

织构化 ZrB_2 -SiC 超高温陶瓷中取向关系的 EBSD 研究

郑海亚¹, 孟晨曦¹, 胡冬力¹, 顾辉¹, 刘海涛², 张国军^{1,3}

(1. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200444; 2. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 高性能陶瓷和超微结构国家重点实验室, 上海 200050; 3. 东华大学 功能材料研究所, 纤维材料改性国家重点实验室, 上海 201620)

摘要: 以放电等离子体烧结的织构化 ZrB_2 -SiC 复相陶瓷为研究对象, 利用 SEM 和 EDS 方法对相组成进行分析。研究发现, 由于初始粉体与杂质之间存在多种反应, 陶瓷中出现相当含量的 ZrC 新相及少量的 ZrO_2 、BN 相。与利用 TEM 研究新生成相与主相间取向关系的常规方法相比, SEM 中 EBSD 方法不但能研究该取向关系, 还可同时对大量相界进行研究以获得统计性结果, 从而避免人为选择性。利用该方法, 对 ZrB_2 与 ZrC 相间可能存在的三种取向关系 $(0110) \parallel (111) \& [2110] \parallel [101]$ 、 $(1120) \parallel (202) \& [0001] \parallel [111]$ 和 $(1210) \parallel (220) \& [0001] \parallel [110]$ 进行验证, 确定本实验中所得复相陶瓷中两相间不存在特定取向关系, 从而推断 ZrC 的成相遵循均匀成核模式, 而非外延成核。

关键词: 织构化超高温陶瓷; 扫描电镜; EBSD; 取向关系

中图分类号: TQ174 文献标识码: A

EBSD Analysis for Orientation Relationship of Textured ZrB_2 -SiC Ultra-high Temperature Ceramics

ZHENG Hai-Ya¹, MENG Chen-Xi¹, HU Dong-Li¹, GU Hui¹, LIU Hai-Tao², ZHANG Guo-Jun^{1,3}

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. State Key Laboratory of High Performance Ceramics and Superfine Microstructures, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 3. State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Materials, Research Institute of Functional Materials, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Textured ZrB_2 -ZrC ceramics sintered by spark plasma sintering were analyzed. The results obtained by SEM and EDS demonstrate the formation of an amount of resultant ZrC phase and trace level of ZrO_2 and BN phases, due to the various reactions between starting powders and impurities. Compared with conventional methods in which TEM was used to analyze the orientation relationship between the phase and the primary phase, EBSD method in SEM can not only study the orientation relationship, but also study a large number of phase boundaries simultaneously to obtain statistical results, so as to avoid artificial selectivity. By using this method, three orientation relationships that may exist between ZrB_2 and ZrC phases, *i.e.* $(0110) \parallel (111) \& [2110] \parallel [101]$, $(1120) \parallel (202) \& [0001] \parallel [111]$, and $(1210) \parallel (220) \& [0001] \parallel [110]$ were checked. It is determined that there is no specific orientation relationship between the two phases in this study, inferring that the ZrC phase formed with a homogeneous nucleation mode rather than an epitaxial nucleation.

Key words: textured ultra-high temperature ceramic; scanning electron microscope; EBSD; orientation relation

ZrB_2 超高温陶瓷具有高熔点、高硬度以及优良的抗热震性能, 在航天领域有着广阔的应用前景^[1-2]。但

ZrB_2 具有强共价键和较低的自扩散系数, 在无外场辅助下单相 ZrB_2 陶瓷难以在较低温度下烧结致密。并且

收稿日期: 2017-04-28; 收到修改稿日期: 2017-05-31

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51532006) National Natural Science Foundation of China (51532006)

作者简介: 郑海亚(1990-), 男, 硕士. E-mail: zhenghaiya99@163.com

通讯作者: 胡冬力, 讲师. E-mail: dlhu_sh@t.shu.edu.cn

ZrB_2 高温强度尤其是高温抗氧化性能较差, 严重限制了其实际应用^[3-4]。通过添加 SiC 作为第二相, 可同时达到促进烧结致密化、细化晶粒、提升力学性能和高温抗氧化性能等多重目的^[5]。Ni^[6]、刘海涛^[7]等结合强磁场定向方法, 使各向异性的 ZrB_2 和 SiC 粉体定向排列, 再利用放电等离子体烧结(SPS)方式制备了组织化的 $\text{ZrB}_2/\text{HfB}_2$ -SiC 陶瓷, 其垂直于磁场面的力学性能和高温抗氧化性能均得到进一步的提升。

在复相 ZrB_2 陶瓷烧结过程中, 主相与烧结助剂、杂质以及球磨介质间发生复杂的化学反应并生成多种新相, 尤其当烧结液相形成并主导烧结过程时, 陶瓷中最终相组成和微结构往往超出最初设计, 使得致密化机理和力学性能的研究变得困难^[8-9]。Zheng 等^[9]研究发现, 氧杂质的存在促使较多的 ZrO_2 新相生成, 并逐步替代反应设计所预期的 ZrC 相; 全面、仔细的相关关系研究还发现氧在反应烧结中起到促进作用。ZrC 相是添加碳化物烧结助剂后在 ZrB_2 基陶瓷中形成的经典产物^[8,10-12], 研究发现加入 ZrC 相可进一步提升 ZrB_2 陶瓷的力学性能^[13-14]。结构方面而言, ZrC 与 ZrB_2 均属于密排结构, 有一定概率形成取向关系, 而这种取向关系会对材料的力学性能产生影响。如在 ZrB_2 -ZrC、 TiB_2 -TiC 等共晶陶瓷中, 研究者发现其力学性能得到显著提升^[15-17]。因此, ZrB_2 基陶瓷中碳化物各相的尺寸、形貌及其与主相间的取向关系对材料的性能均起着不可忽略的作用^[18]。对于 ZrB_2 基复相陶瓷, 不但要分析相组成关系, 还需要探究并定量分析相间的取向关系, 这样才能更为深入了解烧结过程和机理, 从而通过优化相组成和取向关系等微结构特征来制备性能更为优异的 ZrB_2 复相超高温陶瓷。

为此, 本工作以经强磁场定向及放电等离子体烧结的 ZrB_2 -SiC 组织化陶瓷为研究对象, 利用 SEM 对形成的 ZrB_2 -SiC-ZrC 复相陶瓷的相组成进行分析, 并利用 EBSD 方法分析 ZrC 与 ZrB_2 相之间的取向关系, 从而探讨 ZrC 相的形成机理。

1 实验方法

1.1 材料制备

以自制棒状 ZrB_2 粉体^[19](直径为 0.4~0.8 μm , 长度为 2~5 μm)和 α -SiC 粉体(直径为 0.45 μm)为原料, 将两种粉体混合球磨 4 h 后(球磨介质为 ZrO_2 磨球), 再超声分散 1 h。球磨后的粉体制备成浆料在 12 T 的强磁场下注浆成型。采用 SPS 在 1900℃和 50 MPa 条件下烧结 5 min, 制备成 ZrB_2 (ZB)、 ZrB_2 -10%SiC (ZS10)和 ZrB_2 -20%SiC (ZS20)三种样品, 详细制备过程请参考文献[7]。

1.2 表征方法

表面抛光处理后的样品在 FE-SEM (Gemini300, Carl Zeiss, Germany)上进行微结构表征, 该仪器配备能谱

分析仪 EDS (AZTEC, Oxford Instrument, UK)以及背散射电子衍射仪 EBSD (AZTEC, Oxford Instrument, UK)。

利用 SEM 中背散射电子像(BSE)结合 EDS 的方法对样品中各相进行鉴别。虽然 BSE 像对元素的原子序数比较敏感, 但当各相中元素原子序数相差较小时, 如本研究中 ZrB_2 相和 ZrC 相的 BSE 像衬度不够明显, 需借助 EDS 辅助区分。

利用 EBSD 对 ZrB_2 相和 ZrC 相的取向关系进行研究, 并对不同取向关系进行定量统计。EBSD 可以获得两相中所有晶粒的取向信息, 再利用 CHANNEL 5 软件对相邻 ZrB_2 与 ZrC 晶粒的给定晶面对或晶面对面的夹角进行计算, 若同时满足晶面对和晶面对平行, 则认定该相邻晶粒间存在特定的取向关系。

2 结果与讨论

2.1 相鉴别与分析

图 1(a)、(b)和(c)为三种样品的垂直于磁场方向截面的 BSE 像。除 ZrB_2 与 SiC 相外, 还检测到 ZrC、 ZrO_2 及 BN 三种新相, 图 1(d)为各相的 EDS 谱线。 ZrB_2 相主体上表现为灰色衬度, 相内衬度差别主要来源于晶粒之间的取向差, 并且由于第二相 SiC 颗粒在晶界处的钉扎, 可以阻止 ZrB_2 晶粒生长, 因此随着 SiC 含量的增加, ZrB_2 晶粒尺寸逐步减小。 ZrB_2 初始粉体呈棒状, 在烧结过程中生长为等轴状, 这是因为晶粒沿着 c 轴方向生长所需的激活能高于 a 、 b 轴方向, 导致 ZrB_2 棒晶沿着 a 、 b 轴方向的生长速率大于 c 轴方向的速率^[20]。尽管 c 轴方向也发生一定程度的生长, 但是由于其速度较慢, 该相最终发育成等轴晶。

SiC 相的衬度呈黑色, 但 SiC 晶粒处在 ZrB_2 晶粒和晶界两种位置, 显示出明显不同的形态和尺寸: 处在 ZrB_2 晶界处的 SiC 晶粒呈现不同形状, 尺寸较大, 在 ZS10 样品中甚至逼近 ZrB_2 晶粒尺寸; 在 ZrB_2 晶粒内也存在很多细小的 SiC 晶粒, 形状均近似球形, 大多直径在 100~300 nm。这是由于 SPS 烧结过程在 5 min 内完成, ZrB_2 晶粒快速长大, 尤其是 a 、 b 轴方向的生长会“俘虏”来不及聚集长大的原始 SiC 晶粒, 并且由于两相间晶格失配较大, SiC 晶粒倾向于发育成似球形。另外, 随着 SiC 添加量的增加, ZrB_2 晶粒内的 SiC 含量逐渐减少, 因此随 ZrB_2 晶粒尺寸减小, 原始 SiC 晶粒被包裹的几率越小。

ZrO_2 相导电性较差, 引起的电荷累积效应使其呈亮白色。该相晶粒一般处于三角晶界处, 并经常伴随着空洞出现。 ZrO_2 晶粒一方面可能来源于球磨过程中 ZrO_2 球磨介质剥落的碎片, 以及 ZrB_2 粉体制备过程中残留的 ZrO_2 原料^[19]; 另一方面, 初始 ZrB_2 和 SiC 粉体表面的氧化层在球磨过程中进一步增加, 这些氧化层在没有除氧剂参与的情况下通常会残留至烧结后期,

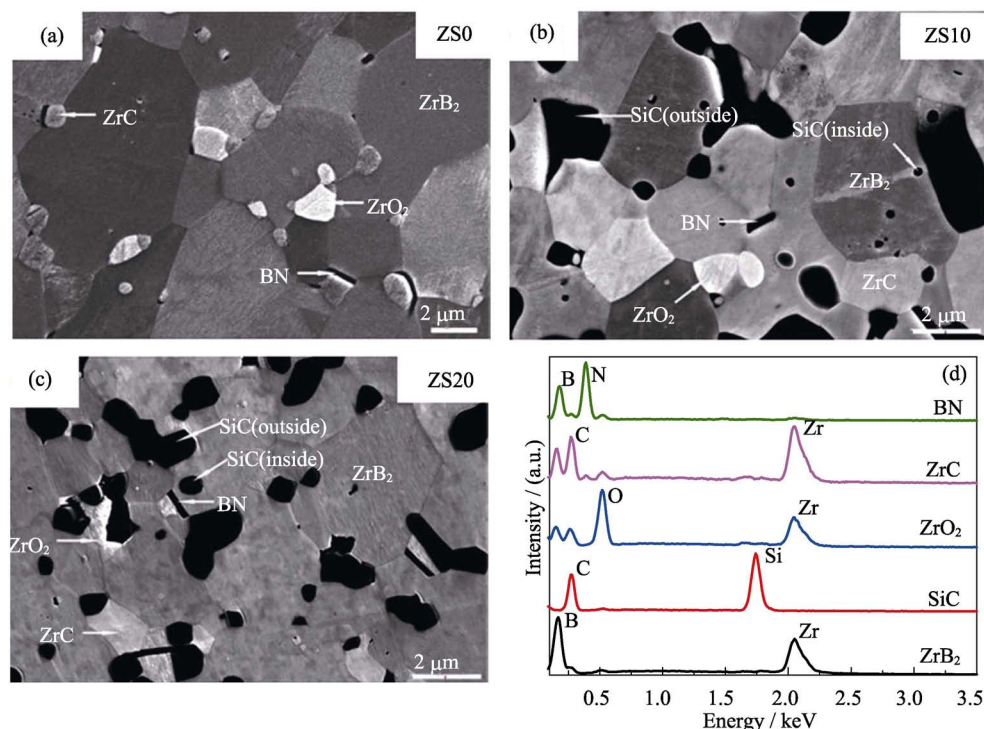
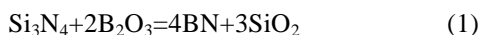


图 1 ZS0(a)、ZS10(b)和 ZS20(c)三种样品抛光面的 SEM 照片及各相的能谱曲线(d)
Fig. 1 SEM images of the polished surface for ZS0 (a), ZS10 (b) and ZS20 (c) samples and EDS spectra for different phases formed in the ceramics (d)

并以非晶或结晶相形式保存下来, ZrO_2 即为一种典型的残余液相析晶结果^[9]。

ZrC 相衬度与主相 ZrB_2 相近, 需要借助 EDS 谱来辅助鉴别, 在该系列样品中都存在 ZrC 相, 且出现频度很高。它通常出现在添加过渡族金属碳化物 MeC 的 ZrB_2 陶瓷体系中^[10-12], 但在只添加 SiC 的复相陶瓷中, 该相并不多见。该 ZrC 相有可能来自 ZrB_2 粉体, 因为在该粉体制备过程中, ZrO_2 与石墨反应也可能同时生成少量的 ZrC 相^[19]。

BN 相呈明显的长直棒状或薄片状, 该相在每个样品中也都能检测到, 但含量较低, 应该主要来自于 ZrB_2 粉体中的杂质, 并可能经过了下列反应(1)^[21-22]:



其中 Si_3N_4 来自于制备 ZrB_2 粉体的过程中 Si_3N_4 磨球介质的碎片, B_2O_3 来自于原料 B_4C 或生成物 ZrB_2 粉体表面的氧化层。

2.2 ZrB_2 相与 ZrC 相之间的取向关系

ZrB_2 相(六方)和 ZrC 相(面心立方)都是密排结构, 在适当条件下两相间可以形成共晶微结构, 甚至形成共晶陶瓷^[16-17,23]。考虑到本研究中主相 ZrB_2 的组织特性, 对于新发现的 ZrC 相, 利用 EBSD 方法来探究这两相间是否存在取向关系, 并对其进行分类和统计, 可了解其生成的过程及机理。

参考其他研究者关于 $\text{TiB}_2\text{-TiC(N)}$ 体系和 $\text{ZrB}_2\text{-ZrC}$ 体系中取向关系的研究, 本研究在多种可能组合中选取三组晶面对及相关的晶向对组合开展取向关系

分析研究, 如图 2 所示, 分别为: $(0110)_{\text{ZrB}_2} \parallel (111)_{\text{ZrC}}$

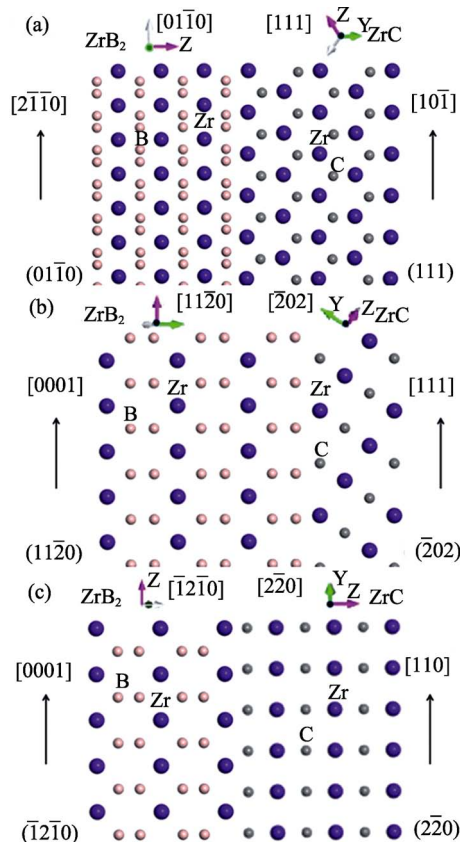


图 2 ZrB_2 和 ZrC 相间三组取向关系的原子模拟图
Fig. 2 Atomic illustration of orientation relationship of ZrB_2 and ZrC in plane pair and orientation pair

与 $[2110]_{\text{ZrB}_2} \parallel [101]_{\text{ZrC}} : (1120)_{\text{ZrB}_2} \parallel (202)_{\text{ZrC}}$ 与 $[0001]_{\text{ZrB}_2} \parallel [111]_{\text{ZrC}} : (1210)_{\text{ZrB}_2} \parallel (220)_{\text{ZrC}}$ 与 $[0001]_{\text{ZrB}_2} \parallel [110]_{\text{ZrC}}$ 。根据金属体系的两相取向关系理论中最常应用的“边-边”匹配方法,可计算出其晶面对和晶向对的错配度(δ) (公式 2):

$$\delta = \frac{d_{\text{F}} - d_{\text{H}}}{d_{\text{F}}} \quad (2)$$

式中 d 为晶面间距或晶向内的有效原子间距,下标 F 和 H 分别为 ZrC 和 ZrB₂ 所属的面心立方和六角密排结构。

表 1 为上述三组晶面对与晶向对的错配度计算结果。根据界面匹配的最大允许错配度为 16% 原则^[24],在 ZrB₂ 与 ZrC 相中选取这三组取向关系组合是可行的。选取 ZS10 样品中具有代表性的区域进行分析,图 3 中分别给出了三组晶面对与晶向对的角度差分布图,所选取的角度差间隔为 1°,基于 EBSD 的角度分辨率为 0.5°~1.0°。从图 3 可见,不是所有取向差在低角度有比较高的分布,而晶向对与晶面对都具有突出分布的则只有 $(1120)_{\text{ZrB}_2} \parallel (202)_{\text{ZrC}}$ 与 $[0001]_{\text{ZrB}_2} \parallel [111]_{\text{ZrC}}$ 这一组合。因此,这是唯一可能具有特定取向关系的相界面。这就是 Sorrell 等^[15]在 ZrB₂-ZrC 体系中最早推测的共晶取向关系,而 Cheng 等^[17]在 TiB₂-TiC_xN_{1-x} 中也报道了该共晶取向关系。我们对这一组合所对应的界面可以逐一进行比对,以寻找该取向关系在快速烧结陶瓷中是否真实存在。

图 4 是 ZS10 样品分析区域中所有晶粒和界面的

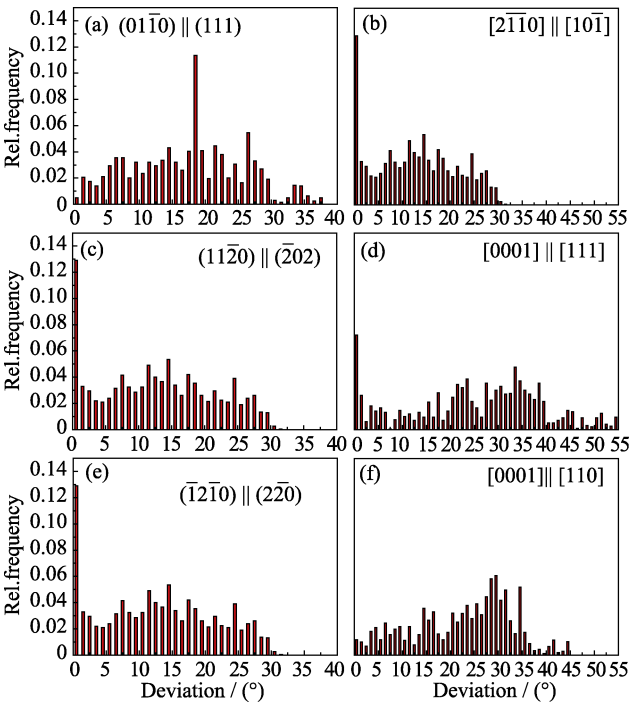


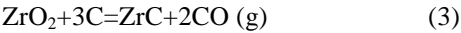
图 3 三组晶面对与晶向对的角度差统计图
Fig. 3 Statistics of misorientation in plane pair and orientation pair

表 1 ZrB₂ 与 ZrC 相间晶面对和晶向对的错配度
Table 1 Mismatch of plane pair and orientation pair between ZrB₂ and ZrC phases

	Mismatch/%	
	Plane	Orientation
(0110) (111)	1.27	
[2110] [101]		4.50
(1120) (202)	4.50	
[0001] [111]		13.10
(1210) (220)	4.50	
[0001] [110]		6.40

衍射带衬度分布图,其中 ZrB₂ 主相未染色,而 ZrC 新相被染成蓝色,其晶界主要为 ZrB₂ 和 ZrC 之间的各种不同相界面。晶面对或晶向对之间的匹配度用两相界面的角度关系进行表征,红色相界面表示所选晶面对或晶向对的夹角小于 1°,紫色表示其夹角在 1°~3°之间,白色则表示其夹角大于 3°。根据上设分辨率极限,本研究中不考虑超出 3°的相界面结构。图 4(a)显示满足 $(1120)_{\text{ZrB}_2} \parallel (202)_{\text{ZrC}}$ 关系(红色和紫色)的相界有 8 条,但图 4(b)中只有 2 条相界满足 $[0001]_{\text{ZrB}_2} \parallel [111]_{\text{ZrC}}$ 关系,同时满足这两种平行关系的相界则只有 1 条(红圈标识),从统计角度,可以认为该陶瓷样品不存在特定取向关系。

至此,在通过强磁场定向后快速烧结的织构化 ZrB₂-SiC 陶瓷中,所生成的 ZrC 新相与 ZrB₂ 主相不存在任何取向关系,说明该新相是在烧结过程中均匀成核所形成,而非通过在 ZrB₂ 晶面的外延模式来成核。ZrC 相形成需要 Zr 和 C 源:Zr 源可以来自 ZrB₂ 或 ZrO₂,而 ZrO₂ 相随着 ZrC 相的增多趋近于消失,因此后者是其 Zr 源的主要提供者。ZrC 相的 C 源可以来自 SiC 或其它碳污染,但未掺杂 SiC 相的 ZS0 陶瓷中也发现存在 ZrC 相,其 C 源应该主要来自于碳污染。因此,推测在烧结过程中发生了反应(3)^[19]:



从而消耗了 ZrO₂ 相来增加 ZrC 相的含量。

3 结论

结合 SEM 中 BSE 像和 EDS 对 ZrB₂-SiC 复相陶瓷进行相鉴别,除主相 ZrB₂ 和第二相 SiC 外,还检测到 ZrC、ZrO₂ 及 BN 三种新相。这说明原料及各种杂质在烧结过程中发生了比初始设计更加复杂的反应,对原料控制及微结构设计有着重要意义。

利用 EBSD 方法对 ZrB₂ 主相和 ZrC 新相间可能存在取向关系的晶面对和晶向对进行角度关系统计,通过对比直观呈现的两相界面,判定这两相间不存在特定的取向关系。利用 SEM 平台上的 EBSD 方法相对简单,并可同时对大量晶粒进行取向关系分析,与传统

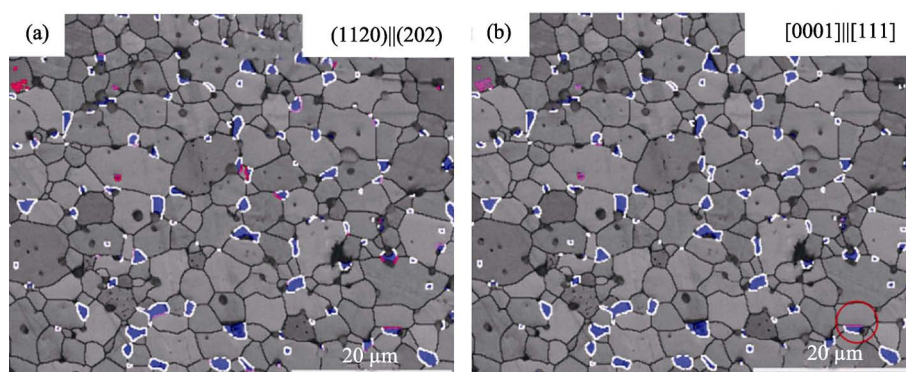


图 4 ZS10 样品中晶面对与晶向对的角度关系

Fig. 4 Relationships of plane pair and orientation pair in ZS10 sample

的 TEM 表征方法相比,更具有统计意义,从而避免实验取样不足导致的人为选择因素等引起的误判。因此该技术在陶瓷微结构研究领域有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] ZHANG G J, DENG Z Y, KONDO N, *et al.* Reactive hot pressing of ZrB_2 -SiC composites. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2000, **83**(9): 2330–2332.
- [2] ZOU J, SUN S K, ZHANG G J, *et al.* Chemical reactions, anisotropic grain growth and sintering mechanisms of self-reinforced ZrB_2 -SiC doped with WC. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2011, **94**(5): 1575–1583.
- [3] ZHANG X, LUO X, HAN J, *et al.* Electronic structure, elasticity and hardness of diborides of zirconium and hafnium: first principles calculations. *Comp. Mater. Sci.*, 2008, **44**(2): 411–421.
- [4] ZHANG G J, ZOU J, NI D W, *et al.* Boride ceramics: densification, microstructure tailoring and properties improvement. *Journal of Inorganic Materials*, 2012, **27**(3): 225–233.
- [5] SCITI D, SILVESTRONI L, CELOTTI G, *et al.* Sintering and mechanical properties of ZrB_2 -TaSi₂ and HfB₂-TaSi₂ ceramic composites. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2008, **91**(10): 3285–3291.
- [6] NI D W, ZHANG G J, KAN Y M, *et al.* Highly textured ZrB_2 -based ultrahigh temperature ceramics via strong magnetic field alignment. *Scripta Mater.*, 2009, **60**(8): 615–618.
- [7] 刘海涛. 织构化硼化锆基超高温陶瓷及其性能提升. 上海: 中国科学院上海硅酸盐研究所博士论文学位, 2013.
- [8] HU D L, ZHENG Q, GU H, *et al.* Role of WC additive on reaction, solid-solution and densification in HfB₂-SiC ceramics. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2014, **34**(3): 611–619.
- [9] ZHENG Q, XU N A, GU H, *et al.* Effect of ZrO₂ impurity on promoting reactive sintering of ZrB_2 -SiC-ZrC composites. *Int. J. Mater. Res.*, 2013, **104**(7): 675–679.
- [10] ZHANG S C, HILMAS G E, FAHRENHOLTZ W G. Pressureless densification of zirconium diboride with boron carbide additions. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2006, **89**(5): 1544–1550.
- [11] ZOU J, ZHANG G J, KAN Y M, *et al.* Pressureless densification of ZrB_2 -SiC composites with vanadium carbide. *Scripta Mater.*, 2008, **59**(3): 309–312.
- [12] ZOU J, ZHANG G J, HU C F, *et al.* Strong ZrB_2 -SiC-WC ceramics at 1600°C. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2012, **95**(3): 874–878.
- [13] MEDIR V, MONTEVERDE F, BALBO A, *et al.* Comparison of ZrB_2 -ZrC-SiC composites fabricated by spark plasma sintering and hot-pressing. *Adv. Eng. Mater.*, 2005, **7**(3): 159–163.
- [14] KIM K H, SHIM K B. The effect of lanthanum on the fabrication of ZrB_2 -ZrC composites by spark plasma sintering. *Mater. Character.*, 2003, **50**(1): 31–37.
- [15] SORRELL C C, BERATAN H R, BRADT R C, *et al.* Directional solidification of (Ti, Zr) carbide-(Ti, Zr) diboride eutectics. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1984, **67**(3): 190–194.
- [16] ORDAN'YAN S S, ZARICHNYAK Y P, BAL'NOVA E S. Anomalous concentration dependences of thermal conductivity of ceramics in TiN-AlN and ZrC-ZrB₂ systems with the structure of "eutectics of rough conglomerate". *Russ. J. Non-Ferr. Met.*, 2014, **55**(1): 92–96.
- [17] CHENG E J, KATSUI H, RONG T, *et al.* Long-range ordered structure of Ti-B-C-N in a TiB₂-TiC_xN_{1-x} eutectic composite. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2014, **97**(8): 2423–2426.
- [18] HOLLECK H, LEISTE H, SCHNEIDER W. Significance of phase boundaries in wear resistant TiC/TiB₂ materials. I. Investigations with transmission electron microscopy. *Int. J. Refract. Met. H.*, 1987, **6**(3): 149–154.
- [19] QIU H Y, GUO W M, ZOU J, *et al.* ZrB_2 powders prepared by boron/carbothermal reduction of ZrO₂: the effects of carbon source and reaction atmosphere. *Powder Technol.*, 2012, **217**: 462–466.
- [20] LIU H T, ZHANG G J. Textured ZrB_2 -based ceramics by tape casting from rod-like ZrB_2 starting powders. *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 2013, **121**(1412): 327–330.
- [21] AHMADI Z, ASL M S, NAYEBI B, *et al.* Effect of Si₃N₄ Additive on Densification and Microstructure of ZrB_2 -SiC Composites Manufactured by Hot Pressing and Pressureless Sintering Methods. International Conference on Materials Engineering and Metallurgy. 2016.
- [22] WENG L, ZHANG X, HAN J, *et al.* The effect of Si₃N₄ on microstructure, mechanical properties and oxidation resistance of HfB₂-based composite. *J. Compos. Mater.*, 2009, **43**(2): 113–123.
- [23] CHENG E J, KATSUI H, GOTO T. ZrB_2 -ZrC_xN_{1-x} eutectic composites produced by melt solidification. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2016, **99**(2): 667–673.
- [24] FRANK F C, VAN DER MERWE J H. One-dimensional dislocations. I. Static theory. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. The Royal Society*, 1949, **198**(1053): 205–216.