

装甲钢 / 芳纶复合材料防爆轰波性能研究

曲志敏 金子明 迟华亭

(中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031)

摘要 利用防爆轰波模拟试验装置研究了由装甲钢和芳纶复合材料组成的不同复合结构对爆轰波的防护性能。结果表明,以装甲钢为面板的装甲钢 / 芳纶复合材料的复合结构的防爆轰波性能优于以芳纶复合材料为面板的芳纶复合材料 / 装甲钢复合结构;装甲钢 / 芳纶复合材料的防爆轰波性能优于装甲钢 / 装甲钢的防爆轰波性能。

关键词 芳纶复合材料 装甲钢 爆轰波

近年来,随着纤维增强树脂基复合材料的发展及其在装甲防护上应用的日益广泛,纤维增强树脂基复合材料的爆轰波衰减特性得到人们的关注。研究热点主要集中在碳纤维复合材料、玻璃纤维复合材料等对爆轰波压力的衰减及在爆炸载荷下的破坏形式^[1~6]。而有关芳纶复合材料防爆轰波性能的研究较少,尤其是芳纶复合材料和钢板组成的复合结构的防爆轰波性能研究未见报道。芳纶复合材料是一种性能优异的装甲防护材料,韧性好,强度高,具有优良的防碎片性能和防爆轰波性能。因此,笔者对芳纶复合材料和钢板组成的不同复合结构的防爆轰波性能进行研究,通过结构优化设计,获得防爆轰波性能优异的最佳结构。

1 实验部分

1.1 原材料

芳纶复合材料: WS FZ - 201, 厚度分别为 3、6 mm, 自制;

装甲钢: 厚度分别为 2.7、4.5、6.7 mm, 鞍山钢铁公司;

黑索金炸药: 工业用, 装药密度为 1.70 g/cm³ 的圆柱形药柱, 药量为 5.3 g, 甘肃银光化学工业公司。

1.2 设备

万能数控高压水切割机: DADI - J - 2 型, 南京大地有限公司。

1.3 试样制备

将芳纶复合材料和装甲钢在万能数控高压水切割机上加工成 120 mm 的试样。

1.4 试验装置

当固体表面受炸药爆炸载荷作用时, 爆轰波以球面波的形式向固体内部传播, 但是在离作用点足够远的地方, 球面波的曲率一般变得很小, 甚至可以忽略, 因此, 爆轰波可以近似地当作平面波看待。爆炸载荷在半无限介质中引起的爆轰波一般可当作单

向应变平面波处理。笔者将 120 mm 的试样近似处理为圆形半无限靶板, 不考虑侧向稀疏波对测试结果的影响。由此设计的试验装置如图 1 所示, 药柱在试样表面接触爆炸, 采用圆柱钢体型腔, 以使爆炸产生的边界条件降低到最小。

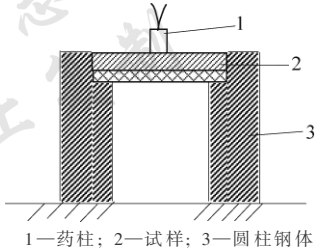


图 1 防爆轰波模拟试验装置示意图

2 结果与讨论

2.1 不同厚度装甲钢对爆轰波的防护能力

表 1 列出不同厚度装甲钢对爆轰波的防护能力。图 2 示出不同厚度装甲钢的损伤状态。

表 1 不同厚度装甲钢对爆轰波的防护能力

装甲钢厚度 / mm	装药量 / g	损伤情况
2.7	5.3	穿透, 背面呈花瓣开裂 (6 瓣), 破口尺寸 46 mm × 37 mm, 高约 38 mm
4.5	5.3	正面凹陷 7 mm, 背面凸起, 裂纹透光, 分层崩落, 崩落破口直径约 13 mm, 碎片厚度约 1.0 mm
6.7	5.3	正面凹陷 5.2 mm, 有一道裂纹; 背面有崩落碎片和纤维状拉伸破口

从表 1 及图 2 可以看出, 装甲钢的防爆轰波性能随其厚度增加而提高, 厚装甲钢板虽然未穿透, 但易产生裂纹, 背面产生层裂和崩落碎片, 这是因为爆轰波到达药柱与钢板的分界面之后, 在钢板表面产生一个强烈的冲击波, 随着冲击波向钢板内的传播, 振幅减小, 波长增大。当冲击波到达钢板背面时, 在背面产生反射拉伸波。对于大多数固体材料, 拉伸能力远小于压缩能力, 在入射冲击波的作用下虽然

没有破坏,但在反射拉伸波的作用下材料可能发生破坏,材料背面会崩落一块至数块碟形碎片。

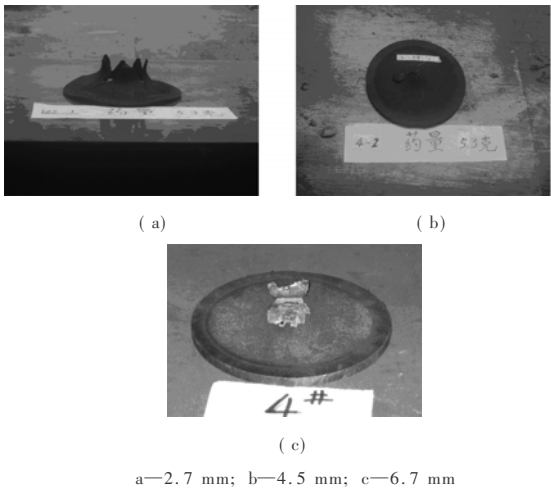


图2 不同厚度装甲钢的损伤状态

2.2 不同装甲钢/芳纶复合材料双层复合结构的防爆轰波性能

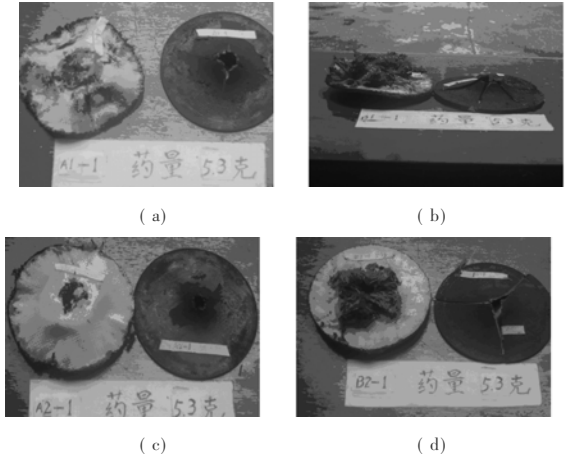
单一装甲钢材料不能有效防护炸药爆炸产生的爆轰波,因此需要考虑采用多种材料组合来防护爆轰波。表2列出不同装甲钢/芳纶复合材料双层复合结构的防爆轰波性能,复合结构的损伤状态见图3。

表2 不同装甲钢/芳纶复合材料双层复合结构的防爆轰波性能

复合结构	装药量/g	损伤情况
2.7 mm 装甲钢/3 mm 芳纶复合材料 ¹⁾	5.3	钢板背面呈花瓣开裂,复合材料背板正面有侵彻,背面无穿孔,基本形成有效防护
3 mm 芳纶复合材料/2.7 mm 装甲钢 ²⁾	5.3	复合材料严重扭曲、变形但未解体,钢板解体
2.7 mm 装甲钢/6 mm 芳纶复合材料	5.3	钢板背面呈花瓣开裂,破口尺寸 13 mm ×13 mm,高约 16 mm,复合材料背板沿刚度较差的 ±45°方向发生严重弯曲变形,变形最大高度 17 mm,正面有侵彻,背面无穿孔
6 mm 芳纶复合材料/2.7 mm 装甲钢	5.3	钢板产生三条穿越圆心的星形裂纹,整体鼓出约 21 mm,复合材料正、背面破损呈正方形,边长分别为 60 mm 和 50 mm,穿孔直径为 14 mm

注:1) 装甲钢为面板,芳纶复合材料为背板;2) 芳纶复合材料为面板,装甲钢为背板。

由表2、图3可以看出,采用装甲钢/芳纶复合材料这种复合结构,在爆轰波作用下装甲钢发生穿孔或背面开裂,芳纶复合材料变形大,无崩落碎片。而芳纶复合材料/装甲钢这种复合结构在爆轰波作用下,芳纶复合材料被穿孔破坏,并伴随着分层,破损区域成正方形,钢板解体或产生裂纹。这是因为钢板的密度 ρ 和弹性波速 C 分别为 7.8 g/cm^3 和



a—2.7 mm 装甲钢/3 mm 芳纶复合材料;
b—3 mm 芳纶复合材料/2.7 mm 装甲钢;
c—2.7 mm 装甲钢/6 mm 芳纶复合材料;
d—6 mm 芳纶复合材料/2.7 mm 装甲钢

图3 不同复合结构的损伤状态

6000 m/s ,芳纶复合材料的密度 ρ 和弹性波速 C_e 分别为 1.2 g/cm^3 和 2510 m/s ,将钢板用作面板时,透射系数 $T=2/(1+\rho C_e/\rho C_s)=0.12<1$,由式 $\sigma_t=T\sigma_i$ (σ_t 为透射应力, σ_i 为入射应力)可知,透射应力小于入射应力,说明爆轰波通过装甲钢与芳纶复合材料界面进入芳纶复合材料时,波的强度将减弱。而将芳纶复合材料用作面板时,透射系数 $T=2/(1+\rho C_e/\rho C_s)=1.88>1$,由式 $\sigma_t=T\sigma_i$ 可知,透射应力大于入射应力,说明爆轰波通过芳纶复合材料与装甲钢板界面进入钢板时,波的强度将增强,对钢板的破坏程度加大。

因此,以装甲钢为面板的装甲钢/芳纶复合材料复合结构的防爆轰波性能优于以芳纶复合材料为面板的芳纶复合材料/装甲钢复合结构。

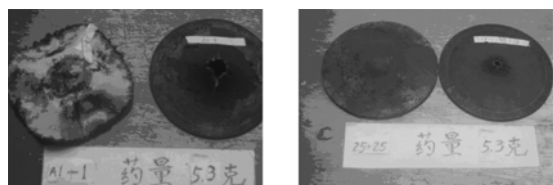
2.3 不同材料的双层复合结构防爆轰波性能

表3列出装甲钢/芳纶复合材料和装甲钢/装甲钢两种复合结构的防爆轰波性能比较,图4示出两种复合结构的损伤状态。

表3 装甲钢/芳纶复合材料、装甲钢/装甲钢防爆轰波性能比较

复合结构	装药量/g	损伤情况
2.7 mm 装甲钢/2.7 mm 装甲钢	5.3	面板凹陷明显,背板穿孔,面板破口尺寸为 11 mm ×10 mm,有崩落碎片
2.7 mm 装甲钢/3 mm 芳纶复合材料	5.3	钢板背面呈花瓣开裂,复合材料背板正面有侵彻,背面无穿孔,基本形成有效防护

由表3、图4可以看出,装甲钢/装甲钢复合结构较装甲钢/芳纶复合材料复合结构的防爆轰波性



(a) (b)

a—2.7 mm 装甲钢/2.7 mm 装甲钢;

b—2.7 mm 装甲钢/3 mm 芳纶复合材料

图 4 不同材料的复合结构的损伤状态

能要低。这是由于爆轰波在装甲钢/装甲钢中传播时,波强度经过装甲钢/装甲钢界面不会发生衰减,而爆轰波在装甲钢/芳纶复合材料中传播时,波强度经过装甲钢/芳纶复合材料界面会发生衰减。

3 结论

(1) 在防护相同药量炸药产生的爆轰波时,以装甲钢为面板的装甲钢/芳纶复合材料复合结构的防护性能优于以芳纶复合材料为面板的芳纶复合材料/装甲钢复合结构。

STUDY ON DETONATION WAVE RESISTANCE OF ARMOUR STEELS/KEVLAR COMPOSITES

Qu Zhimin, Jin Ziming, Chi Huating

(CNGC Institute 53, Jinan 250031, China)

ABSTRACT The detonation wave resistance of multi-layer structures composed of Kevlar composites and armour steels was studied by using simulation test device. The results showed that the resistance to detonation wave in armour steels/Kevlar composites was better than that in Kevlar composites/armour steels, and it was better than that in armour steels/armour steels.

KEYWORDS Kevlar composite, armour steel, detonation wave

新一代超级纤维编织航天未来

华东理工大学、哈尔滨工业大学、东华大学、上海交通大学等进行了顺聚对苯撑苯并二恶唑(PBO)纤维制备的研究。其中,上海交通大学印杰研究小组和东华大学刘兆峰研究小组的联合研究团队近期取得可喜进展。他们在实验室进行了PBO的聚合并成功纺丝得到PBO纤维,不久前通过了有关部门组织的鉴定。PBO纤维具有出色的力学性能和耐高温性能,问世即被视为航空航天及军事等领域的新一代先进结构复合材料,迅速在美国和日本的航空航天工业、防火、防弹衣等特殊纺织品工业及汽车工业的复合材料等领域中开始应用。用它制成的服装在火焰中不燃烧、不收缩,仍非常柔软;利用受冲击时纤维可原纤化从而吸收大量的冲击能之特性,发达国家开发了PBO纤维在防弹抗冲击吸能材料领域的用途;另外,利用该纤维的特性还开发了在新型高速交通工具、宇宙空间器材、深层海洋开发及高级体育运动竞技用品等领域的用途。(塑机网)

薄膜蒸发工艺攻克涂料技术瓶颈

近日,烟台万华聚氨酯股份有限公司自主创新、拥有自主知识产权的世界级MDI(二苯基甲烷二异氰酸酯)大型化

(2) 装甲钢/芳纶复合材料复合结构的防爆轰波性能优于装甲钢/装甲钢复合结构的防爆轰波性能。

参考文献

- 1 Comtois J L R, Edwards M R, Oakes M C. The effect of explosives on polymer matrix composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1999, 30(3): 181
- 2 Mouritz A P, Saunders D S, Buckley S. The damage and failure of GRP laminates by underwater explosion shock loading. *Composites*, 1994, 25(6): 431
- 3 Mouritz A P. The effect of underwater explosion shock loading on the flexural properties of GRP laminates. *Int J Impact Eng*, 1996, 18(2): 129
- 4 Mouritz A P. The effect of underwater explosion shock loading on the fatigue behavior of GRP laminates. *Composites*, 1995, 26(1): 3
- 5 Mouritz A P. The damage to stitched GRP laminates by underwater explosion shock loading. *Composites Science and Technology*, 1995, 55: 365
- 6 Dandekar D P, Hall C A, Chhabildas L C. Shock response of a glass-fiber-reinforced polymer composite. *Composite Structures*, 2003, 61: 51

工装置,在宁波市大榭岛一次性试车成功;同时,“烟台万华年产16万t MDI制造技术”在北京顺利通过专家鉴定,从而使我国成为拥有这项技术的4个国家之一。中科院资深院士、我国著名化工专家陈冠荣向记者介绍,这套装置是中国化工界自主创新的最好典范。据中国工程院院士李俊贤等专家介绍,我国16万t MDI装置生产工艺在三个方面成为世界首创:一是完全摒弃了间歇工艺,缩合、光气化和结晶分离装置实现了全连续;二是通过实施能量集成和工艺优化,使装置公用工程消耗达到并部分超过了国外公司的技术水平,原料消耗与国外处于同一水平;三是我国装置MDI取消了液态光气储罐,使系统内静态光气储量为零,极大地降低了装置的安全风险。这说明我国已经拥有了世界单套最大MDI生产技术的自主知识产权,形成了我国自有的民族化工品牌。据了解,MDI是技术门槛最高的化工产品之一,其先进制造技术一直由德国巴斯夫等4家跨国公司掌握,并占据了全球85%的产能。而我国在这一领域的突破,标志着我国大型石化装置可以不再全部依赖进口,我国完全有能力自主研发建设,烟台万华的成功经验对我国化工工业自主创新具有典型的示范意义。(塑机网)