

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.01.021

EP/CF/铜复合板防弹性能的实验和模拟

付远^{1,2}, 冯星¹, 陆德平¹, 蒋智梅¹, 张友亮¹, 胡强¹

(1. 江西省科学院应用物理研究所, 南昌 330028; 2. 南昌大学材料科学与工程学院, 南昌 330031)

摘要: 研究了以环氧树脂为基体材料与碳纤维/Cu板制得复合板的防弹性能。对碳纤维采用正交铺层结构并与不同厚度的铜板交叉铺层设计, 整个设计铺层为17层, 总厚度为7.6 mm。根据四次击穿实验与数值模拟分析表明: 该复合板能够吸收子弹的比动能为 $1.2814 \times 10^9 \text{ J/m}^2$ 。该吸能结果优于同等厚度的945防弹钢, 但是其密度约为它的一半。因此该复合材料是一种更为轻便, 设计更灵活的防弹材料。

关键词: 防弹; 复合材料; 抗穿透; 碳纤维; 铜板

中图分类号: TB301 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)01-0089-06

Experimental and Numerical Investigation of Bulletproof Property in a Epoxy Resin/CF/Cu Plate Composite Material

Fu Yuan^{1,2}, Feng Xing¹, Lu Deping¹, Jiang Zhimei¹, Zhang Youliang¹, Hu Qiang¹

(1. Applied Physics Institute for Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330028, China;

2. College of Material Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: It was introduced the bulletproof property of a carbon fiber/Cu plate composite material, and in which the epoxy resin as base and binding material. The carbon fiber was lie up by quadrature transform method and alternated with Cu plate of different thickness. The whole thickness of this composite plate is 7.6 mm. The result shows with statistical data in four times experimental and numerical analysis: The maximum specific kinetic energy absorption of this composite plate is $1.2814 \times 10^9 \text{ J/m}^2$, which is better than 945 bulletproof steel, and the density is the half. Since, this kind of composite is a material with more handiness and flexibility.

Keywords: bulletproof; composite material; resistance of penetration; carbon fiber; Cu plate

复合材料具有传统单一材料无法比拟的材料特性, 目前被广泛应用于日常生活的各个领域。采用不同的复合方式和铺层结构能够获得单一材料无法比拟的抗穿透和冲击性能, 因此复合材料是一种灵活多变的材料。目前, 由于碳纤维具备很高的模量, 平均为钢的10倍, 其复合材料被广泛运用于抗穿透结构的制备体系中。除此之外, 铜合金作为一种塑性非常优良的延性金属, 在抗冲击材料中引入铜合金能够有效地吸收冲击体的激振能, 降低弹体的激振波对装甲结构的损伤。当前, 在抗冲击的高强材料研究领域, 碳纤维复合材料, 或金属合金高强

材料研究较普遍^[1-5]。例如, 胡邓平等^[1]研究了616装甲防弹钢的冲击特性及其绝热剪切性能。刘国权等^[2]在微观层面探讨了高强玻璃纤维的防弹特点。湛勇等^[3]通过在靶板上进行不同的加强筋布置, 研究金属靶板的抗穿击能力。但是碳纤维与金属材料同时复合铺层材料却鲜见报道。笔者以单向编织的碳纤维布、紫铜合金板为增强材料, 热固性环氧树脂为基体材料, 复合制备了以碳纤维、铜复合结构的复合板, 并采用实验和数值手段分别对其进行抗穿性能评估。同时也为开发新型装甲结构提供相应的解决方案和设计思路。

基金项目: 江西省科学院青年基金重点项目 (2017-YZD2-10), 江西省科学院科研开发专项基金博士项目 (2014-YYB-17), 江西省科学院协同创新专项普惠制项目 (2014-XTPH1-17), 国家自然科学基金青年基金 (51505203)

通讯作者: 蒋智梅, 副研究员, 主要从事金属材料的损伤与强度的研究 E-mail: 273519887@qq.com

收稿日期: 2017-11-14

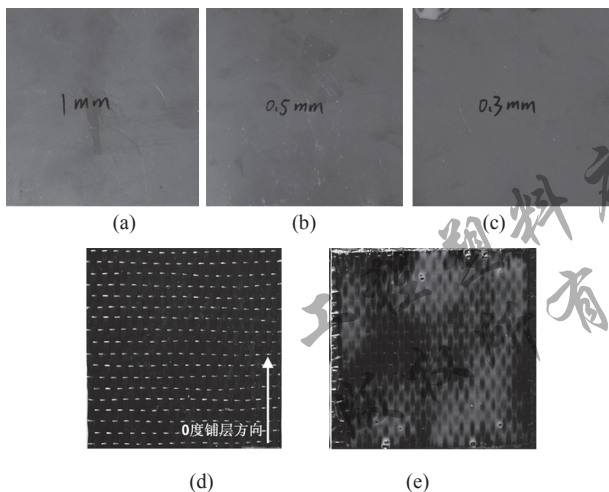
引用格式: 付远, 冯星, 陆德平, 等. EP/CF/铜复合板防弹性能的实验和模拟 [J]. 工程塑料应用, 2017, 46(1): 89-94.

Fu Yuan, Feng Xing, Lu Deping, et al. Experimental and numerical investigation of bulletproof property in a epoxy resin/CF/Cu plate composite material[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 46(1): 89-94.

1 实验方法

1.1 复合结构的铺层方法

笔者采用的复合结构由4个规格的增强材料构成,复合铺层结构与铺层方向如图1所示。它们分别是厚度为1 mm(图1a)、0.5 mm(图1b)和0.3 mm(图1c)的紫铜板结构以及厚度为0.4 mm的碳纤维编织布(图1d)。这4种规格材料的长×宽都为100 mm×100 mm。而基体材料为环氧树脂(EP)。由于铜板结构是均质材料,它在铺层方向上的力学特性为各向同性。而碳纤维编织布结构由于它的编织结构特点,存在一个应力主方向(该方向上的模量最大)。因此,定义应力主方向为0°铺层方向,而垂直于应力主方向定义为90°铺层方向,如图1所示。图1e为铺层复合完成后的结构。



a—厚度为1 mm; b—厚度为0.5 mm; c—厚度为0.3 mm;
d—厚度为0.4 mm的0°铺层方向; e—铺层完成后的结构

图1 复合铺层结构与铺层方向

该复合结构共17层,它的铺层方式按照从上至下的顺序依次为:碳纤维0°/碳纤维90°/铜板0.3 mm/碳纤维90°/碳纤维0°/铜板0.5 mm/碳纤维0°/碳纤维90°/铜板1 mm/碳纤维90°/碳纤维0°/铜板0.5 mm/碳纤维0°/碳纤维90°/铜板0.3 mm/碳纤维90°/碳纤维0°,共17层。总铺层厚度为7.6 mm。整个铺层过程采用负压灌注工艺完成。首先将铜板与碳纤维布按照上述预定的铺层角度逐层铺设于可抽真空的模具腔体中(模具腔体壁预先需要涂一层脱模蜡,防止树脂固化后难以脱模);然后闭合模具,将空气流入口密封,在空气流出口一端用高压真空泵将腔体空气抽至50 Pa以下;随后在空气流入口一端与按一定配比混合后且尚未固化的热固性树脂流道相连,接着,

关闭抽真空一端空气出口阀门,并开启模具的流入口阀门;此时腔体内的负压将环氧树脂自然吸入到密封腔中并与铺设好的复合板相互渗透;最后将空气流入口与空气流出口阀门都闭合,室温静置12 h后,待树脂基体完全固化后将复合板取出。

1.2 仪器及设备

子弹测速仪: JX3200型,北京斯普特科技有限公司;

微电子拉力试验机: GL8305型,武汉国量仪器有限公司;

高速相机: CR-S3500型,海南科天健光电技术有限公司。

1.3 铺层板结构的力学性能及材料状态方程

(1) 铺层板的力学性能。

该复合板的力学性能由3种不同材料复合而成,其整体力学特性取决于3种材料各自的力学特性以及相应的复合方式。这3种材料分别是紫铜板、碳纤维布,以及EP。因此,通过力学实验测定,获取了3种材料的相关力学性能。其中,碳纤维材料力学各向异性数据由微电子拉力试验机测定,其结果见表1。而铜板和环氧树脂的力学性能见参考文献[12]和[13]。在这里,碳纤维布力学特性为各向异性,铜板和树脂基为各向同性。

表1中所示的碳纤维X方向为应力主方向(即图1中所示的0°铺层方向),Y方向为次应力方向(即90°铺层方向),而Z方向为垂直于X、Y平面的法线方向。

表1 碳纤维的力学性能

项目	正应力方向		
	X	Y	Z
密度/(kg·m ⁻³)		1 540	
拉伸弹性模量/MPa	2.09×10 ⁵	9 450	9 450
泊松比	0.27	0.4	0.27
拉伸应力极限/MPa	1 979	26	26
压缩应力极限/MPa	-893	-139	-139
拉伸应变极限	0.009 2	0.003 1	0.003 1
压缩应变极限	-0.005 3	-0.017 2	-0.017 2
项目	剪切应力方向		
	XY	YZ	XZ
剪切弹性模量/MPa	5 500	3 900	5 500
剪切应力极限/MPa	100	50	100
剪切应变极限	0.001 6	0.001	0.001 6

(2) 材料状态方程。

要准确地对材料的瞬态动力学损伤进行模拟,需要精确把握材料的状态方程。任意一种均质材料的热动力学状态,在没有经历化学反应或者相变过

程的前提下,都可以由两种状态变量来定义,比如材料所受的压力 P 可以由以下几种状态变量表示。

$$P=(\rho, T)=P(v, e)=P(v_r, e_v)=P(\mu, e_{v_0}) \quad (1)$$

式中: ρ ——密度;

T ——温度;

v ——体积;

e ——比内能(单位质量的内能);

v_r ——相对体积;

e_v ——单位当前体积的内能;

e_{v_0} ——单位相对体积的内能;

μ ——体积参数,它可以表示为: $\mu=(1-v_r)/v_r=\rho/\rho_0-1$ 。

描述此类函数关系的方程,称之为状态方程^[6]。通过状态方程,可以表达和计算出材料瞬间发生形变或者损伤状态下热动力学状态的变化情况。而状态方程,根据材料的不同,具有很多种形式,笔者采用 Rankine-Hugoniot 方程^[7] 来确定冲击振动特性,并通过该方程来定义任意一对变量条件,这里所需考虑的这些状态变量包括材料密度、压力、能量、粒子速度(u_p)和激波速度(U)。这种形式的状态方程 1962 年首先由 J. H. Tillotson^[7] 以及 1967 年由 R. T. Allen^[8] 提出,并且可以用于准确计算金属和部分非金属材料在超高速时较宽的压力与密度。这个状态方程不仅描述通用材料在激振之后的密度变化及条件。同时又提供了激振能过大导致材料的融化或者蒸发的情况。它使用的材料压力范围非常宽,在这种状态方程适用的“低压”区域,其压力范围适用于 $0 \sim 0.1$ MPa,而“高压”区域范围为 $0.1 \sim 1 \times 10^8$ MPa。因此除了低压区域,该方程适用于任何形式的通用材料。这个构想可以准确判断 5% 以内的 Hugoniot 压力和 10% 以内的等熵压力,因此它非常适用于通用材料的高速冲击问题。

整个压力-体积平面的范围可以分为 4 个区域,如图 2 所示。

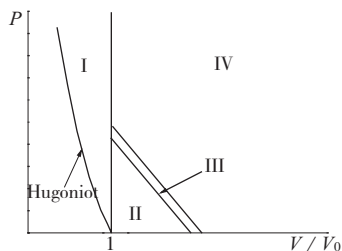


图2 状态方程的压力体积平面分布

Hugoniot 线左侧区域仅表示绝热压缩(无振动

),同时这部分区域与冲击问题无关。因此这部分区域不包括在 Rankine-Hugoniot 方程之内。其中, V/V_0 表示材料的当前单位体积与当前单位相对体积(0 压力体积)之比。区域 I 表示材料的压缩相,并且垂直延伸到冲击压力大约 10 MPa。区域 II 表示材料被冲击后,能量低于升华能 e_s ,并且经过绝热释放,回到固体零压力状态的情况。区域 IV 则表示材料的膨胀相,它表明材料经过高速冲击后,其升华能 e_s 非常高,以至于能够气化材料,导致材料体积急剧膨胀的情况。简而言之,当 $V=V_0$ 时,则发生相变。

在许多动力学实验中,在测量激波速度 U 和粒子速度 u_p 时发现,对于大多数固体和许多液体处于大幅度的压力变化时,这两个变量之间存在一个经验上的线性关系^[9]:

$$U = c_0 + su_p \quad (2)$$

式中: c_0 ——零压力的粒子初始速度;

s ——线性系数(无量纲)。

然后,基于冲击 Hugoniot 曲线可以很方便地建立一个状态方程的 Mie-Gruneisen 形式:

$$p = p_H + \varphi \rho (e - e_H) \quad (3)$$

式中: p ——冲击压力;

p_H ——Hugoniot 压力(图 2);

e_H ——Hugoniot 内能;

φ ——Gruneisen 系数。

这里,假设 $\varphi \rho = \varphi_0 \rho_0 = \text{常数}$,并且:

$$p_H = \frac{p_0 c_0 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s - 1)\mu]^2} \quad (4)$$

$$e_H = \frac{1}{2} \frac{p_H}{\rho_0} \left(\frac{\mu}{1 + \mu} \right) \quad (5)$$

式中: φ ——Gruneisen 系数,通常的取值范围近似于 $\varphi \approx 2s$, φ 最大到 1。

当 $s > 1$ 时,此时表示在压缩状态下,随着温度趋于无穷大具有一个极限值。因此上面方程 4 的分母变为 0,并且压力变成无穷大,此时 $1 - (s - 1)\mu = 0$ 。

给定一个最大密度, $\rho = s \rho_0 (s - 1)$ 。在这种情况下达到之前的很长一段时间,常量 $\varphi \rho$ 可能是无效的。此外,这种在 U 和 u_p 之间线性变化的设想,并不支持压力太大的情况。因此在低压冲击时(< 10 MPa),激振波与粒子速度的关系,考虑采用式(2)的线性关系,而在高压冲击时(≥ 10 MPa),则采用式(6)所示的二次振动函数,其包含一个二次振动速度与粒子速度的函数关系:

$$U = c_0 + S_1 u_p + S_2 u_p^2 \quad (6)$$

式中: S_1 ——一次系数;

S_2 ——二次系数。

参数 S_2 可以设定为一个非零值便于更好地适应高速非线性 $U-u_p$ 材料数据。该状态方程的输入参数如表 2 所示。

表 2 材料状态方程参数

参数名称	碳纤维	铜板	EP
φ	1.7	2	1.83
$C_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	4 300	3 958	2 439
S_1	1.256	1.497	1.826
$S_2/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.006	0.003	0.048

1.4 击穿实验布置

采用的弹丸为球头形状,弹丸直径为 4.6 mm,长度为 18 mm,击穿实验布置装置及弹丸尺寸示意图如图 3 所示。弹丸材料为 D6A 钢。它主要包含了子弹发射装置,靶板固定装置,子弹穿击前后速度测定系统,以及子弹回收装置。其中,弹丸发射装置为 4.6 mm 火炮系统,最大装药时,可将弹丸加速至 2 000 m/s。子弹测速装置包括两套系统,分别为前置测速装置和后置测速装置。前置测速装置为子弹测速仪,其功能是触发速度测定装置,当前置测速仪捕捉到高速运动的物体时,能在 0.1 ms 内开启速度测量系统,追踪子弹速度。后置测速装置为高速相机,其由一台高清摄像机来捕捉穿击后的子弹轨迹和速度,其精度不及前置测速装置。

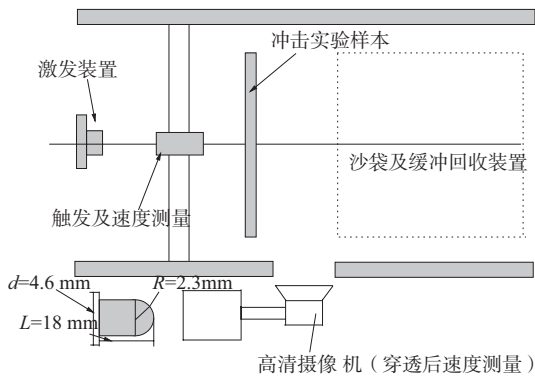


图 3 击穿实验布置装置及弹丸尺寸示意图

1.5 性能测试

复合板的防弹性能按 GA 165-1997 测试。

2 结果及讨论

2.1 弹丸击穿实验

笔者共发射 4 发弹丸,弹丸质量均为 2 g。这 4 发弹丸的装药量不同,测速系统捕捉的初始速度也各异。因此,4 发子弹对复合板的损伤程度也不相同。表 3 分别为 4 发子弹击穿实验与数值分析的结

果。

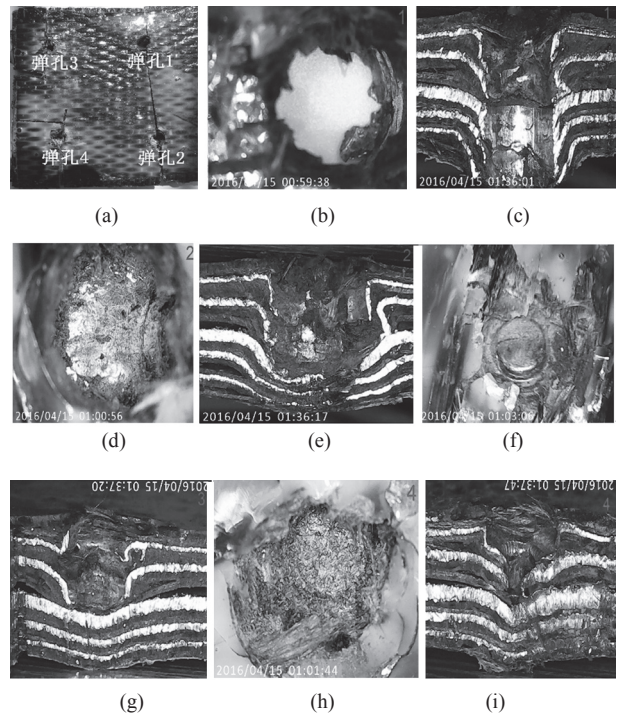
表 3 实验顺序及测定结果

工况	弹丸质量 / g	$V_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_r/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	E_{drop}/J
1(实弹)	2	1170	639.6	959.812
2(实弹)	2	843	0	710.649
3(实弹)	2	571	0	326.041
4(实弹)	2	436	0	190.096
5(模拟)	2	1170	636.7	963.513
6(模拟)	2	843	0	710.649
7(模拟)	2	571	0	326.041
8(模拟)	2	436	0	190.096

这 4 发子弹按照填药量的多少及激发的先后顺序分别标注为 1,2,3,4。根据测速系统捕捉的数据,它们测得的初始速度分别为 1 170,843,571,436 m/s。

根据表 3 统计的实验结果,4 发子弹中只有初速度为 1 170 m/s 的子弹发生穿透,其穿透后测得的速度为 639.6 m/s,对应的动能损失为 959.812 J,复合板的比动能吸收为 $1.2814 \times 10^9 \text{ J/m}^2$ 。945 钢的比动能吸收为 $9.75 \times 10^8 \text{ J/m}^2$,其抗穿透性能强于 945 防弹钢,且更为轻便。

图 4 为子弹侵入后的复合板样本及 4 个弹孔的正视图及剖切截面的放大图。



a—击穿后样本; b, d, f, h—弹孔 1,2,3,4 的正视放大图;

c, e, g, i——弹孔 1,2,3,4 的剖视放大图

图 4 高速冲击弹孔及相应的剖切损伤面

图 4 中弹孔标记的数字与表 3 中所对应的工况一致。根据图 4 可见,在子弹 1 的初速度为

1170 m/s 时,弹孔 1 完全贯穿,铜板呈延性损伤,弹孔周边出现了碳纤维与铜板之间的层离。子弹 2 的初速度为 843 m/s,它共穿透了 8 层铺层结构,9~17 层均有不同程度的损伤。其中,9~17 层中所有的铜板层都发生了断裂损伤,但子弹并未完全穿透其中的碳纤维层。子弹 3 的初始速度为 571 m/s,它相对子弹 2 的损伤更小,弹孔 3 也穿透了 8 层结构,但是与弹孔 2 不同的是 9~17 层并未发生断裂损伤,这些层只是发生了细微的塑性变形。子弹 4 的初始速度为 436 m/s,弹孔 4 贯穿了 6 层,7~17 层也有不同程度的塑性变形。

2.2 数值模拟实验

为了更细致地了解子弹侵入过程对复合板的破坏机制,笔者采用复合材料铺层设计对层合板进行数值定义,且采用瞬态结构动力学在时域上求出 4 种不同初速度子弹侵入复合板的过程。具体的数值解析模型如图 5 所示。图 5 中,按照实际射击顺序布置了 4 发子弹,并且对应于表 3,依据速度传感器测定的速度数值,采用 4 种不同初速度子弹穿击板材。在数值模型中,子弹距离复合板的初始距离都设定为 50 mm。板材的截面铺层与实际铺层相对应,采用复合材料铺层。碳纤维进行方向铺层定义(碳纤维两个铺层方向,分别是 $0^{\circ}/90^{\circ}$ 方向),铜板为均质材料(不需定义铺层方向),铜板与碳纤维之间的界面产生的内聚力,采用 EP 材料参数进行定义。具体板材的材料数据见表 1 和参考文献 [12] 和 [13]。

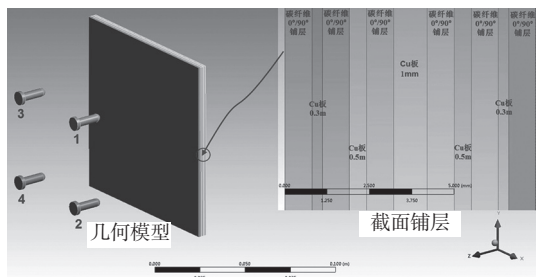
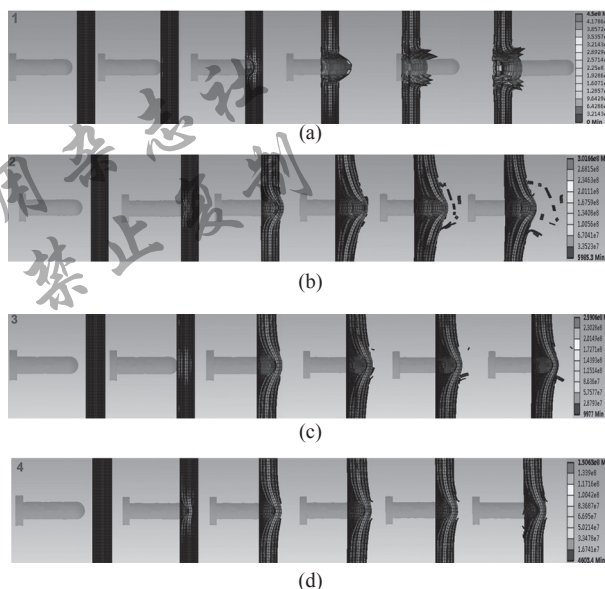


图 5 子弹侵入数值模型

图 6 为 4 种不同初速度下各节选子弹在击中板靶前和终止过程的 6 个时间点的应力分布图片(顺序从左到右)。板靶的击穿失效的判断是根据表 2 中确定的材料的数据通过数值计算出的结果满足表 1 中所示的最大应力极限,或者最大应变极限,两者超过其中之一则判定失效。图 6 中每一行包含一个击穿实验数值模拟过程,从图 6a~6d 分别记录了子弹 1~子弹 4 的冲击过程,这与图 5 中和图 4 所示的

子弹与弹孔标记号相对应。每一个子弹的冲击过程都是由 6 个不同时间片段所组成。子弹 1~4 所对应的初始速度分别为 1 170, 843, 571, 436 m/s。图 6 中, 子弹 1 从左至右 6 个图所对应的时间点分别为: 4.168×10^{-5} , 4.296×10^{-5} , 4.488×10^{-5} , 5.001×10^{-5} , 5.769×10^{-5} , 6.4106×10^{-5} s。子弹 2 所对应的时间点分别为: 5.652×10^{-5} , 6.079×10^{-5} , 6.612×10^{-5} , 7.785×10^{-5} , 9.2781×10^{-5} , 1.0664×10^{-4} s。子弹 3 所对应的时间点分别为: 8.407×10^{-5} , 8.827×10^{-5} , 9.947×10^{-5} , 1.1208×10^{-4} , 1.261×10^{-4} , 1.401×10^{-4} s。子弹 4 所对应的时间点分别为: 1.101×10^{-4} , 1.193×10^{-4} , 1.284×10^{-4} , 1.45×10^{-4} , 1.651×10^{-4} , 1.835×10^{-4} s。



a—子弹 1 ; b—子弹 2 ; c—子弹 3 ; d—子弹 4

图6 子弹侵入复合板的过程及板材应力分布

表3显示动力学数值分析的结果,与实验测定的结果基本一致,在初速度为1170 m/s时发生穿透,其余3发子弹均未能穿透靶板。同时1170 m/s初速度对应的最大应力为450 MPa,843 m/s初速度对应的最大应力为310.66 MPa,571 m/s初速度对应的为259.06 MPa,436 m/s初速度对应为150.67 MPa。通过细节显示发现,在冲击最后时刻,843 m/s的子弹击穿了9层,第10~17层发生严重的塑性变形,同时由于存在激振能,有大量的损伤碎片剥脱。571 m/s的子弹击穿了8层,第9~17层也发生一定的塑性变形,并伴有少量损伤碎片脱落。而436 m/s的子弹击穿了6层。

3 结论

(1) 通过实验测定,碳纤维 / Cu 复合材料具有

非常优异的抗穿透性能,通过与文献[1]和[5]对比发现,其抗穿透性能强于945防弹钢,且更为轻便。

(2)通过分析碳纤维/Cu复合板的结构与材料特性可知,碳纤维具有比金属更高的模量,它的抗冲击性能优于金属材料,而Cu合金具有良好的延展性,它能够较好地吸收子弹的激振能,同时,相比于同种均质的防弹材料,复合结构防弹板材的设计更具有多样性和灵活性。

(3)实验测定与数值分析得出,笔者设计的这种碳纤维/Cu复合材料总厚度为7.6 mm,通过测算,它能够吸收子弹的比动能为 $1.2814 \times 10^9 \text{ J/m}^2$ 。

参考文献

- [1] 胡邓平,赵利平,伍先明,等. 616装甲防弹钢动态冲击下的性能研究[J]. 兵器材料科学与工程,2017,40(2):96-99.
Hu Dengping, Zhao Liping, Wu Xianming, et al. Performance of 616 armor steel under dynamic impact condition[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2017, 40(2):96-99.
- [2] 刘国权,杨大峰,梅树清. 高强玻璃纤维复合材料防弹性能的微观研究[J]. 纤维复合材料,2001,21(3):21-23.
Liu Guoquan, Yang Dafeng, Mei Shuqing. Micro examination of high strength glass fiber composite material bulletproof property[J]. Fiber Composites, 2001, 21(3):21-23.
- [3] 湛勇,汪玉,唐平,等. 加筋靶板抗穿透特性的实验研究[J]. 兵器材料科学与工程,2008,31(3):15-20.
Chen Yong, Wang Yu, Tang Ping, et al. Experimental research on the anti-perforated characteristics of the stiffened plate[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2008, 31(3):15-20.
- [4] 张中国,黄凤雷,段卓平,等. 弹体侵彻带加强筋结构靶的实验研究[J]. 爆炸与冲击,2004,24(5):431-436.
Zhang Zhongguo, Huang Fenglei, Duan Zhuoping, et al. The experimental research for projectile penetrating the structural target with rebar[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(5):431-436.
- [5] 杨超,田时雨. 装甲钢动态性能与抗弹性能关系研究[J]. 兵器材料科学与工程,2002,25(1):3-7.
Yang Chao, Tian Shiyu. Study of relation between dynamic characteristics and penetrating resistance of armour steel[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2002, 25(1):3-7.
- [6] Ipson T W. Ballistic perforation dynamics[J]. J Appl Mech, 1963, 30:384-390.
- [7] Tillotson, J H. Metallic equations of state for hypervelocity impact of GA-3216[J]. General Atomic, 1962, 10(7):22-29.
- [8] Allen R T. Equation of state of rocks and minerals[J]. General Atomic, 1967, 15(6):7828-7834.
- [9] Lee E L, Tarver C. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives[J]. Physics of Fluids, 1980, 23(12):2362-2372.
- [10] 付远,张友亮,刘小红,等. 敏度算法的二次珠优化改善油底盘的频率特性[J]. 噪声与振动控制,2017,31(3):66-71.
Fu Yuan, Zhang Youliang, Liu Xiaohong, et al. Improvement of frequency characteristics of oil pans by using twice shell bead optimizations with sensitive algorithm[J]. Noise and Vibration Control, 2017, 31(3):66-71.
- [11] 王闯,刘荣强,邓宗全,等. 铝蜂窝结构的冲击动力学性能的试验及数值研究[J]. 振动与冲击,2008,27(11):56-61.
Wang Chuang, Liu Rongqiang, Deng Zongquan, et al. Experimental and numerical studies on aluminum honeycomb structure with various cell specifications under impact loading[J]. Journal of vibration and shock, 2008, 27(11):56-61.
- [12] 郑峰. 铜与铜合金速查手册[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
Zheng Feng. Quick manual of cooper and Aldary[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2008.
- [13] 陈平,刘胜平,王德中,等. 环氧树脂及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2011.
Chen Ping, Liu Shengping, Wang Dezhong, et al. Epoxy resin and its application[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2011.

天津石化聚烯烃 TJZS2650 高端产品进军国际市场

天津石化自主开发生产的高熔体流动速率(MFR)聚烯烃 TJZS2650 专用料第一次出口到日本市场。

TJZS2650 专用料自 2011 年 5 月份问世以来,天津石化始终致力于将其做优做大。经过 6 年的精心培育,品牌效应逐步凸显,国内市场份额逐年递增。加工量从 2012 年的月均 684 t 提高到目前的 3 588 t,在聚乙烯产品加工量中的占比也由 7% 提高至 33.22%。2017 年 11 月份,产量更是猛增至 5 018 t,占当月总产量 48.25%,再创历史新高。作为高附加值的產品,目前, TJZS2650 专用料价格高出通用料近 900 元/t,增效明显。

天津石化立足于我国石化战略布局,着力拓展高端产品的海外市场。为满足国外客商对该类产品的苛刻要求,烯烃部坚持技术创新,攻克了生产工艺复杂、流动性高、控制难等

技术难题,完成了 TJZS2650 专用料从单一粉料生产到粒料加工的技术提升,近年来相继开发了 TJZS2433, TJZS2680, 2790D 等不同 MFR 的系列产品,做到生产一代储备一代,成为国内唯一生产该系列成套产品的企业,实现了技术上的跨越以及提升,大大增强了海外市场的竞争能力。

为确保出口产品的质量,烯烃部出台了一系列质量管理措施,建立了从生产到分析、产品包装到入库、出厂和装运等一整套质量检验流程制度。特别是在生产过程中,通过加强精准牌号切换、催化剂升级、馏出口控制、反应负荷提升以及造粒均一化攻关等措施,使 TJZS2650 产品达到出口质量指标要求。此次 TJZS2650 高端产品走出国门,进一步拓宽了天津石化的市场空间,形成了新的效益增长点,将有力提升我国石化聚烯烃产品在国际市场上的影响力。

(中国石化新闻网)