

Quemadores de gas cerámicos

E. GARCÍA, P. MIRANZO, M. I. OSENDI

Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC
Campus de Cantoblanco. 28049 MADRID

El creciente uso del gas natural, como fuente de energía térmica en aplicaciones domésticas, está produciendo una continua evolución en la tecnología de este tipo de calderas. Estas son cada vez más compactas y capaces de trabajar en un mayor rango de potencias caloríficas, para satisfacer las demandas de energía requeridas, en cada momento, por los usuarios. Para ello, deben estar provistas con quemadores que puedan funcionar intermitentemente en modo radiante, lo que permite un aumento en la eficiencia del proceso de combustión y, además, una reducción en la emisión de gases nocivos. Los materiales cerámicos son unos buenos candidatos para fabricar estas placas radiantes de los nuevos quemadores de gas. En general, estos materiales poseen las propiedades adecuadas para funcionar en las severas condiciones que se producen en la combustión, caracterizadas por las altas temperaturas y la presencia de especies químicas corrosivas. Estas condiciones de trabajo producen una degradación lenta pero progresiva de sus propiedades y, con el tiempo, dan lugar al fallo del quemador. En este trabajo se presenta una revisión sobre los tipos de quemadores de gas cerámicos existentes, requisitos que deben cumplir, su modo de operación y los modos en que se degradan.

Palabras Clave: Quemadores radiantes, gas, combustión.

Ceramic gas burners

The extended use of natural gas for domestic applications is spurring the continuous improvement in the gas boiler technology. Thus, compact boilers that are able to work in a wider power range, in order to satisfy the exact energy requirements of the users, are a common goal. This requires the development of gas burners capable of working in radiant mode for increasing the combustion efficiency besides reducing the emissions of hazardous gases. The ceramic materials are strong candidates for this application. They have the properties required for working in the severe conditions associated with the combustion of gases, i.e. high temperatures and the presence of corrosive chemical species. These work conditions produce a slow but continuous degradation of their properties and the ultimate burner failure. This paper discusses the different types of ceramic gas burners available, their working requirements, modes of operation and the possible degradation mechanisms.

Keywords: radiant gas burners, combustion.

1. INTRODUCCIÓN

La combustión de gas natural es muy común en usos domésticos, como son los sistemas centrales de calefacción y las cocinas. Una ventaja del gas natural frente a los combustibles fósiles es su mayor limpieza, ya que no hay emisión de SO_x , debido a que todos los compuestos de azufre se eliminan antes del transporte. Sin embargo, sí se producen emisiones de CO_2 , CO y NO_x . El CO_2 es inherente a la combustión y solamente puede reducirse disminuyendo la cantidad de combustible quemado. La emisión de CO es pequeña cuando se consigue una combustión eficiente, mientras que la emisión de NO_x , propia de la combustión en aire, se puede reducir si la temperatura de los gases de combustión decrece. Esto último se consigue usando quemadores de superficie que trabajen en modo radiante, ya que la llama se enfría en contacto con el quemador, el cual pierde esta energía principalmente por radiación. Los quemadores fabricados con materiales altamente porosos son los más idóneos para este uso (1,2).

Un quemador radiante es aquel que convierte una alta proporción de la energía que le suministra el combustible en energía radiante, que se puede usar para calentar otro material (Figura 1). La cantidad total de calor irradiado por un cuerpo caliente depende de la naturaleza de su superficie y de su

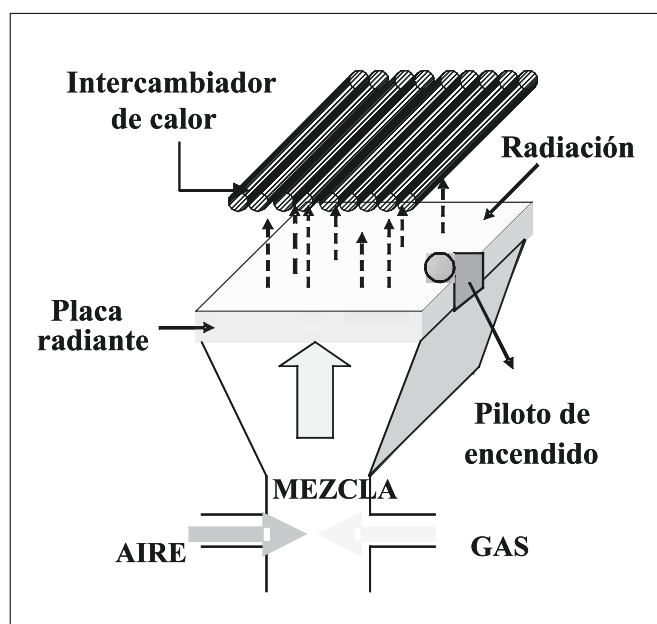


Figura 1: Esquema de un quemador radiante.

temperatura. El estudio de materiales refractarios como superficies radiantes en quemadores de gas se inició a principios del siglo XX (3). Los requisitos principales que debe cumplir un material cerámico para que sea adecuado como quemador son: poseer un bajo coeficiente de dilatación térmica y una baja conductividad térmica, tener alta emisividad térmica y estabilidad mecánica a alta temperatura, así como una porosidad elevada para que aumente tanto la eficiencia de la combustión como la superficie radiante total. Además, existen requerimientos comerciales como que deben ser económicos, disponibles en poco tiempo y fáciles de producir industrialmente.

Hay distintos materiales cerámicos que cumplen, en mayor o menor medida, los requisitos antes mencionados. Entre estos materiales se encuentran el óxido de aluminio, la mullita, el titanato de aluminio, el óxido de circonio, el carburo de silicio, los compuestos del sistema $\text{LiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ y la cordierita. La cordierita es un compuesto cerámico del sistema ternario $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ de fórmula molecular $2\text{MgO:2Al}_2\text{O}_3:5\text{SiO}_2$.

Aparte de los quemadores de gas cerámicos también existen quemadores de gas metálicos. La principal ventaja de los quemadores metálicos frente a los cerámicos es su resistencia mecánica, y su inconveniente es la oxidación. Las formas principales en las que se presentan comercialmente son los perforados con agujeros o rejillas (4) y los de fibras (5). Los materiales base de estos quemadores son distintas aleaciones metálicas como aceros austeníticos, ferríticos, aleaciones de Fe-Cr-Al (FeCralloy) y Ni-Cr-Fe (Nicrofer). Al igual que los quemadores cerámicos, los metálicos pueden presentar distintas geometrías: planos, cónicos, cilíndricos etc.

2. TIPOS DE QUEMADORES DE GAS CERÁMICOS

Existen distintos tipos de quemadores cerámicos de gas, algunos de ellos desarrollados comercialmente, entre los que se pueden destacar los fabricados con fibras, los reticulados y las placas con orificios perforados. A continuación hablaremos de cada uno de ellos.

2.1 Quemadores Cerámicos de Fibras

Una de las formas más comunes de los quemadores cerámicos es la manta de fibras. El método usual de preparación de estos materiales fibrosos es el conformado en vacío de una barbotina. La barbotina se obtiene mezclando fibras, de diámetro entre 10 y 30 μm y un ligante que, normalmente, es un cemento de alúmina, circona o sílice. La barbotina se conforma en vacío con un molde metálico, para extraer el agua que se había utilizado como vehículo. Después del secado, el cuerpo se cura a temperaturas $\leq 500^\circ\text{C}$ para que los ligantes le confieran cierta solidez estructural. Estos cuerpos fibrosos poseen una porosidad muy alta (hasta 95% en volumen), manteniendo además sus propiedades estructurales a las temperaturas típicas de trabajo del quemador, es decir $T \geq 900^\circ\text{C}$ (6).

Los más comunes, y también los más económicos, son los quemadores fabricados con fibras silicoaluminosas (7). Algunas investigaciones modifican la composición añadiendo otras especies como el Ba_2O_3 (8) o bien fibras de menor longitud, para aumentar la eficiencia radiante (9). Este tipo de estructuras fibrosas también se pueden utilizar como una pantalla radiante, en este caso, se depositan sobre el quemador utilizando vehículos orgánicos volátiles (10) o bien polímeros (11). Otro

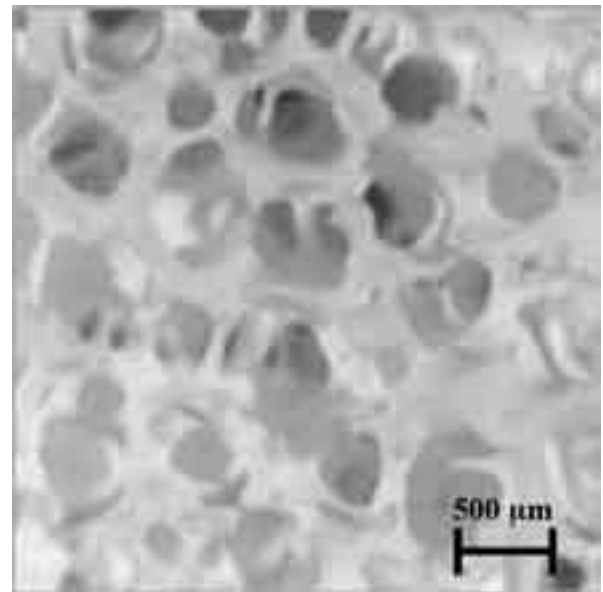


Figura 2: Detalle de una placa cerámica reticulada cortesía de Ecoceramics BV (21).

tipo de fibras que se utilizan en esta aplicación son las de SiC (12) y las de ZrO_2 .

Existen quemadores de fibras comerciales para su uso en calderas domésticas e industriales, así como en calentadores de agua (13).

2.2 Esponjas Cerámicas

Las esponjas cerámicas, o cerámicas reticuladas, pueden considerarse como un sistema con dos fases; una fase sólida continua y una fase porosa que se extiende en todas las direcciones. Estas esponjas se utilizan frecuentemente, entre otras aplicaciones, como filtros de gases en los motores diesel y como filtros para colar metales fundidos. La manera de obtenerlas es por el método de la réplica polimérica (14), que consiste en la inmersión de una esponja, normalmente de poliuretano, en una barbotina de la composición buscada para conformar el quemador. Después de eliminar el exceso de barbotina, la esponja recubierta se calienta para eliminar el componente orgánico y, posteriormente, se sinteriza. La estructura de la esponja queda así replicada como se puede observar en la Figura 2.

Dependiendo de la forma inicial de la esponja polimérica se pueden obtener cerámicas reticuladas en forma de paralelepípedo (15), cilindro (16), cilindro hueco (17), toroide (16) etc., según la aplicación buscada. Los materiales cerámicos que se utilizan abarcan prácticamente todos los mencionados en la introducción (16,18,19). Para su empleo como quemador, la densidad de poros de estas estructuras es un parámetro importante y suele estar en el entorno de los 30 poros por cm^2 (20). La porosidad puede oscilar entre un 50 y un 95%. A veces, se recurre a distintos tipos de recubrimientos sobre la estructura reticulada para mejorar la eficiencia radiante del quemador (15). Dichos recubrimientos suelen estar patentados y se realizan mediante pulverizado de emulsiones, por inmersión en una barbotina (17) o mediante deposición en fase vapor (15). Algunos de estos quemadores reticulados están ya comercialmente implantados (21).

2.3 Placas Cerámicas Perforadas

Las placas cerámicas perforadas están formadas por un material cerámico de alta porosidad con un gran número de finos canales, distribuidos uniformemente, que atraviesan la placa transversalmente. El combustible atraviesa los canales desde una de las caras de la placa y se quema en la opuesta. Como en los casos anteriores, el material base de la placa debe ser refractario para que soporte las altas temperaturas alcanzadas en la superficie de combustión y, además, debe tener una alta porosidad para que se reduzca la conductividad térmica y aumente el rendimiento de la combustión (1). Este tipo de quemadores se ha desarrollado con los materiales cerámicos mencionados anteriormente (2,22-24). Para incrementar la porosidad, generalmente, se añade a las materias primas determinados productos formadores de poros, como pueden ser partículas de carbón, virutas de madera, gránulos de almidón o de celulosa o cualquier otro material orgánico que genere gases durante su descomposición a altas temperaturas. La proporción en volumen del componente productor de porosidad debe estar dentro de ciertos límites. Estos límites están entre el 30 y 40 % vol., según la patente de Abe y col. (23) y, de igual forma, el tamaño de estos poros es importante, debiendo encontrarse en el rango de 25-500 μm (23). Por otra parte, las propiedades mecánicas de estos materiales porosos pueden mejorarse añadiendo fibras cerámicas, generalmente silicoaluminosas, a las composiciones originales (24).

Hay distintos métodos para producir los canales característicos de este tipo de quemadores (Figura 3). Los canales pueden ser moldeados por prensado de la pasta cerámica, introduciendo la pasta en un molde con la forma final que se desea dar al quemador o, también, se pueden utilizar métodos de tecnología más avanzada como puede ser la perforación por láser (25).

El diámetro de los canales es un parámetro muy importante y debe estar entre 0,05 y 5 mm para que funcione correctamente (23). Si el diámetro es menor de 0,05 mm es muy difícil que se produzca la combustión en la zona superior del canal y, si se produce, es incompleta. Además, los canales de diámetro demasiado pequeño se obstruyen fácilmente por los residuos carbonosos de la combustión. Si el diámetro excede los 5 mm, se producen fenómenos de soplado, por los cuales las llamas se despegan de quemador, haciendo que la combustión no sea homogénea, o bien se produce el retroceso de la llama hacia las zonas inferiores del quemador. En el mercado pueden encontrarse placas con diámetros de agujeros que varían entre los 0,5 y los 2 mm (23,26).

El espesor de la placa del quemador es también un factor importante a tener en cuenta. Si bien, debido a la baja conductividad térmica, la placa cerámica podría hacerse muy fina sin que hubiera transferencia de calor excesiva hacia las zonas metálicas de la cámara de combustión, no es aconsejable un espesor menor de 2 mm debido a la pobre resistencia mecánica que tendría el quemador. De igual forma, placas cerámicas con espesores superiores a los 30 mm darían lugar a heterogeneidades en la temperatura superficial del quemador (23). La geometría de los canales también puede variar según el tipo de quemador, siendo generalmente canales cónicos o cilíndricos.

Algunos autores modifican la composición del material base añadiendo determinados óxidos metálicos (24), que tienen un efecto catalítico sobre la combustión del gas y reducen la relación CO/CO_2 .

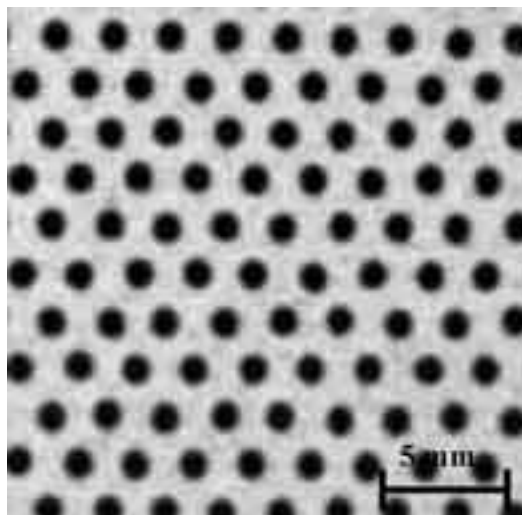


Figura 3: Detalle de las placas perforadas producidas por Rauschert España S.A. (32).

Como en el caso de los quemadores reticulados, uno de los aspectos más críticos buscados es el aumento de la emisión radiante desde la superficie. Para conseguirlo, éstas se suelen recubrir con materiales de alta emisividad como puede ser grafito (27) o materiales de base metálica (28). Otra forma de aumentar la emisividad consiste en incrementar la superficie radiante, de hecho, hay diferentes patentes que proponen aumentar la superficie radiante mediante relieves moldeados en las placas. Estos relieves suelen ser romboédricos, triangulares o hexagonales (23,29-31) y se disponen en la superficie del quemador de distintas formas.

Existen diversas empresas que producen placas cerámicas perforadas, con distintas formas y de diversos materiales, para aplicaciones en quemadores tanto domésticos como industriales (32-34).

3. MODOS DE COMBUSTIÓN EN LOS QUEMADORES CERÁMICOS

El quemado de combustibles gaseosos requiere la mezcla del gas con el elemento oxidante, normalmente el aire, que se aporta en exceso para disminuir la emisión de gases nocivos como el CO. Este exceso de aire, n , es un parámetro de la combustión y se define como:

$$n \equiv \frac{\text{volumen de aire total}}{\text{volumen de aire necesario para la combustión estequiométrica}}$$

donde el denominador es característico de cada gas. Los valores usuales de n están generalmente entre 1,2 y 1,3, lo que significa un 30 % de exceso de aire. De hecho, este valor es el óptimo para que la eficiencia de la combustión sea máxima y las emisiones sean mínimas (20, 35).

Otro parámetro importante en la combustión de quemadores cerámicos es la carga térmica, P , que es una medida de la potencia por unidad de superficie y se mide en kW/m^2 . Para obtener una carga térmica determinada, los gases deben tener una cierta velocidad de salida o flujo. La relación entre P y la velocidad de los gases, u , depende de n y del valor calorífico neto, H , según la relación (20):

$$u = \frac{P}{H} \left(1 + s_{\text{CH}_4} \frac{1}{X_{\text{O}_2}} n \right)$$

siendo $x_{O_2} = 0.2094$ la fracción volumétrica de oxígeno en aire seco y $s_{CH_4} = 2.0028$ el volumen relativo de oxígeno necesario para la combustión estequiométrica del metano, teniendo en cuenta que el volumen molar del metano difiere en un factor de 1,0014 del volumen molar del aire. El valor calorífico neto del metano es $H = 35,9 \text{ MJ/m}^3$ (20,35).

Una forma de caracterizar un quemador es representar su diagrama de trabajo, un ejemplo esquemático se muestra en la Figura 4, que representa el rango permitido de utilización en una caldera en términos de la carga térmica, P , y de la relación de aire, n . Las zonas 1, 2 y 3 del diagrama se corresponden con las situaciones de trabajo del quemador en modo radiante, modo transitorio y modo de llama azul, respectivamente:

Modo de Llama Azul

Está caracterizado por cargas térmicas elevadas, entre 600 y 2000 kW/m², y la presencia de llamas de color azul que se forman a cierta distancia del quemador. La longitud de estas llamas puede variar desde 3 mm hasta 20 mm, dependiendo del nivel de carga térmica (20). En este modo de trabajo, el quemador cerámico está sujeto a temperaturas en su superficie de alrededor de 750°C. Las especies químicas que son susceptibles de degradar el material cerámico no lo afectan, pues la combustión se produce bastante lejos de la superficie.

Modo Transitorio

Para cargas térmicas intermedias ($P \approx 400 - 600 \text{ kW/m}^2$) aparecen dos tipos de comportamiento de la llama; en determinadas zonas, la llama se estabiliza cerca de la superficie del quemador, mientras que en otras se aprecian llamas azules tipo Bunsen.

Modo Radiante

Cuando se opera a cargas térmicas bajas ($P \approx 100 - 400 \text{ kW/m}^2$), el frente de llama se estabiliza en la superficie del quemador. De esta forma, el quemador aumenta su temperatura y comienza a emitir energía a los alrededores en forma de radiación. Como la temperatura de la llama ha disminuido, la relación de producción térmica de NO_x se reduce significativamente.

Es muy complicado medir la temperatura de los gases y la concentración de especies que se producen en la combustión. Hay numerosos trabajos que modelizan el proceso de combustión que ocurre en los quemadores de gas (20,36-43), utilizando parámetros propios del quemador y aproximaciones a las reacciones químicas como la C-1 (Figura 5), usualmente empleada para la combustión del metano (20). Estos cálculos permiten conocer los perfiles de concentración de especies como CO , CO_2 , H_2O , NO_x , que dan idea sobre la eficiencia y seguridad de la combustión. También se pueden obtener los perfiles de concentración de las especies minoritarias como O , OH o H , susceptibles de degradar el material del quemadores.

4. DEGRADACIÓN DE LOS QUEMADORES CERÁMICOS

La vida de un quemador se puede definir como el tiempo durante el cual el quemador, instalado según las especificaciones del fabricante y trabajando bajo condiciones de operación normales, mantiene sus funciones sin que se produzcan fallos en la combustión. Los fallos del quemador pueden estar relacionados con fallos en el aporte de la mezcla combustible o con la degradación del material que lo forma. Dentro de este segundo supuesto se hallan distintos mecanismos que lo producen, como se detallan a continuación.

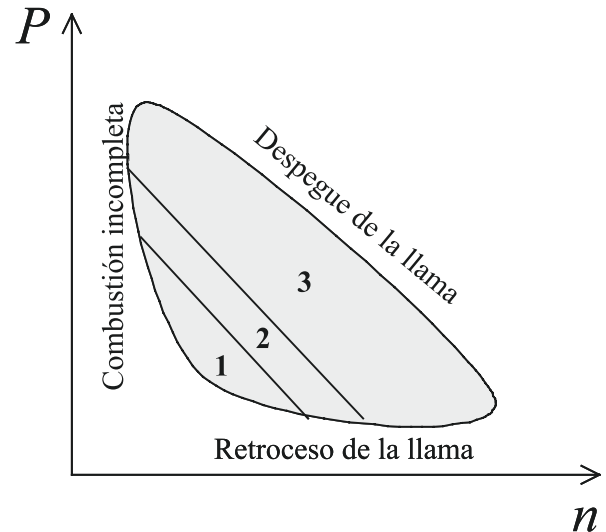


Figura 4: Ejemplo de diagrama de trabajo de un quemador de gas.

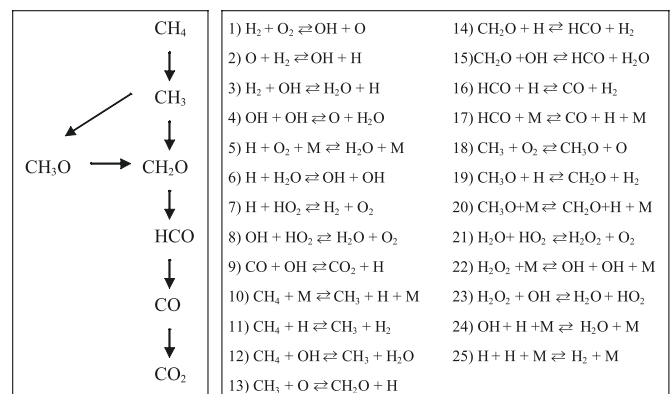


Figura 5: Aproximación de la reacción de oxidación del metano en aire denominada C-1 (20).

Fusión

Se produce cuando, en algún punto del quemador, se dan temperaturas lo suficientemente altas como para alcanzar la fusión del material. La presencia de impurezas en la composición de las placas cerámicas disminuye el punto de fusión del material (44).

Una fusión localizada puede producir deformaciones puntuales y, al mismo tiempo, un sobrecalentamiento local extendiéndose de esta forma la zona de fusión. Este tipo de calentamientos locales se conocen como "puntos calientes" (45).

Crecimiento Subcrítico de Grietas

Consiste en el crecimiento lento de las microgrietas presentes en el material. Cuando una de estas grietas alcanza la longitud llamada crítica, ocurre la fractura de la placa. Este fenómeno puede ocurrir debido a la exposición a temperaturas elevadas, a niveles de esfuerzo moderados, en ambientes químicamente activos o al ciclado térmico. Los quemadores funcionan, generalmente, en ciclos térmicos de encendido y apagado, esto hace que el material este sujeto a choques térmicos de distinta intensidad, provocando el crecimiento de las grietas por tensiones de origen térmico. El ciclado térmico produce tensiones adicionales cuando ciertas fases presentes en las materias primas, como son el cuarzo o la cristobalita, en el peor caso, muestran transiciones de fase con cambios bruscos del coeficiente de dilatación térmica, lo que lleva a la formación de microgrietas.

Hay que destacar también que la porosidad interna (46) puede actuar como barrera al crecimiento de las microgrietas, pues relaja tensiones residuales. Por otro lado, un tamaño de grano demasiado grande puede tener una influencia negativa, ya que aumenta el tamaño de defecto crítico que controla la resistencia mecánica.

Degradación Química

Oxidación

En el caso de los quemadores cerámicos, la oxidación no suele ser un problema para su vida de trabajo. La razón es que, generalmente, los materiales cerámicos empleados son óxidos estables aunque también existen algunos tipos no oxidicos. En el caso de un material de SiSiC (carburo de silicio infiltrado con silicio) (47), sometido a pruebas de oxidación estática durante 49 h a una temperatura de 1350°C, no se observó evidencia de daño, si bien se detectó la oxidación del silicio. En los quemadores fabricados con materiales metálicos, este suele ser el mecanismo principal de degradación (48), fundamentalmente, cuando se produce el desprendimiento de la capa oxidica protectora.

Reducción

Los materiales cerámicos oxidicos, sin embargo, son susceptibles de sufrir la reducción de alguno de sus componentes por parte de las especies químicas que se forman en la combustión. Concretamente, el CO (49) y el hidrógeno diatómico (50) y monoatómico (51) pueden reducir la sílice presente en los óxidos cerámicos produciendo SiO y H₂O en fase vapor. De entre estas especies, el hidrógeno monoatómico es la que tiene un mayor poder reductor. El efecto reductor del hidrógeno monoatómico se ha probado en materiales de mullita (51) y cordierita (52) usados en placas radiantes. En este último material, se ha comprobado que en la superficie del quemador, donde la concentración de hidrógeno monoatómico aumenta, se produce un desplazamiento de la composición química del material, la presencia de nuevas fases cristalinas y cambios estructurales que afectan a las propiedades del quemador (52).

Ambiente y diseño de la cámara de Combustión

El ambiente de la cámara de combustión es un ambiente generalmente sucio, lo que provoca la caída de partículas de hollín o de residuos desprendidos de distintas partes de la cámara. Estas partículas, al depositarse sobre el quemador, pueden producir el taponamiento de los poros o de los canales de la placa. Este taponamiento provoca una combustión heterogénea en la zona formándose los denominados puntos calientes.

Además, como la combustión no es en un recinto abierto, existen problemas de re-radiación de la energía hacia el quemador por parte de los distintos componentes de la cámara, como puede ser el intercambiador de calor. La re-radiación hace que la temperatura de la superficie del quemador aumente, modificándose los parámetros de la combustión.

La consecuencia más drástica de la degradación de los quemadores, y que los hace inutilizables, es el fenómeno de la explosión por retroceso de llama. Cuando la degradación de los canales, o de los poros, hace más difícil la disipación del calor desde la superficie del material, se produce la combustión en una zona más profunda del quemador. Este proceso puede progresar con el tiempo de trabajo del quemador, según este se va degradando, hasta que llegue un momento en el que la llama no puede estabilizarse dentro del quemador y alcanza la zona inferior, donde se produce la explosión. En ese momento, el quemador deja de funcionar y, en el caso de los quemadores cerámicos, suele suponer la rotura de la placa.

5. CONCLUSIONES

Existen diferentes tipos de quemadores cerámicos de gas que se diferencian por el material con el que se fabrican y el tipo de estructura de la placa de combustión. Así, existen los quemadores cerámicos de fibras, las esponjas cerámicas y las placas cerámicas perforadas. Los materiales base empleados para quemadores deben cumplir dos requisitos básicos como son el poseer un bajo coeficiente de dilatación térmica y una baja conductividad térmica, además de otras condiciones. La combustión está gobernada por distintos parámetros que definen el modo de operación del quemador. Cuando el quemador opera en el denominado modo radiante, en general, se aceleran los mecanismos de degradación y se reduce la vida útil del mismo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto Mcyt MAT1999-0168-CE y por el proyecto EC (Brite-EURAM III Program) bajo el contrato BR-CT98-0743 (LIFEBURN Project). Los socios del proyecto *Lifeburn* fueron N.V. Acotech, CATIM S.A, CSIC-ICV, EcoCeramics B.V, Eindhoven University of Technology, Gaz de France, Ikerlan, INETI, Italgas, Kanthal AB, Morgan Matroc, N.V. Nederlandse, Politecnico di Torino, Repsol Petroleo S.A. and Worgas Bruciatori.

BIBLIOGRAFÍA

1. M. Arai, K. Amagai, T. Mogi, "Catalytic Combustion of Pre-Vaporized Liquid Fuel", *J. Energy Resources Tech.*, **123**, 44-49, (2001).
2. J. K. Kilham and E. P. Lanigan, "A Study of the Mechanism of Radiant Burners" *Gas Council Research Communication GC167*, I. G. E. *Journal-October* (1970), **10** pp. 700-713.
3. Bone y McCourt "Flameless Combustion", *J. Franklin Inst.* 101-131, (1912).
4. Información disponible en <http://www.kanthal.com>.
5. Información disponible en <http://www.acotech.com>.
6. O. Pickenäcker, K. Pickenäcker, K. Wawrzinek, D. Trimis, W.E.C. Pritzkow, C. Müller, P. Goedtko, U. Papenburg, J. Adler, G. Standke, H. Heymer, W. Tauscher, F. Jansen, "Drying and Firing: Innovative Ceramic Materials for Porous-Medium Burners, II" *Interceram* **48** [6] 424-34 1999.
7. J.T. Holmes, R. M. Edgar y P.F. Gerrish "Screening Ceramic Materials for Intense Radiant Heat Applications" *Ceram. Eng. Sci. Proc.* **6** [7-8] 682-87 (1986).
8. I. M. Rodgers y K. M. Long, "Premixed Gas Burner", Patente de EEUU, N° 5520536 5/1996.
9. T. W. Tong, S. B. Sathe y R. E. Peck, "Porous Radiant Burners Having Increased Radiant Output", Patente de EEUU, N° 4977111 12/1990.
10. A. Holowczenko, "Method for Making an Infrared Burner", Patente Europea N° 0397591A1 11/1990.
11. N. M. Otto, "Infrared Burner", Patente Europea N° 032674A2 8/90
12. T. M. Smith, "Infra-red Heating", Patente de EEUU, N° 5090898 2/1992.
13. Información disponible en <http://www.alzeta.com>.
14. F. F. Lange, K. T. Miller, "Open-Cell, Low-Density Ceramics Fabricated from Reticulated Polymer Substrates", *Advanced Ceramic Materials* **2**(4) 80-85 (1987).
15. J. R. Morris, N. H. Burlingame, "Dual Structure Infrared Surface Combustion Burner", Patente de EEUU, N° 4889481 12/1989.
16. J. R. Morris, "Coated Ceramic Structure and Method of Making Same", Patente de EEUU, N° 4568595 2/1986.
17. F. Ahmady, "Infrared Heater for Fluid Immersion Apparatus", Patente de EEUU, N° 4900245 2/1990.
18. I. M. Rodgers, "Gas Burner with Radiant Retention Head" Patente de EEUU, N° 5562440 10/1996.
19. M. W. Gordon, M. Zlatkin, K. A. Bauer y K. D. Oswald, "Ceramic Foam Low Emissions Burner for Natural Gas-Fired Residential Appliances", Patente de EEUU, N° 5511974 4/1996.
20. P. H. Bouma, "Methane-air Combustion on Ceramic Foam Surface Burners", Memoria de Tesis Doctoral. Eindhoven University of Technology, 1997.

21. Información disponible en <http://www.ECOceramics.nl>.
22. H. Kato y T. Yamana, "Ceramic Burner Plate for Gas Combustion", Patente de EEUU, N° 4640261 2/1987.
23. F. Abe, H. Hasegawa, T. Fujita y M. Maeda, "High Temperature Surface Combustion Burner", Patente de EEUU, N° 4673349 6/1987.
24. T. Mihara, T. Kusuda, K. Noma y H. Taki, "Ceramic Burner Plate", Patente de EEUU, N° 4504218 3/1985.
25. R. Luedi, "Flame Retention Baffle Mfr. For Radiant Burner – Forming Ceramic Body by Plasma Injection and Boring Channels for Fuel and Air Mix by Laser Beam", Patente europea 536706A2 4/1993.
26. R. D. LaFontaine, "Method of Forming Radiant Fiber Burner", Patente de EEUU, N° 5447666 9/1995.
27. T. W. Tong y W. Li, "Enhancement of Thermal Emission From Porous Radiant Burners", *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **52**, [2], 235-248, (1995).
28. F. Akio, M. Masao, "Gas Combustion Burner", patente japonesa JP61014189 1/1986.
29. M. Kito y T. Nomura, "Infrared Radiation Gas Burner Plate", Patente de EEUU, N° 4340357 7/1982.
30. M. Kito y T. Nomura, "Infrared Radiation Gas Burner Plate", Patente del Reino Unido N° 2068527A 8/1981.
31. S. Naito, "Infrared Gas Burner Plate" Patente de EEUU, N° 4063873 12/1977.
32. L. Tico, "Infrared – clean and efficient heat at the speed of light", *Global Ceramic Review*, **4** 12-13 (1998/99), (www.matroc.es).
33. Información disponible en www.hamilton-saint-gobain.com.
34. Información disponible en www.schwankheaters.com.
35. M. Márquez "Combustión y Quemadores" Ed. Marcombo, Barcelona 1989.
36. P. H. Bouma y L. P. H. De Goey, "Premixed Combustion on Ceramic Foam Burners", *Combust. Flame*, **119**, 133-43, (1999).
37. L. P. H. De Goey, L. M. T. Somers, W. M. M. L. Bosch y R. M. M. Mallens, "Modelling of the Small Scale Structure of Flat Burner Stabilized Flames", *Combust. Sci. and Tech.* **104**, 387-400, (1995).
38. P. F. Hsu y R. D. Matthews, "The Necessity of Using Detailed Kinetics in Models for Premixed Combustion Within Porous Media", *Combust. Flame*, **93**, 457-466, (1993).
39. R. Tanaka, M. Shinoda y N. Arai, "Combustion Characteristics of a Heat-Recirculating Burner Using a Low-Calorific-Fuel", *Energy Conversion and Management*, **42**, 1897-1907, (2001).
40. J. A. Van Oijen, F. A. Lammers y L. P. H. De Goey, "Modeling of Complex Premixed Burner Systems by Using Flamelet-Generated Manifolds", *Combust. Flame*, **127**, 2124-2134, (2001).
41. C. L. Hackert, J. L. Ellzey y O. A. Ezekoye, "Combustion and Heat Transfer in Model Two-Dimensional Porous Burners", *Combust. Flame*, **116**, 177-191, (1999).
42. R. Mital, J. P. Gore y R. Viskanta, "A Study of the Structure of Submerged Reaction Zone in Porous Ceramic Radiant Burners", *Combust. Flame*, **111**, 175-184, (1997).
43. M. D. Rumminger, "Numerical and Experimental Investigation of Heat Transfer and Pollutant Formation in Porous Direct-Fired Radiant Burners", Memoria de Tesis Doctoral, Universidad de California, Berkeley, 1996.
44. L. E. Thiess, "Vitrified Cordierite Bodies", *J. Am. Ceram. Soc.* **26** [3] 99-102 (1943).
45. G. Wang y J. L. Lannutti, "Surface Cavity Microenvironments in a Porous Ceramic Radiant Burner", *Combust. Sci. and Tech.* **95**, 277-311, (1994).
46. W. D. Kingery, H. K. Bowen y D. R. Uhlmann. "Introduction to Ceramics". John Wiley and Sons, 1976.
47. I. Alliat, A. J. Jickles, A. E. Segall, "Thermal Fatigue Performance of the Three SiSiC Ceramics For Gas Fired Heating Systems". International Gas Research Conference. 1995.
48. J. Jedlinski, "The oxidation behaviour of FeCrAl "alumina forming" alloys at high temperatures", *Solid State Ionics*, **101-103** (1997), pp 1033 – 1040.
49. R. E. Wright y H. I. Wolff, "Refractory Problems in Production of Hydrogen by Pyrolysis of Natural Gas", *J. Amer. Ceram. Soc.*, **31**, [2], 31-38, (1947).
50. M. S. Crowley, "Hydrogen-Silica Reactions in Refractories", *Ceram. Bull.* **46**, [7], 679-682, (1967).
51. J. L. Lannutti y R. A. Rapp, "Degradation of Radiant Ceramics Structures in Combustion Atmospheres", *GRI-report*, 93/0435, 1994.
52. E. García, P. Miranzo y M. I. Osendi "Alterations In Cordierite Based Burners Subjected To Radiant Mode Ageing Conditions" *J. Eur.Ceram. Soc.* **23**, 3097-3103 (2003).

Recibido: 29.07.03

Aceptado: 02.08.03

