

# B<sub>4</sub>C-PrB<sub>6</sub>/CeB<sub>6</sub>汽车材料的制备及性能研究<sup>①</sup>

黄 樱<sup>1</sup>, 睢利铭<sup>2</sup>, 李 坤<sup>2</sup>

(1.河南交通职业技术学院 汽车学院,河南 郑州 450005; 2.河南工学院 车辆与交通工程学院,河南 新乡 453000)

**摘 要:** 分别以 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 和 CeO<sub>2</sub> 为添加剂,采用无压烧结、热压烧结和放电等离子烧结法分别在 2 200 °C、1 900 °C 和 1 700 °C 制备了 B<sub>4</sub>C 基复合材料,并对其微观结构和力学性能进行了研究。结果表明,通过原位反应形成的 PrB<sub>6</sub> 和 CeB<sub>6</sub> 可以填充 B<sub>4</sub>C 晶粒之间的孔隙,提高复合材料的致密性;与无压烧结和热压烧结相比,放电等离子烧结制备的复合材料具有更高的致密性;B<sub>4</sub>C-CeB<sub>6</sub> 复合材料断裂韧性得以提高的原因是实现了高致密以及裂纹沿着 CeB<sub>6</sub> 发生了偏转、分枝和桥联,最终延长了裂纹的扩展路径,降低了应力集中。采用放电等离子烧结制备的 B<sub>4</sub>C-CeB<sub>6</sub> 复合材料综合力学性能较好,相对密度、维氏硬度、抗弯强度和断裂韧性分别达到了 99.3%、34.7 GPa、451 MPa 和 4.38 MPa·m<sup>1/2</sup>。

**关键词:** 汽车材料; 碳化硼; 硼化镨; 硼化铈; 稀土掺杂; 添加剂; 制备工艺; 断裂韧性; 复合材料; 致密性

中图分类号: TF125

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.06.036

文章编号: 0253-6099(2023)06-0169-05

## Preparation and Properties of Automobile Material B<sub>4</sub>C-PrB<sub>6</sub>/CeB<sub>6</sub>

HUANG Ying<sup>1</sup>, SUI Liming<sup>2</sup>, LI Kun<sup>2</sup>

(1. School of Automobile, Henan College of Transportation, Zhengzhou 450005, Henan, China; 2. College of Vehicle and Traffic Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453000, Henan, China)

**Abstract:** With Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> and CeO<sub>2</sub> as additives, B<sub>4</sub>C matrix composite materials were prepared at 2 200 °C, 1 900 °C, and 1 700 °C by adopting techniques of pressureless sintering, hot pressing sintering, and spark plasma sintering, respectively. The relative microstructure and mechanical properties were also studied. It is found that PrB<sub>6</sub> and CeB<sub>6</sub> formed in situ can fill the pores between B<sub>4</sub>C grains, and improve the density of the composites. Compared with pressureless sintering and hot pressing sintering, the technique of spark plasma sintering can bring the prepared composites with higher density. The fracture toughness of B<sub>4</sub>C-CeB<sub>6</sub> composites can be improved due to its high relative density, as well as the deflection, branching and bridging of cracks occurring along CeB<sub>6</sub>, which extends the expansion path of cracks and reduces stress concentration. The B<sub>4</sub>C-CeB<sub>6</sub> composite prepared by spark plasma sintering has good comprehensive mechanical properties, with the relative density, vickers hardness, bending strength and fracture toughness reaching 99.3%, 34.7 GPa, 451 MPa and 4.38 MPa·m<sup>1/2</sup>, respectively.

**Key words:** automobile material; boron carbide; praseodymium borate; cerium boride; rare earth doping; additives; preparation process; fracture toughness; composite materials; density

汽车离合器材料在汽车工业中扮演着不可或缺的角色,但其需要满足极为严格的性能要求,如良好的耐磨性能、高强度以及低密度,同时这种材料还要兼具良好的韧性,使其在保证良好性能的基础上可以长时间稳定服役,避免因裂纹失效而产生严重后果<sup>[1-2]</sup>。近年来,碳化硼基复合材料引起广泛关注。碳化硼(B<sub>4</sub>C)

是一种硬质材料,常温及高温条件下具有仅次于金刚石和立方氮化硼材料的超高硬度(约 40 GPa),这一优良性能可以满足离合器材料耐磨要求<sup>[3-4]</sup>。同时 B<sub>4</sub>C 材料具有高强度和低密度,这也是汽车离合器材料需要的优良性质。此外,碳化硼材料还具有高熔点和耐腐蚀性,使其在汽车材料领域具有广阔的应用前

① 收稿日期: 2023-06-05

基金项目: 2019 年度河南省高等职业学校青年骨干教师培养计划项目(2019GZGG102)

作者简介: 黄 樱(1982—),女,河南郑州人,副教授,硕士研究生,主要从事汽车技术服务与营销、汽车检测与维修技术研究。

景<sup>[5-6]</sup>。

然而,  $B_4C$  是一类高共价键化合物, 相关研究表明其共价键含量超过了 93%, 因此断裂韧性很差<sup>[7-8]</sup>。 $B_4C$  扩散系数较低, 同时表面还被一层致密的  $B_2O_3$  覆盖, 延缓了  $B_4C$  分子的扩散与传输, 导致其制备非常困难, 往往需要特殊的制备工艺, 耗能耗时的同时还对设备要求较高, 这是  $B_4C$  在工业应用过程中面临的一个巨大难题<sup>[9]</sup>。

相关研究表明氧化镨 ( $Pr_6O_{11}$ ) 和氧化铈 ( $CeO_2$ ) 可以与  $B_4C$  发生原位反应, 形成稀土六硼化镨 ( $PrB_6$ ) 和稀土六硼化铈 ( $CeB_6$ )<sup>[10-11]</sup>。原位反应具有较高的烧结驱动力, 可以有效促进  $B_4C$  的烧结, 同时生成的稀土六硼化物可以进一步改善断裂韧性<sup>[12]</sup>。因此, 本文拟以  $Pr_6O_{11}$  和  $CeO_2$  为添加剂, 采用原位反应制备  $B_4C$  基复合材料, 同时对其微观结构和力学性能进行研究。

$B_4C$  复合材料的制备工艺主要为无压烧结、热压烧结和放电等离子烧结<sup>[13-15]</sup>。目前关于各种制备工艺所得  $B_4C$  复合材料样品力学性能对比的研究相对较少, 因此, 本文对不同制备工艺所得样品进行对比, 以确定适宜的烧结工艺。

## 1 实 验

实验所用原料包括  $B_4C$  粉体、 $Pr_6O_{11}$  粉体和  $CeO_2$  粉体, 各原料主要信息如表 1 所示。首先将质量分数 97% 的  $B_4C$  粉体和质量分数 3% 的  $Pr_6O_{11}$  或  $CeO_2$  粉体在无水乙醇介质中球磨混合 24 h, 所用设备为搅拌式球磨机。将混合后的粉体在干燥箱内真空干燥, 然后过筛, 去除颗粒较大的团聚粉体, 获得粒度均匀的混合粉体。

表 1 原料主要信息

原料名称	尺寸/ $\mu\text{m}$	纯度/%	产地
$B_4C$	1~3	99.0	大连金玛有限公司
$Pr_6O_{11}$	3	99.9	上海陆森纳米科技有限公司
$CeO_2$	3	99.9	上海陆森纳米科技有限公司

将制好的粉体分别采用无压烧结、热压烧结和放电等离子烧结法烧结成型。无压烧结的步骤为: 首先将粉体置于冷等静压机中成型, 然后在热压炉中加热到 2 200  $^{\circ}\text{C}$  并常压烧结 2 h。热压烧结的步骤为: 将粉体置于热压烧结炉中进行烧结, 烧结参数为: 以速率 20  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升温至 1 900  $^{\circ}\text{C}$ , 随后以 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升温至 1 950  $^{\circ}\text{C}$ , 保温 40 min, 施加压力 20 MPa, 最后冷却至

室温; 实验全程采用真空泵抽真空, 使炉体内部保持真空状态。放电等离子烧结的步骤为: 将粉体置于放电等离子烧结炉中, 温度迅速升至 1 700  $^{\circ}\text{C}$  后保温 5 min, 施加压力 50 MPa, 最后冷却至室温; 烧结过程中采用氩气气氛。各烧结工艺及助剂详细信息如表 2 所示。

表 2 烧结工艺和烧结助剂详细信息

样品编号	简写	烧结助剂	烧结方式
1	Pr1	$Pr_6O_{11}$	无压烧结
2	Ce1	$CeO_2$	无压烧结
3	Pr2	$Pr_6O_{11}$	热压烧结
4	Ce2	$CeO_2$	热压烧结
5	Pr3	$Pr_6O_{11}$	放电等离子烧结
6	Ce3	$CeO_2$	放电等离子烧结

将烧结后的样品切成 18 mm  $\times$  4 mm  $\times$  3 mm 长方体, 用砂纸打磨抛光表面后进行相对密度、维氏硬度、抗弯强度和断裂韧性测试。采用阿基米德排水法<sup>[10]</sup>测试相对密度; 使用 HVS-50Z 型显微维氏硬度计测试维氏硬度, 为了使数值更加准确, 每个样品测量 10 次, 排除误差较大的数值后取平均值; 采用三点弯曲法, 在 WDW-100 型万能试验机上测量抗弯强度; 采用压痕法<sup>[11]</sup>测试断裂韧性。测试完成后的样品再进行表面抛光或断裂处理, 采用 X 射线衍射 (XRD) 分析表面形貌, 采用扫描电子显微镜 (SEM) 分析断口形貌。实验及检测设备如表 3 所示。

表 3 实验及检测设备

设备	型号	生产厂家
搅拌式球磨机	MK-BG12S	山东美科仪器有限公司
热压炉	OTF-1200X-VHP4	合肥科晶技术材料有限公司
火花放电等离子炉	JD-T50-30K	苏州力碳新能源发展有限公司
X 射线衍射仪	Smart Lab 9KW	日本理学公司
X 射线能量色散谱仪	Merlin Compact	德国卡尔蔡司公司
场发射扫描电子显微镜	Merlin Compact	德国卡尔蔡司公司

## 2 结果与讨论

不同烧结工艺制备的  $B_4C$ - $PrB_6$ / $CeB_6$  复合材料样品 XRD 图谱见图 1。从图 1 可知, 以  $Pr_6O_{11}$  为烧结助剂时, 复合材料的物相均包含  $B_4C$ 、 $PrB_6$  和 C。烧结过程中发生化学反应(1), 形成  $PrB_6$ , 过量的  $B_4C$  充分消耗  $Pr_6O_{11}$ , 使得烧结过程中  $Pr_6O_{11}$  完全转化成  $PrB_6$ <sup>[10]</sup>。以  $CeO_2$  为烧结助剂时, 复合材料的物相均包含  $B_4C$ 、 $CeB_6$  和 C。烧结过程中发生化学反应(2),

形成 CeB<sub>6</sub>, 过量的 B<sub>4</sub>C 充分消耗 CeO<sub>2</sub>, 使得 CeO<sub>2</sub> 最终完全转化成 CeB<sub>6</sub><sup>[11]</sup>。不同样品中均发现了微量的 C, 这是由于 B<sub>4</sub>C 原本就是一类 C 含量不同的化合物, 粉体中都包含一定量的单质 C, C 在烧结过程中不与 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 或 CeO<sub>2</sub> 发生反应。从图 1 可以发现, 不同烧结工艺所得样品物相组成相同, 说明烧结工艺不会影响复合材料的组成。相较于无压烧结, 热压烧结和放电等离子烧结制备出的复合材料衍射峰强度较高, 说明复合材料表面平整、气孔较小、晶形保持较好。由图 1 还可知, 采用不同烧结工艺制备的复合材料中, 除基体相 B<sub>4</sub>C 外, 还产生了第二相 PrB<sub>6</sub>/CeB<sub>6</sub>, 除了微量的 C, 无其他杂质产生, 说明成功制备了 B<sub>4</sub>C-PrB<sub>6</sub>/CeB<sub>6</sub> 复合材料。

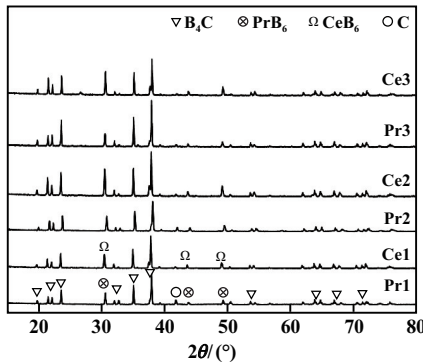
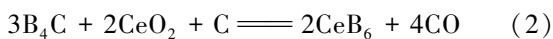
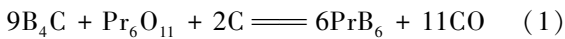


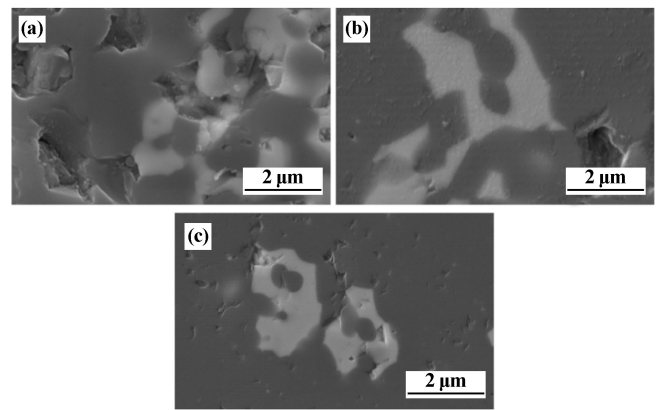
图 1 不同烧结工艺所得 B<sub>4</sub>C-PrB<sub>6</sub>/CeB<sub>6</sub> 复合材料 XRD 图谱



采用不同烧结工艺制备的 B<sub>4</sub>C-PrB<sub>6</sub> 复合材料样品的表面抛光扫描电镜图如图 2 所示。从图 2 可以发现, 复合材料主要包含两种物相: 黑色相为 B<sub>4</sub>C, 灰色相为 PrB<sub>6</sub>。采用无压烧结制备出的样品表面存在较大孔洞, 表面呈现凹凸不平的形貌。热压烧结制备的复合材料表面较为平整, 较大的孔洞不多, 致密性较好, 这是由于在热压烧结过程中, 烧结体同时受到温度和压力的作用, B<sub>4</sub>C 晶界发生软化, PrB<sub>6</sub> 填充到晶粒间的孔隙之中, 最终促进了烧结体的致密。采用放电等离子烧结法制备的复合材料表面孔洞进一步减少, 组织形貌更均匀, 这是由于放电等离子烧结压力更大, 烧结体之间的部分闭孔被压实并被填充, 样品具有良好的平面形貌, 保持较好的晶形。

由以上分析可知, 不同烧结工艺制备的 B<sub>4</sub>C 复合材料表面微观形貌存在很大差异, 同时烧结压力对复合材料的致密性起着重要作用。为了探究不同烧结工艺的致密性机理, 图 3 给出了理想情况下气孔在烧结

体内的分布示意图。



(a) 无压烧结; (b) 热压烧结; (c) 放电等离子烧结

图 2 不同烧结工艺所得 B<sub>4</sub>C-PrB<sub>6</sub> 复合材料 SEM 图

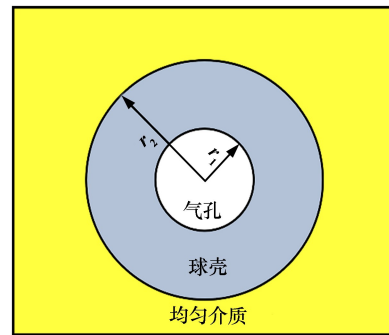


图 3 理想情况下气孔在烧结体内的分布示意图

假设气孔(半径为  $r_1$ )为球体且外部被一个不可压缩的球壳(半径为  $r_2$ )包围, 球壳外侧为均匀介质。随着烧结过程的进行, 体系吉布斯自由能减小, 这使得孔隙的比表面应力减少, 最终导致气孔减小:

$$\sigma = \frac{-2\gamma}{r_1} \quad (3)$$

式中  $\sigma$  为比表面应力;  $\gamma$  为材料表面张力。由塑性体的流动方程和孔隙表面能的减小等于变形功可导出无外力作用烧结致密化速度方程式为:

$$\left(\frac{d\rho}{dt}\right)_{P=0} = \frac{3\gamma}{2\eta r_1} (1-\rho) \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{2\gamma} \tau_c r_1 \ln \frac{1}{(1-\rho)}\right] \quad (4)$$

式中  $\rho$  为相对密度, 即孔隙加致密材料球壳的平均密度与材料理论密度之比;  $\tau_c$  为材料的屈服极限;  $\eta$  为材料的黏度;  $P$  为外力。

当有外力作用时, 烧结体致密化速度方程式为:

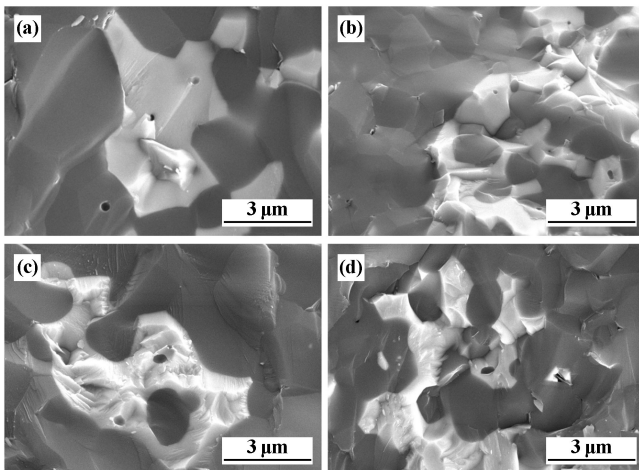
$$\left(\frac{d\rho}{dt}\right)_{P>0} = \frac{3\gamma}{2\eta r_1} \left(1 + P \frac{r_1}{2\gamma}\right) (1-\rho) \cdot \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{2\gamma \left(1 + P \frac{r_1}{2\gamma}\right)} \tau_c r_1 \ln \frac{1}{(1-\rho)}\right] \quad (5)$$

对比式(4)和式(5),发现:

$$\left(\frac{d\rho}{dt}\right)_{P>0} = \left(\frac{d\rho}{dt}\right)_{P=0} + \frac{3P}{4\eta}(1-\rho) \quad (6)$$

式(6)表明,有外力作用时,烧结体致密化的驱动力除了孔隙减少的表面能还有外力<sup>[16]</sup>。外力作用下烧结体致密化速度大于无外力作用时,因此热压烧结更有利于烧结体的致密化。此外随着 $P$ 增加,烧结体致密化速度逐渐增加。放电等离子烧结法具有更高的烧结压力,因此其表面孔洞更少,烧结致密化速度更快。以上计算结果表明,放电等离子烧结法制备的复合材料具有更高的致密性,同时可以保持更快的致密化速度。

采用热压烧结和放电等离子烧结制备的 $B_4C-CeB_6$ 和 $B_4C-PrB_6$ 复合材料断口形貌见图4。从图4可见,无论是 $CeB_6$ 还是 $PrB_6$ 都很好嵌入到 $B_4C$ 晶粒间,起到了填充孔隙的作用,提高了复合材料的致密性。对比发现,热压烧结制备的复合材料晶粒尺寸大于放电等离子烧结制备的复合材料晶粒尺寸,这是由于热压烧结过程温度较高,保温时间较长, $B_4C$ 晶粒在高温条件下异常长大。从图4还发现,在 $PrB_6$ 和 $CeB_6$ 相处均出现一些细小气孔,这可能是由于反应产物 $Pr_6O_{11}$ 和 $CeO_2$ 中的“O”原子在烧结过程中与 $B_4C$ 发生反应,形成了碳化物气体并残留在烧结体内。以上现象在文献[8]有类似报道。



(a) 热压烧结, $B_4C-CeB_6$ ; (b) 放电等离子烧结, $B_4C-CeB_6$ ;  
(c) 热压烧结, $B_4C-PrB_6$ ; (d) 放电等离子烧结, $B_4C-PrB_6$

图4 热压烧结和放电等离子烧结制备的 $B_4C-CeB_6$ 和 $B_4C-PrB_6$ 复合材料断口形貌

图5为不同样品相对密度和力学性能变化。从图5可见,采用无压烧结制备的 $B_4C-PrB_6$ 和 $B_4C-CeB_6$ 复合材料相对密度低于热压烧结和放电等离子烧结制备

的复合材料。这是由于无压烧结过程中,烧结的驱动力仅仅包含热能和化学能,没有机械能,烧结体很难被压实致密。 $B_4C-CeB_6$ 复合材料相对密度略高于 $B_4C-PrB_6$ 复合材料,这可能是由于原位生成的 $CeB_6$ 对 $B_4C$ 晶粒间气孔的填充率优于 $PrB_6$ ,使其保持了较高的致密性。

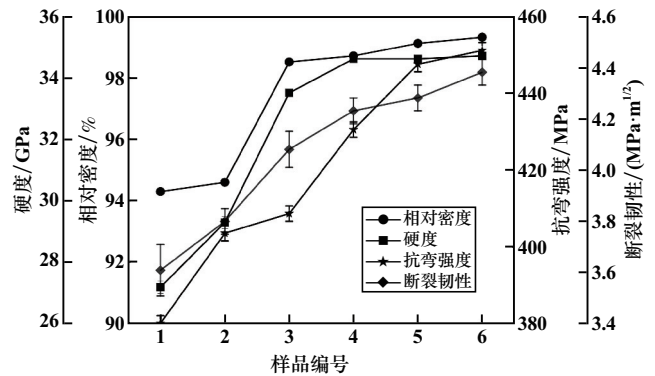


图5 不同样品相对密度和力学性能变化

热压烧结和放电等离子烧结制备的复合材料具有更高的致密性,而硬度值和致密度呈线性负相关,硬度越高,气孔率越低,在生成的 $PrB_6$ 和 $CeB_6$ 含量相同的情况下,无压烧结制备出的样品硬度更低。放电等离子烧结因烧结温度低、保温时间短,所得样品晶粒尺寸更小,具有更高的抗弯强度。研究表明,原位生成的 $CeB_6$ 和 $PrB_6$ 均会对高温条件下的 $B_4C$ 晶粒长大产生一定的阻碍作用,因此 $B_4C-PrB_6/CeB_6$ 复合材料在较高温度下仍能保持较小的晶粒尺寸,最终使其抗弯强度明显升高<sup>[10-11]</sup>。但由图5可知, $B_4C-CeB_6$ 复合材料抗弯强度高于 $B_4C-PrB_6$ 复合材料,可见 $CeB_6$ 对 $B_4C$ 晶粒长大的阻碍作用明显高于 $PrB_6$ 。

无压烧结制备的复合材料孔隙较高,在外加载荷过程中,这些孔隙处往往会萌生微裂纹,造成局部断裂。因此高致密性是复合材料断裂韧性得以提高的前提<sup>[10]</sup>。本文采用热压烧结或放电等离子烧结,同时以 $Pr_6O_{11}$ 或 $CeO_2$ 为添加剂,最大程度地提高了相对密度,使断裂韧性得到了进一步改善。

图6为 $B_4C-CeB_6$ 复合材料中裂纹的扩展路径图。从图6可见,裂纹在扩展过程中遇到 $CeB_6$ 时会沿着 $CeB_6$ 晶界发生偏转,从而扩展路径延长。扩展路径延长使得 $B_4C-CeB_6$ 复合材料断裂需要更多能量,因而提高断裂韧性。裂纹在 $CeB_6$ 处发生了分枝,分散了裂纹尖端应力,也会提高断裂韧性。裂纹在 $CeB_6$ 处发生了桥联现象,桥联过程中, $CeB_6$ 两侧界面向裂纹施加闭合应力,抑制裂纹萌生,也会提高断裂韧性。

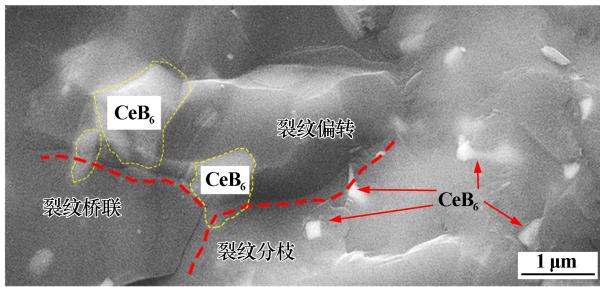


图6  $B_4C$ - $CeB_6$  复合材料中裂纹扩展路径图

综上所述,高致密是  $B_4C$  基复合材料断裂韧性得以提高的前提。在  $B_4C$ - $CeB_6$  复合材料中,裂纹沿着  $CeB_6$  发生偏转、分枝和桥联是复合材料断裂韧性得以提高的原因。采用放电等离子烧结法制备的  $B_4C$ - $CeB_6$  复合材料综合力学性能较好,相对密度、维氏硬度、抗弯强度和断裂韧性分别达到了 99.3%、34.7 GPa、451 MPa 和  $4.38 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

### 3 结 论

以  $Pr_6O_{11}$  和  $CeO_2$  为添加剂,采用无压烧结、热压烧结和放电等离子烧结法制备了  $B_4C$  基复合材料,并对其微观结构和力学性能进行研究,得出以下结论:

1) 采用无压烧结、热压烧结和放电等离子烧结法均成功制备出  $B_4C$ - $PrB_6$  和  $B_4C$ - $CeB_6$  复合材料。

2) 原位形成的  $PrB_6$  和  $CeB_6$  可以填充  $B_4C$  晶粒之间的孔隙,提高复合材料致密性。通过理论计算发现,相较于无压烧结和热压烧结,放电等离子烧结制备的复合材料具有更高的致密性。

3) 高致密是  $B_4C$  基复合材料断裂韧性得以提高的前提,裂纹沿着  $CeB_6$  发生偏转、分枝和桥联是复合材料断裂韧性得以提高的原因。采用放电等离子烧结制备的  $B_4C$ - $CeB_6$  复合材料综合力学性能较好,相对密度、维氏硬度、抗弯强度和断裂韧性分别达到了 99.3%、34.7 GPa、451 MPa 和  $4.38 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

#### 参考文献:

[1] 李 妍,崔志华,王 强. 硼铸铁汽车引擎汽缸套切削加工用 PCBN 刀具材料的制备与切削性能研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(6): 163-166.

- [2] 杨桂娟,杨胜才,王冠群. 温度对汽车零部件切削加工用 PCBN 复合材料结构与性能的影响研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):145-148.
- [3] 黄 健,陈石林,李姗姗,等. C-SiC- $B_4C$  复合材料烧结曲线的制定研究[J]. 矿冶工程, 2011,31(3):115-118.
- [4] MA Q C, ZHANG G J, KAN Y M, et al. Effect of additives introduced by ball milling on sintering behavior and mechanical properties of hot-pressed  $B_4C$  ceramics[J]. *Ceramics International*, 2010,36: 167-175.
- [5] Yamada S, Hirao K, Yamauchi Y, et al. High strength  $B_4C$ - $TiB_2$  composites fabricated by reaction hot-pressing[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2003,23(7):1123-1129.
- [6] 赵 亮,李艳国,邹 芹,等.  $B_4C$  的研究现状及发展前景[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2019,39(5):123-131.
- [7] 张国峰,晏朝晖,庞晓轩,等.  $B_4C$ /Al 复合材料研究进展[J]. 科技与创新, 2018(21):30-36.
- [8] YANG M S, ZHANG Y X, XING P F. High-performance  $B_4C$ - $LaB_6$  composite ceramics fabricated via hot-pressing sintering with  $La_2O_3$  as sintering additive[J]. *Ceramics International*, 2021,47(6):32675-32684.
- [9] ZHANG Z X, XU C J, DU X W, et al. Synthesis mechanism and mechanical properties of  $TiB_2$ -SiC composites fabricated with the  $B_4C$ -TiC-Si system by reactive hot pressing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 619(1):26-30.
- [10] YANG M S, WANG L J, LI H Q, et al. Microstructure and mechanical properties of  $B_4C$  matrix composites prepared via hot-pressing sintering with  $Pr_6O_{11}$  as additive[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(6): 7897-7904.
- [11] XU J Y, WU W Y, BIAN X, et al. High temperature chemical reaction and phase composition in  $CeO_2$ - $B_4C$ -C System[J]. *Chinese Rare Earths*, 2008, 29(1):10-18.
- [12] 张卫珂,常 杰,张 敏,等. Si 对热压烧结  $B_4C$  陶瓷材料显微结构与性能的影响[J]. 人工晶体学报, 2013,42(13):2577-2581.
- [13] 尹素花,董中奇,彭可武,等.  $CeO_2$  对  $B_4C$ - $CeB_6$ /Al 复合材料组织性能的影响[J]. 中国稀土学报, 2020,28(3):77-82.
- [14] ZHU M, CHEN J, RAN N, et al. The electrical conductivity properties of  $B_4C$  ceramics by pressureless sintering[J]. *Ceramics International*, 2020,46(10):16447-17451.
- [15] LI P H, MA M D, WU Y J, et al. Preparation of dense  $B_4C$  ceramics by spark plasma sintering of high-purity nanoparticles[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021,41(2):3929-3935.
- [16] 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京:冶金工业出版社, 1982.

引用本文:黄 樱,睢利铭,李 坤.  $B_4C$ - $PrB_6$ / $CeB_6$  汽车材料的制备及性能研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):169-173.