

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2023.03.015

显微组织对 Si₃N₄ 陶瓷基板热导率的影响

代思远^{1,2}, 陈松^{1,2}, 孙峰³, 王再义³, 林燕^{1,2}, 张伟儒^{3,4}, 王卫国^{1,2}

- (1. 福建工程学院 晶界工程研究所, 福建 福州 350118;
2. 福建工程学院 材料科学与工程学院, 福建 福州 350118;
3. 中材高新氮化物陶瓷有限公司, 山东 淄博 255022;
4. 中材高新材料股份有限公司, 北京 100021)

摘要: 采用电子背散射衍射、晶界面分布五参数分析和激光闪射等方法研究了国外生产的 3 种商用 Si₃N₄ 陶瓷基板的显微组织和热导率。结果表明, 烧结助剂含量较低、平均晶粒尺寸较大且 $\{h\ k\ -(h+k)\ 0\} // ND$ 丝织构较强的基板, ND 为基板板面法向, 其面内热导率较高; 反之亦然。3 种 Si₃N₄ 陶瓷基板的晶界取向差分布虽总体符合随机分布, 但在取向差转角为 180° 位置明显偏离随机分布, 这部分晶界的旋转轴以 $\langle 1\ 1\ -2\ 0 \rangle$ 和 $\langle 1\ 0\ -1\ 0 \rangle$ 为主, 分别为 $\Sigma 3$ 和 $\Sigma 2$ 晶界, 其晶界面分布和晶界面匹配在 3 种基板中存在明显差异, 但是由于这类晶界占总晶界的比例在 3 种基板中均不超过 0.5%, 尚不能对热导率产生明显影响。

关键词: Si₃N₄ 陶瓷基板; 电子背散射衍射; 显微组织; 导热性能

中图分类号: TQ174.75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2023)03-0293-08

Effects of microstructure on thermal conductivity of Si₃N₄ ceramic substrate

DAI Siyuan^{1, 2}, CHEN Song^{1, 2}, SUN Feng³, WANG Zaiyi³,
LIN Yan^{1, 2}, ZHANG Weiru^{3, 4}, WANG Weiguo^{1, 2}

- (1. Institute of Grain Boundary Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, 350118, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
3. Sinoma Advanced Nitride Ceramics Co., Ltd., Sinoma Group, Zibo 255022, China;
4. Sinoma Hi-Tech Materials Co., Ltd., Sinoma Group, Beijing 100021, China)

Abstract: The microstructure and thermal conductivity of three commercial Si₃N₄ ceramic substrates made abroad were investigated by using electron backscatter diffraction, five parameter analysis and laser flash method. Results show that the substrates with lower sintering aid content, larger average grain size and stronger $\{h\ k\ -(h+k)\ 0\} // ND$ fiber texture have higher in-plane thermal conductivity when ND is in the normal direction to the substrate surface, and vice versa. Although the misorientation distribution of the three Si₃N₄ ceramic substrates generally accords with the random distribution, it obviously deviates from the random distribution when the rotation angle is 180°. These grain boundaries are basically those having $\langle 1\ 1\ -2\ 0 \rangle$ and $\langle 1\ 0\ -1\ 0 \rangle$ rotation axis, corresponding to $\Sigma 3$ and $\Sigma 2$ boundaries respectively. The grain boundary distribution and grain boundary interface matching are significantly different in the three substrates, but their effects on the thermal conductivity are negligible because of their very low frequencies which are generally lower than 0.5% out of the entire grain boundaries.

Keywords: Si₃N₄ ceramic substrates; electron backscatter diffraction; microstructure; thermal conductivity

收稿日期: 2023-02-10

基金项目: 中国建材集团原创技术策源地及关键核心技术“揭榜挂帅”项目资助(2021HX2021)

第一作者简介: 代思远(1998—), 男, 四川眉山人, 硕士研究生, 研究方向: 无机非金属材料晶界工程。

通信作者: 王卫国(1965—), 男, 山西忻州人, 教授, 博士, 研究方向: 金属和无机非金属材料晶界工程。

Si_3N_4 具有 3 种结晶结构,分别为 α 相、 β 相和 γ 相,均属于六方晶系^[1]。经过流延成型和高温烧结后, β - Si_3N_4 是 Si_3N_4 陶瓷基板的最常见形态。由于固定在基板上的半导体电子元器件在正常工作时会产生大量热,要求基板材料本身具有较高的热导率。早在 1995 年,Haggerty 和 Lightfoot^[2]曾预测 β - Si_3N_4 的理论热导率可以达到 200~320 W/(m·K)。张景贤等人^[3]采用高纯 Si 粉作为起始原料,通过流延成型、氮化和气压烧结工艺制备热导率达到 76 W/(m·K)的导热 Si_3N_4 陶瓷基片。Lee 等人^[4]采用热压烧结对氧化物和非氧化物烧结添加剂进行了对比研究,含有非氧化物烧结添加剂的陶瓷在保持弯曲强度的同时导热率也得到提高,其弯曲强度为 862 MPa,导热率为 101.5 W/(m·K)。因此,如何显著提高热导率已成为 Si_3N_4 陶瓷基板材料研究的重点。王为得^[5]通过掺杂 YbH_2 使得 Si_3N_4 晶粒尺寸变大,晶间相减少,提高了 Si_3N_4 陶瓷的热导率。赵明亮^[6]通过设计控制晶界特征分布,为提高 Si_3N_4 材料的高温力学性能和高周疲劳性能提供理论基础。

基于此,同时考虑到国内在 Si_3N_4 陶瓷基板研究方面起步较晚,与欧美、特别是与日本等国家之间存在明显差距,国内相关行业、特别是高端制造业所用 Si_3N_4 陶瓷基板主要依赖进口,本文将研究国外生产的 3 种商用 Si_3N_4 陶瓷基板的显微组织及其与热导率的相关性,相关研究结果可以为国产高品质 Si_3N_4 陶瓷基板的研究和开发提供参考。

1 实验过程

选用国外生产的 3 种商用 Si_3N_4 陶瓷基板为研究对象,并分别命名为样品 1、样品 2 和样品 3。3 个样品的厚度均为 0.32 mm,均以 Al_2O_3 和 Y_2O_3 作为烧结助剂。首先,利用 STX-202A 金刚石线切割机将大片 Si_3N_4 基板样品分割成 10 mm×10 mm 小片样品;采用 Leica EM TXP 精研一体机对样品表面进行研磨,磨布粒度由粗到细(15, 9, 2, 0.5 μm)。最后依次使用粒度分别为 0.05、0.02 μm 的 SiO_2 悬浮抛光液对研磨后的样品进行机械抛光处理、超声清洗并干燥后备用。

将抛光好的样品置入配有环形背散射

(circular back scatter, CBS) 电子探测器和 Oxford-Aztex 电子背散射衍射仪(electron back scatter diffraction, EBSD)等附件的 FEI NavoSEM-450 场发射扫描电镜(field emission scanning electron microscopy, FESEM)完成显微组织观察分析和 EBSD 测试。EBSD 测试参数为:加速电压 15 kV,束斑大小 5.5,工作距离 10~12 mm,步长为 0.1 μm ,测试区域 30 μm ×30 μm ;为确保数据具有统计代表性,每个样品均需测试多个区域,保证采集到的晶界数量超过 50 000 条。

采用 EBSD 处理软件对原始数据进行处理,以获得全欧拉角图(all Euler angle, AEA)、取向成像显微图(orientation imaging microscopy, OIM)、晶界网络图(grain boundary network, GBN)、取向差分布图(misorientation distribution, MD)和反极图(inverse pole figure, IPF)。IPF 是通过合并多个测试区域的数据并进行相关计算后得出的,可给出宏观织构信息。利用 EDAX-OIM-7.1 软件完成晶界重构和提取,利用自编程序专用软件进行固定取向差晶界过滤,即对其轴角对特征进行过滤,先进行以旋转轴为特征的轴过滤(偏差为 $\pm 5^\circ$),再对轴过滤后的晶界进行以旋转角为特征的角度过滤(偏差为 $\pm 2.5^\circ$),采用 Rohrer^[7]基于体视学原理的单一界面五参数分析法(five parameter analysis, FPA)对提取和过滤出来的晶界进行晶界面分布(grain boundary plane distribution, GBPD)统计,以晶界面随机分布强度的倍数(multiple of random distribution, MRD)表示 GBPD 的实际分布强度;为了方便分析,GBPD 均极射赤面投影在(0 0 0 1)基面内。针对特定取向差晶界,基于 GBPD 结果,对其晶界面匹配(grain boundary inter-connection, GBIC)^[8]进行分析。

采用直径 20 mm 的圆片样品,利用 LFA467 HyperFlash 热导仪的激光闪射法测定上述 3 种 Si_3N_4 陶瓷基板样品的面内热扩散率 a 和等压比热 c_p ,并通过公式(1)求得面内热导率 λ ,即

$$\lambda = \rho \times c_p \times a \quad (1)$$

式中: ρ 为密度,因为 3 个样品均为烧结后高致密态,统一取值 3.3 g/cm³。测试温度分别取 20、85 和 150 $^\circ\text{C}$,每个温度点测 4 次取平均值,测试过程 N_2 气氛保护。

2 结果

2.1 显微组织

图1为3个样品的CBS电子显微组织,其中A所指灰色衬度区域为β-Si₃N₄,B所指深灰色或黑色衬度区域是样品经精研一体机抛光处理过程中烧结助剂脱落自然形成的空洞,表明烧结助剂与Si₃N₄基体结合并不紧密。利用Image Pro Plus

软件对多幅CBS图像进行衬度分析和统计,可获得各样品中β-Si₃N₄和烧结助剂两种物相的面积。依据体视学原理,用二维测量获得的各物相的面积百分比代表三维实体中的体积百分比,得到样品1、样品2和样品3中烧结助剂添加量分别为6.85%、6.69%和10.37%,即样品3中烧结助剂添加量显著高于样品1和样品2。

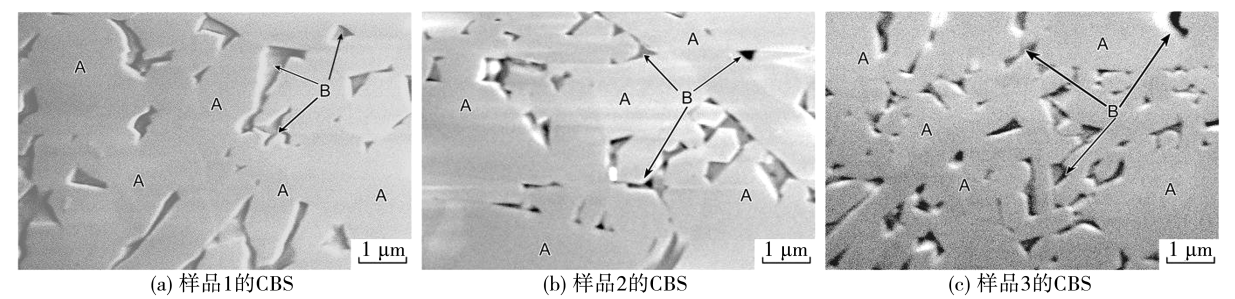
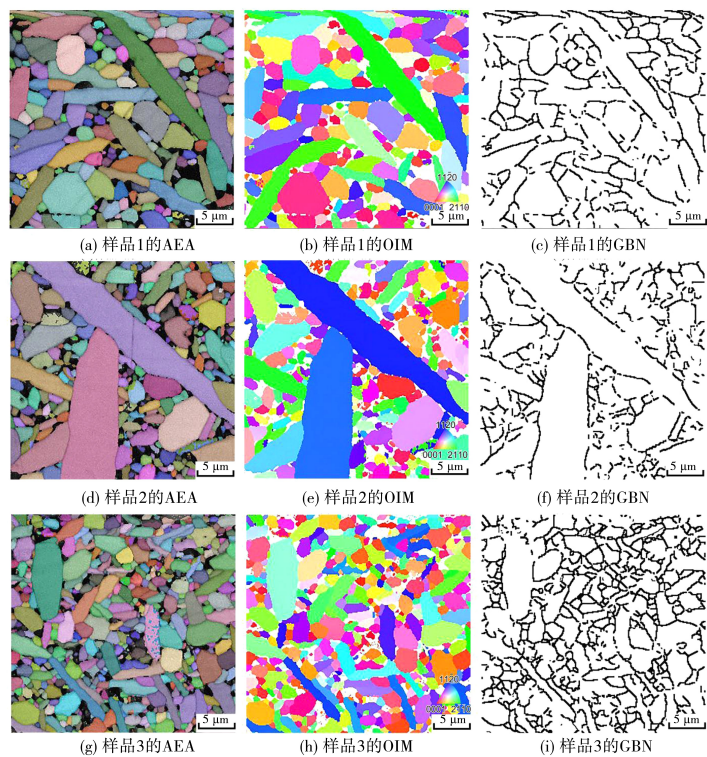


图1 3种 Si₃N₄ 陶瓷基板样品的环形背散射 (CBS) 电子显微组织

Fig.1 Circular back scatter (CBS) electron microscopies of the three Si₃N₄ ceramic substrates

图2为3个样品的EBSD显微组织。可以看出,3个样品中的β-Si₃N₄晶粒均为长棒状(测试面内近似为等轴状的晶粒,其长度方向平行于测试

面法向),晶粒大小不一,其平均晶粒尺寸存在明显差异,即样品1和样品2的平均晶粒尺寸均约为2 μm,而样品3的平均晶粒尺寸约为1.5 μm。



注:AEA图中黑色区域和OIM图中白色区域皆为无法标定的烧结助剂相

图2 3种 Si₃N₄ 陶瓷基板的EBSD显微组织

Fig.2 EBSD microstructure of the three Si₃N₄ ceramic substrates

图 3 为 3 个样品的反极图,其中 LD、TD 和 ND 分别为基板的长度方向、横向和板面法向。可看出,虽然 3 个样品中均出现 $[0\ 0\ 0\ 1]//$ TD 和 $[1\ 0\ -1\ 0]$ 或 $[1\ 1\ -2\ 0]//$ ND 的丝织构,但是样品 1 和样品 2 中的织构强度明显

高于样品 3,表明样品 1 和样品 2 中有更多的晶粒其 $[1\ 0\ -1\ 0]$ 柱面或 $[1\ 1\ -2\ 0]$ 柱面与基板板面平行,即更多晶粒的 $[0\ 0\ 0\ 1]$ 基极方向“平躺在”基板板面内。

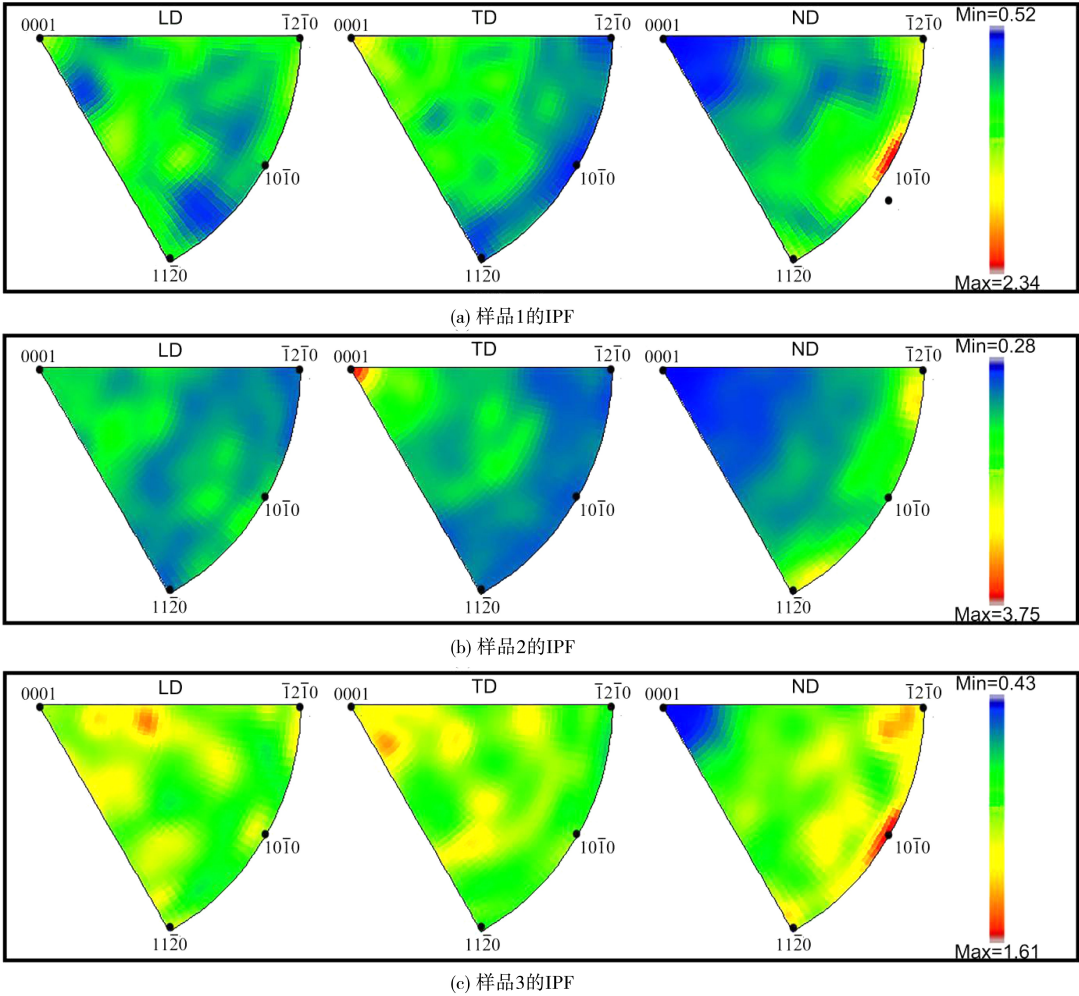


图 3 3 种 Si_3N_4 陶瓷基板的反极图 (IPF)

Fig.3 Inverse pole figures of the three Si_3N_4 ceramic substrates

图 4 为 3 个样品的取向差分布 (MD)、所有晶界 (全谱) 的晶界面分布 (GBPD) 和晶界旋转轴分布。可以看出,尽管 3 个样品的 MD 均基本符合随机分布 (图 4(a)、4(d) 和 4(g) 中黑色箭头所指曲线),但是均在旋转角为 180° 处明显偏离随机分布 (图 4(a)、4(d) 和 4(g) 中红色箭头所指位置); 3 个样品的 GBPD 均以 $\{1\ 0\ -1\ 0\}$ 柱面分布为主 (图 4(b)、4(e) 和 4(h)); 对上述轴过滤出来的晶界进行归一化处理,发现 3 个样品的晶界旋转轴主要为 $\langle -1\ 2\ -1\ 0 \rangle$ 、 $\langle 0\ 1\ -1\ 0 \rangle$ 、 $\langle 2\ 1\ -3\ 0 \rangle$ 、 $\langle 1\ 2\ -3\ 0 \rangle$ 、 $\langle -1\ 5\ -4\ 0 \rangle$ 及 $\langle 5\ -1\ -4\ 0 \rangle$ 6 个转轴,以这 6 个晶

轴为旋转轴的晶界占到所有轴过滤出来晶界的近 70% (图 4(c)(f)(i))。对具有上述 6 个主要旋转轴的晶界进行角度过滤后得知,旋转角为 180° 的晶界,其旋转轴主要为 $\langle 1\ 1\ -2\ 0 \rangle$ 和 $\langle 1\ 0\ -1\ 0 \rangle$ (图 5),分别为 $\Sigma 3$ 和 $\Sigma 2$ 晶界^[8],图 6 和图 7 为 $\Sigma 3$ 和 $\Sigma 2$ GBPD 及晶界 GBIC 图。对于 $\Sigma 3$ 晶界,样品 1 存在 $\{0\ 0\ 0\ 1\} // \{0\ 0\ 0\ 1\}$ 和 $\{0\ 1\ -1\ 1\} // \{0\ 1\ -1\ 1\}$ 两种 GBIC (图 6(d)); 样品 2 存在 $\{-7\ 2\ 5\ 0\} // \{-7\ 2\ 5\ 0\}$ 一种 GBIC (图 6(e)); 样品 3 存在 $\{-2\ 1\ -3\ 0\} // \{-2\ 1\ -3\ 0\}$ 一种 GBIC (图 6(f))。

$1\ 1\ 0\}/\{-2\ 1\ 1\ 0\}$ 和 $1\ 0\ -1\ 0\}/\{1\ 0\ -1\ 0\}$ 两种 GBIC(图 6(f))。对于 $\Sigma 2$ 晶界,样品 1 存在 $\{-2\ 1\ 1\ 2\}/\{-2\ 1\ 1\ 2\}$ 一种 GBIC(图 7(d));样品 2 存在 $\{-2\ 1\ 1\ 2\}/\{-2\ 1\ 1\ 2\}$ 一种 GBIC(图 7(e));样品 3 存在 $\{-15\ 15\ 0\ 1\}/\{-15\ 0\ 15\ 1\}$ 一种

GBIC(图 7(f))。为了简洁,图 6(d)只给出 $0\ 1\ -1\ 1\}/\{0\ 1\ -1\ 1\}$ 多个等同 GBIC 中的一个,即 $(0\ 1\ -1\ 1)/(1\ -1\ 0\ 1)$ 的旋转操作,类似的情形也在图 6(e)(f)、图 7(d)(e)(f)中存在。

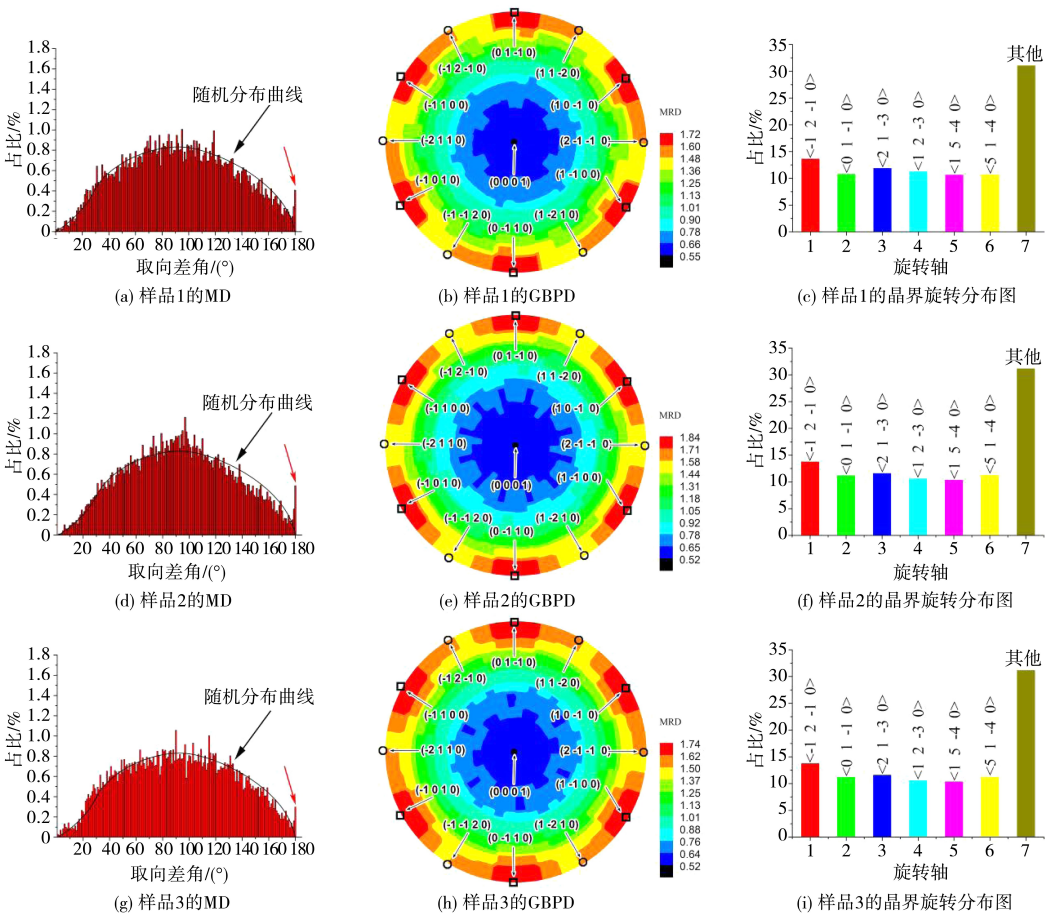


图 4 3 种 Si₃N₄ 陶瓷基板的晶界取向差分布 (MD) (a, d, g)、全谱晶界面分布 (GBPD) (b, e, h) 和晶界旋转轴分布 (c, f, i)

Fig.4 Misorientation distribution (a, d, g), grain boundary plane distribution (b, e, h) and grain boundary rotation axis distribution (c, f, i) of the three Si₃N₄ ceramic substrates

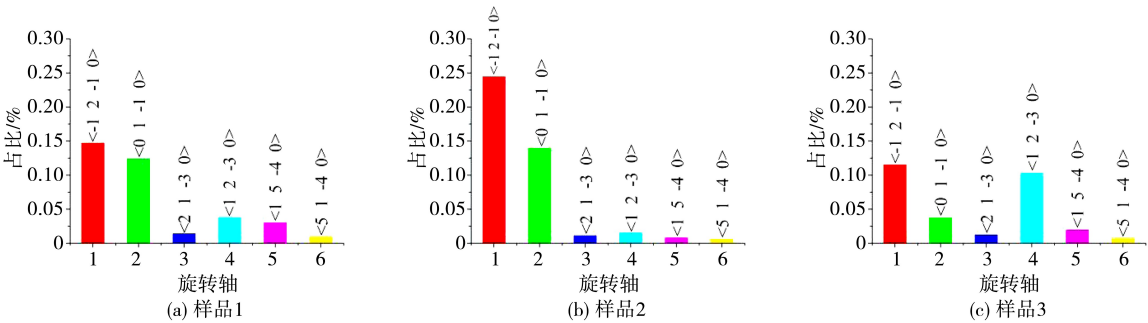


图 5 3 种 Si₃N₄ 陶瓷基板中旋转角为 180°晶界的旋转轴分布

Fig.5 Rotation axis distributions of the grain boundaries with rotation angle of 180° in the three Si₃N₄ ceramic substrates

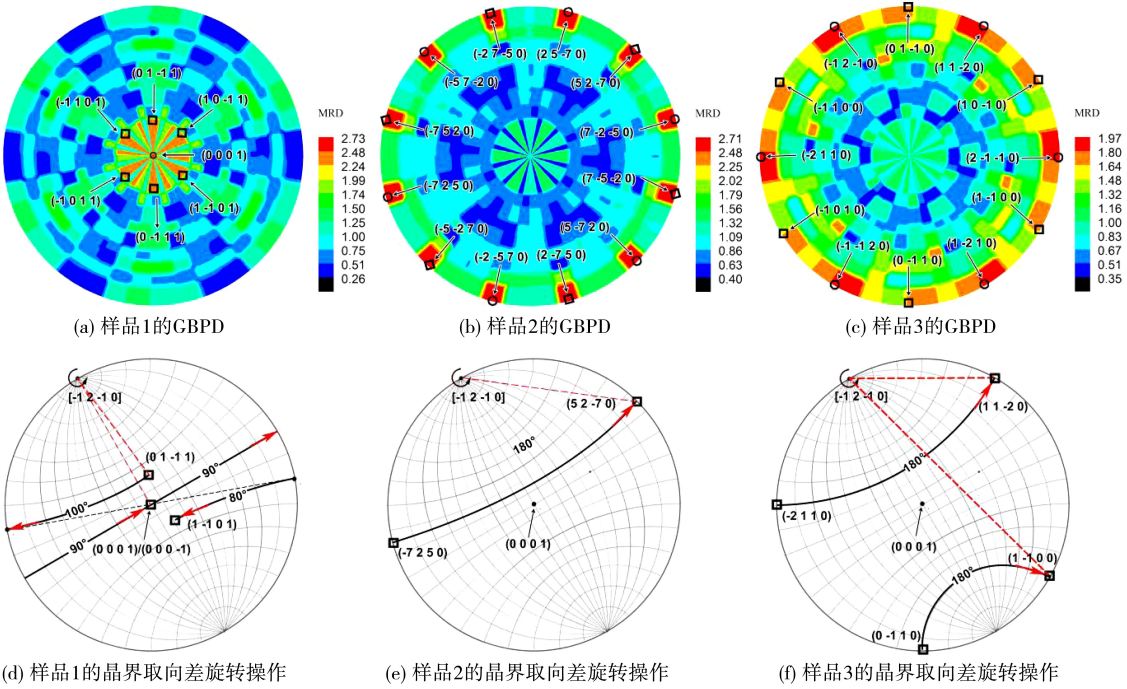


图 6 3 种 Si_3N_4 陶瓷基板中取向差为 $\langle 1 \ 1 \ -2 \ 0 \rangle / 180^\circ (\Sigma 3)$ 晶界的晶界面分布 (GBPD) (a, b, c) 和晶界取向差旋转操作 (d, e, f)

Fig.6 Grain boundary plane distributions (a, b, c) and the misorientation operations (d, e, f) of the $[1 \ 1 \ -2 \ 0] / 180^\circ (\Sigma 3)$ boundaries in the three Si_3N_4 ceramic substrates

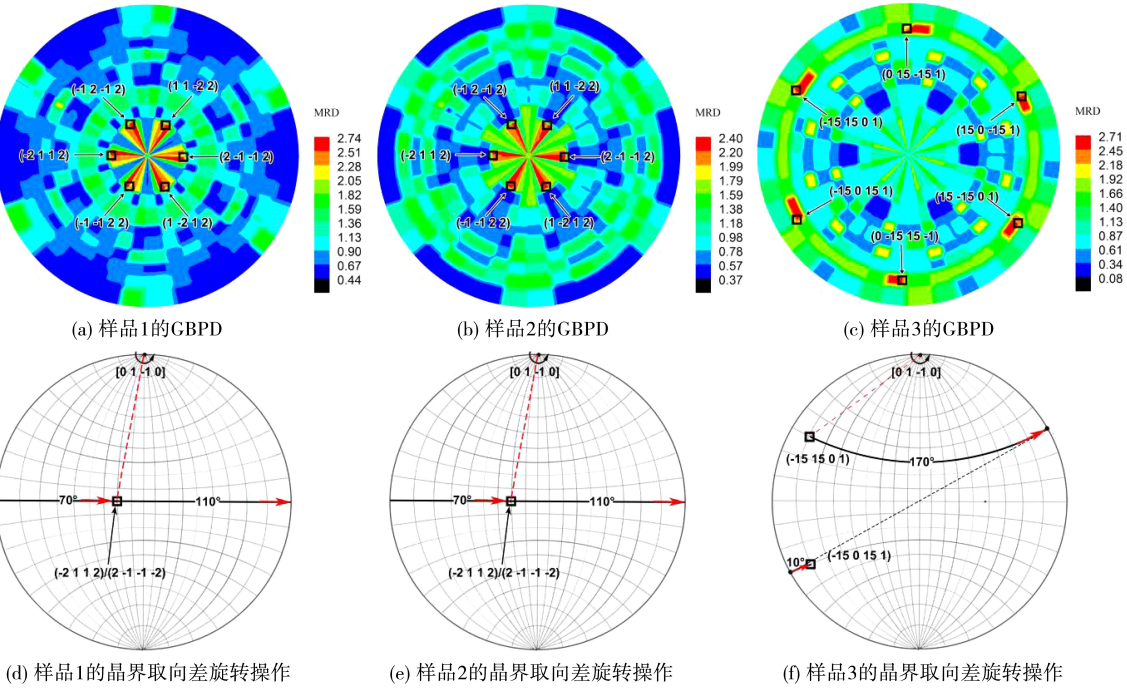


图 7 3 种 Si_3N_4 陶瓷基板中取向差为 $\langle 1 \ 0 \ -1 \ 0 \rangle / 180^\circ (\Sigma 2)$ 晶界的晶界面分布 (GBPD) (a, b, c) 和晶界取向差旋转操作 (d, e, f)

Fig.7 Grain boundary plane distributions (a, b, c) and the misorientation operations (d, e, f) of the $[1 \ 1 \ -2 \ 0] / 180^\circ (\Sigma 2)$ boundaries in the three Si_3N_4 ceramic substrates

2.2 热导率

表 1 为利用激光闪射法测得的 3 种 Si₃N₄ 陶瓷基板的热导率,从表中可看出,随着温度的升

高,3 个样品的热导率均明显下降;在相同温度下,样品 1 和样品 2 的热导率明显高于样品 3。

表 1 利用激光闪射法测定的 3 种 Si₃N₄ 陶瓷基板的热导率
Tab.1 Thermal conductivity of the three Si₃N₄ ceramic substrates

T/K	样品 1			样品 2			样品 3		
	$c_p/(J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1})$	$a/(mm^2 \cdot s^{-1})$	$\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$c_p/(J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1})$	$a/(mm^2 \cdot s^{-1})$	$\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$c_p/(J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1})$	$a/(mm^2 \cdot s^{-1})$	$\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
293	0.58	39.0	74.6	0.60	38.1	75.4	0.59	34.4	67.0
358	0.69	28.9	65.8	0.70	27.4	63.3	0.69	24.7	56.2
423	0.76	22.6	56.7	0.77	20.9	53.1	0.75	18.9	46.8

3 讨论

烧结助剂的导热性能远不如 Si₃N₄ 陶瓷基体,增加烧结助剂含量会降低 Si₃N₄ 陶瓷基板的热导率。与样品 1 和样品 2 相比,样品 3 的烧结助剂含量明显偏高(图 1),这是其热导率明显偏低(表 1)的原因之一。平均晶粒尺寸越小,则单位体积内界面密度越高,界面对声子散射越严重,热导率越低。样品 3 的平均晶粒尺寸比样品 1 和样品 2 明显偏小(图 2),这是其热导率明显偏低的另一原因。

Hirosaki 等人^[9]发现 Si₃N₄ 陶瓷单晶体的热导率存在各向异性,沿任意方向 x 的热导率 $\lambda_x(T)$ 可通过公式(2)求得

$$\lambda_x(T) = \frac{1}{k \cdot V \cdot T^2} \int_0^\infty \langle S_x(0) S_x(t) \rangle dt \quad (2)$$

其中, k 为玻尔兹曼常数, J/K; V 为系统的体积, nm³; T 为系统的温度, K; t 为传导时间, s; S_x 为沿 x 方向的热流矢量, J/s。β-Si₃N₄ 单晶晶胞参数: $a=b=0.760\ 8\ nm, c=0.291\ 0\ nm$, 单位时间内通过各单位面积的热能,在 a 轴向的损耗比 c 轴向的损耗高,所以热流密度 $S_a<S_c$, 因此, a 轴向的热导率 $\lambda_a(T)$ 要比 c 轴向的热导率 $\lambda_c(T)$ 低。相关计算结果表明,室温条件下,β-Si₃N₄ 单晶的 a 轴向热导率约为 $170\ W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, c 轴向热导率约为 $450\ W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ 。与样品 1 和样品 2 相比,样品 3 具有更弱的 $\{h\ k\ -(h+k)\ 0\} // ND$ 的丝织构(图 3),更少的晶粒具有 $\langle 0\ 0\ 0\ 1 \rangle$ 基极或 c 轴“平躺”于板面内的取向,这是其热导率明显

偏低的又一原因。

图 4 的结果显示,全谱晶界取向分布图总体上相近,晶界取向差分布图均呈现随机分布。由图 5~图 7 所确定的 $\Sigma 3$ 和 $\Sigma 2$ 晶界,其 GBIC 在 3 个样品中存在明显差异。依据赵明亮等人^[6]的分析,具有不同 GBIC 的 $\Sigma 3$ 和 $\Sigma 2$ 晶界,其界面上的重合阵点密度不同,结构有序度存在明显差异,对热导率应存在重要影响。但是,由于本次分析的 3 个样品中, $\Sigma 3$ 和 $\Sigma 2$ 晶界的比例均不超过 0.5%(图 4(a)(d)(g)), 它们对热导率的影响可忽略不计。无论如何,诸如那些具有 $\{1\ 0\ -1\ 0\} // \{1\ 0\ -1\ 0\}$ 和 $\{0\ 0\ 0\ 1\} // \{0\ 0\ 0\ 1\}$ GBIC 特征的 $\Sigma 3$ 和 $\Sigma 2$ 晶界,由于其具有很高的面重合阵点密度,结构有序度很高,是 Si₃N₄ 陶瓷中的特殊晶界,大幅提高此类晶界的比例将有望显著提升 Si₃N₄ 陶瓷基板的热导率。

4 结论

- 1) 显微组织结构对 Si₃N₄ 陶瓷基板的热导率有重要影响,特别是晶粒大小,平均晶粒尺寸越大,其面内热导率越高;同种烧结助剂,添加量越低,其面内热导率越高。
- 2) 存在 $\{h\ k\ -(h+k)\ 0\} // ND$ 丝织构(ND 基板板面法向)的基板,织构强度越高,其面内热导率越高。
- 3) 通过调控晶界特征分布,特别是提升具有 $\{1\ 0\ -1\ 0\} // \{1\ 0\ -1\ 0\}$ 和 $\{0\ 0\ 0\ 1\} // \{0\ 0\ 0\ 1\}$ 界面特征的 $\Sigma 3$ 和 $\Sigma 2$ 晶界,有望进一步提升 Si₃N₄ 陶瓷基板的热导率。

参考文献:

- [1] 廖圣俊,周立娟,尹凯俐,等. 高导热氮化硅陶瓷基板研究现状[J]. 材料导报,2020,34(21):21105-21114.
- [2] HAGGERTY J S,LIGHTFOOT A. Opportunities for enhancing the thermal conductivities of SiC and Si₃N₄ ceramics through improved processing[M] // Ceramic Engineering and Science Proceedings. Hoboken,NJ,USA: John Wiley & Sons, Inc., 2008:475-487.
- [3] 张景贤,段于森,江东亮,等. 高导热 Si₃N₄ 陶瓷基片材料的制备研究[J]. 真空电子技术,2016(5):7-10.
- [4] LEE H M,LEE E B,KIM D L,et al. Comparative study of oxide and non-oxide additives in high thermal conductive and high strength Si₃N₄ ceramics[J]. Ceramics International,2016,42(15):17466-17471.
- [5] 王为得,陈寰贝,李世帅,等. 以 YbH₂-MgO 体系为烧结助剂制备高热导率高强度氮化硅陶瓷[J]. 无机材料学报,2021,36(9):959-966.
- [6] 赵明亮,陈松,孙峰,等. Si₃N₄ 陶瓷材料晶界特征分布研究[J]. 物理学报,2021,70(22):254-265.
- [7] BELADI H,GHADERI A,ROHRER G S. Five-parameter grain boundary characterisation of randomly textured AZ31 Mg alloy[J]. Philosophical Magazine,2020,100(4):456-466.
- [8] WANG WG,CAI C H,ROHRER G S,et al. Grain boundary inter-connections in polycrystalline aluminum with random orientation[J]. Materials Characterization,2018,144:411-423.
- [9] HIROSAKI N, OGATA S, KOCER C, et al. Molecular dynamics calculation of the ideal thermal conductivity of single-crystal α - and β -Si₃N₄[J]. Physical Review B, 2002, 65(13): 134110.

(责任编辑:陈雯)

(上接第 287 页)

- [6] 刘文涛,张容畅,董雨欣,等. 一种新型算法在光伏最大功率跟踪中应用[J]. 电测与仪表,2018,55(1):72-77.
- [7] 孙以泽,彭乐乐,孟焯,等. 基于 Lambert W 函数的太阳能电池组件参数提取及优化[J]. 太阳能学报,2014,35(8):1429-1434.
- [8] 王明达,赵瑞杰. 基于数据手册的光伏电池特性及参数实用估算方法[J]. 可再生能源,2012,30(3):102-107.
- [9] 师楠,周苏荃,李一丹,等. 基于 Bezier 函数的光伏电池建模[J]. 电网技术,2015,39(8):2195-2200.
- [10] MOTAHHIR S,CHALH A,EL GHIZAL A,et al. Modeling of photovoltaic panel by using proteus[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review,2017,10(2):8-13.
- [11] 梁聚盛,朱育权,董蓉,等. 准双曲面齿轮齿面数字化重构及误差分析[J]. 西安工业大学学报,2017,37(5):421-425.

(责任编辑:方素华)