

文章编号: 1004-0609(2004)07-1234-07

## 燃烧合成法制备的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 基多孔陶瓷<sup>①</sup>

苏娟<sup>1</sup>, 李军<sup>2</sup>, 钱东浩<sup>1</sup>, 张树格<sup>1</sup>, 李先容<sup>3</sup>, 程金华<sup>1</sup>

(1. 南京工业大学 电光源材料研究所, 南京 210015; 2. 南京工业大学 材料科学与工程学院, 南京 210009;

3. 四川材料与工艺研究所, 绵阳 621000)

**摘要:** 研究了  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiB}_2$  两个体系的多孔陶瓷的制备过程, 分析和讨论了产物的相组成、显微结构及成型性以及影响多孔陶瓷性能, 如孔径大小、耐腐蚀性能和压缩强度的诸多因素。实验结果表明: 布料时有序地改变反应物料的化学组成, 可以在产物中不同区域产生不同尺寸的孔洞, 形成梯度多孔陶瓷。利用燃烧合成法, 可制备出孔径尺寸为  $1\sim 500\ \mu\text{m}$ 、酸碱腐蚀质量损失率小于 2%、压缩强度为 10 MPa 左右的多孔陶瓷。

**关键词:** 燃烧合成; 复合材料; 多孔陶瓷

中图分类号: TB 3

文献标识码: A

## $\text{Al}_2\text{O}_3$ matrix porous ceramics prepared by SHS

SU Juan<sup>1</sup>, LI Jun<sup>2</sup>, QIAN Dong-hao<sup>1</sup>, ZHANG Shu-ge<sup>1</sup>,

LI Xian-rong<sup>3</sup>, CHENG Jin-hua<sup>1</sup>

(1. Institute of Electric Light Source Materials,

Nanjing University of Technology, Nanjing 210015, China;

2. College of Materials Science and Engineering,

Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;

3. Institute of Materials & Technics, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** The preparation of porous ceramics of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiB}_2$  by combustion synthesis was presented. The phase, microstructure, compactibility of the products, and the factors influencing on the pore size, porosity, compressive strength, and corrosion resistance were analyzed and discussed. The results show that, ordinal variations in the composition of the reactants during packing can get different sized pores and produce gradient porous ceramics. The porous ceramics with the pore size of  $1\sim 500\ \mu\text{m}$ , less than 2% of the corrosion mass-loss rate against acid and alkali, and the compressive strength about 10 MPa can be prepared by combustion synthesis.

**Key words:** SHS; composite; porous ceramic

多孔陶瓷是一种经高温烧成、内部具有大量彼此相通并与材料表面也相贯通的孔道结构的陶瓷材料<sup>[1]</sup>。它具有发达的比表面、良好的化学稳定性和一定的强度, 可用于催化剂载体、液体过滤、气体的分离与净化等, 在化工、环保、能源、冶金、食品、生物医药等领域有着广阔的应用前景<sup>[2-4]</sup>。

传统多孔陶瓷的制备方法有多种, 应用较多的

有添加造孔剂工艺、发泡工艺、有机泡沫浸渍工艺、溶胶-凝胶工艺等, 但上述制备方法都存在不足之处, 或原料要求高, 或工艺复杂, 或显气孔率低等<sup>[5]</sup>。而利用燃烧合成法制备多孔陶瓷, 可以克服上述不足。

燃烧合成是利用化学反应自身放热制备材料的新技术<sup>[6]</sup>。利用燃烧合成法制备多孔陶瓷具有以下

① 收稿日期: 2003-09-30; 修订日期: 2004-02-10

作者简介: 苏娟(1969-), 女, 工程师。

通讯作者: 苏娟, 电话: 025-58805313; E-mail: juan-shu@163.com

特点: 1) 原料纯度无特别要求, 只要反应物料能够提供足够的能量来维持燃烧波的蔓延; 2) 显气孔率高, 燃烧合成时的高温反应促使液相生成和大量挥发气体逸出, 有助于孔隙的产生, 能制备显气孔率大于 50% 的多孔陶瓷; 3) 节能, 燃烧合成多孔陶瓷仅仅需要引燃反应物料的能量, 一旦引燃, 即可通过反应热维持反应的自我进行, 不需额外补充能量; 4) 工艺流程短, 燃烧合成是利用化学反应合成陶瓷材料, 通过反应热烧结陶瓷材料, 这二者是同步的, 且反应瞬间完成, 省却了高温下长时间烧结。不过, 利用燃烧合成制备多孔陶瓷也有不足之处, 如燃烧过程复杂难控、原料成本高等。

利用燃烧合成法制备多孔陶瓷已有一些报道<sup>[7, 8]</sup>。目前俄罗斯在这项工作上的研究比较多, 并已能制成产品<sup>[7]</sup>。作者通过研究, 已能在实验室制备孔径尺寸为 1~ 500  $\mu\text{m}$ 、显气孔率大于 50%、压缩强度为 10 MPa 左右的管状、柱状等多孔陶瓷制品。

## 1 实验

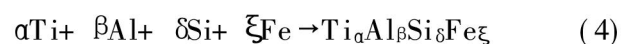
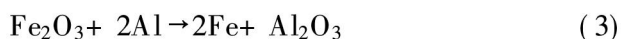
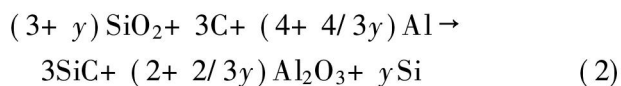
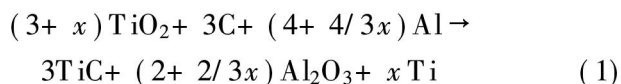
### 1.1 主要原料

对于  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  体系, 选用金红石型二氧化钛(粒度为 < 45  $\mu\text{m}$ )、工业铝粉(粒度为 45~ 180  $\mu\text{m}$  不等)、无定形炭黑或石墨粉(平均粒径 1  $\mu\text{m}$ )、石英砂(粒度为 < 75  $\mu\text{m}$ )、铁红(粒度为 < 75  $\mu\text{m}$ )、电熔刚玉粉(粒度为 < 75  $\mu\text{m}$ ) 等。

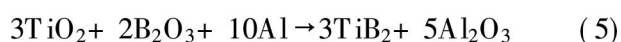
对于  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiB}_2$  体系, 选用金红石型二氧化钛(粒度为 < 45  $\mu\text{m}$ )、硼酐(粒度为 < 180  $\mu\text{m}$ )、工业铝粉(粒度为 45~ 180  $\mu\text{m}$  不等)、电熔刚玉粉(粒度为 < 75  $\mu\text{m}$ ) 等。

### 1.2 配料

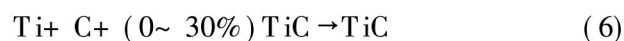
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiB}_2$  这二种体系均是利用铝热反应进行的<sup>[9, 10]</sup>。其中  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  体系按下列反应式进行:



$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiB}_2$  体系按下列反应式进行:



另外, 制备孔梯度陶瓷时, 选用 TiC 体系按下列反应式进行:



配料时,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  体系按方程式(1)~(4)中的反应物以一定比例混合;  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiB}_2$  体系按方程式(5)中的反应物以化学计量比混合。这两个体系中均添加了一定量的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  作稀释剂, 然后以 1:1 的球料比在球磨机中混合 6 h, 即得燃烧合成多孔陶瓷的反应物料。

### 1.3 成型

将反应物装入  $d$  40 mm  $\times$  10 mm  $\times$  100 mm 管状、 $d$  (20~ 50) mm  $\times$  (20~ 50) mm 柱状等形状的钢质模具中,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  体系通过振动,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiB}_2$  体系通过压制或振动<sup>[11]</sup>, 获得所需密度的生坯, 通过钨丝圈在空气中、室温下引燃生坯, 使坯料逐层燃烧, 从而获得均匀的多孔陶瓷制品。

孔梯度多孔陶瓷的制备通常是通过布料有序地改变反应物的化学组成, 使产物中不同区域产生不同尺寸的孔洞。作者的前期工作表明, TiC 体系孔径最小(1~ 10  $\mu\text{m}$ ),  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  体系孔径较大(10~ 50  $\mu\text{m}$ ),  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiB}_2$  体系孔径最大(50~ 500  $\mu\text{m}$ )。所以本实验选用孔径较大的  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiB}_2$  体系, 在其生坯表面上均匀铺上 200~ 250  $\mu\text{m}$  的 TiC 体系的反应物料, 来制备孔梯度陶瓷。

### 1.4 测试

多孔陶瓷的性能测试主要根据 GB/T 1964~ 1966—1996、GB/T 1970—1996 方法进行, 孔径大小通过 SEM 形貌照片估测。此外, 用 W-Re 热电偶测试燃烧温度, 用秒表测试燃烧波前峰蔓延时间来确定燃烧速度, 用 X 射线衍射仪分析相组成, 用 SEM 扫描电镜观察形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 相组成与显微结构

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  体系燃烧合成产物的 X 射线衍射图见图 1。从图 1 中可看出, 产物主要由  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 TiC 组成, 以及少量 SiC 和作为粘结相的金属间化合物  $\text{FeSi}_3$  和  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$ 。该体系以铝热反应为主, 因此产物中以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  相为最多; 在燃烧合成中选择以方程式(1)为主反应, 故产物中以 TiC 相为其次; 另外, 为调节燃烧温度和速度以及提高产物含量, 选择弱放热反应体系<sup>[10]</sup>的方程式(2)和生成金属及复杂金属间化合物的方程式(3)和(4)为辅助反应, 因而在图

1 中可见少量 SiC,  $\text{FeSi}_3$  和  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$ 。但由于燃烧合成高温反应过程非常短暂, 常生成亚稳态和非平衡态相, 因此少量的 Fe 与 Ti, Al, Si 之间的非化学计量的金属间化合物在图 1 中未能发现。

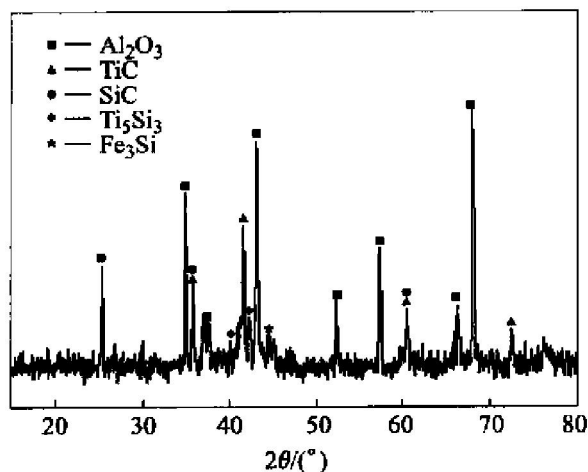


图 1  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC 体系燃烧合成产物 X 射线衍射图

Fig. 1 XRD pattern of product of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC system

$\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiB}_2$  体系燃烧合成产物的 X 射线衍射图见图 2。由于该体系是按化学计量配比混合反应物料, 且燃烧温度高达 2 000 °C 左右, 反应充分、完全, 因此反应产物由  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{TiB}_2$  两相组成。

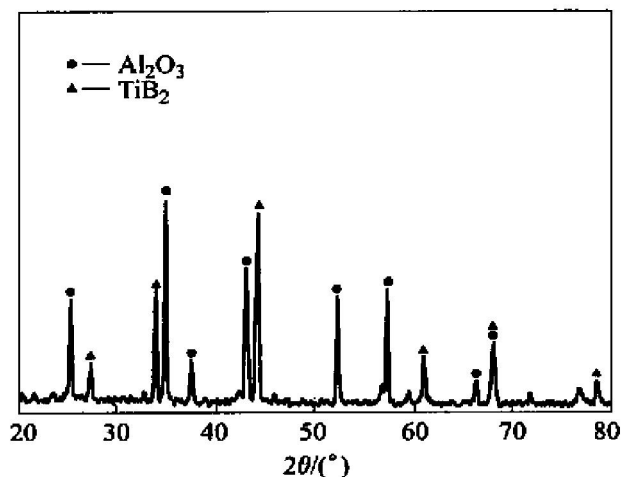


图 2  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiB}_2$  体系燃烧合成产物 X 射线衍射图

Fig. 2 XRD pattern of product of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiB}_2$  system

所制备的多孔陶瓷的孔径尺寸为:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC 体系 10~ 50  $\mu\text{m}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiB}_2$  体系 50~ 500  $\mu\text{m}$ 。从图 3 可明显看出,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC 体系的孔径明显比  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiB}_2$  体系的小。

燃烧合成产生的孔隙主要来源于两方面: 一是

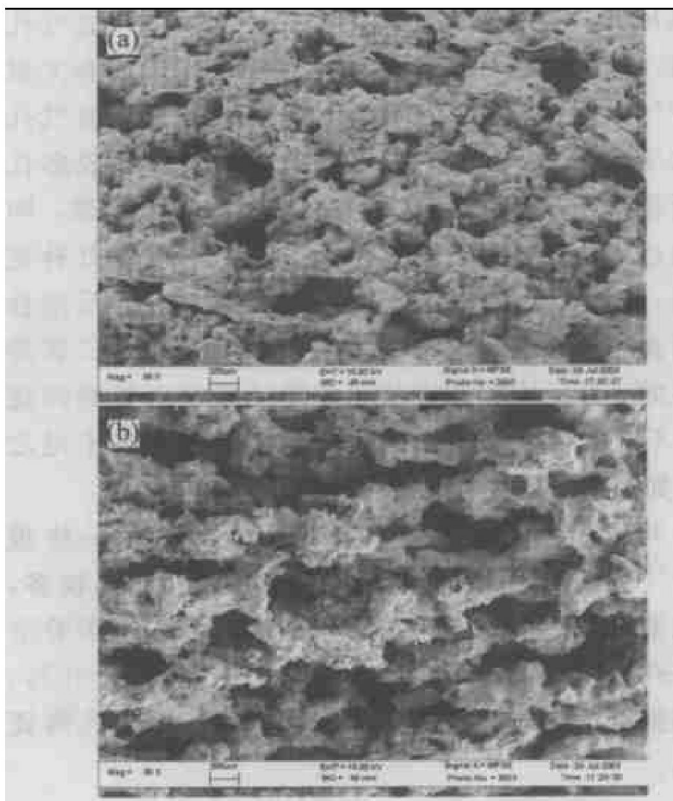


图 3 多孔陶瓷的 SEM 像

Fig. 3 SEM micrographs of porous ceramics prepared by SHS

(a)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC system;  
(b)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiB}_2$  system

生坯中的孔隙; 二是燃烧过程中液相的收缩和气相物质的挥发<sup>[12]</sup>。前者与颗粒堆积有关。在原料 Al 粉粒度和生坯相对密度相同的情况下, 造成两个体系孔径差异的因素主要为后者。可以这样认为: 在燃烧合成高温反应中, 呈液态的 Al 与  $\text{TiO}_2$  和  $\text{B}_2\text{O}_3$  发生原位反应, 在随后快速凝固过程中会发生体积收缩, 扩大了孔隙; 对于  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC 体系, 产物中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  总含量仅为 50%; 而  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiB}_2$  体系, 产物中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 55%~ 75%, 因此  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiB}_2$  体系的燃烧反应中, 孔洞周围的局部区域液态 Al 含量高于  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC 体系, 使体积收缩增加, 孔径变大。另外,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC 体系燃烧温度为 1 800~ 1 900 °C, 而  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiB}_2$  体系燃烧温度为 1 900~ 2 200 °C, 后者燃烧温度明显高于前者, 除 Al 容易发生气化外, 反应物料中的  $\text{B}_2\text{O}_3$  是低熔点相, 也易发生气化, 有大量挥发物逸出。这两方面造成  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiB}_2$  体系的孔径明显大于  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC 体系的。

## 2.2 产物的成型性

前期实验中, 采用  $\text{TiO}_2$ 、金属 Al 粉和炭黑为原料, 按反应式  $3\text{TiO}_2 + 3\text{C} + 4\text{Al} \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{TiC}$

合成多孔陶瓷时, 产物易分层, 通过降低 C 含量或将炭黑换为石墨或添加  $\text{Al}_2\text{O}_3$  稀释剂来降低燃烧速度, 使反应平缓地逐层燃烧, 可改善其成型性, 但产物的强度明显降低。为此, 在  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC 体系中, 通过同时添加稀释剂和粘结剂来解决成型与强度的矛盾。添加的稀释剂有二类: 一类为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  稀释剂, 另一类为弱放热反应体系, 如  $3\text{SiO}_2 + 3\text{C} + 4\text{Al} \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{SiC}$  或  $3\text{SiO}_2 + 4\text{Al} \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Si}$ 。粘结剂是用 Al 还原铁红生成粘结相 Fe, 以提高产物的强度。但是金属 Fe 量应加以控制, 燃烧合成  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} \rightarrow 2\text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3$  反应属强放热反应, 其绝热温度为 3 622 K, 当  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  增加时, 会发生燃烧温度升高和熔融 Fe 团聚, 更易造成液相的流动, 使金属 Fe 呈纵向梯度分布, 影响成型。实验表明, 当 Fe 含量控制在 6% ~ 8% 时, 通过振动成型, 可制备出具有一定强度并保持原始素坯形状的均质多孔陶瓷。

对于  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiB<sub>2</sub> 体系, 无论压制还是振动, 产物均比较容易成型, 没有分层现象发生。但燃烧过程中由于燃烧速度过快, 气体来不及逸出, 常会导致物料喷溅、产物膨胀, 影响多孔陶瓷的成型。通过添加稀释剂等工艺<sup>[13]</sup>, 控制燃烧速度, 可制备出管状、杯状、柱状等形状的多孔陶瓷。

## 2.3 影响性能的因素

### 2.3.1 孔径(以 $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiB<sub>2</sub> 体系为例)

前面提及, 孔隙来源首先是生坯中的孔隙, 而生坯中孔隙大小取决于原料颗粒之间的接触程度。原料粒度、生坯密度直接影响颗粒间接触程度。降低原料 Al 粉粒度或增加生坯密度, 颗粒间接触程度增大, 因而孔径较小。Al 粉粒度对孔径的影响见图 4, 生坯密度对孔径的影响见图 5。

孔径大小还与稀释剂有关, 当加入稀释剂  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 在燃烧合成中, 由于其不参与化学反应, 只起机械填充与阻隔作用, 一方面阻止了物料点燃之初熔融 Al 的团聚, 同时在原有的孔隙中填入  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 使产物的孔径缩小; 另一方面, 由于燃烧温度降低, 减缓了呈半熔融态的产物在快速凝固过程中由于体积收缩而造成孔径的扩大。所以加入添加剂  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 使产物的孔径变小。稀释剂  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量对孔径的影响见图 6。

孔径大小也可通过布料来调节。在布料过程中, 有序地改变反应物料的化学组成, 使产物中的孔径随区域的改变而改变, 形成孔梯度多孔陶瓷。例如, 在  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiB<sub>2</sub> 体系的生坯表面上均匀地铺

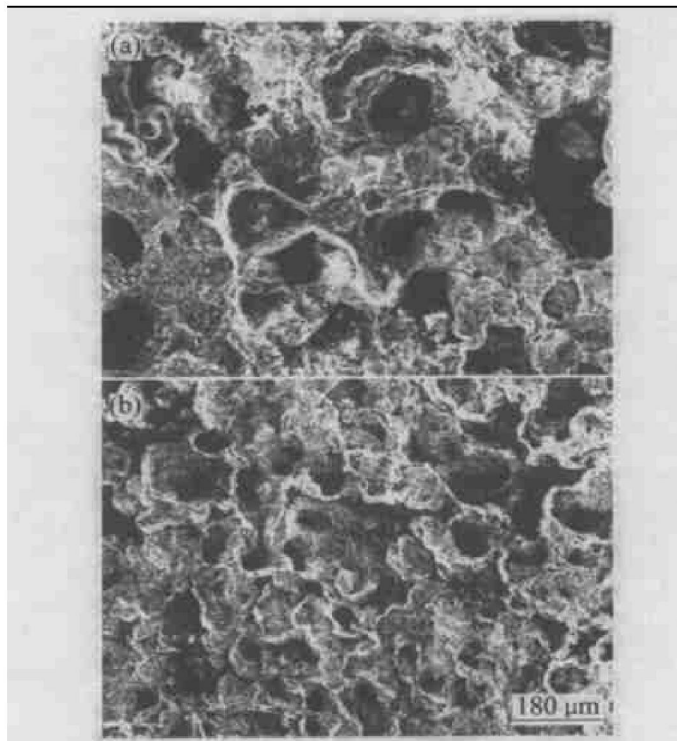


图 4 Al 粉粒度对孔径的影响

Fig. 4 Effects of particle size of aluminium powder on pore size  
(a) 120 - 175  $\mu\text{m}$ ; (b) 75 - 100  $\mu\text{m}$

上一薄层 TiC 体系的反应物料, 即可制备梯度多孔陶瓷, 如图 7 所示。

### 2.3.2 腐蚀性能

在  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC 体系中, 由于产物中存在一定量的粘结相 Fe, 会影响产物的酸腐蚀性能。添加  $\text{SiO}_2$  后, 产物酸腐蚀质量损失率明显降低, 当 Si 含量为 8.5% ~ 10.0% 时, 耐酸腐蚀性能较好, 产物的碱腐蚀质量损失率基本不变, 保持在 1% ~ 2% 之间。Si 含量与腐蚀质量损失率关系见图 8。

含硅 14% 的硅铁化合物具有优良的抗酸腐蚀性能<sup>[14]</sup>。但在燃烧合成反应中, 当反应物料中 Si 含量大于 8.5% 时, 就会因  $\text{SiO}_2 + \text{Al} \rightarrow \text{Si} + \text{Al}_2\text{O}_3$  弱放热反应, 导致燃烧温度降低过快, 使反应转化不完全, 因此实验中还添加过量 Al, 使 Fe 与 Ti、Al、Si 形成复杂的金属间化合物, 提高耐酸腐蚀性能; 但是, 由于燃烧过程比较复杂难控, 不能按实验设计生成所需的物质, 只能通过实验选择 Ti、Al、Si 和 Fe 的合适配比, 使多孔陶瓷的综合性能最佳。另外, 因 Fe 与 1% NaOH 溶液不反应, 添加 Si 前后的碱腐蚀率基本不变。

$\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiB<sub>2</sub> 体系产物由 TiB<sub>2</sub> 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  两相组成, 这两相均耐腐蚀, 因此 TiB<sub>2</sub>- $\text{Al}_2\text{O}_3$  体系的耐腐蚀性能良好。

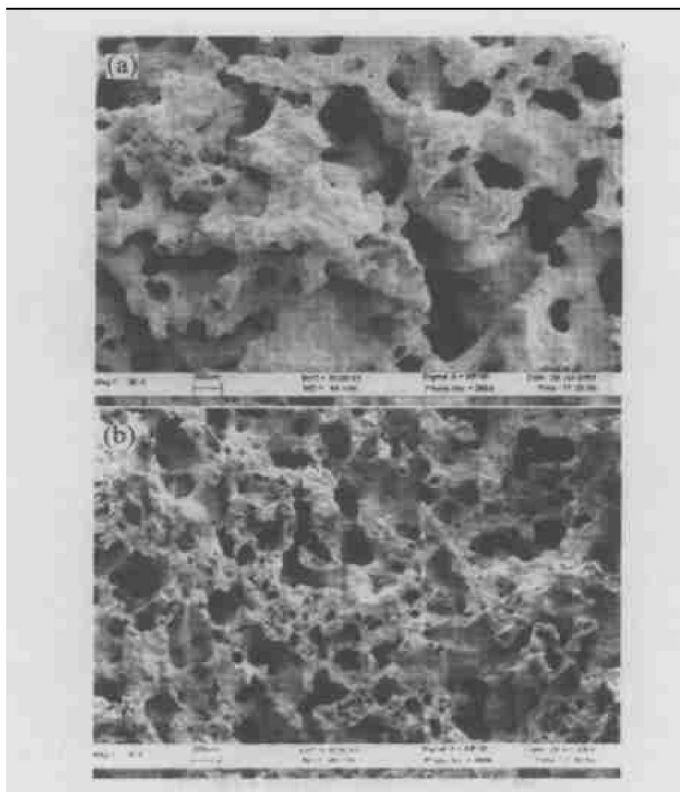


图 5 生坯密度对孔径的影响

Fig. 5 Effects of green density on pore size

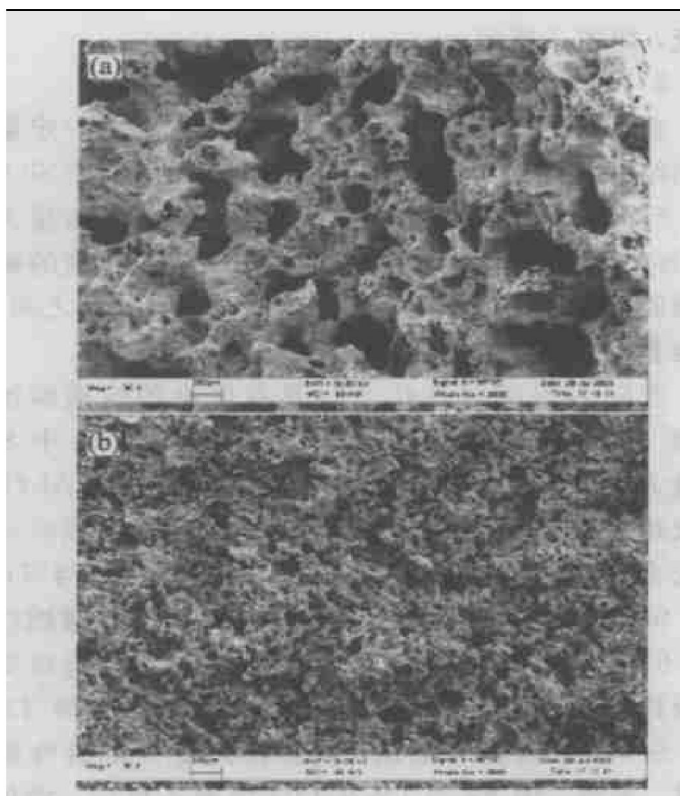
(a)  $\rho = 1.16 \text{ g/cm}^3$ ; (b)  $\rho = 1.92 \text{ g/cm}^3$ 图 6 稀释剂  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量对孔径的影响

Fig. 6 Effects of content of alumina diluents on pore size

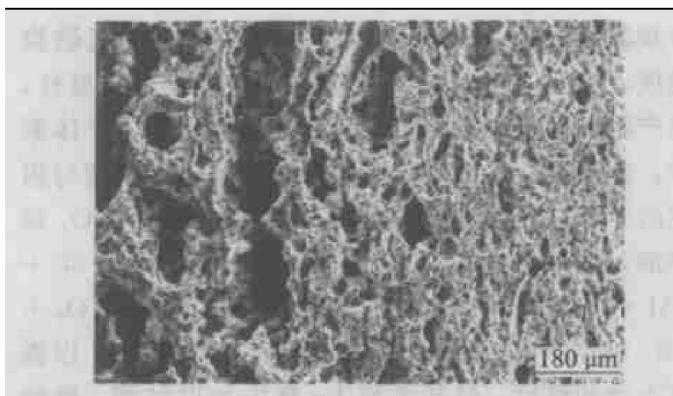
(a)  $10\% \text{ Al}_2\text{O}_3$ ; (b)  $30\% \text{ Al}_2\text{O}_3$ 

图 7 梯度多孔陶瓷的形貌

Fig. 7 Morphology of gradient porous ceramics

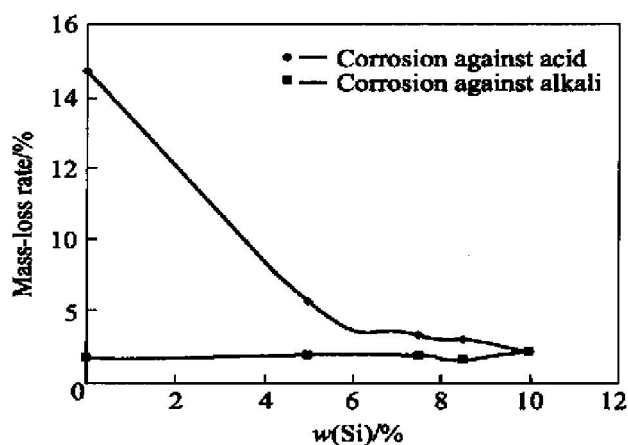


图 8 Si 含量与腐蚀质量损失率的关系

Fig. 8 Relationship between content of silicon and corrosion mass loss rate

### 2.3.3 压缩强度

实验表明：在一定范围内，原料 Al 粉粒度增加，多孔陶瓷压缩强度呈增加趋势(见图 9)； $\text{Al}_2\text{O}_3$  稀释剂含量增加，压缩强度呈先升后降的趋势(见图 10)。

众所周知，多孔陶瓷的结构包括孔壁(或称为筋)和孔隙，前者起支撑连接作用，后者起功能作用。多孔陶瓷的平均厚度和孔壁强度影响着多孔陶瓷材料的强度<sup>[15]</sup>。平均厚度与孔隙度相关，本实验中两种体系的孔隙度均大于 50%，且两种体系的孔隙度相差不大。因此这两种体系的多孔陶瓷材料的强度主要取决于孔壁强度，而孔壁强度的影响存在两方面：一是多孔陶瓷材料的烧结程度，二是多孔陶瓷的孔壁厚度。

在一定粒度范围内，当 Al 粉粒度增加时，物质间相互传输速度变慢，燃烧合成反应速度有所降低，这样反应物料在高温下持续时间长，颗粒间扩散、烧结充分，使颗粒结合更牢固，从而提高多孔

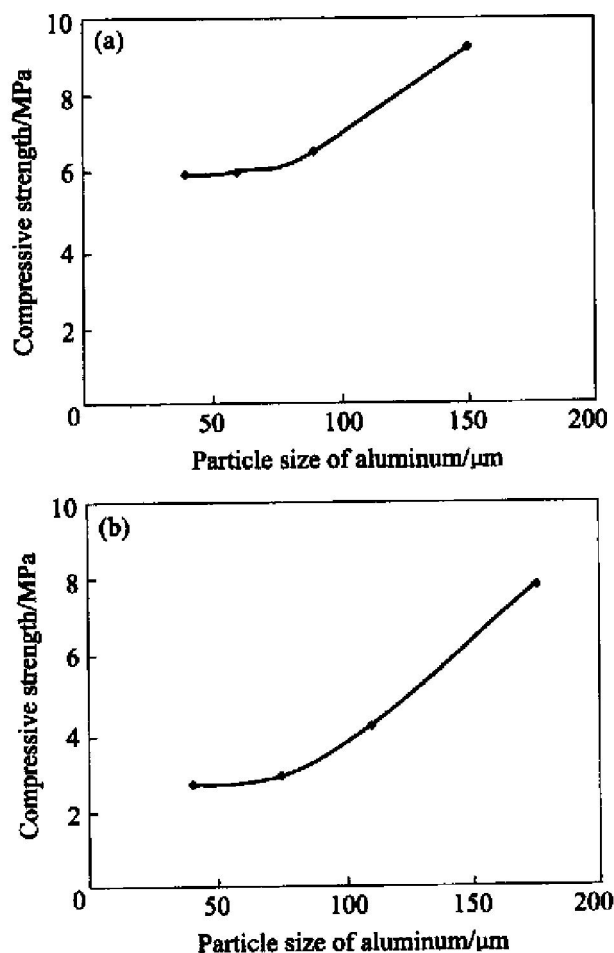


图9 Al粉粒度与压缩强度的关系

Fig. 9 Relationship between particle size of aluminium and compressive strength  
(a) —  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC system; (b) —  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiB<sub>2</sub> system

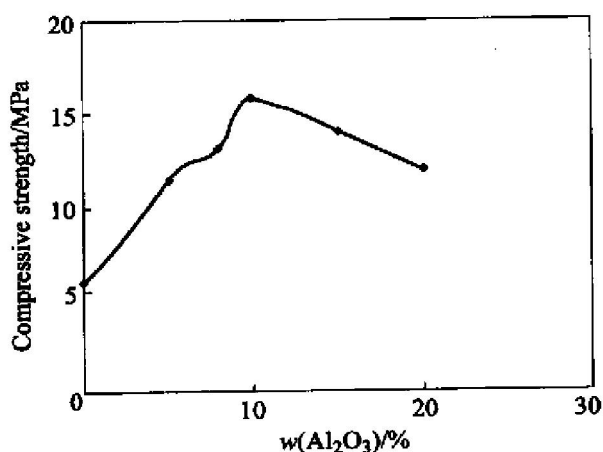


图10  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiB<sub>2</sub> 体系稀释剂  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量  
与压缩强度的关系

Fig. 10 Relationship between content of alumina diluent and compressive strength

陶瓷的压缩强度。

稀释剂  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量增加时,一方面能降低燃烧速度,延长高温持续时间,物质的扩散和烧结比较

充分,同时稀释剂  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的添加,使多孔陶瓷的孔径变小、孔壁相对增厚,从而提高压缩强度;另一方面,当稀释剂量过多时,燃烧温度降低过快,又使颗粒间烧结温度不够,化学转化不完全,造成压缩强度降低。实验测得,在  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiB<sub>2</sub> 体系中,添加 10% 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  稀释剂,其压缩强度最高。

## 4 结论

1) 通过控制工艺条件,采用燃烧合成法能够制备  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiB<sub>2</sub> 两种体系的多孔陶瓷。

2) 通过布料改变反应物料的化学组成,可制备孔梯度陶瓷。

3) 多孔陶瓷孔径可通过改变 Al 粉粒度、生坯密度及添加稀释剂调节。

4) 添加  $\text{SiO}_2$  可改善  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC 体系的酸腐蚀性能,而碱腐蚀性能无明显影响。

5) 在一定范围内,Al 粉粒度增大,多孔陶瓷压缩强度提高;稀释剂  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量增加,压缩强度呈先升后降趋势。

## REFERENCES

- [1] 马文,沈卫平,董红英,等. 多孔陶瓷的制造工艺及进展[J]. 粉末冶金技术, 2002, 20(6): 365-368.  
MA Wen, SHEN Weiping, DONG Hongying, et al. Process and development of porous ceramic materials[J]. Powder Metallurgy Technology, 2002, 20(6): 365-368.
- [2] 朱小龙,苏雪筠. 多孔陶瓷材料[J]. 中国陶瓷, 2000, 36(4): 36-39.  
ZHU Xiaolong, SU Xuejun. Porous ceramics materials[J]. China Ceramics, 2000, 36(4): 36-39.
- [3] 王耀明,蔡伟庆. 多孔陶瓷过滤材料[J]. 江苏陶瓷, 2003, 1(36): 19-23.  
WANG Yaoming, CAI Weiqing. Porous ceramic filtering materials[J]. Jiangsu Ceramics, 2003, 1(36): 19-23.
- [4] 许可敬,孟凡涛,李国昌,等. 陶瓷过滤器材料及其制备技术进展[J]. 山东工程学院学报, 2002, 3(16): 62-67.  
XU Kejing, MENG Fantaotao, LI Guochang, et al. Materials and preparing techniques of ceramic filters[J]. Journal of Shandong Institute of Technology, 2002, 3(16): 62-67.
- [5] 刘富德,陈森凤,张书政. 多孔陶瓷材料的发展状况

- [J]. 材料导报, 2000, 14(6): 33-34.
- LIU Fu-de, CHEN Sen-feng, ZHANG Shu-zheng. Present state of porous ceramics R&D[J]. Materials Daily, 2000, 14(6): 33-34.
- [6] 殷 声. 燃烧合成[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999. 1-7, 316-323, 365-387.
- YIN Sheng. Combustion Synthesis[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999. 1-7, 316-323, 365-387.
- [7] 朱新文, 江亮, 谭寿洪. 多孔陶瓷的制备、性能及应用: (I) 多孔陶瓷的制造工艺[J]. 陶瓷学报, 2003, 24(1): 40-45.
- ZHU Xin-wen, JIANG Dong-liang, TAN Shou-hong. Processing, properties and application of porous ceramics: (I) processing of porous ceramics[J]. Journal of Ceramics, 2003, 24(1): 40-45.
- [8] 赵金龙, 周鼎玲. 自蔓延高温合成控制制备( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiB}_2$ )泡沫陶瓷过滤器的方法[P]. CN 1063411C, 2001.
- ZHAO Jing-long, ZHOU Ding-ling. The Preparing Method of the  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiB}_2$  Foamed Ceramic Filter[P]. CN 1063411C, 2001.
- [9] Mezhanov A G. Ten research directions in the future of SHS[J]. International Journal of Self-propagating High-temperature Synthesis, 1997, 16(2): 119.
- [10] Wang L L, Munir Z A, Maxmov Y M. Review thermite reactions: their utilization in the synthesis and processing of materials[J]. Journal of Materials Science, 1993, 28: 3693-3708.
- [11] 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985. 208-209.
- HUANG Pei-yun. The Mechanism of Powder Metallurgy[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1985. 208-209.
- [12] LI Bing-yun, RONG Li-jian, Gjunter V E, et al. Porous NiTi shape memory alloys produced by two different methods[J]. Z Metallkd, 2000, 91(4): 291-295.
- [13] 李明怡, 康志君, 张宝生, 等. 自蔓延高温合成  $\text{TiB}_2$  粉末[J]. 稀有金属, 1994, 18(5): 370-374.
- LI Ming-yi, KANG Zhi-jun, ZHANG Bao-sheng, et al. The powder synthesized by SHS[J]. Rare Metals, 1994, 18(5): 370-374.
- [14] 张祥麟. 无机化学(下册)[M]. 长沙: 湖南教育出版社, 1983. 141-142.
- ZHANG Xiang-lin. Inorganic Chemistry(Vol. 2)[M]. Changsha: Hunan Education Press, 1983. 141-142.
- [15] 张宇民, 刘殿魁, 韩杰才, 等. 多孔陶瓷材料制备工艺研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2002, 2(25): 62-66.
- ZHANG Yu-min, LIU Dian-kui, HAN Jie-cai, et al. Progress in fabrication of porous ceramics[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2002, 2(25): 62-66.

(编辑 杨 兵)