

# 晶须增强 CMCs 的增韧机制及其角度依赖性 \*

翟洪祥 黄勇 汪长安  
(北方交通大学) (清华大学)

**摘要** 探讨了晶须增强陶瓷基复合材料 (CMCs) 增韧过程的主要机制, 研究了机制的发生和作用过程对晶须角度的依赖性. 结果表明, 大部分晶须在架桥过程中折断, 折断后的晶须可以滑动摩擦的形式继续消耗能量. 当晶须角度较大时, 架桥过程和滑动摩擦过程因局部基体的破碎而截止.

**关键词** 增韧机制 角度效应 晶须架桥 滑动摩擦 基体破碎

**分类号** TB332

## TOUGHENING MECHANISMS AND WHISKER ORIENTATION DEPENDENCE IN WHISKER REINFORCED CMCs

ZHAI Hongxiang\*\*

(Department of Mechanical Engineering, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

HUANG Yong WANG Changan

(Tsinghua Univeristy)

**ABSTRACT** The main mechanisms correlated with the toughening process of whisker reinforced CMCs, including whisker/matrix interface debonding, whisker bridging, sliding friction between whisker and matrix, and local matrix spalling, was explored. The dependence of the occurrence and the acting processes on whisker orientation was particularly emphasized, and was characterized with the modeled relations. The results showed that most of whiskers are broken in the bridging process and the broken whiskers continuously consume energy with the form of sliding friction. However, when whisker orientation angle is large, the bridging process and the sliding friction process could be cut off due to the local matrix spalling.

**KEY WORDS** toughening mechanisms, orientation effects, whisker bridging, sliding friction, matrix spalling

在晶须增强 CMCs 的裂纹扩展过程中, 发生在裂纹尖端后方尾流区 (Wake Zone) 的晶须架桥以及晶须与基体之间的滑动摩擦, 可一定程度地吸收裂纹扩展的能量, 导致 CMCs 断裂韧性

\* 国家自然科学基金资助项目 59672029 和清华大学新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室开放基金资助项目.

1998年9月14日收到初稿; 1999年6月17日收到修改稿.

本文联系人: 翟洪祥, 北京市 100044, 北方交通大学机械系

\*\* To whom correspondence should be addressed

的提高<sup>[1~5]</sup>; 而架桥及滑动摩擦过程中晶须根部周围局部基体的破碎, 构成对架桥和摩擦滑动的作用程度的限制。这些机制的发生及其对 CMCs 增韧效果的贡献, 不仅受晶须 / 基体界面形态的控制, 而且强烈依赖晶须与裂纹面之间的角度<sup>[4,5]</sup>。本文探讨晶须增强 CMCs 增韧过程的主要机制, 揭示这些机制的发生和作用与晶须角度之间的关系。

## 1 实验方法

采用热压工艺制备 SiC 晶须增强 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 基复合材料; Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 作为添加剂用以调控晶须 / 基体界面及基体的显微结构。将体积分数 20% 的 SiC 晶须连同添加剂掺入 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 粉末, 混合球磨; 球磨后晶须的测量平均长度 35 μm、平均直径 1.2 μm。干燥后的混合粉末冷压成直径 75mm、厚 15mm 的圆板, 然后在压力为 30MPa、温度为 1820 ℃、氮气气氛下烧结 90min, 制成圆板形材料。

为观察裂纹尖端后方晶须与基体之间的干涉行为, 采用截面为 4mm × 6mm 的单边斜切口试样, 三点弯曲加载方式, 跨距 36mm。实验在标准材料试验机上进行; 加载速率 (十字头位移速率) 0.02mm·min<sup>-1</sup>。当裂纹扩展到一定长度时, 将试样放到扫描电镜下观察。

## 2 结果与讨论

### 2.1 晶须增强 CMCs 的增韧机制

图 1 表明, 材料典型断口形貌的最一般的特征是裸露在断面上的折断晶须和深入到断面内的晶须孔洞。这意味着在裂纹通过时这些晶须没有立即破坏, 而是经历了一个解离的过程。解离的发生可能是界面结合强度控制的, 也可能是界面相断裂韧性控制的。晶须与基体之间的热弹性失配引起的基体残余应力是影响解离的重要因素<sup>[6]</sup>, 晶须的取向角度对解离的发生、特别是对解离的程度也有显著的影响<sup>[7]</sup>。

晶须架桥是晶须从基体有限解离之后的必然过程 (图 2); 局部界面解离后的完好晶须只有通过架桥才能被折 (拉) 断。折断的晶须并没有完全失去增韧能力。由于弯矩的作用, 架桥晶须的

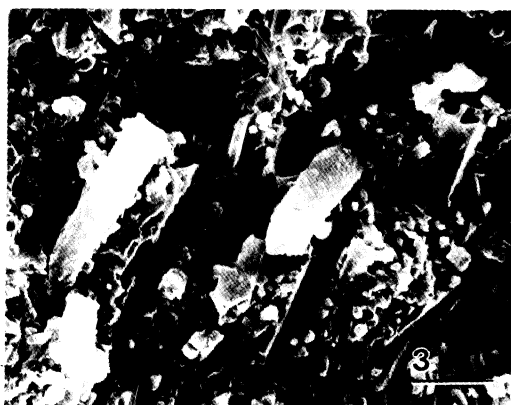


图 1 试样断口形貌的 SEM 照片

Fig.1 Scanning electron micrograph of the fractured surface image of the sample



图 2 晶须架桥的 SEM 照片

Fig.2 Scanning electron micrograph showing whisker bridging

折断总是在解离部分与约束部分的交界处发生(图3),因而折断后的晶须仍然桥接于两裂纹面之间.其结果,随着裂纹张开,残留在裂纹面内的具有解离长度的晶须段与周围基体发生滑动摩擦,继续消耗能量.图4是折断晶须处于滑动摩擦状态的照片.由于陶瓷晶须的脆性和所受到的弯曲作用,大部分一次折断的晶须在滑动摩擦过程中再次折断.

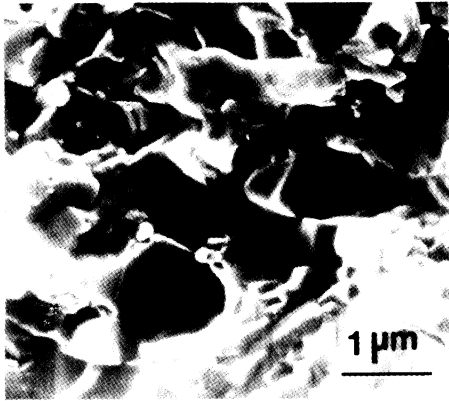


图3 晶须折断形貌的SEM照片

Fig.3 Scanning electron micrograph showing whisker breaking image

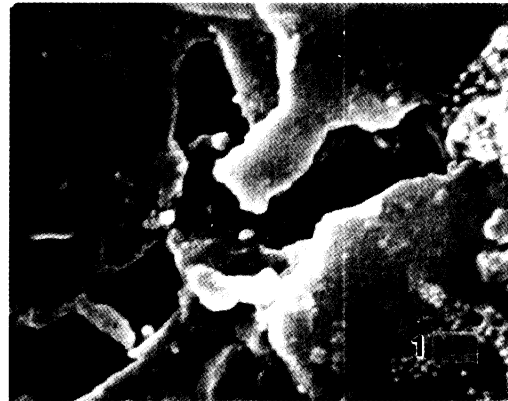


图4 晶须摩擦滑动的SEM照片

Fig.4 Scanning electron micrograph showing fractional sliding of whisker

另一方面,在晶须的架桥和摩擦滑动过程中,裂纹面附近的局部基体可能因晶须的“掘撬”作用而破碎.图5是局部基体破碎的SEM照片.这种情况发生后,晶须的架桥和滑动摩擦由于晶须失去约束而截止.因此,局部基体破碎实质上构成对晶须架桥和滑动摩擦的限制性机制.经常观察到的裂纹局部偏转、蛇行、分叉和汇合现象,大多是局部基体破碎的结果.

## 2.2 增韧机制的角度依赖性

假定晶须和基体是完全弹性的,晶须之间的力学行为相互独立.根据对称性,晶须及其根部附近的基体在架桥过程中的受力可按图6(a)分析.  $\theta$  为晶须与裂纹面法线之间的夹角,  $L_{db}$  和  $L_a$  分别为解离长度和根部约束长度 ( $L_{db}+L_a=L/2$ ,  $L$  为晶须平均长度),  $u$  为裂纹张口位移,  $S_b$  为晶须承受的拉力.晶须折断、局部基体破碎、以及晶须/基体界面破坏(导致晶须拔出)发生时的临界裂纹张口位移为<sup>[5]</sup>:

$$u_{bc} = \frac{\sigma_{wc} R \eta \phi(\theta)}{E_w (\cos \theta + \eta \sin \theta)}$$

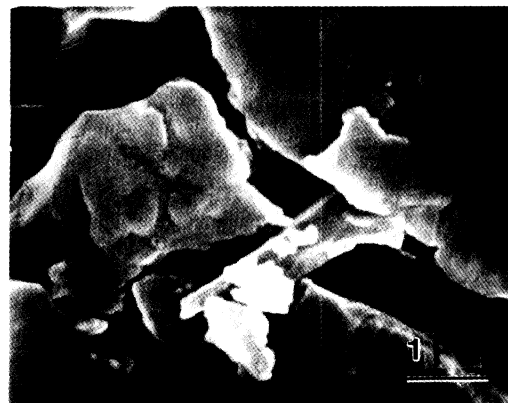


图5 局部基体破碎的SEM照片

Fig.5 Scanning electron micrograph showing local matrix spalling

$$u_{mc} = \frac{\sigma_{mc} l_d \eta \phi(\theta) \varphi(\alpha)}{E_w \sin \theta},$$

$$u_{ic} = \frac{2\tau_c l_d \eta \phi(\theta)}{E_w \cos \theta},$$

式中  $\phi(\theta) = \cos^2 \theta + (4/3)\eta^2 \sin^2 \theta$ ,  $\varphi(\alpha) = (2\alpha - \tan \alpha) / (\tan \alpha - \alpha)$ ,  $\alpha = \pi/2 - \theta$ ,  $\eta = L_{db}/R$ ,  $R$  为晶须的半径,  $E_w$ 、 $\sigma_{wc}$  分别为晶须的弹性模量和临界破坏应力,  $\sigma_{mc}$ 、 $\tau_c$  分别为基体和界面的临界破坏应力。

架桥晶须折断后, 随着裂纹继续张开, 其残留部分与基体之间发生滑动摩擦, 并由此产生裂纹面分离阻力  $S_p$ 。考虑折断晶须对周围基体的“掘撬”作用, 卡在基体中的晶须段所受的力可以用分布力  $q = q_0(l_s - x)$  近似描述。  $q_0$  为常数, 由力平衡关系确定;  $x$  为参考坐标,  $x = 0 \sim 2L_s$ ,  $L_s = (L_{db} - L_p)/2$ ;  $L_p$  为晶须的拔出长度。 由此得到:

$$S_p = \frac{3\pi R E_w \omega \tan \theta}{2\eta^3 (1 - L_p/L_{db})(1 + L_p/L_{db})^2} \Delta u$$

式中  $\Delta u = 2(u - u_{bc})$ ,  $\omega$  表示晶须与局部接触基体之间的摩擦系数。

晶须的拔出过程中, 由于晶须的弯曲变形抵抗,  $S_p$  随裂纹张口位移增大而增长。 晶须将再次折断, 或者局部接触基体破碎。 根据图 7(b), 晶须上的拉伸应力为:

$$\sigma_{w'} = \frac{S_p \cos \theta}{\pi R^2} [1 + (4\eta/3\omega)(1 - L_p/L_{db})],$$

当  $\sigma_{w'}$  达到临界应力  $\sigma_{wc'}$  时晶须被破坏。 架桥过程中晶须上的最大应力集中在解离与约束交界处晶须的受拉表面 (图 6 中“w”点), 而  $\sigma_{w'}$  在晶须的自由段上均匀分布。 所以, 架桥晶须的折断总是发生在解离段与约束段的交界处, 而滑动摩擦过程中晶须的折断则可能发生在自由段的任何位置。 由于这个原因, 根据强度统计理论的最弱环破坏概念,  $\sigma_{wc'}$  比  $\sigma_{wc}$  小得多。

作为反作用力, 在滑动摩擦过程中局部接触基体承受压力  $q_{-1} = q_0(L_s - x)$ ,  $x \leq L_s$  (图 7b)。

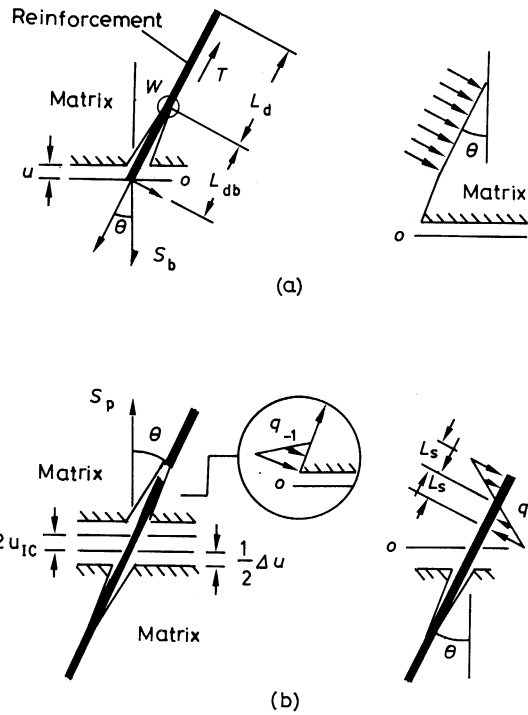


图 6 晶须与基体相互作用过程的受力状况

Fig.6 Mechanical condition during interaction between whisker and matrix; (a) bridging process, (b) sliding friction process

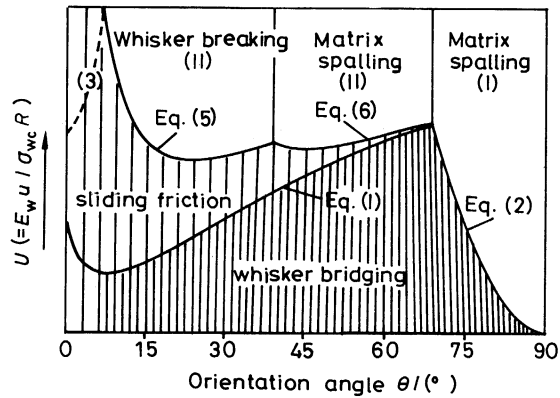


图 7 增韧机制及其作用程度对晶须取向的依赖关系

Fig.7 Dependence of the toughening mechanisms and their action extent on whisker orientation

取其平均值转换为  $L_s$  范围内的均布压力, 局部接触基体上的最大主应力为:

$$\sigma_{m'} = \frac{2S_p \cos\theta(2\alpha - \tan\theta)}{\eta(1 - L_p/L_{db})(\tan\alpha - \alpha)},$$

当  $\sigma_{m'}$  达到临界值  $\sigma_{mc'}$  时局部接触基体破碎.

在滑动摩擦过程中晶须的拔出量是有限的. 数值模拟计算的结果表明, 一般情况下, 比值  $L_p/L_{db}$  小于 3%, 即可近似地取  $L_p/L_{db}=0$  令  $\sigma_w' = \sigma_{wc'}$ ,  $\sigma_m' = \sigma_{mc'}$ , 滑动摩擦过程中晶须折断和局部基体破碎发生时的临界裂纹张口位移  $\sigma_w'$  和  $\sigma_m'$  即可确定.

图 7 所选取的参数为:  $R=0.75\mu\text{m}$ ,  $L=45\mu\text{m}$ ,  $E_w=480\text{GPa}$ ,  $\sigma_{ws}=20\text{GPa}$ ,  $\sigma_{wc'}=0.2\sigma_{wc}$ ,  $\sigma_{mc}=1.5\text{GPa}$ ,  $\sigma_{mc'}=0.5\sigma_{mc}$ ,  $\tau_c=0.5\text{GPa}$ ,  $\omega=0.6$ ,  $\eta=8$ . 由此可知, 大部分晶须在经历架桥过程之后被折断, 其余的大角度晶须在架桥过程中由于局部基体破碎而失去架桥能力, 几乎没有完好的晶须在架桥过程中可能从基体拔出. 在滑动摩擦过程中, 较小角度的晶须在经历有限的拔出之后再再次被折断, 而较大角度的晶须由于局部基体的破碎而失去作用.

### 3 结 论

晶须增强 CMCs 材料具有晶须角度依赖性的增韧机制. 产生增韧效果的能量消耗依赖晶须架桥和晶须与基体之间的滑动摩擦. 晶须 / 基体界面解离是晶须架桥机制和滑动摩擦机制得以发生的先决条件, 局部基体破碎构成对晶须架桥和滑动摩擦的限制性机制.

### 参 考 文 献

- 1 P.F.Becher, C.H.Hsueh, P.Angelini, T.N.Tiegs, J. Am. Ceram. Soc, **71**(12), 1050(1988)
- 2 P.F.Becher, J.Am.Ceram.Soc., **74**(2), 255(1991)
- 3 P.F.Becher, H.T.Lin, K.B.Alexander, in *Proc. of the 1th International Symposium on the Science of Engineering Ceramics*, edited by S.Kimura (Tokyo, The ceramic Society of Japan 1991) p.307
- 4 翟洪祥, 黄 勇, 汪长安, 高技术通讯, **7**(4), 11(1997)
- 5 翟洪祥, 黄 勇, 汪长安, 高技术通讯, **7**(5), 26(1997)
- 6 A.G.Evans, D.B.Marshall, Mechanical Behavior of Ceramic Matrix Composites. *Fiber Reinforced Ceramic Composites*, edited by Mazdiyasi K S (New Jersey, Noyes Publications, 1990) p.1
- 7 翟洪祥, 袁 泉, 黄 勇, 汪长安, 硅酸盐学报, **26**(5), 571(1998)