第 49 卷第 12 期
2021 年 12 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 12
December，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210540

原位合成 ZrB_2 对 SiC–ZrB_2 陶瓷复合材料组织与性能的影响

黄 楠，韩凌锋，张翠萍，岳新艳，茹红强，王 伟

(东北大学材料科学与工程学院，材料各向异性与织构教育部重点实验室，沈阳 110819)

摘 要：以碳化硅(SiC)、二氧化锆(ZrO_2)、碳化硼(B_4C)、水溶性酚醛树脂以及炭黑为原料，基于原位反应合成法在 SiC 基体中合成不同体积含量[30%(体积分数)、35%、40%、45%]的 ZrB_2，并采用无压烧结法制备得到 SiC–ZrB_2 陶瓷复合材料，研究了 ZrB_2 含量对 SiC–ZrB_2 复合材料物相组成、显微组织、力学性能以及电学性能的影响。结果表明：不同 ZrB_2 含量的复合材料中，其相组成均为 SiC 和 ZrB_2，并存在少量的 $B_{13}C_2$；随着 ZrB_2 含量的增加，复合材料中 ZrB_2 晶粒尺寸增大、ZrB_2 颗粒间呈相互连接趋势，并且复合材料致密度、力学性能与导电性能均呈增加趋势。当 ZrB_2 含量为 45%时，复合材料的体积密度、开口气孔率、相对密度、抗折强度、Vickers 硬度和电阻率分别为 4.16 g/cm^3、0.27%、95%、(332±17) MPa、(16±2) GPa 和(2.35±0.7×10^{-6}) Ω·m。

关键词：碳化硅–硼化锆陶瓷复合材料；原位合成；无压烧结；显微组织
中图分类号：TQ174　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)12–2589–06
网络出版时间：2021–10–29



Effect of *In-situ* Synthesized ZrB_2 Content on Microstructure and Properties of SiC–ZrB_2 Composites

HUANG Nan, *HAN Lingfeng*, *ZHANG Cuiping*, *YUE Xinyan*, *RU Hongqiang*, *WANG Wei*
(School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials Ministry of Education, Shenyang 110819, China)

Abstract: ZrB_2 with different volume contents (30%, 35%, 40% and 45%) was *in-situ* synthesized in SiC matrix with silicon carbide (SiC), zirconium dioxide (ZrO_2), boron carbide (B_4C), water-soluble phenolic resin and carbon black as raw materials. SiC–ZrB_2 composites were prepared *via* pressureless sintering. The effect of ZrB_2 content on the microstructure and properties was investigated by X-ray diffraction, scanning electron microscopy, and electronic universal tests. The results show that the phase composition of the composites with different ZrB_2 contents are SiC and ZrB_2 with a little of $B_{13}C_2$. The grain size of ZrB_2 increases, the particles interconnect, the density, mechanical properties and electrical conductivity of the composites increase when ZrB_2 content increases. At ZrB_2 content of 45%, the volume density, open porosity, relative density, flexural strength, vickers hardness and volume resistivity of the composites are 4.16 g/cm^3, 0.27%, 95%, (332±17) MPa, (16±2) GPa and (2.35±0.7×10^{-6}) Ω·m, respectively.

Keywords: silicon carbide-zirconium boride composites; *in-situ* synthesis; pressureless sintering; microstructure

碳化硅陶瓷作为一种高性能的结构材料，凭借其高强度、高硬度、良好的化学稳定性以及优良的耐侵蚀性能广泛应用于能源、国防军工、核工业、微电子、航空航天等领域[1–3]。SiC 的强共价键性(约 88%)以及低自扩散系数，导致其难以烧结致密化，限制了 SiC 的实际应用[4]。因此，为了得到高致密度的 SiC 陶瓷材料，通常采用热压烧结和 SPS 等方法[5–7]。热压烧结和 SPS 虽然能够制备得到高致密度的样品，但成本高昂且难制备复杂形状的制品，其应用受到了限制[8–9]。相比之下，无压烧结可以获

收稿日期：2021–07–03。　修订日期：2021–07–29。
基金项目：辽宁省自然基金资助计划(2019-MS-126)；国家重点研发计划(2017YFB0310300)；国家自然科学基金(51602041，51772048)，装备预先研究项目(41422010905，41422010903)。
第一作者：黄 楠(1997—)，女，硕士研究生。
通信作者：张翠萍(1983—)，女，讲师。

Received date: 2021–07–03.　**Revised date:** 2021–07–29.
First author: HUANG Nan(1997–), female, Master candidate.
E-mail: 1014835753@qq.com
Correspondent author: ZHANG Cuiping(1983–), female, Ph.D., Lecturer.
E-mail: zhangcp@smm.neu.edu.cn

得形状复杂的制品，且生产成本较低，适用于大规模的工业生产[10–11]。

然而，碳化硅半导体的特性限制了其在导电领域的应用，为了调控 SiC 陶瓷的导电性能，采用在 SiC 基体中引入导电相的方法来实现[12]。硼化锆(ZrB_2)作为高导电性材料，同时具有强度高、硬度高、导热性及化学稳定性良好等特性[13–16]，且热膨胀系数与 SiC 相近，因此将上述两者复合，可获得高导电性、高抗氧化性和高机械强度的 SiC–ZrB_2 复合材料[17–19]。

Lee 等采用 SPS 方法在 SiC 基体中添加 ZrB_2 制备得到致密的 SiC–ZrB_2 复合材料[20]。但高纯 ZrB_2 粉体价格高昂，限制了复合材料的工业化生产及应用[21]。相比之下，与直接使用 ZrB_2 粉体相比，以 ZrO_2 和 B_4C 为原料，在 SiC 基体中原位合成 ZrB_2 制备 SiC–ZrB_2 复合材料，具有工艺简单，成本低廉等优点。

本工作在 SiC 基体中原位合成 ZrB_2，并采用无压烧结工艺制备 SiC–ZrB_2 复合材料，讨论了复合材料中 ZrB_2 含量对材料的物相组成、显微组织、力学性能及电学性能的影响。

1 实验

1.1 样品制备

以 α-SiC 粉体(0.5 μm，通化宏信研磨材有限责任公司)、ZrO_2 粉体(30~50 nm，杭州吉康新材料有限公司)；B_4C 粉体(0.5 μm，大连天宏硼业有限公司)、酚醛树脂溶液(碳含量为 49.9%，山东圣泉集团股份有限责任公司)及纳米炭黑为原料制备 ZrB_2 含量(体积分数)为 30%、35%、40%和 45%的 SiC–ZrB_2 复合材料。按式(1)进行配料计算，计算结果如表 1 所示。

$$2ZrO_2 + B_4C + 3C = 2ZrB_2 + 4CO\uparrow \quad (1)$$

表 1 SiC–ZrB_2 复合材料的原料配比

Table 1 Ratio of the raw materials of SiC–ZrB_2 composites

w/%

Composites	SiC	ZrO_2	B_4C	C
SiC–30%ZrB_2	45.02	40.11	9.00	5.87
SiC–35%ZrB_2	39.47	44.17	9.90	6.46
SiC–40%ZrB_2	34.49	47.80	10.72	6.99
SiC–45%ZrB_2	30.02	51.07	11.44	7.47

w—Mass fraction.

采用湿法混料制备复合粉体，所得复合粉体经 WE–10A 型液压式万能试验机进行压制，压制压力为 100 MPa，将压制好的试样放入真空管式炉中进行碳化，碳化温度为 700 ℃。最后将坯体放入石墨坩埚内进行无压烧结，烧结过程中通入氩气气氛保护，原位反应温度为 1 500 ℃，烧结温度为 2 050 ℃，烧结时间为 1 h。烧结后的样品经过磨削和抛光后进行性能测试。

1.2 样品表征

利用 Archimedes 排水法测定陶瓷材料的密度与开孔气孔率。借助日本理学 D/Max–YX–射线衍射仪(XRD)对陶瓷材料进行物相分析。采用日本电子株式会社 JSM–7001F 扫描电子显微镜(SEM)观察材料的显微组织。使用日本株式会社制造的 AG–Xplus100kN 电子万能试验机测定陶瓷材料的抗弯强度。通过 Vickers 硬度计对陶瓷材料的硬度进行测试，载荷为 1 kg。采用四探针法测定陶瓷材料的电阻率。

2 结果与讨论

2.1 SiC–ZrB_2 复合材料物相分析

图 1 为 SiC–ZrB_2 复合材料的 XRD 谱。由图 1 可见，基于原位合成法制备得到的 4 组不同 ZrB_2 含量的 SiC–ZrB_2 复合材料，其主相均为 SiC 和 ZrB_2，且存在少量的 $B_{13}C_2$。此外，未发现原料 ZrO_2 的衍射峰，表明在陶瓷烧结过程中，ZrO_2 已完全转变为 ZrB_2。随着 ZrB_2 体积分数的增加，ZrB_2 的衍射峰强度(2θ=23.4°、32.4°和 41.5°)逐渐增强，这是因为随着原料中 ZrO_2 含量的增加，原位反应生成的 ZrB_2 含量增多，故 ZrB_2 衍射峰的强度增加。

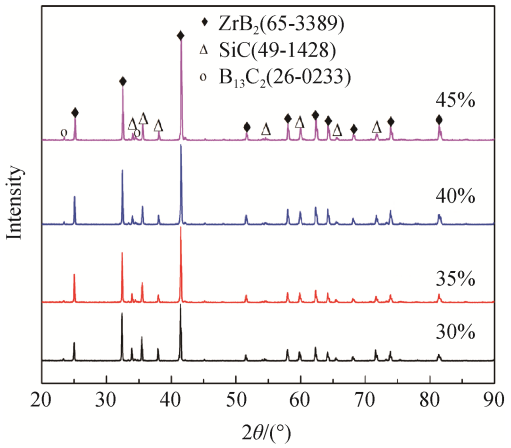


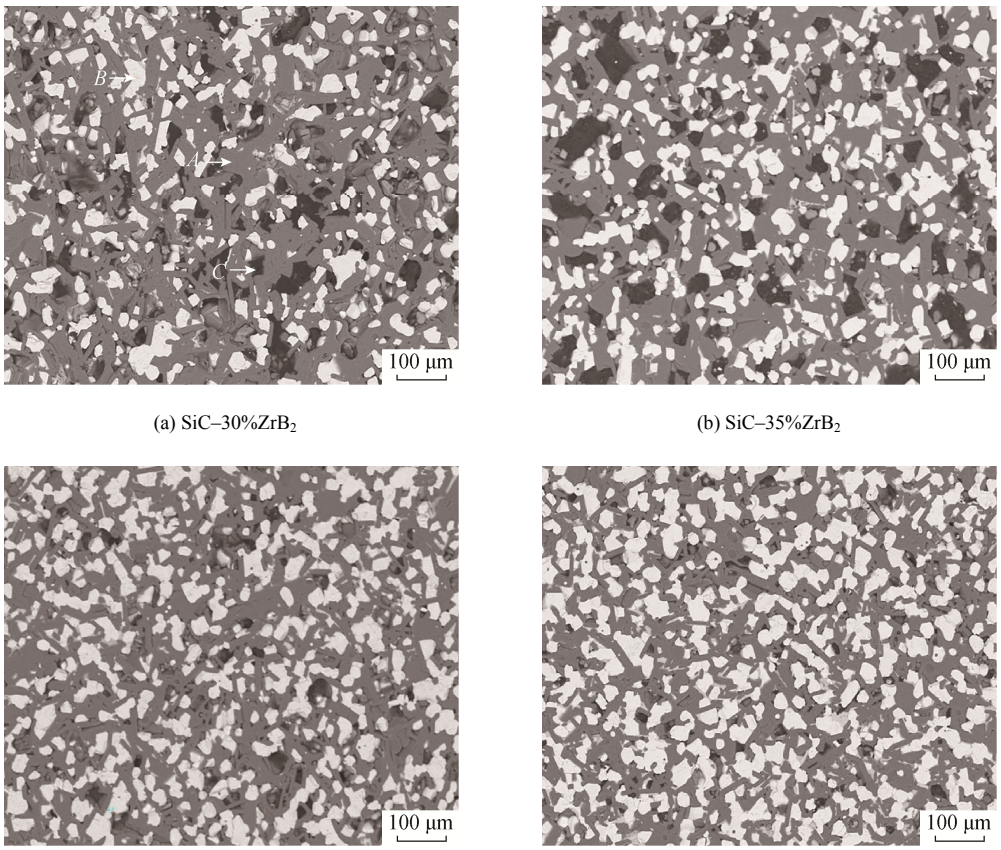
图 1 不同 ZrB_2 含量的 SiC–ZrB_2 复合材料的物相组成

Fig. 1 XRD patterns of SiC–ZrB_2 composites with different ZrB_2 content

2.2 SiC–ZrB_2 复合材料显微组织分析

图 2 为 SiC–ZrB_2 复合材料背散射电子(BSE)图

像以及对应的 EDS 分析。由图 2 可知，复合材料由 3 相组成。结合表 2 可知，灰色区域(点 *A*)主要有 Si、C 2 种元素构成，结合 XRD 结果分析，灰色区域为 SiC，白色区域(点 *B*)为 ZrB_2，黑色区域(点 *C*)为 $B_{13}C_2$。如图 2 所示，对于含有不同 ZrB_2 体积分数的 SiC–ZrB_2 复合材料，ZrB_2 在 SiC 基体中的分布都比较均匀。此外，随着 ZrB_2 体积含量的增加，ZrB_2 颗粒的数量明显增多，ZrB_2 晶粒尺寸增大，说明原位合成的 ZrB_2 颗粒活性较高，颗粒容易长大。在 ZrB_2 体积含量较低时，ZrB_2 颗粒呈孤岛状分布于 SiC 基体中；在 ZrB_2 体积含量较高时，ZrB_2 颗粒间呈相互连接的趋势。



(a) SiC–30%ZrB_2　　(b) SiC–35%ZrB_2

(c) SiC–40%ZrB_2　　(d) SiC–45%ZrB_2

图 2　SiC–ZrB_2 复合材料的 SEM 照片

Fig. 2　SEM images of SiC–ZrB_2 composites

表 2　图 2a 中各区域的 EDS 成分分析结果

Table 2　EDS analysis results of the composites shown in Fig.2(a)

Element	*w*/%			*x*/%		
	A	*B*	*C*	*A*	*B*	*C*
Si K	67.38		13.83	46.91		5.92
C K	32.62	4.02	16.25	53.09	11.56	16.28
B K		18.47	69.92		59.03	77.80
Zr L		76.63			27.52	
O K		0.88			1.90	
Total		100.00			100.00	

x—Mole fraction.

2.3　硼化锆含量对 SiC–ZrB_2 复合材料致密度的影响

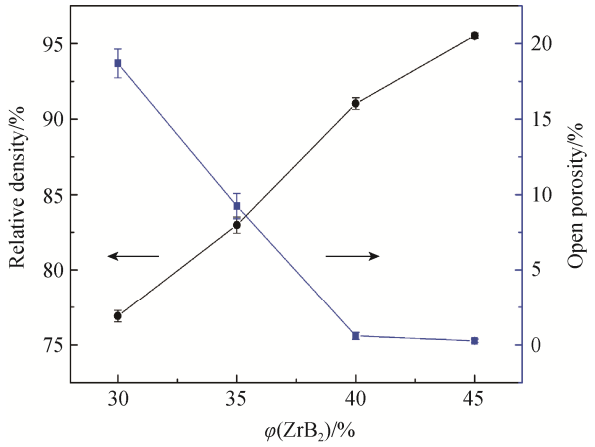
图 3 为 SiC–ZrB_2 复合材料的相对密度以及开口气孔率。由图 3 可见，随着原位合成 ZrB_2 含量的逐渐增加，复合材料的相对密度逐渐增加，开口气孔率逐渐减小。其中 SiC–45%ZrB_2 组分的相对密度达到最大值 95%，开孔气孔率为 0.27%。与文献[20]相比，采用 ZrO_2 原位合成 ZrB_2 的方法大大降低了成本，且得到相对致密的复合材料。SiC–ZrB_2 复合材料的烧结是一个固相烧结过程，材料在烧结的过程中会发生有规律的传质、颗粒重排，同时伴随着致密度提高以及气孔率降低的现象[12]。一方面，由于 SiC 原料表面含有一定量的 SiO_2，它会降低原料的表面能，添加适量的 B_4C 和 C 有助于去除 SiC 颗粒表面的 SiO_2，提高表面能，增加烧结活性，促进材料烧结致密化[22]。另一方面，当 ZrO_2 含量增加时，原位生成的 ZrB_2 增多，反应活化能增大，其活化作

用同样会促进材料烧结致密化，提高材料的相对密度，降低材料的孔隙率[23]。

材料的体积密度呈不断增加的趋势，因为复合材料的性能与各组分的性能及体积分数有关，即材料的复合满足复合定律，如式(2)所示[24]，因为 ZrB_2 的密度[$\rho(ZrB_2)$=6.09 g/cm^3]大于 SiC 的密度[ρ(SiC)=3.21 g/cm^3]，所以当 ZrB_2 含量增加时，材料的体积密度增加。

$$y_c = \varphi_1 x_1 + \varphi_2 x_2 + \ldots \quad (2)$$

式中：y_c 为复合材料的物性值；φ_1、φ_2 为各组分的体积分数；x_1、x_2 为各组分物性值。



φ—Volume fraction.

图 3 不同 ZrB_2 含量 SiC–ZrB_2 复合材料的相对密度和开口气孔率

Fig. 3 Relative density and open porosity of SiC–ZrB_2 composites with different ZrB_2 contents

2.4 硼化锆含量对 SiC–ZrB_2 复合材料力学性能的影响

图 4 和图 5 为不同 ZrB_2 含量的 SiC–ZrB_2 复合材料抗折强度和 Viskers 硬度的变化曲线。随着 ZrB_2 含量的增加，抗折强度和 Viskers 硬度均呈增加趋势，当 ZrB_2 含量为 45%时，烧结试样的抗折强度和硬度达到最大值分别为 332 MPa 和 16 GPa。这种变化趋势与复合材料的致密度变化趋势基本一致。结合图 4 和图 5 变化曲线可知，气孔与材料的力学性能具有密切关系。一方面，气孔减少了材料的负载面积，降低了材料承受的应力；另一方面，气孔附近区域应力集中，当应力达到临界值，材料会形成裂纹并扩展直至断裂。根据材料的抗折强度即硬度与气孔率的经验公式[24]可知，随着复合材料中的气孔率降低(见图 3)，材料的致密度增加，材料的抗折强度和硬度均增加。

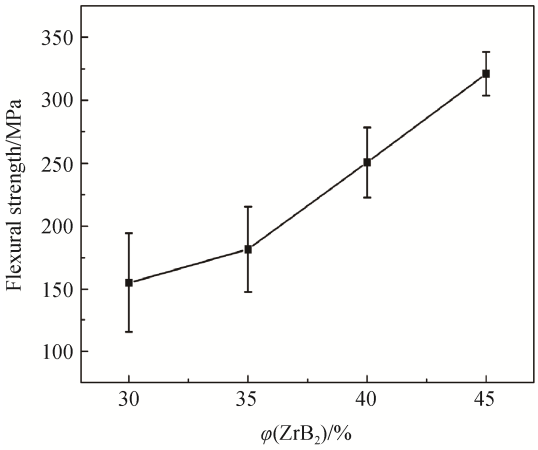


图 4 SiC–ZrB_2 复合材料的抗折强度

Fig. 4 Flexural strength of SiC–ZrB_2 composites with different ZrB_2 content

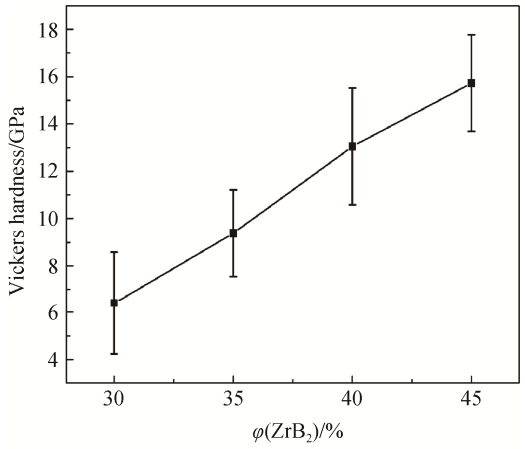


图 5 不同 ZrB_2 含量 SiC–ZrB_2 复合材料的 Vickers 硬度

Fig. 5 Vickers hardness of SiC–ZrB_2 composites with different ZrB_2 content

2.5 硼化锆含量对 SiC–ZrB_2 复合材料电阻率的影响

图6为不同组分烧结试样的电阻率。由图6可知，随着原位合成 ZrB_2 含量的增加，烧结试样的电阻率逐渐降低。与文献[20]相比，采用无压烧结制备得到的 SiC–ZrB_2 复合材料可获得较低的电阻率，最低可达到$(2.35\pm0.70\times10^{-6})\,\Omega\cdot m$。由于 SiC 是一种半导体，故导电相 ZrB_2 的加入在总体上降低了电阻率的值，提高了 SiC–ZrB_2 复合材料导电性能。一方面，如式(2)所示，材料满足复合定律，因为 ZrB_2 的电阻率($1.66\times10^{-6}\ \Omega\cdot m$)远远小于 SiC($1.1\times10^{-3}\ \Omega\cdot m$)的电阻率，所以当 ZrB_2 含量增加时，材料的电阻率减小；另一方面，当材料中的气孔率减低时即材料的致密度增加时(见图 3)，也会对复合材料的电阻率产生影响。

复相导电陶瓷的导电机理有以下 2 种：一种是通过物相变化引起载流子浓度的变化；另一种是掺

杂的物理相连接构成导电通道[25]。通过在 SiC 基体中掺杂一定量的导电相(ZrB_2)，基体与导电相的结合可以改变复合材料的导电性能。由渗流理论可知，当导电相体积分数达到临界值即渗流阈值时，导电相相互连接形成连续导电网络，电阻率会发生突变，从绝缘体变为导体，变化幅度可达 10 个数量级，在 ZrB_2 含量比较少时，在 SiC 颗粒中分布不均，孤立存在，不能形成有效的导电通路，此时试样的电阻率较高，随着 ZrB_2 含量的增加(约 40%)，ZrB_2 含量在 SiC 颗粒间形成导电通路，此时 SiC–ZrB_2 复合材料的电阻率急剧降低。

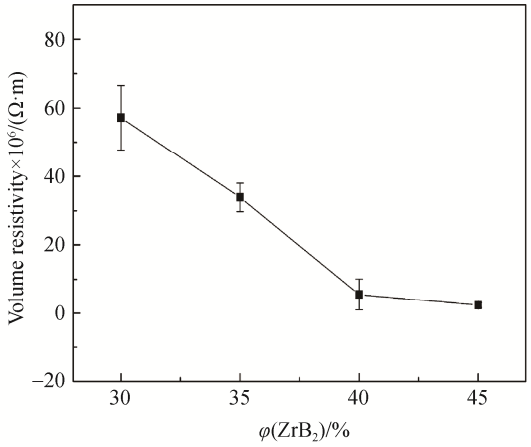


图 6　不同 ZrB_2 含量的 SiC–ZrB_2 复合材料的电阻率

Fig. 6　Volume resistivity of SiC–ZrB_2 composites with different ZrB_2 content

3　结论

1) 以 SiC、ZrO_2、B_4C、水溶性酚醛树脂以及炭黑为原料，在 SiC 基体中原位合成不同体积含量(30%、35%、40%、45%)的 ZrB_2，采用无压烧结制备了较为致密的 SiC–ZrB_2 陶瓷复合材料。复合材料的相组成为 SiC、ZrB_2 和 $B_{13}C_2$；

2) 当原位合成 ZrB_2 含量增加时，SiC–ZrB_2 复合材料中 ZrB_2 晶粒尺寸逐渐增加，ZrB_2 颗粒间相互连接，材料的致密度逐渐增加。当 ZrB_2 含量为 45% 时，复合材料的相对密度、开口气孔率和体积密度分别为 95%，0.27%和 4.16 g/cm^3。

3) 当合成 ZrB_2 含量为 45%时，使用无压烧结在 2050 ℃烧结 1 h，可制备得到综合性能较为优异的 SiC–ZrB_2 陶瓷复合材料，试样的电阻率可达 $(2.35\pm0.7\times10^{-6})\ \Omega\cdot m$，抗弯强度达到(332±17) MPa，Vickers 硬度为(16±2) GPa。通过在 SiC 基体中引入原位合成 ZrB_2 相的方法，大大降低了 SiC–ZrB_2 复合材料的电阻率，提高了材料导电性能。

参考文献:

[1] RAJU K, YOON D H. Sintering additives for SiC based on the reactivity: A review[J]. Ceram Int, 2016, 42(16): 17947–17962.

[2] 黄安琪, 朱时珍, 刘玲等. SPS 制备 SiC–TiB_2 复相陶瓷材料结构和性能研究[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(7): 923–929.
HUANG Anqi, ZHU Shizhen, LIU Ling, et al. J Chin Ceram Soc, 2017, 45(7): 923–929.

[3] 杨晓, 黄政仁, 刘学建. 常压烧结碳化硅陶瓷的表面裂纹对其力学性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(7): 841–845.
YANG Xiao, HUANG Zhengren, LIU Xuejian. J Chin Ceram Soc, 2014, 42(7): 841–845.

[4] JANG S H, KIM Y W, KIM K J. Electrical and thermal properties of SiC–Zr_2CN composites sintered with Y_2O_3–Sc_2O_3 additives[J]. J Eur Ceram. Soc, 2017, 37(2): 477–484.

[5] CHAMBERLAIN A L, FAHRENHOLTZ W G, HILMAS G E. Low-emperature densification of zirconium diboride ceramics by reactive hot pressing[J]. J Am Ceram Soc, 2006, 89(12): 3638–3645.

[6] LU Y, ZHANG G J, LIU J X, et al. Reactive hot–pressing of ZrB_2–ZrC–SiC ceramics via direct addition of SiC[J]. Ceram Int, 2016, 42(15): 16474–16479.

[7] FATTAHI M, AZIZIAN–KALANDARAGH Y, DELBARI S A, et al. Nano-diamond reinforced ZrB_2–SiC composites[J]. Mater Sci Eng A, 2020, 46(8): 10172–10179.

[8] ASL M S, FARAHBAKHSH I, NAYEBI B. Characteristics of multi-walled carbon nanotube toughened ZrB_2–SiC ceramic composite prepared by hot pressing[J]. Ceram Int, 2016, 42(1): 1950–1958.

[9] FARAHBAKHSH I, AHMADI Z, ASl M S. Densification, microstructure and mechanical properties of hot pressed ZrB_2–SiC ceramic doped with nano–sized carbon black[J]. Ceram Int, 2017, 43(11): 8411–8417.

[10] MALLIK M, ROY S, RAY K K, et al. Effect of SiC content, additives and process parameters on densification and structure–property relations of pressureless sintered ZrB_2–SiC composites[J]. Ceram Int, 2013, 39(3): 2915–2932.

[11] WANG W, LIAN J B, RU H Q. Pressureless sintered SiC matrix toughened by in situ synthesized TiB_2: Process conditions and fracture toughness[J]. Ceram Int, 2012, 38(3): 2079–2085.

[12] 陈军军. SiC 基复相导电陶瓷的制备与性能研究[D]. 中国科学院大学, 2018.
CHENG Junjun. Preparation and properties of SiC based electrical conductive ceramics (in Chinese, dissertation). University of Chinese Academy of Sciences, 2018.

[13] ASL M S, NAYEBI B, AHMADI Z, et al. Effects of carbon additives on the properties of ZrB_2-based composites: A review[J]. Ceram Int, 2018, 44(7): 7334–7348.

[14] ASL M S, ZAMHARIR M J, AHMADI Z, et al. Effects of nano-graphite content on the characteristics of spark plasma sintered ZrB_2–SiC composites[J]. Mater Sci Eng A, 2018, 716: 99–106.

[15] 汪长安, 王海龙, 王明福. 二硼化锆超高温陶瓷的强韧化[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(12): 1653–1660.
WANG Changan, WANG Hailong, WANG Mingfu. J Chin Ceram Soc, 2018, 46(12): 1653–1660.

[16] ZHANG S C, HILMAS G E, FAHRENHOLTZ W G, Pressureless Sintering of ZrB_2–SiC Ceramics[J]. J Am Ceram Soc, 2007, 91(1): 26–32.

[17] BALAK Z, ASL M S, AZIZIEH M, et al. Effect of different additives

and open porosity on fracture toughness of ZrB_2–SiC-based composites prepared by SPS[J]. Ceram Int, 2017, 43(2): 2209–2220.

[18] FAHRENHOLTZ W G, HILMAS G E. Refractory Diborides of Zirconium and Hafnium[J]. J Am Ceram Soc, 2007, 90(5): 1347–1364.

[19] ZHANG S C, HILMAS G E, FAHRENHOLTZ W G. Mechanical properties of sintered ZrB_2–SiC ceramics[J]. J Eur Ceram. Soc, 2011, 31(5), 893–901.

[20] LEE J H, JU J Y, KIM C H, et al. The Development of an Electroconductive SiC–ZrB_2 Composite through Spark Plasma Sintering under Argon Atmosphere[J]. J Electr Eng Technol, 2010, 5(2): 342–351.

[21] YANG H, ZHANG L J, GUO X Z, et al. Pressureless sintering of silicon carbide ceramics containing zirconium diboride[J]. Ceram Int, 2011, 37(6): 2031–2035.

[22] 张翠萍. 反应烧结碳化硼复合材料显微组织和力学性能的研究[D]. 东北大学, 2014.
ZHANG Cuiping. Study of microstructure and mechanical properties of reaction bonded boron carbide composites (in Chinese, dissertation). Northeastern University, 2014.

[23] 陈碧霜. 热压烧结 B_4C、ZrB_2/B_4C 陶瓷材料的组织与性能研究[D]. 东北大学, 2009.
CHENG Binshuang. Research of the microstructure and properties of B_4C and ZrB_2/B_4C ceramic material by hot-pressure sintering (in Chinese, dissertation). Northeastern University, 2009.

[24] 赵祖德. 复合材料固–液成形理论与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008, 5.

[25] 吴炳辉, 周立娟, 刘晓燕等. 复相导电陶瓷的导电机理分析[J]. 人工晶体学报, 2015, 44(12): 3537–3542.
WU Binghui, ZHOU Lijuan, LIU Xiaoyan, et al. J Synth Cryst (in Chinese), 2015, 44(12): 3537–3542.

JMAT 2021 年度优秀审稿专家

樊 贞 高兴森 Dawei Wang Haixue Yan 翟继卫 Shujun Zhang 张海波
张善涛 赵 磊 赵立东

《硅酸盐学报》2021 年度优秀审稿专家

白志民 曾惠丹 陈天虎 范丽珍 方必军 冯金奎 傅正义 李翠伟 李亚伟
李 勇 梁金生 廖立兵 凌立成 刘世民 刘数华 马鸿文 欧阳静 潘世烈
邱建荣 沈 强 施惠生 史才军 孙志明 汤庆国 汪长安 王 轲 王文中
王正宝 吴甲民 夏新辉 夏志国 向军辉 肖汉宁 徐家跃 阎培渝 姚 武
余家国 余 睿 余 彦 翟继卫 张波萍 张铁锐 张文生 赵海雷 郑水林
周荣飞