
Contenido

Prefacio xiii

Prefacio para estudiantes xvii

A.	<i>Introducción a la termodinámica</i>	1
1.	Conceptos básicos y definiciones	11
1.1	Sistemas termodinámicos	12
1.2	Propiedades, estados y procesos	14
1.3	Modelado de sistemas y procesos	17
1.4	Dimensiones y unidades	19
1.4.1	Sistema internacional de unidades (SI)	20
1.4.2	Sistema inglés de unidades	21
1.5	Algunas propiedades directamente observables	23
1.5.1	Densidad y volumen específico	23
1.5.2	Presión	24
1.5.3	Temperatura	26
1.6	Funciones de punto y de trayectoria	29
1.7	Conservación de la masa	36
1.8	Flujo estable	39
1.9	Trabajo	44
1.9.1	Proceso cuasiequilibrio de un sistema simple compresible cerrado	47
1.9.2	Proceso cuasiequilibrio de una sustancia simple compresible en flujo estable	52
1.9.3	Procesos cuasiequilibrio de otros sistemas	60
1.10	Calor	62
1.11	Resumen	66

2.	Propiedades—Relaciones pvT	81
2.1	Fases de sustancias	82
2.1.1	Modelo molecular de sólidos, líquidos y gases	82
2.1.2	Sustancias puras	84
2.1.3	Equilibrio de fases de una sustancia pura	84
2.2	Datos de propiedades	98
2.3	Ecuaciones de estado para gases	107
2.3.1	La ecuación de estado de un gas ideal	108
2.3.2	Aplicación de la ecuación de estado de un gas ideal a gases reales	109
2.3.3	Escala de temperatura de gas ideal	115
2.4	Ecuaciones de estado para líquidos y sólidos	115
2.5	Resumen	116
B.	<i>Notas sobre solución de problemas</i>	127
3.	La primera ley de la termodinámica	139
3.1	La primera ley para procesos cíclicos	140
3.2	La primera ley para procesos no cíclicos: definición de energía almacenada	144
3.3	La naturaleza de la energía almacenada	149
3.4	La primera ley aplicada a sistemas cerrados	152
3.5	La primera ley aplicada a sistemas abiertos	157
3.5.1	Sistemas abiertos—general	157
3.5.2	Sistemas abiertos—flujo estable	163
3.5.3	Aplicaciones de la primera ley a sistemas abiertos	166
3.6	Uso de la primera ley para evaluar el rendimiento	186
3.7	Nota histórica acerca de la primera ley	191
3.8	Resumen	194
4.	Propiedades que dependen de la primera ley	211
4.1	Energía interna y entalpía de sustancias	212
4.1.1	Calores latentes	217
4.1.2	Calores específicos	225
4.2	Energía interna y entalpía de gases ideales	228
4.2.1	Calores específicos de gases ideales	231
4.2.2	Gases ideales con calores específicos constantes—un caso especial	242
4.2.3	Proceso adiabático cuasiequilibrio de gases ideales con calores específicos constantes	242
4.2.4	Teoría cinética y explicaciones de mecánica estadística	250
4.3	Fuentes de datos de propiedades	252
4.4	Resumen	253

5.	La segunda ley de la termodinámica	273
5.1	Limitaciones de la primera ley; por qué necesitamos una segunda ley	274
5.2	La segunda ley de la termodinámica	275
5.3	El uso de la segunda ley	278
5.4	Procesos reversibles e irreversibles	279
5.4.1	Ilustraciones	279
5.4.2	Características de los procesos reversibles e irreversibles	284
5.4.3	Reversibilidad interna y externa	288
5.5	Ciclos reversibles	289
5.5.1	El ciclo de Carnot	293
5.5.2	El ciclo de Carnot inverso	295
5.5.3	Otros ciclos reversibles	300
5.6	Los corolarios de Carnot	303
5.7	La escala de temperatura termodinámica	306
5.8	Máquinas de movimiento perpetuo	313
5.9	Procesos irreversibles y desorden molecular	314
5.10	Resumen	315
6.	Propiedades que dependen de la segunda ley— Entropía y otras	325
6.1	La propiedad de la entropía	326
6.1.1	Cálculo de cambios en la entropía a partir de la definición	331
6.2	Relaciones útiles entre las propiedades: las ecuaciones $T ds$	338
6.2.1	Cálculo de cambios en la entropía a partir de las ecuaciones $T ds$	341
6.3	La entropía como una coordenada	350
6.4	El principio de incremento de la entropía	354
6.5	Funciones de Helmholtz y de Gibbs	362
6.6	Usos de la entropía	364
6.7	Entropía y probabilidad; entropía en otros campos	365
6.8	Resumen	369
7.	Relaciones entre las propiedades	383
7.1	Las ecuaciones de Maxwell	384
7.2	Algunas aplicaciones de las ecuaciones de Maxwell	386
7.2.1	Funciones características	389
7.2.2	La ecuación de Clapeyron	390
7.3	Ecuaciones generales para energía interna, entalpía y entropía en términos de p , v , T y calores específicos	393
7.4	Relaciones de calor específico	396
7.5	El coeficiente de Joule-Thomson	402
7.5.1	El coeficiente de Joule-Thomson en términos de datos de pvT y c_p	404
7.5.2	El coeficiente de temperatura constante	405
7.5.3	Relacionando lecturas de termómetro con escalas de temperatura termodinámica	406

7·6	Gases reales	407
7·6·1	Ecuaciones de estado para gases	407
7·6·2	La hipótesis de estados correspondientes y factores de compresibilidad generalizados	413
7·6·3	Entalpía y entropía de gases reales	416
7·7	Resumen	422
8.	Disponibilidad e irreversibilidad	433
8·1	Trabajo máximo	434
8·1·1	Trabajo máximo para un sistema que intercambia calor únicamente con la atmósfera	435
8·1·2	Trabajo máximo para un sistema que intercambia calor con la atmósfera y un reservorio a T_R	437
8·2	Disponibilidad	443
8·3	Energía disponible y no disponible	450
8·3·1	Energía disponible y no disponible de un sistema y la atmósfera circundante	451
8·3·2	Transferencia de calor de partes disponibles y no disponibles	452
8·4	Irreversibilidad	457
8·5	Contabilidad de la disponibilidad y de la energía disponible	467
8·6	Resumen	472
C.	<i>Recapitulación—Viendo hacia atrás, viendo hacia adelante</i>	485
9.	Gas y mezclas de gas-vapor	489
9·1	Mezclas de gases	490
9·1·1	Análisis de mezclas	490
9·1·2	Presión parcial y volumen parcial	491
9·1·3	El modelo de Dalton	492
9·1·4	El modelo de Amagat	493
9·1·5	Propiedades de mezclas de gas-ideal basadas en el modelo de Dalton	496
9·2	Mezclas de gases ideales	501
9·3	Mezclas de gases reales	505
9·4	Mezclas de gases ideales y vapores	507
9·4·1	Aire atmosférico	510
9·4·2	Humedad relativa y razón de humedad	511
9·4·3	Temperaturas usadas en psicrometría	513
9·4·4	Cartas psicrométricas	518
9·5	Procesos de mezclas de gases ideales y vapores	522
9·6	Resumen	527
10.	Mezclas binarias	543
10·1	Características de mezclas binarias	544
10·2	Diagramas T_{xy} y y_x	548

- 10.3 Equilibrio líquido-vapor: líquidos miscibles 553
- 10.4 Equilibrio líquido-gas: solubilidad 553
- 10.5 Sistemas de ingeniería: rectificadores y desaeradores 554
- 10.6 Resumen 559

11. Reacciones químicas—combustión 563

- 11.1 Algunos preliminares 564
 - 11.1.1 Las reacciones de combustión básicas 564
 - 11.1.2 La composición del aire seco 565
- 11.2 El balance de masa de la combustión 566
 - 11.2.1 Combustión ideal 567
 - 11.2.2 Combustión real 574
- 11.3 Balance de energía de combustión 583
 - 11.3.1 Energía interna de reacción 583
 - 11.3.2 Entalpía de reacción 585
 - 11.3.3 Relación entre ΔU_R y ΔH_R 587
 - 11.3.4 Cálculo de la entalpía de reacción a partir de la entalpía de formación 590
 - 11.3.5 Cambio de entalpía en un proceso de combustión: forma general 593
- 11.4 Datos de combustión 594
- 11.5 Temperatura máxima de combustión adiabática 600
- 11.6 Equilibrio químico 603
- 11.7 Análisis de la segunda ley de reacciones químicas 604
- 11.8 Resumen 612

12. Equilibrio químico en reacciones de gas ideal 619

- 12.1 Criterios de equilibrio 620
- 12.2 La constante de equilibrio, K_p 623
 - 12.2.1 La naturaleza de K_p 628
 - 12.2.2 K_p en términos de la constante de equilibrio de formación, K_f 628
- 12.3 Uso de la constante de equilibrio en aplicaciones 636
- 12.4 Relación de K_p con otras propiedades termodinámicas 644
 - 12.4.1 La relación entre K_p y $\Delta \bar{h}_R$ 645
 - 12.4.2 La relación entre K_p y Δg_R 646
- 12.5 Nota sobre velocidades de reacción 647
- 12.6 Resumen 650

13. Aspectos termodinámicos del flujo de fluidos 657

- 13.1 Definiciones 658
- 13.2 La ecuación dinámica básica para el flujo de fluidos estable unidimensional 659
- 13.3 Propiedades prácticas en flujo de fluidos 663
 - 13.3.1 Medición de propiedades en flujo de fluidos 668

- 13·4 Relaciones básicas para el flujo de fluido estable unidimensional 671
- 13·5 Aplicaciones de las relaciones básicas 672
- 13·6 Flujo en boquillas y difusores—flujo reversible adiabático 674
 - 13·6·1 Caso especial: gas ideal 680
 - 13·6·2 Caso especial: gas ideal con calores específicos constantes 681
- 13·7 Flujo en tuberías—flujo adiabático irreversible en una sección de área constante 691
- 13·8 Flujo con combustión o transferencia de calor—flujo diabático sin fricción 693
- 13·9 Choques normales—flujo adiabático irreversible en una sección de área constante 694
 - 13·9·1 Caso especial: gas ideal 695
 - 13·9·2 Caso especial: gas ideal con calores específicos constantes 695
- 13·10 Resumen 702

D. Mirando hacia adelante a un modelado más extenso 715

14. Procesos y sistemas de compresión y expansión 719

- 14·1 Procesos de compresión de flujo estable 720
- 14·2 Procesos de expansión de flujo estable 728
- 14·3 Flujo incompresible a través de máquinas 733
- 14·4 Máquinas dinámicas: turbomáquinas 734
 - 14·4·1 Relaciones básicas de las turbomáquinas 735
 - 14·4·2 Turbomáquinas: compresores y turbinas 737
 - 14·4·3 Turbomáquinas: consideraciones de diseño adicionales 740
- 14·5 Máquinas de desplazamiento positivo 742
- 14·6 Resumen 744

15. Sistemas de potencia 755

- 15·1 Modelado de turbinas de gas 756
 - 15·1·1 Ciclo de Brayton o ciclo de turbina de gas básico 757
 - 15·1·2 Regeneración en turbinas de gas 763
 - 15·1·3 Interenfriamiento en turbinas de gas 769
 - 15·1·4 Recalentamiento en turbinas de gas 770
 - 15·1·5 Propulsión a chorro con turbinas de gas 772
- 15·2 Modelado de máquinas de combustión interna reciprocantes 775
 - 15·2·1 Ciclo de Otto de aire estándar 776
 - 15·2·2 Ciclo de Diesel de aire estándar 777
 - 15·2·3 Otros ciclos de potencia de gas 781

- 15-3 Modelado de plantas de potencia de vapor 782
 - 15-3-1 Ciclo de Rankine 784
 - 15-3-2 Regeneración en plantas de potencia de vapor 788
 - 15-3-3 Recalentamiento en plantas de potencia de vapor 798
 - 15-3-4 Otros ciclos de potencia de vapor 799
- 15-4 Plantas de ciclo combinado 804
- 15-5 Resumen 805

16. Sistemas de refrigeración 827

- 16-1 Parámetros de rendimiento de refrigeración 828
- 16-2 Modelado de sistemas de refrigeración de gas: ciclo de Brayton inverso 830
- 16-3 Modelado de sistemas de refrigeración de vapor: ciclos de compresión de vapor 833
- 16-4 Refrigeración por absorción 840
- 16-5 La licuefacción de gases 848
- 16-6 Resumen 850

17. Conversión directa de energía 859

- 17-1 Sistemas de conversión directa de energía 860
- 17-2 Celdas de combustible 862
 - 17-2-1 Descripción de la operación de la celda de combustible 862
 - 17-2-2 Análisis de la operación de una celda de combustible 866
 - 17-2-3 Rendimiento de la celda de combustible real 868
- 17-3 Baterías 869
 - 17-3-1 Descripción de la operación de la batería 870
 - 17-3-2 Análisis de la operación de la batería 872
- 17-4 Otros sistemas de conversión directa de energía 876
 - 17-4-1 Dispositivos fotovoltaicos 876
 - 17-4-2 Dispositivos termoeléctricos 877
 - 17-4-3 Dispositivos termiónicos 879
 - 17-4-4 Dispositivos magnetohidrodinámicos 879
- 17-5 Resumen 881

Apéndices 885

- I. Dimensiones y unidades 885
- II. Nota sobre derivadas parciales 891
- III. Tablas y cartas 895
 - Tabla de contenido para las tablas y cartas 895
 - Tablas y cartas en unidades SI 898
 - Tablas y cartas en unidades inglesas 938
 - Tablas y cartas sin dimensiones 976

Respuestas a problemas seleccionados 989

Índice 993