Materiales y estructuras cerámicas para el diseño de quemadores de gas

R. MARIN

Ikerlan Energía, Centro de Investigaciones Tecnológicas, Juan de la Cierva 1,
Parque Tecnológico de Álava, Miñano Menor, Álava, España.

Los materiales cerámicos han sido utilizados en la fabricación de quemadores radiantes desde largo tiempo atrás. Ello se debe a que las propiedades de los materiales cerámicos resultan muy adecuadas para el desarrollo de quemadores:

- Elevado punto de fusión, adecuado para soportar las elevadas temperaturas de la llama.
- Elevada resistencia a la oxidación, que confiere a los quemadores larga vida sin degradación.
- Muy bajo coeficiente de expansión térmica, que reduce las tensiones termomecánicas.
- Muy baja conductividad térmica, con fuertes gradientes de temperatura a través del quemador que evitan el retroceso de llama.
- Elevada eficiencia radiante, que reduce la temperatura de los humos y minimiza la producción de NOx.
- Facilidad de conformado en diferentes estructuras: esponjas, placas con orificios, empaquetaduras de fibras, etc., cada una adecuada para un tipo de quemador.

Todo ello ha provocado una gran expansión de los materiales cerámicos para el diseño de quemadores de gas en los sectores doméstico, comercial e industrial de baja potencia. Desde los quemadores radiantes de superficie hasta los quemadores para hidrógeno, pasando por los quemadores volumétricos porosos, el abanico de posibilidades es inmenso. Solo hay que encontrar la combinación material-estructura adecuada.

Palabras clave: gas, quemadores cerámicos radiantes porosos.

Ceramic materials and structures applicable in gas burners design.

Ceramic materials have been extensively used in the production of radiant gas burners since decades. The properties of these materials are well adapted for the development of burners:

- High melting temperature, adequate for the high flame temperatures.
- Good oxidation resistance, producing a long burner lifetime.
- Extremely low thermal expansion coefficient, thus reducing thermo-mechanic stress.
- Very low thermal conductivity, with strong temperature gradients through the burner head, thus avoiding flame flashback.
- High radiant efficiency, lowering the fumes temperature and NOx production.
- Variety of burner shapes and structures: foams, holed plaques, fibres, etc. allowing to produce different burner types.

As a consequence, a strong expansion of the ceramic materials application in the development of gas burners for the domestic, catering, and industrial sectors, has been experienced. From the surface radiant burners to the burners for hydrogen or the porous radiant burners, there is a wide range of possibilities for the design of ceramic gas burners. There is a sole requirement: to find out the proper combination material-structure.

Keywords: gas, ceramic, porous radiant burners.

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales cerámicos han sido utilizados en la fabricación de quemadores desde largo tiempo atrás. En la memoria de todos están las estufas de butano o los asadores de pollos, equipados ambos con placas cerámicas con orificios.

El elevado punto de fusión que estos materiales presentan, unido a su baja conductividad térmica, muy bajo coeficiente de expansión térmica y muy elevada resistencia a la oxidación, les hacen candidatos idóneos para esta aplicación (1). Además, estos materiales presentan una gran flexibilidad en cuanto a su conformado, con muy variadas estructuras: esponjas,

placas con orificios, empaquetaduras de fibras, etc., cada una de las cuales adecuada para un tipo específico de quemador o aplicación.

Finalmente, los quemadores fabricados con materiales cerámicos presentan una muy elevada eficiencia radiante, junto con un espectro de emisión radiante muy ajustado al espectro de absorción del agua, lo que hace a los quemadores cerámicos muy adecuados para procesos de secado, curado, tratamiento térmico, etc.

Esto ha provocado una gran expansión en la utilización

de los materiales cerámicos para el diseño de quemadores de gas en los sectores doméstico, comercial, e industrial de baja potencia.

2. EL QUEMADOR DE GAS

El quemador es el componente fundamental de cualquier aplicación de gas. Su misión es conseguir la combustión completa y limpia de la mezcla aire-gas, generando una llama estable y homogénea, y adecuando la emisión del calor al producto a calentar. Para ello, el quemador debe cumplir los siguientes requerimientos:

- Distribución uniforme de la llama (y altura uniforme) con reparto homogéneo y eficiente del calor al elemento a calentar (intercambiador de agua, utensilio de cocinado, etc.)
- Combustión completa del gas, con emisiones contaminantes mínimas y, siempre, cumpliendo la normativa vigente.
- Estabilidad de la llama, sin desprendimiento ni retroceso de la misma en todo el rango de potencias del quemador.
- Larga vida del quemador (de 12 a 15 años), similar a la esperable para la aplicación en que va instalado, y sin degradación apreciable a lo largo de su vida útil.

Últimamente ha aumentado significativamente la preocupación por la reducción de emisiones de NOx. Por ello, resulta deseable el desarrollo de quemadores que presenten una baja tasa de emisión de este contaminante.

2.1. Tipos de quemadores

Los quemadores se pueden distribuir de diferentes maneras según el aspecto analizado:

- Según la forma de la transmisión del calor a la carga se distinguen quemadores de llama azul (transmisión de calor por convección) y quemadores radiantes (transmisión de calor lo más radiante posible).
- Según como consiguen la mezcla aire-gas se diferencian los quemadores de mezcla parcial (con aire primario mezclado con el gas aguas-arriba del quemador y aire secundario aspirado en la llama) y quemadores de premezcla (con todo el aire mezclado con el gas antes de alcanzar al quemador).
- Según la generación del “tiro” que asegura la entrada del aire en el quemador se distinguen los quemadores atmosféricos (con entrada del aire por tiro natural) y quemadores asistidos con ventilador (con tiro aspirado o forzado).

Aunque los tradicionales asadores de pollos, y algunos calentadores radiantes a gas para el calentamiento de locales, siguen estando equipados con quemadores cerámicos atmosféricos radiantes y de mezcla parcial, la mayoría de las aplicaciones (calderas, calentadores de agua, sistemas de secado, aplicaciones de catering, etc.) van equipadas con quemadores de premezcla, preferiblemente de tiro forzado, y con una forma de transmisión de calor que va desde el calentamiento radiante, a bajas potencias, hasta el calentamiento por convección en alta potencia.

Frente a los quemadores de mezcla parcial, estos quemadores de premezcla (2) presentan las ventajas siguientes:

- Menor exceso de aire necesario y mejor control del mismo, lo que se traduce en una mayor eficiencia térmica, y menores emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero.
- Admiten una mayor potencia específica (W/mm^2 de quemador), lo que se traduce en quemadores más compactos

y de menor tamaño para igual potencia térmica.

- Producen una llama más viva y corta: Esta característica, junto con su mayor potencia específica, permite reducir las dimensiones de la cámara de combustión y diseñar, con ello, aplicaciones más compactas.

- Permiten el envío de los humos de combustión a gran distancia, a través de conductos de pequeño diámetro. También permiten el desarrollo de aplicaciones estancas, con la recogida del aire exterior y la descarga de los humos a través de sendos tubos concéntricos y sin interferir en absoluto con el aire de la vivienda o local en que se ubica la aplicación.

Por ello, el presente trabajo se centra en este tipo de quemadores: quemadores de premezcla, de tiro forzado, y trabajando, en gran medida, en forma radiante.

3. ESPECTRO DE EMISIÓN RADIANTE

Todo cuerpo que se encuentre a temperatura superior al cero absoluto emite radiación. El espectro electromagnético completo (Figura 1) cubre, por ello, desde las ondas “largas” de cuerpos a baja temperatura a las radiaciones gamma de onda “corta”. Del espectro electromagnético, solo una porción comprendida entre las longitudes de onda de 10^{-3} m y 10^{-7} m, correspondientes a la radiación infrarroja, visible y ultravioleta cercana, son las consideradas en el calentamiento radiante mediante quemadores a gas

Fig. 1- Espectro electromagnético completo, en el que se muestra el rango de longitudes de onda, el tamaño de las ondas y su frecuencia, así como las diferentes fuentes de radiación que las producen. Se muestra también el rango de longitudes de onda que cubren los quemadores radiantes.

TABLA I. INTENSIDAD RADIANTE RELATIVA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL FOCO EMISOR

Temperatura [°C]	800	900	1000	1100	1400
Intensidad radiante relativa	1	1,42	1,98	2,68	5,91

Por otro lado, es conocida la relación entre la longitud de onda radiante y la intensidad de la radiación. Según la ley de Stefan-Boltzman ($E = \sigma T^4$), todos los objetos calientes emiten un espectro de radiación característico, siendo la intensidad de la radiación proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del emisor.

Esto es, existe una relación directa entre la temperatura del foco emisor y la intensidad radiante del mismo (Tabla 1). De ello se deduce la gran importancia de adecuar la temperatura de la superficie del quemador a la intensidad radiante que se pretende conseguir.

Atendiendo a este aspecto, la intensidad de la energía radiada, se distinguen tres tipos de quemadores (Figura 2):

1. Quemadores catalíticos.
2. Quemadores radiantes de superficie.
3. Quemadores volumétricos porosos.

Fig. 2- Diferentes quemadores radiantes: catalítico, quemador radiante de superficie y quemador volumétrico poroso, y temperatura media de foco que producen cada uno de ellos.

En los siguientes apartados se muestran las características que diferencian de cada uno de ellos.

4. QUEMADORES CATALÍTICOS

Un catalizador es una sustancia que acelera un proceso químico (en este caso la oxidación completa del gas) sin ser consumido durante el mismo y sin modificar el equilibrio termodinámico de la reacción. La combustión catalítica resulta, por ello, una completa, limpia y eficiente conversión del gas en calor radiado y humos. Un quemador catalítico (3) se compone de tres partes:

1- **Soporte:** Aporta al quemador elevada resistencia mecánica y térmica, gran relación superficie-volumen y baja pérdida de carga. Corderita o Perovskitas son materiales habitualmente utilizados en su construcción y su estructura habitual es una esponja de poro abierto.

2- **Recubrimiento:** es el material que recubre el soporte. Su función es incrementar el área efectiva de catálisis y minimizar la reacción del material activo con el soporte. El material más utilizado es Alúmina con aditivos, aunque están apareciendo otros como ZrO_2 , MgO o SiC que permiten alcanzar mayores temperaturas de foco.

3- **Material activo:** Es el catalizador en sí. Los metales nobles como Pt o Pd presentan más alta actividad para la oxidación a bajas temperaturas pero, a temperaturas elevadas, se volatilizan. Algunos óxidos de metales de transición como Fe_2O_3 , Co_3O_4 , son buenos catalizadores de oxidación, al igual que los óxidos mixtos tipo Perovskita.

Los quemadores catalíticos (Figura 3) son quemadores de "baja temperatura". Sus principales características son:

- Potencia específica baja: entre 20 y 50 kW/m².
- Poca capacidad de modulación de la potencia térmica entregada, y trabajando habitualmente con control todo-nada
- Temperatura del foco radiante baja: entre 500 y 600 °C.
- Eficiencia radiante muy elevada, con más del 85% de la energía en forma radiada.
- Radiación muy uniforme y de onda larga.
- Espectro emisor muy ajustado al espectro de absorción del agua.
- Precisa de un precalentamiento eléctrico inicial que favorezca las reacciones de catálisis. Son, por ello, quemadores de respuesta lenta.
- No produce llama visible.
- Presenta una ausencia absoluta de riesgo de encendido

y/o explosión, por lo que puede utilizarse en atmósferas inflamables como disolventes, pinturas, etc.

Fig. 3- Quemador catalítico Boostercat ®, de Infragas, desarrollado para secado y curado.

Por todo ello, los quemadores catalíticos son muy adecuados para procesos industriales de curado y secado, y también para calefacción (estufas catalíticas). En todas estas aplicaciones, la baja densidad de potencia y la eficiencia radiante elevada representan una gran ventaja.

5. QUEMADORES RADIANTES DE SUPERFICIE

Son, con mucho, los quemadores más utilizados y en los que puede encontrarse una mayor profusión de materiales y estructuras disponibles en el mercado. Son quemadores de "temperatura media" de foco, alrededor de los 1000 °C, según el material del quemador.

A diferencia de los anteriores, los quemadores radiantes de superficie están compuestos por un único componente. La llama se estabiliza sobre la cara "caliente" del quemador, a unos pocos milímetros de la superficie (con apariencia de llama azul) o penetra ligeramente en éste (con apariencia infrarroja), en función del balance entre la velocidad de la combustión y la velocidad de salida de la mezcla aire-gas del quemador.

En situaciones extremas puede producirse el desprendimiento de la llama (la llama se despega del quemador) o el retroceso de la misma (la llama se mete bien dentro del quemador). En el primer caso la tasa de CO se dispara si la llama alcanza zonas frías de la cámara de combustión, como el intercambiador humos-agua. En el segundo caso se produce un deterioro irreversible del quemador y, en el peor de los casos, la deflagración de la mezcla aire-gas situada aguas-arriba del mismo.

Las principales características de estos quemadores son:

- Un rango muy amplio de potencias específicas, según los materiales utilizados: entre 100 y 2000 kW/m².
- Amplio rango de modulación de potencia, de hasta 10 a 1, lo que favorece su utilización en calderas de condensación.
- Temperatura máxima de foco elevada cuando trabaja en modo radiante: entre 950°C y 1100 °C, según el material y la estructura del quemador.

- Eficiencia radiante media: 25-30%, según el material y la estructura del quemador.
- Con llama visible.
- Bajas emisiones: CO y NO_x inferiores a 100 mg/kWh.
- Respuesta rápida al encendido.
- Muy apta para secado, conformado y tratamiento superficial, así como para aplicaciones domésticas (calderas y calentadores de agua) y de catering (hornos, salamandras, gratinadoras, etc.).

Los materiales y estructuras cerámicas más habitualmente utilizadas en el diseño de estos quemadores se muestran en los apartados siguientes.

5.1. Placas cerámicas con orificios

Son placas cerámicas sólidas con una matriz de pequeños agujeros, de 1.2 a 1.6 mm de diámetro (4), que las atraviesan y por donde pasa la mezcla aire-gas (Figura 4). Cordierita, Mullita y Carburo de Silicio son materiales habitualmente utilizados en la fabricación de estas placas. Para reducir el peso de material y la conductividad térmica de la placa, estas placas se construyen con una elevada porosidad, del orden del 60 %. De este modo, se consigue un elevado gradiente de temperaturas a través de la placa que previene el retroceso de la llama.

Fig. 4- Quemador radiante de placa cerámica con orificios, mostrando la cara "caliente" almenada, y apariencia del mismo trabajando en modo "llama azul" y en "modo radiante".

La eficiencia radiante de estos quemadores ronda el 18-20 %. Se utilizan tres formas de aumentar esta eficiencia:

1. Colocar una malla metálica a unos pocos milímetros sobre la superficie de la placa y paralela a ella. Esta malla, que se calienta al rojo, refleja el calor hacia la superficie de la placa aumentando su temperatura. Aunque se alcanzan eficiencias radiantes del 36 % es un método en desuso por el rápido deterioro de la malla.

2. Un segundo método es utilizar placas con "relieve" desigual, con los agujeros de paso de gas colocados en los valles. Las "paredes" inclinadas de los valles se calientan, produciendo el mismo efecto que la malla. Se alcanzan eficiencias radiantes de hasta el 40 %.

3. El tercer método consiste en el recubrimiento de las placas con óxidos metálicos o sales. Es menos efectivo que los anteriores y poco utilizado.

La eficiencia radiante depende del exceso de aire en la combustión y de la potencia específica del quemador, con su valor máximo obtenido para potencias específicas de entre 300 y 500 kW/m².

Las placas cerámicas presentan una pérdida de carga extremadamente baja, por lo que su capacidad de equilibrado de la llama es también muy baja. Así, cuando el quemador trabaja en llama azul es muy inestable, con tendencia a escape de llama y a presentar llamas muy poco homogéneas, por lo que las placas cerámicas se utilizan fundamentalmente para fabricar quemadores que trabajan en modo radiante.

Como ventajas fundamentales de estas placas cabe citarse su baja tendencia a retroceso de llama y su muy bajo costo. Como contrapartida, estos quemadores presentan el inconveniente de la necesidad de prever sistemas de equilibrado del quemador, amén de su fragilidad frente a las diferentes dilataciones del quemador y del alojamiento del mismo. Por ello, se hace necesario prever la expansión del quemador en su alojamiento. Fabricantes conocidos son Schwank (Alemania), Saint Gobain (USA), Bray (Reino Unido) y Rauscher (España).

5.2. Quemadores de espuma cerámica

A diferencia de los anteriores, estos quemadores trabajan perfectamente en modo llama azul y en modo radiante, en este último caso, con la llama ardiendo muy cerca de la superficie del quemador que se calienta al rojo (5). Esto permite amplísimas relaciones de potencia, muy útiles en el desarrollo de equipos de condensación.

En este caso, no existen orificios de llama definidos, sino que la mezcla aire-gas pasa por los poros del material (figura 5). El material base de la espuma es Cordierita o Mullita.

Fig. 5- Quemador radiante de espuma cerámica y apariencia del mismo trabajando en modo "llama azul" y en modo "radiante"

La pérdida de carga producida por estos quemadores es muy importante, lo que se traduce en una gran capacidad de equilibrado de la llama y, como contrapartida, en la necesidad de utilizar ventiladores más potentes.

Para obtener una buena eficiencia radiante conviene que la llama se acerque lo más posible a la superficie de salida del quemador y que la relación aire-gas de combustión sea próxima a la estequiométrica (6). En la práctica, se utilizan excesos de aire de entre el 10 y 20 % para asegurar la combustión completa del gas frente a variaciones en el suministro de gas o aire. Otro modo de incrementar la eficiencia radiante de estos quemadores suele ser el recubrimiento de la cara caliente con una pintura de SiC. El fabricante más conocido es EcoCeramics (Holanda).

5.3. Quemadores de fibra cerámica

Están constituidos por un conglomerado de fibras de SiC, de pequeño espesor (unos 3-5 mm) muy ligero, mecánicamente estable y ligeramente flexible, a través del que pasa la mezcla aire-gas (7). El quemador presenta aspecto de fibras cerámicas empaquetadas. Como la espuma cerámica, este material es

autoportante, no requiriendo sistema de sujeción alguno. En contrapartida, su baja flexibilidad sólo permite conformar quemadores planos.

Existe una versión con orificios discretos (Figura 6) y otra sólida, sin orificios definidos. La primera de ellas va dirigida a quemadores de alta potencia (calderas y calentadores); la segunda está más orientada hacia el calentamiento radiante, con baja potencia específica.

Fig. 6- Quemador radiante de fibra cerámica con orificios (izda), especial para quemadores de alta densidad de potencia, y sin orificios (dcha), especial para quemadores de baja densidad de potencia, trabajando ambas en modo "radiante".

El muy bajo coeficiente de expansión térmica de este material reduce enormemente las posibilidades de deformación del quemador o la aparición de tensiones termomecánicas. Por lo demás, su rango de operación alcanza los 2500 kW/m² con excesos de aire de entre el 10 y 40 %. El fabricante más conocido es Orkli (España).

6. QUEMADORES POROSOS RADIANTES

Son quemadores de "muy alta temperatura" y muy elevada eficiencia radiante (8), muy especiales y poco utilizados en aplicaciones domésticas.

A diferencia de los procesos de combustión convencional de premezcla, la tecnología de quemadores porosos no opera con llamas libres (Figura 7). Por el contrario, la combustión tiene lugar en cavidades distribuidas tridimensionalmente en un medio poroso inerte (9), presentando una apariencia puramente radiante, totalmente diferente de la llama de quemadores superficiales.

Fig. 7- Quemador poroso radiante.

La transmisión del calor desde el interior del material hacia su periferia se lleva a cabo por la acción combinada de la radiación, convección y la conducción a través del medio sólido.

Un quemador poroso (Figura 7) está compuesto por dos capas muy diferenciadas: estructura porosa y placa base. La estructura porosa puede presentar diversas formas: espumas, mezcladores, etc, y utilizar diversos materiales (10), aunque los más utilizados son: SiC, Al₂O₃ y ZrO₂ (Figura 8). Debe soportar elevadísimas temperaturas, tensiones termomecánicas y fatiga térmica.

Fig. 8- Estructuras porosas de ZrO₂ (izda), Al₂O₃ (centro) y SiC (dcha).

En cuanto a la placa base, ésta debe soportar enormes gradientes de temperatura, desde casi 1400 °C en su cara caliente (la que está en contacto con la espuma) a casi temperatura ambiente en su cara fría (por donde entra la mezcla aire-gas). En consecuencia, esta placa debe ser de poro muy pequeño (11) para evitar la tendencia al retroceso de la llama y soportar bien las tensiones termomecánicas producidas por la diferente dilatación de sus caras superior e inferior. El material habitualmente utilizado es SiO₂ y Al₂O₃.

Las principales características de estos quemadores son:

- Potencia específica elevada: 200 - 2000 kW/m².
- Muy amplio rango de modulación de potencia: superior a 10 a 1.
- Temperatura máxima de foco radiante > 1400 °C.
- Eficiencia radiante alta: entre 35 y 60%, según la carga específica del quemador.
- Radiación muy uniforme y de onda media-corta.
- Sin llama visible (apariciencia totalmente infrarroja).
- Muy bajas emisiones (CO y NOx inferiores a 35 mg/kWh)
- Respuesta rápida.
- Muy apta para procesos de alta temperatura, conformado y tratamiento superficial.

La eficiencia radiante de este tipo de quemadores es alrededor de un 30% mayor que en los quemadores radiantes de superficie (12). Por ello, a pesar de su elevado costo, este tipo de quemadores tiene su campo de aplicación donde se precise elevada eficiencia radiante, elevada temperatura del foco emisor, elevada densidad de potencia, radiación muy uniforme, bajo coste de operación y bajo coste de mantenimiento. Este es el caso de un calentador a gas para lavavajillas industrial desarrollado en Ikerlan (Figura 9).

Ente los fabricantes de este tipo de quemadores destacan Promeos y GoGas (GE). Por su lado, el consorcio formado por el Instituto de Cerámica y Vidrio-CSIC, Ikerlan y Prosidier ha desarrollado y está patentando (13) un nuevo modelo de quemador poroso radiante (Figura 10).

Fig. 9- Calentador a gas para lavavajillas industrial con quemador poroso radiante desarrollado en Ikerlan.

Fig. 10- Quemador poroso radiante desarrollado por el consorcio ICV-Prosider-Ikerlan.

7. QUEMADORES PARA HIDRÓGENO

Los quemadores analizados hasta ahora están diseñados para trabajar con gases de la segunda familia (gas natural) o la tercera (propano y butano). En ambos casos, la combustión más limpia del gas provoca emisiones de CO_2 . Por el contrario, el hidrógeno es el gas combustible "perfecto". Su combustión, según la reacción $\text{O}_2 + 2\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$, es absolutamente limpia, sin producir CO ni CO_2 . Esto le hace particularmente atractivo cuando se trata de reducir emisiones de gases contaminantes y de gases de efecto invernadero.

Esto está favoreciendo, en un proceso que se irá acentuando con el paso del tiempo, la progresiva hidrogenación de la red del gas natural, en proporciones que se prevén llegarán a alcanzar el 25 %, en volumen de H_2 en la mezcla " $\text{H}_2 - \text{CH}_4$ ". Por ello, cuando hablamos de quemadores para hidrógeno, en realidad estamos considerando quemadores adecuados para estas futuras mezcla hidrogenadas.

Quemar hidrógeno o mezclas gaseosas altamente hidrogenadas presenta serios problemas, no resueltos en la actualidad salvo en la industria aeroespacial, con combustores de tecnología muy sofisticada y cara. En efecto, además de ser un gas incoloro e inodoro, y por ello difícil de detectar, el hidrógeno es el combustible menos denso que existe (quince veces más ligero que el aire), con una conductividad térmica cinco veces superior al metano (constituyente fundamental del gas natural) y con una viscosidad ocho veces superior a éste (Tabla II). Además, para su combustión completa, el aire requerido es la cuarta parte del requerido por el metano. Esta combinación de factores hace del hidrógeno un gas combustible muy "especial".

TABLA II. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS GASES COMBUSTIBLES HABITUALES.

DATOS DE LOS GASES COMBUSTIBLES

Gas	D.absoluta	Aire Esteq.	Viscos. Din.	C.Térmica	I. Wobbe
Metano	0,680	9,524	1,09E-05	0,0332	45,672
Propano	1,900	23,81	8,06E-06	0,0177	70,692
Butano	2,543	30,952	7,39E-06	0,0159	80,58
H_2	0,083	2,381	8,76E-06	0,1672	33,490

NOMENCLATURA

D.abs. - DENSIDAD DE LAS MEZCLAS GASEOSAS [Kg/Nm^3] (en C.N.: 15 °C y 1.013.25 mbar)

Aire Esteq. - AIRE ESTEQUIOMÉTRICO DE COMBUSTIÓN (Nm^3 aire/ Nm^3 gas)

Viscos. Din. - VISCOSIDAD DINÁMICA DE LAS MEZCLAS GASEOSAS ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) a 20 °C

C. Térmica - CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS GASES [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$] (en C.N.: 15 °C y 1.013.25 mbar)

I. Wobbe - ÍNDICE DE WOBBE INFERIOR (mJ/m^3) a 15 °C y 1.013 mbar

Por otro lado, la velocidad de combustión del hidrógeno (Tabla III) es incomparablemente mayor que la de cualquiera de los gases combustibles habituales. Por ello, la llama que produce presenta una enorme tendencia hacia el retroceso, es decir hacia la penetración de la misma en el quemador.

TABLA III. VELOCIDADES MÁXIMAS DE COMBUSTIÓN PARA LOS COMBUSTIBLES HABITUALES.

VELOCIDADES MÁXIMAS DE COMBUSTIÓN EN AIRE

Combustible	Símbolo	Velocidad máxima de combustión en aire, cm/s	
Hidrógeno	H_2	306	cm/s
Metano	CH_4	39	cm/s
Etano	C_2H_6	46	cm/s
Propano	C_3H_8	45	cm/s
Butano	C_4H_{10}	44	cm/s

Para evitar este fenómeno indeseable es necesario encontrar una combinación adecuada de material y estructura, que favorezca la congelación de la llama en caso de penetración en el quemador, junto con un diseño adecuado del mismo. Dicho diseño se basará, necesariamente en una combinación material-estructura con muy baja conductividad térmica, pasos de gas de muy pequeño diámetro y gran pérdida de carga. La única estructura que reúne estas condiciones es la espuma cerámica de poro pequeño.

En el laboratorio de combustión de Ikerlan se han ensayado dos combinaciones material-estructura, potencialmente adecuadas para la combustión de mezclas hidrogenadas con mezclas de hasta el 50% de H_2 en la mezcla $\text{H}_2 - \text{CH}_4$:

- Una espuma cerámica de Alzeta Corp (USA) no comercializada en la actualidad.
- Un sinterizado cerámico de Ecoceramics (NE), utilizado en la fabricación de filtros para la industria farmacéutica.

7.1. Espuma cerámica

Se trata de una espuma de Cordierita utilizada en el pasado en el conformado de quemadores industriales y que, en la actualidad, ha dejado de fabricarse (Figura 11, izda). Se fabricaba con distintas porosidades, 20, 30 y 40 poros por pulgada (PPI). Esta espuma cerámica, con 15 mm de espesor, presenta una suficiente resistencia mecánica. Para incrementar la eficiencia radiante, y para aumentar la resistencia superficial a la corrosión, su cara superior va recubierta de una pintura de SiC.

Para fabricar quemadores para mezclas hidrogenadas, en Ikerlan se seleccionó la espuma más tupida, 40 PPI, por ser la que mejor debiera comportarse ante el retroceso de la llama.

En ensayos de combustión con gas G27 ($82\% \text{CH}_4 - 18\% \text{N}_2$) + $45\% \text{H}_2$ se observó el retroceso de la llama (Figura 11, dcha). Al entrar la llama en el quemador las temperaturas que se alcanzaron fueron tales que llegaron a fundir el material cerámico.

Fig. 11- Espuma cerámica de Alzeta montada en el banco de ensayos de Ikerlan.

7.2. Sinterizado cerámico

Se trata de un quemador con forma de placa plana de 20 mm de espesor y conformado mediante un sinterizado de polvos cerámicos de Carburo de Silicio (Figura 12). Este material se utiliza, también, en la fabricación de filtros para procesos de alta temperatura en la industria farmacéutica.

Fig. 12- Espuma cerámica de EcoCeramics (izda) y quemador en operación (dcha).

Este material se fabrica con dos únicas porosidades: 60 PPI y 90 PPI. El material más tupido sería el candidato obvio de cara a evitar el flash-back. Sin embargo, la elevada resistencia al paso del fluido por sus poros provocaría una pérdida de carga que limitaría de forma notable la potencia específica del futuro quemador. Esto aconsejó la elección de la espuma de menor porosidad como un mejor compromiso entre buena resistencia a flash-back y moderadas pérdidas de carga. De hecho, en ensayos previos sobre este material se midieron 75 Pa para densidades de potencia de 1000 kW/m^2 , resistencia muy aceptable para ventiladores soplantes de corriente continua, habituales en quemadores de premezcla (producen hasta 20 mbar).

Como en el caso anterior, la espuma cerámica tiene 15 mm de espesor, presentando una suficiente resistencia mecánica.

En condiciones de baja potencia específica y baja aireación, el quemador trabaja en modo radiante, con la llama perfectamente pegada a la superficie del mismo. Estas condiciones son las más propensas a producir el retroceso de la llama. Sin embargo, la adición de H_2 a la mezcla $\text{CH}_4\text{-H}_2$ no produjo el retroceso de la llama en ninguna de las condiciones ensayadas, ni siquiera en concentraciones del 50% de H_2 en la mezcla combustible. La apariencia del quemador fue tendiendo cada vez más al rojo, indicando una pequeña penetración de la llama en interior del quemador, pero sin vestigio alguno de retroceso significativo. En esas condiciones

de operación no es esperable una degradación apreciable del quemador que limitase su vida útil.

4. CONCLUSIONES

Los materiales cerámicos han sido, son y serán profusamente utilizados en el desarrollo de quemadores cerámicos para gas. Son muchas las ventajas que aportan en esta aplicación e innumerables las combinaciones de material y estructura (espumas, esponjas, fibras, sinterizados, etc.) que permiten el desarrollo de muy diferentes quemadores (radiantes, para hidrógeno, etc.). Es responsabilidad del diseñador el seleccionar la combinación más adecuada para cada aplicación concreta.

AGRADECIMIENTOS

La investigación llevada a cabo en el campo de los quemadores cerámicos y, en concreto, de los quemadores porosos radiantes y de los quemadores para hidrógeno ha contado con la colaboración del Ministerio de Educación y Ciencia a través de sendos proyectos asignados al Consorcio formado por ICV (CSIC), Ikerlan y Prosider, Petri RADIPOR, PTR1995-0756-OP, y Petri, HIDROBUR, 95-0981.OP.01.

BIBLIOGRAFÍA

1. R. Barea, M.I. Osendi, J. M. Ferreira, P. Miranzo, Thermal conductivity of highly porous mullite material. *Acta materialia*, vol. 53, no11, pp. 3313-3318 (2005).
2. H.R.N. Jones, The application of combustion principles to domestic gas burner design, *British Gas (U. K.)*, [4] 76-105 (1989).
3. T. M. Smith. Infra-red generators and matrix therefor. United States Patent 4654000 (1987).
4. M. Smith, L. Martin, A. Constable, V. Hinton, V. Alan. Construction of ceramic plaque burners. United States Patent 5049065 (1991).
5. F.A. Lammers, P.H. Bouma, L.P.H. de Goey and A.A. van Steenhoven, Combustion on a ceramic foam burner in a hot environment, *Heat Transfer In Radiating And Combusting System*, Eurotherm Seminar no. 56, 168-170, (1998).
6. F.A. Lammers. Ceramic-foam surface burners in high-temperature environments. *Technische Universiteit Eindhoven*, (2001). ISBN 90-386-2842-0.
7. E. D. Herbert. Ceramic fibre gas burner. European Patent EP0194157 (1986).
8. D. Trimis et al., Porous Medium Combustor vs Combustion systems with free flames. *Proceedings of Second International Symposium on Heat Transfer Enhancement and Energy Conversion. ISHTEEC*. 339-345 (1997).
9. G. Brenner, K. Pickenacker, O. Pickenacker, D. Trimis, K. Wawrzinek, T. Weber. Numerical and experimental investigation of matrix-stabilized methane/air combustion in porous inert media *Combustion and Flame*, Volume 123, Issue 1, pp. 201-213 (2000).
10. F. Durst et al., Static Mixers for Novel Burners. 8th International Summer School of Chemical Engineering. (1998).
11. O. Pickenacker et al., Innovative Ceramic Materials for Porous-Medium Burners. *Interceram Vol 48*. N° 5 y 6. (1999).
12. Jia F. Liu, Wen H. Hsieh. Experimental investigation of combustion in porous heating burners *Combustion and Flame*, Volume 138, Issue 3, Pages 295-303 (2004).
13. M. Osendi et al., Quemador radiante poroso. Solicitud de patente de invención P200701465. (2007).

Recibido: 06.05.08

Aceptado: 19.05.08