

[文章编号] 1004- 0609(2000) 06- 0872- 05

SiC 晶须有序添加角度对 Si₃N₄ 基体陶瓷的增韧效应^①

朱其芳¹, 姚 伟¹, 孙丽虹¹, 王瑞坤¹, 董利民², 张宝清²

(1. 北京有色金属研究总院, 北京 100088; 2. 清华大学 材料系, 北京 100084)

[摘 要] 对晶须添加的方向角效应进行了研究, 对裂纹尖端后方晶须桥连角度引起的应力重新分配进行了有限元分析, 得到晶须添加角度不同时 Si₃N₄ 陶瓷材料的裂纹尖端和晶须附近区域的应力应变场。分析表明, 试件在 I 型加载受力状态下, 当添加晶须的轴向垂直于裂纹面时, 晶须在裂纹尖端后方的桥接所引起的能量耗散作用最大, 添加效果最优, 使材料达到较好的增韧效果。当添加晶须与裂纹面法向形成角度 θ 时, 随角度 θ 的增加, 裂纹尖端拉应力增加。当添加角度较大时, 晶须根部基体承受了较大的应力, 易遭到破坏性崩裂。同时, 晶须内部主应力与晶须轴向之间的角度也随角度 θ 的增加而增加, 造成晶须折断, 致使造成晶须拨出的体积分数 φ_{ap} 减小, 降低了增韧效果。

[关键词] SiC 晶须; Si₃N₄; 桥连; 有序添加角度; 增韧机制

[中图分类号] TG 111. 91

[文献标识码] A

通过添加晶须不连续细长相, 改善精密陶瓷脆性的研究已有很大发展。细长相的增韧作用主要来自裂纹尖端后方裂纹面晶须桥连引起的能量耗散^[1~ 3], 其作用机制和过程对材料的断裂行为、破坏强度有明显的影响^[4~ 7]。由于细长相以及基体的载荷响应对细长相方位角的敏感性, 增韧机制及其过程与方位角密切相关^[8]。本文作者用有限元方法对晶须补强陶瓷材料在 I 型加载情况下裂纹尖端附近的应力应变场进行了分析, 特别是对裂纹尖端及后方晶须桥连角度造成的应力重新分配进行了有限元分析, 讨论有关陶瓷基体中不连续细长相的方位角增强效应。实验选用了 SiC 晶须增强 Si₃N₄ 复合陶瓷材料。

1 研究方法

所分析的材料为 SiC 晶须添加于 Si₃N₄ 基体复合陶瓷材料。材料产生裂纹后, 在 I 型加载的方式下, 裂纹尖端后方不连续晶须桥连的方位角引起的能量耗散效应进行了计算研究。所分析晶须轴向与裂纹面法线方向的夹角分别为 0°, 5°, 15°, 30°, 45°和 60°, 材料的力学参数如表 1 所示。

有限元分析模型的加载方式为 I 型加载, 对垂直于裂纹面方向施以单位均布拉向载荷。加载模

表 1 陶瓷材料力学性能

Table 1 Mechanical properties of ceramic material

Material	$E/(N \cdot \mu m^{-2})$	μ
Whisker SiC	0. 4	0. 21
Matrix Si ₃ N ₄	0. 3	0. 21

型、晶须桥连方式和网格划分如图 1 所示。为分析裂纹尖端后方晶须桥连方向角效应, 将该问题简化为二维平面问题, 采用美国 SP91 大型线性有限元程序进行分析。

2 结果与分析

2. 1 晶须桥连角度与裂纹尖端主应力

裂纹尖端为材料受力时裂纹扩展的敏感部位, 其应力状态反映了材料存在裂纹时的承载行为。对于裂纹尖端后方晶须桥连加载模型的有限元计算结果分析表明, 裂纹尖端的应力是随桥连晶须轴向与裂纹面法向之间角度的增大而增加的, 如图 2 所示。当晶须桥连轴向与裂纹面法向的夹角 θ 为 0°时, 裂纹尖端主应力 σ_{max} 为最小值, 此时, 拉应力与主应力之间夹角趋近于零, 同时为最小值, 如图 3 所示。而在此状态下, 晶须桥接部位承受了该加载系统中最大的主应力, 这一现象说明架桥晶须耗

① [基金项目] 国家自然科学基金资助项目(5977201)

[收稿日期] 2000- 03- 02; [修订日期] 2000- 08- 02

[作者简介] 朱其芳(1953-), 女, 高级工程师。

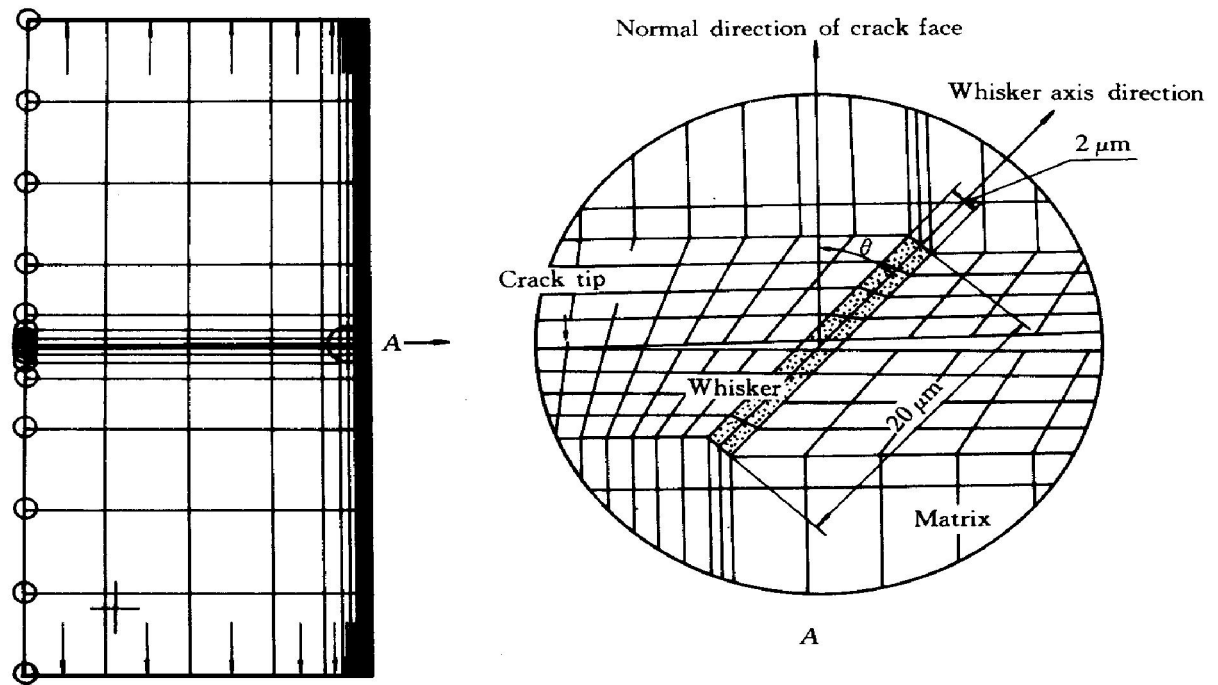


图 1 加载模型网格划分及晶须角度图示

Fig. 1 Graphic representation of loading model, net division and whisker angle

散了较大的能量, 使裂纹尖端基体承受应力数值降低, 降低了裂纹尖端应力强度因子, 相对而言, 即提高了材料的裂纹尖端临界强度因子——断裂韧性^[9, 10]。这种晶须架桥韧化作用, 使在该应力作用下, 无晶须基体中可以扩展的裂纹在这种含有桥连晶须作用的复合材料中停止扩展。如使其继续扩展必须提高外加应力水平, 这样晶须的韧化作用使材料的断裂韧性产生增量。而随着晶须桥连角度的转动, 裂纹尖端基体的主应力逐渐增加, 架桥晶须应力耗散的能力逐渐减弱, 如图 2 所示。

由此表明, 晶须轴向与裂纹面法向夹角越小, 对裂纹尖端应力的分散越有利。

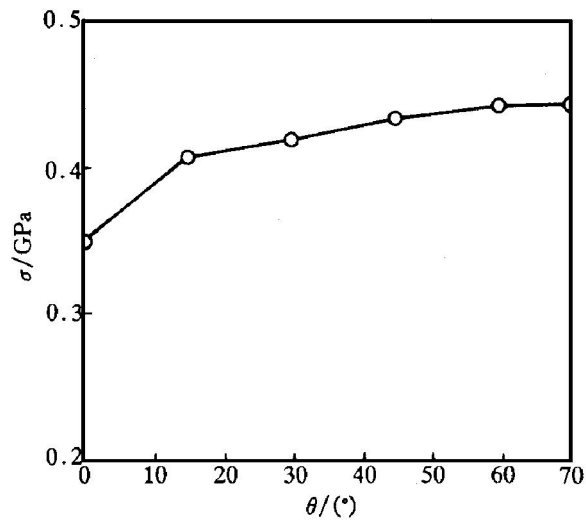


图 2 裂纹尖端主应力随架桥晶须角度变化曲线

Fig. 2 Curve of principle stress in crack tip vs angle of whisker-bridging

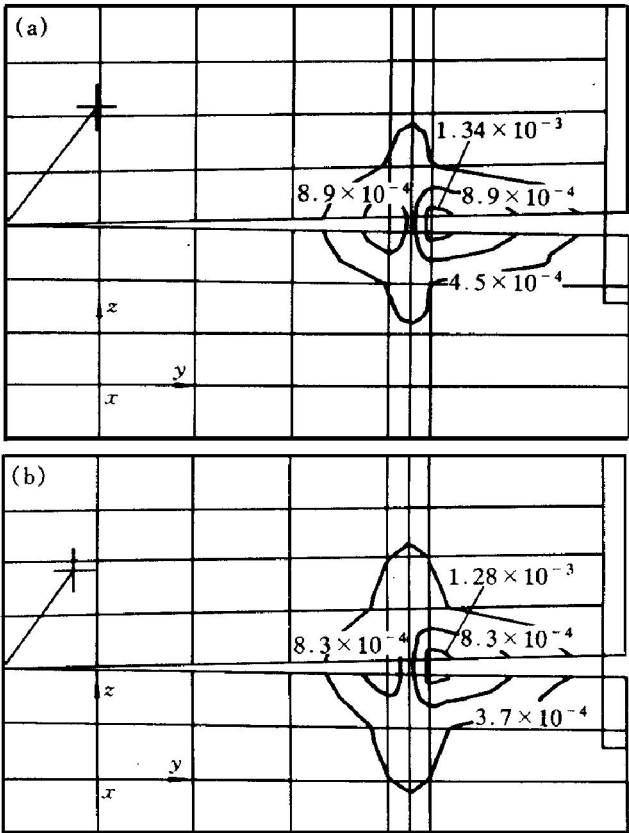


图 3 晶须桥连角度为 0 时加载模型的最大主应力(a)和拉应力(b)分布等值线

Fig. 3 Contour lines of maximum principle stress (a) and tensile stress (b) distribution in loading model when $\theta= 0^\circ$

2.2 晶须桥连角度与晶须内部应力

晶须桥连角度改变时, 晶须内主应力是随着该角度的增加而递减的, 计算结果如图 4 所示。

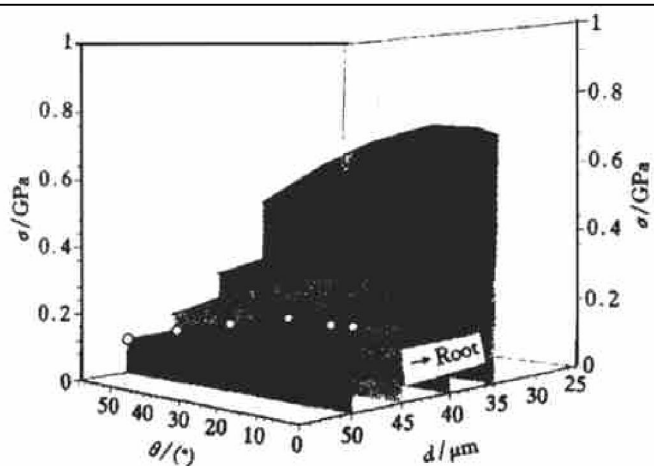


图4 晶须内主应力随桥连角度变化曲线

Fig. 4 Curves of principle stress vs whisker-bridging angle in whiskers

根据本文有限元计算所得应力分布的结果, 晶须内部靠近桥连根部部位的最大主应力 $\sigma_{\max}$ 与桥连角度 θ 有如下关系:

$$\sigma_{\max} \approx 0.000\ 807 - 0.000\ 004\ 65\theta \quad (1)$$

$\sigma_{\max}$ 呈现随晶须角度的增加而下降的趋势。

在晶须增韧陶瓷材料中, 晶须拔出的体积分数 φ_{ap} 与晶须内部轴向的拉应力 σ_{axis} 成正比例, 这是由于晶须拔出将克服晶须周围的与轴向应力相反的摩擦阻力和晶须与基体的粘结力, 关系式可表达如下:

$$\varphi_{\text{ap}} \propto K \sigma_{\text{axis}} \quad (2)$$

式中 φ_{ap} 为晶须拔出的体积分数; K 为正比例系数; σ_{axis} 为晶须内轴向拉应力。

根据本文计算结果可知, 由于桥连角度的变化, 晶须内部最大主应力的方向与晶须轴向之间的角度也在变化, 而且随角度 θ 线性增加, 如图6所示, 其相应关系拟合方程为

$$\alpha = 0.49\theta + 0.53 \quad (3)$$

式中 α 为主应力与晶须轴向夹角, θ 为桥连角度。晶须轴向应力 σ_{axis} 应是晶须内最大主应力 $\sigma_{\max}$ 与晶须轴向夹角 α 的余弦值, 即

$$\sigma_{\text{axis}} = \sigma_{\max} \cos \alpha \quad (4)$$

将式(3)代入式(4), 晶须轴向应力 σ_{axis} 可写成:

$$\sigma_{\text{axis}} = \sigma_{\max} \cos(0.49\theta + 0.53) \quad (5)$$

将晶须桥连角度 θ 与晶须内最大主应力关系式(1)代入关系式(5), 得到:

$$\sigma_{\text{axis}} = (0.000\ 807 - 0.000\ 004\ 65\theta) \cdot \cos(0.49\theta + 0.53) \quad (6)$$

由此可以看出, 晶须轴向的拉力 σ_{axis} 是一个随着角度 θ 在 $0 \sim 60^\circ$ 范围中变化的递减函数, 当桥连

角度增加时晶须轴向应力则减小, 晶须被拔出的可能性也减少了。

将式(6)代入式(2), 得到

$$\varphi_{\text{ap}} \propto K \sigma_{\text{axis}} \approx K (0.000\ 807 - 0.000\ 004\ 65\theta) \cdot \cos(0.49\theta + 0.53) \quad (7)$$

当 θ 在 $0 \sim 60^\circ$ 范围内, 上式可简化为

$$\varphi_{\text{ap}} = -B\theta + C \quad (8)$$

式中 $\theta < C/B$; B , C 均为线性方程系数。

文献[9]给出断裂韧性增量 $\Delta K_{\text{ic}}^{\text{Pa}}$ 与晶须拔出的体积分数 φ_{ap} 有关, 关系式如下:

$$\Delta K_{\text{ic}}^{\text{Pa}} = \frac{(E_c \varphi_{\text{ap}} \tau_{\text{ir}})^{1/2} L_{\text{ap}}}{\gamma} \quad (9)$$

式中 E_c —弹性模量; φ_{ap} —参与拔出晶须体积分数; L_{ap} —晶须拔出长度; τ_{ir} —界面剪切抗力; γ —界面和晶须断裂能。

将式(8)代入式(9)得到

$$\Delta K_{\text{ic}}^{\text{Pa}} = \frac{[E_c(-B\theta + C) \tau_{\text{ir}}]^{1/2} L_{\text{ap}}}{\gamma} \quad (10)$$

从式(10)可以看出, 断裂韧性增量 $\Delta K_{\text{ic}}^{\text{Pa}}$ 是随角度 θ 增加的减函数, 即桥连角度越大, 断裂韧性增量越小。晶须桥连角度增大时, 削弱了裂纹尖端应力耗散效应, 使得晶须的拔出机制减弱, 材料韧性增量不显著。

当晶须桥连角度与裂纹面法向方向角为 0° 时, 晶须内主应力方向与晶须轴线方向基本一致, 与拉应力方向趋近重合, 晶须受到正应力拉伸作用, 且为该应力场中最大值, 如图3所示。由于晶须本身承载能力较高, 不易拉断, 且晶须与基体材料之间存在力学性能的差异, 当晶须与基体界面承受较大剪应力时, 晶须易于拔出而不拉断, 使材料增韧机制增强。图5所示为 SiC 晶须拔出 Si_3N_4 基体的扫描电镜照片。当桥连角度增加时, 晶须内部的主应力方向与晶须轴向的夹角 α 同时在变化, 且随桥连角度的增大而增大, 如图6所示。当晶须内部主应力方向与晶须轴向存在角度 α 时, 晶须内主应力 $\sigma_{\max}$ 可分解出对晶须产生弯曲作用的垂直于轴向的应力分量。晶须上每一区域 Δl 对于晶须桥连根部产生的弯矩 ΔM 可用下式表示:

$$\Delta M = \sigma_{\max} \sin \alpha \cdot \Delta l$$

式中 α 为晶须内部主应力方向与晶须轴向之间的夹角; $\sigma_{\max}$ 为晶须内部最大主应力, Δl 为晶须上不同位置与晶须根部的距离。

从上式可知, 角度 α 越大, 产生的弯矩越大, 引起晶须折断的可能性也越大。晶须折断将导致材料韧性降低(见图7)。此外, 轴向应力分量还将对

晶须/基体界面产生压力, 不利于晶须拔出。

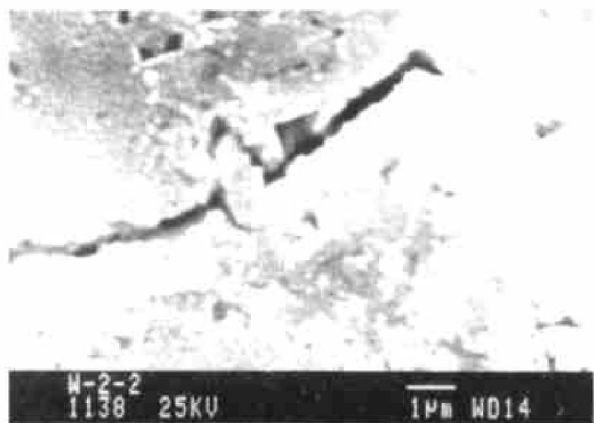


图 5 SiC 晶须拔出 Si₃N₄ 基体的 SEM

Fig. 5 SEM of SiC whisker pulled out from Si₃N₄ matrix

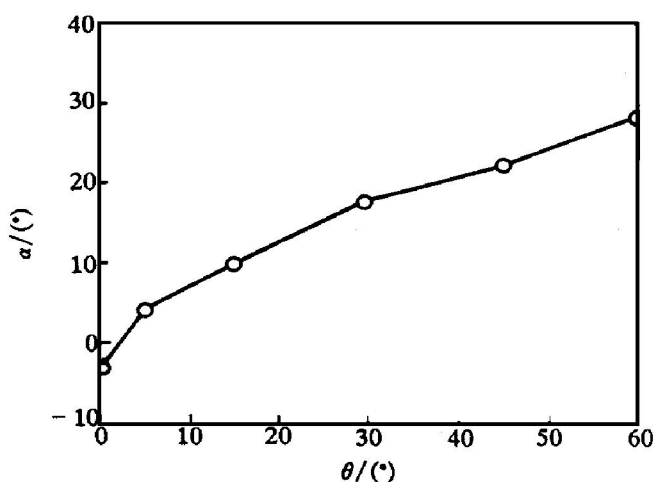


图 6 主应力方向与晶须轴向之间角度 α 随桥连角度 θ 变化曲线

Fig. 6 Curve of angle (α) between principle stress direction and whisker axis direction vs whisker-bridging angle (θ)

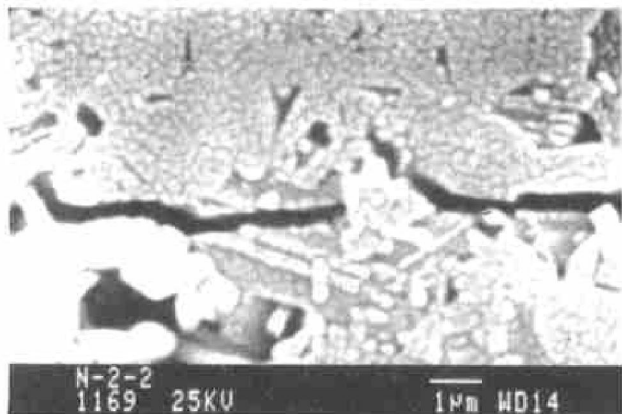


图 7 SiC 晶须折断的 SEM

Fig. 7 SEM of broken SiC whisker

2.3 晶须桥连角度对晶须周围基体的影响

当晶须与裂纹面法向角度 θ 为 0° 时, 晶须周围基体的应力场较弱, 但是随着角度 θ 的增加, 应力作用越明显, 如图 8 所示。

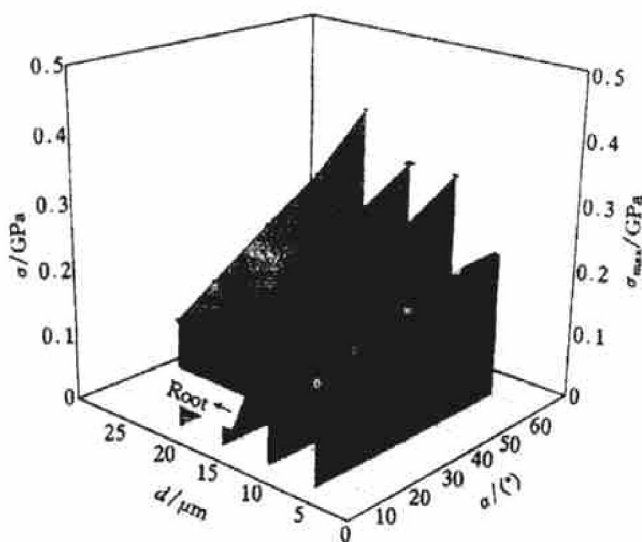


图 8 晶须根部附近基体内主应力随桥连角度 α 变化曲线

Fig. 8 Curves of principle stress in matrix around whisker roots vs whisker-bridging angle (α)

晶须基体根部附近的 Si₃N₄ 基体的应力随着角度的改变而急剧变化, 由于基体的承载能力较低, 当角度变化导致基体应力水平增加, 达到基体断裂应力时, 则引起基体损伤, 导致崩裂而终止晶须桥接, 这种现象在承载过程中时有发生, 说明角度对晶须根部基体有明显效应。晶须轴向与裂纹面法向夹角越小, 晶须根部基体趋于稳定。

以上分析表明, 晶须与断裂面法线角度 θ 为 0° 时, 对晶须根部基体的破坏性最小。

3 结论

在承受 I 型载荷下, 当添加了 SiC 晶须和不连续细长相的 Si₃N₄ 陶瓷复合材料的晶须添加角度垂直于裂纹平面时, 由于晶须与架桥作用而引起较大能量耗散, 断裂尖端的应力值最小, 晶须本身受到与晶须轴同向的最大正拉应力, 使晶须拔出的可能性增加, 加强了增韧效应。当晶须添加方向与裂纹面法向的角度增加时, 晶须内主应力方向与晶须轴向方向夹角增大, 减小了晶须拔出的可能性, 同时作用在晶须上的弯矩增加, 也将会引起晶须折断,

削减了增韧效应。角度增加也使得晶须根部基体应力水平升高,引起基体损伤,终止晶须桥连。可以认为,晶须桥连角度与裂纹面法向角度越小,对基体陶瓷材料的增韧效果越明显。

[REFERENCES]

- [1] LI Cherrwei, LUI Siurching and Goldackor J. Relation between strength, microstructure, and grain-bridging characteristics in in-situ reinforced silicon nitride [J]. J Am Ceram Soc, 1995, 78(2): 449.
- [2] Evans A G. Fiber Rienforced Ceramic Composites [M]. New Jersey, 1990.
- [3] Steinbrech R W. Fracture Mechanics of Ceramics(Vol. 9) [M]. New York: PlPenum Press, 1992.
- [4] ZHAI Hong-xiang(翟洪祥), WANG Chang-an(汪长安) and HUANG Yong(黄勇). 不连续细长相定向增强 CMCS 的增韧效果 [J]. Gaojishu Tongxun(高技术通讯), 1997, 4: 11- 15.
- [5] ZHOU Yu(周 玉), SONG Gu-ming(宋桂明), WANG Yu-jin(王玉金), et al. TiC_p/W 复合材料的断裂行为 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1999, 9(Suppl. 1): 158- 165.
- [6] LIU Yue(刘 越), LI Hu-li(李会莉), ZHAI Yu-chun(翟玉春), et al. 晶须增强铝锌合金复合材料拉伸断口分形 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1999, 9(1): 97- 100.
- [7] LU Wei-jie(吕维洁), ZHANG Xiao-nong(张小农), ZHANG Di(张 荻), et al. 原位合成 TiC 和 TiB 增强钛基复合材料的微观结构与力学性能 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 2000, 10(2): 163- 169.
- [8] ZHAI Hong-xiang(翟洪祥), WANG Chang-an(汪长安) and HUANG Yong(黄勇). 陶瓷基体中不连续细长相的增韧机制与方位角效应 [J]. Gaojishu Tongxun(高技术通讯), 1997, 5: 26- 31.
- [9] ZHOU Yu(周玉). Ceramic Material(陶瓷材料学) [M]. Harbin: Harbin Institute University Press, 1995. 303.
- [10] Becher P F. Microstructural design of toughened ceramics [J]. J Am Ceram Soc, 1991, 74: 225.

Reinforcing effect of orderly additive orientation of SiC whisker in Si₃N₄ ceramic matrix

ZHU Qi-fang¹, YAO Wei¹, SUN Li-hong¹, WANG Ru-kun¹, DONG Li-min², ZHANG Bao-qing²

(1. General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, P. R. China;

2. Department of Materials, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China)

[Abstract] The effect of additive orientation of SiC whisker was studied, the stress redistribution caused by whisker-bridging orientation was analyzed by finite element method, and the stress-strain fields in zone of crack end with whisker were obtained at different additive orientations in Si₃N₄ ceramic material. When the specimen was loaded by I type, analysis results showed that the tensile stress in crack end and the main stress in whisker depended directly on the angle θ (angle between whisker axis and normal line of crack face). If $\theta = 0^\circ$, it means that whisker axis is perpendicular to crack face, the energy dissipation caused by whisker-bridge join in zone of crack end achieves its maximum and the reintoughening effect of material achieves the best of all; along with growth of angle θ , the maximum principal stress in the matrix of whisker roots increases, when it achieves its limit, the whisker will be broken and orientation effect will be weakened.

[Key words] SiC whisker; Si₃N₄; bridge join; additive orientation; reintoughening mechanism

(编辑 何学锋)