Tierras Raras

GEOLOGÍA, PRODUCCIÓN, APLICACIONES Y RECICLADO

Manuel Bustillo Revuelta
Javier Ruiz Sánchez-Porro

FUEYO EDITORES

Índice

Dedicatoria 5
Prólogo 7
Índice 11
Índice de anunciantes 17

1. Introducción

1.1. Definición de tierras raras 19
1.2. Descubrimiento de las tierras raras y etimología 23
1.3. Abundancia de las tierras raras en la corteza terrestre 25
1.3.1. Principales yacimientos de tierras raras en el mundo 25
1.4. Mineralogía de las tierras raras 27
1.5. Principales aplicaciones de las tierras raras 31
1.6. Carácter crítico de las tierras raras 35
1.6.1. Estados Unidos 35
1.6.2. Unión Europea 38
1.6.3. World Materials Forum 42
1.6.4. Crisis del año 2010 42
1.7. Producción y demanda de las tierras raras 43
1.8. El problema del equilibrio en la producción de las tierras raras 46
1.9. Precios de las tierras raras 52
1.10. Factores que condicionan la economía de las tierras raras 55

2. Los yacimientos de tierras raras

2.1. Geoquímica de las tierras raras 57
2.1.1. Introducción 57
2.1.2. Abundancia de las tierras raras en la tierra y en los principales tipos de rocas 59
2.1.3. Abundancia de las tierras raras en las fases minerales 62
2.1.4. Mineralogía de las tierras raras en los yacimientos 62

2.2. Procesos de formación de los yacimientos de tierras raras 68
2.2.1 Formación en magmas carbonatíticos 68
2.2.2 Formación en magmas alcalinos 69
2.2.3. Formación a través de procesos hidrotermales 70
2.2.4. Formación a través de procesos de alteración 71
2.2.5. Geoquímica de las tierras raras en soluciones acuosas 72
2.3. Tipos de yacimientos de tierras raras 73
2.3.1. Depósitos en carbonatitas 77
2.3.2. Depósitos en rocas ígneas peralcalinas 83
2.3.3. Depositos en venas y skarn 89
2.3.4. Depósitos de alteración 90
2.3.5. Depósitos en arcillas con adsorción iónica 96
2.3.6. Depósitos en placeres 100
2.3.7. Otros tipos de yacimientos 104
2.4. Distribución geográfica de los yacimientos de tierras raras 107
2.4.1. China 112
2.4.2. Estados Unidos 117
2.4.3. Europa 119
2.4.4. Australia 124
2.4.5. Brasil 127
2.4.6. Rusia 129
2.4.7. Canadá 129
2.4.8. África 133
2.4.9. Otros 137
2.5. Principales yacimientos de tierras raras en el mundo 138
2.5.1. Bayan Obo 145
2.5.2. Maoniuping 147
2.5.3. Arcillas con adsorción iónica del sur de China 149
2.5.4. Mount Weld 153
2.5.5. Lovozero 154
2.5.6. Mountain Pass 155

3. Procesado de las tierras raras

3.1. Introducción 157
3.2. Métodos de explotación 162
3.3. Técnicas de concentración de los minerales 168
3.3.1. Métodos basados en la gravedad 172
3.3.2. Separación magnética 175
3.3.3. Separación electrostática 179
3.3.4. Flotación 179
3.4. Hidrometalurgia: lixiviado 193
3.4.1. Lixiviado de la bastnasita 196

3.4.2. Lixiviado de la monacita 197
3.4.3. Lixiviado de la xenotima 198
3.4.4. Lixiviado de las arcillas con adsorción iónica 202
3.4.5. Lixiviado de otros minerales con tierras raras 206
3.4.6. Eliminación de las impurezas de carácter radioactivo 210
3.5. Procesos de separación 211
3.5.1. Oxidación-reducción 212
3.5.2. Cristalización fraccionada 212
3.5.3. Precipitación fraccionada 213
3.5.4. Intercambio iónico 214
3.5.5. Extracción por solvente 215
3.6. Reducción y refino de las tierras raras 220
3.6.1. Electrolisis de sales fundidas (*electrowinning*) 221
3.6.2. Reducción metalotérmica 225
3.6.3. Procesos de refino 226

4. Aplicaciones y usos de las tierras raras

4.1. Introducción 227
4.2. Catalizadores 238
4.2.1. Craqueo (*cracking*) catalítico del petróleo 239
4.2.2. Convertidores catalíticos de automóviles 245
4.2.3. Otros usos 247
4.3. Imanes permanentes 248
4.3.1. Imanes de samario-cobalto 252
4.3.2. Imanes de neodimio-hierro-boro 255
4.4. Aleaciones y metal 275
4.4.1. Hierro fundido 275
4.4.2. Acero 275
4.4.3. Aleaciones de magnesio, aluminio y otras 276
4.5. Baterías NiMH 278
4.5.1. Otras baterías 280
4.6. Fósforos 280
4.6.1. Bombillas fluorescentes compactas 281
4.6.2. Otras lámparas 282
4.6.3. Pantallas de rayos X 283
4.6.4. Tubos de rayos catódicos 283
4.6.5. Monitores y pantallas de televisión 284
4.6.6. Otros usos 284
4.7. Pulido del vidrio 285
4.8. Cerámica 290
4.8.1. Colorantes 290
4.8.2. Refractarios 290
4.8.3. Electrónica 291

4.8.4. Cerámicas estructurales 292
4.8.5. Otras cerámicas 297
4.9. Vidrio 298
4.9.1. Decolorantes 298
4.9.2. Colorantes 298
4.9.3. Aumento del índice de refracción 299
4.9.4. Protección contra la radiación 300
4.9.5. Fibra óptica 300
4.10. Otras aplicaciones 305
4.10.1. Láseres 305
4.10.2. Aplicaciones nucleares 309
4.10.3. Medicina 310
4.10.4. Magnetostricción 310
4.10.5. Refrigeración magnética 311
4.10.6. Fertilizantes 313
4.10.7. Textiles 313
4.10.8. Joyería 313
4.10.9. Pintura 313
4.10.10. Iluminación 313
4.10.11. Microondas 314
4.10.12. Otros usos en diversas ciencias 314
4.11. Defensa 315
4.12. Aplicaciones y usos por elementos 317
4.12.1. Lantano 318
4.12.2. Cerio 319
4.12.3. Praseodimio 321
4.12.4. Neodimio 321
4.12.5. Prometio 323
4.12.6. Samario 324
4.12.7. Europio 325
4.12.8. Gadolinio 326
4.12.9. Terbio 327
4.12.10. Disprosio 328
4.12.11. Holmio 330
4.12.12. Erbio 330
4.12.13. Tulio 331
4.12.14. Iterbio 332
4.12.15. Lutecio 334
4.12.16. Escandio 337
4.12.17. Itrio 341
4.12.18. Resumen de las principales aplicaciones de los elementos de tierras raras 343
4.13. Perspectivas de las tierras raras en las aplicaciones industriales 346

5. Reciclado de las tierras raras

5.1. Introducción 353
5.2. Los residuos de los aparatos eléctricos y electrónicos 362
5.3. Minería urbana 368
5.4. Métodos de reciclado 370
5.4.1. Métodos hidrometalúrgicos 371
5.4.2. Métodos pirometalúrgicos 372
5.4.3. Extracción en fase gaseosa 374
5.5. Reciclado de las tierras raras en los productos fuera de uso 375
5.5.1. Imanes permanentes 376
5.5.2. Fósforos 386
5.5.3. Baterías 395
5.5.4. Catalizadores 396
5.6. Reciclado de las tierras raras en los residuos industriales líquidos y sólidos .. 396
5.6.1. Cenizas del carbón 396
5.6.2. Fosfoyeso 398
5.6.3. Barros rojos 399
5.6.5. Residuos mineros 400
5.6.6. Escorias metalúrgicas 402

Bibliografía 405