

玄武岩纤维增强乙烯基酯树脂的抗弹性能研究

李英建 金子明 李 华 吴春芝 钟蔚华

(中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031)

摘要 以连续玄武岩纤维为增强剂, 乙烯基酯树脂为基体, 制备了新型纤维增强树脂基复合材料。通过分析该复合材料的抗弹性能与其结构设计因素的关系, 确定了该复合材料中的纤维织物形式、织物面密度、纤维直径和纤维含量等结构参数; 并对该复合材料的抗弹机理进行了初步的分析讨论。

关键词 玄武岩纤维 乙烯基酯树脂 复合材料 抗弹性能 抗弹机理

连续玄武岩纤维是以天然玄武岩矿石作为原料, 将其破碎后加入熔窑中, 在 1 450 ~1 500℃熔融后通过铂铑合金拉丝漏板制成的^[1]。它与碳纤维、芳纶纤维、超高分子量聚乙烯纤维等相比具有独特的优点^[2~4]: (1) 原料来源广泛, 成本低; (2) 突出的耐高温性能; (3) 无污染; (4) 电磁波透过性好; (5) 吸湿率比玻璃纤维低 6 ~8 倍。因而连续玄武岩纤维增强树脂基复合材料以其独特的性能在冶金、化工、建筑、航空航天、兵器等领域将具有较广阔的应用前景。近年来国内对玄武岩纤维的研究应用取得了一定的进展, 但将其应用在抗弹材料方面尚未见文献报道。笔者以乙烯基酯树脂为基体, 连续玄武岩纤维为增强剂制备了玄武岩纤维增强乙烯基酯树脂复合材料, 并研究了该复合材料的抗弹性能及其影响因素, 这对开发利用玄武岩纤维具有重要意义。

1 实验部分

1.1 主要材料:

连续玄武岩纤维: 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: 密度 1.1 g/cm³, 上海精细化工有限公司;

过氧化甲乙酮: 化学纯, 科龙化工厂;

环烷酸钴: 化学纯, 沈阳市应用技术试验厂。

1.2 主要设备、仪器

真空泵: 国营南光机械制造厂;

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;

54 式 12.7 mm 弹道枪: 山西重型机械制造责任有限公司。

1.3 靶板制备

以乙烯基酯树脂和连续玄武岩纤维为原料并配以所需助剂, 采用真空吸注成型工艺在压力 0.2

MPa、温度 80℃下保持 1 h 后取出, 在常温下后固化 3 d。用高压水切割机制成 300 mm ×300 mm 的标准靶板。

1.4 抗弹性能表征

(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) V₅₀ 测试

V₅₀ 即一定面密度的复合材料靶板在贯穿/防住弹丸的概率为 50% 时弹丸的入射速度。V₅₀ 值能科学表征一定面密度靶板的抗弹性能。

(3) 面密度和比吸能计算

面密度是抗弹材料轻量化的重要指标, 此值在能满足防护要求的条件下应尽量小些, 以实现轻量化和降低成本。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度和宽度, 经计算得到面密度。其计算公式为:

$$\rho = M/s$$

式中: ρ ——靶板面密度;

M ——靶板质量;

s ——靶板面积。

比吸能 (Sea) 是评价抗弹性能的另一个重要指标, 是指靶板所吸收的能量与复合材料靶板面密度的比值。复合材料的比吸能越高, 抗弹性能越好。比吸能的计算公式为:

$$Sea = mv^2 / 2 \rho$$

式中: ea ——靶板比吸能;

m ——入射弹丸质量;

v ——入射弹丸速度。

1.5 SEM 分析

从被弹体冲击的靶板上切取试样, 经喷金后用

SEM 观察纤维断裂形态并拍照。

2 结果与讨论

2.1 纤维织物形式对靶板抗弹性能的影响

采用面密度为 300 g/m²、纤维直径为 7 μm 的纤维织物制备纤维体积分数为 45% 的靶板,考察了纤维织物形式对靶板抗弹性能的影响,结果见表 1。

表 1 纤维织物形式对靶板抗弹性能的影响

编织结构	靶板面密度 / kg · m ⁻²	靶板厚度 / mm	V ₅₀ / m · s ⁻¹	比吸能 / J · m ² · kg ⁻¹
单向布	23.1	12.7	464.3	21.0
斜纹布	22.9	12.6	411.0	16.6
平纹布	23.2	12.8	424.8	17.5

从表 1 可以看出,在玄武岩纤维织物中以单向布增强乙烯基酯树脂复合材料的抗弹性能最好,斜纹布的效果最差。产生这种现象的原因可能是由于不同织物中单位长度内纤维的弯曲程度不同引起的。如果防弹材料中的纤维呈平直状态,则冲击波可沿纤维轴向传播至较远的距离而无反射,这有助于冲击能的快速扩散^[5];如果纤维弯曲或有断头,则弯曲点或断点会部分反射冲击波,缩小了瞬间扩散范围,使防弹效果降低^[6]。因此纤维单向布的防弹效果要比斜纹布和平纹布好。由于斜纹布的编织结构影响到织物的力学性能,导致断裂强度下降,从而影响了其抗弹效果。

2.2 纤维直径对靶板抗弹性能的影响

表 2 列出在靶板纤维体积分数为 45%,单向布面密度为 300 g/m² 时不同纤维直径对靶板抗弹性能的影响。

表 2 纤维直径对靶板抗弹性能的影响

纤维直径 / μm	靶板面密度 / kg · m ⁻²	靶板厚度 / mm	V ₅₀ / m · s ⁻¹	比吸能 / J · m ² · kg ⁻¹
7	23.0	12.6	474.2	22.0
9	23.1	12.7	464.3	21.0
11	23.1	12.6	450.9	19.8
13	22.9	12.6	445.5	19.5

从表 2 可见,纤维直径越小,复合材料的抗弹性能越好。究其原因,一是纤维直径越小,在冲击的极短时间内能量传播的通道越多,能量被吸收的也越快、越多;二是纤维直径越小,纤维与树脂基体的界面接触面积越大,复合材料受到冲击时界面脱胶和分层的几率增加,由此所吸收的能量也越多。

2.3 织物面密度对靶板抗弹性能的影响

表 3 列出在靶板纤维体积分数为 45%,采用 7 μm 纱织单向布时,织物不同面密度对靶板抗弹性能的影响。从表 3 可以看出,织物面密度越小,复合

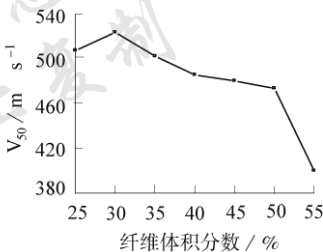
材料的抗弹性能越好。产生这种现象的原因是,冲击能量在传播到层间界面时,部分能量会被反射回来而朝冲击波的反方向传播。经过多次反弹后既减小了冲击能量又增加了能量在靶板中的传播时间,这有利于能量向更大范围扩散。在靶板面密度几乎相同的条件下,织物面密度越小,所用织物层数越多,吸收的能量也越多。

表 3 织物面密度对靶板抗弹性能的影响

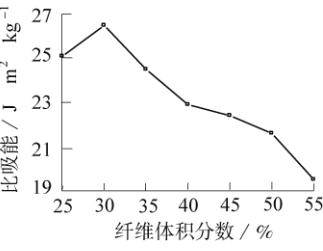
织物面密度 / g · m ⁻²	靶板面密度 / kg · m ⁻²	靶板厚度 / mm	V ₅₀ / m · s ⁻¹	比吸能 / J · m ² · kg ⁻¹
188.0	23.1	12.7	479.6	22.4
300.0	23.0	12.7	468.8	21.5
660.0	23.3	12.7	457.4	20.2

2.4 纤维体积分数对靶板抗弹性能的影响

图 1 示出在织物面密度、纤维直径、织物形式不变的条件下纤维含量对靶板抗弹性能的影响。



(a)



(b)

a—V₅₀; b—比吸能

图 1 纤维含量对靶板 V₅₀ 和比吸能的影响

图 1 表明 V₅₀(面密度变化小于 1%)、比吸能在纤维体积分数为 30% 时达到最大值,这说明加入体积分数为 30% 的连续玄武岩纤维是复合材料较理想的纤维含量。

如果纤维含量过高,不能被树脂完全浸透,则会产生缺胶现象。缺胶对复合材料来说主要有两方面的影响:一是树脂不能将纤维很好地粘结在一起,无法形成一个受力整体;二是由于界面结合不好,能量从上层传递到下层时,界面不能很好地反射应力波作用。这两方面造成的结果是使复合材料的抗弹性能降低。而纤维含量过低,当受到高速弹丸冲击时纤维未达到破坏应变就已断裂,不能充分发挥纤维

织物的抗冲击特性。只有纤维含量适中(体积分数为30%)时才能充分发挥纤维增强树脂的整体作用,达到最佳的抗弹效果。另外此时复合材料靶板相对较厚,厚度效应明显,这也是抗弹性能好的一个重要原因。

2.5 玄武岩纤维与玻纤增强乙烯基酯树脂的抗弹性能比较

玄武岩纤维增强乙烯基酯树脂与玻纤增强乙烯基酯树脂复合材料的抗弹性能比较如表4所示。

表4 玄武岩纤维与玻纤增强乙烯基酯树脂的抗弹性能比较

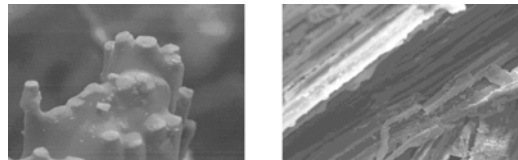
复合材料体系	靶板面密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	V_{50} / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	比吸能 / $\text{J} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$
乙烯基酯树脂/高强玻纤	23.1	534.0	27.8
乙烯基酯树脂/中碱玻纤	23.0	514.5	25.9
乙烯基酯树脂/玄武岩纤维	23.2	518.0	26.0

注:纤维体积分数均为30%。

从表4可看出,玄武岩纤维增强乙烯基酯树脂复合材料的抗弹性能比高强玻纤增强乙烯基酯树脂的抗弹性能稍差,但与中碱玻纤增强乙烯基酯树脂的抗弹性能基本相同。

2.6 靶板的 SEM 分析

图2为被弹体冲击靶板的SEM照片。根据弹体侵彻靶板的现象分析,弹体侵彻过程比较复杂,既不是简单的压缩塑性变形扩孔,也不是简单的冲塞现象^[7,8]。弹体击中靶板后产生两种应力波:一种是沿纤维轴向的横波(类似脉冲波)向周围传播,通过纤维交错点和树脂基体分散开来,传递到较大的面积,造成纤维断裂和基体破坏(见图2a),从而吸收能量。另一种波以纵波形式沿靶板厚度方向传播,造成靶板分层和分层部位的纤维断裂(见图2b),



(a)

(b)

a—纤维断裂及基体破坏;b—靶板分层及纤维断裂

图2 被弹体冲击靶板的SEM照片

并在靶板背面撕起一些小窄层,从而吸收能量。从SEM照片看来,其它抗弹复合材料的纤维拔脱现象在此并不明显,这可能与纤维-树脂基体界面结合较好有关。由以上分析可知,玄武岩纤维增强乙烯基酯树脂复合材料的吸能方式主要是纤维断裂、基体破坏、靶板局部的变形和分层。

3 结论

(1)以乙烯基酯树脂为基体,采用玄武岩纤维单向布制备的靶板具有较好的抗弹性能;纤维直径越小、织物面密度越小,复合材料的抗弹性能越好;用纤维体积分数为30%,织物面密度为 188 g/m^2 的 $7 \mu\text{m}$ 纱织单向布增强的乙烯基酯树脂复合材料具有最佳的抗弹性能。

(2)玄武岩纤维增强乙烯基酯树脂复合材料的吸能方式主要是纤维断裂、基体破坏、靶板局部的变形和分层;靶板的厚度效应显著影响其抗弹性能。

(3)玄武岩纤维增强乙烯基酯树脂复合材料的抗弹性能与中碱玻纤增强乙烯基酯树脂复合材料的抗弹性能基本相同,可部分替代玻璃纤维。该纤维在抗弹材料方面具有广阔的应用前景。

参考文献

- 1 Vanvoo B, Smit H H G, Sinke R J, et al. Natural fiber reinforced sheet moulding compound. *Composites Part A*, 2001, 32: 1271
- 2 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. *复合材料学报*, 2004, 21(1): 38
- 3 Jiri Militky, Vladimir Kovacic, Jitka Rubnerova. Influence of thermal treatment on tensile failure of basalt fiber. *Engineering Fracture Mechanics*, 2002, 69: 1025
- 4 谢尔盖,李中.玄武岩纤维材料的应用前景. *纤维复合材料*, 2003, 17(3): 17
- 5 Prevorsek D C. Damage tolerance: design for structural integrity penetration. *Composite Structure*, 1993, 23(4): 137
- 6 夏军佳,卫甘霖,张征定,等.纤维力学性能与防弹性能的关系. *纤维复合材料*, 2004, 18(1): 18
- 7 Traim N, Findik F, Uzum H. Ballistic impact performance of polymer composites. *Composites Structure*, 2002, 49: 13
- 8 Findik F, Traim N. Ballistic impact efficiency of polymer composites. *Composites Structure*, 2003, 61: 187

STUDY ON BALLISTIC PERFORMANCE OF BASALT FIBER REINFORCED VINYL ESTER RESIN

Li Yingjian, Jin Ziming, Li Hua, Wu Chunzhi, Zhong Weihua

(CNGC Institute 53, Jinan 250031, China)

ABSTRACT A new kind of fiber reinforced composite was prepared by using continuous basalt fiber as reinforcing agent and vinyl ester resin as matrix. By analyzing the relationship between the ballistic performances and composite structural design factors, some key structural parameters such as fabric form, fabric area density, fiber diameter and fiber content were determined and the ballistic mechanism was analyzed.

KEYWORDS basalt fiber, vinyl ester resin, composite, ballistic performance, ballistic mechanism