

文章编号:1673-9981(2022)01-0130-06

“三明治”结构复合材料的超高速撞击行为

易 鹏^{1,4}, 李 勇¹, 朱德智^{2*}, 罗铭强³, 聂德键³

(1. 江西理工大学 材料冶金化学学部, 江西 赣州 341000; 2. 华南理工大学 广东省金属新材料制备与成形重点实验室, 广东 广州 510640; 3. 广东兴发铝业有限公司, 广东 佛山 528061; 4. 广东兴发铝业(江西)有限公司, 江西 宜春 360000)



摘 要:紧凑型“三明治”结构复合材料在航空航天领域中具有广泛的应用前景。设计了三种由软/硬材料组合而成的“三明治”结构复合材料,即 $\text{TiB}_2/\text{2024}+\text{Al}$ 结构复合材料, $2\text{D-M40}_i/5\text{A06}+\text{Al}$ 结构复合材料和 $2\text{D-M40}_i+2\text{D-Ti}_i/5\text{A06}$ 结构复合材料。利用二级轻气炮、光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)等多种手段,系统地研究了这三种“三明治”结构复合材料薄靶在撞击速度为 2.5 km/s 及粒子直径为 $0.8\sim 2.0\text{ mm}$ 时的抗高速撞击能力、靶板宏观损伤特征,通过破坏特点各异的“三明治”结构复合材料的平均吸能能力评判抗高速撞击能力。结果表明,“三明治”结构复合材料抗高速撞击能力都比对应的单一材料的好,其最大吸能的高低顺序依次为 $\text{TiB}_2/\text{2024}+\text{Al}$ 结构复合材料 $> 2\text{D-M40}_i/5\text{A06}+\text{Al}$ 结构复合材料 $> 2\text{D-M40}_i+2\text{D-Ti}_i/5\text{A06}$ 结构复合材料。

关键词: 高速撞击; 复合材料; 动态损伤

中图分类号: TB331

文献标志码: A

引文格式: 易鹏, 李勇, 朱德智, 等. “三明治”结构复合材料的超高速撞击行为[J]. 材料研究与应用, 2022, 16(1): 130-135.
YI Peng, LI Yong, ZHU Dezhi, et al. Hypervelocity Impact Behaviors of Sandwich Structural Composites[J]. Materials Research and Application, 2022, 16(1): 130-135.

航天材料应具备轻质和抗高速撞击性能好, 即其受撞击应穿深越小和层裂破坏度越低。综合材料应具备高强、高硬、高塑等力学能力, 这在单一材料中无法实现^[1-4]。航空航天领域中的飞行器通常会采用多层结构作为外层防护。管公顺等人^[5]研究表明, 采用复合结构设计, 如“三明治”结构或多层软/硬结构的组合材料, 是实现材料高强高塑性的最有效方法。朱德智等人^[6-8]的研究表明, M40 纤维和 TiB_2 颗粒增强铝基复合材料的高速粒子侵彻深度最浅, 而 5A06 铝的韧性最好且不易发生崩落。目前, 微型航天器针对空间碎片的防护主要采用的

是多层网状防护结构^[3,5,9], 并且带有一定间距, 整体防护结构的体积较大, 发射成本高。因此, 有必要对紧凑型的多层结构复合材料的防护性能进行设计与研究。

设计了三种“三明治”结构复合材料, 即 $\text{TiB}_2/\text{2024}+\text{Al}$ 复合材料, $2\text{D-M40}_i/5\text{A06}+\text{Al}$ 复合材料和 $2\text{D-M40}_i+2\text{D-Ti}_i$ 复合材料。重点研究“三明治”结构复合材料薄靶, 在速度为 2.5 km/s 及粒子直径为 $0.8\sim 2.0\text{ mm}$ 撞击的条件下的抗高速撞击能力及靶板宏观损伤特征, 并对不同破坏特征的“三明治”结构复合材料的抗高速撞击能力进行评价。

收稿日期: 2021-04-24

基金项目: 广东省自然科学基金(2018A030313486); 佛山市核心技术攻关项目(1920001000412); 广东省科技计划项目(2020B121202002); 广东省重点领域研发计划(2020B010186001); 宜春市创新驱动“5511”工程专项科技计划项目; 江西省自然科学基金项目(20192BAB206002)

作者简介: 易鹏(1993-), 江西宜春人, 硕士研究生, 研究方向为有色金属合金制备与加工

通讯作者: 朱德智(1980-), 湖北公安人, 博士, 副教授, 研究方向为金属基复合材料

1 实验材料及方法

1.1 材料设计与制备

选择常用于航天材料的 Al-Mg 合金 (5A06 合

金)作为基体合金材料。所选用的几种组成材料,如 5A06, (2D-M40_f)/5A06 复合材料和 (2D-Ti_f)/5A06 复合材料、TiB₂/2024 复合材料的基础性能列于表 1,其中 L 表示纤维径向。

表 1 几种组成材料的基础性能
Table 1 Basic properties of several materials

材料	密度/(g·cm ⁻³)	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%
5A06	2.69	264	69	15
(2D-M40 _f)/5A06(L)	2.15	631.5	218	0.1
(2D-Ti _f)/5A06(L)	3.5	1045	110	5.2
55% TiB ₂ /2024	3.69	552	224	0.5

根据以上几种材料各自不同的性能特点,设计了不同软/硬材质组合的“三明治”结构复合材料,即使“三明治”结构复合材料尽可能的匹配增强相来缓解基体间的冲击阻抗,或舍弃增强相来减小崩落分层等,以免破坏材料。为了获得轻量及抗冲击性能好的复合材料,将 M40 纤维布等具有高阻抗、大的体积分数的材料作为增强相铺在高速粒子接触区前部,阻止粒子前进。铝合金基体材料则作为“三明治”结构复合材料的后表面,因其具有高塑韧性的特征,而吸收粒子的动能。设计的三种“三明治”结构复合材料如图 1 所示。从图 1 可以看出,合理的不同材料分布组合,可以将各材料的优势性能充分展示。

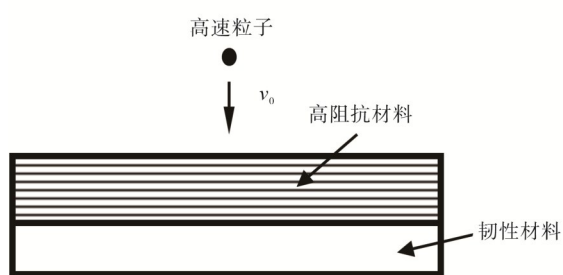


图 1 “三明治”结构复合材料的设计思路

Fig. 1 Schematic diagram of the composite structure materials

2D-M40_f/5A06+Al 结构复合材料是由 M40 纤维布增强的 5A06 复合材料与相应的基体合金组合成层状的复合结构材料。M40 纤维布层厚约 1.75 mm, 5A06 铝合金层厚约 0.25mm, 中间无间隔, 通过液态铝合金浸渗复合在一起。

2D-M40_f+2D-Ti_f/5A06 结构复合材料是由 Ti 纤维网与 M40 纤维布通过叠层设计组成多层复合

结构的复合材料。其中 Ti 纤维网 5 层, 每层厚度约 0.2 mm, M40 纤维布 4 层, 每层厚度约 0.25 mm。将 Ti 纤维网与 M40 纤维布交替叠加铺设, 其中外侧为 Ti 纤维网层, 通过液态铝合金浸渗复合在一起。

TiB₂/2024+Al 结构复合材料是由 TiB₂ 增强相的 2024 与 5A06 合金组成的双层结构靶板。其中 TiB₂/2024 铝合金板厚约 1.4 mm, 作为“三明治”结构复合材料的前部, 5A06 铝合金板厚约 0.8 mm, 作为“三明治”结构复合材料的后部, 二者采用螺栓紧固连接而成整体材料。

1.2 试验方法

试验在中国空动研究中心超高所的 FD-18A 超高速撞击靶上进行, 发射器为 7.6 mm 的二级轻气炮, 靶板厚约 2 mm, 选取 2024 铝合金为高速粒子, 撞击速度约 2.5 km/s, 撞击角 0°。在靶板后置一块 2 mm 厚铝合金板为见证靶, 两块靶板靶距为 100 mm, 用铁框架固定。测试完成后, 用线切割机将“三明治”结构复合材料弹坑切开, 磨平、抛光, 通过 OLYMPUS PMG3 光学显微镜(OM)和 S-4700 扫描电镜(SEM)对弹坑周围基体组织进行分析。

2 实验结果

2.1 复合材料的金相组织

图 2 为三种“三明治”结构复合材料的显微组织图。从图 2 可以看出: M40 纤维布、Ti 纤维网呈较均匀分布, 无明显的层间间隔及铝基体合金层出现, 2D-M40_f/5A06+Al 结构复合材料中的金相组织致密、缺陷少, 纤维的一个分布状态比较均匀; 2D-

M40_f+2D-Ti_f/5A06 结构复合材料中, Ti 纤维和基体结合紧密; TiB₂/2024+Al 结构复合材料的金相组织致密、无明显缺陷, 颗粒均匀分布并没有显著的

颗粒偏聚和贫化的区域, 而 TiB₂ 颗粒却有粗大存在且尺寸不均匀。

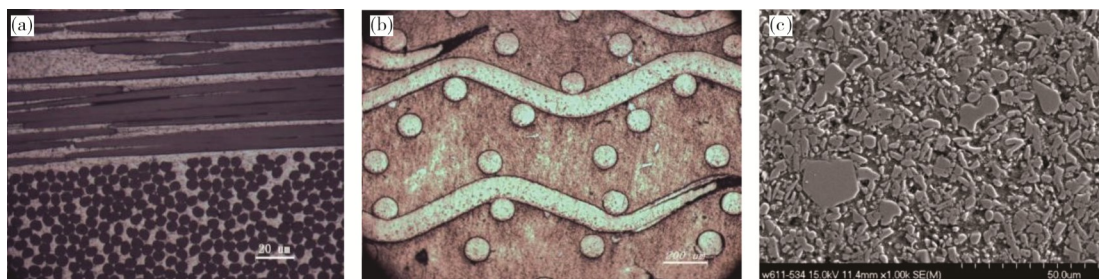


图2 “三明治”结构复合材料中几种组成部分的金相照片
(a) 2D-M40_f/5A06+Al; (b) 2D-M40_f+2D-Ti_f/5A06; (c) TiB₂/2024+Al

Fig. 2 Microstructures of several aluminum matrix composites

2.2 高速撞击行为

表2为2D-M40_f/5A06+Al结构复合材料和2D-M40_f+2D-Ti_f/5A06结构复合材料及TiB₂/2024+Al结构复合材料在高速粒子撞击下的试验结果。由表2可知, 相比M40纤维布增强的铝基复

合材料, 2D-M40_f/5A06+Al结构复合材料和2D-M40_f+2D-Ti_f/5A06结构复合材料显示出良好的抗高速撞击性能。本课题组前期工作进行了5A06, 2D-Ti_f/Al复合材料及2D-M40_f/Al复合材料的超高速撞击行为测试, 相关数据见文献[3]和文献[4]。所以, 在表2中不再重复给出。

表2 “三明治”结构复合材料的高速撞击试验结果

Table 2 Experimental results of several sandwich structural composite materials

靶材	粒子直径/mm	粒子质量/mg	速度/(km·s ⁻¹)	面、背板材料失效状况
2D-M40 _f +2D-Ti _f /5A06 复合材料	0.78	0.80	2.52	未穿透, 背面出现鼓包
	1.00	1.60	2.44	未穿透, 临界
	1.22	2.60	2.61	穿透, 背面大面积层裂
2D-M40 _f /5A06+Al 复合材料	0.78	0.80	3.68	未穿透, 背面出现鼓包
	1.00	1.60	2.46	未穿透, 背面出现鼓包
	1.20	2.60	2.55	穿透
TiB ₂ /2024+Al 复合材料	1.73	7.9	2.49	未穿透
	2.03	12.2	2.70	穿透

在高速粒子冲击下2D-M40_f/5A06+Al复合材料的损伤, 如图3所示。从图3可见, 2D-M40_f/5A06+Al复合材料无显著的崩落损伤, 靶板正面有明显突起, 靶板后面薄层铝很好的缓和了铝弹冲击力, 变成一道缓冲层, 表明铝薄层能够有效的吸收冲击后的残余动能, 起到结构防护的作用。

在高速粒子冲击下2D-M40_f+2D-Ti_f/5A06复合材料的损伤, 如图4所示。从图4可见: 2D-M40_f+2D-Ti_f/5A06复合材料也无显著的崩落损伤, 靶板正面一圈产生突出缘, 随粒径增大, 凸起愈加明显; 靶板背面则产生鼓包的现象, 随粒径增大, 鼓包呈十

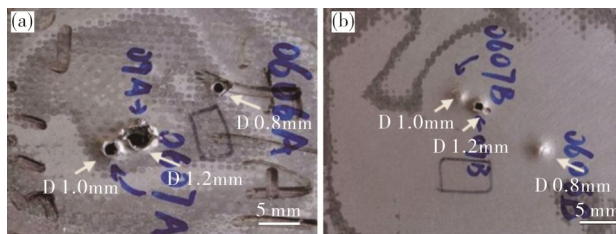


图3 超高速撞击后2D-M40_f/5A06+Al复合材料靶板损伤
(a) 正面; (b) 后面

Fig. 3 Damage for the 2D-M40_f/5A06+Al materials under hypervelocity impacts
(a) front surface; (b) back surface

字型裂纹扩展,且趋势愈加明显.表明,Ti纤维网能够有效的吸收冲击后的残余动能,起到结构防护的作用.

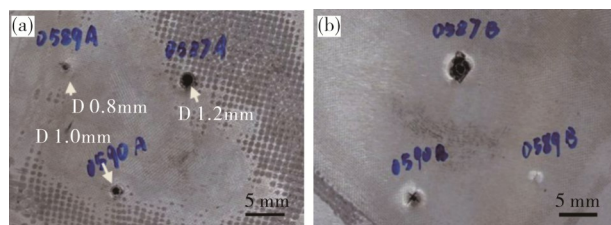


图4 超高速撞击后 2D-M40_i+2D-Ti/5A06 复合材料靶板的损伤

(a)正面;(b)背面

Fig. 4 Damage for the 2D-M40_i+2D-Ti/5A06 materials under hypervelocity impacts

(a) front surface; (b) back surface

2.3 弹坑损伤分析

图5为高速撞击后 2D-M40_i+2D-Ti/5A06 结构复合材料的弹坑形貌.从图5可以看出:Ti纤维和M40纤维布发生了断裂,其前部向着弹坑前沿,是因为粒子撞击后形成球形的压缩冲击波,当它在靶材前表面反射形成拉伸冲击波,这样就承受了向着外侧的拉伸波影响;而后部向着弹坑后沿,原因则是不管一开始形成的压缩冲击波亦或是在靶材后表面反射形成的拉伸冲击波,它都是向着后表面;坑壁

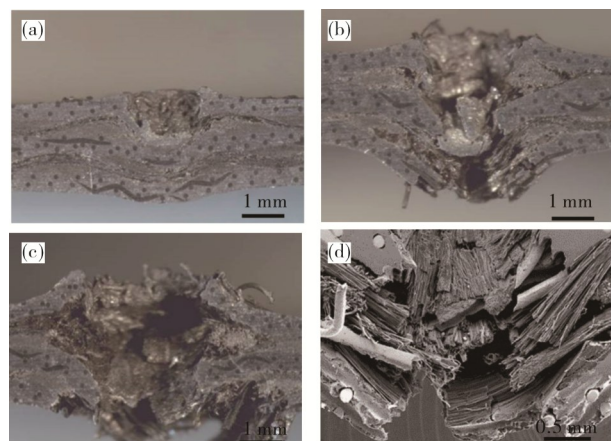


图5 超高速撞击后 2D-M40_i+2D-Ti/5A06 复合材料靶板的损伤

(a) 0.8 mm 粒子;(b) 1.0 mm 粒子;(c) 1.2 mm 粒子;(d) 图(b)的放大图

Fig. 5 Damage for 2D-M40_i+2D-Ti/5A06 materials impacted by varied projectile

(a) 0.8 mm projectile; (b) 1.0 mm projectile; (c) 1.2 mm projectile; (d) high magnification of (b)

底部,增强相与基体间发生了微小的剥离.

图6为高速撞击后 TiB₂/2024+Al 结构复合材料的宏观损伤形貌.从图6可以看出:高速粒子撞击这种双层结构的 TiB₂/2024+Al 复合材料,其靶板背面出现严重的崩落层,但因为 TiB₂/2024 这种双层结构层可以使粒子发生粉碎现象,从而使高速粒子不能穿孔破坏其后的 5A06 铝合金板;在 0.8 mm 厚 5A06 铝合金板的正面产生约 4 mm 直径的凹坑,在靶材背面严重产生了鼓包,只是没被穿透.结合本课题前期的研究结果显示^[3-4],相比相同厚度的 2D-Ti/Al 复合材料、5A06 合金板的单层材料,则 TiB₂/2024+Al 结构复合材料的防护作用更优,所以软/硬层组合的复合材料的防护效果相比单层材料存在明显的优势. TiB₂/Al 双层结构层的高强度、高硬度能够抵挡入射粒子,形变能力强的 5A06 铝合金能够很大的吸收冲击能.

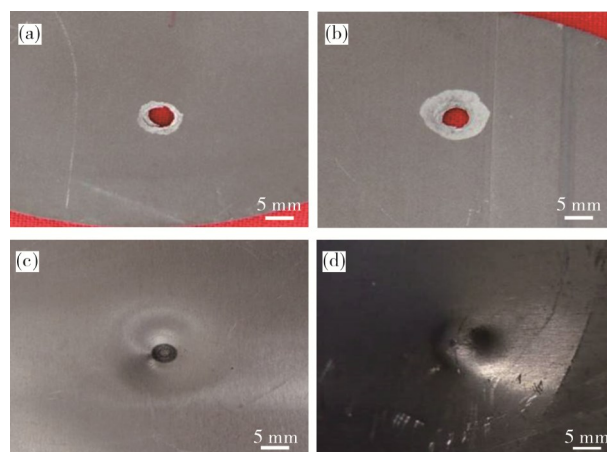


图6 超高速撞击后 TiB₂/2024+Al 结构复合材料的损伤
(a), (b) TiB₂/Al 复合材料; (c), (d) 5A06 合金板

Fig. 6 Damage for the TiB₂/2024+Al structure materials under hypervelocity impacts

(a), (b) TiB₂/Al composites; (c), (d) Al targets

3 分析与讨论

目前使用或研究的多层防护结构,大多采用多层金属网或多层铝板及其混杂组合方式,对多层结构(微观层面)复合材料单靶的研究较少.采用传统的临界弹丸直径、侵彻深度或是防护系数等指标来评价单层薄靶(厚度≤2 mm)在高速或超高速弹丸撞击下的防护性能,均存在一定的局限性.因此,为了评价设计的几种不同“软/硬”材质组合的“三

治”结构复合材料吸能效能,选用单层防护板常用的击穿前最大吸能评判它的抗撞击能力^[9-12]。击穿是指高速粒子撞击单层板整体穿破深度与靶材背板崩落深度共同结果,即“三明治”结构复合材料在此粒子撞击下有无“透亮”现象发生。靶材穿透与未透之间的中间值即为粒子的临界尺寸。依据动能的计算方式,也为减小面密度的差别对“三明治”结构复合材料高速撞击性能影响,引入参数 k ($k=A_{Al}/A_c$),其为“三明治”结构复合材料靶板与等厚5A06合金板的面密度的比值。则复合材料击穿前的最大吸能表达式为:

$$E_c = \frac{1}{12} k \pi d_p^3 \rho_p v_0^2. \quad (1)$$

式(1)中 ρ_p 为高速粒子密度, v_0 为粒子速度, d_p 为临界粒子直径, A_{Al} 为相同厚度的5A06铝合金板面密度, A_c 为试验用“三明治”结构复合材料靶板的面密度。

将表1数据代入式(1),得到设计的几种“三明治”结构复合材料的最大吸能,结果如图7所示。同时,将文献^[3-4]中的5A06,2D-Ti_f/Al复合材料及2D-M40_f/Al复合材料的超高速撞击性能数据也代入式(1)进行最大吸能计算,其结果也列入图7进行比较。

图7的横坐标为几种测试的防护材料,包括5A06铝合金、复合材料和复合结构等靶板的面密度,纵坐标为入射弹丸的冲击功,取未击穿时的临界弹丸冲击功作为该靶板的最大吸能能力。从图7可以看出,TiB₂/2024+Al结构复合材料的吸能能力

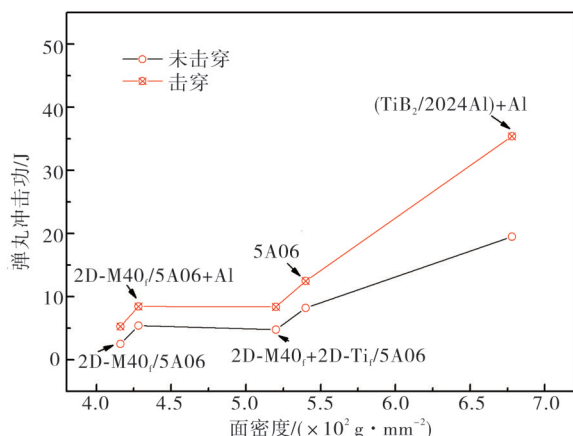


图7 几种“三明治”结构复合材料材料的吸能性能比较

Fig. 7 Energy absorption comparison of several composite materials

最好,把高强度、高硬度的TiB₂/Al结构材料安置在高韧性的靶材前部即可显示出两种材料的优势。因此,在将来的开发抗高速撞击材料时,在靶材前应铺置高阻抗的金属丝网、陶瓷等增强相,用以破碎高速弹丸。在靶材后应铺置高塑性的金属丝网、合金等材料,用来约束靶材背部的拉伸波导致产生层裂和崩落,虽然2D-M40_f/5A06+Al结构复合材料和2D-M40_f+2D-Ti_f/5A06结构复合材料的吸能性能不如TiB₂/2024+Al结构复合材料,但相比2D-M40_f/Al复合材料,这两种复合材料均显示出优异的吸能能力。这对航空航天材料应用中要求的质量轻、高强度、高比模和良好的抗弹性能,2D-M40_f/5A06+Al结构复合材料表现出巨大的优势。

4 结 论

(1)提出了“三明治”结构复合材料的设计原则,即采用高低阻抗材料层叠排布且低阻抗材料置于靶板后部的结构,制备了三种“三明治”结构复合材料靶板2D-M40_f/5A06+Al结构复合材料和2D-M40_f+2D-Ti_f/5A06结构复合材料及TiB₂/2024+Al结构复合材料。

(2)2D-M40_f/5A06+Al结构复合材料,M40纤维布层对高速粒子撞击的侵彻损伤和冲击波效应可以有效抑制,铝薄层鼓包能够有效的吸收冲击后的残余动能,提升了2D-M40_f/5A06复合材料的抗高速撞击的性能。

(3)2D-M40_f+2D-Ti_f/5A06结构复合材料,高冲击阻抗的M40纤维和高强韧性的Ti纤维分层破坏吸能,发挥出了二者性能各自的优势,防止了2D-M40_f/5A06复合材料背部崩落损伤。

(4)TiB₂/2024+Al结构复合材料中,高强度、高硬度的TiB₂/Al结构材料可以有效阻止粒子侵彻,高塑性的铝薄层变形可以有效吸收TiB₂/Al材料撞击产生的碎片及残余能量,提高了其抗高速撞击的性能,界粒子直径约为1.8 mm、最大吸能达到35 J,比5A06合金单板高约20 J。临界高速粒子直径约1.8 mm、最大吸能35 J,比5A06合金约高20 J。

参考文献:

- [1] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社, 1985:18-23.

- [2] 阎晓军,张玉珠.超高速碰撞下 Whipple 防护结构的数值模拟[J].宇航学报,2002,23(5):81-84.
- [3] ZHENG Zhenxin, ZHU Dezhi, DING Xia, et al. Hypervelocity impact damage and microstructure evolution of woven Ti6Al4V fabric reinforced aluminum matrix composites[J]. Materials and Design, 2016, 108: 86-92.
- [4] ZHU Dezhi, CHEN Qi, MA Zhijun. Impact behavior and damage characteristics of hybrid composites reinforced by Ti fibers and M40 fibers[J]. Materials and Design, 2015, 76: 196-201.
- [5] 管公顺,庞宝君,哈跃,等.铝合金 Whipple 防护结构高速撞击实验研究[J].爆炸与冲击,2005,25(5):461-466.
- [6] 朱德智,陈维平,李元元,等. TC4 纤维增强铝复合材料的高速撞击损伤行为[J].稀有金属材料与工程,2011,40(10):1804-1807.
- [7] 郑振兴,朱德智.高应变速率下 55% TiB₂ 颗粒增强铝基复合材料绝热剪切带的组织特征[J].机械工程材料,2017,41(4):84-88.
- [8] 武高辉,朱德智,陈国钦,等.高体积分数 TiB₂/Al 复合材料的动态压缩性能[J].稀有金属材料与工程,2010,39(2):262-267.
- [9] WEI Q, KECSKES L, JIAO T, et al. Adiabatic shear banding in ultrafine-grained Fe processed by severe plastic deformation[J]. Acta Materialia, 2004, 52(7): 1859-1869.
- [10] ZHANG H, RAMESH K T, CHIN E S C. High strain rate response of aluminum 6092/B₄C composites [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 384 (1-2): 26-34.
- [11] 朱耀. AA 7055 铝合金在不同温度及应变率下力学性能的实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010:41-43.
- [12] 邹东利.固溶态 AM60B 镁合金高速撞击变形及损伤行为[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010:43-47.

Hypervelocity Impact Behaviors of Sandwich Structural Composites

YI Peng^{1,4}, LI Yong¹, ZHU Dezhi^{2*}, LUO Mingqiang³, NIE Dejian³

(1. Faculty of Materials Metallurgy and Chemistry, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory for Processing and Forming of Advanced Metallic Materials, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Xingfa Aluminum Industry Co., Ltd., Foshan 528061, China; 4. Guangdong Xingfa Aluminum Industry (Jiangxi) Co., Ltd., Yichun 336000, China)

Abstract: "Sandwich" structural composite materials have broad application prospects in the aerospace field. In this paper, several "sandwich" structural composite materials composed of soft/hard materials are designed: TiB₂/2024+Al structure, 2D-M40_i/5A06+Al structure, 2D-M40_i+2D-Ti_i/5A06 structure. The use of secondary light gas guns, optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscope (TEM) and other methods to systematically study these "sandwich" structure composite thin targets at a speed of 2.5 km/s. The high-speed impact resistance and the macroscopic damage characteristics of the target plate when the particle diameter is 0.8-2.0 mm, and the average energy absorption performance is used to evaluate the high-speed impact resistance of the "sandwich" structure composites with different damage characteristics. The results show that the high-speed impact resistance of several "sandwich" composite materials is better than the corresponding composite materials, and the order of their protective performance is TiB₂/2024+Al structure, 2D-M40_i/5A06+Al structure, 2D-M40_i+2D-Ti_i/5A06 structure.

Key words: high-speed impact; composite materials; dynamic damage