

# 连续玄武岩纤维增强环氧树脂基复合材料 抗冲击性能研究

刘玉美

(滨州职业学院工业工程系, 滨州 256603)

**摘要** 制备了连续玄武岩纤维增强的环氧树脂基复合材料靶板, 并进行了抗冲击性能测试, 研究了影响其抗冲击性能的主要因素及抗冲击机理。结果表明, 表面处理会使复合材料抗冲击性能下降, 而降低织物面密度、提高纤维体积含量可以使复合材料抗冲击性能得到提高。复合材料靶板的主要能量吸收形式为靶板局部变形、分层和纤维拉伸、剪切断裂及纤维拔脱。

**关键词** 连续玄武岩纤维, 环氧树脂, 复合材料, 抗冲击性能

## Impact resistance properties of continuous basalt fiber reinforced epoxy resin composites

Liu Yumei

(Industry Engineering Department, Binzhou Vocational College, Binzhou 256603)

**Abstract** Continuous basalt fiber reinforced epoxy resin composites were prepared. The main influence factors and theories were studied by testing the impact resistance properties. The results showed that when the fiber has not been treated, it has lower fabric area density and when it had higher fiber content, it will have better impact resistance properties. Its main energy absorbed forms were the distortion and delamination of the target, the switching off and the pulling out of the fiber.

**Key words** continuous basalt fiber, epoxy resin, composite, impact resistance property

随着战争条件的不断改变, 满足现代战争需要的新型装甲防护材料不断被应用于武器系统的防护领域。纤维复合材料具有优良的物理机械性能, 其比强度和比模量高于金属材料, 抗声震疲劳性、减震性能也大大超过金属材料。此外该类材料还具有良好的动能吸收性, 且无“二次杀伤效应”, 因而具有良好的抗冲击性能<sup>[1-2]</sup>。更重要的是在抗冲击性能相当的情况下, 复合材料的质量较金属材料大大减轻, 从而使武器系统具有良好的机动性, 对于装甲车辆的轻量化具有重要意义<sup>[3]</sup>。

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, 熔融后通过铂铑合金拉丝漏板制成的<sup>[4]</sup>。它与玻璃纤维、芳纶纤维、高强聚乙烯纤维等相比具有独特的优点<sup>[5]</sup>: (1) 原料来源广泛, 成本低; (2) 突出的耐高温性能; (3) 耐酸碱腐蚀性能优异; (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<sup>[6]</sup>。本试验对基体树脂种类与含量、纤维织物结构以及纤维表面处理对玄武岩纤维复合材料抗冲击性能的影响进行了研究。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料和设备

主要原材料: 连续玄武岩纤维, 7 $\mu$ m, 上海俄金玄武岩纤维有限公司; 环氧乙烯基树脂, Arotech7121, 济南扬程实业有限公司; 硅烷偶联剂, KH550, 南京立派化工有限公司。

主要设备仪器: DSC-1 缠绕机, 哈尔滨玻璃钢研究所生产; YX-100 压力成型机, 上海伟力机械厂制造; QUANTA200 型扫描电子显微镜, 美国 FEI 公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 纤维表面处理

将 KH550 处理剂配成浓度为 2% 的水溶液, 将连续玄武岩纤维放入处理剂溶液中浸泡, 至规定时间后取出放入真空烘箱, 在 80 $^{\circ}$ C 下真空加热 30min 除去溶剂, 再在 110 $^{\circ}$ C 下反应 90min。

#### 1.2.2 靶板制备

纤维在缠绕机上完成预浸料制备。将预浸料放在模具里, 升温至 140 $^{\circ}$ C, 在 5MPa 压力下固化成型为玄武岩纤维复合材料靶板。

#### 1.2.3 $v_{50}$ 测试和比吸能计算

$v_{50}$  弹道极限速度是评估材料抗冲击性能的一个重要指标<sup>[7]</sup>。 $v_{50}$  的计算公式:

$$v_{50} = \sqrt{v_s^2 - v_f^2} \quad (1)$$

式中,  $m$  为弹体质量,  $v_s$ 、 $v_f$  分别为弹体入靶速度和出靶

作者简介: 刘玉美(1966-), 女, 副教授, 工学硕士学位, 主要研究方向: 工程材料、数控加工。

速度。

比吸能性是靶板吸收能量与靶板面密度之比,其计算公式为:

$$Sea = m v_{50}^2 / 2 s \quad (2)$$

式中,Sea - 靶板比吸能; m - 入射弹丸质量; s - 靶板面密度。

本试验采用 7.62mm 53 式弹道枪,使用 1.1g 碎片模拟弹进行  $v_{50}$  和比吸能性的测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 纤维表面处理对复合材料抗冲击性能的影响

在 KH550 处理剂中的双官能团可以分别与玄武岩纤维及环氧树脂进行反应。纤维经过表面处理以后,与基体材料的结合状况会得到加强,从而影响到复合材料的抗冲击性能。纤维经过表面处理以后所制备的复合材料抗冲击性能如表 1 所示,图 1 为靶板断口的 SEM 照片。

表 1 表面处理对连续玄武岩纤维复合材料抗冲击性能的影响

处理工艺	处理时间 / min	靶板面密度 / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$V_{50}$ / ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	比吸能性 / ( $\text{J} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )
不处理	—	20.1	833.1	19.0
KH550	30	20.2	804.5	17.6
	60	20.2	809.3	17.8

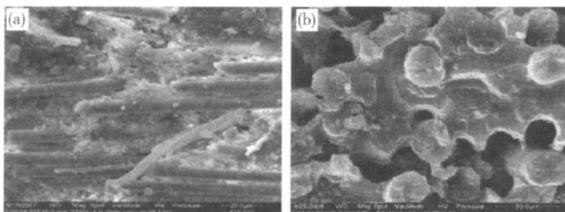


图 1 靶板断口的 SEM 照片  
(a - 未处理; b - KH550 处理)

从表 1 可以看到,用处理剂对纤维表面进行处理以后,抗冲击性能有所下降,而处理时间对其抗冲击性能影响不十分明显。从图 1 可以发现,未经表面处理的纤维复合材料在受到弹丸冲击作用时,靶板断口处的纤维会从基体中发生“拔脱”现象,“拔脱”出的纤维表面仍然带有少量的树脂,这种“拔脱”可以消耗弹丸的冲击能量。而纤维经过表面处理以后,纤维与基体材料的结合力大大增强,在弹丸的瞬时冲击作用下,纤维只是在靶板断口处发生断裂,这使得复合材料可以吸收弹丸冲击能量减少,因而抗冲击性能下降。此外由于表面处理剂与纤维表面和基体树脂之间均为化学连接,在化学反应达到平衡以后,延长处理时间对于处理效果的影响较小,因此对其抗冲击性能的影响也就较小。

### 2.2 织物面密度对复合材料抗冲击性能的影响

在靶板厚度一定的情况下,随着织物面密度的减少,复合材料的铺层层数会增加,对复合材料的抗冲击性能有很大影响,如图 2 所示。

从图 2 可以看到,随着织物面密度的增加,复合材料的抗

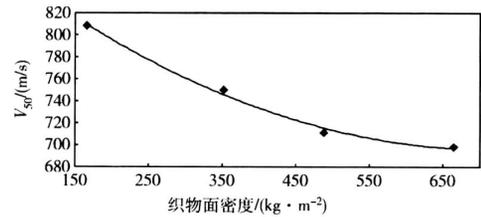


图 2 织物面密度对复合材料抗冲击性能的影响

冲击性能呈现下降趋势。这主要是由于当织物面密度较小时,在相同厚度条件下复合材料的铺层层数较多。在受到弹丸冲击作用时,由于同一弹丸所产生的冲击波的传播速率是一定的,因此在同一时间段内会有较多的纤维参与对弹丸冲击能量的吸收,同时由于铺层层数的增加,使得冲击波在各层之间的反射次数增多,衰减作用加大,因而复合材料的抗冲击性能也就较高。

### 2.3 纤维体积含量对复合材料抗冲击性能的影响

纤维为复合材料的主要增强相,因此纤维体积含量对于复合材料的抗冲击性能有很大影响。不同纤维体积含量下复合材料的抗冲击性能结果如图 3 所示。

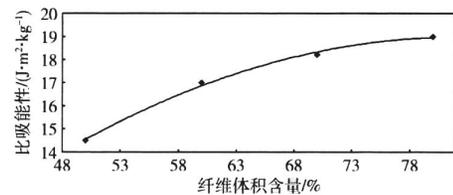


图 3 纤维体积含量对复合材料抗冲击性能的影响

从图 3 可以看到,随着纤维体积含量增加,复合材料的抗冲击性能也增大。这主要是由于纤维体积含量增加使得纤维之间的协同作用增强,弹丸的冲击作用可以同时由更多的纤维来分担,从而使得抗冲击性能增加。

### 2.4 连续玄武岩纤维复合材料抗冲击机理

弹丸对连续玄武岩纤维复合材料板的冲击损伤如图 4 所示。弹体进入一侧有整齐的纤维断头。弹体未穿透靶板时,靶板背面有较大的鼓包,靶板沿厚度方向的后半部分出现明显分层,靶板最外层被撕起一些小窄条,弹体射出面有明显弹孔。

根据弹体侵彻复合材料靶板的现象及图 1 靶板断口的 SEM 照片可以看出,弹体侵彻过程较复杂。当弹体击中靶板时,靶板表面的纤维首先由于受到剪切力的作用而断裂。此后由于弹体的冲击作用而在靶板内部产生张力波,张力波以两个方向向外传播。一是张力波以连续的脉冲沿纤维的轴向传播,先受到冲击的纤维与别的纤维通过基体树脂及交错点的相互作用,在很多纤维上扩散开来,能量在相当大的面积上被吸收;二是张力波沿靶板纵向传播。张力波在靶板的织物和基体树脂界面及靶板自由面之间产生连续反射,使压应力变为拉应力,当拉应力值大于纤维和基体树脂之间的粘接强度时,导致靶板分层,吸收弹体部分能量。由于纤维和基体材

(下转第 91 页)

### 3 结论

在鼓泡式反应柱中反应,以生物柴油副产物甘油为原料,丙酸和氯乙酸为复合催化剂,HCl 气体为氯化剂,催化氯化制备二氯丙醇。考察了氯化反应温度、催化剂量、复合催化剂、不同浓度生物甘油对二氯丙醇收率的影响。氯化反应在氯化温度 110 ,复合催化剂量为甘油质量的 3%,原料纯度大于 40%,反应 10~15h 后,二氯丙醇收率达 90% 以上。

#### 参考文献

- [1] 2008 年中国生物柴油市场研究报告[M]. 54.  
 [2] Conneman J Fischer. 生物柴油及其对甘油的影响[J]. 日用化学工业信息, 2002, (11):5.  
 [3] 帕维尔·库比切克,彼得·斯拉德切克,伊万娜·布日乔娃. 从甘油中制备二氯丙醇的方法[P]. CN1845888A, 2006.  
 [4] 菲利普·克拉夫特,克里斯蒂安·弗兰克,等. 通过甘油的氯化

制备二氯丙醇[P]. CN101068761A, 2007.

- [5] 许玉梅,丁克鸿,等. 一种甘油催化氯化制备二氯丙醇的方法[P]. CN101029000A, 2007.  
 [6] 单玉华,韩蕾,等. 一种从甘油制备二氯丙醇的方法[P]. CN101007751A, 2007.  
 [7] 赵学娟,柏子龙. 甘油法制备环氧氯丙烷中间体二氯丙醇催化剂的研究[J]. 精细化工中间体, 2008, (7):34-36.  
 [8] 宗敏,蒋惠亮,方银军. 甘油氯化制备二氯丙醇工艺的研究[J]. 应用化工, 2008, (2):162-164.  
 [9] 刘创. 家用洗涤剂[M]. 北京:化学工业出版社, 2001, 221-223.  
 [10] 卢定强,凌岫泉,段柳,吴雅霜. 气相色谱法测定甘油氯化反应中的反应物和产物[J]. 中国科技论文在线.  
 [11] 巫淼鑫,邹国英,颜飞佳,张宝玲. 生物柴油副产物下层甘油液的组成分析及其分离[J]. 江苏工业学院学报, 2006, (1):22-24.

收稿日期:2008-08-05

(上接第 77 页)

料应变波速不同,在纤维与基体材料有适中的结合强度时,会导致纤维从基体材料中“拔脱”,纤维“拔脱”所做的功将吸收弹体的部分能量。随着弹体更深入侵入,纤维受到拉伸变形以及靶板局部变形,弹体的动能转化为纤维的弹性势能和靶板局部变形做的切向功。当纤维的应变大于其极限应变时,则纤维断裂。如果弹体仍具有多余的动能,则进一步侵入下一铺层,直至弹体动能完全被消耗。若靶板较薄,则被弹体穿透。通过以上分析可知,连续玄武岩纤维复合材料靶板受到弹体冲击作用时的能量吸收形式主要为靶板局部变形、分层和纤维拉伸、剪切断裂及纤维拔脱。

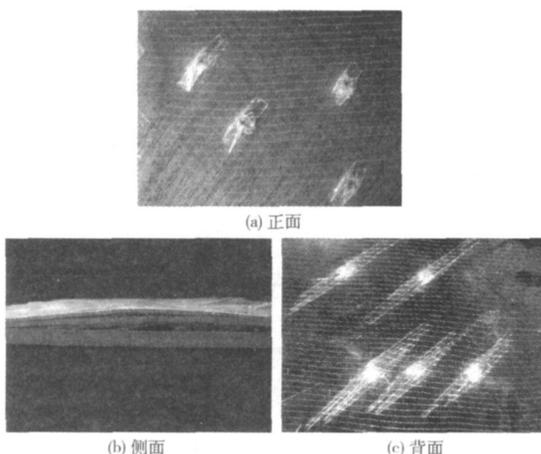


图4 弹丸对复合材料板的冲击损伤

### 3 结论

(1)对于连续玄武岩纤维增强的环氧树脂基复合材料,用

表面处理剂对纤维进行表面处理以后,纤维与环氧树脂之间的结合力增大,但复合材料的抗冲击性能反而下降,说明纤维与基体树脂间有适中的结合强度时复合材料会有较佳的抗冲击性能。

(2)织物面密度及纤维体积含量均会影响复合材料抗冲击性能的大小。在织物面密度较小,纤维体积含量较高时,复合材料会具有更优的抗冲击性能。

(3)弹丸对连续玄武岩纤维复合材料的冲击过程较为复杂,其冲击能量会通过复合材料靶板的局部变形、分层以及纤维拉伸、剪切断裂和纤维从基体树脂中“拔脱”而被吸收。

#### 参考文献

- [1] Abrate S. Impact on laminated composite materials[J]. Applied Mechanics Reviews, 1991, 44(4):155-189.  
 [2] Cantwell W J, Morton J. Comparison of the low and high velocity impact response of CFRP [J]. Composites, 1989, 20(6):545-551.  
 [3] Zhu G, Goldsmith W. Penetration of laminated Kevlar by projectiles experimental investigation [J]. Int J Solids Structure, 1992, 29(4):399-420.  
 [4] 王岚,等. 连续玄武岩纤维及其复合材料的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2000, (6):22-24.  
 [5] 黄根来,等. 玄武岩纤维及其复合材料基本力学性能实验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006, (1):24-27.  
 [6] 霍冀川,等. 玄武岩纤维的制备及其复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(5):382-385.  
 [7] 刘国权,等. 高强玻璃纤维复合材料抗冲击近似计算[J]. 纤维复合材料, 2001, 18(1):11-12.

收稿日期:2008-08-01