

# 烧结温度对 WC 增韧 $Al_2O_3$ 陶瓷耐磨性的影响

郭英奎

( 哈尔滨理工大学材料科学与工程学院 哈尔滨 150080 )

**文 摘** 采用热压(HP)法制备了不同烧结温度下  $Al_2O_3$ —WC 复合陶瓷材料,通过单边切口梁(SEN)法和三点弯曲等力学性能方法测出了室温下该材料的力学性能,对  $Al_2O_3$ —WC 复合陶瓷表面的摩擦磨损特性进行了试验研究。结果表明, $Al_2O_3$ —WC 复合陶瓷在  $(1\ 600 \pm 10)$ 、25 MPa 下具有较优良的力学性能和较好的耐磨性,并且其耐磨性与抗弯强度和断裂韧性的变化趋势相同,与弹性模量和硬度无单调依赖关系。

**关键词** 复合陶瓷,力学性能,耐磨性

## The Influence of Sintering Temperature on Wear Resistance of $Al_2O_3$ Ceramics Toughened by WC

Guo Yingkui

( Harbin University of Science and Technology Harbin 150080 )

**Abstract** The wear behavior of  $Al_2O_3$  - WC ceramic composites prepared by hot pressing at different temperatures was investigated, and its mechanical properties were also measured with single edged notch beams (SEN) and three point bending specimens.  $Al_2O_3$  - WC ceramics sintered at  $(1\ 600 \pm 10)$  under 25 MPa have good mechanical properties and better wear resistance. Higher strength or fracture toughness results in better wear resistance, and the wear resistance does not changes linearly with elastic modulus and hardness of the composites.

**Key words** Ceramic composites, Mechanical properties, Wear resistance

### 1 前言

$Al_2O_3$  结构陶瓷以其优良的耐磨性正在广泛用作航空航天用切削、刀具、轴承<sup>[1]</sup>等耐磨零部件,与现役金属零部件相比性能显著提高,因此研究陶瓷材料的耐磨性,而扩大陶瓷材料在工程上特别在摩擦磨损方面的应用,已经引起人们的高度重视。 $Al_2O_3$  陶瓷材料的耐磨性研究大多数是围绕 ZIM ( $ZrO_2$  增韧  $Al_2O_3$ ) 复合陶瓷进行的<sup>[2~3]</sup>,利用  $ZrO_2$  的  $t_m$  马氏体相变提高耐磨性以被公认;然而这种材料在工程中的应用仅仅是  $Al_2O_3$  陶瓷材料的一部分,其他不含  $ZrO_2$  马氏体相变的  $Al_2O_3$  陶瓷材料

的耐磨性研究却少有报道。本文研究 WC 增韧  $Al_2O_3$  陶瓷材料的烧结工艺,并对该材料的磨损特征和磨损机理进行了初步探索。

### 2 材料及试验方法

#### 2.1 试验材料

试验所用的  $Al_2O_3$  为硫酸铝铵热分解得到的 ( $Al_2O_3$  超细粉末,纯度 99.9%,粒度  $0.04\ \mu m \sim 1.00\ \mu m$ ; WC 粉末粒度小于  $3\ \mu m$ ,纯度为 99.9%。按表 1 设计的成分湿混 10 h,烘干后直接装入石墨模具中在  $N_2$  保护下热压烧结 1 h,加热时升温速度控制在  $20\ ^\circ C/min$ 。

收稿日期:1999-06-21

郭英奎,1963 年出生,博士研究生,主要从事  $Al_2O_3$  复合材料韧化机理的研究工作

表 1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷材料(65 %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 35 %WC)的工艺设计

Tab.1 Experimental design for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic  
(65 %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 35 %WC)

代号	烧结温度/	压力/MPa	保护气氛
AWM1	1 400		
AWM2	1 500		
AWM3	1 600	25	N <sub>2</sub>
AWM4	1 700		

## 2.2 试验方法

在 Instron —1186 型电子万能试验机上用三点弯曲法测定材料的室温力学性能;磨损试验是在销—盘试验机上进行的,如图 1 所示,试验机的转速为 720 r/min,介质分别为 150# 砂纸和涂敷粒度为 200 目的 B<sub>4</sub>C 磨料,应力为 10 N 和 100 N 两个等级的正压力,磨损时间均为 2 min,磨损试验条件如下:

磨损时间 2 min;

载荷 10 N、100 N;

介质 150# 砂纸、B<sub>4</sub>C;

温度 室温;

圆盘转速 720 r/min。

用分析天平称量试样的磨损失重,试验结果使用相对耐磨性( )进行表征,即:

$$\text{相对耐磨性} = \frac{\text{标准试样的磨损量}}{\text{被测试样的磨损量}} \quad (1)$$

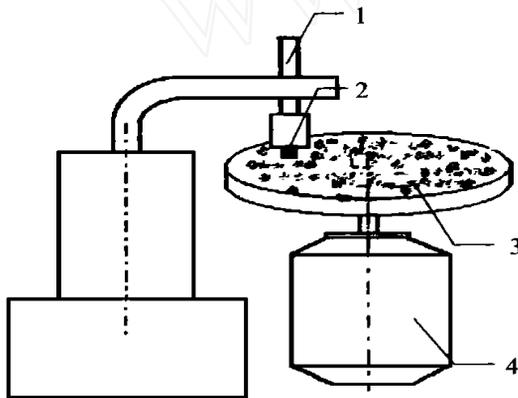


图 1 磨损试验示意图

Fig. 1 Schematic drawing of wear resistance test

1—试样夹;2—试样;3—介质;4—电机。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 力学性能

图 2 为烧结温度与抗弯强度的关系曲线,由曲线可见,1 600 时材料的抗弯强度最大为 780 MPa。对比 AWM3 和 AWM4 发现,温度升高,晶粒长大而使抗弯强度下降;温度降低,材料致密化程度下降,宇航材料工艺 2000 年 第 2 期

气孔的数量相对增多,单位截面的承载能力下降而导致抗弯强度下降。弹性模量虽然与晶粒大小无关,但与材料的气孔率有关,本试验由于加入了成分一定的高模量的 WC ( $E = 720 \text{ GPa}$ ),所以与纯 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷相比 ( $E = 400 \text{ GPa}$ ) 弹性模量提高了。

热压烧结 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—WC 复合陶瓷材料的断裂韧性如图 2(b) 所示,由于添加第二相高模量的 WC,一方面起到“钉扎”裂纹的作用;另一方面抑制了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶粒的长大,提高单位体积内的晶界数量,使裂纹弯曲扩展路径延长,提高断裂能,从而使断裂韧性有所提高,本试验 1 600 烧结时断裂韧性最大为 7.2 MPa·m<sup>1/2</sup>,温度升高晶粒长大,单位体积内晶界数量相对减少;温度降低气孔增多,使断裂韧性下降。

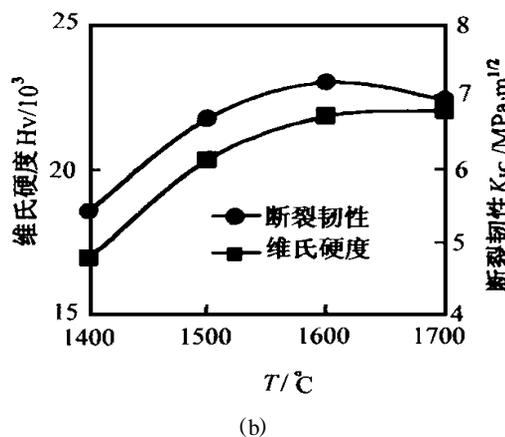
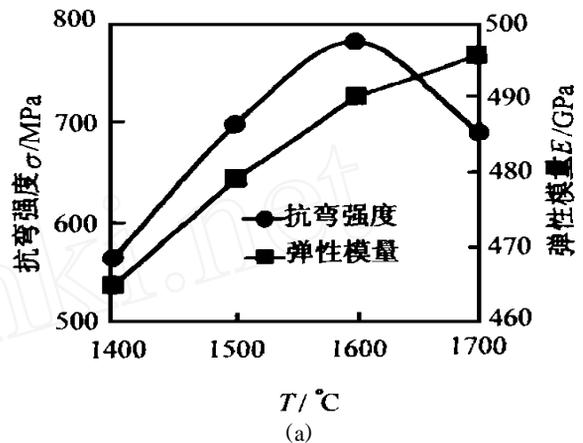


图 2 烧结温度对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—WC 陶瓷力学性能的影响

Fig. 2 Influence of sintering temperature on mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—WC ceramic

### 3.2 耐磨性

当陶瓷材料表面在载荷作用下与硬质磨粒相接触时,接触状态大都是弹性的 ( $E/H$  比值远远小于

金属)或弹塑性的,在摩擦磨损过程中受到硬质磨粒的快速动态(带有一定的冲击性质)接触应力的作用,表面断裂的临界载荷比静态下低得多,脆性断裂(剥离)往往在小应力下就可产生。这陶瓷材料与金属材料的磨损机理有明显不同。取 1 600 的 AWM3 为标准试样,根据式(1)测出了不同应力及介质条件下  $\text{Al}_2\text{O}_3$ —WC 陶瓷的相对耐磨性如图 3(a)。从图 3(b)可看出,随着载荷的增加,磨损量增大;而介质  $\text{B}_4\text{C}$  比 150# 砂纸的磨损量增大,根据 Kato 提出描述陶瓷材料磨损严重程度的公式可知<sup>[4]</sup>:

$$S_C = \frac{P_0 \sqrt{R_{\max}}}{K_{IC}} \quad (2)$$

式中:  $S_C$  为磨损严重程度,  $P_0$  为最大接触应力,  $K_{IC}$  为断裂韧性,  $R_{\max}$  为磨损表面的最大粗糙度。

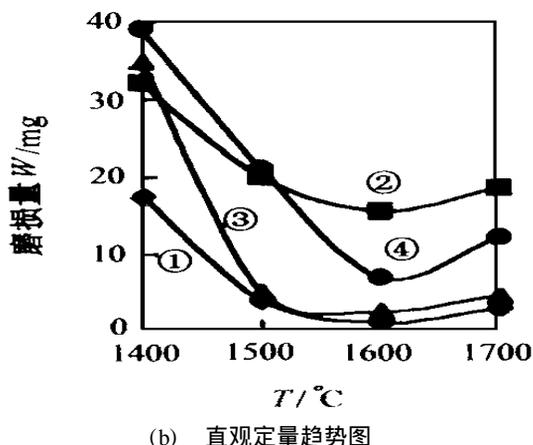
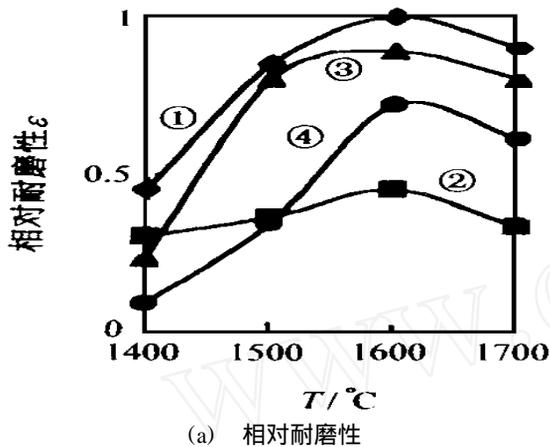


图 3 烧结温度对  $\text{Al}_2\text{O}_3$ —WC 陶瓷耐磨性的影响

Fig. 3 Influence of sintering temperature on wear resistance of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ —WC ceramic

10N 正压力、介质砂纸 150#; 100 N 正压力、介质砂纸 150#;  
10 N 正压力;介质  $\text{B}_4\text{C}$ ; 100 N 正压力;介质  $\text{B}_4\text{C}$ 。

实际上,  $\text{B}_4\text{C}$  比 150# 砂布的表面粗糙得多,因

此,介质为  $\text{B}_4\text{C}$  的磨损量比较大。另外,无论低应力或高应力,对应 1 600 烧结温度的失重量最少,对比图 3(b)与图 2 发现,此温度下的相对耐磨性最好,这与抗弯强度和断裂韧性随烧结温度的变化趋势比较一致,而与弹性模量和硬度随烧结温度的变化趋势却没有依赖关系;低应力时,随着烧结温度的提高,材料致密化程度有所提高,抗弯强度和断裂韧性均有所提高,耐磨性也有所提高;高应力时也如此,只是随着应力的增大,材料的脆性断裂(剥离)倾向加剧,脆弱的晶界容易引起晶粒挤出,使裂纹往往在此产生和扩展,导致磨损加剧,磨损量随之增大。

图 4 为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ —WC 陶瓷表面摩擦磨损的 SEM 照片,图 4(a)为裂纹扩展遇到气孔引起的局部塌陷而形成大尺寸的磨屑后留下的空洞,对比图 4(a)、图 4(b)照片可见,温度超过 1 600,晶粒明显长大,加剧晶界的脆性倾向,使材料的耐磨性下降。



(a) 烧结温度为 1 600



(b) 烧结温度为 1 700

图 4  $\text{Al}_2\text{O}_3$ —WC 陶瓷表面摩擦磨损的 SEM 照片

Fig. 4 SEM photos of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ —WC ceramic surface after wearing

(下转第 47 页)

硅树脂和环氧树脂在两种织物内的毛细压力如表 3 所示。

表 3 树脂在织物内的毛细压力

Tab. 3 Micro-pressure in woven fabric introduced by resin

织物类型	树脂类型	毛细压力/ Pa
8 缎纹玻璃布	有机硅树脂	$2.2 \times 10^3$
	环氧树脂	$1.1 \times 10^4$
2 × 2 斜纹玻璃布	有机硅树脂	$2.4 \times 10^3$
	环氧树脂	$1.2 \times 10^4$

于是,用环氧树脂注射时测得的织物表观渗透率应比用有机硅树脂注射时测得的织物表观渗透率高,对于 8 缎纹玻璃布,其比值为:  $K_1/K_2 = 1.14$ ,对于 2 × 2 斜纹玻璃布,其比值为:  $K_1/K_2 = 1.13$ 。这个值与实验测得的渗透率比值有一定的偏差,可以认为是由织物的不均匀性以及理论与实际的偏差造成的,但两者之间的趋势是一致的,说明树脂对织物的微观浸润性是导致这种现象的原因。从以上的讨论可知,流体对织物的浸润性不同,会造成测得的织物表观渗透率也不同。因此,流体种类、纤维类型以及织物处理剂等影响流体与织物浸润性的因素都将导致测得的织物表观渗透率出现差异。所以,在用实验测定织物的渗透率时,必须考虑这些因素的影

响。

#### 4 结论

(1) 织物的表观渗透率与注射树脂的种类有关。

(2) 树脂与织物之间的微观浸润性是导致织物的表观渗透率发生改变的原因。

#### 参考文献

- 1 毛昶熙. 渗流基本理论及计算. 1992: 25 ~ 58
- 2 Chan A W, Larive D E, Morgan R J. Anisotropic permeability of fiber preforms: constant flow rate measurement. J. Compos. Mater., 1993; 27(10): 996 ~ 1 008
- 3 Bruschke M V, Advani S G. Flow of generalized newtonian fluids across a periodic array of cylinders. J. Rheol., 1993; 37(3): 479 ~ 498
- 4 Crochet M J. Numerical simulation of flow processes. Chem. Eng. and Sci., 1987; 42(5): 979 ~ 1 003
- 5 Greenkorn R A. Flow Phenomena in Porous Media. 1983: 467 ~ 491
- 6 Adams K L, Russel W B, Rebenfeld L. Radial penetration of a viscous liquid into a planar anisotropic porous medium. Int. J. Multiphase Flow, 1988; 14(2): 203 ~ 215
- 7 Parnas R S, Howard J G, Luce T L, Advani S G. Permeability characterization part 1: a proposed standard reference fabric for permeability. Polym. Compos., 1995; 16(6): 429 ~ 445
- 8 天津大学物理化学教研室. 物理化学(下册). 1989: 298 ~ 315

(上接第 24 页)

#### 4 结论

(1) 1 600 烧结时  $Al_2O_3$ —WC 陶瓷具比较有较优良的机械性能,其抗弯强度为 780 MPa;断裂韧性为  $7.2 MPa \cdot m^{1/2}$ 。

(2) 本试验条件下  $Al_2O_3$ —WC 陶瓷的耐磨性与抗弯强度和断裂韧性的变化趋势比较一致,而与弹性模量和硬度的变化趋势没有依赖关系。

(3) 温度超过 1 600,晶粒长大加剧了晶界的脆性而导致材料磨损加剧。

#### 参考文献

- 1 田雨霖. 陶瓷的韧化机理及其显微结构间的关系. 硅酸盐通报, 1988; 3: 43
- 2 陈志刚等. (Ce—TZP)— $Al_2O_3$  陶瓷力学性能及其增韧机理的研究. 硅酸盐学报, 1990; 18(3): 211 ~ 217
- 3 金志浩等.  $ZrO_2$  增韧  $Al_2O_3$  陶瓷耐磨性的研究. 硅酸盐学报, 1989; 17(5): 401 ~ 404
- 4 Kato K. Tribology of Ceramics. In: 5th Intern. Cong. On Tribology, 1989; 1: 75 ~ 93