

Exploración, extracción y tratamiento de minerales

por Yu.G. Sevastyanov*

En muchos laboratorios del mundo entero se trabaja hoy en día con empeño en el desarrollo de técnicas nucleares aplicables en la minería e industrias conexas. Este empeño se explica por diversas razones, pues, desde la reaparición del carbón como fuente importante de energía, se siente la necesidad de disponer de técnicas de exploración más perfectas y de mejorar los análisis para procesos continuos aplicados en las fases de preparación y tratamiento del carbón, así como el control de las calderas en las centrales eléctricas.

También ha dado impulso al desarrollo de las técnicas nucleares la intensificación de las actividades de exploración de uranio, especialmente en los Estados Unidos de América y en el Canadá, donde se están introduciendo, para su empleo diario, nuevas técnicas de diagráfia de pozos de sondeo que permiten medir directamente el contenido de uranio. Asimismo, los adelantos habidos en el rendimiento del equipo con que se mide la radiación gamma natural repercuten favorablemente en el rendimiento del equipo diseñado para medir la intensidad de la radiación gamma, no ya natural sino inducida.

Aunque el desarrollo de equipo de diagráfia para la industria del petróleo se halla limitado a unos cuantos laboratorios, los frecuentes y considerables adelantos logrados en cuanto al rendimiento, y en cuanto a la amplitud del campo de valores medido, son otros tantos estímulos para el desarrollo de equipo análogo destinado a la exploración de otros minerales. Dado que, como es bien sabido, las reservas de ciertos minerales metalíferos tocan probablemente a su fin, la búsqueda de nuevos criaderos ha cobrado urgencia.

Con el seminario de capacitación celebrado en Ottawa** se procuró facilitar a los participantes —que eran principalmente científicos de Estados Miembros en desarrollo— la tecnología analítica nuclear más importante que se usa actualmente y la que más posibilidades de aplicación futura parece ofrecer. El seminario sirvió también para indicar qué industrias, principalmente de entre las radicadas en el territorio de Estados Miembros

* El Sr. Sevastyanov trabaja en la Sección de Química y Aplicaciones Industriales, de la División de Investigaciones y Laboratorios, del Organismo.

** Seminario de capacitación en tecnología analítica nuclear y sus aplicaciones en exploración, extracción y tratamiento de minerales, organizado por el OIEA y celebrado en Ottawa (Canadá) del 28 de junio al 2 de julio de 1982, por invitación del Gobierno del Canadá. Asistieron al seminario de capacitación 51 participantes que representaban a 18 países y a una organización internacional. Se presentaron 20 memorias en ocho sesiones.

que son países en desarrollo, se benefician ya, o podrían beneficiarse más, de la aplicación de técnicas nucleares. Como se subrayó en el seminario, hay varias técnicas nucleares de utilidad para las industrias de la minería: el análisis fluorimétrico por rayos X basado en la dispersión de las energías; la medición de la radiación gamma natural; las técnicas gamma-gamma; y las técnicas de interacción neutrónica.

Hay técnicas de fluorimetría de rayos X, basada en la dispersión de las energías, que ya están bien desarrolladas y son aplicables al análisis, la extracción, y el control del tratamiento, de los minerales. Las principales ventajas de estas técnicas son los bajos umbrales de detección (unas pocas ppm en el caso de la mayoría de los elementos) y su capacidad para medir la concentración de hasta 40 elementos simultáneamente. Se ha diseñado también equipo relativamente sencillo para medir sobre el terreno la concentración de uno o más elementos. Las desventajas de este sistema son: la pequeña magnitud de las muestras analizadas; la interferencia de líneas de rayos X de un elemento sobre otros elementos; y la limitada penetración de los rayos X excitados.

Medición de la radiación gamma natural: Hay diversidad de rayos gamma naturales emitidos por isótopos de los elementos primordiales U, Th y K, que pueden medirse mediante técnicas bien elaboradas. Las principales aplicaciones son la exploración de uranio, la minería de la potasa, y la estratificación de minerales durante la exploración de carbón y de petróleo. Los rayos gamma naturales son buenas indicaciones de la presencia de ciertos otros minerales. (Por ejemplo, los yacimientos fosfóricos tienen alta concentración de uranio; por tanto, pueden localizarse mediante la medición del U.) Las principales desventajas de las técnicas para la medición de rayos gamma naturales tienen su origen en la necesidad de que el mineral que interesa se halle en correlación con el U, Th o K, y el desconocido grado posible de equilibrio entre el U, Th y sus hijos.

Técnicas gamma-gamma: Aunque las técnicas selectivas gamma-gamma se pueden emplear para el análisis elemental específico de elementos de valor Z medio y alto en altas concentraciones ($\geq 0,1\%$) en matrices de valor Z bajo, el desarrollo intenso de estas técnicas de exploración no parece una trayectoria muy provechosa de investigación. Las técnicas gamma-gamma no selectivas se limitan a medir la densidad. Típicamente, la fuente intensa de radiación gamma que se emplea en la proximidad del detector exige el empleo de configuraciones especiales de blindaje a fin de aislar el detector para que no mire directamente a la fuente. Además de este problema, hay que usar métodos especiales para la fijación de la fuente altamente radiactiva.

Análisis por interacción neutrónica: En general, las técnicas de análisis por interacción neutrónica se caracterizan por un alto grado de especificidad elemental y por la penetración hasta un intervalo de 20–100 cm. Estas dos propiedades son atractivas para el análisis *in situ* en la exploración. Son técnicas multielementos, que permiten medir unos 60 elementos, aunque no todos ellos al mismo tiempo, si se da una serie determinada de condiciones de irradiación neutrónica y de matrices de muestra. Entre las diversas técnicas que pueden usarse, la más importante es la de análisis de la emisión inmediata de radiación gamma (de captura o de dispersión inelástica) o de radiación gamma procedente de la desintegración subsiguiente de núcleos activados. La elección depende de cierto número de factores, los más importantes de los cuales son: la sección eficaz para la reacción considerada, la abundancia y energía de la radiación gamma utilizada, la importancia de las reacciones de interferencia, la posibilidad de usar un detector de alto poder de resolución, y las limitaciones impuestas por el diseño del sistema.

Fuentes y detectores de radiación

Cuando se aplican métodos nucleares a la exploración de minerales, se emplean muy diversas fuentes de radiación. Por ejemplo, en la fluorimetría de rayos X se han empleado habitualmente las especies radiactivas ^{109}Cd , ^{241}Am , ^{55}Fe , ^{57}Co y, algunas veces, ^{153}Gd y ^{244}Cm .

En la tecnología que emplea técnicas gamma-gamma se usan varias fuentes radiotópicas. Las principales son ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{57}Co y ^{60}Co .

El análisis por interacción neutrónica se presta a utilizar gran variedad de fuentes neutrónicas. Para su aplicación directa a la investigación de minerales, se prefieren las fuentes neutrónicas isotópicas, especialmente ^{252}Cf , $^{238}\text{Pu}/\text{Be}$ y $^{241}\text{Am}/\text{Be}$, por su reducido tamaño y por su independencia del suministro de energía.

Hay dos tipos primarios de detectores que se han aplicado a la detección de radiaciones. El primer tipo es el detector neutrónico que usa típicamente BF_3 o ^3H . El segundo tipo de detector se emplea para detectar fotones: ya sean rayos X o bien rayos gamma. Como detectores de bajo poder de resolución se cuenta con los escintiladores a base $\text{NaJ}(\text{Tl})$ y de fósforos plásticos; los detectores de alto poder de resolución están hechos a base de $\text{Ge}(\text{Li})$ coaxial, Ge de alta pureza coaxial, o $\text{Si}(\text{Li})$ planar.

La ventaja de usar espectrómetros de bajo poder de resolución es que no requieren refrigeración. Ahora bien, ocurre a menudo que estos espectrómetros no pueden separar, en un espectro dado, todas las crestas fotónicas. Por tanto, para la resolución de crestas fotónicas suelen usarse detectores de alto poder de resolución.

En el seminario se señaló también que las técnicas de base nuclear desempeñan un papel importante en la exploración y subsiguiente recuperación de recursos minerales, que en algunos países constituyen parte importante de la riqueza nacional. Estas técnicas se vienen empleando con éxito desde hace años para la exploración subterránea y superficial, en el marco de estudios llevados a cabo en minas. Por ejemplo, el empleo de técnicas nucleares —principalmente las centradas en la radiación gamma natural, $(\gamma-\gamma)$, (n, n^1) , (n, γ) , $(n, \text{pulsada}, \gamma)$, y (n, p) — es práctica ya arraigada en la industria del petróleo. Además, se están desarrollando nuevas técnicas, que aún plantean problemas de interpretación de datos y de diseño del equipo. En los programas de exploración de carbón, son esenciales las técnicas de diagrfía nuclear: especialmente la técnica $(\gamma-\gamma)$ y la técnica (natural- γ). Además, es práctica arraigada la de medir el contenido de cenizas en el carbón por medio de dispersión con rayos X de baja energía. El refinamiento de las técnicas neutrónicas promete traer aparejados una medición aún más exacta del contenido de cenizas, la medición continua de la energía calorífica, y la determinación de la concentración de elementos importantes como azufre, cloro, silicio, calcio, aluminio y hierro: mediciones que son necesarias para controlar la eficiencia de los hornos especiales de combustión.

A causa de la radiactividad natural del uranio, las técnicas para la medición de rayos gammas se emplearon por primera vez en reconocimientos del terreno durante la exploración de uranio. En los últimos diez años, estas técnicas se han ampliado a la diagrfía de pozos y de sondeo y a los reconocimientos aéreos. Los detectores de radiación más actualizados, la electrónica conexas y los sistemas de manipulación y visualización de datos se hallan actualmente a disposición de casi todo el mundo.

El equipo de $(\gamma-\gamma)$ y de rayos X de baja energía se utiliza ya ordinariamente para controlar el tratamiento de minerales metalíferos en varios países desarrollados, y se dispone de equipo muy idóneo para su empleo en países en desarrollo, aunque hace falta poseer ciertos conocimientos técnicos especializados para aplicarlo con éxito.

El seminario estudió también las aplicaciones marinas de las técnicas nucleares de análisis. Las desarrolladas recientemente para el reconocimiento de las concentraciones de mineral en el lecho marino, así como algunas técnicas ya acreditadas, se pueden usar, por ejemplo, para delimitar yacimientos sedimentarios y depósitos submarinos de fosforita y de nódulos de manganeso. Puesto que muchos de los yacimientos quedan cerca de las costas de países en desarrollo (principalmente en el sudeste asiático), resulta muy atractiva la posibilidad de aprovechar estas técnicas en un futuro próximo.