

# 基于 SHPB 试验的 $B_4C/Al$ 复合材料动态力学性能研究

龙奎<sup>1</sup>, 邓勇军<sup>1,2</sup>, 陈小伟<sup>2,3</sup>, 姚勇<sup>1,2</sup>, 黄雪刚<sup>4</sup>, 张石岩<sup>1</sup>

(1. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621000)

(2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621000)

(3. 北京理工大学 前沿交叉研究院, 北京 100081)

(4. 中国空气动力研究与发展中心 超高速碰撞中心, 四川 绵阳 621000)

**摘要:**  $B_4C/Al$  是一种新型金属复合陶瓷材料, 相比于传统陶瓷材料,  $B_4C/Al$  复合材料具有低密度、高硬度、高韧性、低成本等优点, 常被应用于装甲防护领域。为研究  $B_4C/Al$  复合材料在动态加载下的力学性能, 通过分离式霍普金森压杆 (SHPB) 实验和电镜扫描 (SEM) 等技术, 获得材料在不同冲击速度下的波形图, 以及微观环境下的断口形貌, 研究了不同应变率下材料的应力-应变曲线特征和破坏模式; 同时讨论了 Al 含量对材料的动态压缩强度的影响规律。研究结果可为  $B_4C/Al$  复合材料的设计和应用提供参考。

**关键词:**  $B_4C/Al$ ; SHPB 试验; 动态压缩强度

**中图分类号:** TB333; O346.1+3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2022)10-3826-09

陶瓷材料的主要成分碳化硼 ( $B_4C$ ) 是自然界中硬度排名第 3 的物质, 其硬度仅次于金刚石和立方相氮化硼, 具有熔点高 (2450 °C)、密度低 (2.52 g/cm<sup>3</sup>)、高弹性模量、耐腐蚀以及良好的 X 光透光性等优点, 常被应用于轻质装甲、飞机腹板等常规防护领域<sup>[1-3]</sup>。

单相碳化硼陶瓷存在韧性差且难以烧结致密的缺点, 这使得碳化硼的应用受到了很大的制约。针对碳化硼的这些缺点, 常使用添加剂如金属 Al、金属 MO、单质 C、六方氮化硼 (h-BN)、二硼化钛 ( $TiB_2$ ) 等<sup>[4]</sup>以改善碳化硼的烧结性能、提高材料的致密度。20 世纪 60 年代国外学者开始尝试以金属为主要添加剂研究碳化硼/金属复合材料, 尤其是  $B_4C/Al$  复合陶瓷材料的研究<sup>[5,6]</sup>。 $B_4C/Al$  复合陶瓷采用无压浸渗法制备而成, 具有密度低、硬度高、韧性好、成本低廉等优势, 是用作防护装甲、航天器结构等领域的理想材料。

随着  $B_4C/Al$  复合陶瓷在军事及民用防护领域中的广泛应用, 各国学者对  $B_4C/Al$  材料的力学性能进行了大量的研究。在准静态力学方面, 吕鹏等<sup>[7]</sup>研究了  $B_4C$  颗粒级配对  $B_4C/Al$  复合材料硬度、抗弯强度、断裂韧性的影响, 当采用 2 种不同粒度的  $B_4C$  混合, 细颗粒  $B_4C$  质量分数为 40% 时, 复合材料将会具有较好

的综合性能。Topcu 等<sup>[8]</sup>指出,  $B_4C/Al$  复合材料中  $B_4C$  的质量分数由 5% 到 20% 时, 材料韧性会降低, 但硬度会增加。在动态力学性能方面, 研究表明, 在相同的加载条件下, 陶瓷基金属复合材料的动态力学性能与单质材料之间存在很大差异<sup>[9,10]</sup>。Liu 等人<sup>[11]</sup>开展了  $B_4C$  体积分数为 55% 的铝基复合材料的动态压缩性能研究, 同时考虑加载温度范围从 298~773 K 不等, 应变率从  $1 \times 10^{-3} s^{-1}$  到  $5 s^{-1}$  之间, 试验获得了  $B_4C/Al$  复合材料的压缩应力-应变曲线, 结果显示材料的动态压缩强度比静态压缩强度差异较大, 这是不同荷载作用下的不同失效模式造成的。Karakuov 等<sup>[12]</sup>研究表明,  $B_4C/Al$  复合材料在冲击波荷载作用下的力学性能很大程度上取决于陶瓷基体的体积浓度, 且对材料的体积声速、纵向声速、剪切声速和弹性模量的影响是非线性和单调递增的, 原因是高速冲击加载时, 复合材料微观结构的快速大变形受材料组分影响较大, 但目前影响机理尚不明确。黄雪刚等<sup>[13]</sup>通过弹丸超高速撞击防护屏实验, 发现  $B_4C/Al$  缓冲屏的防护效能明显高于铝合金缓冲屏, 且撞击速度越高, 防护效果越显著。在  $B_4C/Al$  的微观层面, Shorowordi 等人<sup>[14]</sup>认为当  $B_4C/Al$  复合材料中  $B_4C$  的含量小于 20% 时,

收稿日期: 2021-10-17

基金项目: 国家自然科学基金 (1187020163, 12002293); 四川省科技厅应用基础项目 (2018JY0410, 2020YJ0423); 大学生创新创业训练计划创新训练项目 (S202110619082)

作者简介: 龙奎, 男, 1997 年生, 硕士生, 西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621000, E-mail: 121719552@qq.com

粒子和基体的界面强度将达到最优值。陈洪胜等<sup>[15]</sup>的研究发现  $B_4C$  颗粒在基体中均匀分布, 引起材料内部位错密度增大, 从而提高基体强度。李宇力等<sup>[16]</sup>研究表明  $B_4C/Al$  复合材料中  $B_4C$  颗粒尺寸  $<46$  nm 时复合材料的缺陷最少, 相对密度最高, 对复合板材抗拉强度的增强效果最显著。

综上所述, 由于  $B_4C/Al$  复合材料其力学性能的影响因素较复杂, 各国关于  $B_4C/Al$  复合材料的动态力学性能以及 Al 含量对复合材料动态强度的影响机理研究总体进展缓慢, 缺乏对具体物理现象的机理解读。为系统研究  $B_4C/Al$  复合材料的动态力学性能, 揭示不同加载应变率条件下相应的微观机理, 找出 Al 含量对宏观力学性能的影响机制, 论文基于 SHPB 试验系统开展了一维应力加载条件下  $B_4C/Al$  复合材料的应变率效应及其微观机理的研究, 同时讨论了 Al 含量对复合材料宏观动态力学响应的影响机制, 研究成果可为陶瓷复合装甲材料的设计提供参考。

## 1 准静态压缩实验

为获得材料的基本力学参数, 先对试件进行准静态压缩实验。实验采用大连巨鑫超硬材料有限公司提供的  $B_4C$  粉末, 其  $B_4C$  含量大于 98% (质量分数), 平均粒径 ( $d_{50}$ ) 为  $1 \mu m$ 。熔渗所用牌号为 5083 的铝合金板, 采用自配的酚醛树脂-丙酮溶液作为黏结剂。材料采用真空无压预烧工艺与真空熔渗法制备<sup>[13]</sup>, 先取  $B_4C$  粉末烧结成多孔预制体, 再将熔融状态的金属 Al, 通过多孔预制体的毛细管作用, 浸渗入多孔预制体中, 最后冷却为  $B_4C/Al$  复合体。本实验共设计了 3 种不同 Al 含量的试件, 材料中 Al 的质量分数分别为 90%、85%、75%, 试件尺寸为直径 6 mm, 高度 6 mm 的圆柱体。

准静态试验在电子万能试验机 WDW-200C 上进行, 在试件的上下断面加高强度的合金钢垫块, 以防止试件压坏试验机端面, 再用套筒罩住试件和垫块, 如图 1 所示。分别对 3 种试件进行准静态压缩实验, 压缩速率为  $0.5$  mm/min, 自动读取压缩过程中试验力和位移的数据, 绘制应力-应变曲线, 如图 2 所示。

结合静态试验的应力-应变曲线, 可得不同 Al 含量下  $B_4C/Al$  复合材料准静态基本力学参数, 如表 1 所示。从图 2 可以看出, 不同的 Al 含量条件下, 复合材料准静态压缩的应力-应变曲线变化趋势基本相似, 大致可分为 3 个阶段: 弹性阶段、塑性阶段、强化阶段。当 Al 的质量分数为 90% 时, 其应力随着应变的增大持续增大, 复合材料表现出明显的金属材料塑性特征; 当 Al 质量分数分别为 85% 和 75% 的试件, 材

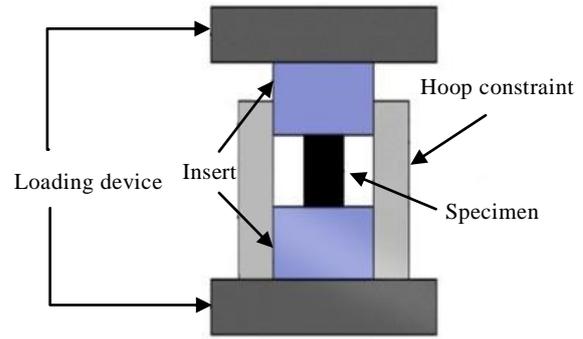


图 1 准静态压缩示意图

Fig.1 Schematic diagram of quasi-static compression

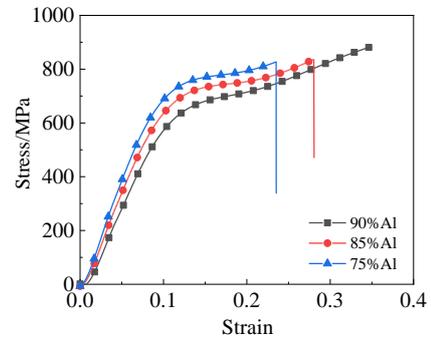


图 2 3 种试件典型的应力-应变曲线

Fig.2 Typical stress-strain curves of three specimens

料在进入塑性后, 应变分别达到 28% 和 23.5% 时发生脆性破坏, 应力突然下降, 表明随着  $B_4C$  陶瓷含量的增加, 复合材料的脆性特征较为明显。由准静态压缩的应力-应变曲线可知, 随着 Al 的质量分数提高,  $B_4C/Al$  复合材料弹性模量和屈服强度下降, 但屈服应变增大, 即变形能力会相应地提高。

## 2 SHPB 实验

SHPB 试验系统可以开展应变率范围为中高应变率 ( $10 \sim 10^3$  s<sup>-1</sup>) 的动态力学性能试验, 在一定程度上可以反映复合材料作为防护结构的服役环境, 故此处采用西南科技大学工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室 20 mm 直径的 SHPB 压杆试验系统开展  $B_4C/Al$  复合材料的力学行为研究。

### 2.1 实验装置

实验所用装置为 SHPB (分离式霍普金森压杆) 试验系统, 主要由子弹、入射杆、试件、透射杆、吸收杆和动态采集器共 6 部分构成, 如图 3 所示。

表 1 试件材料基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of specimen material

Mass fraction/%	Density/ kg m <sup>-3</sup>	Elastic modulus/GPa	Yield strength/MPa
90	2797	8.740	562
85	2985	10.798	609
75	2841	12.249	664

实验采用直径为 20 mm 的 SHPB 杆。撞击杆长 300 mm，入射杆长 2500 mm，透射杆 2000 mm，杆材相关参数见表 2。试件用凡士林粘贴在入射杆和透射杆之间，并用透明的亚克力板盒子罩住试件，防止试件飞溅，也方便收集。应变片采用 120 Ω 阻值，分别贴到入射杆和透射杆上；贴片位置到试件两端面距离均为 1250 mm，可以避免应力波在应变片处叠加；同时为了削弱压杆弯曲对数据准确性的影响，入射杆和透射杆均用 2 个应变片，对称的贴在压杆两侧。动态应变采集箱

的采样频率为 1 MHz，即每 1 μs 采集 1 个数据点。

### 2.2 添加垫块

考虑到试件材料硬度较高，为避免压杆端面受到损伤，在压杆两端面添加了马氏体钢垫块，如图 4 所示，垫块直径 20 mm，长度为 5 mm。由于垫块与压杆所用材料相同，波阻抗一致，应力波在压杆和垫块界面不会发生反射，且垫块和压杆直径相同，不会出现应力波的弥散，因此添加垫块基本不会对实验结果产生影响。

### 2.3 波形整形

子弹直接撞击入射杆，会在入射杆中产生矩形加载波，矩形加载波上升沿较陡，从加载到峰值所用时间很短，为防止脆性材料在短时间内，试件无法达到应力平衡状态而发生破坏，不能满足 SHPB 实验装置的基本假定。试验中采用波形整形技术，在入射杆受撞击一端贴加整形器，如图 5 所示，使矩形加载波变成上升沿较缓的三角波。实验采用直径 12 mm，厚 2 mm

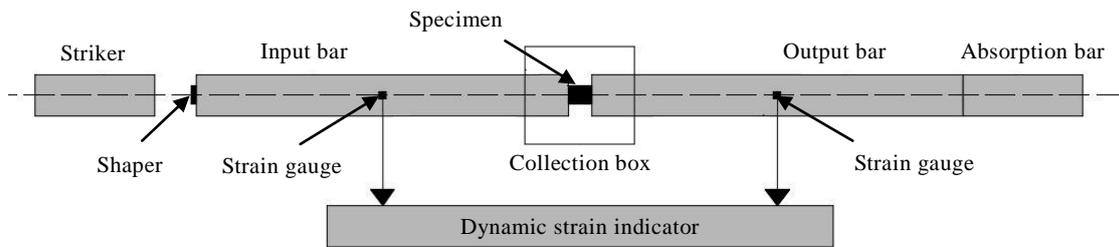


图 3 SHPB 实验装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of SHPB experimental device

表 2 SHPB 杆材料参数

Table 2 SHPB rod material parameters

Density/ kg m <sup>-3</sup>	Elastic modulus/ GPa	Poisson ratio	Wave velocity/ m s <sup>-1</sup>
7740	206	0.29	5158

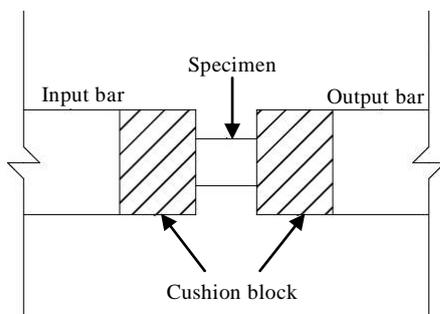


图 4 SHPB 实验装置示意图

Fig.4 Schematic diagram of SHPB experimental device

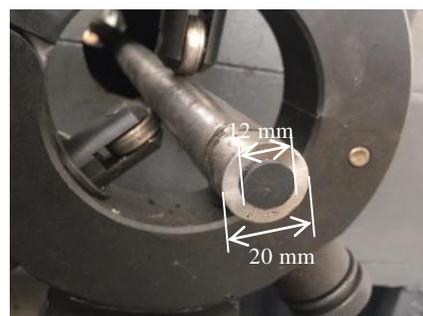


图 5 整形片示意图

Fig.5 Schematic diagram of plastic film

的橡胶片作为整形器，整形效果如图 6 所示，经过波形整形，入射波上升沿明显变缓，但同时入射波的应变峰值也有所降低，可通过提高撞击杆速度予以弥补。

### 2.4 SHPB 试验基本原理

根据应力波在一维弹性杆中传播的原理，试件端面应力波传播如图 7 所示，SHPB 实验装置中应力-应

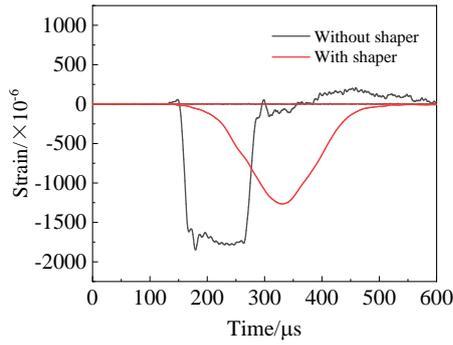


图 6 波形整形效果图

Fig.6 Wave shaping effect chart

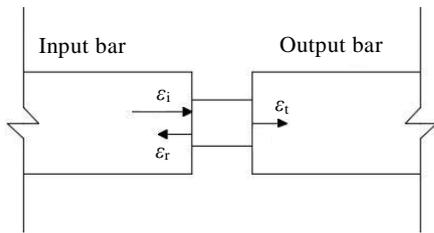


图 7 应力波传播示意图

Fig.7 Schematic diagram of stress wave propagation

变关系如下:

加载时间:

$$T = \frac{2L}{c} \tag{1}$$

应力平衡:

$$\epsilon_i + \epsilon_r = \epsilon_t \tag{2}$$

工程应变率:

$$\epsilon' = -\frac{2c}{L_s} \epsilon_r \tag{3}$$

工程应变:

$$\epsilon = -\frac{2c}{L_s} \int_0^t \epsilon_r dt \tag{4}$$

两端应力:

$$\sigma = \frac{AE}{A_0} \epsilon_t \tag{5}$$

式中,  $\epsilon_i$ 、 $\epsilon_r$  和  $\epsilon_t$  为入射波、反射波和透射波,  $\epsilon$ 、 $\sigma$ 、 $\epsilon'$  分别为应变、应力、应变率,  $L$ 、 $L_s$ 、 $c$ 、 $A$ 、 $A_0$ 、 $E$  分别为撞击杆的杆长、试件长度、杆材波速、入射杆和试件截面积以及杆材的弹性模量,  $t$  为反射波持续时间。由式 (1) ~ (5), 撞击杆的加载时间由撞击杆的长度决定, 入射波、反射波和透射波分别表征加载力、应变和应力的变化。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 应力平衡校验

为满足 SHPB 实验中的应力均匀性假设, 需验证试件两端的应力平衡状态。由应力波守恒关系可知, 入射波一部分由试件端面处反射回入射杆为反射波, 另一部分经过试件透射进入透射杆为透射波, 且入射波与反射波叠加的波形与透射波的波形理论上是重合的, 即满足式 (2) 的关系, 此时即可认为试件两端处于应力平衡状态。分别选取 Al 质量分数 90%、撞击速度 9.196 m/s, 质量分数 85%、撞击速度 14.943 m/s 及质量分数 75%、撞击速度 16.005 m/s 的典型工况进行应力平衡分析。将 3 组工况的入射波、反射波和透射波代入式 (2), 所得结果如图 8 所示, 3 组工况入射波和反射波的叠加波形与透射波波形基本重合, 即试件两端处于应力平衡良好。

#### 3.2 波形特征分析

##### 3.2.1 应力波传播过程分析

首先选取 Al 质量分数为 90% 的试件在撞击速度为 17.041 m/s 下的波形图进行应力波传播过程分析, 如图 9 所示。撞击杆以 17.041 m/s 的速度撞击入射杆,

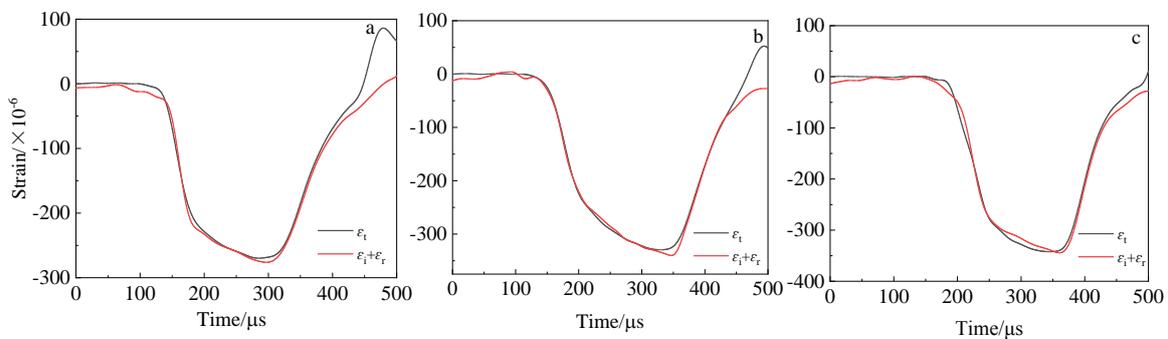


图 8 3 组工况的波形应力平衡校验

Fig.8 Waveform stress balance verification for three groups of working conditions: (a) 90% Al, 9.196 m/s; (b) 85% Al, 14.943 m/s; (c) 75% Al, 16.005 m/s (the stress balance verification is based on the comparison of strain value)

经过整形器的整形作用，在入射杆中产生一段峰值为  $1.522 \times 10^{-3}$  正弦波，正弦波在  $307 \mu\text{s}$  时开始产生，在  $493 \mu\text{s}$  时达到峰值  $1.522 \times 10^{-3}$ ，在  $702 \mu\text{s}$  时衰减为 0。 $777 \mu\text{s}$  时入射波传播到入射杆端面，当入射波到达入射杆与试件的截面时，由于试件与杆的波阻抗不同，应力波在界面处发生反射。入射波反射波最初一段时间入射波与反射波几乎完全重合，入射波全部被反射回入射杆。 $866 \mu\text{s}$  时，入射波与反射波不再重合，入射波部分开始透射进入试件。 $955 \mu\text{s}$  时，反射波达到峰值  $1.236 \times 10^{-3}$ 。 $1051 \mu\text{s}$  时反射波衰减为 0，此时透射波达到峰值  $0.344 \times 10^{-3}$ 。此后，反射波变为负值，透射波开始衰减， $1143 \mu\text{s}$  时反射波与透射波重合，应力波的传播结束。

值得提出的是，在  $1051 \sim 1143 \mu\text{s}$  过程中，反射波出现了负值。根据文献[17]以及式 (3) ~ (5) 可知：试件加载过程中的应变率与反射波有关，而试件的应变与反射波和时间轴包围的面积有关。在应力波加载过程中，反射波出现了负向的应变，表现为试件出现了回弹，反向压缩入射杆；虽然试件受到加载轴向出现了压缩应变，但试件整体完好，没有出现裂纹，由此可以推断，试件卸载后并没有完全破坏，其内部还存在一定的弹性，当加载应力小于试件内部的弹性恢复力时试件开始回弹，故反射波出现了负值。

### 3.2.2 撞击速度对波形特征的影响

为讨论撞击速度对复合材料波形特征的影响，图 10 给出了 Al 含量 90% 的  $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}$  复合材料在不同撞击速度下的波形曲线。从图中可以看出：对于同一质量分数的试件，随着撞击速度的增大，入射波、反射波幅值均在增大。如撞击速度为  $7.719$ 、 $11.759$ 、 $13.865$ 、 $17.041$ 、 $20.316 \text{ m/s}$  时，入射波幅值分别为  $498 \times 10^{-6}$ 、 $887 \times 10^{-6}$ 、 $1130 \times 10^{-6}$ 、 $1522 \times 10^{-6}$ 、 $2015 \times 10^{-6}$ 。由于撞

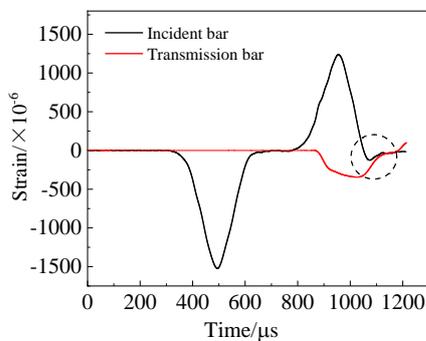


图 9 17.041 m/s 撞击下 90%Al  $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}$  复合材料的波形图  
Fig.9 Waveform of 90%Al  $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}$  composite ceramic at impact speed of 17.041 m/s

击杆使用长度为  $300 \text{ mm}$  的钢杆，且加载时间  $T$  与撞击杆的杆长和材料特性有关，而与加载速度无关，由此可知，入射杆加载的峰值应力与加载速度为线性关系；由于加载过程中，杆材始终处于线弹性状态，因此入射杆的应变峰值与撞击杆的加载速度也正相关。反射波和入射波的波形和幅值与试件的变形和受力有关，在较低的撞击速度下，试件两端的相对运动速度较低，即应变率较低；随着撞击速度的增大，应变率提高，由于应力波加载的时间是相同的，故试件的应变和应力随着撞击速度的增大而相应地提高。

### 3.2.3 Al 的质量分数对波形特征的影响

取相近撞击速度下（撞击速度约  $20 \text{ m/s}$ ）、不同 Al 含量的工况进行分组比较，见图 11。从图中可知，相近速度下入射波的峰值和持续时间相近，反射波达到峰值后衰减为零，并继续下降减小为负值，随后又缓慢回到零位置；透射波在反射波持续一段时间之后开始增大，并几乎与反射波同时达到峰值，随后衰减

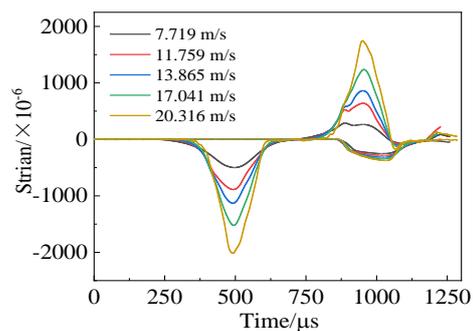


图 10 不同撞击速度下 90%Al  $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}$  复合材料的波形图  
Fig.10 Waveforms of 90%Al  $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}$  composite ceramic at different impact speeds

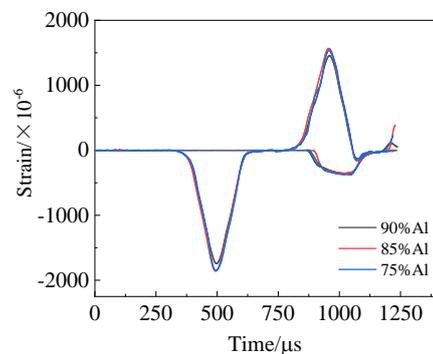


图 11 不同 Al 含量下  $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}$  复合材料的波形图对比  
Fig.11 Comparison of waveforms of  $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}$  composite ceramics with different Al contents

为零。从波形图中可以看出, Al 含量的差异对材料的波形特征影响不明显, 不同 Al 含量的波形曲线整体基本一致, 仅在峰值大小上存在细微的区别。

### 3.3 动态强度影响

撞击杆以不同的冲击速度撞击入射杆, 产生不同的波形曲线, 通过式 (4) 和式 (5) 即可获得试件在加载过程中不同时刻的应变和应力, 继而绘制出对应的应力-应变曲线, 如图 12 所示。

图 12 为不同 Al 的质量分数试件不同撞击速度下产生的动态应力-应变曲线。从图中可以看出: 不同撞击速度下、不同 Al 含量的试件其动态应力-应变曲线均表现为典型的三段式, 线弹性阶段: 试件的应力随应变快速增长, 直到屈服应力, 且速度与 Al 含量对屈服应力的影响较小; 强化阶段: 随着加载速度的增大, 材料应力缓慢增长, 应变继续增大, 呈现出明显的线性强化特征, 且撞击速度与 Al 含量主要影响强化段的持续时间与峰值。具体表现为当 Al 含量相同时, 随着撞击速度的增加, 强化段的持续时间及峰值明显增大, 体现出明显的应变率敏感性; 相对于撞击速度, Al 含量对持续时间及峰值的影响较弱。破坏阶段: 随着应

变的继续增加, 复合材料均表现出脆性破坏的特征, 即应力突然降低。

将 3 组动态应力-应变曲线分别合并, 与相应的准静态应力-应变曲线进行对比, 如图 13 所示。3 组应力-应变曲线对比图中, 动态应力-应变曲线总体位于静态应力-应变曲线上方, 也就是说, 在相同的应变下, 动态压缩的应力值高于准静态压缩, 由此可知, B<sub>4</sub>C/Al 复合材料的动态压缩力学性能优于准静态压缩下的力学性能。

根据不同条件下应力-应变曲线进一步得到陶瓷材料的动态压缩强度随应变率的变化关系, 图 14 及图 15 分别给出了不同条件下动态强度绝对值及 DIF (动态增强因子) 与应变率的关系。从图 14 中可以看出, 3 类试件均具有明显的应变率敏感性, 即随着应变率的增大, 试件的动态压缩强度增加, 如应变率由 500 s<sup>-1</sup> 增加到 3000 s<sup>-1</sup>, Al 含量 90%、85% 及 75% 的复合材料, 其动态抗压强度由约 600 MPa 增加至约 900 MPa, 增幅约为 300 MPa。同时, 图中可以看出, 在应变率相近的情况下, 75% Al 含量的试件其动态压缩强度最高, 90% Al 含量试件强度最低, 如应变率约 1500 s<sup>-1</sup> 时,

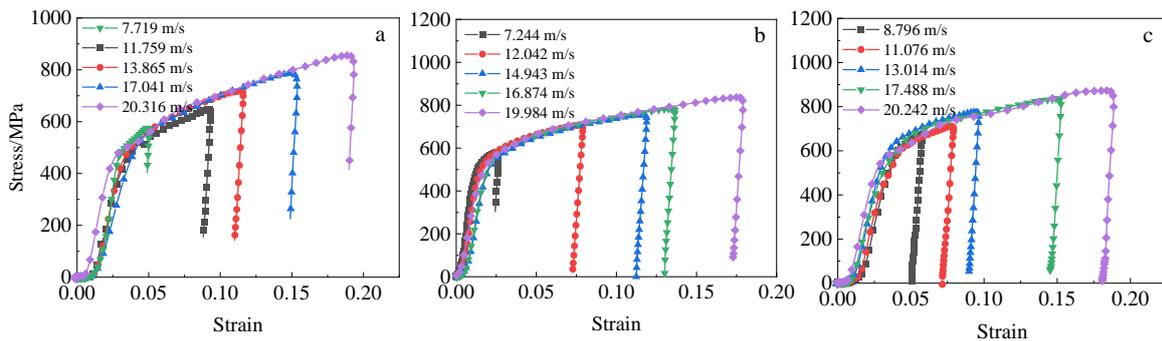


图 12 不同撞击速度和 Al 含量下 B<sub>4</sub>C/Al 复合材料的应力-应变曲线

Fig.12 Stress-strain curves of B<sub>4</sub>C/Al composite ceramics with different Al contents at different impact speeds: (a) 90%Al, (b) 85%Al, and (c) 75%Al

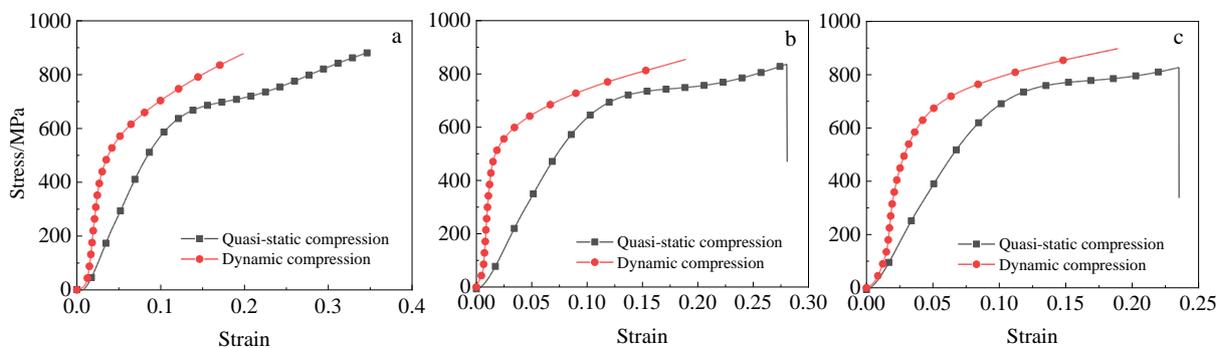


图 13 不同 Al 含量的 B<sub>4</sub>C/Al 复合材料动静态应力-应变曲线对比

Fig.13 Comparison of dynamic and static stress-strain curves of B<sub>4</sub>C/Al composite ceramics with different Al contents: (a) 90%Al, (b) 85%Al, and (c) 75%Al

75%Al 含量的试件的动态压缩强度可达 824.97 MPa ( $1537\text{ s}^{-1}$ )、85%Al 时为 804.22 MPa ( $1553\text{ s}^{-1}$ )、90%Al 时为 749.44 MPa ( $1443\text{ s}^{-1}$ )。这与陶瓷材料与 Al 自身的强度特性有关,在应变率相近的情况下,随着试件 Al 的质量分数提高,动态压缩强度减小。

另一方面,铝在不同应变率区间具有不同的应变率敏感性特征<sup>[18]</sup>,而  $\text{B}_4\text{C}$  陶瓷为应变率敏感性材料,因此 Al 在不同的应变率区间对  $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}$  复合材料的应变率效应有不同的作用,试件中  $\text{B}_4\text{C}$  和铝的比例会影响材料的应变率敏感性。由于 3 类试件屈服强度本身存在差异,因此不能仅用其动态强度的增幅来判断它们之间动态强度增长的区别,采用归一化强度动态增强因子 DIF 来比较 3 类试件的动态强度增长情况。如图 15 所示,90%Al 含量试件的 DIF 值最大,其后依次是 85%和 75%,如应变率在  $1500\text{ s}^{-1}$  左右时,75%Al 试件的 DIF 值为 1.24( $1537\text{ s}^{-1}$ )、85%时为 1.32( $1553\text{ s}^{-1}$ )、90%Al 时为 1.33 ( $1443\text{ s}^{-1}$ )。同时可以发现随着应变率的提高, DIF 的增量逐渐降低,材料在  $500\sim 1500\text{ s}^{-1}$  之间,应变率效应明显,对应的 DIF 值提高速率较快,而在  $1500\text{ s}^{-1}$  之后, DIF 值增幅逐渐减弱。

### 3.4 破坏模式分析

动态压缩试验中,在较高的加载速度下 3 类试件均发生较大的变形,随着应变率的提高,试件的残余变形也随之增大,最大残余应变分别可达到 38.3% (90%Al 含量)、43.5% (85%Al 含量)、29.0% (75%Al 含量)。在撞击速度达到  $20.316\text{ m/s}$  (90%Al 含量)、 $19.903\text{ m/s}$  (85%Al 含量)和  $19.062\text{ m/s}$  (75%Al 含量)时发生破碎,如图 16 所示,从宏观上观察试件裂纹和断口为与端面呈  $45^\circ$ ,而在微观层面,如图 17 所示,其断口形貌有平行于断口方向的刮痕,痕迹之间相互平行,断口截面处出现了平行于断面的相对位移,即表明试件为剪切破坏。

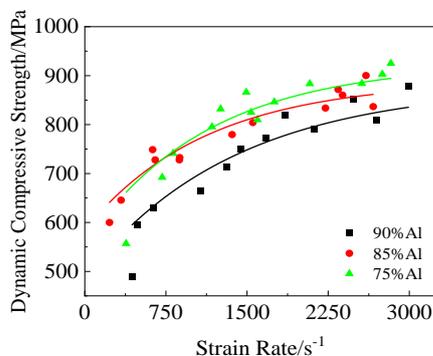


图 14 不同 Al 含量复合材料动态强度分布图

Fig.14 Dynamic strength distribution of composites with different Al contents

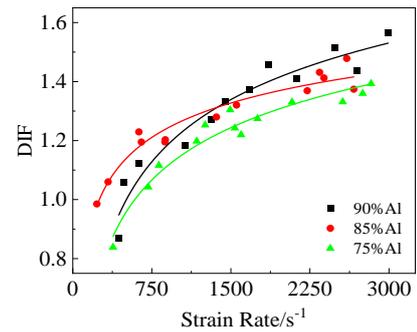


图 15 不同 Al 含量复合材料 DIF 分布图

Fig.15 DIF distribution of composites with different Al contents

对比动态压缩和静态压缩的断口形貌,如图 17 所示。图中表面相对平整且有许多相互平行的刮痕部分代表发生了大变形的金属 Al,在铝的表面和孔洞中附着的、不规则絮状和少量分离的颗粒状物质为  $\text{B}_4\text{C}$ 。从图中可以看到,3 组对比图中,静态压缩的断面,铝相断面变形连续平整,几乎没有撕裂棱;而动态加载的断面图中,铝相变形不连续,有很多的撕裂棱,表面还有  $\text{B}_4\text{C}$  析出,且撕裂棱的数量随  $\text{B}_4\text{C}$  含量的增多而增多。由于  $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}$  复合材料采用无压浸渗工艺制备而成,  $\text{B}_4\text{C}$  多孔预烧体和 Al 基体是连续的,因此  $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}$  的破坏在微观层面属于穿晶断裂。随着试件中  $\text{B}_4\text{C}$  含量和应变率的提高, Al 和  $\text{B}_4\text{C}$  界面发生剥落,发生沿晶断裂。因此在  $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}$  复合材料动态加载其破坏模式为以穿晶断裂为主的混合断裂模式。

由于  $\text{B}_4\text{C}$  相是  $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}$  复合材料的主要承受载荷部分,且属于脆性材料,破坏前应变极小,破坏时  $\text{B}_4\text{C}$  预烧体内保存的能量瞬间释放,同时由于快速、大能量的加载,造成复合材料基体中发生错位且无足够的时间恢复,能量集中在某一个剪切面上并快速促使该界面受力达到临界值,从而发生局部破坏。因此随着加载速度和材料中  $\text{B}_4\text{C}$  含量的增大 (Al 含量的降低),断口撕裂棱数量增多,破坏模式逐渐转变为穿晶断裂和沿晶断裂的混合模式。

另一方面,研究发现<sup>[19-22]</sup>,在  $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}$  的制备过程中,高温熔融状态的 Al 浸渗  $\text{B}_4\text{C}$  时可能会发生界面反应生成  $\text{Al}_3\text{BC}$ ,为此对 3 类试件进行了 X 射线衍射,并对比文献[7,23]分析了其中的成分,如图 18 所示。由 XRD 图谱证实 3 类试件中都存在界面反应产物  $\text{Al}_3\text{BC}$ 。 $\text{Al}_3\text{BC}$  一方面会消耗材料中的 Al 元素,由于材料的塑性变形能力与材料中的 Al-B-C 的比值有关,因此,界面反应会降低材料的塑性变形能力,从而减

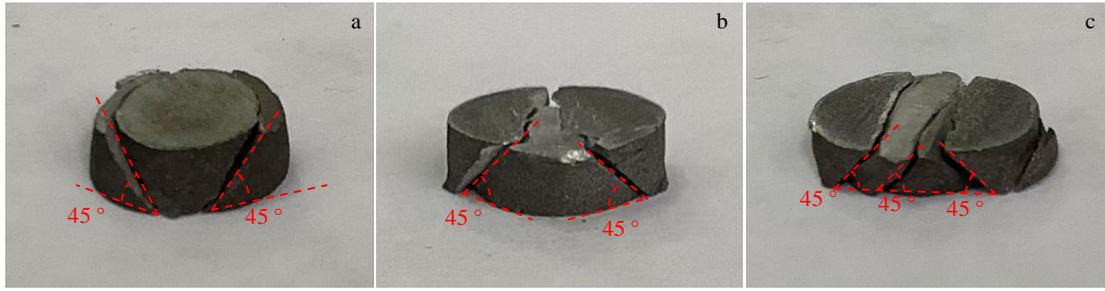


图 16 不同 Al 含量复合材料碎片形貌

Fig.16 Debris morphologies of composites with different Al contents: (a) 75%Al, (b) 85%Al, and (c) 90%Al

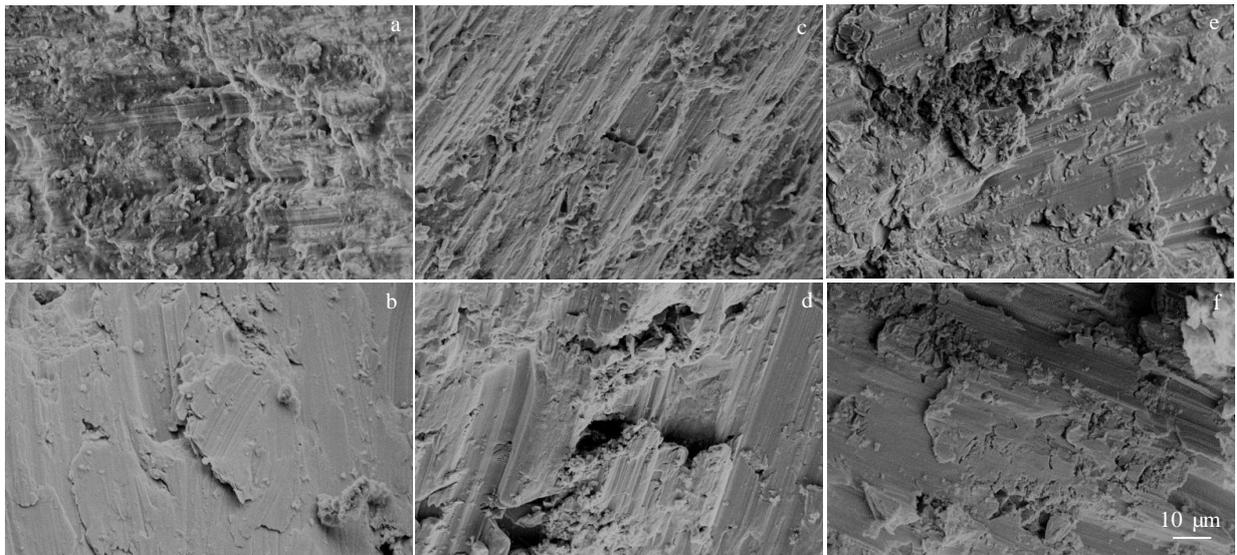


图 17 3 类试件动静态压缩断口微观形貌对比

Fig.17 Comparison of fracture microscopic morphologies of three types of specimens under dynamic (a, c, e) and static (b, d, f) compression: (a, b) 90% Al, (c, d) 85% Al, and (e, f) 75% Al

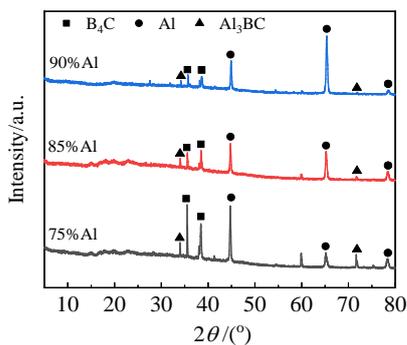


图 18 3 类试件的 XRD 图谱

Fig.18 XRD patterns of three types of specimens

小材料的韧性。另一方面, 界面反应产生的 Al<sub>3</sub>BC, 会向 Al 基体内延伸, 从而抑制 Al 基体的塑性变形, 增大材料的硬度, 在硬度增加的同时, 材料的韧性也会随之减小。

对于 Al 含量较低的复合材料, B<sub>4</sub>C 的含量相对较高, 由于材料中 B<sub>4</sub>C 是均匀分布的, 因此 B<sub>4</sub>C 与 Al 的界面面积相对较大, 界面反应消耗的 Al 和界面生成物 Al<sub>3</sub>BC 更高。综合这诸多因素, 材料的韧性和塑性变形能力随 Al 的质量分数减小而降低, 反之则会增大。

### 4 结论

- 1) B<sub>4</sub>C/Al 复合材料表现出较为明显的应变率敏感性, 且随着 Al 含量的降低其应变率敏感性增强。
- 2) B<sub>4</sub>C/Al 复合材料中 Al 的质量分数越低, 复合材料的动态压缩强度越高, 动态强度增长因子越小; 同时复合材料在较低的加载率下, 其应变率效应更明显, 随着加载率的提高, 复合材料的动态强度增长因子的增幅逐渐减小。
- 3) 动态加载条件下, 复合材料主要发生穿晶断裂。

随着 Al 含量的降低, 断裂模式逐渐转变为穿晶断裂和沿晶断裂同时存在的混合断裂模式。

#### 参考文献 References

- [1] Xu Y F, Ru H Q, Long H B *et al.* *Ceramics International*[J], 2017, 43(5): 4062
- [2] Zhang C P, Ru H Q, Zong H *et al.* *Ceramics International*[J], 2016, 42(16): 18 681
- [3] Zhang Cuiping(张翠萍), Ru Hongqiang(茹红强), Zhu Jinghui(朱景辉) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(S1): 398
- [4] Vast N, Lazzari R, Besson J M *et al.* *Computational Materials Science*[J], 2000, 17(2-4): 127
- [5] Frage N, Levin L, Frumin N *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2003, 143-144: 486
- [6] Arslan G, Kara F, Turan S. *Journal of the European Ceramic Society*[J], 2003, 23(8): 1243
- [7] Lv Peng(吕鹏), Ru Hongqiang(茹红强), Yue Xinyan(岳新艳) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(S2): 536
- [8] Topcu I, Gulsoy H O, Kadioglu N *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2009, 482(1-2): 516
- [9] Li Y, Ramesh K T, Chin E S C. *International Journal of Solids and Structures*[J], 2000, 37(51): 7547
- [10] Zhou Z S, Wu G H, Jiang L T *et al.* *Materials & Design*[J], 2014, 63: 658
- [11] Liu B, Huang W M, Wang H W *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2013, 23(10): 2826
- [12] Karakulov V V, Smolin I Y, Skripnyak V A. *AIP Conference Proceedings*[J], 2014, 1623(1): 237
- [13] Huang Xuegang(黄雪刚), Yin Chun(殷春), Ru Hongqiang(茹红强) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(2): 487
- [14] Shorowordi K M, Laoui T, Haseeb A S M A *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2003, 142(3): 738
- [15] Chen Hongsheng(陈洪胜), Wang Wenxian(王文先), Li Yuli(李宇力) *et al.* *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*(粉末冶金材料科学与工程)[J], 2016, 21(1): 146
- [16] Li Yuli(李宇力), Zhang Peng(张鹏), Gao Zhanping(高占平) *et al.* *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy* (粉末冶金材料科学与工程)[J], 2012, 17(5): 611
- [17] Deng Y J, Chen H, Chen X W *et al.* *Ceramics International*[J], 2021, 47(15): 22 096
- [18] Guo Weiguo(郭伟国), Tian Hongwei(田宏伟). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2009, 19(1): 56
- [19] Lv Peng(吕鹏), Ru Hongqiang(茹红强), Yu Liang(喻亮) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2008(3): 314
- [20] Cramer C L, Elliott A M, Kiggans J O *et al.* *Materials & Design*[J], 2019, 180: 107 956
- [21] Mashhadi M, Taheri-Nassaj E, Sglavo V M *et al.* *Ceramics International*[J], 2009, 35(2): 831
- [22] Cao Leigang(曹雷刚), Wang Xiaohe(王晓荷), Cui Yan(崔岩) *et al.* *Materials Reports*(材料导报)[J], 2019, 33(20): 3472
- [23] Zhang L, Wang Z, Li Q G *et al.* *Ceramics International*[J], 2018, 44(3): 3048

## Study on Dynamic Mechanical Properties of B<sub>4</sub>C/Al Composite Ceramics Based on SHPB Test

Long Kui<sup>1</sup>, Deng Yongjun<sup>1,2</sup>, Chen Xiaowei<sup>2,3</sup>, Yao Yong<sup>1,2</sup>, Huang Xuegang<sup>4</sup>, Zhang Shiyan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China)

(2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Engineering Materials and Structural Shock Vibration, Mianyang 621000, China)

(3. Frontier Interdisciplinary Research Institute, Beijing University of Technology, Beijing 100081, China)

(4. Hypervelocity Collision Center, China Aerodynamic Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** B<sub>4</sub>C/Al is a novel composite material with metals and ceramics. Compared with traditional ceramic materials, B<sub>4</sub>C/Al has been widely used in the protective armour due to the advantages of low density, high hardness, high toughness, and low cost. In order to research the mechanical properties of B<sub>4</sub>C/Al composites under dynamic loading, the waveforms of the materials under different impact speeds and the fracture morphology under micro environment were obtained through split Hopkinson pressure bar (SHPB) testing and scanning electron microscope (SEM). And the stress-strain curve characteristics and failure modes of the materials under different strain rates were studied. Furthermore, the influence of Al content on the dynamic compressive strength of the material was analysed. The results can provide reference for the design and application of B<sub>4</sub>C/Al composites.

**Key words:** B<sub>4</sub>C/Al; SHPB test; dynamic compressive strength

Corresponding author: Deng Yongjun, Ph. D., Associate Professor, School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, P. R. China, E-mail: dyj820@swust.edu.cn