

三维编织碳/环氧复合材料聚能冲击性能研究

冯志海 许斌 高文 余瑞莲

(航天材料及工艺研究所 北京 100076)

摘 要 利用爆炸冲击试验对三维编织碳/环氧复合材料聚能冲击性能进行了研究,并分析了三维编织碳/环氧复合材料的聚能冲击破坏的宏观和微观破坏机理。结果表明,导爆索直接与碳/环氧接触时,碳/环氧复合材料将被破坏;在导爆索和碳/环氧之间加入橡胶,可以保护碳/环氧复合材料不被破坏。

关键词 碳/环氧,编织复合材料,聚能冲击

Study on the Explosive Impact Performance of 3D Braided C/ E Composites

Feng Zhihai Xu Bin Gao Wen Yu Ruilian

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology Beijing 100076)

Abstract The explosive impact performance of 3D braided C/ E has been studied. Field emission gun scanning electron microscope was used to analyze the macro-and micro-fracture morphology. The results show that 3D braided C/ E may be destroyed by explosive impact if transmitted explosive cable directly touch the composite, but if a piece of rubber is put between the explosive cable and the composite, the composite will be protected from fracturing.

Key words C/ E composites, Braided Composites, Explosive impact

1 前言

随着纤维增强复合材料应用的深入,纤维增强复合材料不仅仅作为结构承载材料使用,而且要求材料具有诸如防热、隐身、抗冲击等多种功能。

抗冲击功能复合材料在装甲战车和武装直升机上应用日趋成熟^[1,2],其冲击破坏机理研究也较为透彻。在航天领域,一些装置的分离是通过高能炸药的爆破来进行,要求金属蒙皮沿预定的轨迹被迅速切断,而爆炸切口附近的材料和结构仍需要保持完整。整体编织复合材料具有优异的抗冲击性能,所以本文主要对三维编织碳/环氧复合材料的聚能冲击性能进行研究,并对其聚能冲击破坏机理进行分析。

2 原材料及试样制备

2.1 原材料

碳纤维为日本东丽公司的 T300,拉伸强度 3 GPa,拉伸模量 230 GPa,断裂伸长率 1.5%,体积密度 1.76 g/cm³,线密度 0.20 g/m。

环氧树脂体系为 IDE-85/DDS/BF₃·MEA,基本力学性能为:拉伸强度为 80 MPa,拉伸模量为 4.55 GPa,断裂应变率为 1.7%;压缩强度为 179 MPa,压缩模量为 4.53 GPa,弯曲强度为 88 MPa,弯曲模量为 3.77 GPa。

2.2 试样制备

试样采用三维四向编织方法,编织角为 40°,纤维体积分数为 40%,编织物的结构单元如图 1 所示。编织好的试样,采用 RTM 成型技术进行复合,聚能冲击实验的试样尺寸为 30 mm × 20 mm × 6 mm。三维编织碳/环氧复合材料的拉伸强度 323 MPa,拉伸模量 35 GPa,断裂伸长率 1.5%,体积密度 1.4 g/cm³、纤维体积分数为 40%。

收稿日期:2000-07-21

冯志海,1965 年出生,高级工程师,主要从事立体编织多功能复合材料的研究工作

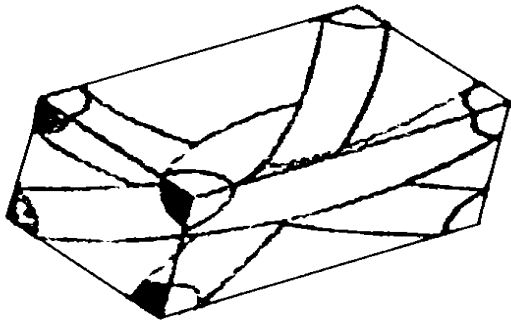


图1 三维编织物的结构单元

Fig.1 Structural unit of 3D braided fabrics

复合工艺流程为:

三维编织—RTM浸渍—加压浸渍—加压固化—脱模—加工试样

3 试验

3.1 聚能冲击试验装置

聚能冲击试验中所使用的每种规格的装药量和特征见表1,三种规格聚能导爆索剖面如图2所示。引爆雷管采用8#电雷管直接引爆。聚能冲击的试验装置实物如图3所示。

表1 聚能导爆索特征参数

Tab.1 Characteristic parameters of transmitted explosive cables

导爆索装药量 /g·m ⁻¹	底宽 D/mm	顶半径 R/mm	聚能槽高度 H ₁ /mm	外形高度 H ₂ /mm	起爆速度 /km·s ⁻¹	装药密度 /g·cm ⁻³
2	2.8	1.3	0.8	2.2	7.2	1.3
5	4	2	1.0	3.3	7.8	1.3
8	4.2	2	1.0	4.2	7.8	1.3

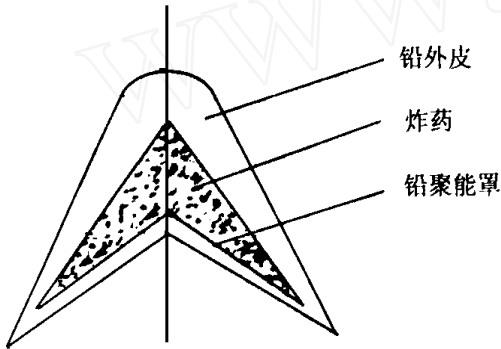


图2 聚能导爆索剖面示意图

Fig.2 Schematic diagram of transmitted explosive cable section

扫描电镜微观分析在清华大学材料系电镜实验室进行,所用的电镜为JSM—6301F场发射扫描电子显微镜。

4 聚能冲击试验结果及分析

表2给出了三维编织碳/环氧复合材料聚能冲击试验结果。从表中看出聚能冲击试验结果表现出一定的分散性,在相同的加载条件下,试样有的被完全炸断,有的未被完全炸断,有的炸断一半,另一半仍连接在一起。这种分散性有多方面原因:复合材料本身也有一定的分散性,材料内部的缺陷也不相同;从聚能冲击炸药条方面讲,由于2g/m的装药量非常小,因此药条中药量分布的均匀性有一定差异,产生的冲击能也不会完全一样。

从表2中可见在三种不同装药量、未垫橡胶的情况下,三维编织碳/环氧复合材料基本被炸断,而在药条和试件之间垫橡胶后,聚能冲击后试件的破坏形式和药条的药量、橡胶厚度有关。图4、图5、图6分别是该材料在8g/m+0.5mm橡胶、2g/m+1mm橡胶、2g/m+1.5mm橡胶加载条件下试验后试样的照片。从照片中可以发现,8g/m+0.5mm橡胶试验条件下,试样被完全炸断;2g/m+1mm橡胶试验条件下,试样被炸成两半,但中间仍有纤维连接;2g/m+1.5mm橡胶试验条件下,试样表面被炸出浅沟,背面有树脂蹦落。

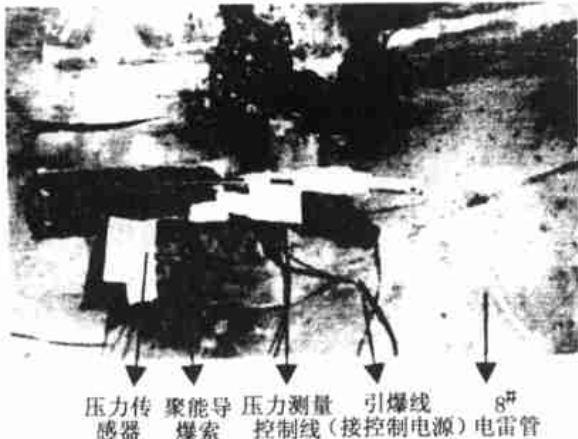


图3 聚能冲击起爆试验装置

Fig.3 Photo of a explosive impact apparatus

3.2 扫描电镜微观分析

表 2 三维编织碳/环氧聚能冲击的试验结果

Tab.2 Explosive impact test results of 3D C/E

加载条件	试验个数	破坏状态
药量为 8 g/m 的 8# 电雷管直接引爆, 试件与导爆索之间垫 1.5 mm~5.5 mm 厚多孔橡胶	8	(1)炸成两半;(2)从试件中部炸裂分开, 但未完全切断,仍有纤维连接
药量为 8 g/m 的 8# 电雷管直接引爆, 试件与导爆索之间垫 7 mm 厚多孔橡胶	2	(1)一试件炸开,未完全切断, 仍有纤维连接;(2)另一试件炸出裂缝
药量为 5 g/m,试件与导爆索之间垫 1.5 mm~4 mm 厚多孔橡胶	3	炸成两半
药量为 2 g/m 的 8# 电雷管直接引爆	1	炸成两半
药量为 2 g/m 的 8# 电雷管直接引爆, 试件与导爆索之间垫 1 mm 厚多孔橡胶	3	(1)炸成两半;(2)从试件中部炸裂分开, 但未完全切断,仍有纤维连接
药量为 2 g/m 的 8# 电雷管直接引爆, 试件与导爆索之间垫 1.5 mm 厚多孔橡胶	2	试件炸成深约 0.5 mm 宽约 2 mm 的沟槽,背面有轻微裂纹

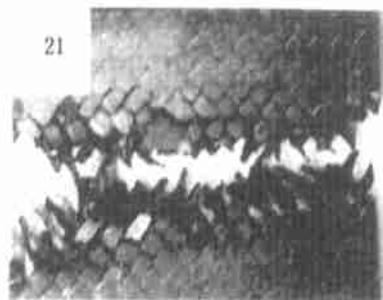


图 4 21# 试样用 8 g/m+0.5 mm

Fig.4 Impacted No. 21 specimen with 8 g/m explosive and 0.5 mm rubber

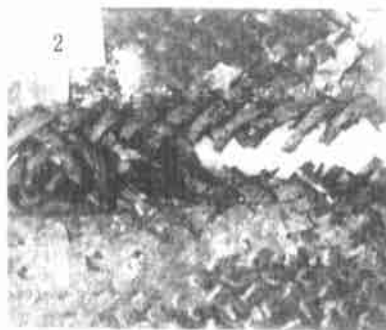


图 5 2# 试样用 2 g/m+1 mm

Fig.5 Impacted No. 2 specimen with 2 g/m explosive and 1 mm rubber

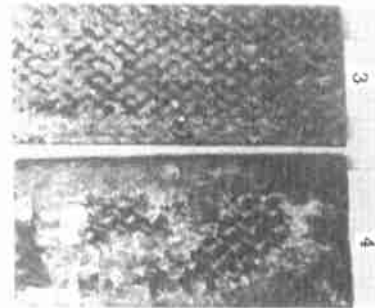


图 6 3#、4# 试样用 2 g/m+1.5 mm

Fig.6 Impacted No. 3 and No. 4 specimens with 2 g/m explosive and 1.5 mm rubber

图 7 所示为 21# 试样聚能试验后的断口 SEM 照片,从照片中可见,试样被炸断的断口纤维束界面严重脱落[图 7(a)],纤维束内有大量沿纤维和树脂界面断续排列的空洞[图 7(b)],纤维束被剪断和脱粘[图 7(c)]。图 8 为 3# 试样的 SEM 照片,试样表面

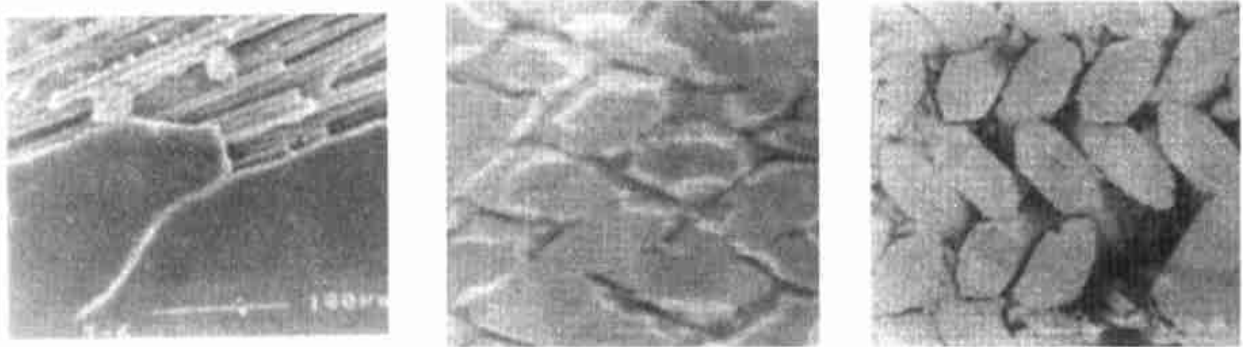
的损伤起源于试样外表面的树脂脆性断裂[图 8(a)],试样背面树脂蹦裂,裂纹沿编织束界面扩展[图 8(b)],厚度方向的损伤取呈倒三角形[图 8(c)]。



(a) 断口纤维束界面严重脱落 (b) 纤维和树脂界面 (c) 纤维束被冲击剪断

图 7 21# 三维编织碳/环氧聚能实验断口 SEM 照片

Fig. 7 SEM photos of impacted No. 21 specimen fracture sections



(a) 聚能冲击面的损伤起源与表面树脂的脆性破坏 (b) 背面树脂崩裂,裂纹沿纤维束扩展 (c) 试样断面的损伤呈倒三角形

图 8 3# 三维编织碳/环氧试样聚能冲击后的 SEM 照片

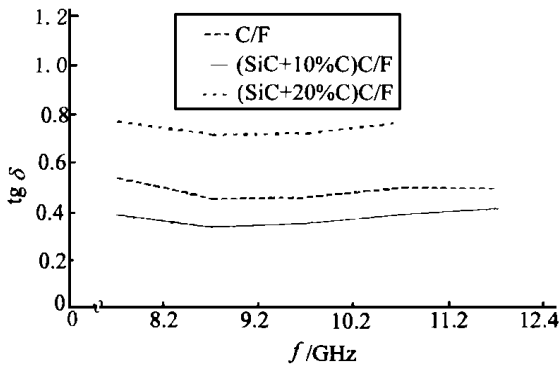
Fig. 8 SEM photos of impacted No. 3 specimen

因此,从总体上讲,聚能冲击试验后的三维编织碳/环氧复合材料试样沿药条方向炸断,正面形成烧蚀和沟槽,背面出现明显的树脂蹦落和沿编织束间产生的裂纹。断口处纤维被切断,树脂从纤维上剥离下来,树脂和纤维有烧损现象。装药量越大,材料的烧损程度越深,烧损面积越大,并有炭化现象,试样表面树脂被震裂并和纤维脱粘,表面和截面处可以看到,表面裂纹沿纤维编织方向扩展。

三维编织碳/环氧复合材料在聚能冲击下的损伤主要是由于炸药爆炸时产生的高温、高速、高压所引起。聚能冲击过程中,当电雷管将导爆索引爆后,随着爆轰波沿导爆索中的炸药向前传播,导爆索中的“V”形沿聚能罩向内运动,并且两个侧壁互相碰

撞,从而连续形成一条聚能射流片,当它碰到试样时就会在试样中产生冲击波,同时形成高温高压区域,该区域内的材料将会膨胀飞散。随着冲击波在试样中传播,它将被衰减,压力和温度下降。当冲击波从试样的背面(自由面)传出的同时,向试样内反射回稀疏波,如果冲击波的强度已超过试样材料的动态断裂强度,材料将产生裂纹或断裂。在这三种装药量的试验条件下,爆炸冲击压力均达到几个 GPa,远远超过三维编织碳/环氧的强度,因此在三种药量的试验条件下,三维编织碳/环氧均发生了断裂破坏。在炸药条与试件之间垫入橡胶后,三维编织碳/环氧的破坏情况有很大的改善,这主要由于橡胶的屈服

(下转第 57 页)



(c) SiC—C涂层对碳纤维复合材料介电损耗角正切的影响

图8 SiC—C涂层对碳纤维复合材料电磁参数(ε'、ε''和tg δ)的影响

Fig. 8 Influence of SiC—C coating on electromagnetic parameters (ε', ε'', and tg δ) of carbon composite

图例中的 C/F(SiC+10%C)代表涂层中C约占10%的碳纤维复合材料试样,C/F(SiC+20%C)代表涂层中C约占20%的碳纤维复合材料试样,从数据可看出:

(1) SiC—C涂层同样可以降低碳纤维复合材料的ε'和ε'',其中,涂层中C含量的变化对ε'的改变影响不大,但对ε''的影响比较明显,涂层中C约占10%的碳纤维复合材料试样的ε''更低;

(2) SiC—C涂层对碳纤维复合材料试样tg δ有影响,共沉积涂层中少量的C(约10%)使碳纤维复合材料的tg δ降低,较多的C(约20%)使碳纤维复合材料的tg δ提高;

(3) SiC—C涂层的结构复杂,它对碳纤维复合材料试样介电常数的影响还有待于深入研究。

4 结论

(1)采用CVD工艺,可以在碳纤维表面制备均匀稳定的SiC或SiC—C涂层,而且可以较精确地控制涂层的厚度;

(2)碳纤维表面的SiC涂层,可以在一定程度上使其复合材料的介电常数和介电损耗角正切值减小;

(3)SiC涂层碳纤维复合材料对电磁波的反射作用,比碳纤维复合材料电磁波的反射作用有所降低。

(上接第48页)

极限低,易变形,可以吸收大量的冲击能量,对冲击波起到缓冲作用,从而使聚能冲击产生的应力波大大减弱,同时也降低了冲击速度,对复合材料起到保护作用。

5 结论

(1)三维编织碳/环氧复合材料在聚能炸药直接冲击下,即使药量小到2 g/m,试样仍被破坏。

(2)在试样和聚能炸药之间加入橡胶的组合体能够抵抗一定装药量的聚能冲击,因此这种组合可以对爆炸束附近的结构提供防护。

(3)碳/环氧复合材料不被破坏时,橡胶的厚度

有一个域值,不同的药量有不同的域值,2 g/m药量导爆索的橡胶厚度是1.5 mm,而8 g/m药量导爆索的橡胶厚度是7 mm。

(4)在聚能冲击下,三维编织碳/环氧复合材料沿聚能药条炸裂或炸断,并向内弯曲,破坏方式为纤维断裂,基体树脂断裂,纤维与基体脱粘与分层,纤维与树脂的烧损。

参考文献

- 1 刘玉明.热塑性复合材料装甲材料.兵器快报,1993;0602
- 2 刘玉明.金属—聚脂—纤维复合装甲.兵器快报,1993;(112)