

SiC 晶须增韧的钨尾矿微晶玻璃^①

孙孝华 王开志* 刘良先 曹显良 李胜旗 王明东
(中南工业大学材料科学与工程系, * 资源环境与工程学院, 长沙 410083)

摘 要 在钨尾矿微晶玻璃基体中加入 25% (体积分数) 的 SiC_w, 可显著提高其断裂韧性和抗弯强度。观察了复合材料的形状记忆效应(SME)。通过微观分析, 讨论了 SiC 晶须增韧补强的原因。

关键词 SiC 晶须 钨尾矿微晶玻璃 晶须增韧 形状记忆效应

微晶玻璃是一种膨胀系数可以调节、化学稳定性和热稳定性好、使用温度高及坚硬耐磨的无机非金属材料。由于这些优点, 它已在机械工程和电子工程等方面得到应用, 并有希望用作航天和结构材料^[1]。但是, 微晶玻璃本身的力学性能并不理想, 这一弱点严重地妨碍着它的广泛应用。为了进一步改善它的脆性和增大其强度, 人们进行了大量研究工作^[2-5]。现在多采用晶须或纤维增韧补强的方法^[6-8]。通过晶须或纤维对微晶玻璃的增韧补强, 可使材料的断裂韧性和强度得到大幅度提高^[9, 10]。但有关尾矿微晶玻璃增韧补强的研究尚未见报导。本文采用 25% SiC_w 对钨尾矿微晶玻璃进行增韧补强, 研究了材料的力学性能及有关形状记忆效应, 并对增韧补强作用的机理进行了分析。

1 实验方法

本实验采用的 SiC_w 由国防科技大学堵永国、周新贵和白书欣提供, 晶须直径 0.5~1.5 μm, 晶须长度 20~100 μm。基体是经过熔融处理及微晶化后球磨而得到的钨尾矿微晶玻璃, 其化学组成(质量分数, %)为: SiO₂ 61.0、Al₂O₃ 7.0、CaO 15.0、MgO 5.0、K₂O 4.0、N₂O 8.0, 配料量组成(质量分数, %)为: 钨尾

矿 47.0、长石 25.0、石灰石 13.0、白云石 25.0、K₂CO₃ 3.0、Na₂CO₃ 11.0, 基体粉末粒径为 3~5 μm。将含量为 25% 的 SiC 晶须和基体粉末于酒精中边超声振动边搅拌混匀, 经干燥后在石墨模具中进行热压烧结, 热压烧结采用感应热压炉、热压温度 950 °C、压力 20 MPa、保温保压时间 20 min。热压制备的复合材料经切割、磨削和抛光制成用于三点抗弯强度 σ_{bb} 和断裂韧性 K_{IC} 测试的试样; σ_{bb} 测量采用 Instron 1342 型材料试验机, 加载速度 0.1 mm/min, 试样尺寸 20 mm × 4 mm × 2 mm, 跨距 11 mm; 断裂韧性 K_{IC} 用单边开槽法(SENB)测定, 试样大小为 20 mm × 2 mm × 4 mm, 槽深 2 mm, 槽宽 0.2 mm, 加载速度 0.1 mm/min, 跨距 11 mm。物相分析用 Siemens D500 X 射线衍射仪(Cu 靶, 2°/min)。新鲜断口喷金后在 X-650 型扫描电镜下观察断口形貌。采用 69-1 型布洛维硬度仪在试样抛光表面上产生压痕裂纹, V 氏压头, 试样表面与热压平面平行。测定形状恢复率的试样为 25 mm × 5 mm × 1.5 mm 薄片, 其测试方法与文献[11]相同。

2 实验结果与讨论

2.1 材料的力学性能及微观分析

表 1 列出了基体、基体+ 25% SiC_w 两者的

① 中国有色金属工业总公司科研基金资助项目(编号: 96K-09-04)
孙孝华, 男, 59 岁, 教授

收稿日期: 1997-07-16; 修回日期: 1997-08-21

抗弯强度和断裂韧性数据。从表 1 可知, 复合材料的抗弯强度 σ_{bb} 和断裂韧性 K_{IC} 分别为 184.5 MPa 和 $3.7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 相当于钨尾矿微晶玻璃基体 σ_{bb} 和 K_{IC} 的 3 倍, 这表明加入 25% 的高弹性模量 SiC 晶须后, 复合材料的断裂韧性和强度得到明显改善, 达到了既增韧又补强的效果。

表 1 材料的力学性能

材料	抗弯强度 σ_{bb} / MPa	断裂韧性 K_{IC} / $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$
基体	53.6	1.2
基体+ 25% SiC	184.5	3.7

为揭示 SiC_w 对基体材料强度和断裂韧性改善的内在机制, 实验中对抗弯试样断口形貌特征进行了分析观察。图 1(a)、(b) 是复合材料弯曲试样的断口 SEM 照片, 可见 SiC 晶须从基体中的拔出部分及拔出后残存的空洞。这种晶须拔出效应因介面摩擦消耗外界负载的能量而达到增韧补强的目的。这说明在复合材料中含有晶须拔出增韧补强机制。图 1(a) 断口形貌特征粗糙且凹凸不平, 是典型的裂纹偏转特征。这可从图 1(b) 看出, 该图显示出复合材料断裂时, 由于存在 SiC_w, 在裂纹扩展中出现了裂纹偏转。此外, 从图 1(b) 还可以看到晶须的桥连作用。

为了证实裂纹偏转及裂纹桥连的存在和对增韧补强机理作进一步探讨, 在硬度仪上采用

V 氏压头预制了压痕裂纹, 并对裂纹的扩展情况进行扫描电镜观察分析, 结果如图 2 所示。由图 2 可知, 该复合材料断裂时, 在裂纹扩展过程中产生明显的裂纹偏转及裂纹桥连。晶须对裂纹的偏转效应延长了裂纹扩展途径。这种非平面断裂比平面断裂有更大的断裂表面, 增加了裂纹扩展阻力, 因而需要吸收更多的能量, 从而起到增韧补强作用。晶须对裂纹的桥连作用则由于产生使裂纹闭合的力而消耗外界载荷所做的功, 因此也能导致断裂韧性和强度提高。这表明在复合材料中存在裂纹偏转及裂纹桥连增韧补强机制。可见, 该复合材料同时具有晶须拔出、裂纹偏转及裂纹桥连三种增韧补强效果, 因而具有较高的抗弯强度和断裂韧性。

复合材料的 X 射线衍射谱如图 3 所示。从图 3 可以看出, 复合材料仅由基体(硅灰石 CaSiO₃及透辉石 CaMgSi₂O₆) 和 SiC_w 所组成, 没有其他反应产物。也就是说, 在本文工艺条件下, SiC_w 在钨尾矿微晶玻璃基体中能稳定存在, 无明显化学反应, 这显然有利于复合材料在断裂时的晶须拔出、裂纹偏转及裂纹桥连。

2.2 有关的形状记忆效应(SME)

当复合材料试样于 520 ℃训练成 2.0% 应变, 在 800 ℃下保温 5 min, 所有变形近乎完全恢复, 测得残留应变约为 0.1%, 从形状恢复率的公式可计算出记忆恢复率为 95%, 与文献

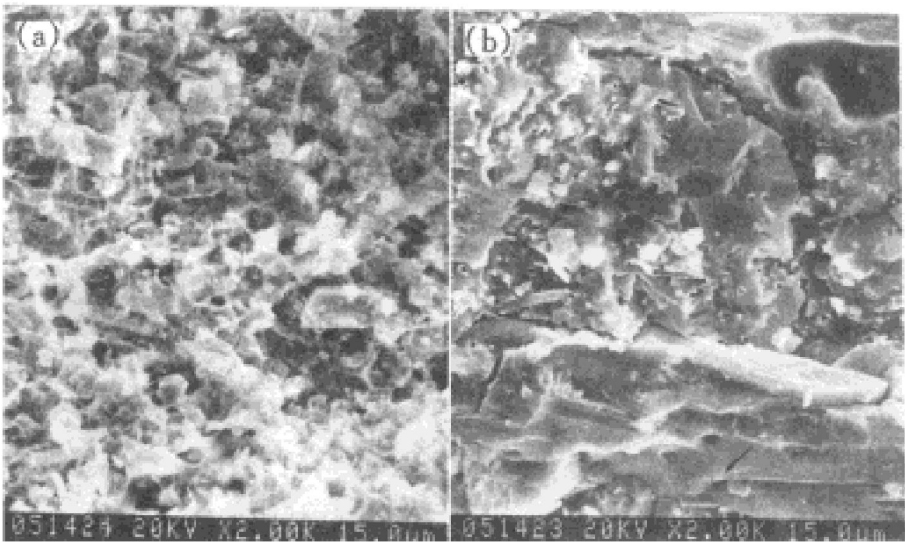


图 1 复合材料弯曲试样的断口 SEM 照片

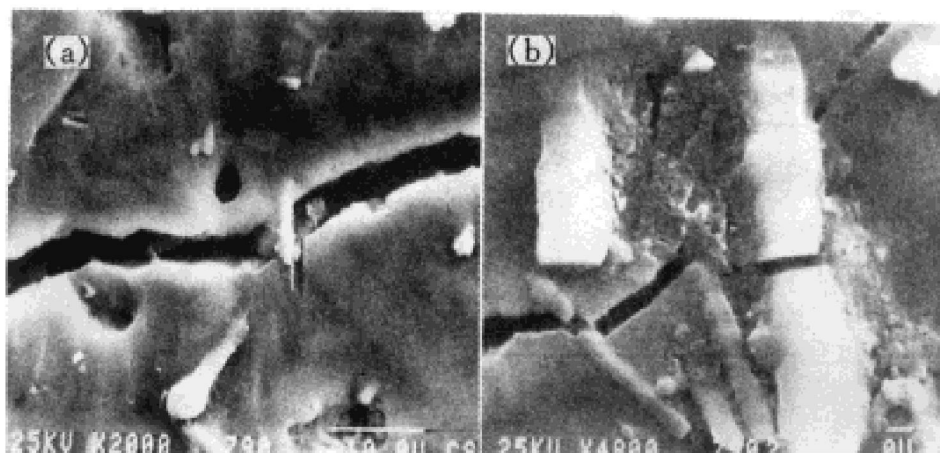


图2 与热压平面平行的抛光试样表面上的压痕裂纹

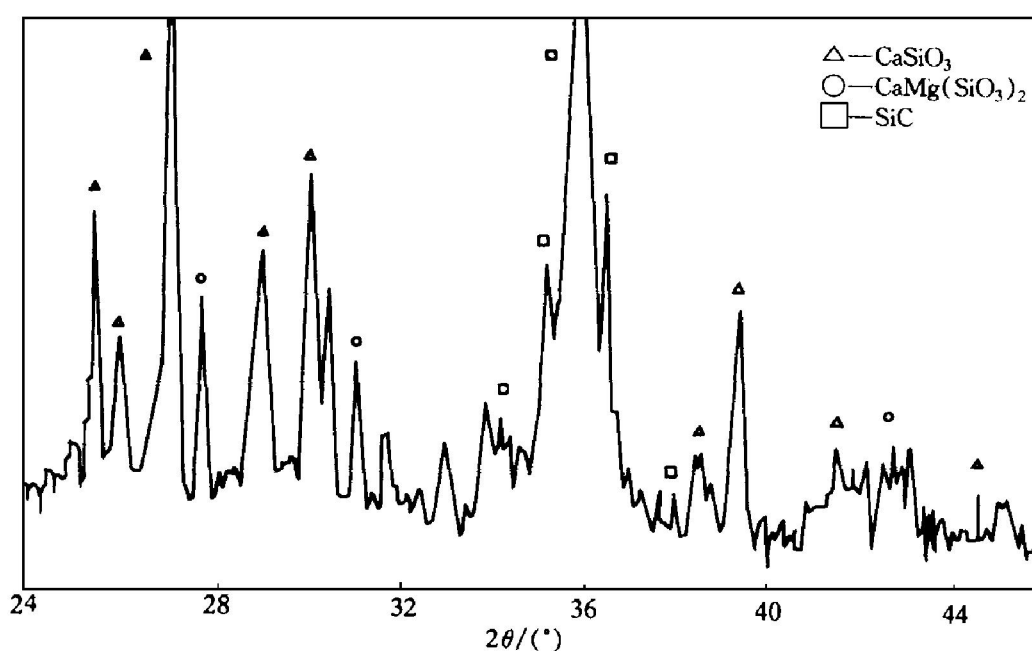


图3 复合材料X射线衍射谱

[11]相比,复合材料的记忆恢复率有所提高。应。
这表明 SiC_w 的加入有助于改善形状记忆效应。

参考文献

3 结论

(1) 加入 25% SiC 晶须对钨尾矿微晶玻璃基体有着明显的增韧补强作用,复合材料的断裂韧性 K_{IC} 和抗弯强度 σ_{bb} 均为基体的 3 倍。

(2) 微观分析表明,该复合材料发生断裂时,其内部出现晶须拔出、裂纹偏转及裂纹桥连三种增韧补强机制。

(3) SiC_w 的加入有助于改善形状记忆效

- 1 麦克粉伦 P W. 微晶玻璃. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988: 270.
- 2 Shalek P D, Petrovic J J and Hurley G F *et al.* Am Ceram Soc Bull, 1986, 65(2): 351.
- 3 Sawyer L C, Arons R M and Haimbach F *et al.* Ceram Eng Sci Proc, 1985, 6(7): 567.
- 4 Chain R, Brandoon D G, Baum L. Ceram Eng Sci Proc, 1988, 9(7): 695.
- 5 Prewo K M. Am Ceram Soc Bull, 1989, 68(2): 395.
- 6 Becher P F. J Am Ceram Soc, 1991, 74(2): 255.

- 7 Jamet I F, Lewis D and Luh E Y. Ceram Eng Sci Proc, 1984, 5(7): 625.
- 8 Prewo K W, Brennan J J and Layden G K. Am Ceram Soc Bull, 1986, 65(2): 370.
- 9 张玉峰, 郭景坤, 杨涵美等. 材料科学进展, 1992, 6(3): 265.
- 10 Brennan J J, Prewo K M. J Mater Sci, 1982, 17(8): 2371.
- 11 孙孝华, 汪明朴, 曹显良等. 中国有色金属学报, 1997, 7(1): 62.

SiC WHISKER TOUGHENED TUNGSTEN TAILINGS GLASS-CERAMICS

Sun Xiaohua, Wang Kaizhi^{*}, Liu Liangxian,

Cao Xianliang, Li Shengqi, Wang Mingdong

Department of Materials Science and Engineering,

** College of Resource, Environment and Civil Engineering,*

Central South University of Technology, Changsha 410083

ABSTRACT Substantial improvements in fracture toughness(K_{IC}) and bending strength(σ_{bb}) were obtained by incorporating 25% (volume fraction) of SiC_w into tungsten tailings glass-ceramics matrix. The shape memory effect of the composite has been observed. The causes of SiC whisker toughening and reinforcing were discussed through microscopic analysis.

Key words SiC whisker tungsten tailings glass-ceramics whisker toughening shape memory effect

(编辑 彭超群)