

玄武岩纤维增强树脂基复合材料力学性能研究*

Research on Mechanical Properties of Continuous Basalt Fiber Reinforced Resin Composites

中国兵器工业集团第五三研究所 郑志才 葛林海 陈艳 孙士祥 王强

[摘要] 玄武岩纤维作为一种新型的树脂基复合材料用高性能增强纤维,具有较好的性价比,通过对连续玄武岩增强环氧树脂复合材料单向板、织物复合材料层合板、缠绕 NOL 环、缠绕 $\phi 60\text{mm}$ 复合材料管的力学性能等研究,可为玄武岩纤维应用于结构复合材料提供设计依据。

关键词: 玄武岩纤维 复合材料 力学性能

[ABSTRACT] As a new type reinforcing fiber of resin-based composites, basalt fiber has high-performance and low cost, the mechanical properties of unidirectional and fabric composites laminates, winding NOL rings, $\phi 60\text{mm}$ compound tube are studied, the results can provide design basis to the application of basalt fiber in structure composites.

Keywords: Basalt fiber Composites Mechanical properties

玄武岩纤维(CBF)是以天然玄武岩矿石作为原料,通过铂铑合金拉丝漏板制成的连续纤维。玄武岩纤维具有一系列优异的性能^[1]:(1)较高的抗拉强度;(2)高的耐蚀性及高化学稳定性;(3)耐高温,可在 $-269\text{℃} \sim 650\text{℃}$ 范围内连续工作;(4)高隔热隔音性;(5)低吸湿性;(6)绝缘性好;(7)良好的透波性能等。

大力开发玄武岩纤维及其制品,具有很好的经济效益和社会效益。用连续玄武岩纤维增强的玻璃钢体的强度、热稳定性、电绝缘性能均优于玻璃纤维增强材料,可在很大程度上替代玻纤、碳纤维和石棉制品。玄武岩纤维在机械制造、航空、船舶、汽车、建材、石化和化学等领域均有很好的应用前景,因此近年来对玄武岩纤维的开发应用引起了很大的关注^[2-3]。

本文主要开展了玄武岩纤维复合材料用树脂基体、玄武岩纤维复合材料单向板、织物复合材料层合板、缠绕 NOL 环、缠绕 $\phi 60\text{mm}$ 复合材料管等研究^[4],并与高强玻璃纤维、无碱玻璃纤维等进行了比较,研究结果为玄武岩纤维结构复合材料的深入研究提供了参考。

1 试验部分

1.1 主要原材料

玄武岩纤维:线密度 400tex,横店集团上海俄金玄武岩纤维有限公司;

高强 -2 玻璃纤维:线密度 480tex,南京玻璃纤维研究院;

无碱玻璃纤维:线密度 480tex,南京玻璃纤维研究院;

玄武岩纤维织物: BW-100,横店集团上海俄金玄武岩纤维有限公司;

环氧树脂 E-51:环氧值为 0.51 eq/100g,蓝星新材料无锡树脂厂;

环氧树脂 TDE-85:环氧值为 0.85 eq/100g,蓝星新材料无锡树脂厂;

固化剂:自制;

丙酮:工业用。

1.2 主要设备、仪器

数控缠绕机:FWA1\5\1,德国 BSD 公司;

25t 平板硫化机:上海伟力机械厂;

电子拉力试验机: SINTECH2/DL,美国 MTS 公司;

液压伺服电子拉力试验机: Instron8032;

电动试压泵:4DY-30/40,海门试压泵厂。

1.3 试样制备

(1)树脂浇铸体制备。

将树脂、固化剂与促进剂按比例称量,混合、搅拌均匀后倒入打好蜡的金属模具中,然后将模具置入烘箱中,按确定的程序进行升温固化,自然冷却至室温,脱模机加工成标准试样。

(2)复合材料单向板制备。

采用辊筒法制备单向预浸料,晾置、裁剪、铺层,后置于模具中热压成型单向板,高压水切割制成试样。

(3)织物复合材料层合板制备。

·玄武岩纤维织物手工涂刷环氧树脂胶液制成预浸料,晾置、裁剪、铺层,后置于模具中热压成型层合板。

·将玄武岩纤维织物裁剪、铺叠后覆脱模布、导流网并密封于真空袋中,抽真空导入树脂制备层合板。

* 国防基础科研计划(D0920060327)。

(4) NOL 环制备。

用湿法缠绕成型玄武岩纤维复合材料 NOL 环,经固化、外表面加工、脱模即制得环形试样。

(5) $\phi 60\text{mm}$ 复合材料管制备。

按 GB/T5351-85 要求制备复合材料管用芯模,通过结构优化计算,确定缠绕角等工艺参数,湿法缠绕成型复合材料管,经固化、脱模即得所需的复合材料管。

2 结果与讨论

2.1 玄武岩纤维性能研究

本文首先对玄武岩纤维的力学性能研究,并与玻璃纤维性能进行了比较。结果见表 1。

表1 玄武岩纤维力学性能

规格	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /MPa	断裂延伸率 /%
CBF	2.11	77.4	2.9
高强 -2 玻纤	2.46	84.7	3.17
无碱玻纤	1.98	71.0	2.6

2.2 玄武岩纤维增强环氧树脂复合材料层合板性能研究

(1) 不同树脂基体玄武岩纤维复合材料层合板性能研究。

本文分别制备了玄武岩纤维复合材料单向层合板,性能如表 2 所示。

表2 不同树脂基体玄武岩纤维复合材料层合板性能

树脂基体	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa
MTER (0°)	1450	45.22
MTER (90°)	43.2	11.5
HTER (0°)	1540	52.8
HTER (90°)	41.2	12.4

注: MTER 为中温固化环氧树脂 / 双氰胺树脂体系, HTER 为高温固化环氧树脂 / 芳香胺树脂体系

从表 2 可以看出: 采用 HTER 作为玄武岩纤维复合材料的基体, 玄武岩纤维增强复合材料 0° 单向板拉伸强度、模量略高于 MTER, 对于 90° 板则影响不大, 说明 HTER 树脂与玄武岩纤维的匹配性更好, 更有利于玄武岩纤维复合材料性能的发挥。

(2) 不同纤维复合材料单向板力学性能比较。

表 3 为玄武岩纤维复合材料单向板与无碱玻纤单向板、高强 -2 玻纤单向板力学性能比较, 结果表明, 玄武岩纤维缠绕复合材料单向板力学性能低于高强 -2 玻璃纤维单向板性能而远高于无碱玻璃纤维。

(3) 不同干湿状态下玄武岩纤维单向板力学性能研究。

表3 玄武岩纤维复合材料单向板性能与玻璃纤维复合材料单向板性能比较

项目	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa	弯曲强度 /GPa	弯曲模量 /GPa	层间剪切强度 /MPa
0° CBF/环氧	1540	52.8	1.37	40.3	87.3
90° CBF/环氧	41.2	12.4	76.1	12.7	-
0° 无碱玻纤/环氧	810	31.5	1.00	36.5	72.5
0° 高强 -2 玻纤/环氧	1640	57.2	1.49	42.8	86.2

本文对不同干湿状态下玄武岩纤维单向板性能进行了研究, 研究结果见表 4。

表4 不同干湿状态下玄武岩纤维单向板力学性能

温度 /°C	湿度 /%RH	拉伸强度 /GPa	拉伸模量 /GPa	弯曲强度 /GPa	弯曲模量 /GPa	层间剪切强度 /MPa
25 ± 2	93 ± 3	1.29	50.55	1.6	52.48	92.08
60 ± 2	93 ± 3	1.31	52.73	1.52	48.32	97.05
25 ± 2	50 ± 3	1.54	52.8	1.37	40.3	87.3

在湿度相同的情况下, 温度对玄武岩纤维复合材料单向板的力学性能影响不大; 而同处于同一温度下, 湿度对玄武岩纤维复合材料单向板的力学性能则有较大的影响, 湿度越大, 则复合材料单向板的拉伸性能越低。

2.3 玄武岩纤维织物复合材料研究

针对玄武岩纤维制成的平纹织物分别采用预浸料铺层热压和真空灌注成型工艺制备了玄武岩纤维织物复合材料层合板, 其中预浸料铺层热压层合板工艺选用了适合于预浸料制备的中温固化环氧树脂 / 双氰胺树脂体系, 真空灌注成型工艺采用了低粘度适合于真空灌注的常温固化环氧树脂 / 脂肪胺树脂体系, 两种工艺成型的复合材料层合板性能如表 5 所示。

表5 玄武岩纤维织物复合材料性能

成型方式	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa	弯曲强度 /MPa	弯曲模量 /GPa
模压	529.6	32.8	709.2	31.8
真空灌注	436.25	31.22	588.6	29.62

从表 5 可以看出, 模压成型的玄武岩纤维复合材料层合板性能均优于真空灌注成型工艺。这主要是因为热压成型的层合板致密性、制品纤维含量较高所致。

2.4 玄武岩纤维缠绕复合材料研究

(1) 玄武岩纤维复合材料缠绕用树脂体系研究。

玄武岩纤维缠绕成型复合材料性能研究采用了高

温固化的多官能环氧/混合芳香胺/促进剂体系,其树脂浇铸体性能见表6。

表6 树脂浇铸体性能

项目	性能
拉伸强度 /MPa	89.7
拉伸模量 /GPa	3.77
断裂延伸率 /%	4.47
弯曲强度 /MPa	121
弯曲模量 /GPa	3.98
压缩强度 /MPa	146
压缩模量 /GPa	4.56

(2)玄武岩纤维缠绕复合材料 NOL 环性能研究。

对玄武岩纤维复合材料 NOL 环力学性能进行了研究,并与高强-2 玻璃纤维缠绕复合材料 NOL 环性能进行了比较。NOL 环性能试验结果如表7。

表7 玄武岩纤维与高强-2玻纤复合材料NOL环性能比较

项目	拉伸强度 / GPa	拉伸模量 /GPa	层间剪切强度 /MPa
CBF/ 环氧	1.42	77.4	70.2
高强-2 玻纤 / 环氧	1.67	77.5	66.1
无碱玻纤 / 环氧	1.33	65.2	50.7

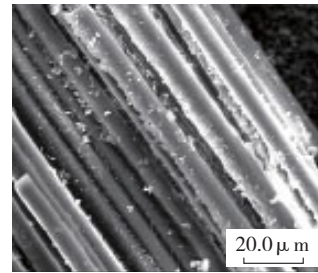
从玄武岩纤维与高强-2 玻纤 NOL 环拉伸性能比较可知,玄武岩纤维缠绕复合材料 NOL 环拉伸强度高于无碱玻璃纤维而略低于高强-2 玻璃纤维缠绕复合材料 NOL 环拉伸强度。

对玄武岩纤维复合材料 NOL 环拉伸试样断面、层间剪切切面进行了 SEM 分析,如图1、2所示。从图1、2可以看出,复合材料破坏后纤维表面粘满树脂并仍保持连续相状态,且纤维分布均匀,没有明显的贫胶区和富胶区出现;此外,玄武岩纤维表面的 Si-O、Fe-O、Al-O 键以及其固有的羟基与环氧树脂体系中的羟基、醚键结合形成氢键,使得二者之间具有较强化学键作用力,因此玄武岩纤维与树脂基体具有很好的浸润性。结合复合材料层间剪切强度来看,玄武岩纤维与环氧树脂比玻璃纤维具有更好的匹配性。玄武岩纤维具有良好的增强效应及与环氧树脂体系较好的粘接性能。

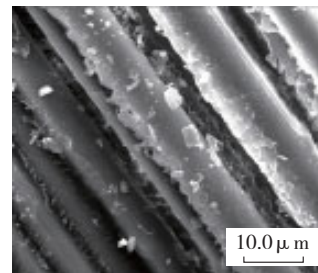
(3)玄武岩纤维缠绕 ϕ 60mm 复合材料管性能研究。

为了进一步考察玄武岩纤维综合性能,进行了玄武岩纤维复合材料 ϕ 60mm 管水压失效试验研究。通过结构优化计算,确定缠绕角为 45° , 3 层环向,6 层纵向,成型了玄武岩纤维、高强-2 玻璃纤维、无碱玻璃纤维、

T-700 碳纤维 ϕ 60mm 复合材料管试验件并进行了水压试验,试验结果见表8。图3为玄武岩纤维复合材料、

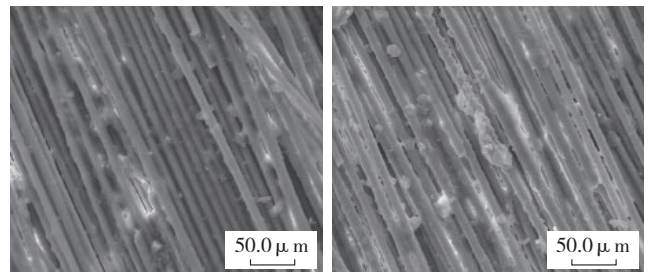


(a) 试样 A



(b) 试样 B

图1 玄武岩纤维复合材料NOL环拉伸断面SEM照片
Fig.1 Tensile section SEM of NOL ring



(a) 试样 A

(b) 试样 B

图2 玄武岩纤维复合材料NOL环层间剪切切面SEM照片
Fig.2 Interbedded shear section SEM of NOL ring

表8 玄武岩纤维复合材料管试样水压试验结果

项目	外径 /mm	厚度 /mm	破坏压力 /MPa	最大环向应力 /MPa	破坏形式
CBFC-1	65.4	2.45	29.0	372.6	筒身破坏
CBFC-2	65.46	2.63	31.5	376.3	筒身破坏
SGC-1	65.9	2.7	37.0	433.0	筒身破坏
SGC-2	65.56	2.68	35.0	410.6	筒身破坏
EGC-1	65.0	2.4	28	365.2	筒身破坏
EGC-2	65.4	2.45	28	359.7	筒身破坏
CFC-1	65.6	2.70	47.0	547.5	筒身破坏
CFC-2	65.7	2.60	47.5	576.4	筒身破坏

注:CBFC为玄武岩纤维复合材料,SGC为高强-2玻璃纤维复合材料,CFC为碳纤维复合材料,EGC为无碱玻璃纤维复合材料。

(下转第72页)

等。初步设计人员根据概念阶段产生的设计说明书,进行优化结构设计、初步选择材料、确定最优参数值等决策,主要考虑材料成本信息、绿色材料的选取、材料质量冲突的削减办法和材料质量约束信息等。详细设计人员则根据产品设计草图、组件说明书及相应的注释进行计算主要参数、选择材料、确定主要结构、技术要求等决策,主要考虑材料质量成本计算方法和材料质量检验信息等。工艺设计人员根据详细设计阶段提供的设计总图进行选择加工方法、加工顺序、工夹具选择等决策,该阶段主要需要信息有工艺信息和材料能力信息等。

产品与工艺设计决策中,都需要考虑到 ISO-9000 质量标准、国标、部标以及企业质量标准。各设计阶段需求的制造质量信息既有继承又有差异,如概念设计、详细设计、工艺设计都需要制造质量标准,但是不同阶段对制造质量标准的需求又存在差异,概念设计需要从整体水平了解企业所能达到的制造质量水平;详细设计需考虑到材料加工能达到的几何公差、精度等;工艺设计则需考虑设计实际材料能否达到加工要求等。在设计过程中同样需要面向设计质量方法如质量功能配置(Quality Function Deployment, QFD)/故障分析(Failure Analyze, FA)、材料知识、成组技术、制造工艺知识等知识、技术、方法的支持,在此基础上,设计人员在根据有关材料信息进行有关质量设计决策,就能有效保证设计决策各阶段质量目标在制造阶段得以实现,从而达到设计与制造真正并行。

4 结束语

材料信息可以有效地支持质量设计决策,首先,在深入分析设计各阶段决策对材料信息需求的基础上,建立设计决策支持的材料信息需求框架。接着,对设计者利用信息研究中信息表示这一“瓶颈”问题,提出了基于 XML 的材料信息表示模型,有效解决信息与异构系统集成问题,方便设计者获取。最后,采用 IDEFO 方法建立设计决策支持的材料信息模型。本文为设计决策支持的材料质量管理提供了有益的指导。

参 考 文 献

- [1] Ramana K V, Rao P V M. Data and knowledge modeling for design-process planning of sheet metal components. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2004, 15: 607-623.
- [2] 谢来勇, 郝永平, 张秉权. 基于 XML 的产品信息模型表示及应用. *计算机集成制造系统*, 2004, 10(12): 1492-1496.
- [3] 陈廷斌, 孙福权. 面向信息挖掘的 XML 知识表示方法研究. *计算机工程与应用*, 2006, 9: 161-165.
- [4] 郁鼎文, 陈肯. 现代制造技术. 北京: 清华大学出版社: 2006.

(责编 晓立)

(上接第 68 页)



图3 玄武岩纤维复合材料管、高强-2纤维复合材料管及无碱纤维复合材料管破坏形貌
Fig.3 Destroy morphology of CBFC, SGC and EGC tubes

高强-2 玻璃纤维复合材料、无碱玻璃纤维复合材料管水压试验破坏形貌照片。

从表 8 及图 3 可知,玄武岩纤维缠绕复合材料 $\phi 60\text{mm}$ 管性能略高于无碱玻璃纤维,低于高强-2 玻璃纤维,且破坏部位均位于筒身段,且均为环向破坏。

3 结论

- (1) 玄武岩纤维与目前常用的环氧树脂基体有良好的浸润性和界面粘接性能;
- (2) 玄武岩纤维增强的环氧复合材料有较高的力学性能,其主要力学性能优于无碱玻璃纤维复合材料、略低于高强玻璃纤维复合材料,有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 石钱华. 国外连续玄武岩纤维的发展及其应用. *玻璃纤维*, 2003(4): 27-31.
- [2] 徐磊. 新型的高性能纤维——玄武岩纤维的应用. *新纺织*, 2005(9/10): 15-17.
- [3] 胡显奇, 申屠年. 连续玄武岩纤维在军工及民用领域的应用. *高科技纤维与应用*, 2005(12): 8-13.
- [4] 黄根来, 孙志杰, 王明超, 等. 玄武岩纤维及其复合材料基本力学性能实验研究. *玻璃钢/复合材料*, 2006(1): 24-26.

(责编 晓立)