

Nanomateriales: Riesgo de incendio y explosión

Fernando Sanz Albert, Marcos Cantalejo García

Centro Nacional de Nuevas Tecnologías. INSHT

Las propiedades de los nanomateriales que fundamentalmente determinan su comportamiento son su pequeño tamaño y su gran superficie específica. En el presente artículo se exponen las principales particularidades que, debido a dichas propiedades, presentan las nanopartículas en relación con el riesgo de incendio y explosión.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, buena parte de los riesgos de seguridad asociados a los nanomateriales están en fase de investigación, por lo que no se dispone de demasiados datos sobre los mismos. Sin embargo, los estudios sobre la materia coinciden en que, entre dichos riesgos, los que más preocupación suscitan son los de incendio y explosión de las nubes de polvo constituidas por partículas sólidas de tamaño nanométrico. A pesar de la escasa información disponible, según algunos autores es posible estimar el peligro de incendio y explosión de los nanomateriales por extrapolación del conocimiento relativo a polvos finos y ultrafinos. No obstante, los resultados de esta extrapolación no ofrecen total certeza, debido a que las propiedades fisicoquímicas características de los materiales varían para dimensiones nanométricas. Así, algunos estudios ponen de manifiesto que las nubes de polvo en escala "nano" podrían presentar, en determinados aspectos, un mayor peli-

gro que una nube de polvo de un material equivalente en escala "micro". Las propiedades de los nanomateriales que principalmente determinan su comportamiento respecto al peligro de incendio y explosión son su pequeño tamaño y su gran superficie específica (siendo ésta la relación entre el área superficial y el volumen). A continuación se exponen los resultados encontrados en la bibliografía en relación con el riesgo de incendio y explosión que presentan los nanomateriales debido a dichas propiedades.

PARÁMETROS Y CONDICIONES QUE INFLUYEN EN EL RIESGO DE INCENDIO Y EXPLOSIÓN

El riesgo de incendio y explosión de una nube de polvo se determina principalmente por su probabilidad de inflamación y por la violencia de la explosión. A su vez, estos factores están condicionados por diversos parámetros. Así, **la probabilidad de inflamación** de un polvo depende

fundamentalmente de su energía mínima de ignición (EMI), su concentración mínima de explosión (CME), también conocida como límite inferior de explosividad (LIE), y su temperatura mínima de ignición (TMI). Respecto a la **violencia de la explosión**, esta queda caracterizada principalmente por la presión máxima de explosión y el gradiente máximo de presión (determinado por la constante Kst).

En la Tabla 1 se definen cada uno de estos parámetros (1), (2).

Algunos estudios revelan que, debido a las propiedades que presentan los nanomateriales, los parámetros anteriores pueden presentar valores distintos para las partículas de tamaño "nano" comparados con las partículas de materiales equivalentes de tamaño "micro", lo cual puede modificar la probabilidad de inflamación y la violencia de explosión de los nanomateriales respecto a los materiales de tamaños convencionales de la misma composición.

PROBABILIDAD DE INFLAMACIÓN

En relación con la **energía mínima de ignición** (EMI), la disminución del tamaño de partícula de materiales combustibles puede reducir la energía de ignición necesaria para que el polvo se inflame, aumentando la posibilidad de que materiales relativamente inertes se vuelvan combustibles. Según dicho razonamiento, las dispersiones de nanomateriales combustibles en el aire pueden presentar una mayor sensibilidad a la inflamación que la dispersión de materiales de composición similar con tamaños de partícula mayores (3), (4), (5), (6), (7).

En este sentido, los datos encontrados en la bibliografía para las nanopartículas de aluminio indican que estas tienen una energía mínima de ignición suficientemente baja para entrar en ignición con una descarga de electricidad estática, y, dependiendo del tamaño de la partícula, podrían clasificarse como moderada o altamente explosivos (8). Ensayos con polvos metálicos muestran que estos pueden explotar con energías menores de 1 mJ, que es la energía más baja que se puede detectar utilizando los aparatos más comúnmente empleados para calcular los valores de energía mínima de ignición. Esta baja EMI denota, por lo tanto, que los nanomateriales podrían inflamarse debido a chispas electrostáticas, por colisión o por fricción mecánica (6).

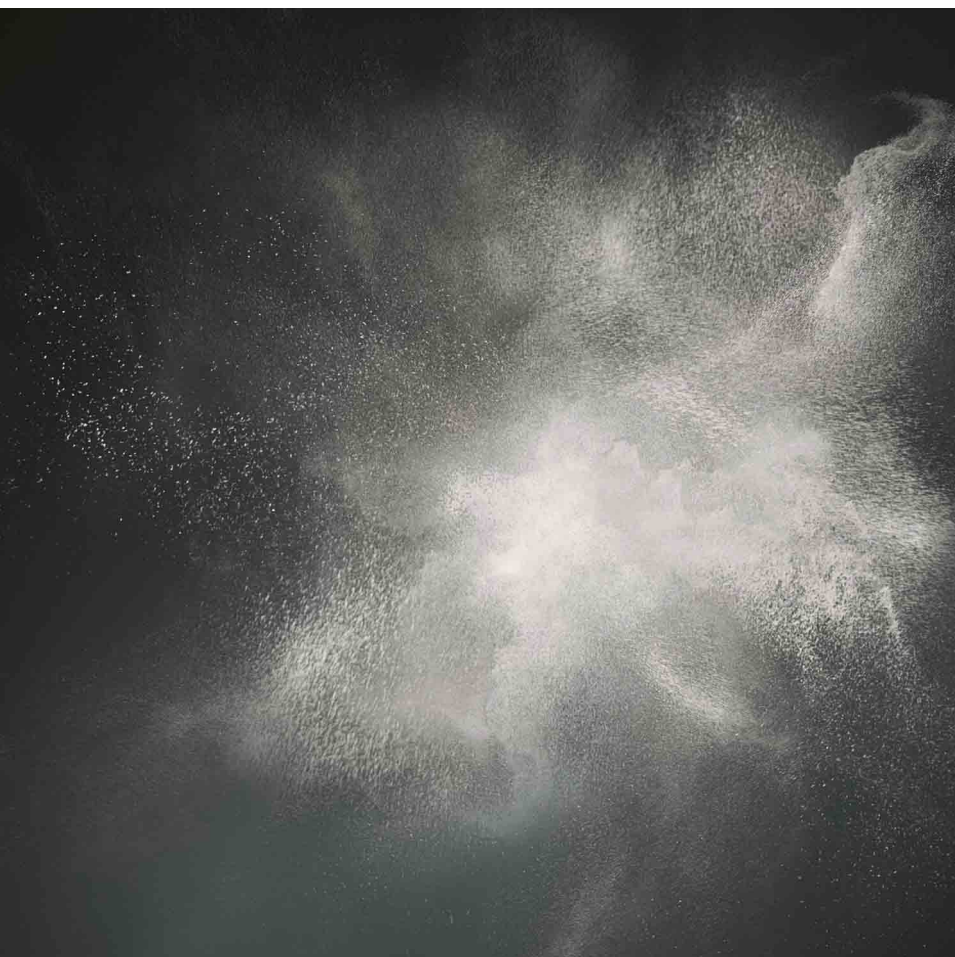
Mientras, según lo indicado, la EMI es menor a medida que disminuye el tamaño de partícula, la **concentración mínima de explosión** (CME) parece no variar significativamente a escala "nano" (6).

Analizando el tercer parámetro que puede afectar a la probabilidad de inflamación y explosión, la **temperatura mínima de ignición** (TMI), los investiga-



■ **Tabla 1** ■ **Definición de los parámetros que influyen en el riesgo de incendio y explosión (1), (2)**

PARÁMETRO	DEFINICIÓN
Energía mínima de inflamación (EMI) [J]	Energía mínima necesaria para conseguir la inflamación de la atmósfera para una determinada concentración.
Concentración mínima de explosión (CME) [g/m³]	Cantidad mínima de polvo suspendido en un volumen dado para la que se pueda producir la ignición y propagación de la llama.
Temperatura mínima de inflamación (TMI) [°C]	<ul style="list-style-type: none"> • Para gases o vapores: temperatura mínima, en función de la concentración, a la que se inicia el proceso de inflamación. También se denomina "temperatura de ignición". • Para polvo existen dos valores: <ol style="list-style-type: none"> a) Temperatura mínima de ignición en capa (TMIc): es la menor temperatura a la que se inicia el proceso de ignición de una muestra de polvo depositada sobre una superficie caliente. b) Temperatura mínima de ignición en nube (TMIn): es la temperatura mínima a la que se produce la inflamación de una nube de polvo dispersada bajo condiciones de ensayo.
Presión máxima de explosión (Pmáx) [bar]	<ul style="list-style-type: none"> • Presión máxima registrada en un ensayo normalizado de explosión en recipiente cerrado con la concentración óptima de polvo en el aire. Es un valor característico para cada polvo combustible y no varía en función del volumen del recipiente.
Constante Kst [bar·m/s]	Medida específica de la explosividad de un polvo, definida por la siguiente expresión: $Kst = (dP/dt)_{máx} \cdot V^{1/3}$



dores han observado que esta presenta valores menores a medida que disminuye el tamaño de la partícula; así, parece que la probabilidad de inflamación puede ser mayor en el caso de las nanopartículas, respecto a partículas de tamaño "micro" (6).

Cualquier polvo seco combustible en el rango de tamaño de las micras puede presentar riesgo de incendio, de explosión o incluso de combustión espontánea. Pero este riesgo puede incrementarse cuando aumenta la superficie específica del material, ya que en estos casos la tendencia de dicho material a cargarse electrostáticamente es mayor. Así, debido a su elevada superficie específica, los nanomateriales pueden acumular mucha carga electrostática, convirtiéndose en su propia fuente de ignición cuando el polvo se encuentra en dispersión en el aire (3), (5).

VIOLENCIA DE EXPLOSIÓN

En lo relativo a la **violencia de la explosión**, los estudios no muestran que esta sea mayor en el caso del polvo de tamaño "nano" respecto del material equivalente de tamaño "micro". En el rango de las micras se observa que, cuando el tamaño de partícula disminuye y la superficie específica aumenta, el gradiente máximo de presión de una explosión (constante Kst) aumenta. Sin embargo, parece que esta tendencia no se mantiene en el rango manométrico. Los datos disponibles indican que la constante Kst tiende a disminuir en el rango de tamaños "nano" para tamaños de partícula inferiores a 300 nm. Este comportamiento parece explicarse por la rápida aglomeración de las partículas como resultado de su colisión y el consiguiente incremento del diámetro de partícula. Por lo tanto, la violencia de la

explosión de los nanomateriales es probablemente menor que las partículas equivalentes en escala "micro", aunque, como se ha mencionado, pueden inflamarse más fácilmente (6), (7), (9).

En todo caso, aunque la violencia de explosión de las nubes de polvo de nanopartículas puede no ser más severa que la producida por las nubes de polvo de materiales en escala "micro", como se podría prever por el incremento de su superficie específica, se debería tener en cuenta que las nubes de polvo de nanomateriales podrían, en determinadas condiciones, llegar a producir fuertes explosiones (7).

COMPOSICIÓN DEL NANOMATERIAL

Otro aspecto a tener en cuenta es que el comportamiento de los nanomateriales en lo relativo al riesgo de incendio y explosión puede variar en función de la composición del mismo. En este sentido, el proyecto Nanosafe2 ha llevado a cabo investigaciones sobre la inflamabilidad y explosividad del polvo de tamaño nanométrico, utilizando nuevos dispositivos que resultan más adecuados para medir la EMI y evaluar los efectos por explosión de polvo de estos tamaños. El proyecto ha estudiado la EMI y la CME, la presión máxima de explosión y el gradiente máximo de presión de determinados polvos nanométricos (varios tipos de polvos de negro de humo, nanopartículas de aluminio de diferentes tamaños y nanotubos de carbono), asignando, como resultado, una clase de explosión a cada uno de ellos. El negro de humo y los nanotubos de carbono presentaron una sensibilidad y una violencia de la explosión del mismo orden, y su clase de explosión fue determinada como débil, mientras que el polvo de aluminio mostró una EMI mucho menor,

Tabla 2 ■ Comparación de la violencia de explosión del polvo en escala “nano” respecto del polvo en escala “micro” (10)

Polvo en escala “nano”				Polvo en escala “micro”			
Material	Tamaño de Partícula	Pmax (bar)	Kst (bar-m/s)	Material	Tamaño de Partícula	Pmax (bar)	Kst (bar-m/s)
Aluminio	210 nm	12,5	449	Aluminio	< 10-100 µm	7-12	300-700
	100 nm	11,2	536				
Hierro	25 nm	2,9	18	Hierro	12 µm 32 µm	5,2 5,1	50 41
Zinc	130 nm	5,6	101	Zinc	160 µm 10 µm	0,7 7,3	2 176
Cobre	25 nm	1,2	3	Cobre	25 µm	Sin ignición	Sin ignición
Nanofibra de carbono	Ø: 100-200 nm L: 30-100 µm	5,2	17	Carbono	100% < 63 µm	7,1-8	43-151
	Ø: 80-200 nm L: 0,5-20 µm	6,0	30				
	Ø: 70-200 nm L: 2-5 µm	6,9	158				
	Ø: 70-200 nm L: 2-10 µm	5,6	37				
Nanotubos de carbono	Ø: 20-30 nm L: 10-30 µm	6,4	91				

con mayor probabilidad de ignición y la violencia de la explosión fue clasificada como fuerte o muy fuerte, dependiendo del tamaño de partícula. Además, se observó que el polvo de nanopartículas de aluminio era menos explosivo que el polvo de tamaño “micro” (debido, probablemente, a la formación de capas de óxido sobre las nanopartículas y al aumento de tamaño por aglomeración) y que presenta una violencia de explosión similar a las micropartículas de polvo de la misma sustancia (8).

Con resultados similares a los del proyecto Nanosafe2, un estudio realizado por el HSE en 2010 sobre el riesgo de incendio y explosión de distintos tipos de polvo de nanopartículas analizó la EMI y la violencia de explosión comparándolos con materiales equivalentes en escala “micro”. Los resultados obtenidos para los distintos materiales estudiados son los siguientes (10):

- Aluminio: el polvo de nanopartículas de aluminio puede entrar fácilmente en ignición y muestra una alta violencia de explosión, de magnitudes simi-

lares al polvo de aluminio en escala “micro”.

- Zinc: la EMI del polvo de nanopartículas de zinc es menor que la del mismo material en escala “micro”, sin embargo la violencia de la explosión, clasificada como débil o moderada, es similar a la del polvo de partículas micrométricas de zinc.
- Hierro: aunque la violencia de explosión del polvo de nanopartículas de hierro es menor que la que resulta del polvo micrométrico de este material, la EMI del polvo nanométrico, menor de 1mJ, es más baja que la del polvo micrométrico. De hecho, el polvo nanométrico se considera potencialmente muy combustible.
- Cobre: el polvo de nanopartículas de cobre presenta una explosividad baja, similar a la del polvo de micropartículas, que se considera no explosivo.
- Carbono: en general, el polvo de nanopartículas de carbono muestra una explosividad baja o moderada, y las

nanofibras resultan más explosivas a medida que disminuye la longitud de la fibra. La EMI del polvo de nanopartículas es del orden de 1000 mJ y, por lo tanto, estos materiales no resultan sensibles a la ignición por la presencia de fuentes de ignición electroestáticas.

En la Tabla 2 se recogen los resultados de la comparación de la violencia de la explosión del polvo de nanopartículas respecto al polvo de partículas en escala “micro” (10).

CONDICIONES DE MANIPULACIÓN DE LOS NANOMATERIALES

Aunque, como se ha podido observar, el riesgo de incendio y explosión asociado a los nanomateriales depende en gran medida de su peligrosidad intrínseca, este riesgo también es función de las condiciones en las que estos se manipulan y almacenan. De hecho, en la bibliografía se mencionan determinados procesos en los que intervienen



nanomateriales en los que este riesgo puede tener una especial importancia. Así, algunos nanomateriales se diseñan específicamente para generar calor a través de la progresión de reacciones a escala "nano", lo que podría presentar un peligro de incendio que es único para los nanomateriales manufacturados (3). En este mismo sentido, las nanopartículas y los materiales nanoestructurados porosos han sido utilizados durante muchos años como catalizadores eficientes debido al incremento de la velocidad de reacción o disminución de la temperatura necesaria para que se produzca la reacción entre líquidos y gases. Dependiendo de su composición y estructura, algunos de estos nanomateriales pueden iniciar la reacción catalítica e incrementar el riesgo de incendio y explosión (3). Además, los actuales sistemas de producción de nanomateriales pueden incluir procesos de alta energía que im-

plican ciertas operaciones que pueden incrementar el riesgo de incendio y explosión (tales como manejo de botellas a presión, manipulación de objetos a altas temperaturas, presencia de corrientes eléctricas de alta intensidad, emisión de radiación electromagnética, luces de alta intensidad y rayos láser, etc.) (5).

En todo caso, el peligro de explosión puede presentarse especialmente en los procesos en los que se libera polvo de los nanomateriales, tales como la mezcla, triturado, perforación, lijado y limpieza (6).

CONCLUSIONES

Las previsiones respecto al riesgo de inflamación y explosión de los nanomateriales son inciertas debido a diversas razones. En primer lugar, está la limitación de datos para los tamaños de par-

tícula "nano" y el hecho de que solo se han investigado algunos nanomateriales. En segundo lugar, existen dificultades relativas a los ensayos con nanomateriales, principalmente debido a la falta de equipos y métodos estandarizados específicos para partículas en escala "nano", lo cual puede derivar en una información insuficiente o incompleta de su peligrosidad en relación con el riesgo de incendio y explosión.

No obstante, a tenor de los estudios revisados, parece que las características de inflamabilidad y explosividad de los nanomateriales son diferentes a las de los materiales equivalentes en escala "micro"; algunos pueden inflamarse más fácilmente, pero, en general, no se espera una mayor violencia de explosión. En ausencia de información específica determinante sobre el peligro de incendio y explosión de los nanomateriales, a

la hora de evaluar el riesgo laboral sería prudente asumir, bajo el principio de precaución, que las nubes de polvo de nanomateriales presentan esta característica de peligrosidad.

En todo caso, el riesgo de incendio y explosión asociado a los nanomateriales en el puesto de trabajo es, como se ha visto, función de la peligrosidad intrínseca de los nanomateriales, pero, lógicamente, también depende de las condiciones en que estos se manipulan y almacenan (tipo de proceso, condiciones ambientales, ventilación, presencia de otros componentes en el aire, etc.).

INVESTIGACIONES FUTURAS

Los estudios consultados evidencian la necesidad de continuar las investiga-

ciones relativas al riesgo de incendio y explosión asociado a nanomateriales con objeto de mejorar el conocimiento sobre:

- las propiedades químicas, físicas y reactivas de los nanomateriales (3),
- el potencial de los nanomateriales en suspensión en el aire para provocar incendio o explosión (3),
- el grado a partir del cual los nanomateriales combustibles plantean un alto riesgo de incendio o explosión respecto a los mismos materiales con tamaños de partícula mayores (3),
- las características físicas o químicas de los nanomateriales que puedan

iniciar reacciones catalíticas e incrementar el riesgo de incendio y explosión (3),

- la forma de ignición de los nanomateriales y, en particular, el efecto sobre la inflamación de la aglomeración de las nanopartículas y el consecuente desarrollo de la explosión (6),
- la desproporción observada del valor Kst para materiales en tamaño "micro" respecto a los materiales en el rango "nano" (7),
- los métodos y equipos de ensayo adaptados a las propiedades de los nanomateriales, que permitan una mejor clasificación de su peligrosidad (7), (11). ●

Referencias bibliográficas

1. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Nota Técnica de Prevención (NTP) 369 Atmósferas potencialmente explosivas: instalaciones eléctricas. 1995. En: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/Fichas-Tecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_369.pdf
2. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Nota Técnica de Prevención (NTP) 427 Paramentos débiles para el venteo de alivio de explosiones (I). 1997. En: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/Fichas-Tecnicas/NTP/Ficheros/401a500/ntp_427.pdf
3. National institute for occupational safety and health (NIOSH). Progress toward safe nanotechnology in the workplace. 2007. En: <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2010-104/pdfs/2010-104.pdf>
4. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST). Best practices guide to synthetic nanoparticle risk management. 2009. En: <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PublIRSST/R-599.pdf>
5. INSHT. Tanarro Gozalo, C.; Gálvez Pérez, V. "Nanopartículas ¿un riesgo pequeño?". En: Seguridad y Salud en el Trabajo, nº 61, p 16- 27. 2011. En: <http://www.insht.es/portal/site/Insht/menuitem.1f1a3bc79ab34c578c2e8884060961ca/?vgnnextoid=1592e113bf112210VgnVCM100000705350aRCRD&vgnxtchannel=9f164a7f8a651110VgnVCM100000dc0ca8cORCRD>
6. S. Morgan Worsfold et al. "Review of the explosibility of nontraditional dusts". En: Ind. Eng. Chem. Res., 51 (22), p 7651- 7655. 2012. En: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie201614b>
7. Safe work Australia. "Evaluation of potential safety (phycochemical) hazards associated with the use of nanomaterials". 2013. En: <http://www.safeworkaustralia.gov.au/sites/swa/about/publications/pages/evaluation-potential-safety-hazards-associated-engineered-nanomaterials>
8. European risk observatory (European Agency for safety and health at work). Workplace exposure to nanoparticles. 2009. En: https://osha.europa.eu/en/publications/literature_reviews/workplace_exposure_to_nanoparticles/view?searchterm=
9. European Community. Nanosafe2 project. What about explosivity and flammability nanopowders? 2008. En: http://www.suva.ch/nanosafe_2_dr-2.pdf
10. Health and Safety Executive (HSE). Fire and explosion properties of nanopowders. 2010. En: <http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr782.pdf>
11. Federal Office for the Environment (FOEM)- Swiss Confederation, Institute of Safety and Security (Basel). Fire and explosion properties of synthetic nanomaterials. 2010. En: <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01539/index.html?lang=en>