

Capítulo 23

Metales y metalurgia

El oro se ha usado con fines artísticos desde hace muchos siglos. Esta obra de arte es la llamada Máscara Áurea de Agamenón, de Micenas, la cual se exhibe en el Museo Natural de Atenas, Grecia.



- 23.1** Presencia de los metales y su distribución en la naturaleza
- 23.2** Pirometalurgia
- 23.3** Hidrometalurgia
- 23.4** Electrometalurgia
- 23.5** El enlace metálico
- 23.6** Aleaciones
- 23.7** Metales de transición
- 23.8** Química de algunos metales de transición

EN EL CAPÍTULO 22 examinamos la química de los elementos no metálicos. En este capítulo enfocaremos nuestra atención en los metales. Los metales han desempeñado un papel importantísimo en el desarrollo de la civilización. La historia antigua se suele

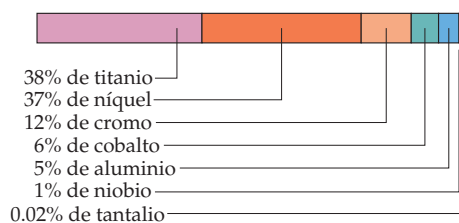
dividir en la Edad de Piedra, la Edad de Bronce y la Edad de Hierro, con base en la composición de las herramientas utilizadas en cada era. Las sociedades modernas dependen de una gran variedad de metales para fabricar herramientas, maquinaria y otros artículos. Los químicos y otros científicos han encontrado diversidad de usos, incluso para los metales menos abundantes, en su búsqueda de materiales que satisfagan las necesidades tecnológicas en continua evolución. Para ilustrar este punto, la figura 23.1 ► muestra la composición aproximada de un motor a reacción de alto rendimiento. Adviértase que el hierro, por largo tiempo el metal predominante en la tecnología, no está presente en una proporción significativa.

En este capítulo consideraremos las formas químicas en las que los elementos metálicos se encuentran en la naturaleza, así como los medios que nos permiten obtener metales de estas fuentes. Examinaremos además los enlaces de los sólidos y veremos cómo se emplean en la tecnología moderna los metales y las mezclas de metales, llamadas *aleaciones*. Por último, estudiaremos específicamente las propiedades de los metales de transición. Como se verá, la química de los metales es variada e interesante.



► Lo que veremos ◀

- En primer término examinaremos la presencia de metales en la *litosfera*, y estudiaremos algunos de sus *minerales* comunes.
- La *metalurgia* es la tecnología de extracción de metales de sus fuentes naturales y de la preparación para su uso.
- Se estudia la *pirometalurgia*, esto es, la metalurgia a temperaturas elevadas, prestando una atención particular al hierro.
- Se analiza la *hidrometalurgia*, esto es, la extracción de metales por medio de disoluciones acuosas, prestando atención especial al aluminio.
- Se examina la *electrometalurgia*, que utiliza la electroquímica para reducir y refinar metales, enfocando la atención en el sodio, el aluminio y el cobre.
- Se repasan las propiedades físicas de los metales para luego explicarlas en términos de dos modelos del *enlace metálico*: el modelo de mar de electrones y el modelo de orbitales moleculares.
- Se describen distintos tipos de *aleaciones*: aleaciones en disolución, aleaciones heterogéneas y compuestos intermetálicos.
- Se estudian las características generales de los *metales de transición*; se examinan sus propiedades físicas, configuraciones electrónicas, estados de oxidación y propiedades magnéticas.
- Por último, se examina la química de algunos metales de transición (Cr, Fe y Cu).



(a)



(b)

▲ **Figura 23.1** (a) Elementos metálicos que se emplean en la construcción de un motor a reacción. (b) Motor a reacción moderno.

23.1 Presencia de los metales y su distribución en la naturaleza

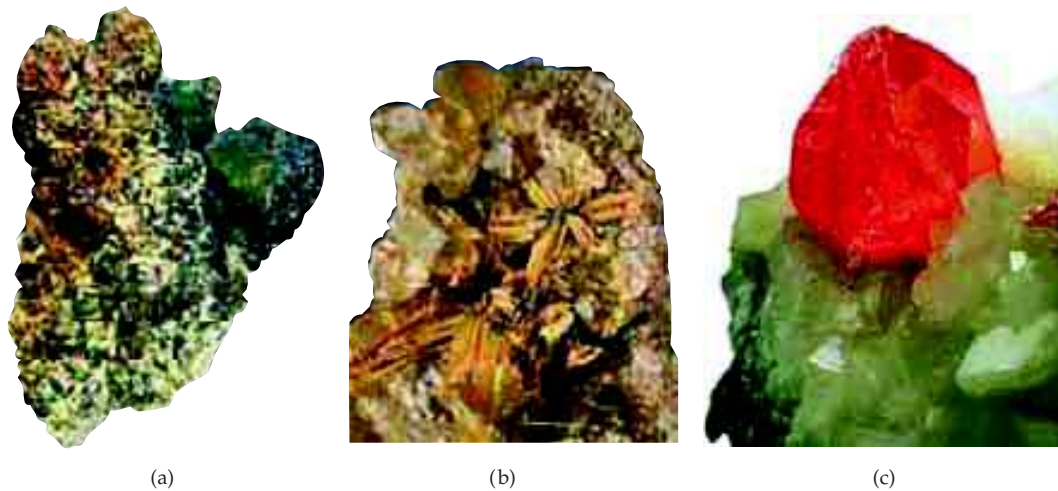
La parte de nuestro ambiente que constituye el suelo bajo nuestros pies se llama **litosfera**. La litosfera aporta todos los materiales que utilizamos como alimento, vestido, abrigo y entretenimiento. Aunque en su mayor parte la Tierra es sólida, sólo tenemos acceso a una pequeña región próxima a la superficie. En tanto que el radio de la Tierra es de 6370 km, la mina más profunda no penetra más allá de 4 km en el interior de la Tierra.

Muchos de los metales de más utilidad para nosotros no son particularmente abundantes en esa parte de la litosfera a la que tenemos acceso con facilidad. En consecuencia, la presencia natural y la distribución de depósitos *concentrados* de estos elementos suelen jugar un papel en la política internacional en la medida en que los países compiten por el acceso a estos materiales. Los depósitos que contienen metales en cantidades susceptibles de explotación económica se conocen como **minas**. Por lo regular, es preciso separar los compuestos o elementos deseados de una gran cantidad de material indeseable, para después tratarlos químicamente de modo que se puedan utilizar. Cada año se extraen alrededor de 2.3×10^4 kg (23 toneladas) de materiales de la litosfera para sostener a cada habitante de un país como Estados Unidos. Debido a que se están agotando las fuentes más ricas de muchas sustancias, en el futuro probablemente será necesario tratar volúmenes mayores de materias primas de menor calidad. Por consiguiente, la extracción de los compuestos y elementos que necesitamos podría costar más en términos tanto de energía como de repercusiones ambientales.

Minerales

A excepción del oro y de los metales del grupo del platino (Ru, Rh, Pd, Os, Ir y Pt), casi todos los elementos metálicos se encuentran en la naturaleza en compuestos inorgánicos sólidos llamados **minerales**. La tabla 23.1 ► presenta una lista de las principales fuentes de minerales de varios metales comunes, tres de los cuales se muestran en la figura 23.2 ►. Adviértase que los minerales se identifican con nombres comunes en vez de nombres químicos. Los nombres de los minerales adquieren, por lo regular, el de los lugares donde fueron descubiertos, la persona que los descubrió, o alguna característica como el color. Por ejemplo, el nombre *malaquita* proviene de la palabra griega *malache*, que es el nombre de un tipo de árbol cuyas hojas son del color del mineral.

En términos comerciales, las fuentes más importantes de metales son minerales de óxidos, sulfuros y carbonatos. Los minerales denominados silicatos (Sección 22.10) son muy abundantes, pero por lo general resultan difíciles de concentrar y reducir. Por consiguiente, la mayoría de los silicatos no son fuentes económicas de metales.



▲ **Figura 23.2** Tres minerales comunes: (a) calcopirita; (b) rutilo (en una matriz de cuarzo) y (c) cinabrio.

TABLA 23.1 Principales fuentes minerales de algunos metales comunes

Metal	Mineral	Composición
Aluminio	Bauxita	Al_2O_3
Cobre	Calcocita	Cu_2S
	Calcopirita	CuFeS_2
	Malaquita	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$
Cromo	Cromita	FeCr_2O_4
Estaño	Casiterita	SnO_2
Hierro	Hematita	Fe_2O_3
	Magnetita	Fe_3O_4
Manganeso	Pirolusita	MnO_2
Mercurio	Cinabrio	HgS
Molibdeno	Molibdenita	MoS_2
Plomo	Galena	PbS
Titanio	Rutilo	TiO_2
	Ilmenita	FeTiO_3
Zinc	Esfalerita	ZnS



Ejercicios con el CD-ROM
Fuentes minerales de menas
(Mineral Source of Mineral
Ores)

Metalurgia

La **metalurgia** es la ciencia y la tecnología de la extracción de metales de sus fuentes naturales y de su preparación para usos prácticos. Por lo común comprende varias etapas: (1) explotación de yacimientos, (2) concentración de la mena o alguna otra forma de preparación de ésta para tratamientos ulteriores, (3) reducción de la mena para obtener el metal libre, (4) refinación o purificación del metal y (5) mezclado del metal con otros elementos a fin de modificar sus propiedades. El producto de este último proceso es una *aleación*, esto es, un material metálico compuesto de dos o más elementos (Sección 23.6).

Una vez extraída la mena del yacimiento, por lo regular se tritura y se muele, y después se trata para concentrar el metal deseado. La etapa de concentración aprovecha las diferencias de propiedades entre el mineral y el material indeseable que lo acompaña, el cual se conoce como *ganga*. Por ejemplo, la mena de hierro cruda se enriquece y se le da forma de gránulos (Figura 23.3 ►).



▲ **Figura 23.3** En esta mina de mena de hierro a cielo abierto de la Península Superior de Michigan, la mena cruda se concentra y se moldea en gránulos para el transporte.

Una vez concentrada la mena, se siguen diversos procedimientos químicos para obtener el metal en un estado de pureza idóneo. En las Secciones de la 23.2 a la 23.4 examinaremos algunos de los procesos metalúrgicos más comunes. Veremos que estas técnicas aplican muchos de los conceptos básicos que ya hemos estudiado en el texto.

23.2 Pirometalurgia

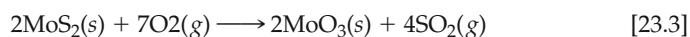
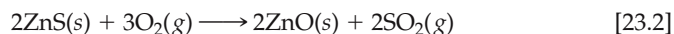
Un gran número de procesos metalúrgicos utiliza temperaturas elevadas para modificar el mineral químicamente y reducirlo a metal libre. El uso de calor para modificar o reducir el mineral se llama **pirometalurgia**. (*Piro* significa “a alta temperatura”.)

La **calcinación** es el calentamiento de una mena para provocar su descomposición y la eliminación del producto volátil. Este producto volátil podría ser, por ejemplo, CO_2 o H_2O . Los carbonatos se suelen calcinar para expulsar CO_2 y formar el óxido del metal. Por ejemplo,



Casi todos los carbonatos se descomponen con razonable rapidez a temperaturas de 400 a 500°C, aunque el CaCO_3 requiere una temperatura de alrededor de 1000°C. La mayor parte de los minerales hidratados pierden H_2O a temperaturas del orden de 100°C a 300°C.

La **tostación** es un tratamiento térmico que favorece las reacciones químicas entre la mena y la atmósfera del horno. Este tratamiento puede dar lugar a la oxidación o la reducción, e ir acompañado de calcinación. Un importante proceso de tostación es la oxidación de menas de sulfuro, en la que el metal se transforma en el óxido, como en los ejemplos que siguen:



La mena de sulfuro de un metal menos activo, como el mercurio, se puede tostar para obtener el metal libre:



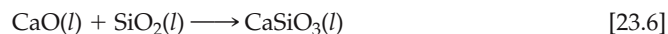
En muchos casos se puede obtener el metal libre empleando una atmósfera reductora durante la tostación. El monóxido de carbono crea una atmósfera de este tipo, y es frecuente su uso para reducir óxidos metálicos:



Sin embargo, este método de reducción no siempre es factible, en especial si los metales son activos, pues son difíciles de reducir.

La **fundición** es un proceso de fusión en el que los materiales formados en el curso de las reacciones químicas se separan en dos o más capas. La fundición suele implicar una etapa de tostación en el mismo horno. Dos tipos importantes de capas que se forman en los hornos de fundición son el metal fundido y la escoria. El metal fundido puede consistir casi en su totalidad de un solo metal, o bien ser una disolución de dos o más metales.

La **escoria** se compone principalmente de minerales de silicato fundidos, con aluminatos, fosfatos y otros compuestos iónicos. Se forma una escoria cuando un óxido metálico básico como el CaO reacciona a temperaturas elevadas con sílice fundida (SiO_2):



Los procedimientos pirometalúrgicos pueden incluir no sólo la concentración y reducción de un mineral, sino además la refinación del metal. La **refinación** es el tratamiento de un producto metálico crudo, relativamente impuro, de un proceso metalúrgico para aumentar su pureza y definir mejor su composición. En ciertos casos

la meta del proceso de refinación es obtener el metal mismo en forma pura. Sin embargo, el objetivo también puede ser producir una mezcla de composición bien definida, como en la producción de aceros a partir de hierro crudo.



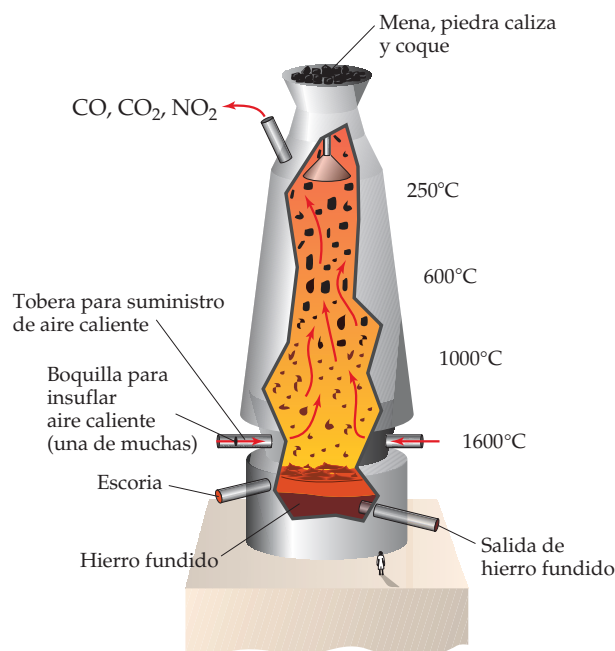
Ejercicios con el CD-ROM
Termita
(Thermite)

Pirometalurgia del hierro

El proceso pirometalúrgico más importante es la reducción de hierro. Este metal está presente en muchos minerales, pero las fuentes más importantes son dos minerales de óxido de hierro: la hematita (Fe_2O_3) y la magnetita (Fe_3O_4). Conforme los depósitos de mayor calidad se han ido agotando, se ha recurrido a menas de menor calidad. La *taconita*, que consiste en sílice de grano fino con proporciones variables de hematita y magnetita, ha adquirido mayor importancia como la fuente de hierro de la cordillera de Mesabi al oeste del Lago Superior.

La reducción de óxidos de hierro se lleva a cabo en un *alto horno* como el que se ilustra en la figura 23.4 ▼. Un alto horno es, en esencia, un enorme reactor químico capaz de trabajar de manera continua. Los hornos más grandes tienen más de 60 m de altura y 14 m de ancho. Cuando trabajan a toda su capacidad, producen hasta 10,000 toneladas de hierro al día.

El alto horno se carga por la parte superior con una mezcla de mena de hierro, coque y piedra caliza. El coque es hulla tratada en ausencia de aire para expulsar sus componentes volátiles, y contiene de 85 a 90% de carbono. El coque sirve como combustible que produce calor al quemarse en la parte inferior del horno. Es además la fuente de los gases reductores CO y H_2 . La piedra caliza (CaCO_3) sirve como fuente del óxido básico CaO , que reacciona con los silicatos y otros componentes de la mena para formar la escoria. El aire, que entra en el alto horno por la parte inferior luego de ser precalentado, es también una materia prima importante, pues se requiere para la combustión del coque. Para producir 1 kg de hierro crudo, llamado *hierro de arrabio*, se necesitan aproximadamente 2 kg de mena, 1 kg de coque, 0.3 kg de piedra caliza y 1.5 kg de aire.



◀ **Figura 23.4** Alto horno para la reducción de mena de hierro. Adviértanse las temperaturas crecientes conforme los materiales descienden por el horno.

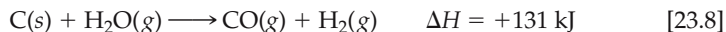


▲ **Figura 23.5** Vertido del hierro fundido para su transporte a un convertidor de oxígeno básico. Los fabricantes de acero convierten el hierro en acero agregando chatarra y otros metales como agentes de aleación.

En el horno el oxígeno reacciona con el carbono del coque y forma monóxido de carbono:

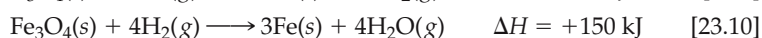


El vapor de agua presente en el aire también reacciona con el carbono y produce monóxido de carbono e hidrógeno:



La reacción del coque con oxígeno es exotérmica y aporta calor para el funcionamiento del horno, en tanto que su reacción con vapor de agua es endotérmica. Por tanto, la adición de vapor de agua al aire constituye un medio para regular la temperatura del horno.

En la parte superior del horno, la piedra caliza se descompone en CaO y CO_2 . Aquí mismo, además, el CO y el H_2 reducen los óxidos de hierro. Por ejemplo, en el caso del Fe_3O_4 las reacciones importantes son



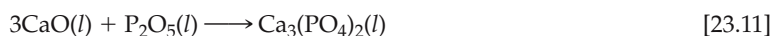
La reducción de otros elementos presentes en la mena también se lleva a cabo en las partes más calientes del horno, donde el carbono es el agente reductor principal.

El hierro fundido se acumula en la base del horno, como se muestra en la figura 23.4. Encima de él hay una capa de escoria fundida producto de la reacción del CaO con la sílice presente en la mena (Ecuación 23.6). La capa de escoria que cubre el hierro fundido ayuda a impedir que éste reaccione con el aire que entra. El horno se vacía periódicamente para drenar la escoria y el hierro fundido. El hierro producido en el horno se puede moldear en lingotes sólidos. La mayor parte, sin embargo, se utiliza directamente en la manufactura de acero. Para ello se transporta, aún en estado líquido, al taller siderúrgico (Figura 23.5 ◀). La producción de hierro de arrabio en altos hornos ha disminuido en años recientes debido a que existen otros procesos de reducción y al creciente uso de chatarra en la fabricación de acero. Con todo, los altos hornos son todavía un importante medio para reducir óxidos de hierro.

Formación del acero

El acero es una aleación de hierro. La producción de hierro a partir de su mena es un proceso químico de reducción del cual se obtiene un hierro crudo con muchas impurezas indeseables. El hierro de alto horno contiene típicamente de 0.6 a 1.2% de silicio, de 0.4 a 2.0% de manganeso, y cantidades menores de fósforo y azufre. Además, hay una cantidad considerable de carbono disuelto. En la producción de acero estos elementos se eliminan por oxidación en un recipiente llamado *convertidor*. En la manufactura moderna de acero, el agente oxidante es O_2 puro o diluido con argón. No se puede usar aire directamente como fuente de O_2 porque el N_2 reacciona con el hierro fundido para formar nitruro de hierro, que torna quebradizo el acero.

En la figura 23.6 ► se muestra una vista en corte transversal de un diseño de convertidor. En este convertidor se insufla O_2 diluido con argón directamente en el metal fundido. El oxígeno reacciona exotérmicamente con el carbono, el silicio y muchas impurezas metálicas y reduce así la concentración de estos elementos en el hierro. El carbono y el azufre se expulsan en forma de CO y SO_2 gaseosos, respectivamente. El silicio se oxida a SiO_2 y se suma a la escoria que pudiese haber estado presente, desde el principio, en la fundición. Los óxidos metálicos reaccionan con el SiO_2 y forman silicatos. La presencia de una escoria básica también es importante para eliminar el fósforo:



Casi todo el O_2 insuflado en el convertidor se consume en las reacciones de oxidación. Vigilando la concentración de O_2 en el gas que sale del convertidor es posible saber cuándo se ha completado prácticamente la oxidación. Normalmente toma alrededor de 20 min oxidar las impurezas presentes en el hierro. Una vez alcanzada la composición deseada, el contenido del convertidor se vierte en un gran cazo de



◀ **Figura 23.6** Convertidor para la refinación del hierro. Se insufla una mezcla de oxígeno y argón a través del hierro fundido y la escoria. El calor generado por la oxidación de las impurezas mantiene la mezcla en estado de fusión. Cuando se alcanza la composición deseada, se inclina el convertidor para verter su contenido.

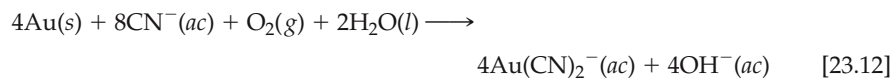
colada. Para producir aceros con diversas propiedades, se agregan los elementos necesarios para formar la aleación al cazo de colada que se está llenando. La mezcla todavía fundida se vierte en moldes, donde solidifica.

23.3 Hidrometalurgia

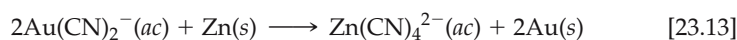
Los procesos pirometalúrgicos consumen grandes cantidades de energía y suelen ser fuentes de contaminación atmosférica, en especial por dióxido de azufre. En el caso de ciertos metales se han ideado otras técnicas en las que el metal se extrae de su mena por medio de reacciones acuosas. Estos procesos se conocen como **hidrometalurgia** (*hidro* significa “agua”).

El proceso hidrometalúrgico más importante es la **lixiviación**, en la cual el compuesto que contiene el metal deseado se disuelve de modo selectivo. Si el compuesto es soluble en agua, el agua misma es un agente de lixiviación idóneo. Es más común que el agente sea una disolución acuosa, de un ácido, base o sal. El proceso de disolución suele implicar la formación de un ion complejo. ∞ (Sección 17.5) Como ejemplo examinaremos la lixiviación del oro.

Como se comentó en el recuadro de “Una perspectiva más detallada” de la Sección 4.4, el oro metálico suele hallarse relativamente puro en la naturaleza. A medida que los depósitos concentrados de oro elemental se han agotado, las fuentes de menor calidad han adquirido mayor importancia. El oro de menas de baja calidad se concentra colocando la mena triturada sobre grandes planchas de concreto, donde se rocía con una disolución de NaCN. En presencia de CN^- y aire, el oro se oxida y forma el ion estable $\text{Au}(\text{CN})_2^-$, que es soluble en agua:



Una vez que se ha lixiviado selectivamente de una mena, el ion metálico se precipita de la disolución en forma de metal libre o de un compuesto iónico insoluble. El oro, por ejemplo, se obtiene de su complejo de cianuro por reducción con polvo de zinc:

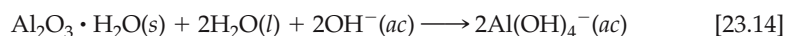


Hidrometalurgia del aluminio

Entre todos los metales, el aluminio ocupa el segundo lugar después del hierro en términos de uso comercial. La producción mundial de aluminio es de alrededor de

1.5×10^{10} kg (15 millones de toneladas) anuales. La mena de aluminio más útil es la *bauxita*, en la que el Al se encuentra en forma de óxidos hidratados: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$. El valor de x es variable, y depende del mineral en que esté presente en particular. Debido a que los depósitos de bauxita en Estados Unidos son limitados, este país importa la mayor parte de la mena que utiliza en la producción de aluminio.

Las impurezas principales presentes en la bauxita son SiO_2 y Fe_2O_3 . Es indispensable separar el Al_2O_3 de estas impurezas antes de recuperar el metal por reducción electroquímica como se describe en la sección 23.4. El método que se emplea para purificar la bauxita, llamado **proceso Bayer**, es un procedimiento hidrometalúrgico. Primero, la mena se tritura y se muele, y después se digiere en una disolución acuosa concentrada de NaOH, de alrededor de 30% de NaOH en masa, a una temperatura comprendida entre 150 y 230°C. Se mantiene una presión suficiente, de hasta 30 atm, para impedir la ebullición. El Al_2O_3 se disuelve en esta disolución y forma el ion complejo aluminato, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$:



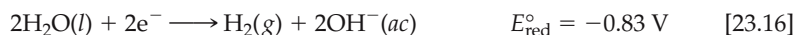
Los óxidos de hierro(III) no se disuelven en esta disolución fuertemente básica. Esta diferencia de comportamiento entre los compuestos de aluminio y los de hierro se debe a que el Al^{3+} es anfótero, no así el Fe^{3+} . ∞ (Sección 17.5) Por consiguiente, la disolución de aluminato se puede separar por filtración de los sólidos que contienen hierro. A continuación se reduce el pH de la disolución, con lo cual precipita el hidróxido de aluminio.

Una vez filtrado, el precipitado de hidróxido de aluminio se calcina como preparativo para su electrorreducción a metal. La disolución recuperada de la filtración se concentra de nuevo para utilizarla otra vez. Esto se consigue calentando para evaporar agua de la disolución, un procedimiento que consume mucha energía y es la parte más costosa del proceso Bayer.

23.4 Electrometalurgia

Muchos procesos de reducción de menas metálicas o de refinación de metales se basan en la electrólisis. ∞ (Sección 20.9) En conjunto, estos procesos se describen como **electrometalurgia**. Los procedimientos electrometalúrgicos se pueden diferenciar a grandes rasgos de acuerdo a que la electrólisis se aplique a una sal fundida o a una disolución acuosa.

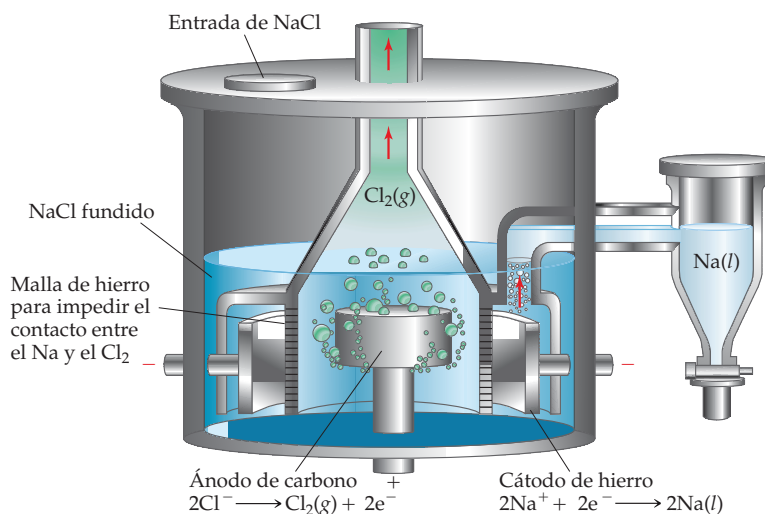
Los métodos electrolíticos son importantes para obtener los metales más activos, como sodio, magnesio y aluminio. Estos metales no se pueden obtener de soluciones acuosas porque el agua se reduce con más facilidad que los iones metálicos. Los potenciales estándar de reducción del agua, en condiciones tanto ácidas como básicas, son más positivos que los del Na^+ ($E_{\text{red}}^\circ = -2.71$ V), Mg^{2+} ($E_{\text{red}}^\circ = -2.37$ V) y Al^{3+} ($E_{\text{red}}^\circ = -1.66$ V):



Para formar estos metales por reducción electroquímica, por tanto, es necesario emplear como medio una sal fundida, en la cual el ion metálico de interés es la especie que se reduce con más facilidad.

Electrometalurgia del sodio

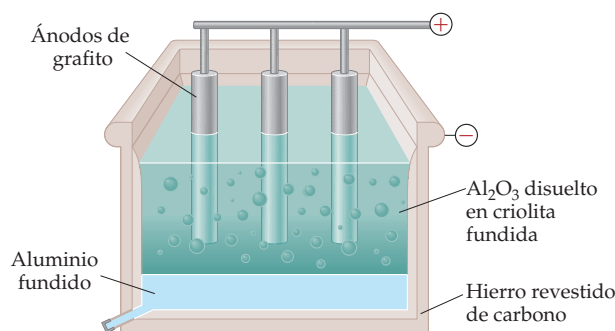
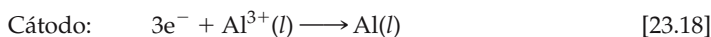
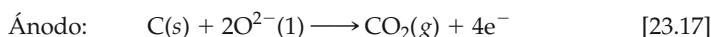
En la preparación comercial de sodio, se electroliza NaCl fundido en una celda de diseño especial llamada **celda de Downs**, la cual se ilustra en la figura 23.7 \blacktriangleright . Se agrega cloruro de calcio (CaCl_2) para abatir el punto de fusión del NaCl, del punto de fusión normal de 804°C, a alrededor de 600°C. Se impide que el $\text{Na}(\text{l})$ y el $\text{Cl}_2(\text{g})$ producidos en la electrólisis entren en contacto y formen de nuevo NaCl. Además, es necesario evitar que el Na tenga contacto con oxígeno porque el metal se oxidaría rápidamente en las condiciones de alta temperatura de la reacción de la celda.



◀ **Figura 23.7** Celda de Downs para la producción comercial de sodio.

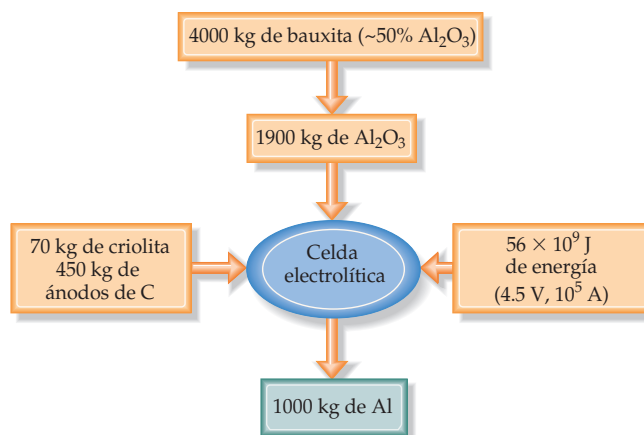
Electrometalurgia del aluminio

En la sección 23.3 se analizó el proceso Bayer, por el cual se concentra la bauxita para producir hidróxido de aluminio. Cuando se calcina este concentrado a temperaturas de más de 1000°C, se forma óxido de aluminio anhidro (Al₂O₃). El óxido de aluminio anhidro funde a más de 2000°C. Esta temperatura es demasiado alta para usar el óxido como medio fundido durante la formación electrolítica de aluminio libre. El proceso electrolítico que se utiliza en escala comercial para producir aluminio se conoce como **proceso Hall**, así llamado en honor a su inventor, Charles M. Hall (véase el recuadro de “Una perspectiva más detallada” en esta sección). El Al₂O₃ purificado se disuelve en criolita fundida (Na₃AlF₆), que tiene un punto de fusión de 1012°C y es un eficaz conductor de la corriente eléctrica. En la figura 23.8 ▼ se muestra un diagrama esquemático de la celda de electrólisis. Se emplean barras de grafito como ánodos, las cuales se consumen en el proceso electrolítico. Las reacciones de electrodo son las siguientes:



◀ **Figura 23.8** Celda electrolítica típica del proceso Hall para obtener aluminio metálico por reducción. Debido a que el aluminio fundido es más denso que la mezcla de criolita (Na₃AlF₆) y Al₂O₃, el metal se acumula en el fondo de la celda.

► **Figura 23.9** Cantidades de bauxita, criolita, grafito y energía necesarias para producir 1000 kg de aluminio.



Ejercicios con el CD-ROM
Electrólisis
(Electrolysis)

En la figura 23.9 ▲ se resumen las cantidades de materias primas y de energía necesarias para producir 1000 kg de aluminio metálico a partir de bauxita por este procedimiento.

Electrorrefinación del cobre

El cobre se utiliza extensamente para fabricar cables eléctricos y en otras aplicaciones en las que se aprovecha su gran conductividad eléctrica. El cobre crudo, que se obtiene normalmente por métodos pirometalúrgicos, no es apropiado para usarse en aplicaciones eléctricas porque las impurezas reducen considerablemente la conductividad del metal.

El cobre se purifica por electrólisis como se ilustra en la figura 23.11 ►. Grandes planchas de cobre crudo sirven como ánodos de la celda, en tanto que los cátodos son láminas delgadas de cobre puro. El electrolito es una disolución ácida de CuSO_4 . La aplicación de un voltaje apropiado a los electrodos provoca la oxidación del cobre metálico del ánodo y la reducción del Cu^{2+} para formar cobre metálico en el cátodo. Esta estrategia es factible porque el cobre se oxida y se reduce con más facilidad que



Una perspectiva más detallada Charles M. Hall

Charles M. Hall (Figura 23.10 ►) comenzó a trabajar en el problema de la reducción del aluminio aproximadamente en 1885, después de conocer por un profesor la dificultad que presenta la reducción de minerales de metales muy activos. Antes de la invención de su proceso electrolítico, el aluminio se obtenía por medio de una reducción química utilizando sodio o potasio como agente reductor. Debido a que el proceso era muy costoso, el aluminio metálico era muy caro. Todavía en 1852, el costo del aluminio era de 545 dólares la libra, mucho más alto que el del oro. Durante la exposición de París en 1855 se exhibía el aluminio como un metal raro, pese a ser el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre.

Hall, quien tenía 21 años cuando inició sus investigaciones, utilizó en sus estudios equipos hechos a mano y prestados, y un cobertizo de madera cercano a su casa era su laboratorio. Aproximadamente un año después consiguió resolver el problema de reducir el aluminio. Su procedimiento consistió en encontrar un compuesto iónico que se pudiera fundir para formar un medio conductor capaz de disolver el Al_2O_3 , pero que no interfiriese las reacciones de electrólisis. La criolita, $(\text{Na}_3\text{AlF}_6)$, mineral relativamente raro, que se encuentra en Groenlandia, satisfacía estos criterios. Irónicamente, Paul



◀ **Figura 23.10** Charles M. Hall (1863–1914) en su juventud.

Hérault, quien tenía la misma edad que Hall, hizo el mismo descubrimiento aproximadamente en la misma época. Como resultado de las investigaciones de Hall y Hérault, la producción de aluminio en gran escala llegó a ser comercialmente factible, y el aluminio se convirtió en un metal común y muy conocido.