

# TiB-Ti 周期序构复合材料设计、制备及性能研究

孙海洋, 季伟, 王为民, 傅正义

(武汉理工大学 材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:** 高性能结构材料部件在航空航天、交通汽车、电子信息、冶金等领域具有重要的应用价值, 得到了广泛研究。增强结构材料部件整体性能的方法主要包括材料本征性能提升和结构复合设计优化, 但提高单一结构材料的本征力学性能的研究已接近极限。本研究旨在提出周期序构结构材料的理念, 并采用一体化烧结制备出整体性能更好的结构复合材料, 从而探索高性能结构复合材料发展的新范式。通过周期序构化的设计, 构建了兼具陶瓷高硬度和金属强韧性的 TiB-Ti 功能单元, 设计制备了不同周期序构模式的 TiB-Ti 高性能结构复合材料。在此基础上, 对这些结构进行了力学性能研究, 并通过分析其断裂模式来探究不同序构模式对材料整体性能的影响。结果表明, 周期序构化可以通过改变材料宏观断裂模式和应力分散特性来提高材料的整体性能。这一研究新范式对其他结构复合材料的结构设计和性能突破具有指导和借鉴意义。对周期序构模式的复杂化探索, 对周期序构结构材料的应用场景探索和其他性能测试研究也将是未来需要重点关注的问题。

**关键词:** 复合材料; 周期序构; 力学性能; 结构设计

中图分类号: TB333 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2024)06-0662-09

## Design, Fabrication and Properties of Periodic Ordered Structural Composites with TiB-Ti Units

SUN Haiyang, JI Wei, WANG Weimin, FU Zhengyi

(State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** High-performance structural material components are widely researched because of their curcial applications in aerospace, transportation and automotive, electronic information, metallurgy, and other fields. Traditional methods for enhancing the overall performance of structural material components mainly include improving intrinsic material properties and optimizing structural composite design. However, research on enhancing the intrinsic mechanical properties of single structural materials is reaching its limits. This study aims to explore a new paradigm for the development of high-performance structural composites by proposing the concept of periodic ordered structural materials and preparing the structural composites with improved overall properties through integrated sintering. The TiB-Ti functional unit with high hardness of ceramics and strong toughness of metal was structured through periodical sequencing, and high-performance TiB-Ti structural composites with different periodical sequencing modes were

收稿日期: 2023-12-04; 收到修改稿日期: 2024-01-19; 网络出版日期: 2024-01-22

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(92163208); 国家自然科学基金优秀青年科学基金(52322207)

National Natural Science Foundation of China Key Program (92163208); National Natural Science Foundation of China (52322207)

作者简介: 孙海洋(1999-), 男, 硕士研究生. E-mail: sunhaiyang@whut.edu.cn

SUN Haiyang (1999-), male, Master candidate. E-mail: sunhaiyang@whut.edu.cn

通信作者: 傅正义, 教授. E-mail: zyfu@whut.edu.cn; 季伟, 研究员. E-mail: jiwei@whut.edu.cn

FU Zhengyi, professor. E-mail: zyfu@whut.edu.cn; JI Wei, professor. E-mail: jiwei@whut.edu.cn

designed and prepared. On this basis, the mechanical properties of these structures were investigated, and their fracture modes were analyzed to understand how different ordering modes affect the overall properties of the materials. The results show that periodic ordered structure can improve the overall performance of materials by altering their macroscopic fracture modes and stress distribution properties. This new paradigm of research provides valuable insights and guidance for the structural design and performance breakthrough of other structural composites. Future research may focus on the exploration of the complexity of the periodic ordered structure modes, identifying potential application scenarios for these materials, and conducting additional performance testing studies.

**Key words:** composite material; periodic order; mechanical property; structural design

高性能结构材料在航空航天、交通汽车、飞行器、电子信息、冶金领域等结构部件中的应用得到了广泛研究。其中典型的叠层复合材料,如陶瓷-陶瓷、陶瓷-金属、金属-金属和金属-陶瓷-金属间体系,由于结合了多种不同材料的优点而表现出理想的综合结构性能<sup>[1-6]</sup>。例如陶瓷-金属叠层结构可以将金属的良好延展性和韧性与陶瓷的高强度相结合。叠层复合结构可以通过多种加工技术制得,如黏接、化学沉积、扩散连接、热累积轧制、片状粉末冶金和反应热压等<sup>[7-14]</sup>。

放电等离子烧结(SPS)是制备叠层和功能梯度复合材料的先进烧结技术,能够在较低温度和较短时间内实现材料致密化和一体化制备。此外,SPS 是一种简单、经济、高效的制造工艺,可以在烧结过程中获得较小的晶粒尺寸,从而获得更好的力学性能<sup>[15]</sup>。SPS 还可以通过改变模具中放置粉末混合物的顺序来获得特定结构,一体化制备具有结构变化的复合材料。

TiB 陶瓷具有较高的强度、硬度和弹性模量, Ti 金属具有很高的韧性。TiB 具有优异的热力学稳定性,并且具有相近的热膨胀系数的 TiB 和 Ti<sup>[16-17]</sup>,有利于层状复合材料的紧密连接。同时材料中不存在明显的界面,理论力学性能极高,因此其在防

护领域有巨大的应用潜力。

基于此,本工作提出周期序构高性能结构材料的设计思想,以 TiB-Ti 为基元构建出兼具高硬度和高韧性的周期序构叠层复合材料。以 TiB<sub>2</sub> 和 Ti 粉体为原料,通过 SPS 工艺在 1450 °C 一体化制备了一系列不同序构模式的 TiB-Ti 周期序构复合材料,研究了不同周期序构复合材料的弯曲强度、压缩强度和断裂特性,探究了周期序构化的结构对复合材料的整体力学性能的影响。这一研究新范式将对其他结构复合材料的结构设计和性能突破具有指导和借鉴意义。

## 1 实验方法

### 1.1 材料选择与制备

实验采用的 Ti 粉末平均粒径为 30 μm(中诺新材, 99.5%), 采用的 TiB<sub>2</sub> 粉末平均粒径为 7 μm(丹东市化工研究院有限公司, 98.5%)。原料的形貌和相组成如图 1 所示。

将质量比为 1 : 1 的 TiB<sub>2</sub> 和 Ti 粉末混合物分散在含有玛瑙球的乙醇溶液中球磨 24 h, 球与粉末的质量比为 4 : 1。然后在 60 °C 下旋转蒸发混合浆料, 在 65 °C 的干燥炉中干燥 24 h, 最后通过 74 μm(200 目)

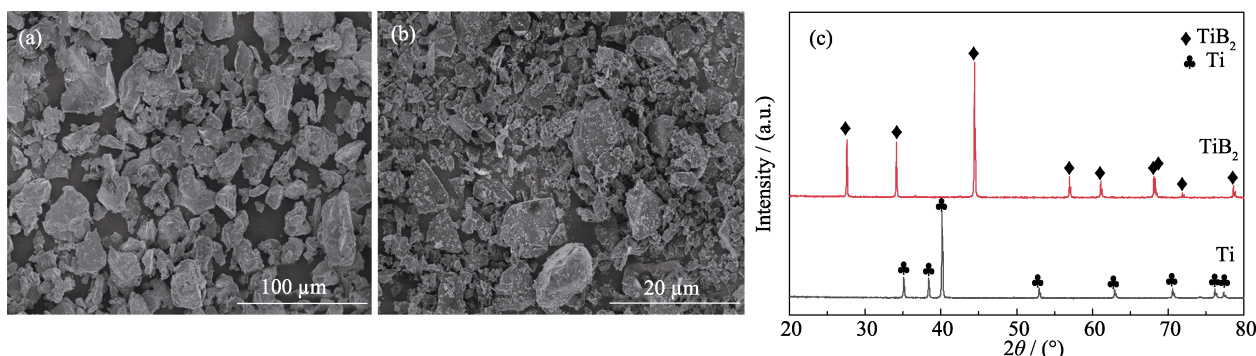


图1 原料的形貌和相组成

Fig. 1 Morphologies and phase compositions of raw materials  
(a, b) Microstructures of (a) Ti powder and (b) TiB<sub>2</sub> powder; (c) XRD patterns of Ti and TiB<sub>2</sub> powders

筛造粒。在 SPS 过程中, Ti 与  $\text{TiB}_2$  通过化学反应原位合成 TiB。按照图 2 所示的六种周期序构模式逐层铺设粉体, 将样品置于内径为 50 mm, 外径为 80 mm 的圆柱形石墨模具中, 通过 SPS 设备(HPD 60, FCT Systeme GmbH, 德国)进行烧结。在 30 MPa 的单轴压力下, 将装配好的样品以 100 °C/min 的升温速率分别加热到 1450 °C, 然后保温 5 min。最后, 样品在小于 50 °C/min 的速率下冷却至常温。烧结后的样品用金刚石砂轮(acc-63dx, 日本冈本机床有限公司)研磨并抛光至镜面。

## 1.2 结构设计

受贝壳珍珠层“砖泥”结构的周期性排布和其断裂方式具有方向性的特性所启示, 在传统陶瓷-金属叠层结构的基础上, 本研究提出周期序构高性能结构材料的设计理念, 设计出厚度一定、整体面密度一致的六种 TiB-Ti 周期序构复合材料。按照图 2 制备出直径均为 50 mm、厚度均为 6 mm 的 TiB-Ti 周期序构复合材料, 其周期数分别为一到三。六种周期序构结构分别记为 aaabbb(TiB-TiB-TiB-Ti-Ti-Ti)、aabbab(TiB-TiB-Ti-Ti-TiB-Ti)、aababb(TiB-TiB-Ti-TiB-Ti-Ti)、abbaab(TiB-Ti-Ti-TiB-TiB-Ti)、abaabb(TiB-Ti-TiB-TiB-Ti-Ti)、ababab(TiB-Ti-TiB-Ti-TiB-Ti), 其中 a 表示 1 mm 厚的陶瓷 TiB 层, b 表示 1 mm 厚的金属 Ti 层。

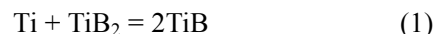
## 1.3 测试方法

采用阿基米德排水法测量了材料的密度。采用 X 射线衍射仪(XRD, Empyrean series 3, Malvern Panalytical, 荷兰)测定了样品的物相。采用日立扫描电子显微镜(FESEM, Hitachi SU8230, 日本)观察样品微观形貌。采用电子探针微量分析仪(EPMA, JEOL JXA-8230, 日本)研究了 TiB-Ti 的元素分布。采用万能试验机(Instron 5967, 美国)测试弯曲强度和抗压强度。采用光学显微镜(VHX7000, Keyence, 日本)观察材料宏观断裂形貌。相对密度和机械性能均至少测量 10 次, 取平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 物相鉴定

Ti 和  $\text{TiB}_2$  之间的化学反应可以按式(1)进行:



如上所述, 当存在足量的 Ti 时, TiB 相比  $\text{TiB}_2$  相热力学更稳定。在烧结过程中,  $\text{TiB}_2$  相转变为 TiB 相<sup>[18]</sup>。

图 3 给出了在 1450 °C、30 MPa 条件下烧结制备<sup>[19]</sup>的六种周期序构复合材料的 XRD 图谱。六个烧结样品均由 TiB 和 Ti 相组成, 未发现残余  $\text{TiB}_2$ , 说明  $\text{TiB}_2$  在高温烧结过程中与 Ti 已完全反应。

### 2.2 微观形貌以及元素分布

图 4 为在 1450 °C、30 MPa 下保温 5 min 烧结得到的周期序构 TiB-Ti 复合材料断面微观形貌。图 4(a)为 TiB 层的断面, 从图中可以看出 TiB 层已经完全致密, 晶粒大小约为 6  $\mu\text{m}$ 。图 4(b)为 Ti 层的断面图, 可以看出 Ti 晶粒在高温下明显长大, 晶粒大小约为 60  $\mu\text{m}$ , 此外 Ti 层呈现出粗糙的板条状晶粒形态。图 4(c)为 TiB 层和 Ti 层的界面微观形貌, 两边的形貌不同, 未发现裂纹, 界面较连续。

以 ababab 六层周期序构 TiB-Ti 复合材料为例, 在数码照片和 EPMA 图像中都可以清楚地观察到 TiB 和 Ti 层的梯度周期分布(图 5)。由 Ti 层和 TiB 层相互交替组成一体化复合材料, 随着 TiB-Ti 叠层周期性变化, EPMA 元素分布的颜色也发生了显著变化。TiB-Ti 复合材料 ababab 从纯 TiB 层向纯 Ti 层交替变化三个周期, 元素分布与结构设计示意图(图 2)中序构 6 基本一致。多层厚度相近, 约为 1 mm, 层间结合牢固, 基本未观察到裂纹、孔隙或其他微尺度缺陷, 说明使用 SPS 在 1450 °C、30 MPa 下保温 5 min 可以制备出完全致密的 TiB-Ti 叠层复合材料。

对 TiB-Ti 复合材料样品 TiB 层和 Ti 层的界面进行 EDS 图谱分析, 结果如图 6 所示。复合材料中存

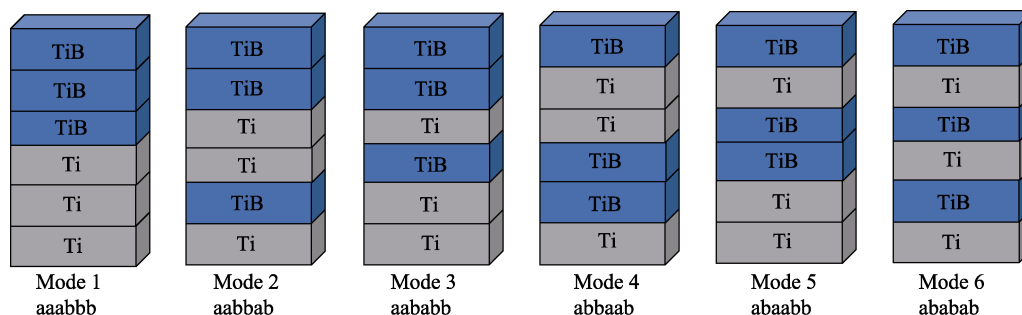


图 2 TiB-Ti 周期序构的结构示意图

Fig. 2 Structure diagrams of periodic ordered structural composites with TiB-Ti units



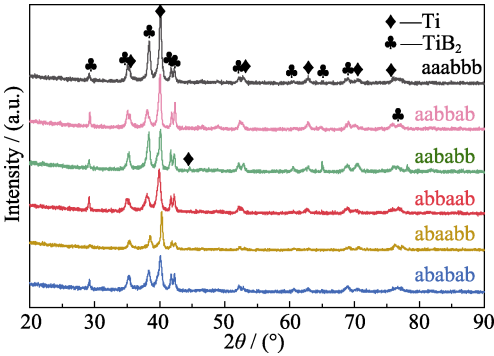


图 3 六种周期序构复合材料的 XRD 图谱  
Fig. 3 XRD patterns of periodic ordered structure composites

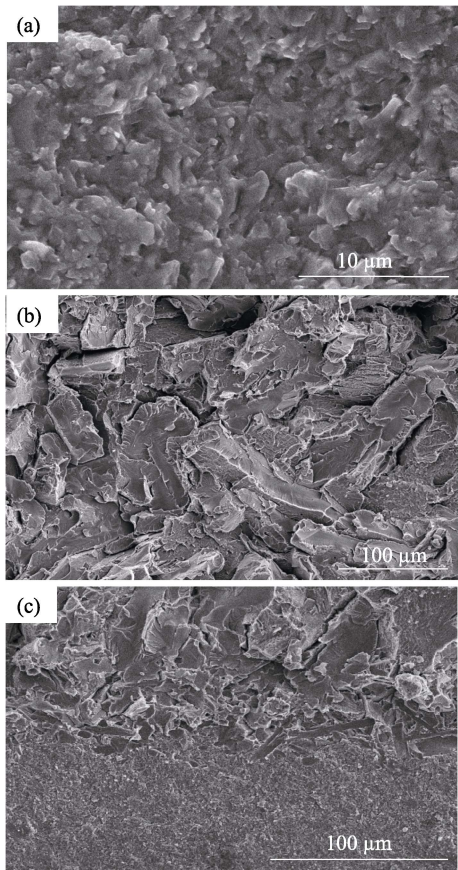


图 4 SPS 制备的 TiB-Ti 复合材料的断口微观形貌  
Fig. 4 Fractural microstructures of TiB-Ti composites prepared by SPS  
(a) TiB fracture surface; (b) Ti fracture surface; (c) Two-phase interface fracture

在两层明显界面：一种是由 TiB 组成的较暗的富 B 区，另一种是灰色较浅的纯 Ti 层。

2.3 力学性能

本研究设计不同结构是由不同厚度的陶瓷层和金属层周期排列而成。六种结构的 TiB-Ti 复合材料均完全致密，进一步研究了周期序构化的结构对材料整体的抗弯强度和抗压强度的影响。

为了和六种结构的 TiB-Ti 复合材料进行比较，

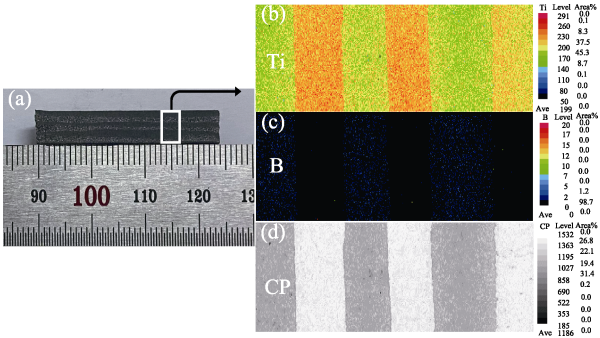


图 5 EPMA 测试的 TiB-Ti 周期序构复合材料 ababab 截面上元素的分布图  
Fig. 5 Distribution of elements on ababab section of TiB-Ti periodic ordered composite tested by EPMA  
(a) Sample selection photo; (b) Ti element distribution; (c) B element distribution; (d) Backscattered electron (BSE) image

本工作在相同工艺(1450 ℃、30 MPa 下保温 5 min)下制备了单相 TiB 和单相 Ti 材料，并对这两种材料进行了力学性能测试。制备的单相 TiB 和单相 Ti 材料的基本力学参数如表 1 所示。

采用万能试验机测量材料三点弯曲强度，三点弯曲试样的尺寸为 6 mm×8 mm×36 mm，跨距为 30 mm，加载速率为 0.5 mm/min，试样的 TiB 层朝上、Ti 层朝下，施加向下的载荷。

采用万能试验机测量材料的压缩强度，压缩试样形状为横截面正方形的方棱柱，方棱柱试样截面边长为 4 mm、高度为 6 mm，加载速率为 0.5 mm/min，试样的 TiB 层朝上、Ti 层朝下，施加向下的载荷。

如图 7(a)所示，不同周期序构 aaabbb、aabbab、aababb、abbaab、abaabb、ababab 表现出不同的抗弯强度，并且宏观结构的变化使抗弯的应力-应变曲线表现出先降低后升高的阶梯状变化。如图 7(b)所示，aaabbb、aabbab、aababb、abbaab、abaabb、ababab 的抗弯强度分别为 1109.22、767.99、908.62、673.17、1002.70 和 663.79 MPa。多周期序构 TiB-Ti 复合材料的抗弯强度都低于普通叠层的 TiB-Ti 复合材料 aaabbb，厚陶瓷在上的结构表现出更强的抗弯

表 1 TiB 陶瓷和 Ti 金属材料的力学参数		
Table1 Mechanical properties of TiB ceramic and Ti metal materials		
Parameter	TiB	Ti
Density/(g·cm <sup>-3</sup> )	4.56	4.50
E/GPa	370	110
K <sub>IC</sub> /(MPa·m <sup>1/2</sup> )	6.1	29.3
Bending strength/MPa	489.95	238.32
Compressive strength/MPa	1035.43	1596.26
Hardness/GPa	20.0	1.7

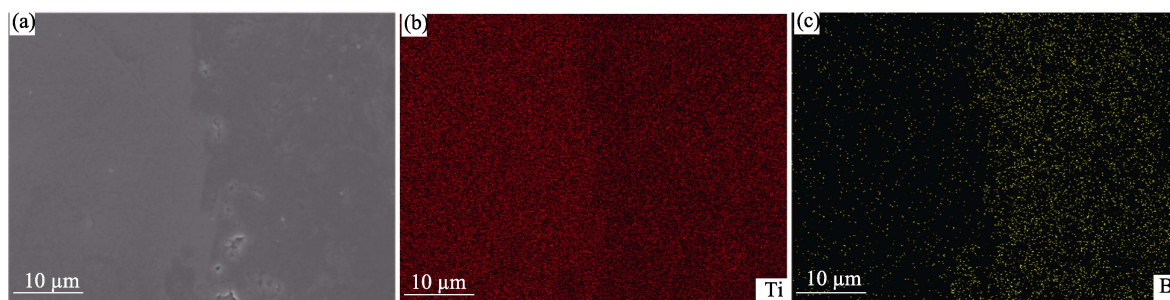


图 6 TiB-Ti 复合材料界面的 EDS 面扫描分析

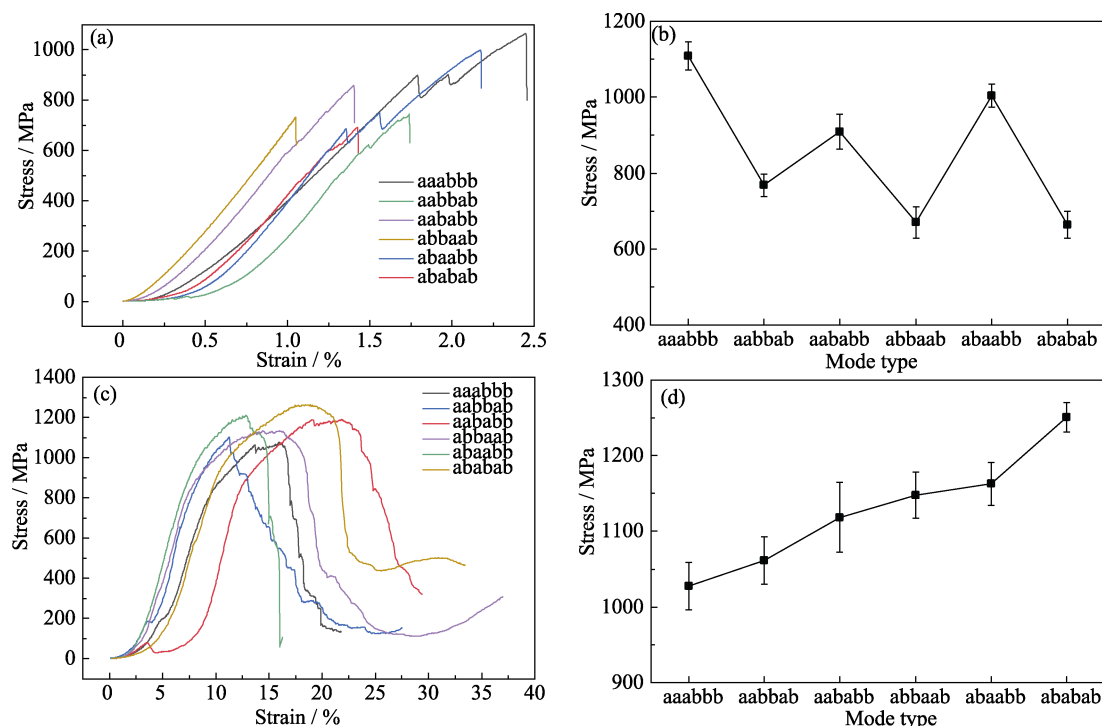
Fig. 6 EDS mappings of the TiB-Ti composite materials interface  
(a) SEM image; (b) Ti element; (c) B element

图 7 六种 TiB-Ti 周期序构复合材料的力学性能

Fig. 7 Mechanical properties of six TiB-Ti periodic ordered composites  
(a) Bending strength stress-strain curves; (b) Bending strength line chart; (c) Compressive strength stress-strain curves; (d) Compressive strength line chart; Colorful figures are available on website

强度, 其中三周期 TiB-Ti 复合材料 ababab 表现出最低的抗弯性能。TiB 层的硬度大于 Ti 层, TiB 层受到的集中载荷相对较大, 在这六种周期结构中 aaabbb 的陶瓷层厚度最集中, 所以该结构的 TiB 层可以承受更大的载荷, 抗弯强度最高。abaabb 因为断裂模式的改变, 其抗弯强度要强于其他厚陶瓷在上的 aabbab 和 aababb。

如图 7(c) 所示, TiB-Ti 周期序构复合材料的压缩强度应力-应变曲线由于整体叠层结构的影响, 当载荷达到最高值时, 材料还未完全失效。如图 7(d) 所示, 不同周期序构 aaabbb、aabbab、aababb、abbaab、abaabb、ababab 的抗压强度分别为 1085.01、1092.20、1135.66、1147.98、1171.64 和 1250.76 MPa。

多周期序构 TiB-Ti 复合材料的抗压强度高于普通叠层的 TiB-Ti 复合材料 aaabbb, 其中三周期 TiB-Ti 复合材料 ababab 的抗压强度均高于其他周期序构 TiB-Ti 复合材料, 展现出更高的抗压性能。在压缩应力的作用下, ababab 展现出较慢的载荷下降速率, 比传统叠层结构 aaabbb 具有更高的应变率, 这有利于断裂的早期预警。

虽然传统叠层结构 aaabbb 具有最厚的陶瓷层和金属层, 但是承受压缩应力时, 陶瓷层的应力集中很明显, 导致陶瓷层易发生破碎失效, 应变率较低, 压缩强度较低。

与表 1 中单相 Ti 和单相 TiB 的力学参数相比, 周期序构复合材料可以有效地将陶瓷的强度和金属



的韧性相结合, 展现出更优的整体性能。

## 2.4 断裂模式

图 8(a~f)为六种 TiB-Ti 周期序构复合材料的三点抗弯试样宏观裂纹形貌。在弯曲应力的作用下, 试样断裂呈现折线逐步失效状态, 裂纹先由 TiB 层产生再扩展到 Ti 层, 主裂纹呈现阶梯状弯曲扩展路径。扩展过程中, 产生的裂纹在多个界面处发生分裂与偏转现象, 裂纹偏转增加了裂纹的扩展路径, 由于裂纹尖端的塑性变形, 裂纹可能会迅速产生、扩展, 然后被 Ti 层阻止, 裂纹的分裂过程进一步耗散能量, 阻止载荷进一步传递, 增加了断裂能量消耗, 降低了裂纹的破坏性, 提高了整体结构的力学性能。

如图 8(e)所示, abaabb 试样在三点抗弯试验中, 除了裂纹阶梯状扩展外, 当载荷超过断裂强度时, 还发生了 TiB 层和 Ti 层层间逐渐断裂的现象。由于厚陶瓷与厚金属的界面结合承受拉应力的能力较差, 在抗弯试验过程中, 试样底面承受更多的拉应力, 使得 abaabb 的厚陶瓷和厚金属的界面出现分层, 部分厚陶瓷也出现了破碎现象, 陶瓷的破碎和层间的开裂都吸收了更多的能量, 断裂路径消耗了更多的能量, 使得 abaabb 的抗压强度较高, 抗弯强度有所提升, 仅次于 aaabbb。

结合图 7(b)抗弯强度折线图分析可知, 序构 1 即 aaabbb 的抗弯强度最高, 因为其只有一个界面结合, 少于其他的五种序构模式。除此之外, 序构 1 还具有最厚的陶瓷层和最厚的金属层, 3 mm 的陶瓷层可以承载更集中的压应力, 3 mm 的金属层具有更强的韧性, 可以承载更强的拉应力, 所以 aaabbb 展现出最强的抗弯强度。

序构 6 即 ababab 的抗弯强度在六种结构中最低。ababab 有 5 个界面结合, 界面最多, 而且 ababab 的陶瓷和金属层均为 1 mm, 三个周期的结构在承受弯曲应力时裂纹路径虽然发生了扩展, 但是每一层的强度不高, 在应力集中的过程中, 裂纹扩展的速度快, 说明序构材料叠层厚度和序构材料强度对材料的整体强度有一定影响。

序构 2 到序构 5 这四种材料均为两个周期的结构, 具有三个界面结合, 它们有着不同的堆叠顺序和层厚。厚陶瓷在上的结构 aababb 的抗弯强度要高于 aabbab, 这是因为在抗弯测试中, aababb 中厚金属承载了更强的拉应力, 使得金属层的失效更慢, 整体强度更高。abbaab 由于薄陶瓷的抗弯强度弱于厚陶瓷, 并且其底部是薄金属, 抗拉强度比厚金属低, 故薄陶瓷在上的结构 abbaab 在两个周期的结构中抗弯强度最低。

本实验对 TiB-Ti 周期序构复合材料压缩测试后的断裂行为也进行了研究, 压缩试验后试样的破坏形态如图 8(a'~f')所示。破坏模式同时表现出脆性材料和高韧性材料的力学特征, 层与层之间具有强黏结的层间结构。裂纹既有剪切破坏, 也有纵裂破坏<sup>[20]</sup>。

TiB-Ti 周期序构复合材料压缩破坏后的断口形貌并不一致, 如图 8(a')所示, aaabbb 中的陶瓷层和金属层均破裂崩落成碎片, 其他五种序构材料的压缩破坏形貌依旧保留着较为完整的叠层结构, 层间没有分层, 具有更强的延性和韧性。

序构 2 到序构 5 这四种结构具有相同的 3 个界面结合, 它们的压缩强度相近。对比只有一个界面的序构 1 即 aaabbb 可知, 具有 3 个界面结合的序构模式压缩强度更高。序构 6 即 ababab 具有最多的界

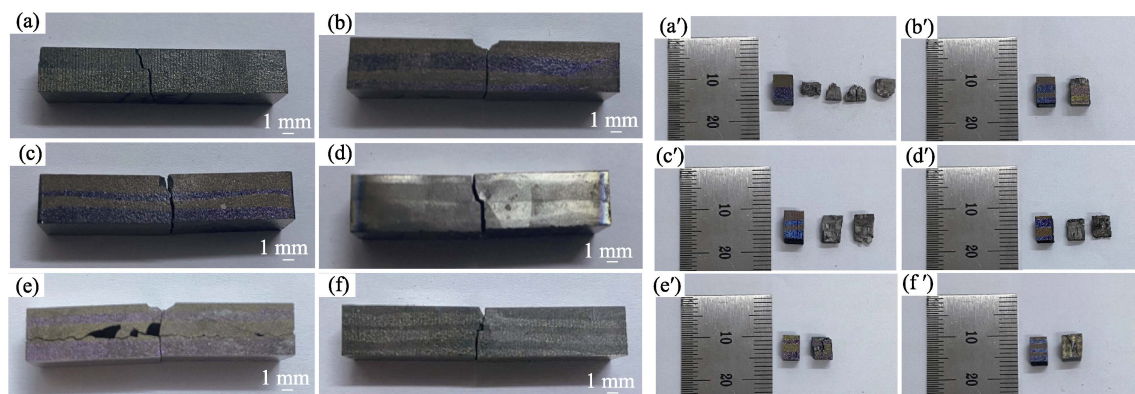


图 8 六种 TiB-Ti 周期序构复合材料的三点抗弯试样宏观裂纹形貌(a~f)和压缩试样破坏形貌(a'~f')

Fig. 8 Macro-cracked morphologies (a-f) and fracture appearances (a'-f') of six TiB-Ti periodic ordered composite bending samples and compressed samples  
(a, a') aaabbb; (b, b') aabbab; (c, c') aababb; (d, d') abbaab; (e, e') abaabb; (f, f') ababab

面结合,在压缩应力作用下,其压缩强度最高,说明多界面序构模式对于压缩强度的提升影响最大。

aaabbb 只有一个界面结合,在受压过程中,容易应力集中,陶瓷层破碎,金属层失去支撑而失效,强度最低。与其他序构模式相比,ababab 的界面结合最多,多界面结构和良好的界面强度使其在压缩应力的作用下应力分布更加均匀,可以承载更高的压缩应力。

综合图 7 和图 8 还可以看出叠层顺序和界面结合对层状复合材料弯曲强度和压缩强度都有影响。这六种周期序构复合材料由不同堆叠顺序粉末烧结制备而成,原料的堆叠顺序对裂纹扩展模式有影响,不同堆叠顺序的试样具有不同的裂纹扩展形态。叠层顺序和层厚的变化改变了复合材料中层的断裂顺序,表现为不同序构的抗弯强度和压缩强度应力-应变曲线不同。与传统多层结构相比,周期序构的模式具有更多的层厚变化和周期变化,可以根据应用场景设计更合适的结构。本研究中不同的序构模式体现出不同的结构强度,与表 1 中普通单相 TiB 和单相 Ti 的力学性能相比,周期序构复合材料的抗弯强度均更高。

Wadgaonkar 和 Parameswaran<sup>[21]</sup>提出,每一层不同厚度材料的抗断裂能力可能不同。在图 9 所示的三点抗弯试样断口中也可以观察到这一现象。如图所示,Ti 层和 TiB 层表面的断裂形貌完全不一样,

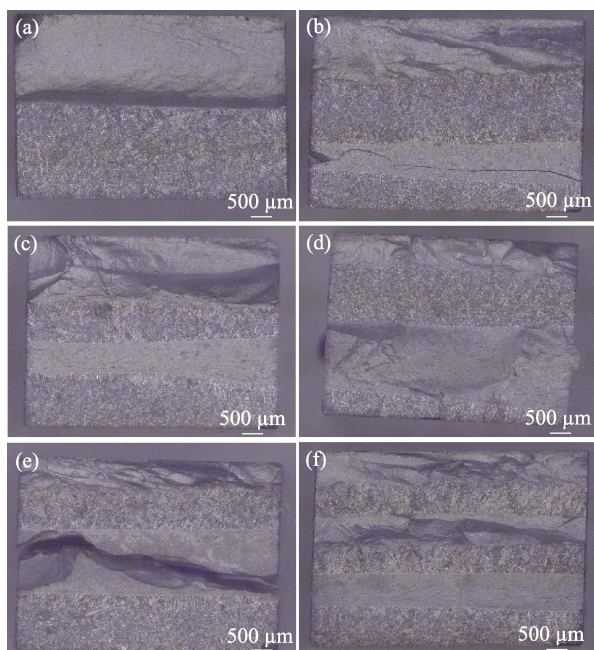


图 9 六种 TiB-Ti 周期序构复合材料的三点抗弯试样宏观断口形貌

Fig. 9 Macro fracture morphologies of six TiB-Ti periodic ordered composite bending samples

(a) aaabbb; (b) aabbab; (c) aababb; (d) abbaab; (e) abaabb; (f) ababab

TiB 层附近断口光滑,Ti 层附近断口粗糙。这表明两层断裂所需的能量不同,断裂先从 TiB 层开始,然后向 Ti 层扩展<sup>[22]</sup>。

ababab 三周期序构 TiB-Ti 复合材料的压缩强度在六种结构中最高,通过光学显微镜观察 ababab 垂直于层状方向进行压缩试验的表面形貌和断裂特征,分析其强度最高的原因。图 10 为 ababab 结构的压缩试样宏观断口形貌。观察后发现,材料在厚度方向上发生剪切破坏,并在层间以阶梯形式大致沿 45° 出现“Z”字形弯曲扩展路径。材料基本保持了 TiB-Ti 周期复合材料的层状结构。从图中可以看出,试样在界面处发生分层,TiB 层出现破碎脱落,Ti 层发生弯曲并与 TiB 层发生部分剥离,这些因素共同作用共同导致材料最后发生失效<sup>[23]</sup>。

在压缩过程中,首层的 TiB 先发生破坏失效。当 TiB 层破坏后,材料整体承载应力的截面积变小,剩余材料的变形量增加。TiB 层的断裂导致剩余 Ti 层的整体强度减小,产生位移进而发生剪切破坏。随着 Ti 层的剪切失效,裂纹继续向下一层扩展,ababab 整体的裂纹扩展路径最长,消耗了最多的能量,因此 ababab 三层周期结构整体上表现出最强的压缩强度。

当 TiB-Ti 复合材料试样在整体受压后,脆性 TiB 层由于内部应力破坏发生裂纹扩展,韧性 Ti 层发生剪切破坏,试样整体失效呈阶梯状。除了主裂纹外,ababab 结构中的各层分布着其他裂纹,在轴向方向裂纹扩展存在垂直、平行和倾斜等几种方向的形式。主裂纹在贯穿 Ti 层之后发生偏转,主要是在剪切力作用下发生断裂。在平行方向的裂纹周边

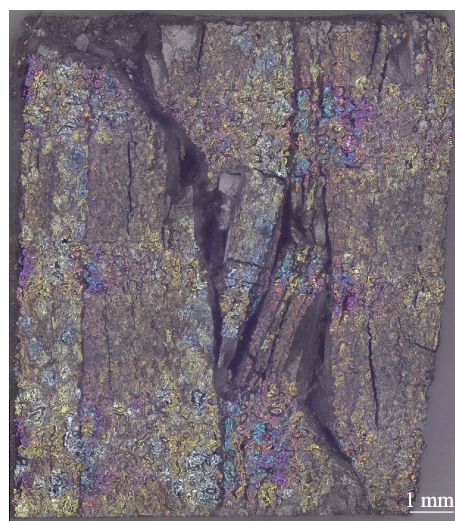


图 10 TiB-Ti 周期序构复合材料 ababab 结构的压缩试样宏观破坏形貌

Fig. 10 Macro fracture morphology of TiB-Ti periodic ordered composite sample with compressed ababab structure



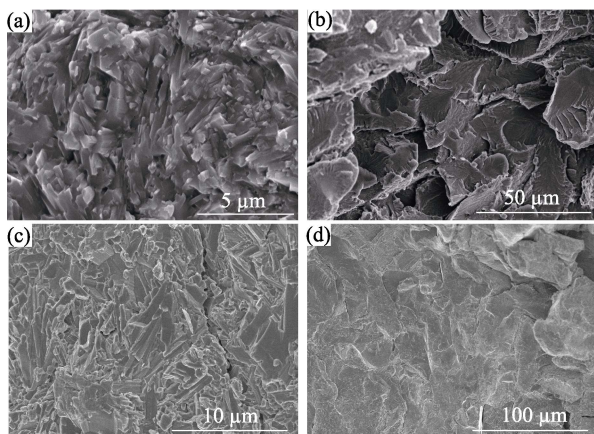


图 11 TiB-Ti 周期序构复合材料的抗弯微观断口形貌(a, b)和压缩显微断口形貌(c, d)

Fig. 11 Microscopic fracture morphologies of TiB-Ti periodic ordered composite bending samples (a, b) and compressed samples (c, d) (a, c) TiB layer; (b, d) Ti layer

还存在一些斜裂纹, 试样的右侧产生了横向位移, 这是由试样在水平方向上的压力效应引起的。

图 11(a, b)为 TiB-Ti 周期序构复合材料的抗弯微观断口形貌。TiB 层棒状晶体出现明显断裂, 陶瓷断口参差不齐, 具有很多小平台。TiB 层以沿晶断裂为主, 表现为脆性断裂; Ti 层以延性断裂为主, 宏观上表现为塑性断裂。从图 11(b)可以看出, Ti 层呈现明显的韧性断裂特点, 伴有大量韧窝, 出现晶间状断裂形态和裂纹分岔模式, 板条状断口周围有许多韧窝和撕裂棱, 还有一些 Ti 晶粒脱黏引发的准断裂伴撕裂脊断裂, 存在塑性变形<sup>[24-25]</sup>。TiB-Ti 复合材料压缩后的微观形貌如图 11(c, d)所示, 可以看出, 室温准静态压缩后的复合材料显微组织主要表现为 TiB 晶粒挤压、TiB 晶粒断裂以及 TiB 与 Ti 界面挤压变形三种现象。Ti 层主裂纹附近存在许多微裂纹、河流解理和韧窝<sup>[26-27]</sup>。TiB 晶粒在载荷作用下断裂成多段, 通过断裂方式吸收了能量, 从而有效地承受压应力载荷。

### 3 结论

采用 SPS 技术在 1450 °C 和 30 MPa 条件下制备了均匀致密的六种 TiB-Ti 周期序构复合材料, 研究了不同序构模式对材料抗弯强度、压缩强度以及断裂方式的影响。

序构 aaabbb、aabbab、aababb、abbaab、abaabb、ababab 的抗弯强度分别为 1109.22、767.99、908.62、673.17、1002.70 和 663.79 MPa。序构模式使弯曲断裂模式呈现折线逐步失效状态, 主裂纹呈现阶梯状弯曲扩展路径, 消耗了更多的能量, 提高了整体结

构的力学性能。

序构 aaabbb、aabbab、aababb、abbaab、abaabb、ababab 的抗压强度分别为 1085.01、1092.20、1135.66、1147.98、1171.64 和 1250.76 MPa。多周期序构 TiB-Ti 复合材料的多界面结构和良好的界面强度使其在压缩应力作用下应力分布更加均匀, 比传统叠层结构可以承载更高的压缩应力。

周期序构的模式具有更多的层厚变化和周期变化, 可以通过改变材料宏观断裂模式和应力分散特性来提高材料的整体性能。这一研究新范式对其他结构复合材料的结构设计和性能突破具有指导和借鉴意义。

### 参考文献:

- [1] OYA T, TIESLER N, KAWANISHI S, *et al.* Experimental and numerical analysis of multilayered steel sheets upon bending. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, **210(14)**: 1926.
- [2] GO Y H, CHO J, JEONG C Y, *et al.* Stress distribution of bulk metallic glass/metal laminate composites during uni-axial fracture. *Materials Science and Engineering A*, 2007, **460/461**: 377.
- [3] AGHDAM M M, KAMALIKHAH A. Micromechanical analysis of layered systems of MMCs subjected to bending—effects of thermal residual stresses. *Composite Structures*, 2004, **66(1-4)**: 563.
- [4] KUO, D H; KRIVEN, W M. Fracture of multilayer oxide composites. *Materials Science and Engineering: A*, 1998, **241(1)**: 241.
- [5] LUO W, YAN S, ZHOU J. Ceramic-based dielectric metamaterials. *Interdisciplinary Materials*, 2022, **1(1)**: 11.
- [6] LUO J. Computing grain boundary “phase” diagrams. *Interdisciplinary Materials*, 2023, **2(1)**: 137.
- [7] EAST D, GIBSON M A, LIANG D, *et al.* Production and mechanical properties of roll bonded bulk metallic glass/aluminum laminates. *Metallurgical and Materials Transaction A*, 2013, **44(5)**: 2010.
- [8] CARREÑO F, CHAO J, POZUELO M, *et al.* Microstructure and fracture properties of an ultrahigh carbon steel-mild steel laminated composite. *Scripta Materialia*, 2003, **48(8)**: 1135.
- [9] SYN C K, LESUER D R, SHERBY O D. Enhancing tensile ductility of a particulate-reinforced aluminum metal matrix composite by lamination with Mg-9%Li alloy. *Materials Science and Engineering*, 1996, **206(2)**: 201.
- [10] OHASHI Y, WOLFENSTINE J, KOCH J, *et al.* Fracture behavior of a laminated steel-brass composite in bend tests. *Materials Science and Engineering*, 1992, **151(1)**: 37.
- [11] SMITH D J, ZUO Y Q, PARTRIDGE P G, *et al.* Bend stiffness and strength of laminates composed of titanium alloy and titanium metal matrix composite. *Materials Science and Technology*, 1997, **13(1)**: 35.
- [12] LIU B X, HUANG L J, GENG L, *et al.* Fabrication and superior ductility of laminated Ti-(TiB<sub>w</sub>/Ti) composites by diffusion welding. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, **602**: 187.
- [13] LIU B X, HUANG L J, GENG L, *et al.* Gradient grain distribution and enhanced properties of novel laminated TiTiB<sub>w</sub>/Ti composites by reaction hot-pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, **595**: 257.
- [14] LIU B X, HUANG L J, GENG L, *et al.* Microstructure and tensile behavior of novel laminated Ti-TiB<sub>w</sub>/Ti composites by reaction hot pressing. *Materials Science and Engineering A*, 2013, **583**: 182.



- [15] GUPTA N, MUKHOPADHYAY A, PAVANI K, *et al.* Spark plasma sintering of novel  $\text{ZrB}_2$ -SiC-TiSi<sub>2</sub> composites with better mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, **534**: 111.
- [16] MALIK P, KADOLI R. Thermo-elastic response of SUS316-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> functionally graded beams under various heat loads. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, **128**: 206.
- [17] KHOA N D, THIEM H T, DUC N D. Nonlinear buckling and postbuckling of imperfect piezoelectric S-FGM circular cylindrical shells with metal-ceramic-metal layers in thermal environment using Reddy's third-order shear deformation shell theory. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2019, **26**(3): 248.
- [18] FENG H B, JIA D C, ZHOU Y. Spark plasma sintering reaction synthesized TiB reinforced titanium matrix composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2005, **36**(5): 558.
- [19] 神祥博, 张朝晖, 王富耻, 等. 放电等离子烧结法制备 TiB 陶瓷刀具材料的显微结构和力学性能. *模具制造*, 2010, **10**(12): 92.
- [20] NAMBU S, MICHIOUCHI M, INOUE J, *et al.* Effect of interfacial bonding strength on tensile ductility of multilayered steel composites. *Composites Science and Technology*, 2009, **69**(11/12): 1936.
- [21] WADGAONKAR S C, PARAMESWARAN V. Structure of near-tip stress field and variation of stress intensity factor for a crack in a transversely graded material. *Journal of Applied Mechanics*, 2009, **76**(1): 011014.
- [22] KIDANE A, ADDIS A. Quasi-static and dynamic fracture initiation toughness of Ti/TiB layered functionally graded material under thermo-mechanical loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010, **77**(3): 479.
- [23] LIU B X, HUANG L J, GENG L, *et al.* Fracture behaviors and micro-structural failure mechanisms of laminated Ti-TiB<sub>w</sub>/Ti composites. *Material Science and Engineering: A*, 2014, **611**: 290.
- [24] HAN Y F, DUAN H Q, LU W J, *et al.* Fabrication and characterization of laminated Ti-(TiB+La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Ti composite. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2015, **25**(5): 453.
- [25] LIU B X, HUANG L J, GENG L. Elastic and plastic behaviors of laminated Ti-TiB<sub>w</sub>/Ti composites. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 2015, **30**(3): 596.
- [26] KOSEKI T, INOUE J, NAMBU S. Development of multilayer steels for improved combinations of high strength and high ductility. *Materials Transactions*, 2014, **55**(2): 227.
- [27] STEIF P S. Bimaterial interface instabilities in plastic solids. *International Journal of Solids and Structures*, 1986, **22**(2): 195.