

连续玄武岩纤维增强复合材料的抗弹性能研究

李英建 李 峰 曲英章 金子明

(中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031)

摘要 通过研究环氧树脂/连续玄武岩纤维(CBF)、乙烯基酯树脂/CBF、聚氨酯树脂/CBF、酚醛树脂/CBF体系的抗弹性能,发现 CBF 增强乙烯基酯复合材料的抗弹性能较好。考察了 CBF 增强乙烯基酯树脂复合材料厚度、靶板法线角对抗弹性能的影响,并对 CBF 增强复合材料的抗弹机理进行了分析。

关键词 连续玄武岩纤维 乙烯基酯树脂 抗弹性能 抗弹机理

连续玄武岩纤维(CBF)是以天然玄武岩矿石作为原料,将其破碎后加入熔窑中,在 1450~1500℃熔融后,通过铂铑合金拉丝漏板制成的连续纤维^[1-2]。自 1985 年乌克兰研制出 CBF 以来,各国科学家也都致力于开发高性能的 CBF^[3-4]。近年来,国内 CBF 制造技术逐渐成熟并且已经拥有自主知识产权的 CBF 制造技术及工艺^[5],这极大地促进了我国 CBF 复合材料的研究。CBF 及其复合材料可以较好地满足国防建设、交通运输、建筑、石油化工、环保、电子、航空、航天等领域结构材料的需求,对国防建设、重大工程和产业结构升级具有重要意义。

近年来,我国对芳纶纤维、超高分子量聚乙烯纤维、玻璃纤维等增强复合材料的抗弹性能研究较多,但对 CBF 复合材料的抗弹性能研究较少。开展 CBF 复合材料抗弹性能研究不仅对开发利用 CBF 具有重要意义,而且对抗弹复合材料的发展具有重要的推动作用。

1 实验部分

1.1 主要原材料

CBF: 密度 2.73 g/cm³, 上海俄金玄武岩纤维有限公司;

乙烯基酯树脂: ARZ3001, 密度 1.1 g/cm³, 无锡市阿尔兹化工有限公司;

环氧树脂: 北京天德玻璃钢制品有限公司;

聚氨酯: 泰和树脂有限公司;

酚醛树脂: 自制。

1.2 主要仪器、设备

液压机: YJ34F-3 型, 湖州欣杰森液压机床厂;

红外光幕测速系统: 西安工业学院;

扫描电子显微镜(SEM): QUANTA200 型, 美国 FEI 公司;

弹道枪: 54 式 12.7 mm, 四川华庆机械有限责

任公司。

1.3 试样制备

将 CBF 浸渍不同的树脂基体制成面密度为 300 g/m² 的单向布。采用层压成型工艺制备靶板, 纤维含量为 42%。其中层压成型工艺参数为: 升温到 70~80℃, 在 3 MPa 压力下, 保压保温 1 h。然后在 50℃烘箱内后固化 72 h。

1.4 性能测试

(1) 抗弹试验

用 54 式 12.7 mm 弹道枪、4.5 g 碎片模拟弹进行抗弹试验, 采用红外光幕测速系统记录子弹速度。

(2) V_{50} 测试^[5]

V_{50} 即一定面密度的复合材料靶板在贯穿/防护住弹丸的概率为 50% 时弹丸的入射速度。 V_{50} 能科学表征一定面密度靶板的抗弹性能。

(3) 面密度和比吸能

面密度是抗弹材料轻量化的重要指标, 在满足防护要求的条件下, 面密度应尽量小些, 以减轻质量和降低成本。用分度值为 10 g 的天平称量靶板质量, 用分度值为 1 mm 的直尺量取靶板的长和宽, 按式(1)计算得到面密度 ρ_A 。

$$\rho_A = M/s \quad (1)$$

式中 M 为靶板质量, s 为靶板面积。

比吸能是评价抗弹性能的一个重要指标, 是靶板所吸收的能量与靶板面密度的比值。复合材料的比吸能越高, 抗弹性能越好。比吸能 Sea 计算公式为:

$$Sea = mv^2 / 2\rho_A \quad (2)$$

式中 m 为弹丸质量, v 为弹丸的入射速度。

(4) SEM 分析

用 SEM 分析弹体冲击下纤维的断裂形态。从靶板上切下样品,经喷金后利用 SEM 进行观察并拍照。

2 结果与讨论

2.1 树脂基体对抗弹性能的影响

表 1 列出 CBF 增强不同树脂基体复合材料的抗弹性能。

表 1 树脂基体对抗弹性能影响

树脂基体	面密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	$V_{50}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	比吸能/ $(\text{J} \cdot \text{m}^2) \cdot \text{kg}^{-1}$
乙烯基酯树脂	23.1	499.5	24.3
环氧树脂	23.1	454.0	20.1
酚醛树脂	23.1	473.0	21.8
聚氨酯树脂	23.1	475.0	22.0

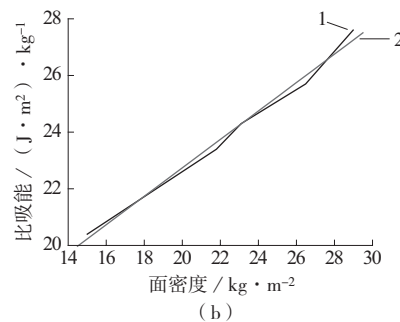
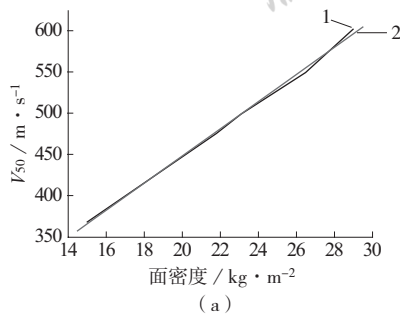
由表 1 可看出, CBF 增强乙烯基酯树脂复合材料的抗弹性能较好,而 CBF 增强环氧树脂的抗弹性能较差。

2.2 CBF 增强乙烯基酯树脂复合材料的面密度与抗弹性能之间的关系

靶板的参数及抗弹性能见表 2、图 1。

表 2 靶板参数及靶试结果

厚度/mm	面密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	$V_{50}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	比吸能/ $(\text{J} \cdot \text{m}^2) \cdot \text{kg}^{-1}$
8.1	15.0	368.5	20.4
11.8	21.8	476.0	23.4
12.5	23.1	499.5	24.3
14.3	26.5	550.0	25.7
15.7	30.0	602.5	27.6



a— V_{50} ; b—比吸能

1—实测值; 2—拟合值

图 1 V_{50} 、比吸能与面密度的关系曲线

由图 1 可以看出,随着面密度的增加,靶板的

V_{50} 和比吸能都呈线性增加。经过回归分析,靶板面密度与靶板 V_{50} 、比吸能的关系可以分别表示为:

$$V_{50}=16.5\rho_A+119.4$$

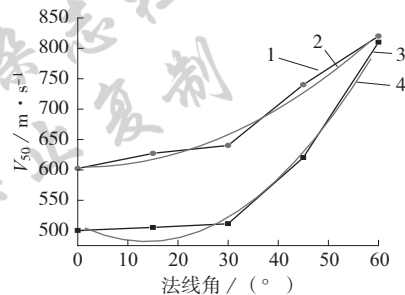
$$\text{Sea}=0.5\rho_A+12.7$$

尤其值得注意的是,靶板的比吸能也随面密度的增加而增加,而抗弹材料研究人员常用的表征方法——比吸能法的基础是以复合材料的防护性能与其面密度无关为假设条件。可见比吸能法也不能完全准确反映 CBF 增强复合材料的抗弹性能。

抗弹性能随面密度增加而有所提高的原因,可能是靶板的厚度效应造成的,这在以前的相关文献中,还未见板厚对抗弹性能影响的分析报道。

2.3 靶板法线角 α 与抗弹性能之间的关系

图 2 示出靶板法线角与抗弹性能之间的关系。



1—面密度为 30.0 kg/m^2 的靶板实测值; 2—面密度为 30.0 kg/m^2 的靶板拟合值; 3—面密度为 23.1 kg/m^2 的靶板实测值;

4—面密度为 23.1 kg/m^2 的靶板拟合值

图 2 法线角对抗弹性能的影响

经过回归分析,当靶板的面密度为 23.1 kg/m^2 和 30.0 kg/m^2 时,靶板 V_{50} 与法线角的关系可以分别表示为:

$$V_{50} = 0.15\alpha^2 - 4.1\alpha + 509.8 \quad (0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ)$$

$$V_{50} = 0.06\alpha^2 - 0.09\alpha + 604.1 \quad (0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ)$$

由图 2 可见,在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内,随着法线角的增大, V_{50} 增大,抗弹性能提高;由回归曲线可以看出, V_{50} 随法线角的增大呈抛物线上升趋势。由图 2 还可以看出,随着法线角的增大, CBF 增强乙烯基酯树脂复合材料的面密度对抗弹性能的影响愈小,当法线角大于 60° ,面密度为 23.1 kg/m^2 和 30.0 kg/m^2 的复合材料的抗弹性能几乎相当。

2.4 乙烯基酯树脂/CBF 复合材料 SEM 分析

图 3 为乙烯基酯树脂/CBF 复合材料靶板着弹点的 SEM 照片,图 4 示出乙烯基酯树脂/CBF 复合材料靶板着弹后的分层破坏和背面“鼓包”情况。

从图 3 可以看出,乙烯基酯树脂/CBF 复合材

料基本上为脆性断裂。复合材料最大的优势在于其中的高强度纤维,由于具有极高的拉伸强度,纤维拉伸破坏形式能够吸收大量的冲击能量。

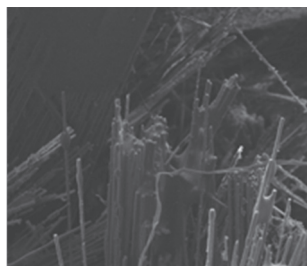


图3 乙烯基酯树脂/CBF复合材料靶板着弹点的SEM照片



图4 乙烯基酯树脂/CBF复合材料着弹后的分层破坏和背面“鼓包”

从图4可以看出,受到弹丸冲击且未被击穿的靶板,靶板背面会出现一个比着弹点面积大的多“鼓包”,这证明复合材料变形是重要的吸能方式。复合材料变形包括子弹入射方向的变形和入射点邻近区域的拉伸变形,由于入射能量的快速传递,复合材料在入射点附近区域将通过变形耗散掉相当一部分能量。从图4还可以看出,复合材料产生了分层和基体破坏。复合材料受到弹丸冲击时,在弹丸与纤维的接触点产生应力波。应力波以连续的脉冲沿纤维轴向传播,应力波到达边界后,有部分能量损失,其余部分从边界反射回原冲击点,导致应力波在冲击点的能量叠加。由于叠加作用,应力波强度增

加,在足够的时间内,该位置发生基体破坏和分层,复合材料分层和基体破坏同样吸收了弹丸的部分能量。

3 结论

(1)在环氧树脂、酚醛树脂、乙烯基酯树脂和聚氨酯树脂等树脂基体中,CBF增强乙烯基酯树脂的抗弹性能最优。

(2)以4.5 g碎片模拟弹试验,靶板面密度与靶板 V_{50} 、比吸能的关系可以分别表示为: $V_{50}=16.5\rho_A+119.4$, $Sea=0.5\rho_A+12.7$ 。

(3)当靶板的面密度为23.1 kg/m²和30.0 kg/m²时,靶板 V_{50} 与法线角的关系可以分别表示为: $V_{50}=0.15\alpha^2-4.1\alpha+509.8$ ($0^\circ\leq\alpha\leq60^\circ$); $V_{50}=0.06\alpha^2-0.09\alpha+604.1$ ($0^\circ\leq\alpha\leq60^\circ$)。

(4)纤维的脆性断裂,复合材料的变形、分层和基体破坏是CBF增强乙烯基酯树脂复合材料重要的吸能方式。

参考文献

- [1] 胡显奇,申屠年.连续玄武岩纤维在军工及民用领域的应用[J].高科技纤维与应用,2005,30(6):7-13.
- [2] 谢尔盖.玄武岩纤维材料德应用前景[J].纤维复合材料,2003,17(3):16-20.
- [3] Jiri M, Vladimir K, Jitka R. Influence of thermal treatment on tensile failure of basalt fiber [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69: 1025-1033.
- [4] 王广健,尚德库,胡琳娜.玄武岩纤维的表面修饰及生态环境复合过滤材料的制备与性能研究[J].复合材料学报,2004,21(1):38-44.
- [5] 石钱华.国外连续玄武岩纤维的发展及其应用[J].玻璃纤维,2003(4):27-31.

THE BALLISTIC PERFORMANCE OF COMPOSITES REINFORCED BY CONTINUOUS BASALT FIBER

Li Yingjian, Li Feng, Qu Yingzhang, Jin Ziming
(CNGC Institute 53, Jinan 250031, China)

ABSTRACT By researching the ballistic performance of epoxy / continuous basalt fiber (CBF), viynyl ester / CBF, polyurethane / CBF and bakelite / CBF, it was found that the ballistic performance of viynyl ester / CBF was optimal. The relationship between thickniss and narmal angle of composites and ballistic performance was researched. In the end, the analysis of ballistic mechanism of CBF reinforced composites was given.

KEYWORD CBF, vinyl ester resin, ballistic performance, ballistic mechanism

商务部对进口氨纶反倾销进行期终复审调查

2011年10月13日,商务部发布公告,决定自即日起对原产于日本、新加坡、韩国、台湾地区和美国的进口氨纶所适用的反倾销措施进行期终复审调查。根据《中华人民共和国反倾销条例》的规定,在反倾销期终复审调查期间,对原产于

上述国家和地区的进口氨纶继续按照中华人民共和国商务部2006年第74号、2008年第39号公告、2008年第68号公告、2010年第6号公告公布的征税范围和反倾销税税率征收反倾销税。此次期终复审被调查产品与原反倾销调查一致。本次调查将于2012年10月13日之前结束。(工塑)