

TiB₂ 基陶瓷/Ti-6Al-4V 合金梯度纳米复合材料组织演化与防弹性能

韩保红¹, 程兆刚¹, 韩思辰², 赵忠民¹, 王民全¹

(1. 陆军工程大学石家庄校区, 河北 石家庄 050003)

(2. 香港城市大学, 香港 999077)

摘要: 基于陶瓷/钛合金液态熔合与扩散原理, 采用离心反应熔铸工艺制备出 TiB₂ 基陶瓷/Ti-6Al-4V 梯度纳米结构复合材料。经 14.5 mm 军用制式穿甲弹 DOP 靶试, TiB₂ 基陶瓷与 TiB₂ 基陶瓷/Ti-6Al-4V 梯度纳米结构复合材料的平均质量效益分别为 3.05 和 7.30。因此可认为, 由于陶瓷/钛合金层间生成 TiB₂、TiB 呈空间尺度连续梯度演化的复合结构, 该复合材料不仅具有高的层间解离抗力与优异的整体力学性能, 而且通过层间载荷传递与多尺度(微米/微纳米/纳米)界面剪切耦合的双重效应, 又在靶试中表现出高的抗弹性能。

关键词: 层状复合材料; 离心反应熔铸工艺; 梯度纳米结构界面; 组织演化; 抗弹性能

中图分类号: TB333

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)S1-123-04

陶瓷/金属梯度复合装甲材料以其结构/功能一体化的集成优势, 通过多尺度界面载荷传递与剪切耦合的双重机制, 削弱反射拉伸波, 加强侵彻动能耗散, 更有利于高效发挥陶瓷与金属之间性能互补优势^[1-3], 因而自然成为今后装甲材料发展的重要方向之一^[4, 5]。

陆军工程大学石家庄校区赵忠民^[6, 7]等人基于陶瓷/金属液态熔合原理, 用离心反应熔铸工艺成功制备出 TiB₂ 基陶瓷/钛合金梯度纳米结构复合材料。因此, 本实验基于前期工作, 结合陶瓷/钛合金层状复合装甲材料靶试, 探讨该层状复合材料显微结构与防弹性能之间的关系。

1 实验

实验原料采用粒度小于 3.5 μm、纯度大于 98% 的 B₄C 粉, 粒度小于 43 μm、纯度大于 99% 的 Ti 粉, 按式(1)所示的化学摩尔比进行反应体系配制, 并添加质量分数为 6% 的 Ni 金属添加剂。



选用直径为 100 mm、厚度为 7 mm 的 Ti-6Al-4V 合金板作为金属基板, 其物理、力学性能如表 1 所示。经表面加工、清洗后置于坩埚底部。经对反应体系进行球磨机械活化、压制成坯后, 将粉末压坯放入坩埚中。采用离心反应熔铸工艺^[6, 7]分别制备出 TiB₂ 基陶

瓷、陶瓷/钛合金层状复合材料样品, 并加工成对角线为 80 mm、厚度为 25 mm 的陶瓷/钛合金梯度纳米结构复合材料正六边形制品, 如图 1 所示。

采用着弹速为 990 ± 8 m s⁻¹ 的 14.5 mm 军用制式穿甲燃烧弹对材料进行 DOP (depth of penetration) 靶试, 如图 2 所示。根据式(2)计算出靶体材料防护系数 *N* (亦称质量效益)。

$$N = \frac{[P_0 - P_r]\rho_m}{t\rho_c} \quad (2)$$

式中, *P*₀ 为 603 装甲钢靶试穿深, 约为 41 mm; *P*_r 为 603 装甲钢背板剩余穿深(mm); *t* 为靶体材料穿深(mm); *ρ*_m 为 603 装甲钢密度(7.85 g cm⁻³); *ρ*_c 为靶体材料密度。

2 结果与讨论

FESEM 分析显示, TiB₂ 基陶瓷组成为 TiB₂ 微米

表 1 实验用 Ti-6Al-4V 合金物理与力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy used in the experiment

<i>E</i> / GPa	<i>ρ</i> / g cm ⁻³	<i>μ</i>	<i>ρ</i> _c / ×10 ¹⁰ kg m ⁻² s ⁻¹	<i>σ</i> _b / MPa	<i>σ</i> _s / MPa	<i>δ</i> / %	<i>Ψ</i> / %
109	4.51	0.34	2.71	925	825	10	25

收稿日期: 2017-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(51072229)

作者简介: 韩保红, 男, 1968 年生, 博士, 副教授, 陆军工程大学石家庄校区车辆与电气工程系机械工程教研室, 河北 石家庄 050003, 电话: 0311-87994715, E-mail: zhaozm2007@aliyun.com

(或亚微米) 基体相、TiC 无规则第二相及 Ni 基金属晶间相, 如图 3 所示。TiB₂ 基陶瓷物理、力学性能如表 2 所示。因此可以认为, 该陶瓷之所以具有高的断裂韧性与弯曲强度正是因小尺寸 TiB₂ 片晶具有的强烈自增韧机制(裂纹桥接与片晶拔出机制)所致, 如图 4 所示。

经过对复合材料层间 FESEM 观察, 如图 5 所示, 发现陶瓷/钛合金层间出现 TiB₂、TiB 呈空间尺度连续梯度演化的复合结构, 即自陶瓷向钛合金呈现出 TiC_{1-x}-TiB-TiB₂→TiB₂-Ti-TiC_{1-x}-TiB→TiB₂-TiC_{1-x}-TiB-Ti→



图 1 层状复合材料六边形样品

Fig.1 Hexagonal sample of the laminated composite

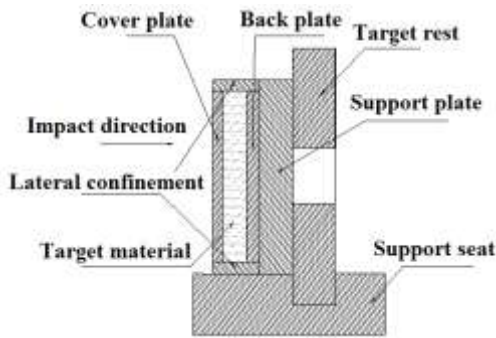


图 2 用于穿甲侵彻的靶体结构

Fig.2 Target structure against AP penetration

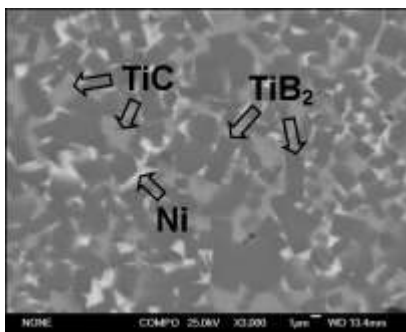


图 3 TiB₂ 基陶瓷的 FESEM 显微组织

Fig.3 FESEM image of the microstructure of TiB₂-based ceramic

表 2 实验制备的 TiB₂ 基陶瓷性能

Table 2 Properties of TiB₂-based ceramic prepared in the experiment

$E/$ GPa	$\rho/$ g cm^{-3}	$Hv/$ GPa	$K_{IC}/$ $\text{MPa m}^{0.5}$	$\sigma_f/$ MPa	$\rho_C/\times 10^{10}$ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
475	4.38	21.5	12.5	758	5.04

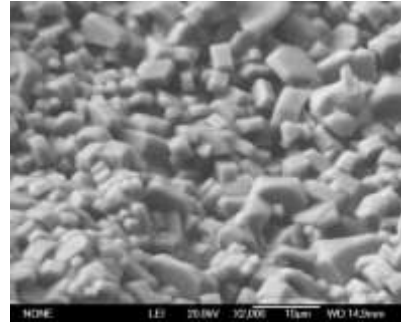


图 4 TiB₂ 基陶瓷的 FESEM 断口形貌

Fig.4 FESEM fractograph of TiB₂-based ceramic

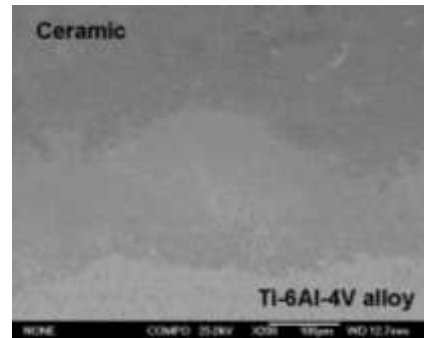


图 5 复合材料层间的 FESEM 显微组织

Fig.5 FESEM image of the interlaminar microstructure of the composite

TiB-TiC_{1-x}-Ti→TiC_{1-x}-Ti 的梯度纳米结构复合界面, 如图 6 所示。根据前期研究^[6, 7]可知, 这种层间梯度纳米结构复合界面的生成在于离心场诱发自蔓延高温合成 (self-propagation high-temperature synthesis, SHS) 热爆反应, 经陶瓷/钛合金之间液态熔合, 遂在快速凝固后期发生一系列物理化学反应(如 TiB₂ 析出相与 Ti 液的过包晶、亚包晶反应及 TiB 直接自 Ti 液的析晶反应等) 所致。

经靶试后, TiB₂ 基陶瓷、陶瓷/钛合金梯度纳米结构复合材料的防护系数(即质量效益)如表 3 所示, 因此得出两种材料的平均防护系数分别为 3.05 与 7.30。两种靶体遭穿甲弹侵彻后损毁状况如图 7、图 8 所示。

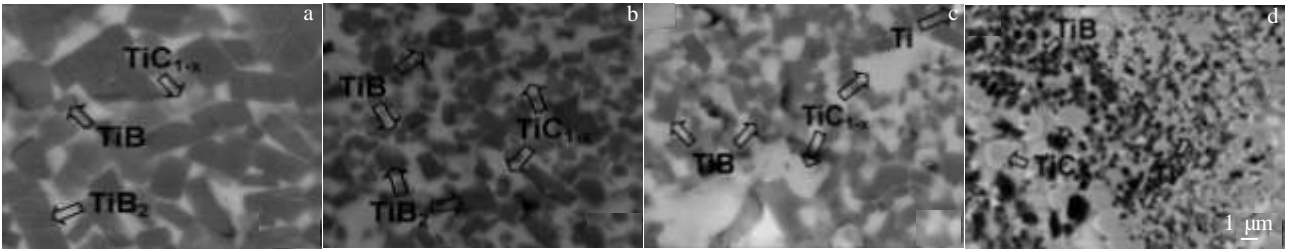


图 6 复合界面层间的 FESEM 高倍显微组织

Fig.6 High-magnification FESEM images of the interlaminar microstructures: (a) ceramic matrix, (b) 0.5 mm away from the ceramic, (c) 1.0 mm away from the ceramic, and (d) 1.5 mm away from the ceramic

表 3 靶试材料的 DOP 结果

Table 3 DOP results of the target materials

Target material	P_c /mm	t /mm	P_r /mm	N
TiB ₂ -based ceramic I	4	19	2.4	3.03
TiB ₂ -based ceramic II	4	18	2.9	3.13
TiB ₂ -based ceramic III	4	20	1.6	2.98
Laminated composite I	4	8.6	—	7.30
Laminated composite II	4	8.7	—	7.22
Laminated composite III	4	8.5	—	7.39

根据目前各国对陶瓷材料的动态力学研究进展^[8], 穿甲弹 (亦称作 AP 弹) 对陶瓷装甲系统的侵彻击穿过程包括 3 个阶段: 首先, 侵彻弹与陶瓷发生碰撞, 陶瓷表面发生断裂、破碎, 同时弹体也遭受头部墩粗、弹体断裂; 其次, 陶瓷材料在反射拉伸应力波作用下自背面出现圆锥裂纹, 并向内部扩展产生损伤累积; 最后, 陶瓷材料虽因动态损伤累积, 已丧失相当大的强度, 但是通过磨蚀机制仍继续毁伤侵彻弹弹芯, 并通过陶瓷锥的动量转移机制, 仍与背板共同降低侵彻弹速度, 最终达到捕获弹体的效果。故此, 可认为穿甲弹的毁伤机制主要发生于第 1、2 侵彻阶段, 并且当陶瓷材料遭受的撞击破碎区与陶瓷背部动态损伤区相接触时, 陶瓷材料抵抗穿甲弹侵彻的防护效能随之丧失, 最终穿甲弹凭借剩余动能对装甲钢板造成剩余穿深, 如图 7a、图 7b 所示。

由于陶瓷/钛合金层间形成的陶瓷相呈空间尺度连续梯度变化的梯度纳米复合结构, 故而在陶瓷与钛合金层间不产生成分突变界面。根据冲击固体动力学^[9]可知, 当应力波由一种材料进入另一材料时, 将在界面上分成透射波和反射波。由于 TiB₂陶瓷和装甲钢板钢的声阻抗分别为 5.04 和 2.57($\times 10^{10} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)^[9], 因而对于传统的陶瓷/装甲钢层状装甲材料, 其透射系数为 0.675。与之相对照, 对于陶瓷/钛合金梯度结构复合装甲材料, 为简化计算, 假设梯度结构为线性梯度 (即梯度指数为 1), 经计算得出其透射系数和

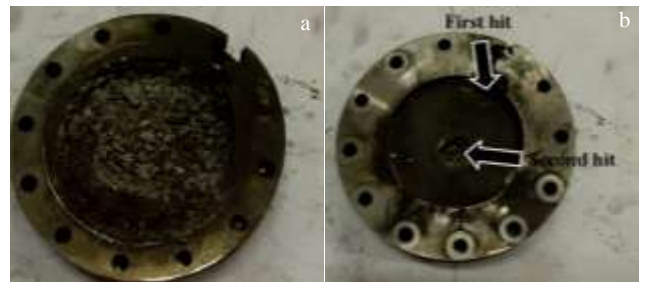


图 7 陶瓷靶体毁伤状况

Fig.7 Damage and failure of ceramic target: (a) the front plate of the ceramic and (b) the back plate of armor steel

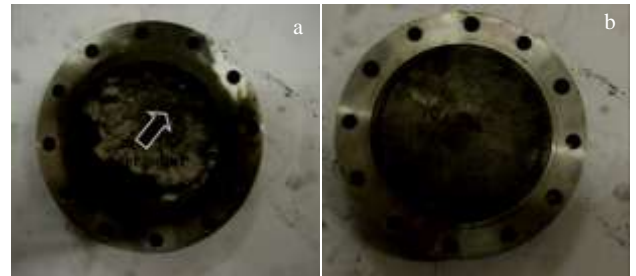


图 8 层状复合材料靶体毁伤状况

Fig.8 Damage and failure of laminated composite target: (a) the front plate of the ceramic and (b) the back plate of titanium alloy

成分离散层数的关系, 如图 9 所示。即随着成分梯度离散层数 n 增大, 透射系数 T 趋于 0.733。由于陶瓷/钛合金层间梯度结构增大压缩透射波, 相应削弱反射拉伸应力波, 因此也就相应缓解穿甲弹对陶瓷材料的损伤失效, 增加弹体在陶瓷内部的转留时间, 进而显著增强陶瓷材料对弹体的磨蚀效应。同时, 由于该复合材料层间形成梯度纳米复合结构, 陶瓷与钛合金层间保持着较高的结合强度, 且钛合金又具有高的弯曲强度, 因此钛合金不仅为陶瓷材料提供足够的强度支撑, 而且陶瓷/钛合金层间又通过载荷传递与多尺度 (微米→微纳米→纳米) 界面剪切耦合的双重机制,

强烈抑制横向剪切应力波产生的层间横向位移, 显著弱化层间解离倾向, 这样不仅显著增大靶体遭侵彻的结构完整性, 而且又非常有效地缓解陶瓷材料内部的动态损伤积累, 最终使该复合材料在靶试中表现出高的抗弹性能, 如图 8a, 8b 所示。

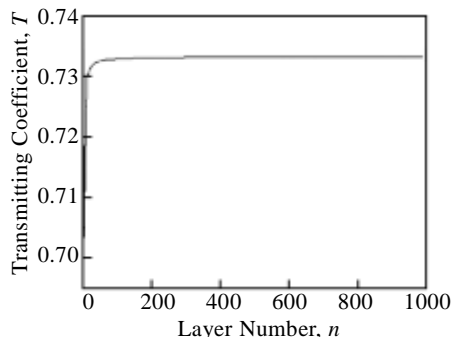


图 9 透射系数 T 随梯度层层数 n 增大的变化关系

Fig.9 Dependence of transmitting coefficient T on increasing layer number n of the graded layers

3 结 论

1) 采用离心反应熔铸工艺可以制备出 TiB_2 基陶瓷/Ti-6Al-4V 合金层状复合材料, 并在陶瓷/钛合金层间生成 TiB_2 、 TiB 呈空间尺度连续梯度演化的梯度纳米复合结构。

2) 经 DOP 靶试, TiB_2 基陶瓷与 $\text{TiB}_2/\text{Ti-6Al-4V}$ 梯度纳米复合材料的平均防护系数 (即质量效益) 分别为 3.05 和 7.30。因此, 可认为陶瓷/钛合金层间原位

生成 TiB_2 、 TiB 呈空间尺度连续梯度演化的复合结构, 不仅具有高的层间解离抗力与高的整体力学性能, 而且通过陶瓷/钛合金层间载荷传递与多尺度 (微米 \rightarrow 微米 \rightarrow 纳米) 界面剪切耦合的双重机制, 强烈抑制横向剪切应力波产生的层间横向位移, 显著缓解层间解离倾向, 进而不仅增大靶体遭侵彻后的结构完整性, 而且又强烈缓解陶瓷内部动态损伤积累, 最终使该复合材料在靶试中表现出高的抗弹性能。

参考文献 References

- [1] Sherman D. *Inter J Impact Eng*[J], 2000, 24: 313
- [2] Holmquist T J, Johnson G R. *Inter J Impact Eng*[J], 2005, 31: 113
- [3] Swab J J. *Advances in Ceramic Armor VII*[M]. New York: A John Wiley & Sons Inc Publication, 2011: 195
- [4] Chin Ernest S C. *Mater Sci Eng A*[J], 1999, 259(2): 155
- [5] Pettersson A, Magnusson P, Lundberg P *et al.* *Inter J Impact Eng*[J], 2005, 32: 387
- [6] Zhao Zhongmin(赵忠民), Zhang Long(张龙), Wang Minquan(王民权). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程) [J], 2013, 42(S1): 383
- [7] Huang X G, Zhao Z M, Zhang L. *Mater Sci Eng A*[J], 2013, 564: 400
- [8] Orphal D L. *Inter J Impact Eng*[J], 2006, 33: 496
- [9] Ren Huilan(任会兰), Ning Jianguo(宁建国). *Shock Dynamics of Solid*(冲击固体动力学)[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2014: 84

Microstructure Evolution and Ballistic Performance of the Laminated Composites of TiB_2 -based Ceramic and Ti-6Al-4V Alloy with Nano-structured Gradient

Han Baohong¹, Cheng Zhaogang¹, Han Sichen², Zhao Zhongmin¹, Wang Minquan¹

(1. Shijiazhuang School, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

(2. City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: Based on liquid fusion and interdiffusion between the ceramic and the titanium alloy, the laminated composites of TiB_2 -based ceramic and Ti-6Al-4V alloy with the nano-structured gradient were prepared by centrifugal reactive casting processing. By performing DOP test with 14.5 mm army AP projectiles on TiB_2 -based ceramic and the laminated composite, the average ballistic effectiveness of the two materials is 3.05 and 7.30, respectively. Therefore, it is considered that since the interlaminar interface develops the nano-structured gradient from the ceramic to Ti-6Al-4V alloy, the laminated composite not only presents high interlaminar cleavage resistance and excellent mechanical properties, but also exhibits good ballistic performance through dual mechanisms of interlaminar load transfer and multi-scale (micro/micro-nano/nanometer) interface shear-coupling.

Key words: laminated composite; centrifugal reactive casting processing; interlaminar interface with nano-structured gradient; microstructure evolution; ballistic performance

Corresponding author: Zhao Zhongmin, Ph. D., Associate Professor, Teaching and Research Section of Mechanical Engineering, Department of Vehicle and Electric Engineering, Shijiazhuang School, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, P. R. China, Tel: 0086-311-87994737, E-mail: zhaozm2007@aliyun.com