

莫来石纤维增强铝硅酸盐陶瓷的强度及断裂韧性*

刘宇 邓永茜**

(工程系)

摘 要

通过对莫来石纤维、铝硅酸盐陶瓷基体及复合材料力学参数的测定,以及通过扫描电镜、电子探针等观察,对复合材料的强度及断裂韧性进行了分析,认为这两种材料的复合是匹配的。本课题所试制的铝硅酸盐陶瓷基体的强度和断裂韧性有较大的提高。

关键词: 铝硅酸陶瓷 纤维增强 断裂韧性

A Test Report on Strength and Fracture Toughness of Mullite Fiber-reinforced Alumina-silica Ceramics

Liu Yu Deng Yongqian

(Engineering Department)

Abstract

In this paper, by determining mechanical parameter of mullite fibers, alumina-silicate ceramic matrix and their synthetic materials and by means of SEM and EPAM, the strength and fracture toughness of the synthetic materials to be tested has been observed. Thus it is affirmed that the combination of the two materials are matchable and that the strength and fracture toughness of alumina-silicate ceramic matrix have been greatly improved.

Key words: Alumina silicate ceramic, Fiber reinforce, Fracture toughness

一、引 言

经过长期的探索,陶瓷学者们发现纤维增强陶瓷可有效地克服陶瓷材料的脆性,提高陶瓷材料的强度和韧性。但往往由于增强纤维与陶瓷基体材料力学性能不匹配或纤维与基体发生化学反应而使纤维不能有效地发挥增强作用,因而陶瓷基体材料的力学性能也不能得到改

*本文收稿时间1989年2月3日

**本文选自作者硕士论文的部分内容。

善。本文选用含钾、钠、镁熔剂的铝硅酸盐陶瓷作为基体，莫来石纤维作为增强纤维来分析纤维增强陶瓷的力学性能^[1]。对此，下面将作具体讨论。

二、实验及性能测试

将含钾、钠、镁熔剂的铝硅酸盐陶瓷（化学成份见表1）料粉碎，过200目筛，制成干粉，将乱向多晶莫来石纤维切制成长径比分别为3~15、20~30、40~80、100~200四种短莫来石纤维（化学成份见表1）。称一定量干粉料，加入5%体积百分比的短纤维，充分混合，加入少量水，造粒，压制成80×20×10mm的试条，并在1300°C温度下烧结。

表1 基体陶瓷料、莫来石纤维的化学成份表

百分含量 种类	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	烧失量
基体陶瓷料	68.39	19.53	0.68	0.29	1.68	3.27	0.78	6.30
莫来石纤维	19.7	80	<0.1	/	/	<0.3		/

用数字动弹模量仪测定试条的动态弹性模量。用拉伸法测纤维的强度、断裂应变及弹性模量。磨平试条的表面，用三点弯曲的方法测试其弯曲强度，跨距取55mm，加载速率为0.02mm/S。并用扫描电镜观察试条断裂后断口的形貌，以及用电子探针线扫描分析断口纤维与基体界面成份的变化及结合状态。

三、分析与讨论

3.1 纤维与基体的弹性模量、断裂应变

要提高陶瓷基体的强度和韧性，采用纤维增强，首先必须选用高强度、高弹性模量的纤维（比基体高），只有这样，纤维在基体中才有可能承受高于基体的载荷。

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_m} = \frac{V_f}{(1-V_f)} \left[\frac{E_f}{E_m} \right] \quad \text{和} \quad \frac{\sigma_f}{\sigma_c} = \frac{[E_f/E_m]}{[E_f/E_m] + [(1-V_f)/V_f]}$$

式中： σ_f 、 σ_m 、 σ_c 分别为纤维、基体和复合材料所承受的载荷； E_f 、 E_m 为纤维和基体的弹性模量； V_f 为纤维加入量（体积百分率）。

从上式中可以看出：纤维与基体所承受的载荷之比相当于它们的弹性模量和体积百分数的乘积之比。即纤维的弹性模量愈高，其所承受的载荷愈大。莫来石纤维的单丝强度为500~800MPa，弹性模量为197.7GPa，基体陶瓷材料的强度为44.4MPa，弹性模量为7.5GPa，可见，莫来石纤维作为增强材料是满足弹性模量和强度要求的。

其次，对于纤维、基体和复合材料的断裂应变也有要求。一般纤维的断裂应变 ϵ_f 都高于陶瓷基体的断裂应变 ϵ_m 。如果纤维的断裂应变 ϵ_f 大于基体的断裂应变 ϵ_m ，而复合材料的断

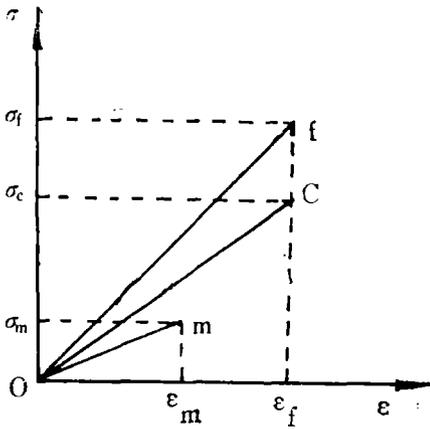


图1 $E_f > E_m, \epsilon_f \geq \epsilon_c > \epsilon_m$ 条件下复合材料的强度

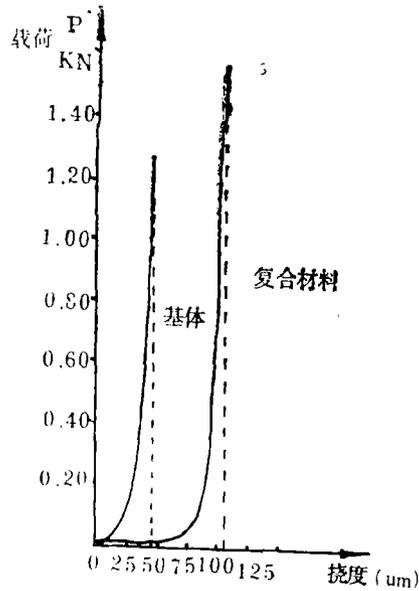


图2 基体纤维和纤维复合材料试条的载荷—挠度曲线

裂应变 ϵ_c 等于基体断裂应变 ϵ_m ,即 $\epsilon_f > \epsilon_c = \epsilon_m$,这时,即使纤维的断裂应变较大,亦只能在上述水平下发挥作用,纤维的高强度也是没有意义的。比较理想的情况是复合材料的断裂应变小于或等于纤维的断裂应变,而大于基体的断裂应变即 $\epsilon_f \geq \epsilon_c > \epsilon_m$ 。在这种情况下,虽然复合材料的应变已超过基体的断裂应变值,但由于高强纤维的支撑不致于发生复合材料的整体破坏,仅当复合材料应变达到纤维的断裂应变值,才出现整体破坏。如图1所示,材料的强度 σ_c 值为 $\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f)$ 或 $\sigma_c \approx \sigma_f V_f$ 时,这种复合材料可望具有较好的增强效果。

实验测得基体、纤维、复合材料的断裂应变分别为0.76%、0.98%、0.90%。图2是尺寸相同的基体试条和加入5.0%长径比为40~80纤维复合材料试条的载荷—挠度曲线,可以看出,加入高强度、高弹性模量,断裂应变比基体大的莫来石纤维,基体陶瓷的强度和应变都有显著增加。

3.2 基体与纤维间结合力

纤维增强陶瓷的机理之一就是复合材料断裂过程中,纤维从基体中拔出而吸收能量。

纤维与基体间的化学反应,一方面会导致纤维力学性能的退化,使纤维失去增强增韧的作用;另一方面会产生纤维与基体的牢固结合,导致“拔出效应”不能产生,因而基体的断裂韧性不能得到改善,应尽力避免。

莫来石纤维与含钾、钠、镁熔剂的铝硅酸盐陶瓷的化学成份见表1,两者的主要成份是同型的,皆为 SiO_2 、 Al_2O_3 。只是基体含有部分 K_2O 、 Na_2O 、 MgO 熔剂。 K_2O 、 Na_2O 、 MgO 的电子探针扫描图片表明,纤维与基体并未发生明显的化学反应(见图版4中的图3~5)。回

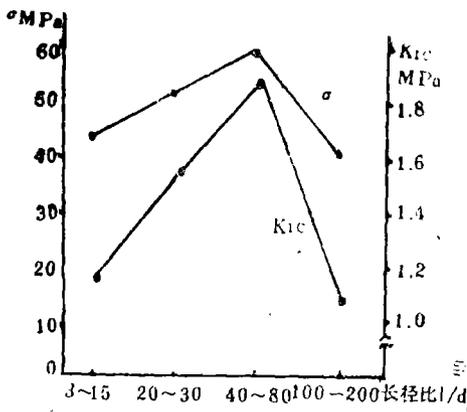


图8 复合材料 σ 、 k_{1c} 与长径比关系曲线

时,也可看出纤维在基体中完整无损(见图版4中的图6),并且纤维与基体的结合力是比较适中的。这是因为纤维与基体间过强的结合力,将会使纤维与基体一起脆断,不会产生图7所示的纤维从基体中拨出现象;而纤维与基体间过弱的结合力,基体将无法把应力传递到纤维上,纤维亦无从发挥增强作用,因而,就不会得出图2所示的强度和断裂应变增大的结果。当纤维与基体间保持着适中的结合强度,其中纤维既可承担大部分外加应力来提高强度,又能在基体断裂过程中以拨出功的形式消耗能量来增加基体

的断裂韧性,才能获得增强增韧的纤维陶瓷复合材料。

实验得出:在纤维加入量和长径比合适的情况下,陶瓷基体材料强度和断裂韧性得到了很大程度的提高(见图8)。

四、结束语

莫来石纤维增强含钾、钠、镁熔剂的铝硅酸盐陶瓷,两者在弹性模量、强度、断裂应变等力学性能方面是匹配的,并且两者间没有发生明显的化学反应,界面结合力比较适中。复合材料在断裂过程中,纤维从基体中拨出,因而显著地提高了陶瓷基体的强度和断裂韧性,改善了陶瓷基体的力学性能。

参 考 文 献

- [1] Thomas, F. Toltz, *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 6, 7/8 (1985).
- [2] F. P. Meyer, G. D. Quznn, *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 6, 7/8 (1985).
- [3] US Patent 4412854.
- [4] Erjch, Fitzer, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 65, 2 (1986).
- [5] Marcus P. Borom, *J. Am. Ceram. Soc.*, 70, 1, 1~8 (1987).

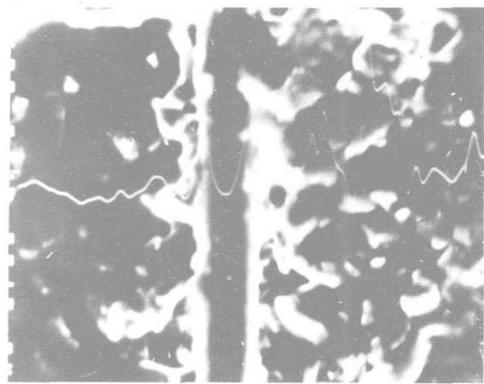


图4 Na₂O 电子探针线扫描
(1500×)

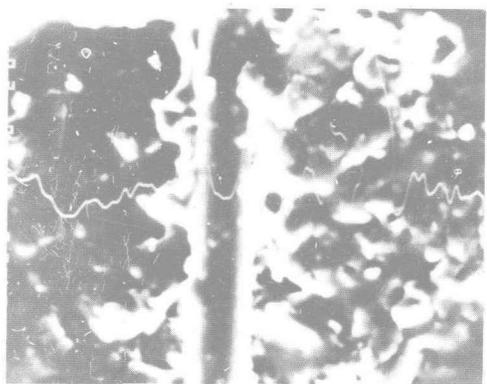


图3 K₂O 电子探针线扫描
(1500×)

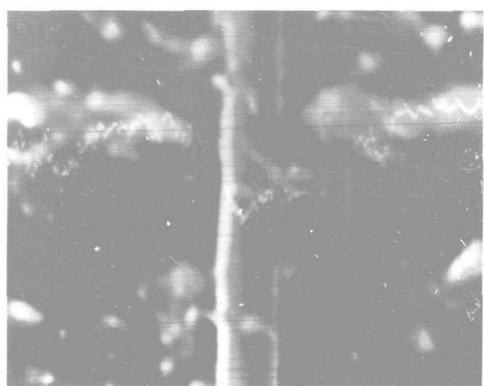


图5 MgO 电子探针线扫描
(2000×)

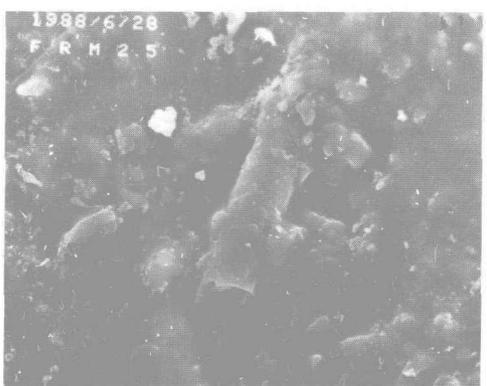


图6 复合材料断口电子扫描
(2000×)

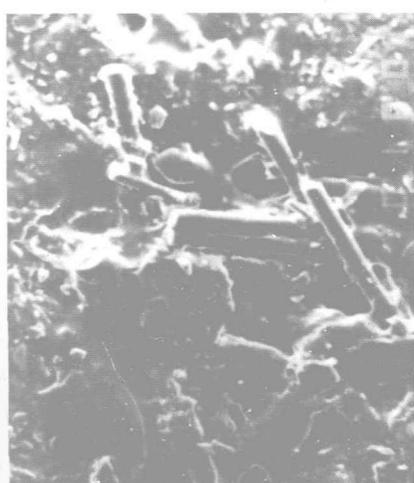


图7 复合材料断口纤维拔出
1000×电子扫描

图版4 《莫来石纤维增强铝硅酸盐陶瓷的强度及断裂韧性》照片图