

Capitolo 5

Analisi energetica dei sistemi chiusi

Nel *Capitolo 3* sono state considerate varie forme di energia e di scambi di energia ed è stata sviluppata una relazione generale per il principio di conservazione dell'energia o del bilancio energetico. Poi, nel *Capitolo 4*, si è appreso come determinare le proprietà termodinamiche delle sostanze. In questo capitolo, la relazione per il bilancio energetico verrà applicata a sistemi che non implicano alcun flusso di massa attraverso il loro contorno, cioè, a sistemi chiusi. Si inizierà con una trattazione del *lavoro di variazione di volume* (o *lavoro $p dV$*) che si incontra comunemente nelle macchine alternative, quali i motori a combustione interna per autotrazione e i compressori. Poi verrà applicata la relazione per il *bilancio energetico generale*, espressa semplicemente come $E_{\text{entrante}} - E_{\text{uscente}} = \Delta E_{\text{sistema}}$ per i sistemi che implicano una sostanza pura. Quindi verranno definiti i *calori specifici*, verranno ricavate relazioni per l'energia interna e l'entalpia dei *gas perfetti* in funzione dei calori specifici e delle variazioni di temperatura e verranno eseguiti i bilanci energetici per vari sistemi che implicano gas perfetti. Questa trattazione verrà poi ripetuta per sistemi che implicano sostanze solide e liquide, che possono essere trattate come *sostanze incompressibili*.

Gli obiettivi di questo capitolo sono:

- esaminare il lavoro di variazione di volume (o lavoro $p dV$) che si incontra comunemente nelle macchine alternative, quali i motori a combustione interna per autotrazione e i compressori;
- riconoscere il primo principio della termodinamica come enunciato del principio di conservazione dell'energia per sistemi chiusi (a massa costante);
- sviluppare il bilancio energetico generale applicato ai sistemi chiusi;
- definire il calore specifico a volume costante e il calore specifico a pressione costante;
- mettere in relazione i calori specifici con il calcolo delle variazioni dell'energia interna e dell'entalpia dei gas perfetti;
- descrivere le sostanze incompressibili e determinare le variazioni della loro energia interna e della loro entalpia;
- risolvere problemi di bilancio energetico per sistemi chiusi (a massa costante) che implicano scambi di calore e di lavoro per sostanze pure generali, gas perfetti e sostanze incompressibili.



FIGURA 5.1
Il lavoro associato a una variazione di volume viene chiamato *lavoro di variazione di volume*.

5.1 Il lavoro di variazione di volume

Un tipo di lavoro meccanico che si incontra frequentemente nella pratica è quello associato con l'espansione o la compressione di un gas in un sistema cilindro-pistone, prodotta dallo spostamento di parte del contorno (la faccia interna del pistone si muove avanti e indietro). Il lavoro di espansione e compressione, spesso denominato lavoro di variazione di volume (**Figura 5.1**), è il principale tipo di lavoro che caratterizza il funzionamento dei motori alternativi; infatti, durante l'espansione, i gas di combustione forzano il pistone a muoversi e, quindi, l'albero motore a ruotare. Il lavoro di variazione di volume associato a motori o a compressori reali non può essere determinato con esattezza dalla sola analisi termodinamica, poiché, a causa della velocità del pistone, non è possibile individuare gli stati attraverso cui passa il sistema durante la trasformazione e tracciare la linea della trasformazione, non essendo questa quasistatica. D'altra parte, essendo il lavoro una funzione di linea, questo non può essere determinato analiticamente senza la conoscenza della linea della trasformazione; il lavoro di variazione di volume nei motori o compressori reali si determina, quindi, attraverso misurazioni dirette. In questa sezione verrà analizzato il lavoro di variazione di volume per una *trasformazione quasistatica*, vale a dire una trasformazione durante la quale un sistema è continuamente quasi in equilibrio. Una trasformazione quasistatica (detta anche *trasformazione di quasi-equilibrio*) è strettamente approssimata dai motori reali quando il pistone si muove a basse velocità. In queste condizioni, il lavoro compiuto dal motore risulta essere massimo, mentre nel caso di un compressore, il lavoro assorbito minimo. Qui di seguito verrà valutato il lavoro associato a un contorno mobile per una trasformazione quasistatica.

Si consideri il gas contenuto nel sistema cilindro-pistone mostrato nella **Figura 5.2**. La pressione iniziale del gas sia p , il volume totale V e l'area della sezione trasversale del pistone A . Se al pistone è consentito di spostarsi di una quantità ds in modo quasi statico, il lavoro elementare compiuto durante la trasformazione è dato dalla relazione:

$$\delta L_v = F ds = pA ds = p dV \quad (5.1)$$

Cioè, il lavoro di variazione di volume in forma infinitesima è dato dal prodotto della pressione p per la variazione infinitesima di volume dV del sistema. Questa espressione spiega anche perché il lavoro di variazione di volume è detto talvolta *lavoro* $p dV$. Si noti che nell'**Equazione 5.1** p è la pressione assoluta ed è sempre positiva; mentre la variazione di volume dV è positiva durante una trasformazione di espansione (aumento di volume) e negativa durante una trasformazione di compressione (diminuzione di volume). Di conseguenza, il lavoro di variazione di volume è positivo durante una trasformazione di espansione e negativo durante una trasformazione di compressione. Perciò, l'**Equazione 5.1** può essere considerata come un enunciato del lavoro di variazione di volume uscente, $L_{v, uscente}$. Un risultato negativo indica un lavoro di variazione di volume entrante (compressione). Il lavoro totale di variazione di volume compiuto durante l'intera trasformazione in cui il pistone si muove, si ottiene integrando il lavoro elementare tra lo stato iniziale e lo stato finale:

$$L_v = \int_1^2 p dV \quad (J) \quad (5.2)$$

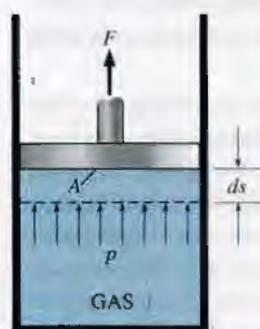


FIGURA 5.2
Il gas compie una quantità infinitesima di lavoro δL_v quando forza il pistone a spostarsi di una quantità infinitesima ds .

Tale integrale si può calcolare solo se si conosce la relazione funzionale tra p e V durante la trasformazione, cioè se si conosce la funzione $p = f(V)$. Si noti che $p = f(V)$ è semplicemente l'equazione della linea di trasformazione nel diagramma p - V . La trasformazione di espansione quasistatica sopra descritta è mostrata nel piano p - V nella **Figura 5.3**. In tale diagramma, l'area infinitesima dS , che è uguale a $p dV$, rappresenta il lavoro elementare. L'area totale S sottesa dalla linea della trasformazione 1-2 si ottiene integrando le aree infinitesime dS :

$$\text{Area} = A = \int_1^2 dA = \int_1^2 p dV \quad (5.3)$$

Dal confronto di tale equazione con l'Equazione 5.2 si ottiene che l'area sottesa dalla linea della trasformazione nel piano p - V rappresenta il lavoro di variazione di volume compiuto durante una trasformazione quasistatica di espansione o compressione di un sistema chiuso (in un diagramma p - v , essa rappresenta il lavoro di variazione di volume riferito all'unità di massa). Un gas può seguire linee di trasformazione differenti quando si espande dallo stato 1 allo stato 2; in generale, ogni linea di trasformazione sottenderà un'area differente e poiché tale area rappresenta il lavoro, il lavoro compiuto sarà differente per ogni trasformazione (**Figura 5.4**). Questo risultato è prevedibile, perché il lavoro è una funzione di linea (cioè, dipende dalla linea seguita, ossia dal cammino seguito, nonché dagli stati finali). Se il lavoro non fosse una funzione di linea, nessuna macchina termodinamica ciclica (motori a combustione interna per autotrazione, centrali termoelettriche) potrebbe operare come macchina per la produzione di lavoro. Infatti, il lavoro compiuto da queste macchine durante una parte del ciclo dovrebbe essere utilizzato durante un'altra parte del ciclo e il lavoro netto uscente dalla macchina sarebbe nullo. Il ciclo rappresentato nella **Figura 5.5** compie un lavoro uscente netto non nullo perché il lavoro compiuto dal sistema durante la trasformazione di espansione (rappresentato dall'area sottesa dalla linea A) è maggiore del lavoro compiuto sul sistema durante la trasformazione di compressione del ciclo (rappresentato dall'area sottesa dalla linea B), e la differenza tra questi due lavori è il lavoro uscente netto fornito durante il ciclo (rappresentato dall'area colorata). Se la relazione fra p e V durante una trasformazione di espansione o di compressione è espressa mediante i dati sperimentali invece che in forma funzionale, ovviamente non si è in grado di eseguire analiticamente l'integrazione. Ma si può sempre costruire il diagramma p - V della trasformazione, usando i punti rappresentativi dei dati, e calcolare graficamente l'area sottesa per determinare il lavoro compiuto.

A rigore, la pressione p nell'Equazione 5.2 è la pressione sulla superficie interna del pistone. Essa diventa uguale alla pressione del gas nel cilindro soltanto se la trasformazione è quasistatica e quindi tutto il gas contenuto nel cilindro è in ogni istante alla stessa pressione. L'Equazione 5.2 può essere usata anche per trasformazioni non quasistatiche purché si usi per p la pressione sulla superficie interna del pistone. (Inoltre, non si può parlare della pressione di un sistema durante una trasformazione non quasistatica perché le proprietà sono definite soltanto per gli stati di equilibrio.) Perciò, si può generalizzare la relazione per il lavoro di variazione di volume esprimendola nella forma:

$$L_v = \int_1^2 p_i dV \quad (5.4)$$

dove p_i è la pressione sulla superficie interna del pistone.

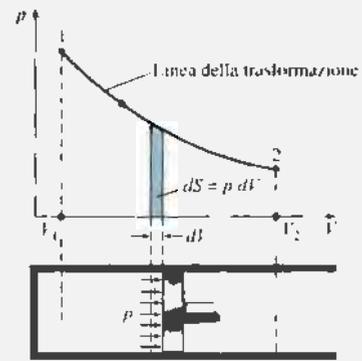


FIGURA 5.3
L'area sottesa dalla linea della trasformazione in un diagramma p - V rappresenta il lavoro di volume.

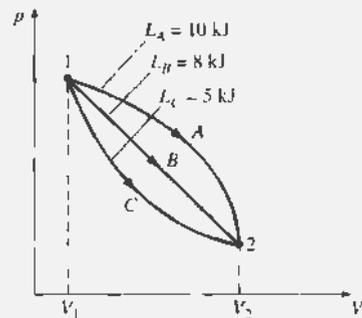


FIGURA 5.4
Il lavoro di variazione di volume fatto durante una trasformazione dipende dal percorso seguito e dagli stati iniziale e finale.

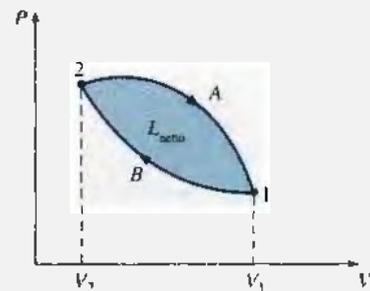


FIGURA 5.5
Il lavoro netto prodotto durante un ciclo è la differenza tra il lavoro compiuto dal sistema e il lavoro compiuto sul sistema.

Si noti che il lavoro rappresenta una modalità di scambio energetico tra un sistema termodinamico e l'ambiente esterno e L_u rappresenta la quantità di energia trasferita dal sistema all'ambiente durante una trasformazione di espansione (o dall'ambiente al sistema durante una trasformazione di compressione). Perciò, essa deve comparire altrove e deve essere tenuta in conto perché l'energia si conserva. Per esempio, in un motore a combustione interna per autotrazione il lavoro di variazione di volume compiuto dai gas caldi in espansione viene utilizzato per vincere l'attrito tra il pistone e il cilindro, espellere l'aria atmosferica e fare ruotare l'albero a gomiti. Perciò:

$$L_v = L_{\text{str}} + L_{\text{atm}} + L_{\text{alb}} = \int_1^2 (F_{\text{str}} + p_{\text{atm}} A + F_{\text{alb}}) dx \quad (5.5)$$

Ovviamente, il lavoro utilizzato per vincere l'attrito si manifesta sotto forma di calore per attrito e l'energia trasmessa attraverso l'albero a gomiti si trasmette ad altri componenti (quali le ruote) per eseguire una certa funzione. Ma è importante notare che l'energia trasferita dal sistema all'ambiente sotto forma di lavoro deve essere uguale alla somma dell'energia ricevuta dall'albero a gomiti, dell'energia ricevuta dall'atmosfera e dell'energia utilizzata per vincere l'attrito. L'impiego della relazione per il lavoro di variazione di volume non è limitato alle trasformazioni quasistatiche dei gas. Essa può essere impiegata anche per le sostanze solide e liquide.

ESEMPIO 5.1

Il lavoro di variazione di volume per una trasformazione a volume costante (trasformazione isocora)

Un serbatoio rigido contiene aria a 150°C e 500 kPa. Per effetto dello scambio termico con l'ambiente, la temperatura e la pressione all'interno del serbatoio si abbassano rispettivamente a 65°C e 400 kPa. Si determini il lavoro di variazione di volume durante tale trasformazione.

Soluzione

L'aria contenuta in un serbatoio rigido viene raffreddata e sia la temperatura sia la pressione si abbassano. Si deve determinare il lavoro di variazione di volume.

Analisi

Uno schema del sistema e il diagramma p - V del processo sono mostrati nella Figura 5.6 ed essendo la trasformazione quasistatica, il lavoro di variazione di volume si può determinare con l'Equazione 5.2:

$$L_v = \int_1^2 p dV = 0$$

Considerazioni

Ciò era prevedibile, perché un serbatoio rigido ha volume costante e quindi nella suddetta equazione $dV = 0$; perciò, durante tale processo non si compie alcun lavoro di variazione di volume. Il lavoro di variazione di volume compiuto durante una trasformazione a volume costante (trasformazione isocora) è sempre nullo, come risulta evidente dalla rappresentazione del processo sul diagramma p - V (l'area sottesa dalla linea di trasformazione è nulla).

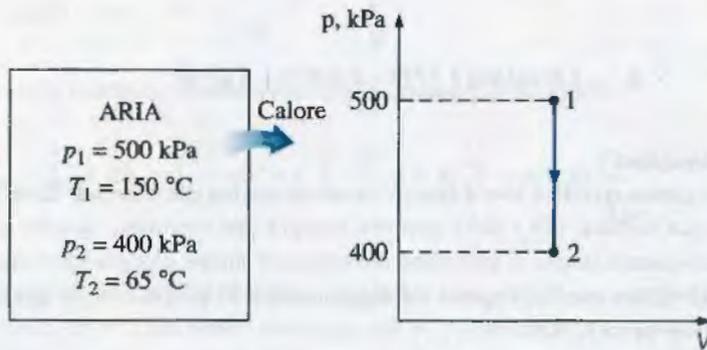


FIGURA 5.6
Schema e diagramma p-V per
l'Esempio 5.1.

ESEMPIO 5.2

Il lavoro di variazione di volume per una trasformazione a pressione costante (trasformazione isobara)

Un sistema cilindro-pistone senza attrito contiene 5.0 kg di vapore d'acqua a 0.10 MPa e 150°C. Si fornisce calore al vapore finché la temperatura non raggiunge 200°C.

Se il pistone è libero di muoversi e la sua massa è costante, si determini il lavoro compiuto dal vapore durante la trasformazione.

Soluzione

Il vapore d'acqua contenuto in un sistema cilindro-pistone viene riscaldato e la sua temperatura aumenta a pressione costante. Si deve determinare il lavoro di variazione di volume.

Analisi

Uno schema del sistema e il diagramma p-V della trasformazione sono mostrati nella *Figura 5.7*.

Ipotesi

La trasformazione di espansione è una trasformazione quasistatica.

Analisi

Sebbene non sia affermato esplicitamente, si può ritenere che la pressione del vapore nel cilindro rimanga costante durante la trasformazione, perché sia la pressione atmosferica sia il peso del pistone sono costanti. Quindi, si tratta di una trasformazione a pressione costante (o trasformazione isobara), e, in base all'*Equazione 5.2*:

$$L_v = \int_1^2 p \, dV = p_0 \int_1^2 dV = p_0(V_2 - V_1) \quad (5.6)$$

ossia:

$$L_v = mp_0(v_2 - v_1)$$

dato che $V = mv$. In base alla tabella per il vapore surriscaldato (*Tabella A.6*), i volumi specifici sono $v_1 = 1.9367 \text{ m}^3/\text{kg}$ nello stato 1 (0.10 MPa, 150°C) e v_2

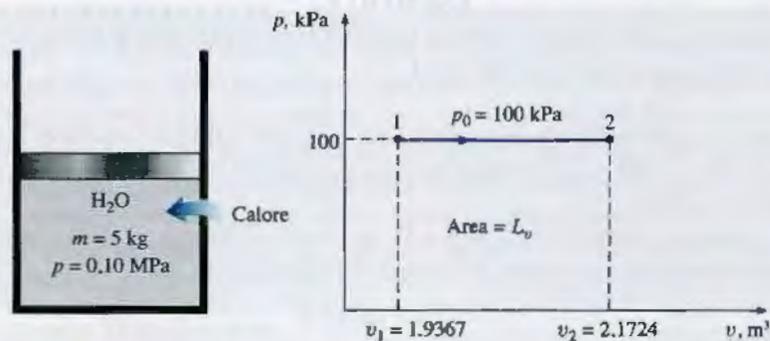
= 2.1724 m³/kg nello stato 2 (0.10 MPa, 200°C). Sostituendo questi valori, si ottiene:

$$L_v = 5.0 \times 0.10(2.1724 - 1.9367) = 118 \text{ kJ}$$

Considerazioni

Il segno positivo indica che il lavoro viene compiuto dal sistema. Cioè, il vapore d'acqua utilizza 118 J della propria energia per compiere questo lavoro. Il valore di questo lavoro si potrebbe determinare anche calcolando l'area sottesa dalla linea di trasformazione sul diagramma p - V , lavoro che, in questo caso, è semplicemente $p_0 \Delta V$.

FIGURA 5.7
Schema e diagramma p - V per
l'Esempio 5.2.



ESEMPIO 5.3

La compressione isoterma di un gas perfetto

Un sistema cilindro-pistone contiene inizialmente 0.4 m³ di aria a 100 kPa e 80°C. L'aria viene successivamente compressa fino a 0.1 m³ in modo tale che la temperatura all'interno del cilindro rimanga costante. Si determini il lavoro compiuto sul sistema durante tale trasformazione.

Soluzione

L'aria contenuta in un sistema cilindro pistone viene compressa isotermicamente. Si deve determinare il lavoro di variazione di volume compiuto.

Analisi

Uno schema del sistema e il diagramma p - V della trasformazione sono mostrati nella Figura 5.8

Ipotesi

1. La trasformazione di compressione è una trasformazione quasistatica.
2. Nelle condizioni specificate l'aria può essere considerata un gas perfetto perché la sua temperatura è alta e la sua pressione è bassa rispetto ai valori del punto critico.

Analisi

Per un gas perfetto a temperatura costante T_0

$$pV = mRT_0 = C \quad \text{ossia} \quad p = \frac{C}{V}$$

dove C è una costante. Sostituendo nell'Equazione 5.2, si ottiene:

$$L_v = \int_1^2 p \, dV = \int_1^2 \frac{C}{V} dV = C \int_1^2 \frac{dV}{V} = C \ln \frac{V_2}{V_1} = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (5.7)$$

Nell'Equazione 5.7, $p_1 V_1$ può essere sostituito con $p_2 V_2$ o con mRT_0 . Inoltre, in questo caso, V_2/V_1 può essere sostituito con p_1/p_2 perché $p_1 V_1 = p_2 V_2$. Sostituendo i valori numerici nell'Equazione 5.7, si ottiene:

$$L_v = 100 \times 0.4 \ln \frac{0.1}{0.4} = -55.45 \text{ kJ}$$

Considerazioni

Il segno negativo indica che il lavoro è compiuto sul sistema, come sempre accade nelle trasformazioni di compressione.

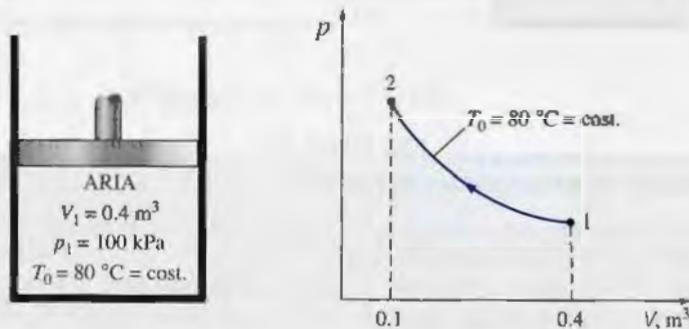


FIGURA 5.8
Schema e diagramma p - V per
l'Esempio 5.3

5.1.1 La trasformazione politropica

Una trasformazione durante la quale la pressione e il volume sono correlati dalla relazione $pV^n = C$, dove n e C sono costanti, è detta trasformazione politropica. Per sviluppare un'espressione generale per il lavoro scambiato durante una trasformazione politropica si faccia riferimento al sistema e al diagramma p - V della trasformazione mostrati nella Figura 5.9. La pressione per una trasformazione politropica si può esprimere come:

$$p = CV^{-n} \quad (5.8)$$

Sostituendo questa relazione nell'Equazione 5.2, si ottiene:

$$L_v = \int_1^2 p \, dV = \int_1^2 CV^{-n} dV = C \frac{V_2^{-n+1} - V_1^{-n+1}}{-n+1} = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1-n} \quad (5.9)$$

perché $C = p_1 V_1^n = p_2 V_2^n$. Nel caso di un gas perfetto ($pV = mRT$), questa equazione può essere scritta nella forma:

$$L_v = \frac{V_2^{-n+1} - V_1^{-n+1}}{1-n}, \quad n \neq 1 \quad (\text{J}) \quad (5.10)$$

Nel caso particolare di $n = 1$, il lavoro di variazione del volume diventa:

$$L_v = \int_1^2 p \, dV = \int_1^2 CV^{-1} \, dV = pV \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (\text{J}) \quad (5.10)$$

Nel caso di un gas perfetto, questo risultato equivale alla trasformazione isoterma esaminata nell'esempio precedente.

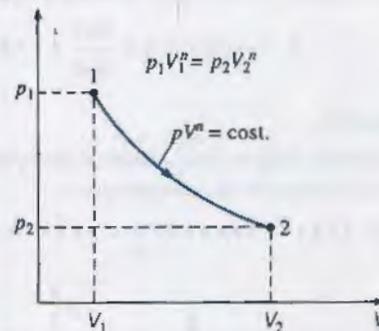
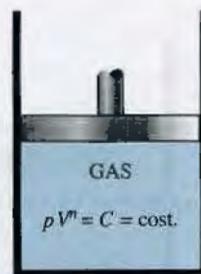


FIGURA 5.9
Schema e diagramma p - V per
una trasformazione politropica.

ESEMPIO 5.4

L'espansione di un gas contro una molla

Un sistema cilindro-pistone contiene 0.05 m^3 di un gas inizialmente a 200 kPa . In tale stato, una molla lineare, con costante elastica pari a 150 kN/m , è collegata al pistone senza esercitare alcuna forza su di esso. Viene quindi fornito calore al gas, causando l'innalzamento del pistone e la compressione della molla finché il volume nel cilindro non raddoppia. Se l'area della sezione trasversale del pistone è 0.25 m^2 , si determinino (a) la pressione finale nel cilindro, (b) il lavoro totale compiuto dal gas e (c) la frazione di tale lavoro compiuto contro la molla per comprimerla.

Soluzione

Un gas in un sistema cilindro-pistone provvisto di una molla lineare si espande per effetto del riscaldamento.

Si devono determinare la pressione finale del gas, il lavoro compiuto totale e la frazione di lavoro compiuto per comprimere la molla.

Ipotesi

1. La trasformazione di espansione è una trasformazione quasistatica.
2. La molla è lineare nell'intervallo di interesse.

Analisi

Uno schema del sistema e il diagramma p - V della trasformazione sono presentati nella *Figura 5.10*.

(a) Il volume racchiuso nel cilindro nello stato finale è:

$$V_2 = 2V_1 = 2 \times 0.05 = 0.1 \text{ m}^3$$

Quindi lo spostamento del pistone (e della molla) diventa:

$$x = \frac{\Delta V}{A} = \frac{(0.1 - 0.05)}{0.25} = 0.2 \text{ m}$$

La forza esercitata dalla molla lineare nello stato finale del sistema è:

$$F = k_e x = 150 \times 0.2 = 30 \text{ kN}$$

In tale stato, la pressione aggiuntiva esercitata sul gas dalla molla è:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{30}{0.25} = 120 \text{ kPa}$$

Senza la molla, la pressione del gas mentre il pistone si solleva rimarrebbe costante a 200 kPa; ma, sotto l'effetto della molla, la pressione aumenta linearmente da 200 kPa sino al valore:

$$200 \text{ kPa} + 120 \text{ kPa} = 320 \text{ kPa}$$

nello stato finale.

(b) Il lavoro compiuto si può determinare facilmente disegnando la trasformazione sul piano p - V e calcolando l'area sottesa dalla linea della trasformazione. Dalla **Figura 5.10**, per l'area sottesa (un trapezio) si ha:

$$L = \text{area} = \frac{(200 + 320)}{2} (0.1 - 0.05) = 13 \text{ kJ}$$

Si noti che il lavoro è compiuto dal sistema.

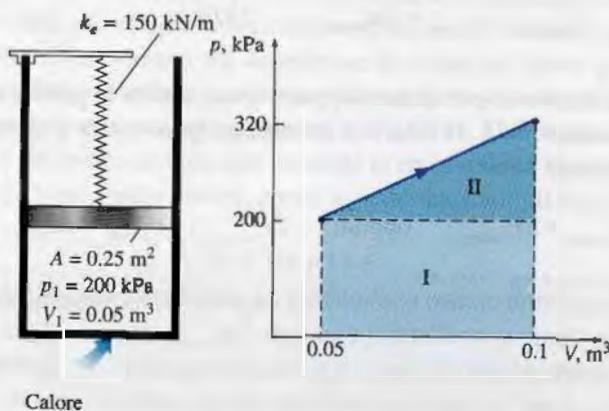


FIGURA 5.10
Schema e diagramma p - V per
l'Esempio 5.4.

(c) Il lavoro rappresentato dall'area rettangolare (regione I) è compiuto contro il pistone e l'atmosfera e il lavoro rappresentato dall'area triangolare (regione II) è compiuto contro la molla. Perciò:

$$L_m = \frac{1}{2}(320 - 200)0.05 = 3 \text{ kJ}$$

Considerazioni

Si potrebbe ottenere questo risultato anche da:

$$L_m = \frac{1}{2}k_e(x_2^2 - x_1^2) = \frac{1}{2} \times 150(0.2^2 - 0^2) = 3 \text{ kJ}$$

5.2 Il bilancio energetico per sistemi chiusi

Il bilancio energetico per qualsiasi sistema che subisce qualunque tipo di trasformazione è stato espresso nella forma (**Capitolo 3**):

$$\frac{E_{\text{entrante}} - E_{\text{uscite}}}{\text{Energia netta scambiata sotto forma di calore, lavoro e massa}} = \frac{\Delta E_{\text{sistema}}}{\text{Variazione delle energie interna, cinetica, potenziale, ecc.}} \quad (\text{kJ}) \quad (5.11)$$

o, con riferimento all'*unità di tempo*, nella forma:

$$\frac{\dot{E}_{\text{entrante}} - \dot{E}_{\text{uscite}}}{\text{Potenza netta scambiata sotto forma di calore, lavoro e massa}} = \frac{\dot{\Delta E}_{\text{sistema}}}{\text{Variazione delle energie interna, cinetica, potenziale, ecc. nell'unità di tempo}} \quad (\text{kW}) \quad (5.12)$$

Per potenze costanti, le quantità totali durante un intervallo di tempo Δt sono correlate con le quantità riferite all'unità di tempo dalle relazioni:

$$Q = \dot{Q}\Delta t, \quad L = \dot{L}\Delta t \quad \text{e} \quad \Delta E = (dE/dt)\Delta t \quad (\text{kJ}) \quad (5.13)$$

Il bilancio energetico può essere espresso anche con riferimento all'*unità di massa* come:

$$e_{\text{entrante}} - e_{\text{uscite}} = \Delta e_{\text{sistema}} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (5.14)$$

che si ottiene dividendo per la massa m del sistema tutte le grandezze che figurano nell'**Equazione 5.11**. Il bilancio energetico può essere espresso anche in forma differenziale come:

$$\delta E_{\text{entrante}} - \delta E_{\text{uscite}} = dE_{\text{sistema}} \quad \text{oppure} \quad \delta e_{\text{entrante}} - \delta e_{\text{uscite}} = de_{\text{sistema}} \quad (5.15)$$

Nel caso di un sistema chiuso che subisce un **ciclo termodinamico**, lo stato iniziale e lo stato finale sono identici e quindi $\Delta E_{\text{sistema}} = E_2 - E_1 = 0$. Perciò, il bilancio energetico per un ciclo si semplifica diventando $E_{\text{entrante}} = E_{\text{uscite}}$ ossia $E_{\text{entrante}} - E_{\text{uscite}} = 0$. Tenendo presente che un sistema chiuso non implica

alcun flusso di massa attraverso il suo contorno, si può esprimere il bilancio energetico in termini di scambi di calore e lavoro:

$$L_{\text{netto, uscente}} = Q_{\text{netto, entrante}} \quad \text{oppure} \quad \dot{L}_{\text{netto, uscente}} = \dot{Q}_{\text{netto, entrante}} \quad (5.16)$$

Cioè, durante un ciclo, il lavoro netto uscente è uguale al calore netto entrante (Figura 5.11).

Le relazioni per il bilancio energetico (ossia per il primo principio della termodinamica) già indicate sono di natura intuitiva e possono essere usate facilmente quando si conoscono i valori e i versi degli scambi di calore e lavoro. Però, quando si esegue uno studio analitico generale o si risolve un problema che implica uno scambio sconosciuto di calore o lavoro, si deve supporre un verso per gli scambi di calore o lavoro. In questi casi, si usa di solito la convenzione dei segni della termodinamica classica e si suppone che il calore si trasferisca *dall'ambiente al sistema* (calore entrante) nella quantità Q e il lavoro sia compiuto *dal sistema sull'ambiente* (lavoro uscente) nella quantità L , e poi si risolve il problema. Nel caso di un sistema chiuso, la relazione per il bilancio energetico diventa:

$$Q_{\text{netto, entrante}} - L_{\text{netto, uscente}} = \Delta E_{\text{sistema}} \quad \text{oppure} \quad Q - L = \Delta E \quad (5.17)$$

dove $Q = Q_{\text{netto, entrante}} = Q_{\text{entrante}} - Q_{\text{uscente}}$ è il *calore netto entrante* e $L = L_{\text{netto, uscente}} = L_{\text{uscente}} - L_{\text{entrante}}$ è il *lavoro netto uscente*. Quando si ottiene un valore negativo per Q o per L significa semplicemente che il verso supposto per quella quantità è sbagliato e deve essere invertito. Varie forme di questa relazione "tradizionale" per il primo principio della termodinamica per sistemi chiusi sono presentate nella Figura 5.12.

Il primo principio della termodinamica non può essere dimostrato matematicamente, ma non si conosce alcuna trasformazione in natura che lo violi, e questo dovrebbe essere considerata un'evidenza sufficiente della sua validità. È importante notare che, se fosse possibile dimostrare il primo principio della termodinamica sulla base di altri principi fisici, il primo principio dovrebbe essere una conseguenza di quei principi, invece di essere una legge fisica fondamentale di per sé. Come grandezze energetiche, il calore e il lavoro non sono affatto diversi e quindi ci si può chiedere perché si continui a distinguerli. Dopo tutto, la variazione del contenuto energetico di un sistema è uguale alla quantità di energia che attraversa il contorno del sistema e non fa differenza se l'energia attraversa il contorno sotto forma di calore oppure sotto forma di lavoro. Le relazioni per il primo principio sembrerebbero molto più semplici se si avesse un'unica grandezza da poter chiamare *scambio energetico* per rappresentare sia il calore sia il lavoro. Ebbene, dal punto di vista del primo principio, il calore e il lavoro non sono affatto diversi. Però dal punto di vista del secondo principio della termodinamica, il calore e il lavoro sono molto diversi, come si vedrà nei capitoli seguenti.

ESEMPIO 5.5

Il riscaldamento elettrico di un gas a pressione costante

Un sistema cilindro-pistone contiene 25 g di vapore d'acqua saturo che viene mantenuto a una pressione costante di 300 kPa. Un riscaldatore a resistenza



FIGURA 5.11 Per un ciclo, $\Delta E = 0$, perciò, $Q = L$.

Generale $Q - L = \Delta E$

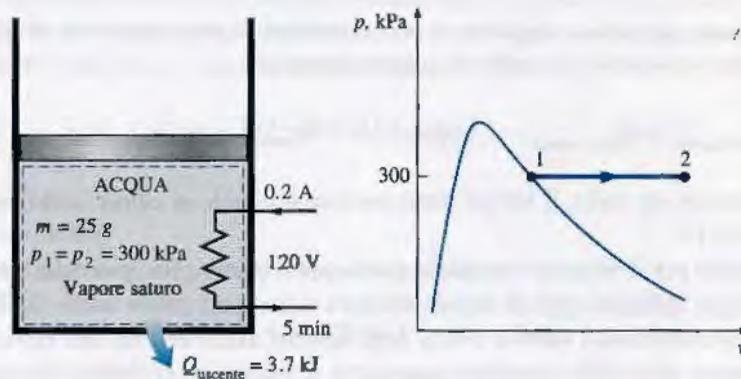
Sistemi stazionari $Q - L = \Delta U$

Riferito all'unità di massa $q - l = \Delta e$

Forma differenziale $\delta q - \delta l = de$

FIGURA 5.12 Vari enunciati del primo principio della termodinamica per sistemi chiusi.

FIGURA 5.13
Schema e diagramma p - V per
l'Esempio 5.5



elettrica posto nel cilindro viene acceso e viene percorso per 5 min da una corrente elettrica di 0.2 A prodotto da un generatore di 120 V. Simultaneamente avviene una cessione di calore di 3.7 kJ. (a) Si dimostri che, per un sistema chiuso, il lavoro di variazione di volume L_v e la variazione di energia interna ΔU nella relazione per il primo principio possono essere combinati in un unico termine, ΔH , nel caso di una trasformazione a pressione costante. (b) Si determini la temperatura finale del vapore d'acqua.

Soluzione

Vapore d'acqua saturo in un sistema cilindro-pistone si espande a pressione costante per effetto del riscaldamento. Si deve dimostrare che $\Delta U + L_v = \Delta H$ e si deve determinare la temperatura finale.

Ipotesi

1. Il cilindro è stazionario e quindi la variazione di energia cinetica e la variazione di energia potenziale sono nulle: $\Delta E_{cin} = \Delta E_{pot} = 0$. Perciò, $\Delta E = \Delta U$ e l'energia interna è l'unica forma di energia del sistema, la quale può variare durante questa trasformazione.
2. I conduttori elettrici costituiscono una piccolissima parte del sistema e quindi la variazione di energia dei conduttori può essere trascurata.

Analisi

Si assume come *sistema* il contenuto del cilindro, compresi i conduttori del riscaldatore (Figura 5.13). Questo sistema è un *sistema chiuso* perché durante la trasformazione il suo contorno non viene attraversato da alcun flusso di massa. Si osserva che un sistema cilindro-pistone implica tipicamente un contorno mobile e quindi un lavoro di variazione di volume L_v . La pressione rimane costante durante la trasformazione e quindi $p_2 = p_1$. Inoltre, il sistema cede calore e viene compiuto lavoro elettrico L_{el} sul sistema.

- (a) Questa parte della risoluzione implica un'analisi generale per un sistema chiuso che subisce una trasformazione isobara quasistatica e quindi si considera un sistema chiuso generale. Si considera che il verso dello scambio di calore Q sia rivolto dall'ambiente al sistema e che il lavoro L sia compiuto dal sistema sull'ambiente. Inoltre, si esprime il lavoro come la somma del lavoro di variazione di volume e delle altre forme di lavoro, quali il lavoro elet-

trico e il lavoro meccanico (lavoro all'albero). Quindi, il bilancio energetico può essere espresso come:

$$\frac{E_{\text{entrante}} - E_{\text{uscite}}}{\text{Energia netta scambiata sotto forma di calore, lavoro e massa}} = \frac{\Delta E_{\text{sistema}}}{\text{Variazione delle energie interna, cinetica, potenziale, ecc.}}$$

$$Q - L = \Delta U + \Delta E_{\text{cin}}^{+0} + \Delta E_{\text{pot}}^{+0}$$

$$Q - L_{\text{altro}} - L_v = U_2 - U_1$$

Per una trasformazione isobara, il lavoro di variazione di volume è dato da $L_v = p_0(V_2 - V_1)$.

Sostituendo questa relazione in quella precedente, si ottiene:

$$Q - L_{\text{altro}} - p_0(V_2 - V_1) = U_2 - U_1$$

Però:

$$p_0 = p_1 = p_2 \rightarrow Q - L_{\text{altro}} = (U_2 + p_2 V_2) - (U_1 + p_1 V_1)$$

Inoltre, $H = U + pV$, e quindi:

$$Q - L_{\text{altro}} = H_2 - H_1 \quad (\text{kJ}) \quad (5.6)$$

che è la relazione desiderata (Figura 5.14).

Questa equazione è di impiego molto comodo nell'analisi di sistemi chiusi soggetti a trasformazioni isobare quasistatiche perché il lavoro di variazione di volume è tenuto in conto automaticamente dai termini di entalpia e quindi non è più necessario determinarlo separatamente.

(b) In questo caso l'unica altra forma di lavoro è il lavoro elettrico, che può essere ottenuto dalla relazione:

$$L_{\text{el}} = V_{\text{el}} I \Delta t = 120 \times 0.2 \times 300 = 7.2 \text{ kJ}$$

dove V_{el} è la tensione elettrica e I è l'intensità della corrente elettrica.

$$\text{Stato I: } \left. \begin{array}{l} p_1 = 300 \text{ kPa} \\ \text{vapore saturo} \end{array} \right\} h_1 = h_{v, 300 \text{ kPa}} = 2724.9 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Tabella A.5})$$

L'entalpia dello stato finale si può ottenere direttamente dall'Equazione 5.18, esprimendo il calore uscente dal sistema e il lavoro compiuto sul sistema come quantità negative (perché i loro versi sono opposti ai versi supporti).

Oppure, si può usare la relazione per il bilancio energetico generale con la semplificazione che il lavoro di variazione di volume venga considerato automaticamente sostituendo ΔU con ΔH per una trasformazione di espansione o di compressione isobara:

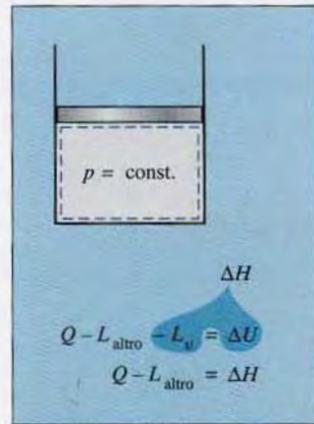


FIGURA 5.14

Per un sistema chiuso che subisce una trasformazione quasistatica con $p = \text{costante}$, vale la relazione: $\Delta U + L_v = \Delta H$.

$$\frac{E_{\text{entrante}} - E_{\text{uscente}}}{\text{Energia netta scambiata sotto forma di calore, lavoro e massa}} = \frac{\Delta E_{\text{sistema}}}{\text{Variazione delle energie interna, cinetica, potenziale, ecc.}}$$

$$7.2 \text{ kJ} - 3.7 \text{ kJ} = 0.025(h_2 - 2724.9) \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = 2864.9 \text{ kJ/kg}$$

Ora lo stato finale è completamente specificato perché si conoscono sia la pressione sia l'entalpia. In questo stato la temperatura è:

$$\text{Stato 2: } \left. \begin{array}{l} p_2 = 300 \text{ kPa} \\ h_2 = 2864.9 \text{ kJ/kg} \end{array} \right\} T_2 = 200^\circ\text{C} \quad (\text{Tabella A.6})$$

Perciò, il vapore d'acqua sarà alla temperatura di 200°C alla fine di questa trasformazione.

Considerazioni

A rigore, la variazione di energia potenziale del vapore d'acqua non è nulla per questa trasformazione perché il centro di gravità del vapore d'acqua si è innalzato alquanto. Se si ipotizzasse una variazione di quota di 1 m (che è piuttosto improbabile), la variazione dell'energia potenziale del vapore d'acqua sarebbe pari a 0.0002 kJ, che è molto piccola rispetto agli altri termini che compaiono nella relazione per il primo principio. Perciò, nei problemi di questo tipo, il termine di energia potenziale per i gas è sempre trascurabile.

ESEMPIO 5.6

L'espansione non vincolata dell'acqua

Un serbatoio rigido è diviso in due parti uguali da un setto. Inizialmente, la parte inferiore del serbatoio contiene 5 kg di acqua a 200 kPa e 25°C , e nella parte superiore è stato fatto il vuoto. Poi il setto viene rimosso e l'acqua si espande nell'intero serbatoio. Si permette all'acqua di scambiare calore con il suo ambiente finché la temperatura nel serbatoio non è ritornata al valore iniziale di 25°C . Si determinino (a) il volume del serbatoio, (b) la pressione finale e (c) lo scambio di calore per questa trasformazione.

Soluzione

Una delle due metà di un serbatoio rigido è piena di acqua liquida, mentre nell'altra metà è stato fatto il vuoto.

Il setto che separa le due parti viene rimosso e l'acqua si espande e riempie tutto il serbatoio, mentre la temperatura viene mantenuta costante. Si devono determinare il volume del serbatoio, la pressione finale e la quantità di calore scambiata.

Ipotesi

1. Il sistema è stazionario e quindi la variazione di energia cinetica e la variazione di energia potenziale sono nulle, $\Delta E_{\text{cin}} = \Delta E_{\text{pot}} = 0$ e $\Delta E = \Delta U$.

2. Il verso dello scambio di calore è rivolto dall'ambiente al sistema (acquisto di calore, Q_{entrante}). Un risultato negativo per Q_{entrante} indica che il verso supposto è sbagliato e quindi si tratta di una cessione di calore.
3. Il volume del serbatoio rigido è costante e quindi non avviene scambio di energia sotto forma di lavoro di variazione di volume.
4. Non intervengono lavoro elettrico, lavoro meccanico (lavoro all'albero) o altre forme di lavoro.

Analisi

Si assume come *sistema* il contenuto del serbatoio, compreso lo spazio evacuato (Figura 5.15). Il sistema scelto è un *sistema chiuso* perché non avviene alcun flusso di massa attraverso il suo contorno durante la trasformazione. Si osserva che l'acqua riempie tutto il serbatoio quando il setto viene rimosso (forse sotto forma di miscela liquido-vapore).

- (a) Inizialmente l'acqua nel serbatoio è presente sotto forma di liquido sottoraffreddato dato che la sua pressione (200 kPa) è maggiore della pressione di saturazione a 25°C (3.1698 kPa). Approssimando il liquido sottoraffreddato come un liquido saturo alla temperatura data, si trova:

$$v_1 = v_{f, 25^\circ\text{C}} = 0.001003 \text{ m}^3/\text{kg} \approx 0.001 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (\text{Tabella A.4})$$

Quindi il volume iniziale dell'acqua è:

$$V_1 = m v_1 = 5 \times 0.001 = 0.005 \text{ m}^3$$

Il volume totale del serbatoio è il doppio di questa quantità:

$$V_{\text{serbatoio}} = 2 \times 0.005 = 0.01 \text{ m}^3$$

- (b) Nello stato finale, il volume specifico (volume massico) dell'acqua è:

$$v_2 = \frac{V_2}{m} = \frac{0.01}{5} = 0.002 \text{ m}^3/\text{kg}$$

che è il doppio del valore iniziale del volume specifico. Questo risultato è atteso perché il volume raddoppia mentre la massa rimane costante.

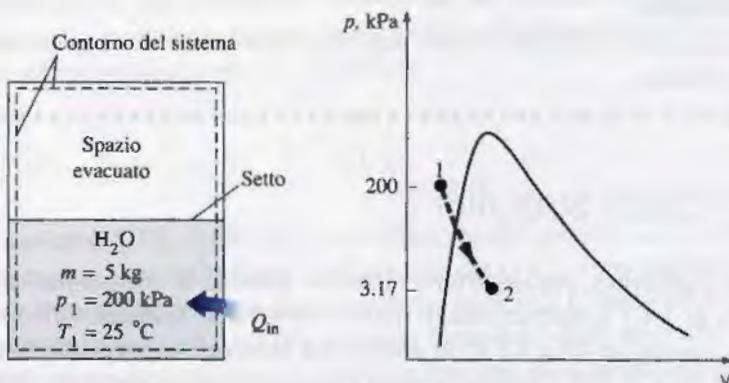


FIGURA 5.15
Schema e diagramma p - V per
l'Esempio 5.6.

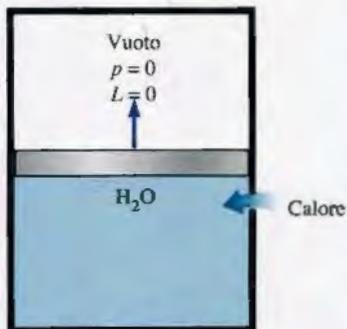


FIGURA 5.16
L'espansione contro il vuoto non richiede lavoro e quindi non implica scambio di energia.

$$\text{a } 25^{\circ}\text{C: } v_l = 0.001003 \text{ m}^3/\text{kg} \quad v_v = 43.340 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (\text{Tabella A.4})$$

Dato che $v_1 < v_2 < v_v$, nello stato finale l'acqua è una miscela satura liquido-vapore e quindi la pressione è la pressione di saturazione a 25°C :

$$p_2 = p_{\text{sat a } 25^{\circ}\text{C}} = 3.1698 \text{ kPa} \quad (\text{Tabella A.4})$$

(c) in base alle ipotesi enunciate e alle osservazioni, il bilancio energetico del sistema può essere espresso come:

$$\frac{E_{\text{entrante}} - E_{\text{uscite}}}{\text{Energia netta scambiata sotto forma di calore, lavoro e massa}} = \frac{\Delta E_{\text{sistema}}}{\text{Variazione delle energie interna, cinetica, potenziale, ecc.}}$$

$$Q_{\text{entrante}} = \Delta U = m(u_2 - u_1)$$

È importante notare che, anche se l'acqua si espande durante questa trasformazione, il sistema scelto implica soltanto contorni fissi (le linee tratteggiate) e quindi il lavoro di variazione di volume è nullo (Figura 5.16). Quindi $L = 0$, perché il sistema non implica altre forme di lavoro. (Si arriverebbe alla stessa conclusione se si scegliesse l'acqua come sistema?) Inizialmente:

$$u_1 = u_l \text{ a } 25^{\circ}\text{C} = 104.83 \text{ kJ/kg}$$

Il titolo nello stato finale si ottiene dalle informazioni sul volume specifico:

$$x_2 = \frac{v_2 - v_l}{v_v - v_l} = \frac{0.002 - 0.001}{43.34 - 0.001} = 2.3 \times 10^{-5}$$

Quindi:

$$\begin{aligned} u_2 &= u_l + x_2 u_{lv} \\ &= 104.83 + (2.3 \times 10^{-5}) \times 2304.3 \\ &= 104.88 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Sostituendo, si ottiene:

$$Q_{\text{entrante}} = 5(104.88 - 104.83) = 0.25 \text{ kJ}$$

Considerazioni

Il segno positivo indica che il verso supposto è corretto e che il calore si trasferisce all'acqua.

5.3 I calori specifici

Si sa, per esperienza, che occorrono differenti quantità di energia per innalzare di 1°C (o di 1 K) la temperatura di masse identiche di sostanze differenti: per esempio, occorrono circa 4.5 kJ di energia per innalzare la temperatura di 1 kg di ferro da 20°C a 30°C , laddove occorre circa nove volte tale energia (per esse-

re esatti 41.8 kJ) per ottenere lo stesso innalzamento di temperatura di 1 kg di acqua (Figura 5.17). Perciò, sarebbe auspicabile avere una proprietà che permetta di confrontare la capacità di accumulo di energia di varie sostanze: tale proprietà è il calore specifico.

Il calore specifico è definito come l'energia richiesta per innalzare di 1°C (o di 1 K) la temperatura della massa unitaria di una sostanza (Figura 5.18). In generale, tale energia dipende da come il processo viene eseguito. In termodinamica interessano principalmente due tipi di calori specifici: il calore specifico a volume costante c_v , e il calore specifico a pressione costante c_p .

Fisicamente, il calore specifico a volume costante c_v , può essere considerato come l'energia richiesta per innalzare di 1°C (o di 1 K) la temperatura della massa unitaria di una sostanza mantenendone costante il volume. L'energia richiesta per ottenere lo stesso innalzamento di temperatura a pressione costante è il calore specifico a pressione costante c_p . Come illustrato nella Figura 5.19, il calore specifico a pressione costante c_p è sempre maggiore di c_v , perché a pressione costante al sistema è consentito di espandersi con la conseguenza che per compiere tale lavoro di espansione deve essere fornita al sistema altra energia. I calori specifici possono essere espressi in funzione di altre proprietà termodinamiche. A questo scopo si consideri, innanzitutto, una massa fissa in un sistema chiuso stazionario sottoposto a una trasformazione a volume costante (non viene compiuto alcun lavoro di espansione o di compressione). Il principio di conservazione dell'energia $e_{entrante} - e_{uscente} = \Delta e_{sistema}$ per questa trasformazione può essere espresso nella forma differenziale:

$$\delta e_{entrante} - \delta e_{uscente} = du$$

Il primo membro di questa equazione rappresenta la quantità netta di energia trasferita al sistema. In base alla definizione di c_v , questa energia deve essere uguale a $c_v dT$, dove dT è la variazione infinitesima di temperatura. Perciò:

$$c_v dT = du \quad \text{a volume costante}$$

ossia:

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (5.19)$$

Similmente, si può ottenere un'espressione per il calore specifico a pressione costante, c_p , considerando una trasformazione di espansione o di compressione a pressione costante (isocora). Si ottiene:

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (5.20)$$

Le Equazioni 5.19 e 5.20 sono le equazioni che definiscono c_v e c_p e la loro interpretazione è data nella Figura 5.20. Si noti che c_v e c_p sono espressi in funzione di altre proprietà; pertanto sono essi stessi proprietà. Come ogni altra proprietà, i calori specifici c_v e c_p di una sostanza dipendono dallo stato che, in generale, è individuato da due proprietà intensive indipendenti. Quindi, l'energia richiesta

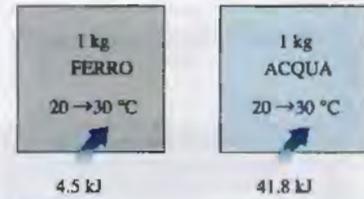


FIGURA 5.17
Differenti quantità di calore necessarie per innalzare della stessa quantità la temperatura di differenti sostanze.

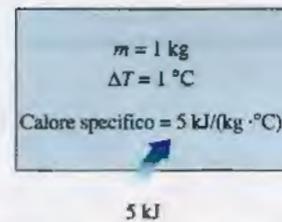


FIGURA 5.18
Il calore specifico è l'energia richiesta per innalzare di un grado la temperatura della massa unitaria di una sostanza secondo un processo ben definito.

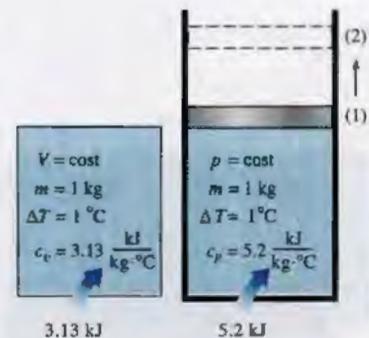


FIGURA 5.19
Calori specifici c_v e c_p a volume costante e a pressione costante (i valori riportati si riferiscono al gas elio).



FIGURA 5.20 Definizioni di c_v e c_p .

per innalzare di 1°C (o di 1 K) la temperatura della sostanza in una data trasformazione sarà differente a temperature e pressioni differenti (Figura 5.21); ma, di solito, tale differenza non è molto grande.

Considerando le Equazioni 5.19 e 5.20 si può osservare che: sono relazioni tra proprietà e come tali sono indipendenti dal tipo di processo; sono valide per qualsiasi sostanza soggetta a qualsiasi trasformazione. Per una trasformazione a volume costante, c_v risulta essere pari all'energia trasferita al sistema di massa unitaria per innalzarne di 1°C (o di 1 K) la temperatura: in questo modo se ne determinano i valori e da ciò trae anche origine il nome di calore specifico a volume costante. Similmente, durante una trasformazione a pressione costante, c_p risulta essere pari all'energia trasferita al sistema di massa unitaria per innalzarne di 1°C (o di 1 K) la temperatura: in questo modo se ne determinano i valori e da ciò trae anche origine il nome di calore specifico a pressione costante. Considerando le Equazioni 5.19 e 5.20 si può ancora osservare che c_v è correlato alle variazioni dell'energia interna e c_p alle variazioni dell'entalpia. Di fatto, sarebbe molto più appropriato definire c_v come la variazione dell'energia interna specifica di una sostanza corrispondente a una variazione unitaria di temperatura a volume costante. Allo stesso modo c_p si può definire come la variazione dell'entalpia specifica di una sostanza corrispondente a una variazione unitaria di temperatura a pressione costante. In altre parole, c_v è una misura della variazione dell'energia interna di una sostanza con la temperatura e c_p è una misura della variazione di entalpia di una sostanza con la temperatura.

Sia l'energia interna sia l'entalpia di una sostanza possono essere variate mediante il trasferimento di energia in qualsiasi forma, delle quali il calore è soltanto una. Perciò, il termine *energia specifica* è probabilmente più appropriato del termine *calore specifico*, che implica che l'energia venga trasferita (e immagazzinata) sotto forma di calore.

Un'unità di misura di uso comune per i calori specifici è il kilojoule al kilogrammo e al grado Celsius [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$] o il kilojoule al kilogrammo e al kelvin [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]. Si noti che queste due unità di misura sono identiche perché $\Delta T(^{\circ}\text{C}) = \Delta T(\text{K})$, e una variazione di 1°C della temperatura equivale a una variazione di 1 K . I calori specifici vengono talvolta riferiti a 1 mol di sostanza (*calori specifici molari*). L'unità SI di calore specifico molare è il joule alla mole e al kelvin (o al grado Celsius) [$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ o $\text{J}/(\text{mol} \cdot ^\circ\text{C})$], equivalente al kilojoule alla kilomole e al kelvin (o al grado Celsius) [$\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ o $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot ^\circ\text{C})$]. Il calore specifico molare a volume costante e quello a pressione costante sono denotati con i simboli \bar{c}_v e \bar{c}_p , rispettivamente.

5.4 L'energia interna, l'entalpia e i calori specifici dei gas perfetti

Un gas perfetto è stato definito come un gas la cui temperatura, pressione e volume specifico soddisfano la relazione:

$$pv = RT$$

È stato dimostrato matematicamente e sperimentalmente (Joule, 1843) che, per un gas perfetto, l'energia interna è funzione della sola temperatura; quindi si ha:

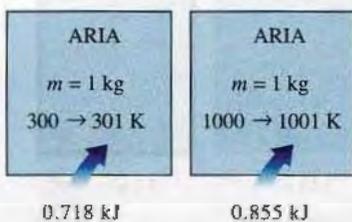


FIGURA 5.21 Il calore specifico di una sostanza cambia con la temperatura.

$$u = u(T) \tag{5.21}$$

Nel suo esperimento, diventato classico, Joule immerse in un bagno d'acqua due recipienti collegati da un tubo dotato di valvola, come mostrato nella **Figura 5.22**. All'inizio, in uno dei due serbatoi vi era aria ad alta pressione e nell'altro era stato fatto il vuoto. Una volta ottenuto l'equilibrio termico, egli aprì la valvola per consentire all'aria di passare da un serbatoio all'altro finché la pressione non si eguagliò. Joule non osservò alcuna variazione della temperatura del bagno d'acqua e ipotizzò che nessuna quantità di calore fosse stata scambiata con l'aria. Poiché non era stato nemmeno compiuto lavoro, egli concluse che l'energia interna dell'aria non era variata, anche se il volume e la pressione erano variati, deducendo che l'energia interna funzione della sola temperatura e non della pressione o del volume specifico (in seguito, Joule dimostrò che per i gas che si discostano notevolmente dal comportamento dei gas perfetti, l'energia interna non è funzione della sola temperatura).

Combinando insieme la relazione che definisce l'entalpia e l'equazione di stato del gas perfetto si ha:

$$\left. \begin{aligned} h &= u + pv \\ pv &= RT \end{aligned} \right\} h = u + RT$$

Poiché R è costante e $u = u(T)$, ne consegue che anche l'entalpia di un gas perfetto è funzione della sola temperatura:

$$h = h(T) \tag{5.22}$$

Poiché per un gas perfetto u e h dipendono solo dalla temperatura, anche i calori specifici c_v e c_p dipendono dalla sola temperatura. Quindi, a una data temperatura, u , h , c_v e c_p di un gas perfetto avranno valori indipendenti dal volume specifico o dalla pressione (**Figura 5.23**). Quindi per i gas perfetti le derivate parziali nelle **Equazioni 5.19** e **5.20** possono essere sostituite dalle derivate ordinarie e le variazioni infinitesime dell'energia interna e dell'entalpia di un gas perfetto saranno:

$$du = c_v dT \tag{5.23}$$

e

$$dh = c_p dT \tag{5.24}$$

La variazione di energia interna o di entalpia per un gas perfetto durante una trasformazione dallo stato 1 allo stato 2 si determina integrando le equazioni precedenti:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c_v(T) dT \quad (\text{kJ/kg}) \tag{5.25}$$

e

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_1^2 c_p(T) dT \quad (\text{kJ/kg}) \tag{5.26}$$

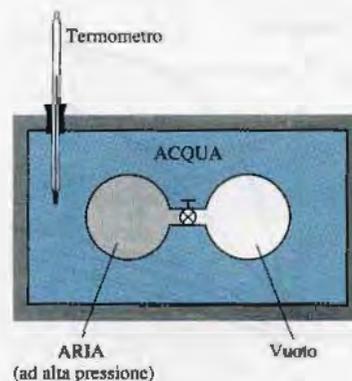


FIGURA 5.22
Schema dell'apparato sperimentale usato da Joule.

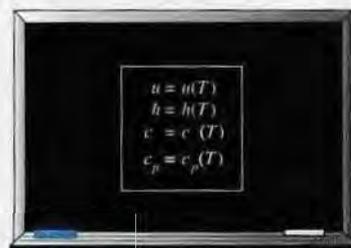


FIGURA 5.23
Per gas perfetti, u , h , c_v e c_p sono funzione della sola temperatura.

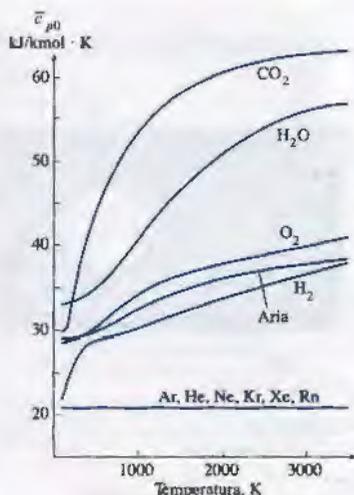


FIGURA 5.24 Calori specifici a pressione costante per alcuni gas (si veda la Tabella A.2c per le equazioni \bar{c}_{p0})

Per eseguire tali integrazioni, occorre avere le relazioni che esprimono c_v e c_p in funzione della temperatura.

A basse pressioni, tutti i gas reali si avvicinano al comportamento di un gas perfetto e perciò i loro calori specifici dipendono soltanto dalla temperatura. I calori specifici dei gas reali a basse pressioni sono detti calori specifici a pressione zero, e spesso sono denotati c_{p0} e c_{v0} . Sono disponibili espressioni analitiche accurate per i calori specifici dei gas perfetti, ricavate da misurazioni dirette o da calcoli basati sul comportamento statistico delle molecole, e sono fornite per diversi gas, sotto forma di polinomio di terzo grado, nell'Appendice (Tabella A.2c). Una rappresentazione di $\bar{c}_{p0}(T)$ per alcuni gas comuni è fornita nella Figura 5.24.

Si noti che l'uso dei calori specifici dei gas perfetti è limitato alle basse pressioni, anche se tali dati si possono utilizzare con ragionevole accuratezza a pressioni relativamente alte, finché il comportamento del gas non si discosta in modo rilevante da quello di un gas perfetto.

Le integrazioni che figurano nelle Equazioni 5.25 e 5.26 sono semplici, ma piuttosto lunghe e quindi poco pratiche. Per evitare questi calcoli laboriosi, i dati di u e h per numerosi gas sono stati tabulati su piccoli intervalli di temperatura. Per compilare queste tabelle si sceglie un punto di riferimento arbitrario e si eseguono le integrazioni indicate nelle Equazioni 5.25 e 5.26 assumendo lo stato 1 come stato di riferimento. Nelle tabelle per i gas perfetti riportate nell'Appendice viene scelto 0 K come stato di riferimento e in questo stato vengono assegnati valori 0 sia all'entalpia sia all'energia interna (Figura 5.25). La scelta dello stato di riferimento non ha alcun effetto sui calcoli di Δu o di Δh . I dati di u e h sono espressi in kilojoule al kilogrammo (kJ/kg) per l'aria (Tabella A.21) e generalmente in kilojoule alla kilomole (kJ/kmol) per gli altri gas. L'unità kilojoule alla kilomole (kJ/kmol) è molto comoda per l'analisi termodinamica delle reazioni chimiche.

Considerando la Figura 5.24 si può osservare che: i calori specifici dei gas con molecole complesse (biatomiche o poliatomiche) sono più elevati e aumentano con la temperatura; la variazione dei calori specifici con la temperatura ha un andamento curvilineo poco accentuato tanto che per intervalli di temperatura sino a poche centinaia di gradi Celsius o meno si può approssimare come lineare. Sulla base di queste considerazioni nelle Equazioni 5.25 e 5.26 i calori specifici possono essere sostituiti con i valori medi costanti, per cui, eseguendo le integrazioni, si ha:

$$u_2 - u_1 = c_{v, med}(T_2 - T_1) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (5.27)$$

e

$$h_2 - h_1 = c_{p, med}(T_2 - T_1) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (5.28)$$

I valori del calore specifico per alcuni gas comuni sono elencati in funzione della temperatura nella Tabella A.2b. In tale tabella, i calori specifici medi $c_{p, med}$ e $c_{v, med}$ sono valutati alla temperatura media $(T_1 + T_2)/2$, come mostrato nella Figura 5.26. Se la temperatura finale T_2 non è nota, i calori specifici possono essere valutati a T_1 o alla temperatura media prevista. Poi, T_2 può essere determinata usando i valori del calore specifico così calcolati. Se necessario, il valore di T_2 può essere affinato valutando i calori specifici alla nuova temperatura media.

C ARIA		
T, K	u, kJ/kg	h, kJ/kg
0	0	0
300	214.07	300.19
310	221.25	310.24

FIGURA 5.25 Nella compilazione delle tabelle per i gas perfetti si sceglie 0 K come temperatura di riferimento.

Un altro modo di determinare i calori specifici medi è valutarli a T_1 e T_2 e quindi prendere la loro media. Di solito, entrambi i metodi forniscono risultati ragionevolmente buoni e l'uno non è necessariamente migliore dell'altro.

Osservando la **Figura 5.24** si noti che i calori specifici a pressione zero dei gas monoatomici quali l'argon, il neon e l'elio rimangono costanti in funzione della temperatura, per cui Δu e Δh dei gas monoatomici possono essere valutati facilmente con le **Equazioni 5.27 e 5.28**.

Si noti, inoltre, che le relazioni Δu e Δh fornite sopra non sono limitate a un certo tipo di processo, ma sono valide per tutti i processi. La presenza del calore specifico a volume costante c_v in un'equazione non deve indurre a credere che quella equazione sia valida solo per una trasformazione a volume costante, al contrario, la relazione $\Delta u = c_{v,med}\Delta T$ è valida per ogni gas perfetto sottoposto a ogni trasformazione (**Figura 5.27**). Un ragionamento simile si può fare anche per c_p e Δh .

Riassumendo, sono disponibili tre metodi per determinare le variazioni di energia interna e di entalpia dei gas perfetti (**Figura 5.28**):

1. usare dati tabulati di u e h . È il metodo più facile e più accurato quando queste tabelle sono facilmente reperibili.
2. usare le relazioni per c_v e c_p in funzione della temperatura ed eseguire le integrazioni. Questo metodo è molto scomodo per i calcoli manuali, ma è appropriato per i calcoli computerizzati. I risultati ottenuti sono molto accurati.
3. usare calori specifici medi. Questo metodo è molto semplice e molto comodo quando non sono disponibili tabelle delle proprietà. I risultati ottenuti sono ragionevolmente accurati se l'intervallo di temperatura non è molto ampio.

5.4.1 Le relazioni tra i calori specifici dei gas perfetti

Una relazione particolare tra c_p e c_v per i gas perfetti si può ottenere differenziando la relazione $h = u + RT$ e ottenendo:

$$dh = du + RdT$$

Sostituendo dh con $c_p dT$, e du con $c_v dT$, e dividendo per dT l'espressione ottenuta, si ottiene:

$$c_p = c_v + R \quad [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (5.29)$$

Questa relazione, valida per i gas perfetti, è importante poiché consente di determinare c_v quando si conoscono c_p e la costante del gas R .

Quando i calori specifici sono espressi su base molare, sostituendo R nella precedente equazione con la costante universale dei gas R_u (**Figura 5.29**) si ha:

$$\bar{c}_p = \bar{c}_v + R_u \quad [\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})] \quad (5.30)$$

A questo punto, si può introdurre un'altra proprietà dei gas perfetti detta **rapporto dei calori specifici k** , definito dalla relazione:

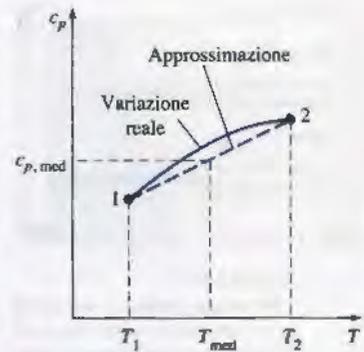


FIGURA 5.26
Per piccoli intervalli di temperatura si può assumere che i calori specifici variano linearmente con la temperatura.

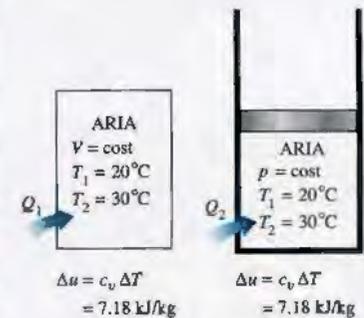


FIGURA 5.27
La relazione $\Delta u = c_{v,med}\Delta T$ è valida per qualsiasi tipo di trasformazione, a volume costante o meno.

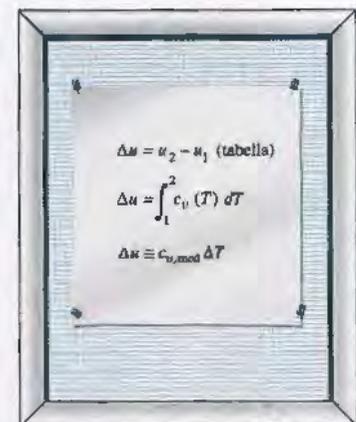


FIGURA 5.28
Tre metodi per calcolare Δu .

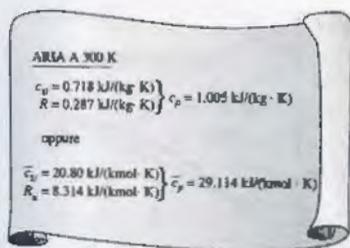


FIGURA 5.29
Per un gas perfetto c_p può essere determinato a partire da c_v e R .

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (5.31)$$

Si osservi che anche il rapporto dei calori specifici varia con la temperatura, ma tale variazione è molto piccola: per i gas monoatomici k può essere considerato costante e pari a 1.667; per molti gas biatomici, inclusa l'aria, k è circa 1.4 a temperatura ambiente.

ESEMPIO 5.7

La valutazione della variazione di energia interna di un gas perfetto

Aria inizialmente a 300 K e 200 kPa viene riscaldata a pressione costante fino a 600 K. Si determini la variazione dell'energia interna dell'aria riferita all'unità di massa, usando (a) i dati presi dalla tabella per l'aria (*Tabella A.21*), (b) la relazione funzionale del calore specifico (*Tabella A.2c*) e (c) il valore medio del calore specifico (*Tabella A.2b*).

Soluzione

Si deve determinare con tre metodi diversi la variazione dell'energia interna dell'aria

Ipotesi

Nelle condizioni indicate, l'aria può considerarsi un gas perfetto, poiché è a temperatura alta e a pressione bassa rispetto ai suoi valori critici.

(a) Un metodo per determinare la variazione dell'energia interna dell'aria consiste nel leggere i valori di u alle temperature T_1 e T_2 sulla *Tabella A.21* e nel calcolare la differenza:

$$u_1 = u_{a,300\text{ K}} = 214.07 \text{ kJ/kg}$$

$$u_2 = u_{a,600\text{ K}} = 434.78 \text{ kJ/kg}$$

Perciò, la risposta esatta è:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 434.78 - 214.07 = 220.71 \text{ kJ/kg}$$

(b) Il $\bar{c}_p(T)$ dell'aria è dato nella *Tabella A.2c* sotto forma di polinomio di 3° grado:

$$\bar{c}_p(T) = a + bT + cT^2 + dT^3$$

dove $a = 28.11$, $b = 0.1967 \times 10^{-2}$, $c = 0.4802 \cdot 10^{-5}$ e $d = -1.966 \cdot 10^{-9}$.

Dall'*Equazione 5.30*:

$$\bar{c}_v(T) = \bar{c}_p - R_u = (a - R_u) + bT + cT^2 + dT^3$$

Dall'*Equazione 5.25*:

$$\Delta \bar{u} = \int_1^2 \bar{c}_v(T) dT = \int_1^2 [(a - R_u) + bT + cT^2 + dT^3] dT$$

Eseguendo l'integrazione e sostituendo i valori numerici, si ottiene:

$$\Delta \bar{u} = 6447 \text{ kJ/kmol}$$

La variazione dell'energia interna riferita all'unità di massa si determina dividendo tale valore per la massa molare dell'aria (*Tabella A.1*):

$$\Delta u = \frac{\Delta \bar{u}}{M} = \frac{6447}{28.97} = 222.5 \text{ kJ/kg}$$

che differisce dello 0.8% dal valore tabulato.

(c) Il valore medio del calore specifico a volume costante $c_{v, \text{med}}$ si ottiene dalla *Tabella A.2b* alla temperatura media $(T_1 + T_2)/2 = 450 \text{ K}$:

$$c_{v, \text{med}} = c_{v \text{ a } 450 \text{ K}} = 0.733 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$$

Perciò:

$$\Delta u = c_{v, \text{med}}(T_2 - T_1) = 0.733(600 - 300) = 220 \text{ kJ/kg}$$

Considerazioni

L'ultimo risultato differisce soltanto dello 0.4% dal valore tabulato (220.71 kJ/kg). Questo stretto accordo non desta sorpresa perché l'ipotesi che c_v vari linearmente con la temperatura è ragionevole in intervalli di temperatura di soltanto qualche grado Celsius (o di qualche kelvin). Se si fosse usato il valore di c_v in corrispondenza di $T_1 = 300 \text{ K}$, invece che in corrispondenza di T_{med} , il risultato sarebbe stato 215.4 kJ/kg, che è affetto da un errore del 2% circa. Errori percentuali di questo ordine di grandezza sono accettabili per la maggior parte degli scopi ingegneristici.

ESEMPIO 5.8

Il riscaldamento di un gas in un serbatoio mediante agitazione

Un serbatoio rigido isolato termicamente contiene inizialmente 0.7 kg di elio a 27°C e 350 kPa.

Si fa quindi girare nel serbatoio, per 30 min, un agitatore a palette con una potenza nominale di 15 W. Si determinino (a) la temperatura finale e (b) la pressione finale dell'elio gassoso.

Soluzione

Elio gassoso contenuto in un serbatoio rigido isolato termicamente viene agitato mediante un agitatore a palette. Si devono determinare la temperatura finale e la pressione finale dell'elio.

Ipotesi

1. L'elio gassoso è un gas perfetto perché è a temperatura molto alta rispetto alla sua temperatura critica di 5.3 K (− 267.85°C).

2. Per l'elio si possono usare calori specifici costanti.
3. Il sistema è stazionario e quindi la variazione di energia cinetica e la variazione di energia potenziale sono nulle, $\Delta E_{cin} = \Delta E_{pot} = 0$ e $\Delta E = \Delta U$.
4. Il volume del serbatoio è costante e quindi non viene compiuto lavoro di variazione di volume.
5. Il sistema è adiabatico e quindi non avviene scambio di calore.

Analisi

Si assume come *sistema* il contenuto del serbatoio (*Figura 5.30*). Il sistema scelto è un *sistema chiuso* perché attraverso il suo contorno non avviene alcun flusso di massa durante la trasformazione. Si osserva che sul sistema viene compiuto lavoro meccanico (lavoro all'albero).

(a) La quantità di lavoro compiuta sul sistema dall'agitatore a palette è:

$$L_{mecc} = \dot{L}_{mecc} \Delta t = 15 \times 30 \times 60 = 27\,000 \text{ J}$$

In base alle ipotesi enunciate e alle osservazioni, il bilancio energetico per il sistema può essere espresso come:

$$\underbrace{E_{entrante} - E_{uscite}}_{\substack{\text{Energia netta scambiata} \\ \text{sotto forma di calore, lavoro e massa}}} = \underbrace{\Delta E_{sistema}}_{\substack{\text{Variazione delle energie} \\ \text{interna, cinetica, potenziale, ecc.}}}$$

$$L_{mecc, entrante} = \Delta U = m(u_2 - u_1) = mc_{v, med}(T_2 - T_1)$$

Come si è posto in rilievo precedentemente, i calori specifici a pressione zero dei gas monoatomici (essendo l'elio uno di essi) sono costanti. Il valore $c_u = 3.116 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ per l'elio si ricava dalla *Tabella A.2a*. Sostituendo questa e le altre quantità note nell'equazione dell'energia precedente, si ha:

$$27\,000 = 0.7 \times 3.116(T_2 - 27)$$

$$T_2 = 39.4^\circ\text{C}$$

(b) La pressione finale si determina con l'equazione di stato dei gas perfetti:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

dove V_1 e V_2 sono identici e si possono semplificare. Quindi la pressione finale diventa:

$$\frac{350}{(27 + 273)} = \frac{p_2}{(39.4 + 273)}$$

$$p_2 = 364 \text{ kPa}$$

Considerazioni

È importante notare che la pressione che compare nell'equazione di stato dei gas perfetti è sempre la pressione assoluta.

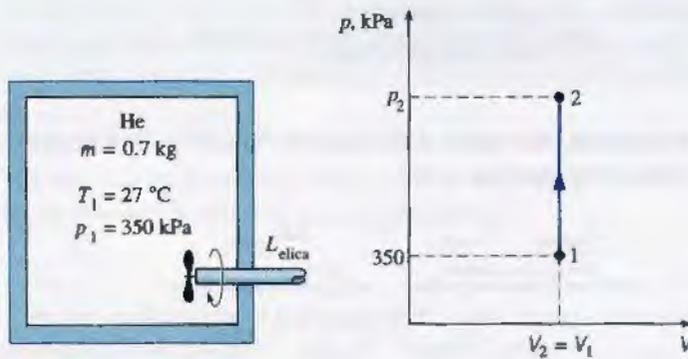


FIGURA 5.30
Schema e diagramma p-V per
l'Esempio 5.8.

ESEMPIO 5.9

Il riscaldamento di un gas mediante un riscaldatore a resistenza elettrica

Un sistema cilindro-stantuffo contiene inizialmente 0.5 m^3 di azoto gassoso alla pressione di 400 kPa e alla temperatura di 27°C . Un riscaldatore a resistenza elettrica posto all'interno del dispositivo, alimentato da un generatore a 120 V , viene acceso per 5 minuti durante i quali viene percorso da una corrente elettrica di 2 A . L'azoto gassoso si espande a pressione costante e, durante questa trasformazione, cede 2800 J di calore. Si determini la temperatura finale dell'azoto.

Soluzione

Azoto gassoso contenuto in un sistema cilindro-pistone viene riscaldato da un riscaldatore a resistenza elettrica. L'azoto si espande a pressione costante e durante questa trasformazione viene ceduta una certa quantità di calore. Si deve determinare la temperatura finale dell'azoto.

Ipotesi

1. L'azoto è un gas perfetto perché è a temperatura alta e a pressione bassa rispetto ai valori del punto critico, -147°C e 3.39 MPa , rispettivamente.
2. Il sistema è stazionario e quindi la variazione di energia cinetica e la variazione di energia potenziale sono nulle: $\Delta E_{\text{cin}} = \Delta E_{\text{pot}} = 0$ e $\Delta E = \Delta U$.
3. La pressione rimane costante durante la trasformazione e quindi $p_2 = p_1$.
4. L'azoto ha calori specifici costanti a temperatura ambiente.

Analisi

Si assume come sistema il contenuto del cilindro (Figura 5.31). Il sistema scelto è un sistema chiuso perché il suo contorno non viene attraversato da alcun flusso di massa durante la trasformazione. Si osserva che un sistema cilindro-stantuffo implica tipicamente un contorno mobile e quindi un lavoro di variazione di volume, L_v . Inoltre, il sistema cede calore e sul sistema viene compiuto lavoro elettrico L_{el} . In primo luogo si determina il lavoro elettrico compiuto sull'azoto:

$$L_{\text{el}} = V_{\text{el}} I \Delta t = 120 \times 2 \times (5 \times 60) = 72 \text{ kJ}$$

dove V_{el} è la tensione elettrica e I è l'intensità della corrente elettrica. La massa dell'azoto si ricava dall'equazione di stato dei gas perfetti:

$$m = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{400 \times 0.5}{0.297 \times 300} = 2.245 \text{ kg}$$

In base alle ipotesi enunciate e alle osservazioni, il bilancio energetico per il sistema può essere espresso come:

$$\frac{E_{\text{entrante}} - E_{\text{uscite}}}{\text{Energia netta scambiata sotto forma di calore, lavoro e massa}} = \frac{\Delta E_{\text{sistema}}}{\text{Variazione delle energie interna, cinetica, potenziale, ecc.}}$$

$$L_{\text{el, entrante}} - Q_{\text{uscite}} - L_{\text{v, uscite}} = \Delta U$$

$$L_{\text{el, entrante}} - Q_{\text{uscite}} = m(h_2 - h_1) = mc_p(T_2 - T_1)$$

dato che $\Delta U + L_v = \Delta H$ per un sistema chiuso che subisce una trasformazione di espansione o di compressione quasistatica a pressione costante.

Dalla **Tabella A.2**, $c_p = 1.039 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ per l'azoto a temperatura ambiente. L'unica quantità incognita nell'equazione precedente è T_2 , che è data da:

$$72 - 2.8 = 2.245 \times 1.039(T_2 - 27)$$

$$T_2 = 56.7^\circ\text{C}$$

Considerazioni

Si potrebbe risolvere questo problema anche determinando il lavoro di variazione di volume e la variazione di energia interna, invece della variazione di entalpia.

ESEMPIO 5.10

Il riscaldamento di un gas a pressione costante

Un sistema cilindro-pistone contiene inizialmente aria a 150 kPa e a 27°C. In tale stato, il pistone è appoggiato su una coppia di supporti, come mostrato nella **Figura 5.32**, e il volume contenuto è 400 L. La massa del pistone è tale che per muoverla è richiesta una pressione di 350 kPa. Si riscalda l'aria finché

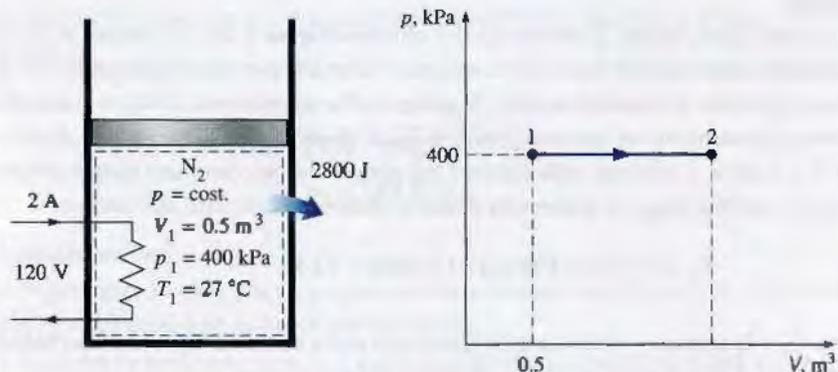


FIGURA 5.31 Schema e diagramma p-V per l'Esempio 5.9.

il suo volume non si è raddoppiato. Si determinino (a) la temperatura finale, (b) il lavoro compiuto dall'aria e (c) il calore totale fornito all'aria.

Soluzione

L'aria contenuta in un sistema cilindro-pistone viene riscaldata finché il suo volume non raddoppia. Si devono determinare la temperatura finale, il lavoro compiuto e la quantità totale di calore fornito all'aria.

Ipotesi

1. L'aria è un gas perfetto perché è a temperatura alta e a pressione bassa rispetto ai valori del punto critico.
2. Il sistema è stazionario e quindi la variazione di energia cinetica e la variazione di energia potenziale sono nulle, $\Delta E_{\text{cin}} = \Delta E_{\text{pot}} = 0$ e $\Delta E = \Delta U$.
3. Il volume rimane costante finché il pistone non comincia a muoversi, dopo di che la pressione rimane costante.
4. Non vengono compiuti lavoro elettrico, lavoro meccanico (lavoro all'albero) o altre forme di lavoro.

Analisi

Si assume come *sistema* il contenuto del cilindro (**Figura 5.32**). Il sistema scelto è un *sistema chiuso*, perché il suo contorno non viene attraversato da alcun flusso di massa durante la trasformazione.

Si osserva che un sistema cilindro-pistone implica tipicamente un contorno mobile e quindi un lavoro di variazione di volume, L_v . Inoltre, il lavoro di variazione di volume viene compiuto dal sistema e il calore viene trasferito al sistema.

- (a) Si può determinare facilmente la temperatura finale usando l'equazione di stato dei gas perfetti fra gli stati 1 e 3 nella forma seguente:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_3 V_3}{T_3} \rightarrow \frac{150 \times V_1}{300} = \frac{350 \times 2V_1}{T_3}$$

$$T_3 = 1400 \text{ K}$$

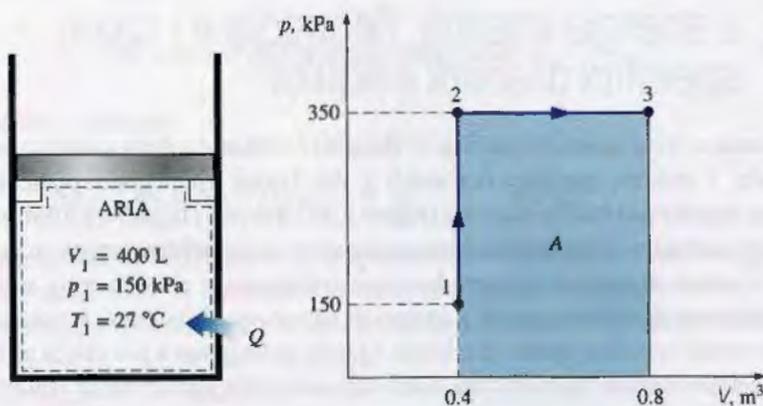


FIGURA 5.32
Schema e diagramma p - V per
l'Esempio 5.10.

- (b) Il lavoro compiuto potrebbe essere determinato mediante integrazione, ma, in questo caso, è molto più facile ricavarlo dall'area sottesa dalla curva di trasformazione su un diagramma p - V , presentato nella **Figura 5.32**:

$$A = (V_2 - V_1)p_2 = 0.4 \times 350 = 140 \text{ m}^3 \cdot \text{kPa}$$

Perciò:

$$L_{13} = 140 \text{ kJ}$$

Il lavoro viene compiuto dal sistema (per sollevare il pistone ed espellere l'aria atmosferica), quindi è lavoro uscente.

- (c) In base alle ipotesi enunciate e alle osservazioni, il bilancio energetico per il sistema fra lo stato iniziale e lo stato finale (trasformazione 1-3) può essere espresso nella forma:

$$\underbrace{E_{\text{entrante}} - E_{\text{uscente}}}_{\substack{\text{Energia netta scambiata} \\ \text{sotto forma di calore, lavoro e massa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Variazione delle energie} \\ \text{interna, cinetica, potenziale, ecc.}}}$$

$$Q_{\text{entrante}} - L_{\text{v. uscente}} = \Delta U = m(u_3 - u_1)$$

Le energie interne, ottenute dalla tabella per l'aria (**Tabella A.21**), sono:

$$u_1 = u_{a, 300 \text{ K}} = 214.07 \text{ kJ/kg}$$

$$u_2 = u_{a, 1400 \text{ K}} = 1113.52 \text{ kJ/kg}$$

Perciò:

$$Q_{\text{entrante}} - 140 = 0.697(1113.52 - 214.07) = 767 \text{ kJ}$$

Considerazioni

Il segno positivo conferma che il calore viene trasferito al sistema.

5.5 L'energia interna, l'entalpia e i calori specifici di solidi e liquidi

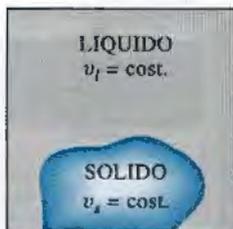


FIGURA 5.33
I volumi specifici di sostanze incompressibili rimangono costanti durante qualsiasi processo.

Una sostanza il cui volume specifico (o densità) è costante è detta sostanza incompressibile. I volumi specifici dei solidi e dei liquidi rimangono praticamente costanti durante una trasformazione (**Figura 5.33**); perciò, i liquidi e i solidi si possono approssimare come sostanze incompressibili senza perdere troppo in accuratezza. L'ipotesi di volume costante ha come conseguenza che l'energia associata alla variazione di volume, quale il lavoro di variazione di volume, è trascurabile se confrontata con altre forme di energia. Questa ipotesi non è più valida se si studiano le sollecitazioni termiche nei solidi (causate dalla variazione di volume con la temperatura) o se si analizza il comportamento dei termometri a bulbo.

Si può dimostrare matematicamente che, per le sostanze incompressibili, il calore specifico a volume costante e il calore specifico a pressione costante sono identici (Figura 5.34). Perciò, per i solidi e i liquidi, tralasciando i pedici e rappresentando entrambi i calori specifici con l'unico simbolo c , si ha:

$$c_p = c_v = c \tag{5.32}$$

Tale risultato si potrebbe dedurre anche direttamente dalle definizioni dei calori specifici a volume costante e a pressione costante. I valori del calore specifico per diversi liquidi e solidi comuni sono forniti nella Tabella A.3.

5.5.1 Le variazioni di energia interna

I calori specifici delle sostanze incompressibili, come quelli dei gas perfetti, dipendono soltanto dalla temperatura. Perciò, i differenziali parziali nell'equazione di definizione di c_v possono essere sostituiti con differenziali ordinari, dando:

$$du = c_v dT = c(T) dT \tag{5.33}$$

La variazione dell'energia interna tra gli stati 1 e 2 si ottiene per integrazione:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c(T) dT \quad (\text{kJ/kg}) \tag{5.34}$$

Per effettuare tale integrazione si dovrebbe conoscere la variazione del calore specifico c con la temperatura, tuttavia per piccoli intervalli di temperatura si può usare un valore di c costante, determinato alla temperatura media, ottenendo:

$$\Delta u = c_{\text{med}}(T_2 - T_1) \quad (\text{kJ/kg}) \tag{5.35}$$

5.5.2 Le variazioni di entalpia

Usando la definizione di entalpia $h = u + pv$, e notando che $v = \text{costante}$, si può determinare per differenziazione la forma differenziale della variazione di entalpia delle sostanze incompressibili:

$$dh = du + v dp + p dv^{-0} = du + v dp \tag{5.36}$$

Integrando, si ottiene:

$$\Delta h = \Delta u + v \Delta p = c_{\text{med}} \Delta T + v \Delta p \quad (\text{kJ/kg}) \tag{5.37}$$

Nel caso dei solidi, il termine $v \Delta p$ è trascurabile e quindi $\Delta h = \Delta u = c_{\text{med}} \Delta T$. Nel caso dei liquidi, si incontrano comunemente due casi particolari:

1. trasformazioni a pressione costante (trasformazioni isobare), come nei riscaldatori ($\Delta p = 0$): $\Delta h = \Delta u = c_{\text{med}} \Delta T$;
2. trasformazioni a temperatura costante (trasformazioni isoterme), come nelle pompe ($\Delta T = 0$): $\Delta h = v \Delta p$.



FIGURA 5.34 I valori c_v e c_p di sostanze incompressibili sono identici e sono indicati con la lettera c .

Per una trasformazione fra gli stati 1 e 2, l'ultima relazione può essere espressa nella forma $h_2 - h_1 = v(p_2 - p_1)$. Se si suppone che lo stato 2 sia lo stato di liquido sottoraffreddato alla temperatura T e alla pressione p date e che lo stato 1 sia lo stato di liquido saturo alla stessa temperatura, l'entalpia del liquido sottoraffreddato può essere espressa nella forma:

$$h_{a,p,T} = h_{i,s,T} + v_{i,s,T}(p - p_{sat,T}) \quad (5.38)$$

come si è visto nel **Capitolo 4**. Questo è un miglioramento rispetto all'ipotesi che l'entalpia del liquido sottoraffreddato possa essere assunta come h_i alla temperatura data (cioè, $h_{a,p,T} = h_{i,s,T}$). Però, il contributo dell'ultimo termine è spesso molto piccolo e quindi trascurabile. (Si noti che a temperature e a pressioni elevate, l'**Equazione 5.38** può sovracorreggere l'entalpia e determinare un errore maggiore dell'approssimazione $h = h_{i,s,T}$).

ESEMPIO 5.11

L'entalpia di un liquido sottoraffreddato

Si determini l'entalpia dell'acqua liquida a 100°C e a 15 MPa (*a*) usando le tabelle per i liquidi sottoraffreddati, (*b*) approssimandola come un liquido saturo e (*c*) usando la correzione data dall'**Equazione 5.38**.

Soluzione

Si devono determinare il valore esatto e il valore approssimato dell'entalpia.

Analisi

A 100°C , la pressione di saturazione dell'acqua è 101.2 kPa e, dato che $p > p_{sat}$ nello stato specificato l'acqua esiste sotto forma di liquido sottoraffreddato.

(*a*) Dalle tabelle per i liquidi sottoraffreddati, si legge:

$$\left. \begin{array}{l} p = 15\text{ MPa} \\ T = 100^\circ\text{C} \end{array} \right\} h = 430.39\text{ kJ/kg} \quad (\text{Tabella A.7})$$

Questo è il valore esatto.

(*b*) Approssimando il liquido sottoraffreddato come un liquido saturo a 100°C , come si fa comunemente, si ottiene:

$$h = h_{i,s,100^\circ\text{C}} = 419.17\text{ kJ/kg}$$

Questo valore è affetto da un errore di circa il 2.6%.

(*c*) Dall'**Equazione 5.38**:

$$\begin{aligned} h_{a,p,T} &= h_{i,s,T} + v_{i,s,T}(p - p_{sat,T}) \\ &= 419.17 + 0.001(15\,000 - 101.42) \\ &= 434.07\text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Considerazioni

Si noti che, nel caso dell'ultimo risultato, il termine di correzione ha ridotto l'errore dal 2.6% all'1%. Però, questo miglioramento dell'accuratezza spesso non vale lo sforzo che richiede.

ESEMPIO 5.12

Il raffreddamento di un blocco di ferro con l'acqua

Un blocco di ferro di 50 kg alla temperatura di 80°C viene immerso in un serbatoio isolato termicamente che contiene 0.5 m³ di acqua a 25°C. Si determini la temperatura quando sia stato raggiunto l'equilibrio termico.

Soluzione

Un blocco di ferro viene lasciato cadere nell'acqua in un serbatoio isolato termicamente. Si deve determinare la temperatura finale quando è stato raggiunto l'equilibrio termico.

Ipotesi

1. Sia l'acqua sia il blocco di ferro sono sostanze incompressibili.
2. Per l'acqua e per il ferro si possono usare calori specifici costanti a temperatura ambiente.
3. Il sistema è stazionario e quindi la variazione di energia cinetica e la variazione di energia potenziale sono nulle, $\Delta E_{cin} = \Delta E_{pot} = 0$ e $\Delta E = \Delta U$.
4. Non vengono compiuti lavoro elettrico, lavoro meccanico (lavoro all'albero) o altre forme di lavoro.
5. Il sistema è ben isolato termicamente e quindi non avvengono scambi di calore.

Analisi

Si assume come *sistema* l'intero contenuto del serbatoio (Figura 5.35). Il sistema scelto è un *sistema chiuso*, perché durante la trasformazione non avviene alcun flusso di massa attraverso il contorno del sistema. Si osserva che il volume di un serbatoio rigido è costante e quindi non viene compiuto lavoro di variazione di volume. Il bilancio energetico per il sistema può essere espresso come:

$$\frac{E_{entrante} - E_{uscite}}{\text{Energia netta scambiata sotto forma di calore, lavoro e massa}} = \frac{\Delta E_{sistema}}{\text{Variazione delle energie interna, cinetica, potenziale, ecc.}}$$

$$0 = \Delta U$$

Poiché l'energia interna totale U è una proprietà estensiva e può esprimersi come la somma delle energie interne delle parti del sistema, si avrà che la variazione di energia interna totale del sistema è:

$$\Delta U_{sist} = \Delta U_{ferro} + \Delta U_{acqua} = 0$$

$$[mc(T_2 - T_1)]_{ferro} + [mc(T_2 - T_1)]_{acqua} = 0$$

Il volume specifico dell'acqua a temperatura ambiente può essere assunto pari a 0.001 m³/kg, per cui la massa dell'acqua è:

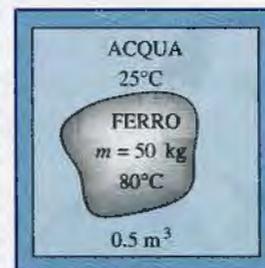


FIGURA 5.35
Schema per l'Esempio 5.12.

$$m_{\text{acqua}} = \frac{V}{v} = \frac{0.5}{0.001} = 500 \text{ kg}$$

Determinando con la **Tabella A.3** i calori specifici del ferro e dell'acqua $c_{\text{ferro}} = 0.45 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ e $c_{\text{acqua}} = 4.184 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ e sostituendoli nell'equazione dell'energia, si ottiene:

$$50 \times 0.45(T_2 - 80) + 500 \times 4.18(T_2 - 25) = 0$$

$$T_2 = 25.6^\circ\text{C}$$

Una volta stabilito l'equilibrio termico, sia l'acqua sia il ferro saranno a 25.6°C .

Considerazioni

Il fatto che l'innalzamento di temperatura dell'acqua sia piccolo è dovuto alla sua grande massa e al suo grande calore specifico.

ESEMPIO 5.13

L'aumento di temperatura causato da uno schiaffo

Chiunque abbia dato o ricevuto uno schiaffo, ricorderà probabilmente la sensazione di bruciore. Si immagini di ricevere da una persona adirata uno schiaffo che abbia fatto aumentare di 1.8°C (ahil!) la temperatura della parte interessata della faccia. Supponendo che la mano che ha inferto lo schiaffo abbia una massa di 1.2 kg e che circa 0.150 kg del tessuto della faccia e della mano siano stati interessati dall'evento, si stimi la velocità della mano immediatamente prima dell'impatto. Si supponga che il calore specifico del tessuto sia pari a $3.8 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$.

Soluzione

La faccia di una persona riceve uno schiaffo. Per l'aumento specificato della temperatura della parte interessata, si deve determinare la velocità di impatto della mano.

Ipotesi

1. La mano si arresta completamente dopo l'impatto.
2. La faccia riceve il colpo senza subire un movimento rilevante.
3. Non avviene cessione di calore dalla parte interessata all'ambiente, quindi la trasformazione è adiabatica.
4. Non viene compiuto lavoro sul sistema o dal sistema.
5. La variazione di energia potenziale è nulla, $\Delta E_{\text{cin}} = \Delta E_{\text{pot}} = 0$ e ΔU .

Analisi

Si analizza l'evento in modo professionale, senza lasciarsi influenzare dalle emozioni. In primo luogo, si identifica il sistema, se ne fa un disegno schematico e si enunciano le osservazioni sulle specifiche del problema. Si assume come sistema la mano e la parte interessata della faccia (**Figura 5.36**). Il sistema scelto è un sistema chiuso perché contiene una quantità fissa di massa (non avviene flusso di massa attraverso il contorno del sistema). Si osserva che l'energia cinetica



FIGURA 5.36
Schema per l'Esempio 5.13.

della mano diminuisce durante la trasformazione, come è mostrato dalla diminuzione della velocità dal valore iniziale a zero, mentre l'energia interna della parte interessata aumenta, come è mostrato da un aumento della temperatura. A quanto pare, durante la trasformazione non avviene un rilevante scambio di energia tra il sistema e il suo ambiente.

In base alle ipotesi enunciate e alle osservazioni, il bilancio energetico per il sistema può essere espresso nella forma:

$$\frac{E_{\text{entrante}} - E_{\text{uscite}}}{\text{Energia netta scambiata sotto forma di calore, lavoro e massa}} = \frac{\Delta E_{\text{sistema}}}{\text{Variazione delle energie interna, cinetica, potenziale, ecc.}}$$

$$0 = \Delta U_{\text{tessuto interessato}} + \Delta E_{\text{cin, mano}}$$

$$0 = (mc\Delta T)_{\text{tessuto interessato}} + [m(0 - w^2)/2]_{\text{mano}}$$

Cioè, la diminuzione dell'energia cinetica della mano deve essere uguale all'aumento dell'energia interna della parte interessata. Risolvendo rispetto alla velocità e sostituendo le quantità date, si ottiene la velocità di impatto della mano:

$$\begin{aligned} w_{\text{mano}} &= \sqrt{\frac{2(mc\Delta T)_{\text{tessuto interessato}}}{m_{\text{mano}}}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \times 0.15 \times 3.8 \times 1.8}{1.2}} \\ &= 41.4 \text{ m/s (ossia 149 km/h)} \end{aligned}$$

Considerazioni

La ricostruzione di eventi come questo, mediante la formulazione di ipotesi appropriate, è pratica routinaria in ingegneria forense.

SOMMARIO

Il lavoro è energia che si trasferisce quando una forza agente su un sistema sposta il proprio punto di applicazione. La forma più comune di lavoro meccanico è il **lavoro di variazione di volume**, il lavoro associato all'espansione e alla compressione di sostanze. Su un diagramma p - V l'area sottesa dalla linea di trasformazione rappresenta il lavoro di variazione di volume per una trasformazione quasistatica.

Varie forme di lavoro di variazione di volume possono essere espresse come segue:

1 Generale

$$L_v = \int_1^2 p \, dV$$

2 Trasformazione isobara

$$L_{ij} = mp_0(v_2 - v_1) \quad (p_0 = \text{costante})$$

3 Trasformazione politropica

$$L_v = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1-n} \quad (n \neq 1) \quad (pV^n = \text{costante})$$

4 Trasformazione isoterma di un gas perfetto

$$L_v = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = mRT_0 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$(pV = mRT_0 = \text{costante})$$

Il primo principio della termodinamica è essenzialmente un enunciato del principio di conservazione dell'energia; è detto anche bilancio energetico. Il bilancio energetico generale per **qualsiasi sistema** soggetto a **qualsiasi trasformazione** può essere espresso nella forma:

$$\frac{E_{\text{entrante}} - E_{\text{uscite}}}{\text{Energia netta scambiata sotto forma di calore, lavoro e massa}} = \frac{\Delta E_{\text{sistema}}}{\text{Variazione delle energie interna, cinetica, potenziale, ecc.}}$$

Può anche essere espresso con riferimento all'unità di tempo nella forma:

$$\frac{\dot{E}_{\text{entrante}} - \dot{E}_{\text{uscite}}}{\text{Potenza netta scambiata sotto forma di calore, lavoro e massa}} = \frac{\Delta \dot{E}_{\text{sistema}}}{\text{Variazione delle energie interna, cinetica, potenziale, ecc. nell'unità di tempo}}$$

Se si considerano quantità positive la quantità di calore fornita *al* sistema e la quantità di lavoro compiuto *dal* sistema, il bilancio energetico per un sistema chiuso può essere espresso nella forma:

$$Q - L = \Delta U + \Delta E_{\text{cin}} + \Delta E_{\text{pot}}$$

Dove:

$$L = L_{\text{altro}} + L_v$$

$$\Delta U = m(u_2 - u_1)$$

$$\Delta E_{\text{cin}} = \frac{1}{2} m(w_2^2 - w_1^2)$$

$$\Delta E_{\text{pot}} = mg(z_2 - z_1)$$

Per una **trasformazione a pressione costante** (o **trasformazione isobara**), $L_v + \Delta U = \Delta H$. Perciò:

$$Q - L_{\text{altro}} = \Delta H + \Delta E_{\text{cin}} + \Delta E_{\text{pot}}$$

La quantità di energia necessaria per innalzare di 1°C (o di 1 K) la temperatura di 1 unità di massa di una sostanza è detto **calore specifico a volume costante**, c_v , per una trasformazione a volume costante (o trasformazione isocora), e **calore specifico a pressione costante**, c_p , per una trasformazione a pressione costante (o trasformazione isobara). Sono definiti come:

$$c_v = \left(\frac{du}{dT} \right)_v \quad \text{e} \quad c_p = \left(\frac{dh}{dT} \right)_p$$

Per i gas perfetti, u , h , c_v e c_p sono funzioni della sola temperatura. Le Δu e Δh dei gas perfetti sono espresse come:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c_v(T) \, dT \cong c_{v, \text{med}}(T_2 - T_1)$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_1^2 c_p(T) \, dT \cong c_{p, \text{med}}(T_2 - T_1)$$

Per i gas perfetti, c_v e c_p sono legati dalla relazione:

$$c_p = c_v + R$$

dove R è la costante dei gas. Il **rapporto dei calori specifici**, k , è definito come:

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

Per le **sostanze incompressibili** (liquidi e solidi), il calore specifico a pressione costante e il calore specifico a volume costante sono identici e sono denotati con c :

$$c_p = c_v = c$$

La Δu e la Δh delle sostanze incompressibili sono date da:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c(T) dT \cong c_{\text{med}}(T_2 - T_1)$$

$$\Delta h = \Delta u + v \Delta p$$

PROBLEMI

5.1 Una massa d'aria di 1.2 kg, alla pressione di 150 kPa e alla temperatura di 12°C, è contenuta in un sistema cilindro-pistone a tenuta di gas e privo di attrito. L'aria viene compressa a una pressione finale di 600 kPa. Durante la trasformazione l'aria scambia calore con l'esterno in modo tale che la temperatura all'interno del cilindro rimanga costante. Si calcoli il lavoro compiuto durante questa trasformazione.

[Soluzione: -136.1 kJ]

5.2 Durante una trasformazione di espansione la pressione di un gas varia da 100 kPa a 900 kPa secondo la relazione $p = aV + b$, dove $a = 1$ MPa/m³ e b è una costante. Se il volume iniziale del gas è 0.2 m³, si calcoli il lavoro compiuto durante la trasformazione.

[Soluzione: 400 kJ]

5.3 Durante alcune trasformazioni reali di espansione e compressione in sistemi cilindro-pistone si è osservato che i gas soddisfano la relazione $pV^n = C$, dove n e C sono costanti. Si calcoli il lavoro compiuto quando un gas si espande da uno stato caratterizzato da una pressione di 150 kPa e da un volume di 0.03 m³ a un volume finale di 0.2 m³ nel caso di $n = 1.3$.

[Soluzione: 6.51 kJ]

5.4 L'anidride carbonica contenuta in un sistema cilindro-pistone viene compressa da 0.3 m³ a 0.1 m³. Durante la trasformazione, la pressione e il volume sono legati dalla relazione $p = aV^{-2}$, dove $a = 8$ kPa · m⁶. Si calcoli il lavoro compiuto sull'anidride carbonica durante questa trasformazione.

[Soluzione: -53.3 kJ]

5.5 Un sistema cilindro-pistone verticale contiene acqua e viene riscaldato su un fornello. Durante il processo si trasferiscono 50 kJ all'acqua e le perdite di calore dalle pareti laterali ammontano a 8 kJ. Il pistone si solleva per effetto dell'evaporazione dell'acqua e vengono compiuti 5 kJ di lavoro di variazione di volume. Si determini la variazione dell'energia dell'acqua durante questo processo.

[Soluzione: 37 kJ]

5.6 Un sistema chiuso compie un ciclo costituito da due trasformazioni. Durante la prima trasformazione si trasferiscono al sistema 40 kJ sotto forma di calore mentre il sistema compie lavoro per 60 kJ. Durante la seconda trasformazione vengono compiuti 45 kJ sotto forma di lavoro sul sistema. (a) Si determini il calore trasferito durante la seconda trasformazione. (b) Si calcolino il trasferimento netto di lavoro e il trasferimento netto di calore per il ciclo.

[Soluzioni: (a) -25 kJ; (b) 15 kJ]

5.7 Si determini la variazione di energia interna Δu dell'idrogeno, in kJ/kg, quando la sua temperatura viene innalzata da 400 K a 1000 K, usando (a) l'equazione empirica del calore specifico in funzione della temperatura (Tabella A.2c), (b) il valore di c_v a temperatura media (Tabella A.2b) e (c) il valore di c_v a temperatura ambiente (Tabella A.2a).

[Soluzioni: (a) 6295.3 kJ/kg; (b) 6288 kJ/kg; (c) 6100 kJ/kg]

5.8 Un recipiente rigido contiene 10 kg di aria alla pressione di 200 kPa e alla temperatura di 27°C. Si riscalda l'aria finché la sua pressione non raddoppia. Si determinino (a) il volume del recipiente e (b) la quantità di calore trasferita.

[Soluzioni: (a) 4.305 m³; (b) 2199 kJ]

5.9 Una stanza che misura 4 m × 5 m × 6 m deve essere riscaldata da un riscaldatore a resistenza elettrica installato nello zoccolo della stanza. Si desidera che il riscaldatore a resistenza sia capace di innalzare la temperatura dell'aria nella stanza da 7°C a 23°C entro 15 min. Supponendo che non vi siano dispersioni di calore dalla stanza e che la pressione atmosferica sia 100 kPa, si determini la potenza del riscaldatore a resistenza. Si assumano calori specifici costanti a temperatura ambiente.

[Soluzione: 1.91 kW]

5.10 Uno studente che vive in una stanza di 4 m × 6 m × 6 m accende il suo ventilatore da 150 W prima di uscire dalla stanza in una giornata estiva,

sperando che la stanza si sia rinfrescata al suo ritorno alla sera. Supponendo che tutte le porte e tutte le finestre siano chiuse a tenuta d'aria e trascurando ogni scambio di calore attraverso le pareti e le finestre, si determini la temperatura nella stanza quando lo studente ritornerà 10 h dopo. Si usino valori dei calori specifici a temperatura ambiente e si supponga che la stanza sia alla pressione di 100 kPa e alla temperatura di 15°C al mattino quando lo studente la lascia.

[Soluzione: 58.2°C]

5.11 Un sistema cilindro-pistone, il cui pistone poggia su una serie di tappi, contiene inizialmente 0.5 kg di elio gassoso alla pressione di 100 kPa e alla temperatura di 25°C. La massa dello stantuffo è tale che è necessaria una pressione di 500 kPa per sollevarlo. Quanto calore si deve trasferire all'elio prima che il pistone cominci a sollevarsi?

[Soluzione: 1857 kJ]

5.12 Una massa incognita di ferro alla temperatura di 90°C è lasciata cadere in un recipiente isolato termicamente che contiene 80 L di acqua a 20°C. Simultaneamente viene attivato un mulinello azionato da un motore elettrico di 200 W per agitare l'acqua. Dopo 25 min si stabilisce l'equilibrio termico a una temperatura finale di 27°C. Si determini la massa del ferro. Si trascuri l'energia accumulata nel mulinello e si assuma 1000 kg/m³ come densità dell'acqua.

[Soluzione: 72.1 kg]

5.13 Si consideri un'aula che cede all'ambiente esterno una potenza termica di 20 000 kJ/h. Se nell'aula sono presenti 30 studenti, ciascuno dei quali dissipa calore sensibile a una potenza di 100 W, si determini se sia necessario accendere il riscaldatore nell'aula per impedire alla temperatura dell'aula di diminuire.

[Soluzione: sì, è necessario]

5.14 Una donna di 68 kg si propone di andare in bicicletta per 1 h. Se deve soddisfare tutto il suo fabbisogno energetico mentre va in bicicletta consumando barrette di cioccolato di 30 g, si determini quante barrette deve portare con sé.

[Soluzione: 4 barrette]

5.15 Un uomo di 60 kg era solito mangiare una mela ogni giorno dopo il pranzo senza subire né un aumento né una diminuzione di peso. Ora mangia una porzione di 200 mL di gelato invece della mela e cammina ogni giorno per 20 min. Con questa nuova dieta, di quanto aumenterà o diminuirà il suo peso?

[Soluzione: 0.087 kg]

5.16 Un pallone sferico contiene 5 kg di aria alla pressione di 200 kPa e alla temperatura di 500 K. Il materiale del pallone è tale che la pressione al suo interno è sempre direttamente proporzionale al quadrato del suo diametro. Si determini il lavoro compiuto quando il volume del pallone raddoppia per effetto della trasmissione di calore.

[Soluzione: 936 kJ]

5.17 Un uomo di 100 kg decide di perdere 5 kg senza ridurre la sua assunzione di 3000 kcal al giorno. Comincia a praticare il nuoto veloce, la danza veloce, lo jogging e il biking per 1 h al giorno. Nel resto del giorno dorme o si rilassa. Si determini quanto tempo impiegherà per perdere 5 kg.

[Soluzione: 13.2 giorni]

5.18 Una tonnellata (1000 kg) di acqua liquida a 80°C è trasferita in una stanza di 4 m × 5 m × 6 m, ben isolata e ben sigillata, inizialmente alla temperatura di 22°C e alla pressione di 100 kPa. Assumendo calori specifici costanti sia dell'aria sia dell'acqua a temperatura ambiente, si determini la temperatura di equilibrio finale della stanza.

[Soluzione: 78.6°C]

5.19 Un uomo di 68 kg la cui temperatura corporea media è 38°C beve 1 L di acqua fredda a 3°C nel tentativo di abbassare la propria temperatura. Supponendo che il calore specifico medio del corpo umano sia 3.6 kJ/(kg · °C), si determini la diminuzione della temperatura corporea media per effetto dell'ingestione dell'acqua fredda.

[Soluzione: 0.6°C]

5.20 Per raffreddare 1 t (1000 kg) di acqua a 20°C in un recipiente isolato, una persona versa nell'ac-

qua 80 kg di ghiaccio a -5°C . Si determini la temperatura di equilibrio finale nel recipiente. La temperatura di fusione e il calore di fusione del ghiaccio a pressione atmosferica sono 0°C e 333.7 kJ/kg , rispettivamente. [Soluzione: 12.4°C]