

Ciencia de polímeros para ingenieros

Tabla de contenido

1	Introducción a los polímeros	1
1.1	Propiedades generales	1
1.2	Identificación de los polímeros	9
	Problemas	11
	Referencias	12
2	Contexto histórico	13
2.1	Del caucho natural al caucho sintético	13
2.2	La celulosa y la idea de los 10.000 dólares	18
2.3	Galalith – La piedra de la leche	21
2.4	Leo Baekeland y la industria plástica	23
2.5	Hermann Mark y la educación en polímeros	25
2.6	Wallace Hume Carothers y los polímeros sintéticos	28
2.7	Polietileno – Un producto del cerebro y de la fuerza física	30
2.8	La súper fibra y la mujer que la inventó	33
2.9	La última palabra – Plásticos	35
	Referencias	38
3	Estructura de los polímeros	39
3.1	Estructura macromolecular de los polímeros	39
3.2	Enlaces moleculares y atracción molecular	41
3.3	Peso molecular	41
3.4	Conformación y configuración de las moléculas poliméricas	47
3.5	Ordenamiento de las moléculas poliméricas	51
3.5.1	Polímeros termoplásticos	51
3.5.2	Termoplásticos amorfos	52
3.5.3	Termoplásticos semi-cristalinos	54
3.5.4	Termoestables y elastómeros entrecruzados	63
3.6	Copolímeros y mezclas de polímeros	64
3.7	Aditivos para polímeros	66
3.7.1	Retardantes de llama	66
3.7.2	Estabilizadores	68
3.7.3	Agentes antiestática	69
3.7.4	Rellenos o cargas	69
3.7.5	Agentes de espumado	70

3.8 Comportamiento viscoelástico de los polímeros	71
3.8.1 Ensayo de relajación de esfuerzos	71
3.8.2 El principio de superposición tiempo-temperatura (ecuación WLF)	74
3.8.3 El principio de superposición de Boltzmann	75
3.8.4 Aplicación de la viscoelasticidad lineal para describir el comportamiento de los polímeros	77
Ejemplos	84
Problemas	87
Referencias	90
4 Propiedades térmicas de los polímeros	96
4.1 Propiedades de los materiales	96
4.1.1 Conductividad térmica	96
4.1.2 Calor específico	103
4.1.3 Densidad	106
4.1.4 Difusividad térmica	109
4.1.5 Coeficiente de expansión térmica lineal	110
4.1.6 Penetración térmica	111
4.1.7 Temperatura de transición vítrea	112
4.1.8 Temperatura de fusión	113
4.2 Medición de datos térmicos	113
4.2.1 Análisis térmico diferencial (DTA)	113
4.2.2 Calorímetro de barrido diferencial (DSC)	115
4.2.3 Análisis térmico-mecánico (TMA)	117
4.2.4 Termogravimetría (TGA)	118
4.2.5 Mediciones de densidad	119
Ejemplos	119
Problemas	121
Referencias	124
5 Reología de los fundidos poliméricos	125
5.1 Introducción	125
5.1.1 Mecánica del continuo	125
5.1.2 El fluido newtoniano generalizado	127
5.1.3 Esfuerzos normales en flujo cortante	130
5.1.4 El número de Débora	131
5.2 Modelos de flujo viscoso	133
5.2.1 El modelo de la ley de potencia	134
5.2.2 El modelo Bird-Carreau-Yasuda	135
5.2.3 El fluido de Bingham	137
5.2.4 Viscosidad elongacional	137
5.2.5 Reología de los termoestables curables	140
5.2.6 Reología de suspensiones	143
5.3 Modelos simplificados de flujo comunes en el procesamiento de polímeros	144

5.3.1 Flujo cortante simple	145
5.3.2 Flujo a presión a través de dos placas	145
5.3.3 Flujo a presión a través de un tubo (flujo de Hagen-Poiseuille)	146
5.3.4 Flujo ade Couette	147
5.4 Modelos de flujo viscoelástico	148
5.4.1 Modelos viscoelásticos diferenciales	148
5.4.2 Modelos viscoelásticos integrales	151
5.5 Reometría	155
5.5.1 Medidor de índice de fluidez (MFI)	156
5.5.2 El viscosímetro capilar	156
5.5.3 Cálculo de la viscosidad mediante el uso de las ecuaciones de Bagley y Weissenberg-Rabinowitsch	158
5.5.4 Aproximación de la viscosidad con el método de la viscosidad representativa	160
5.5.5 El reómetro de cono y placa	161
5.5.6 El reómetro de Couette	162
5.5.7 Reometría extensional	163
5.6 Tensión superficial	166
Ejemplos	171
Problemas	176
Referencias	177
6 Introducción al procesamiento	180
6.1 Extrusión	180
6.1.1 La extrusora de plastificación	184
6.1.1.1 La zona de alimentación	187
6.1.1.2 La zona de fusión	190
6.1.1.3 La zona de dosificación	193
6.1.2 Datos de extrusión	194
6.1.2.1 Datos para láminas	195
6.1.2.2 Datos para tubos	197
6.2 Proceso de mezclado	198
6.2.1 Mezclado distributivo	200
6.2.1.1 Efecto de la orientación	201
6.2.2 Mezclado dispersivo	204
6.2.2.1 Desintegración de aglomerados de partículas sólidas ..	204
6.2.2.2 Rompimiento de pequeñas gotas de fluido	206
6.2.3 Dispositivos de mezclado	210
6.2.3.1 Mezcladores estáticos	211
6.2.3.2 Mezclador Banbury	212
6.2.3.3 Mezclado en extrusoras de tornillo sencillo	214
6.2.3.4 Coamasador	216
6.2.3.5 Extrusoras doble tornillo	217
6.2.4 Consumo de energía durante el mezclado	220
6.2.5 Calidad y eficiencia del mezclado	221
6.2.6 Plastificación	223

6.3 Moldeo por inyección	229
6.3.1 El ciclo de moldeo por inyección	230
6.3.2 La máquina de moldeo por inyección	234
6.3.2.1 La unidad de plastificación y de inyección	234
6.3.2.2 La unidad de cierre	236
6.3.2.3 La cavidad del molde	237
6.3.3 Variaciones del proceso de moldeo por inyección	234
6.4 Formado secundario	241
6.4.1 Hilado de fibras	241
6.4.2 Producción de película	243
6.4.2.1 Producción de película colada	243
6.4.2.2 Soplado de película	244
6.4.3 Moldeo por soplado	245
6.4.3.1 Moldeo por extrusión soplado	245
6.4.3.2 Moldeo por inyección soplado	247
6.4.4 Termoformado	249
6.5 Calandrado	251
6.6 Recubrimiento	253
6.7 Moldeo por compresión	256
6.8 Espumado	258
6.9 Moldeo rotacional	260
Ejemplos	262
Problemas	271
Referencias	275
7 Desarrollo de anisotropía durante el procesamiento	277
7.1 Orientación en la pieza terminada	277
7.1.1 Procesamiento de polímeros termoplásticos	277
7.1.2 Procesamiento de polímeros termoestables	286
7.2 Predicción de la orientación en la pieza terminada	290
7.2.1 Función plana de distribución de orientación	291
7.2.2 Movimiento de una sola partícula	293
7.2.3 Modelo de Jeffery	296
7.2.4 Modelo de Folgar-Tucker	296
7.2.5 Representación tensorial de la orientación de las fibras	297
7.2.5.1 Predicción de orientación en piezas complejas mediante simulación por computador	299
7.3 Daño de la fibra	304
Ejemplos	307
Problemas	309
Referencias	311
8 Solidificación de los polímeros	313
8.1 Solidificación de termoplásticos	313
8.1.1 Termodinámica durante el enfriamiento	313
8.1.2 Morfología	317

8.1.3	Cristalización	317
8.1.4	Transferencia de calor durante la solidificación	322
8.2	Solidificación de polímeros termoestables	325
8.2.1	Reacción de curado	326
8.2.2	Cinética de curado	327
8.2.3	Transferencia de calor durante el curado	333
8.3	Esfuerzos residuales y alabeo de piezas	336
8.3.1	Modelos de esfuerzos residuales	338
8.3.1.1	Modelo de esfuerzos residuales sin cambio de fase	341
8.3.1.2	Modelo para predecir esfuerzos residuales con efectos de cambio de fase	342
8.3.2	Otros modelos sencillos para predecir esfuerzos residuales y alabeo	345
8.3.2.1	Temperatura inhomogénea del molde	346
8.3.2.2	Esfuerzos residuales en una pieza termoestable delgada	348
8.3.2.3	Cambio en la curvatura inducido por anisotropía	349
8.3.3	Predicción del alabeo en piezas reales	345
	Ejemplos	354
	Problemas	356
	Referencias	357
9	Comportamiento mecánico	359
9.1	Conceptos básicos de esfuerzo y deformación	359
9.1.1	Esfuerzo en un plano	360
9.1.2	Deformación en un plano	361
9.2	El ensayo de tensión a corto plazo	361
9.2.1	Elasticidad del caucho	362
9.2.2	El ensayo a la tensión en polímeros termoplásticos	368
9.3	Ensayos de largo plazo	377
9.3.1	Gráficas isócronas e isométricas de fluencia lenta	381
9.4	Ensayos mecánicos dinámicos	383
9.4.1	Péndulo de torsión	383
9.4.2	Ensayo oscilatorio sinusoidal	387
9.5	Comportamiento viscoelástico de los polímeros	388
9.5.1	Modelo de Kelvin	389
9.5.1.1	Respuesta de fluencia lenta del modelo de Kelvin	389
9.5.1.2	Relajación de esfuerzos en el modelo de Kelvin	390
9.5.1.3	Recuperación de la deformación en el modelo de Kelvin	391
9.5.1.4	Respuesta dinámica en el modelo de Kelvin	391
9.5.2	Modelo de Jeffrey	391
9.5.2.1	Respuesta de fluencia lenta del modelo de Jeffrey	389
9.5.2.2	Relajación de esfuerzos en el modelo de Jeffrey	390
9.5.2.3	Recuperación de la deformación en el modelo de Jeffrey	394
9.5.3	Modelo sólido lineal estándar	394
9.5.3.1	Respuesta de fluencia lenta del modelo sólido lineal estándar	395

9.5.3.2	Relajación de esfuerzos en el modelo sólido lineal estándar	396
9.5.4	Modelo de Maxwell-Weichert	396
9.5.4.1	Relajación de esfuerzos en el modelo de Maxwell-Weichert	397
9.5.4.2	Respuesta dinámica en el modelo de Maxwell-Weichert	398
9.6	Efectos de la estructura y la composición en las propiedades mecánicas	399
9.6.1	Termoplásticos amorfos	400
9.6.2	Termoplásticos semi-cristalinos	402
9.6.3	Termoplásticos orientados	404
9.6.4	Polímeros entrecruzados	409
9.7	Comportamiento mecánico de polímeros rellenos y reforzados	411
9.7.1	Relación esfuerzo-deformación anisotrópica	413
9.7.2	Laminados comuestos reforzados con fibras alineadas	414
9.7.3	Transformación de las propiedades de un compuesto laminado reforzados con fibra	417
9.7.4	Análisis de laminados compuestos reforzados usando la función de distribución de orientación de las fibras	420
9.8	Estabilidad de la resistencia al calor	421
	Ejemplos	423
	Problemas	431
	Referencias	435
10	Falla en polímeros	437
10.1	Mecánica de fractura	437
10.1.1	Preducciones de fractura basadas en el factor de intensidad de esfuerzos	438
10.1.2	Preducciones de fractura con el uso de balances de energía	440
10.1.3	Preducciones de fractura lineal viscoelástica basadas en integrales-J	443
10.2	Resistencia de corto plazo a tensión	445
10.2.1	Falla frágil	446
10.2.2	Falla dúctil	450
10.2.3	Falla de sistemas rellenos y de compuestos	454
10.3	Resistencia al impacto	457
10.3.1	Métodos de ensayo de impacto	464
10.3.2	Análisis de la mecánica de fractura en falla por impacto ..	478
10.4	Fractura por fluencia lenta (<i>creep</i>)	457
10.4.1	Ensayos de ruptura por fluencia lenta	475
10.4.2	Análisis de la mecánica de fractura en fluencia lenta	478
10.5	Fatiga	479
10.5.1	Métodos de ensayo de fatiga	479
10.5.2	Análisis de la mecánica de fractura en falla por fatiga	489
10.6	Fricción y desgaste	490
10.7	Estabilidad de las estructuras poliméricas	494
10.8	Efectos medio ambientales en la falla de polímeros	496

10.8.1 Desgaste ambiental	496
10.8.2 Degradación química	502
10.8.3 Degradación térmica de los polímeros	505
Ejemplos	506
Problemas	509
Referencias	510
11 Propiedades eléctricas	513
11.1 Comportamiento dieléctrico	513
11.1.1 Coeficiente dieléctrico	513
11.1.2 Mecanismos de polarización dieléctrica	517
11.1.3 Factor de disipación eléctrica	521
11.1.4 Implicaciones de las pérdidas eléctrica y térmica en un dieléctrico	525
11.2 Conductividad eléctrica	526
11.2.1 Resistencia eléctrica	526
11.2.2 Causas físicas de la conductividad volumétrica	528
11.3 Problemas de aplicación	526
11.3.1 Resistencia eléctrica	530
11.3.2 Carga electrostática	534
11.3.3 Electretos	535
11.3.4 Protección de la interferencia electromagnética (EMI)	535
11.4 Propiedades magnéticas	536
11.4.1 Magnetizabilidad	536
11.4.2 Resonancia magnética	537
Referencias	538
12 Propiedades ópticas de los polímeros	539
12.1 Índice de refracción	539
12.2 Fotoelasticidad y birrefringencia	542
12.3 Transparencia, reflexión, absorción y transmitancia	546
12.4 Brillo	553
12.5 Color	554
12.6 Espectroscopía infrarroja	557
12.7 Pirometría infrarroja	559
12.8 Calentamiento con radiación infrarroja	562
Referencias	563
13 Propiedades de permeabilidad	565
13.1 Adsorción	565
13.2 Difusión y permeación	567
13.3 Medición de S, D y P	573
13.4 Corrosión y agrietamiento de polímeros	575
13.5 Difusión de moléculas de polímero y auto-difusión	578
Referencias	578

14 Propiedades acústicas	579
14.1 Velocidad del sonido	579
14.2 Reflexión del sonido	581
14.3 Absorción del sonido	583
Referencias	563
Apéndice	585
Índice	601