

Pruebas mecánicas con una máquina de expansión térmica

E. Orozco, A. Morales y A. Mendoza

*Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México
Apartado postal 20-364, 01000 México, D.F.*

(Recibido el 6 de septiembre de 1990; aceptado el 20 de mayo de 1991)

Resumen. Aplicando directamente una corriente eléctrica, se puede provocar la expansión térmica de una barra de acero. Hemos aprovechado esto para deformar materiales frágiles y así investigar sus propiedades mecánicas. En este artículo presentamos los resultados de una serie de experimentos de deformación en halogenuros alcalinos, cálculos renales, geles de óxido de silicio y óxidos superconductores de alta temperatura crítica.

PACS: 62.20.Sr; 62.20.Fe; 81.40.Lm

1. Introducción

El estudio de las propiedades mecánicas de materiales frágiles, aprovechando la expansión térmica de una barra metálica, se propuso en un trabajo publicado anteriormente [1]. Se construyó y calibró una máquina que funciona bajo este principio [2] y se usó de manera sistemática, para investigar los mecanismos de endurecimiento de halogenuros alcalinos impurificados con europio [3]. Para mostrar la utilidad de esta máquina en la investigación de las propiedades mecánicas de materiales frágiles, hemos realizado experimentos de deformación en cloruro de potasio impurificado con bario, cálculos renales, geles de óxido de silicio y cerámicas superconductoras del tipo $Y_1Ba_2Cu_3O_x$.

2. Descripción de la máquina

El diagrama de la Fig. 1 muestra los elementos importantes del prototipo que construimos. Mediante un transformador variable (especialmente construido) y a través de un par de cables de cobre de baja impedancia, inyectamos potencia de hasta 1 KVA (1000 A a un volt) a una barra de acero de un metro de longitud, con lo que conseguimos calentarla para lograr su expansión térmica. De esta forma, podemos aplicar una carga controlada a una muestra que colocamos entre el extremo libre de la barra y la base de la estructura que la soporta.

La parte medular del sistema de medición de la máquina, está constituida por los medidores de deformación y de carga. En este caso, los medidores son un LVDT y una

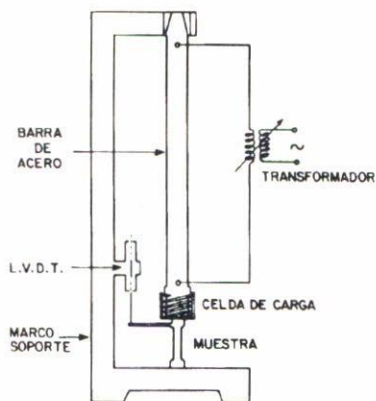


FIGURA 1. Diagrama de la máquina de expansión térmica. En él se pueden apreciar las posiciones de la celda de carga del LVDT y de la muestra que se comprime.

celda de carga, que funcionan de la siguiente manera. El LVDT es un transductor de desplazamiento a voltaje, que consta esencialmente de un transformador con tres devanados (un primario y dos secundarios) y un núcleo que se puede desplazar enlazando magnéticamente los devanados, tal como se muestra en la Fig. 2. El devanado primario es el central, los secundarios de los extremos son enlazados más o menos según la posición del núcleo, cuya longitud es menor que la longitud total de los tres devanados. Si el núcleo enlaza más a uno de los devanados secundarios, le induce un mayor voltaje que al otro. Estos voltajes se comparan mediante un circuito electrónico cuyo voltaje resultante es la señal de salida. Dentro de una región de funcionamiento, esta señal es proporcional a la posición del núcleo que es el elemento sensor conectado mecánicamente a los desplazamientos que han de medirse. La celda de carga es un transductor de fuerza a voltaje, que consiste en un LVDT cuyo núcleo está sujeto mecánicamente a un resorte calibrado con lo que se consigue que el desplazamiento del núcleo sea proporcional a la fuerza aplicada, de esta manera, el voltaje que entrega la celda de carga es proporcional a la fuerza.

Estos transductores se calibraron en nuestro laboratorio; el LVDT con un tornillo micrométrico cuya resolución es de 10^{-6} m, montado en un dispositivo diseñado para este fin. La celda de carga se calibró con una balanza sensible a miligramos en el intervalo de 0–500 Kg.

3. Experimentos en cloruro de potasio con impurezas de Ba^{2+}

La introducción de impurezas catiónicas divalentes en cristales de halogenuros alcalinos, les induce cambios notables en sus propiedades mecánicas, por ejemplo, se ha visto que el cloruro de potasio impurificado con cationes divalentes cuyo radio es

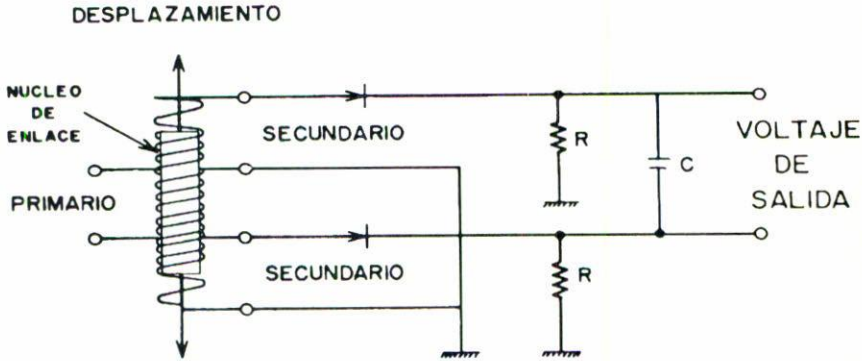


FIGURA 2. Circuito del LVDT, en donde se muestran los devanados del transformador y el núcleo que los enlaza magnéticamente.

inferior al del catión de la matriz (Pb^{2+} , Sr^{2+} y Eu^{2+}), sufre un reblandecimiento gradual a medida que las impurezas se precipitan en los cristales [3]. No existen reportes para este material impurificado con cationes divalentes de tamaño comparable o mayor al del ión potasio, por esta razón, rastreamos la dureza de monocristales de KCl (con forma de paralelepípedo de $2 \times 2 \times 8$ mm) impurificados con 300 ppm de Ba^{2+} , sabiendo que el radio del bario (1.34 \AA) es ligeramente mayor que el radio del potasio (1.32 \AA). La dureza de los cristales se midió a través del esfuerzo de cedencia (esfuerzo necesario para iniciar la deformación plástica), empleando, para esto, la máquina de expansión térmica. Los experimentos se hicieron en muestras añejadas entre 1 y 500 horas, a la temperatura de 100° C (esto para acelerar el proceso de precipitación de las impurezas).

En la Fig. 3 aparece insertada una curva típica de esfuerzo contra deformación obtenida con la máquina. En ella se pueden apreciar tanto la parte elástica como la parte plástica de la deformación de la muestra; la transición entre ambas, corresponde al esfuerzo de cedencia σ_c . En la misma figura aparece la gráfica del esfuerzo de cedencia como función del tiempo de añejamiento, notándose, claramente, que la precipitación del Ba^{2+} provoca un endurecimiento gradual de los cristales hasta un valor de saturación de aproximadamente 9 MPa a las 500 horas. Este comportamiento contrasta con el obtenido para muestras con impurezas de menor radio iónico [3].

4. Experimentos en cálculos renales

Para extraer cálculos de las vías urinarias, usualmente se emplean métodos quirúrgicos que son delicados, consumen mucho tiempo post operatorio para la recuperación del paciente y en muchos casos no son recomendables. Actualmente se han desarro-

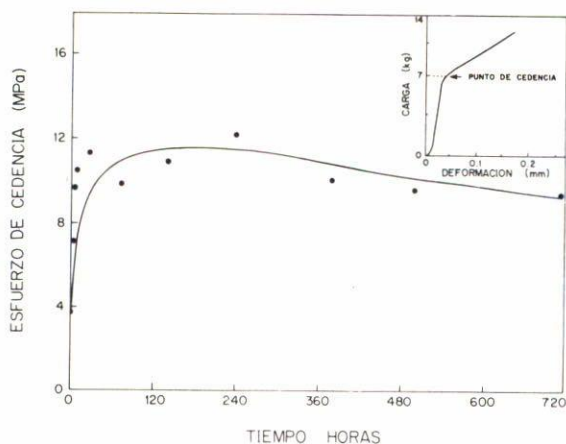


FIGURA 3. Gráfica del esfuerzo de cedencia como función del tiempo de añejamiento a 100°C. La gráfica insertada corresponde a una curva típica de carga contra deformación obtenida con la máquina.

lado una serie de técnicas para eliminar los cálculos a través de su fragmentación y posterior dilución mediante quimioterapia [4].

Una de las técnicas de fragmentación que se ha difundido ampliamente, se basa en la aplicación de ondas de choque extra corporales de corta duración. Para aplicar esta técnica, es necesario conocer las propiedades mecánicas de los cálculos, las que a su vez dependen de la estructura y composición química de los mismos. Uno de los parámetros importantes que se debe conocer para poder aplicar la técnica de fragmentación, es la carga que se necesita aplicar para conseguir el rompimiento de los cálculos. Este parámetro se puede medir con la máquina de expansión térmica.

Realizamos una serie de experimentos en diez muestras de cálculos renales de diferente procedencia, proporcionados por la Facultad de Medicina de la UNAM. En la Fig. 4 aparece una curva de carga contra deformación de una de las muestras ensayadas. Igual que en este caso, en todas las pruebas se observó que la carga en compresión aumentaba hasta el punto de ruptura, a partir de allí, disminuía como consecuencia de la fragmentación del cálculo lo cual sucedía en varias etapas. En ningún caso, la deformación a la ruptura excedió los 0.3 mm y las cargas máximas que soportaban las muestras, estuvieron siempre en el intervalo de 30 a 70 Kg.

5. Experimentos en geles de óxido de silicio

La fabricación de vidrios a partir de geles de óxido de silicio mezclados con óxidos de aluminio, circonio, sodio, titanio, plomo, etc. ha adquirido gran importancia en los últimos años debido a que por este método pueden obtenerse vidrios de alta homogeneidad para aplicaciones ópticas [5]. El proceso incluye la fabricación del gel húmedo que se seca gradualmente y posteriormente se densifica mediante las

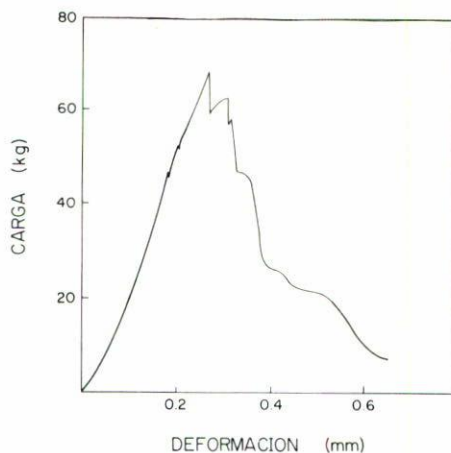


FIGURA 4. Gráfica de carga contra deformación de uno de los cálculos sometidos a compresión con la máquina de expansión térmica.

técnicas usuales de sinterizado. El sinterizado es la etapa mejor entendida del proceso, porque es ampliamente usado en la fabricación de cerámicas y en la metalurgia de polvos. Las etapas previas (gel húmedo-gel seco) se han estudiado menos, a pesar de la importancia que tienen para obtener alta homogeneidad en los vidrios. Se ha sugerido que la medición sistemática de las propiedades mecánicas del gel durante el proceso de fabricación [6], podría aportar información útil para averiguar los mecanismos de formación del gel, del proceso de secado, así como de la interacción de las partículas que lo constituyen.

En el Departamento de Estado Sólido del Instituto de Física de la UNAM, se han incorporado colorantes naturales a geles húmedos de óxido de silicio, con la intención de fabricar vidrios luminiscentes, ya se han conseguido geles que absorben radiación ultravioleta de 320 nm y emiten radiación en el visible entre 500 y 600 nm. Como parte de este proyecto de investigación, realizamos experimentos de deformación con la máquina de expansión térmica, en muestras cilíndricas de 5 mm de radio \times 10 mm de alto, aplicándoles carga en compresión hasta la ruptura para diferentes grados de secado de las muestras. La Fig. 5 presenta la gráfica del esfuerzo a la ruptura como función del tiempo de secado, en ella se puede apreciar claramente el endurecimiento del gel a medida que aumenta el grado de secado.

6. Experimentos en óxidos superconductores de alta temperatura crítica del tipo $Y_1Ba_2Cu_3O_x$

Además de aceptar densidades grandes de corriente eléctrica (10^5 A/cm²), los óxidos superconductores de alta temperatura crítica deben poseer propiedades mecánicas que permitan que se los utilice en aplicaciones tecnológicas como transmisión de potencia y almacenamiento de energía. Preparados por métodos convencionales [7],

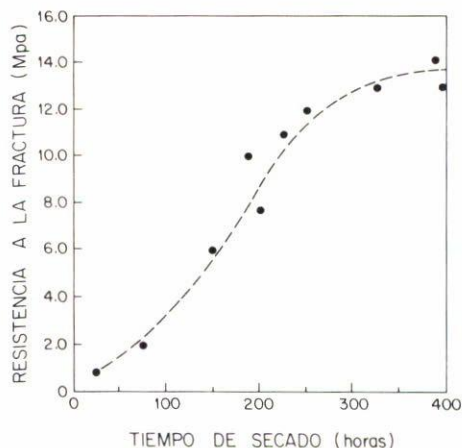


FIGURA 5. Gráfica del esfuerzo a la ruptura como función del tiempo de secado de las muestras luminiscentes de geles de óxido de silicio, probadas en la máquina de expansión térmica.

	a	b	c
Esfuerzo a la ruptura (MPa)	45 ± 3	83 ± 7	60 ± 6
Deformación a la ruptura (mm)	0.33 ± 0.01	0.20 ± 0.01	0.6 ± 0.01

TABLA I. a) Muestra sinterizada por métodos convencionales; b) Muestra sinterizada bajo presión; c) Muestra sinterizada por métodos convencionales pero con adiciones de Na_2CO_3 . ($\text{Y}_{1-n}\text{Na}_n\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, $0.1 \leq n \leq 0.3$).

los superconductores de la familia $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ resultan ser demasiado frágiles, sin embargo, utilizando procedimientos de sinterizado bajo presión, se mejora su resistencia a la fractura [7]. En nuestro laboratorio estamos explorando dos procesos para mejorar la resistencia, uno basado en el sinterizado bajo presión aplicando corriente eléctrica directamente sobre las muestras para calentarlas, y otro en el que con la adición de ciertos aleantes se induce el crecimiento de los granos. En ambos casos se obtiene una notable disminución de la densidad de poros, que son los que fragilizan el material.

Con la máquina de expansión térmica, investigamos el efecto de estos procedimientos de fabricación en la resistencia mecánica de los superconductores, haciendo pruebas de flexión en muestras fabricadas con forma de paralelepípedo cuyas dimensiones eran de $3 \times 3 \times 10$ mm, para esto les aplicamos carga en forma continua hasta conseguir la ruptura. La Tabla I presenta los valores promedio del esfuerzo máximo aplicado para tres clases de muestras. De los resultados obtenidos, se puede apreciar que el sinterizado bajo presión, incrementa casi al doble la resistencia a la fractura con respecto al valor que se obtiene en las muestras fabricadas por métodos convencionales. En el caso de muestras con adiciones de Na_2CO_3 , aunque su resistencia es menor, éstas presentan la mayor deformación hasta la fractura. Los resultados

descritos anteriormente forman parte de un proyecto extenso de investigación que actualmente se desarrolla en nuestro grupo.

Conclusiones

Hemos presentado resultados preliminares de una serie de experimentos de deformación. Estos experimentos se hicieron en diferentes clases de materiales frágiles: monocristales ($\text{KCl}:\text{Ba}^{2+}$), policristales ($\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_2$), sólidos con estructura química compleja (cálculos renales) y sólidos con estructura amorfa (geles de óxido de silicio). Empleamos para esto una máquina diseñada y construida en nuestro laboratorio. Con base en las experiencias relatadas en este trabajo, concluimos que la máquina es un instrumento adecuado para el estudio de propiedades mecánicas de este tipo de materiales.

Reconocimientos

Agradecemos la colaboración del Ing. Lauro Bucio y de los señores Ventura Rodríguez y Jorge Barreto en la realización de algunos de los experimentos.

Referencias

1. A. Mendoza, E. Orozco and A. Morales, *J. Phys.* **E 18** (1985) 474.
2. C. Salinas Ch., Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México (1990).
3. E. Orozco M., Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid, (1985).
4. R.A. Miller and J.E. Wickham, *Urology* **23** (1984) 67.
5. J. Zarzycki, M. Prassas and J. Phalippou, *Jour. Mat. Sci.* **17** (1982) 3371.
6. S. Pardenek, J. Fleming and L. Klein, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **88** (1987) 73.
7. J. Blendall, *Adv. Cer. Mat.* **2** (1987) 512.

Abstract. Applying an electrical current on an iron bar, a thermal expansion can be induced. We have taken advantage of this to deform fragile materials, in order to study their mechanical properties. In this paper we show some results of deformation experiments on alkali halides, kidney stones, silica gels and high T_c oxide superconductors.