

引文格式: 李冰, 赵科, 刘佃光, 等. 振荡热压烧结 ZrB_2 -SiC 陶瓷的力学性能[J]. 航空制造技术, 2024, 67(13): 100-105, 112.

LI Bing, ZHAO Ke, LIU Dianguang, et al. Mechanical properties of ZrB_2 -SiC ceramics sintered by hot oscillatory pressing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(13): 100-105, 112.

振荡热压烧结 ZrB_2 -SiC 陶瓷的力学性能

李冰, 赵科, 刘佃光, 刘金铃

(西南交通大学, 成都 611756)

[摘要] 采用振荡热压烧结(HOP)和热压烧结(HP)工艺制备了 ZrB_2 -SiC 陶瓷, 研究了振荡压力对 ZrB_2 -SiC 陶瓷致密化及力学性能的影响。结果表明, 与采用 HP 工艺制备 ZrB_2 -SiC 陶瓷相比, HOP 工艺的致密化速率有显著提升; ZrB_2 与 SiC 两相界面结合良好; HOP 工艺制备的 ZS30 样品的硬度和断裂韧性分别达到了 21.1 GPa 和 7.3 MPa \cdot m^{1/2}, 较采用 HP 工艺在相同烧结参数下制备的试样有大幅提升。HOP 在制备高性能 ZrB_2 -SiC 陶瓷方面展现出良好发展前景。

关键词: 超高温陶瓷(UHTCs); ZrB_2 ; 烧结; 致密化; 力学性能

Mechanical Properties of ZrB_2 -SiC Ceramics Sintered by Hot Oscillatory Pressing

LI Bing, ZHAO Ke, LIU Dianguang, LIU Jinling

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

[ABSTRACT] ZrB_2 -SiC ceramics were prepared using hot oscillatory pressing (HOP) and hot pressing (HP) processes, and the effect of oscillatory pressure on the densification and mechanical properties of ZrB_2 -SiC ceramics was investigated. The results have shown that compared to using the HP process to fabricate ZrB_2 -SiC ceramics, the densification rate of HOP process has been improved significantly, and the interface between ZrB_2 and SiC is well bonded; The hardness and fracture toughness of the ZS30 sample prepared by the HOP process reached 21.1 GPa and 7.3 MPa \cdot m^{1/2}, respectively, which were significantly improved compared to the samples prepared by the HP process under the same sintering parameters. HOP has shown good development prospects in the preparation of high-performance ZrB_2 -SiC ceramics.

Keywords: Ultra-high temperature ceramics (UHTCs); ZrB_2 ; Sintering; Densification; Mechanical properties

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.13.100

现代空天飞行器, 例如高超音速飞机、导弹、再入飞行器等, 正朝着高推力、高速度和远距离的方向发展。制造空天飞行器的鼻锥、前缘、超燃冲压发动机燃烧室等部件必须用到超高温材料, 这些部件在使用过程中都需要承受 2500 °C 以上的高温, 这使得超高温材料的发展需求越来越迫切^[1-3]。

ZrB_2 是一种具有良好发展前景的超高温陶瓷(Ultra-high temperature ceramics)材料, 具有优异的综合性能, 如较低的密度、高熔点、高硬度、高热导率和电导率、良好的抗氧化性能, 以及较高的力学性能等^[2]。 ZrB_2 在高

温下与氧气发生反应形成的液相 B_2O_3 在 1100 °C 以下能有效阻挡氧原子的扩散, 使得 ZrB_2 陶瓷展现出优异的抗氧化能力^[2-6]。当温度超过 1200 °C 后, B_2O_3 的快速挥发会使其对 ZrB_2 陶瓷的保护能力急剧降低^[2-3]。研究发现, 往 ZrB_2 陶瓷中添加 SiC 能够在 1200 °C 以上形成 Si-B-O/SiO₂ 玻璃相, 可大幅提高其抗高温氧化性能^[5-6]。同时, SiC 的引入对提高 ZrB_2 陶瓷的室温与高温力学性能、抗烧蚀性能及抗热冲击性能有显著效果^[2-4]。此外, SiC 还可以有效阻碍 ZrB_2 的晶粒长大, 提升 ZrB_2 陶瓷的烧结性能^[2-3]。因此, ZrB_2 -SiC 体系是目前最受关

注的超高温陶瓷材料之一。

制备 ZrB_2 -SiC 陶瓷通常采用无压烧结、热压烧结 (HP)、反应热压烧结,以及放电等离子烧结等方法^[7-15]。振荡热压烧结 (Hot oscillatory pressing, HOP) 是新发展的一种压力烧结技术^[16],如图 1 所示,采用振荡压力替代了传统热压烧结中的恒定压力。振荡热压烧结已在制备 Al_2O_3 ^[17-18]、 ZrO_2 ^[19-20]、 B_4C ^[21]、 Si_3N_4 ^[22]、 AlN ^[23] 等多种单相陶瓷中有广泛研究。Liu^[17] 和 Yuan^[18] 等发现,相比于热压烧结,采用 HOP 制备的 Al_2O_3 陶瓷致密度更高、晶粒尺寸更小,且具有更高的硬度和弯曲强度。Liu 等^[17] 发现在 Al_2O_3 陶瓷的各烧结阶段施加振荡压力对样品力学性能的提升都有明显效果,且烧结温度越高,振荡热压烧结的 Al_2O_3 陶瓷的力学性能越好。Fan 等^[19] 认为在氧化锆陶瓷坯体相对密度 <90% 的条件下,由 HOP 制备氧化锆陶瓷的致密化机制由晶界滑移主导。Li 等^[20] 采用 HOP 工艺制备氧化锆陶瓷,发现采用 HOP 和 HP 时晶粒快速生长的起始温度相同,但 HOP 制备的晶粒生长速率低于 HP,并认为当烧结温度高于某一临界值时, HOP 比 HP 更有利于致密化,得到的样品具有更高的硬度。

HOP 工艺在制备复相陶瓷方面也显现出了良好效果,研究人员采用 HOP 工艺获得了高性能的 ATZ^[24]、 Al_2O_3 - ZrO_2 ^[25]、 ZrO_2 - ZrO_2 ^[25]、 SiC_w - Al_2O_3 - ZrO_2 ^[26]、 Al_2O_3 - SiC_w (SiC_w 体积分数 25%)^[27]、ZTA^[28] 和 SiC_w - Si_3N_4 ^[29] 等复相陶瓷材料。采用 HOP 工艺制备 ATZ 陶瓷能够显著抑制晶粒生长,获得比 HP 工艺更细小的晶粒,表明 HOP 是一种比 HP 更有优势的烧结工艺^[30]; HOP 制备的 SiC_w - Al_2O_3 - ZrO_2 的弯曲强度相比 HP 提高了 10%,硬度从 12.59 GPa 增加到 13.19 GPa,断裂韧性从 $6.31 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 增加到 $6.67 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ^[26]; HOP 制备的 Al_2O_3 - SiC_w (SiC_w 体积分数 25%) 陶瓷的弯曲强度和硬度比 HP 制备的分别高出 10% 和 3.5%^[27]; HOP 制备的 SiC_w - Si_3N_4 的弯曲强度和断裂韧性相比 HP 制备的分别增加了 14.7% 和 11.6%^[29]。上述研究结果表明, HOP 工艺可以降低烧结温度、缩短烧结时间、抑制晶粒生长; HOP 工艺还可以促进颗粒重排、晶界滑移和塑性变形,有利于消除残余气孔,从而提高材料的烧结密度和力学性能, HOP 工艺为制备高性能陶瓷材料提供了一种新方法。

本文采用 HOP 工艺制备 ZrB_2 -SiC 超高温陶瓷,研究了振荡压力对 ZrB_2 -SiC 陶瓷致密化的影响,并对其室温弯曲性能、断裂韧性和硬度进行了测试,分析了振荡压力在 ZrB_2 -SiC 陶瓷烧结中的有益效果,为 HOP 应用于制备高性能 ZrB_2 -SiC 陶瓷奠定了基础。

1 试验及方法

本文选用市售 ZrB_2 粉体(平均尺寸约为 $1\sim 3 \mu\text{m}$,质量分数 99.9%,北京华威锐科有限公司)和 SiC 粉体(平均尺寸约为 $0.6 \mu\text{m}$,质量分数 99.9%,上海超威纳米科技有限公司)为原料,两种粉体按照 ZrB_2 : SiC=7:3 的体积配比(以下简称 ZS30)称重后置于聚四氟乙烯球磨罐中,加入 200 mL 无水乙醇作为球磨介质配成悬浮液,磨球为高纯 ZrO_2 球,通过罐磨机混合均匀。 ZrB_2 -SiC 复合粉体微观形貌如图 2 所示。

采用 HOP 制备 ZrB_2 -SiC 陶瓷的过程如下。称取 ZrB_2 -SiC 粉体约 20 g,放入内径为 30 mm 的石墨模具中,采用 2 MPa 的压力经电动压片机预压粉体,再将其放置在振荡热压烧结炉 (OPS-2020,成都易飞得材料科技有限公司)中进行烧结。先将炉内真空度抽至 10 Pa 以下,然后以 $15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升至 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$,再降低升温速率,以 $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升至 $1800 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在温度到达烧结温度之前,将施加在样品上的压力缓慢升高至 30 MPa 或 40 MPa,然后在保温阶段分别施加 30 MPa (相当于 HP 工艺)、 $(30 \pm 5) \text{ MPa}$ 、 $(30 \pm 10) \text{ MPa}$

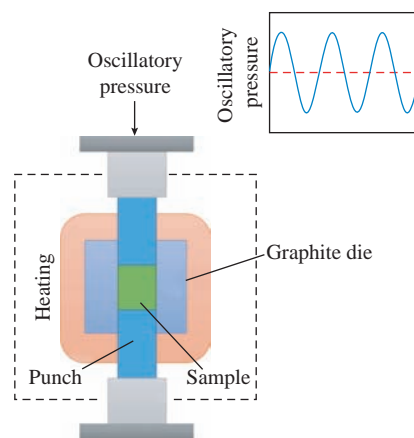


图 1 振荡热压烧结装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of hot oscillating pressing device

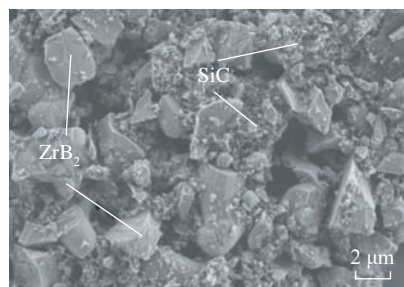


图 2 ZrB_2 -SiC 复合粉体形貌

Fig.2 Morphology of ZrB_2 -SiC composite powder

和 (40 ± 5) MPa 的振荡压力,振荡频率均为 2 Hz;保温 1 h 后停止加热并去除外加压力,降温速率设定为 $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,温度降至 $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 后,降温速率设定为 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,直至炉温降至 $900\text{ }^\circ\text{C}$;然后关闭加热电源,样品随炉冷却至室温后取出。

采用阿基米德排水法测量试样的密度;采用 X 射线衍射仪 (Panalytical Empyrean 型,荷兰帕纳科公司)对烧结后试样的物相成分进行分析;采用扫描电子显微镜 (Sigma 500,德国蔡司公司)观察试样表面及断口的微观结构;采用光学显微镜 (BX51 型,日本奥林巴斯公司)分析试样表面平整度,观察试样表面维氏硬度压痕。

将烧结的 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 陶瓷样品加工成尺寸为 $2\text{ mm} \times 1.5\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ 的长条试样,采用三点弯曲法在万能试验机 (INSTRON LEGEND 2367 型,美国英斯特朗公司)上测试试样的抗弯强度,加载速率设置为 $0.5\text{ mm}/\text{min}$,跨距设置为 15 mm ,试样断裂立即终止试验。采用单边切口梁法 (SENB) 表征陶瓷材料的断裂韧性,首先将烧结的 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 陶瓷样品加工成尺寸为 $2\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 22\text{ mm}$ 的试样,并对试样表面进行打磨和抛光;然后在试样中间位置加工 1 个宽度约 0.2 mm 、深度约 2 mm 的“U”形切口,通过三点弯曲法测试试样的断裂韧性(加载速率 $0.05\text{ mm}/\text{min}$ 、跨距 16 mm)。采用维氏硬度仪 (200HV-5,莱州华银实验仪器有限公司)测试 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 陶瓷的硬度,试验力为 5 kg ,保压时间为 15 s 。

2 结果与讨论

2.1 致密化过程

图 3 展示了采用不同振荡压力制备 ZS30 陶瓷时,试样相对密度随保温时间的变化曲线。可以发现,所有样品在保温阶段的起始相对密度差别不大,约为 87%。施加振荡压力烧结的样品,其致密化速率比未施加振荡压力的样品要高得多,但是振荡压力的大小对致密化速率的影响不太明显。施加振荡压力的样品在 30 min 左右达到几乎完全致密;而施加恒定压力的样品,其达到完全致密的时间需要 50 min 以上,这说明振荡压力能够大幅缩短致密化时间。当试样的相对密度为 87%~90% 时,振荡压力对致密化速率的影响较小,振荡压力对致密化的作用呈现出随保温时间延长先增强后减弱的趋势。此时,恒定压力烧结和振荡压力烧结具有相同的致密化机理,都是原子扩散占主导,所以两者的致密化速率没有显著差异。随着相对密度的增加,气孔逐渐封闭,成为不连续状态,振荡压力激活了晶界滑移和等塑性变形等机制,增加了扩散通道,有利于气孔的

排出,使得致密化速率加快。

2.2 力学性能与断口表征

表 1 为采用 HOP 方式在不同烧结条件下制备的 ZS30 样品的相对密度和弯曲强度。可以看出所有样品都达到了较高的相对密度,但是 HOP 制备的样品密度均高于恒定压力烧结的样品,其相对密度达到了 99% 以上。相比采用恒定压力烧结的样品,HOP 制备样品的弯曲强度都要低。HOP 的烧结时间和振荡压力幅值对弯曲强度的影响比较显著。可以发现采用 (30 ± 5) MPa 振荡压力烧结获得的样品,其弯曲强度随保温时间的缩短有明显提升,最高达到了 (998 ± 58) MPa。在相同保温时间的条件下,采用 10 MPa 振荡压力幅值烧结的样品,其弯曲强度达到了 (910 ± 23) MPa,相比振荡压力幅值为 5 MPa 的样品提高了 4.7%。采用 (40 ± 5) MPa 振荡压力烧结获得的样品,其弯曲强度没有明显变化。

图 4 展示了三 点弯曲试样的断口形貌。可以看出,所有试样内部都很致密,没有观察到明显的气孔,这和密度测试结果一致。恒定压力烧结的样品晶粒尺寸较

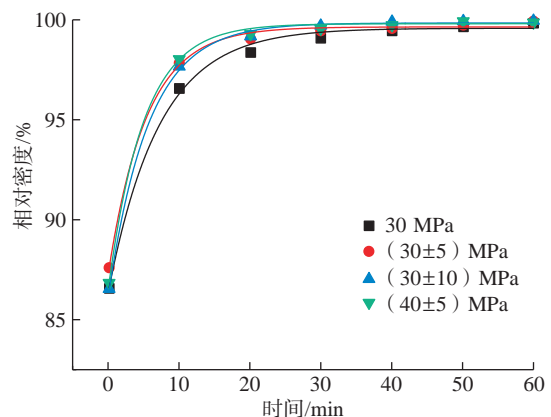


图 3 不同振荡压力烧结的 ZS30 样品相对密度随保温时间的变化曲线

Fig.3 Curves of relative density varying with holding time of ZS30 samples sintered by different oscillatory pressures

表 1 不同烧结条件下 ZS30 样品弯曲性能

Table 1 Flexural strength of ZS30 samples under different sintering conditions

烧结条件	相对密度 /%	弯曲强度 σ /MPa
$1800\text{ }^\circ\text{C}$, 30 MPa, 60 min	99.8	1083 ± 92
$1800\text{ }^\circ\text{C}$, (30 ± 5) MPa, 30 min	99.9	998 ± 58
$1800\text{ }^\circ\text{C}$, (30 ± 5) MPa, 60 min	99.9	869 ± 148
$1800\text{ }^\circ\text{C}$, (30 ± 10) MPa, 60 min	99.9	910 ± 23
$1800\text{ }^\circ\text{C}$, (40 ± 5) MPa, 60 min	99.9	874 ± 148

小,振荡热压烧结的样品晶粒尺寸明显较大。根据图3的致密化曲线可知,振荡热压烧结的样品在保温30 min后,就基本达到了完全致密,后续的保温过程可能会造成显著的晶粒生长,这和图4所展示的断口晶粒尺寸相符。晶粒尺寸增大,会导致 ZrB_2 -SiC陶瓷的弯曲强度降低,这可以部分解释保温60 min的HOP制备样品弯曲强度较低的原因。另一方面,振荡热压烧结相比恒定压力烧结更容易引入晶体缺陷^[32-35],会造成晶粒的动态长大,这也可能导致HOP制备的样品具有较大的晶粒尺寸。从图4中还可以看出,在HOP制备的ZS30样品中,大量灰黑色的SiC晶粒被包裹在灰白色的 ZrB_2 晶粒中(图4中圆圈所示的位置),这是 ZrB_2 晶粒发生了明显的晶粒生长所产生的结果。由于 ZrB_2 和SiC的热膨胀系数存在差异,在试样降温过程中会在 ZrB_2 晶粒内部产生残余热应力,这也会造成HOP制备样品弯曲强度降低。

通过分析三点弯曲试样的断口形貌可以发现,恒定压力烧结的ZS30样品呈现穿晶断裂和沿晶断裂共存的现象,灰白色的 ZrB_2 晶粒和灰黑色的SiC晶粒都有明显的沿晶断裂特征。而振荡热压烧结的ZS30样品主要

以穿晶断裂为主,尤其是粗大的灰白色的 ZrB_2 晶粒几乎观察不到沿晶断裂的特征,且在部分区域发现SiC晶粒嵌入 ZrB_2 晶粒中, ZrB_2 、SiC都为穿晶断裂。一般而言,接近完全致密的复相陶瓷试样,由于晶粒间形成了较强的键合作用,其断裂面以穿晶断裂为主^[31]。这也说明HOP相比恒定压力烧结可以达到更高的烧结密度和更强的界面结合,为制备高性能 ZrB_2 -SiC陶瓷提供了新途径。

表2给出了30 MPa恒定压力烧结和 (30 ± 5) MPa、 (30 ± 10) MPa、 (40 ± 5) MPa HOP制备的ZS30样品的硬度和断裂韧性,并和文献[32-37]中的数据进行了对比。可以看出,HOP制备的ZS30样品的维氏硬度最高,达到了 (21.1 ± 0.7) GPa,相比恒定压力烧结的样品有显著提升。维氏硬度测试是一种压入测试方法,反映的是试样微区的力学性能,结合图4所展示的显微结构可知,HOP制备的样品中 ZrB_2 晶粒尺寸相比恒定压力烧结的样品要粗大,其硬度提升的原因很可能是由于引入了晶体缺陷^[38-40]。图5展示了采用 (30 ± 10) MPa的振荡压力烧结60 min后试样的TEM照片。可以看出,在HOP过程样品中引入了位错、层错和孪晶等晶体

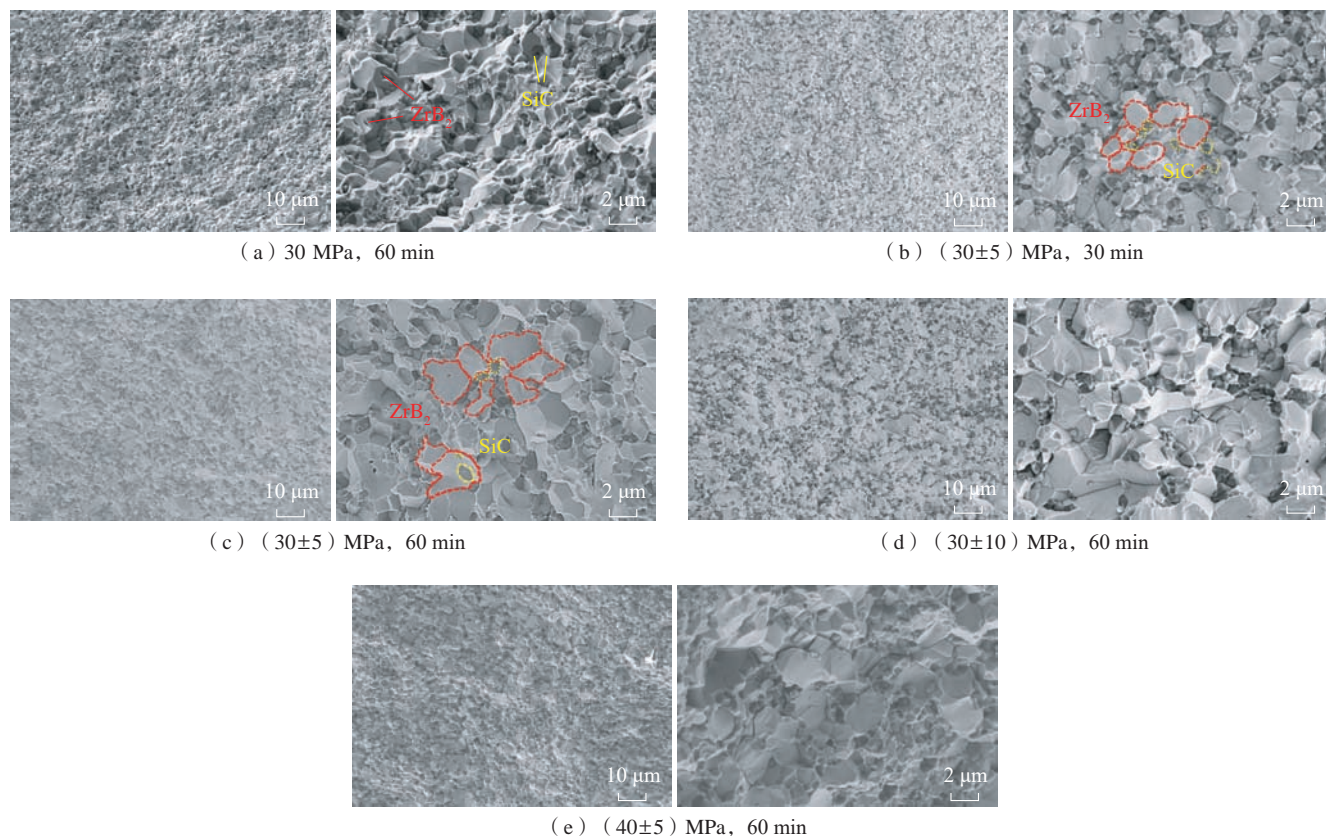


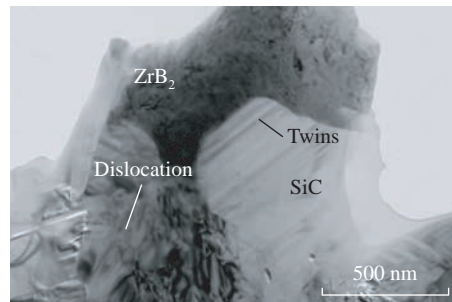
图4 三点弯曲试样的断口形貌

Fig.4 Fractographs of three-point bending specimens

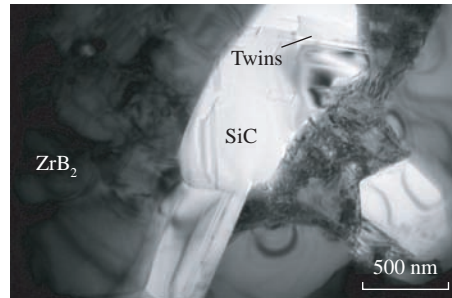
表 2 ZS30 样品的硬度和断裂韧性
Table 2 Hardness and fracture toughness of ZS30 specimens

烧结方式	颗粒尺寸 / μm		烧结条件			维氏硬度 /GPa	断裂韧性 K_{IC} / ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	来源
	ZrB ₂	SiC	温度 / $^{\circ}\text{C}$	振荡压力 /MPa	时间 /min			
HOP	1~3	0.6	1800	30	60	17.6 ± 0.5 (5 kgf)	5.5 ± 0.6	本文试验
	1~3	0.6	1800	30 ± 5	60	20.1 ± 0.5 (5 kgf)	6.6 ± 0.5	本文试验
	1~3	0.6	1800	30 ± 10	60	21.1 ± 0.7 (5 kgf)	7.3 ± 0.1	本文试验
	1~3	0.6	1800	40 ± 5	60	20.8 ± 0.7 (5 kgf)	7.0 ± 0.1	本文试验
HP	2	0.5	1950	30	60	19.6 ± 0.9 (5 kgf)	5.6 ± 0.5	[32]
	6	0.45	1900	32	45	19.3 ± 0.6 (0.2 kgf)	4.2 ± 0.2	[33]
	6	0.7	1900	32	45	20.7 ± 1.0 (0.2 kgf)	4.6 ± 0.1	[34]
	2	0.5	1950	30	60	—	5.6 ± 0.5	[35]
	0.8	0.5	1950	30	60	—	4.3 ± 0.3	[36]
	~3.2	0.31	1900	32	45	—	5.4 ± 1.1	[37]

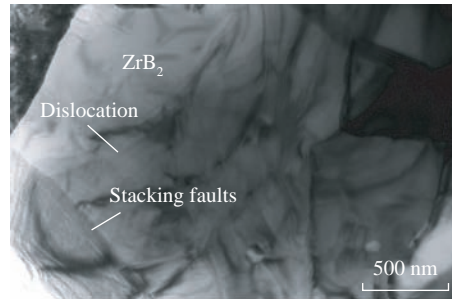
缺陷, SiC 晶粒中的缺陷以孪晶为主,而与 SiC 相邻的 ZrB₂ 晶粒中存在高密度的位错和层错,未与 SiC 相邻的 ZrB₂ 晶粒中缺陷较少,说明在 HOP 过程中, SiC 的塑性变形比 ZrB₂ 的塑性变形更加显著。需要指出的是,本文测试得到的恒定压力烧结的 ZS30 样品的硬度值明显低于文献报道的热压烧结的 ZS30 样品的数据,产生这种差异的原因可能是原料不同或者压痕测试所用载荷不同。从表 2 中数据可知,采用单边切口梁法测试通过 HOP 制备的 ZS30 样品断裂韧性达到了(7.3 ± 0.1) MPa · m^{1/2},远远高于恒定压力烧结的样品,也高于文献报道的热压烧结的 ZS30 样品的数据。而图 4 所展示的断口形貌也表明, HOP 制备样品的穿晶断裂特征更明显,说明裂纹在穿晶断裂过程中可能出现了其他的能量耗散方式,例如裂纹尖端产生塑性变形^[41],使得 HOP 制备的 ZS30 样品相比恒定压力烧结样品具有更好的断裂韧性。相比恒定压力烧结, HOP 同时提高了 ZrB₂-SiC 陶瓷的硬度和断裂韧性。根据图 5 的 TEM 分析结果可知, HOP 制备样品的硬度和断裂韧性提升应主要源于 ZrB₂ 和 SiC 晶粒中所产生的位错、层错和孪晶等晶体缺陷。Xu 等^[42]的研究表明, ZrB₂ 陶瓷中的位错密度和位错组态对位错滑移和裂纹扩展会产生显著的影响,从而提高材料的硬度和断裂韧性;同时孪晶片层也会使得裂纹扩展过程中的能量耗散增加,从而提高材料的力学性能。由此可见,振荡压力对材料力学性能的影响非常显著,通过 HOP 获得高性能的 ZrB₂-SiC 超高温陶瓷还需要进一步对工艺参数进行优化,合理调控晶粒尺寸和振荡压力引起的晶体缺陷。



(a) 局部明场TEM图像



(b) 包含位错的ZrB₂晶粒的明场TEM图像



(c) 包含层错的ZrB₂晶粒的明场TEM图像

图 5 HOP 样品的 TEM 表征

Fig.5 TEM characterization of the HOP samples

3 结论

本文探索了采用 HOP 制备高性能 ZrB_2-SiC 超高温陶瓷的新工艺。振荡压力可以加速致密化过程,缩短烧结时间,获得烧结密度更高的 ZrB_2-SiC 陶瓷。相比传统 HP 工艺, HOP 制备的 ZrB_2-SiC 陶瓷的硬度和断裂韧性同时提升,这可能是因为 HOP 工艺达到了更高的烧结密度和更强的界面结合,甚至引入了大量的位错、层错或孪晶等晶体缺陷。HOP 为调控 ZrB_2-SiC 陶瓷的力学性能提供了新的维度,在制备高性能 ZrB_2-SiC 超高温陶瓷方面有良好的发展前景。

参考文献

- [1] 杨亚政, 杨嘉陵, 方岱宁. 高超声速飞行器热防护材料与结构的研究进展 [J]. 应用数学和力学, 2008, 29(1): 47–56.
- YANG Yazheng, YANG Jialing, FANG Daining. Research progress on the thermal protection materials and structures in hypersonic vehicles[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2008, 29(1): 47–56.
- [2] 陈玉峰, 洪长青, 胡成龙, 等. 空天飞行器用热防护陶瓷材料 [J]. 现代技术陶瓷, 2017, 38(5): 311–390.
- CHEN Yufeng, HONG Changqing, HU Chenglong, et al. Ceramic-based thermal protection materials for aerospace vehicles[J]. Advanced Ceramics, 2017, 38(5): 311–390.
- [3] 张幸红, 胡平, 韩杰才, 等. 超高温陶瓷复合材料的研究进展 [J]. 科学通报, 2015, 60(3): 257–266.
- ZHANG Xinghong, HU Ping, HAN Jiecai, et al. Research progress on ultra-high temperature ceramic composites[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(3): 257–266.
- [4] 张幸红, 胡平, 韩杰才, 等. 超高温陶瓷材料抗热冲击性能及抗氧化性能研究 [J]. 中国材料进展, 2011, 30(1): 27–31, 26.
- ZHANG Xinghong, HU Ping, HAN Jiecai, et al. Study on thermal shock resistance and oxidation resistance of ultra-high temperature ceramics[J]. Materials China, 2011, 30(1): 27–31, 26.
- [5] WANG Y G, LUO L, SUN J, et al. $ZrB_2-SiC(Al)$ ceramics with high resistance to oxidation at 1500 °C[J]. Corrosion Science, 2013, 74: 154–158.
- [6] HE J B, WANG Y G, LUO L, et al. Oxidation behaviour of $ZrB_2-SiC (Al/Y)$ ceramics at 1700 °C[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36(15): 3769–3774.
- [7] ZHANG X H, QU Q, HAN J C, et al. Microstructural features and mechanical properties of $ZrB_2-SiC-ZrC$ composites fabricated by hot pressing and reactive hot pressing[J]. Scripta Materialia, 2008, 59(7): 753–756.
- [8] LÜ Z H, JIANG D L, ZHANG J X, et al. Processing and properties of ZrB_2-SiC composites obtained by aqueous tape casting and hot pressing[J]. Ceramics International, 2011, 37(1): 293–301.
- [9] HU P, WANG Z. Flexural strength and fracture behavior of ZrB_2-SiC ultra-high temperature ceramic composites at 1800 °C[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2010, 30(4): 1021–1026.
- [10] ZHU M, WANG Y G. Pressureless sintering ZrB_2-SiC ceramics at low temperatures[J]. Materials Letters, 2009, 63(23): 2035–2037.
- [11] MASHHADI M, KHAKSARI H, SAFI S. Pressureless sintering behavior and mechanical properties of ZrB_2-SiC composites: Effect of SiC content and particle size[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2015, 4(4): 416–422.
- [12] PADOVANO E, BADINI C, BIAMINO S, et al. Pressureless sintering of ZrB_2-SiC composite laminates using boron and carbon as sintering aids[J]. Advances in Applied Ceramics, 2013, 112(8): 478–486.
- [13] POPOV O, VLEUGELS J, ZEYNALOV E, et al. Reactive hot pressing route for dense ZrB_2-SiC and $ZrB_2-SiC-CNT$ ultra-high temperature ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40(15): 5012–5019.
- [14] ZHANG G J, DENG Z Y, KONDO N, et al. Reactive hot pressing of ZrB_2-SiC composites[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2000, 83(9): 2330–2332.
- [15] YAN X J, JIN X C, LI P, et al. Microstructures and mechanical properties of $ZrB_2-SiC-Ni$ ceramic composites prepared by spark plasma sintering[J]. Ceramics International, 2019, 45(13): 16707–16712.
- [16] XIE Z P, LI S, AN L. A novel oscillatory pressure-assisted hot pressing for preparation of high-performance ceramics[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2014, 97(4): 1012–1015.
- [17] LIU D G, ZHANG X C, FAN J Y, et al. Sintering behavior and mechanical properties of alumina ceramics exposed to oscillatory pressure at different sintering stages[J]. Ceramics International, 2021, 47(16): 23682–23685.
- [18] YUAN Y, FAN J Y, LI J S, et al. Oscillatory pressure sintering of Al_2O_3 ceramics[J]. Ceramics International, 2020, 46(10): 15670–15673.
- [19] FAN J Y, LIU D G, ZHAO K, et al. Densification kinetics and mechanism of zirconia ceramics via hot oscillating pressing[J]. Open Ceramics, 2023, 13: 100323.
- [20] LI J S, FAN J Y, YUAN Y, et al. Effect of oscillatory pressure on the sintering behavior of ZrO_2 ceramic[J]. Ceramics International, 2020, 46(9): 13240–13243.
- [21] FAN L, LI J H, HUANG Y B, et al. Hot oscillatory pressing of B_4C ceramics for improving densification and mechanical properties[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2022, 105(8): 5039–5044.
- [22] LI S S, XIE Z, XUE W J, et al. Sintering of high-performance silicon nitride ceramics under vibratory pressure[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2015, 98: 698–701.
- [23] FENG B, ZHOU Y, PENG C, et al. Vibration assisted hot-press sintering of AlN ceramics[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2015, 98(6): 1711–1713.
- [24] FAN J Y, YUAN Y, LI J S, et al. Densification and grain growth in oscillatory pressure sintering of alumina toughened zirconia ceramic composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 845: 155644.

(下转第 112 页)

peening properties and modelling on the fatigue performance of 304 austenitic stainless steel[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 137: 105621.

[35] GAO T, SUN Z D, XUE H Q, et al. Effect of surface mechanical attrition treatment on high cycle and very high cycle fatigue of a 7075-T6 aluminium alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 139: 105798.

[36] LIU Z G, WONG T I, HUANG W, et al. Effect of surface polishing treatment on the fatigue performance of shot-peened Ti-6Al-4V alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2017, 30(7): 630-640.

[37] ZHANG Q, XU S, ZHANG Z Q, et al. Residual stress and microhardness evolution induced by conventional and ultrasonic shot peening[J]. *Materials Science and Technology*, 2022, 38(7): 436-443.

[38] WILLIAMSON G K, HALL W H. X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram[J]. *Acta Metallurgica*, 1953, 1(1): 22-31.

[39] SUN Q Q, HAN Q Y, XU R, et al. Localized corrosion behaviour of AA7150 after ultrasonic shot peening: Corrosion depth vs. impact energy[J]. *Corrosion Science*, 2018, 130: 218-230.

[40] FENG Q, WU X Y, JIANG C H, et al. Surface layer investigation of a shot-peened duplex stainless steel utilizing X-ray diffraction[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013, 22(7): 2005-2011.

[41] LI K, FU X S, LI R D, et al. A mechanism study on characteristic curve of residual stress field in Ti-6Al-4V induced by wet peening treatment[J]. *Materials & Design*, 2015, 86: 761-764.

[42] FENG B X, MAO X N, YANG G J, et al. Residual stress field and thermal relaxation behavior of shot-peened TC4-DT titanium alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 512(1-2): 105-108.

[43] FU P, JIANG C H, WU X Y, et al. Surface modification of 304 steel using triple-step shot peening[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, 30(6): 693-698.

通讯作者: 徐刚, 高级工程师, 研究方向为大型金属零件喷丸加工技术。

(责编 晓月)

(上接第 105 页)

[25] HE H T, SHAO G, ZHAO R, et al. Effects of oscillatory pressure mode on the sintering behavior of Al_2O_3 - ZrO_2 composite in hot oscillatory pressing[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2022, 105(12): 7778-7784.

[26] ZHANG J, ZHU T B, CHENG Y, et al. Fabrication and mechanical properties of ZrO_2 - Al_2O_3 -SiC(w) composites by oscillatory pressure sintering[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(16): 25719-25725.

[27] ZHU T B, XIE Z P, HAN Y, et al. Improved mechanical properties of Al_2O_3 -25vol% SiC_w composites prepared by oscillatory pressure sintering[J]. *Ceramics International*, 2017, 43(17): 15437-15441.

[28] ZHU T B, XIE Z P, HAN Y, et al. Microstructure and mechanical properties of ZTA composites fabricated by oscillatory

pressure sintering[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(1): 505-510.

[29] HAN Y, LI S, ZHU T B, et al. Enhanced toughness and reliability of Si_3N_4 -SiC_w composites under oscillatory pressure sintering[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(11): 12169-12173.

[30] YANG S L, ZHU Y X, FAN L, et al. Preparation and mechanical properties of SiC_w- Al_2O_3 -YAG ceramic composite by hot oscillatory pressing[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(15): 21231-21235.

[31] SHAHEDI ASL M, GHASSEMI KAKROUDI M, GOLESTANI-FARD F, et al. A Taguchi approach to the influence of hot pressing parameters and SiC content on the sinterability of ZrB_2 -based composites[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2015, 51: 81-90.

[32] LIU D G, FAN J Y, ZHAO K, et al. Preparation of super-strong ZrO_2 ceramics using dynamic hot forging[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, 43(2): 733-737.

[33] ZHAO K, FENG P, TAN J, et al. A new route to fabricate high-performance binderless tungsten carbide: Dynamic sinter forging[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2023, 106(6): 3343-3350.

[34] FAN L, SONG X W, ZHAO P F, et al. Super strong B_4C ceramics prepared by dynamic sinter forging[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, 43(9): 4209-4214.

[35] ZHU T B, XIE Z P. Ultrastrong tough zirconia ceramics by defects-engineering[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2022, 105(3): 1617-1621.

[36] ZHOU P, HU P, ZHANG X H, et al. R-curve behavior of laminated ZrB_2 -SiC ceramic with strong interfaces[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2015, 52: 12-16.

[37] ZHU S M, FAHRENHOLTZ W G, HILMAS G E. Influence of silicon carbide particle size on the microstructure and mechanical properties of zirconium diboride-silicon carbide ceramics[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2007, 27(4): 2077-2083.

[38] ZHOU P, HU P, ZHANG X H, et al. Laminated ZrB_2 -SiC ceramic with improved strength and toughness[J]. *Scripta Materialia*, 2011, 64(3): 276-279.

[39] WEI C C, ZHANG Z Y, MA X F, et al. Mechanical and ablation properties of laminated ZrB_2 -SiC ceramics with Si_3N_4 whisker interface[J]. *Corrosion Science*, 2022, 197: 110051.

[40] LÜ Z H, JIANG D L, ZHANG J X, et al. ZrB_2 -SiC laminated ceramic composites[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2012, 32(7): 1435-1439.

[41] FANG X, BISHARA H, DING K, et al. Nanoindentation pop-in in oxides at room temperature: Dislocation activation or crack formation?[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2021, 104: 4728-4741.

[42] XU H Y, JI W, GUO W M, et al. Enhanced mechanical properties and oxidation resistance of zirconium diboride ceramics via grain-refining and dislocation regulation[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(6): e2104532.

通讯作者: 刘金铃, 教授, 博士, 研究方向为材料场辅助制造技术、陶瓷基复合材料、金属基复合材料和材料强韧化机理。

(责编 晓月)