盐碱环境下玄武岩纤维增强复合材料力学性能试验

金登辉[1] 高嘉欣[1] 高志刚[2,3,*] 贺 涛[2] 林 琦[1]
官 强[1] 张程华[2] 秦 卿[2]

（1.西安西电新能源有限公司，西安 710061；2.西安科技大学建筑与土木工程学院，西安 710054；
3.陕西西科华研建设工程有限公司，西安 710054）

摘 要 随着光伏项目向盐碱地等严苛环境拓展，传统金属支架因易腐蚀难以满足需求，玄武岩纤维复合材料（BFRP）凭借其优良性能成为潜在替代材料。本文通过模拟pH=10、12的盐碱环境，研究BFRP的力学性能退化规律及微观机理。试验采用双向编织BFRP试件，通过拉伸试验和扫描电镜（SEM）分析，对比不同腐蚀时间（30 d、60 d）下的抗拉强度、微观形貌及破坏模式。结果表明：在弱碱性环境（pH=10）中，BFRP抗拉强度腐蚀60 d后下降4.84%，表面仅出现微米级裂纹；中等碱性环境（pH=12）下，界面部分剥离，强度下降5.62%；微观显示纤维断裂为短节状，基体粉化。微观现象表明，碱性离子（OH^-）通过化学键断裂（如Si-O-Si、Al-O-Si水解）及界面脱粘引发退化。

关键词 玄武岩纤维复合材料，拉伸试验，盐碱环境，微观分析

中图分类号：TU599 **文献标志码**：A **DOI**：10.15935/j.cnki.jggcs.202604.0015

Experimental Study on Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Composites in Saline-Alkali Environment

JIN Denghui[1] GAO Jiaxin[1] GAO Zhigang[2,3,*] HE Tao[2] LIN Qi[1]
GUAN Qiang[1] ZHANG Chenghua[2] QIN Qing[2]

（1.Xi′an Xidian New Energy Co., Ltd., Xi′an 710061, China; 2.School of Architecture and Civil Engineering,
Xi′an University of Science and Technology, Xi′an 710054, China;
3.Shaanxi Xike Huayan Construction Engineering Co.,Ltd., Xi′an 710054, China）

Abstract With the expansion of photovoltaic projects to harsh environments such as saline-alkali land, traditional metal supports are difficult to meet the demand due to easy corrosion. Basalt fiber reinforced polymer (BFRP) has become a potential alternative material due to its excellent properties. In this paper, the degradation law of mechanical properties of BFRP and its microscopic mechanism were studied by simulating the saline-alkali environment of pH=10 and 12. Bidirectional braided BFRP specimens were used in the test. The tensile strength, microstructure and failure mode of different corrosion time (30 days, 60 days) were compared by tensile test and scanning electron microscope (SEM) analysis. The results showed that in the weak alkaline environment (pH=10), the tensile strength of BFRP decreased by 4.84% after 60 days of corrosion, and only micron cracks appeared on the surface. In the medium alkaline environment (pH=12), the interface was partially peeled off, and the strength decreased by 5.62%. Microscopically, the fiber fracture was short-segmented and the matrix was pulverized. Microscopic phenomena showed that alkaline ions (OH^-)

收稿日期：2025-07-03

作者简介：金登辉，男，高级工程师，主要研究方向为电气工程/新能源。E-mail：jindenghui@xd.cee-group.cn

[*] **联系作者**：高志刚，男，副教授，主要研究方向为既有建筑结构加固与改造、复合材料耐久性能。E-mail：gaozhigang@xust.edu.cn

caused degradation through chemical bond cleavage (such as Si-O-Si, Al-O-Si hydrolysis) and interfacial debonding.

Keywords basalt fiber composite material, tensile test, saline-alkali environment, microscopic analysis

0 引 言

随着光伏项目的数量急剧增加,土地资源紧张的问题逐渐显现,适合用于光伏项目开发的土地越来越少。因此,新的光伏项目不得不转向更为复杂的地理环境,如西北地区,其土地面积广阔,人口密度相对较低,较为适合光伏项目选址,但其严酷的自然环境(盐碱地及大型化工厂等)又对光伏支架提出更高的要求,传统的金属支架材料(如钢材和铝合金)虽然具有较高的强度,但在腐蚀性环境中容易发生锈蚀和氧化,导致结构性能下降甚至失效。BFRP具有更优异的耐高温性和耐碱腐蚀性,能更好地适应盐碱地等恶劣环境;与碳纤维复合材料相比,它在保持相近拉伸强度的同时,成本显著降低且为绝缘材料,避免了电化学腐蚀风险;而与芳纶纤维复合材料相比,BFRP在耐紫外光和耐碱性方面表现更为出色,更适合长期户外使用。因此,BFRP在性能、耐久性和经济性之间实现了最佳平衡[1-4]。

盐碱地是一种特殊的土壤环境,其pH值通常较高,形成了极端碱性环境。这种环境对材料的腐蚀性极强,尤其是对传统金属材料(如钢材)和部分复合材料(如玻璃纤维增强复合材料)具有显著的破坏作用,盐碱地中的高浓度氢氧根离子会侵蚀玻璃纤维的硅氧网络骨架,同时催化水解树脂基体的分子链,并破坏纤维与树脂间的界面粘结,从而导致材料力学性能的不可逆劣化。同时,玄武岩纤维复合材料(BFRP)在极端碱性环境中的性能表现引起了广泛关注。江迪[5]通过制备BFRP试件研究BFRP在酸碱、硫酸钠和氯化钠复合盐特殊环境下的耐久性能,分析了BFRP在特殊环境下的力学性能变化规律。张文斌等[6]研究了在玄武岩纤维体积掺量分别为0.1%、0.2%、0.3%,长度分别为6、12、18 mm条件下,试件的抗压强度、劈裂抗拉强度及破坏模式。高杰[7]有针对性地分析了玄武岩纤维在酸碱及相对湿度环境下的腐蚀性,通过SEM、EDS、ICP、FTIR等分析其力学性能变化规律。霍文静等[8]研究了国产BF-CSH-01玄武岩纤维在80 ℃情况下,BF-CSH-01在盐酸和氢氧化钠腐蚀相同周期之后的质量和强度的变化。黄根来等[9]通过将玄武岩纤维及其复合材料在蒸馏水以及酸碱溶液中煮沸一段时间来考察玄武岩纤维的质量和强度变化情况。魏斌[10]研究了玄武岩纤维和玻璃纤维经过酸与碱处理后的性能变化情况,结果表明玄武岩纤维耐碱性强于玻璃纤维。朱莹等[11]为探讨玄武岩纤维复合材料片材在各种腐蚀溶液环境下的耐久性,对BFRP片材在碱、酸和盐溶液及水环境中的耐腐蚀性能进行了试验研究。Sim等[12]研究了玄武岩纤维在碱性条件下的质量变化情况,结果表明玄武岩纤维经过碱处理30 d后质量下降将近一半。Xiao等[13]的研究表明BFRP试件在碱溶液中浸泡过后质量减小,在水溶液中浸泡过后质量增加,BFRP试件在水溶液和碱溶液中浸泡过后拉伸和弯曲强度都随着浸泡时间增加而减小,而且碱溶液中的BFRP试件强度比在水溶液中下降得幅度更大。目前国内外关于玄武岩纤维复合材料在各个环境因素影响下性能的研究大都局限于某一单一环境因素,如酸、碱、盐等环境,而实际环境是复杂多因素共同作用的。

本文旨在研究BFRP材料在固定5%氯盐浓度背景下,不同pH值环境对BFRP板材的协同劣化效应,重点分析其力学性能的变化规律。通过模拟不同的盐碱性环境(如pH=10、12的盐碱地环境),对BFRP材料进行腐蚀试验,观察其外观形态变化和破坏模式,并测试其抗拉强度等力学性能参数。通过对比不同腐蚀时间和腐蚀环境下的力学性能变化,并通过微观试验,揭示BFRP材料在碱性环境中的退化机理,为其在实际工程中的应用提供理论依据和技术支持。

1 试验

1.1 试件设计

为研究玄武岩纤维复合材料在盐碱条件下的腐蚀性能,设计了3组试验组,试件信息如表1所示。

表 1　试件信息

Table 1　Test specimens

环境	试件个数
未腐蚀对照组	6
5%NaCl pH=10盐碱环境	12
5%NaCl pH=12盐碱环境	12
合计	30

本试验材料采用双向编制的四川帕沃克矿物纤维制品有限公司生产的玄武岩纤维复合材料。长度为250 mm，宽度为25 mm，厚度为4 mm。在试件两端采用硬铝加强片，厚度选用2 mm，上下两侧各一片，长度为50 mm，宽度为25 mm，如图1所示。

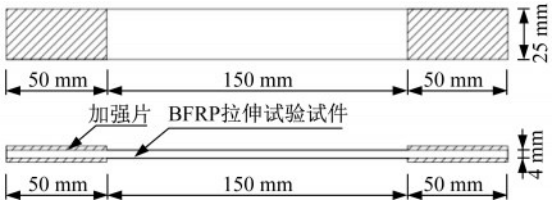


图1　玄武岩纤维复合材料拉伸试件示意图

Fig.1　Basalt fiber composite tensile specimen schematic diagram

1.2　腐蚀方案

盐碱性条件下的玄武岩纤维复合材料腐蚀试验中，温度作为不变量，试验温度恒定为25 ℃，配置各个浓度的氢氧化钠及氯化钠溶液，配好的溶液倒入耐腐蚀的聚丙烯塑料盒中，将试件放入，用聚氯乙烯膜密封以隔绝空气，防止氢氧化钠溶液挥发导致氢氧化钠浓度在试验过程中出现变化，如图2所示。



图2　腐蚀示意图

Fig.2　Corrosion schematic diagram

腐蚀时间定为2个月，每间隔一个月取出5个拉伸试件和1个微观试件。具体腐蚀方案见表2。

表 2　盐碱性条件下腐蚀试件信息

Table 2　Specimens under saline-alkali corrosion conditions

试件编号	试件尺寸/mm	溶液浓度	试验时间/d	试件个数
D0	250×25×4	0	0	6
D1		pH=10 5%NaCl	30	6
D2			60	6
D3		pH=12 5%NaCl	30	6
D4			60	6
合计		/	/	30

1.3　测试方案

1.3.1　拉伸试验

本文试验采用的设备是HJT系列A型电液伺服疲劳试验机（如图3所示）。拉伸试验是一种测定材料受轴向拉伸载荷下性能的试验方法，是研究材料机械性能试验的基本方法，主要用于测试材料是否满足规定的技术标准和判定材料的性能优劣。



图3　HJT系列A型电液伺服疲劳试验机

Fig.3　HJT series A-type electro-hydraulic servo fatigue testing machine

按照《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》（GB/T 1447—2005）中关于加强片的粘贴方法，在试件两端的合适位置粘贴加强片。试验机的加载速度选取2 mm/min，采用连续加载。测定、记录试件的拉伸强度、拉伸弹性模量、断裂伸长率。

1.3.2　微观试验

试验所用的玄武岩纤维复合材料试件中，玄武岩纤维含量约为70%，其余接近30%都为环氧树脂，仅对其进行宏观力学性能试验所得结果不足以分析环境因子对玄武岩纤维复合材料的影响机理。故需对玄武岩纤维复合材料开展碱环境下的微观损伤分析，并结合宏观力学性能试验结果研究BFRP微观结构类型及其劣化机理。

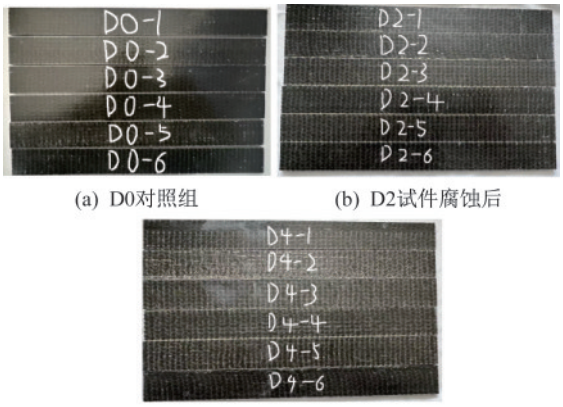
本试验材料采用四川帕沃克矿物纤维制品有

限公司生产的玄武岩纤维复合材料，对经过盐碱腐蚀后的BFRP试件进行取样，每组试件取一个，进行SEM电镜扫描，进而研究BFRP断面破坏情况。

2 试验结果及分析

2.1 腐蚀现象

玄武岩纤维复合材料在不同盐碱溶液中腐蚀损伤后的外观如图4所示。



(a) D0对照组 (b) D2试件腐蚀后

(c) D4试件腐蚀后

图4 试件腐蚀损伤后外观

Fig.4 Appearance of specimens after corrosion damage

明显可以看到腐蚀后与未腐蚀前的试件相比表面变得粗糙且随着pH值的提高，其表面逐渐出现白色。随着浸泡时间与pH值的升高其表面白色会越发明显。

2.2 拉伸现象

玄武岩纤维复合材料试件的拉伸破坏结果如图5所示。

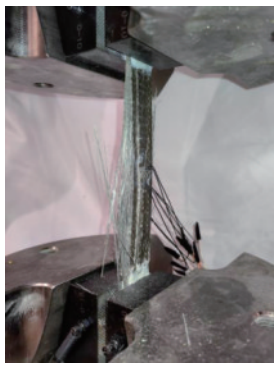


图5 BFRP拉伸试验结果

Fig.5 Tensile test results of basalt fiber composites

在单调递增拉伸荷载作用下，玄武岩纤维复合材料呈现出典型的阶段性损伤演化与最终脆性断裂行为。在加载初期（约为极限承载力的30%~40%），试件表面未出现可见变形，荷载-位移曲线呈线性增长，表明材料处于理想的线弹性工作阶段，纤维与树脂基体协同变形，共同承担外载。随着荷载进一步增加至极限承载力的60%~70%，材料进入弹塑性过渡阶段，此时纤维交织区域因局部应力集中逐渐出现泛白现象，反映出基体内部微裂纹的萌生及其与纤维界面区域的初期脱粘，尽管损伤开始积累，试件整体仍具备持续承载能力。至加载后期（约为极限承载力的90%~95%），损伤进入非稳定扩展阶段，原有分散的泛白区域迅速扩展并相互贯通，形成连续的宏观损伤带，伴随纤维断裂所发出的清脆声响，试件最终发生炸散式脆性断裂，断口形貌清晰显示纤维从基体中被拔出，其表面树脂覆盖层大面积剥落，表现出典型的界面失效特征，材料彻底丧失承载能力。

2.3 抗拉强度分析

试件在经过盐碱环境腐蚀后，每组5个试件均进行标准条件下的拉伸试验，分别绘制荷载-位移曲线，如图6所示。

根据图6的荷载-位移曲线分析，对照组试件D0（未腐蚀）表现出高刚度和线性增长特性，荷载随位移稳定上升且斜率最大，破坏位移较小，表明纤维与基体界面结合紧密、荷载高效传递；pH=10环境下，腐蚀1个月的试件D1峰值荷载较对照组略有下降，位移减小，曲线初始刚度略有降低，表明纤维与基体界面弱化，微裂纹开始萌生；腐蚀2个月后，试件D2峰值荷载进一步下降，曲线下降段趋于陡峭，能量耗散能力显著降低，说明长期盐碱侵蚀加剧了界面剥离和纤维损伤，材料脆性特征逐渐显现。pH=12的高碱性环境对性能的破坏更为显著：腐蚀1个月的试件D3最大荷载下降4.58%，刚度损失明显（曲线初始斜率降低约30%），曲线在峰值后迅速跌落，表明强碱性条件加速了玄武岩纤维的化学腐蚀，同时基体胶凝材料可能发生碱硅反应，导致内部孔隙率增大；腐蚀2个月后，试件D4峰值荷载进一步下降5.62%，极限位移不足3 mm，破坏模式完全转为脆性断裂，曲线呈现“断崖式”下降，验证了高pH环境与长期

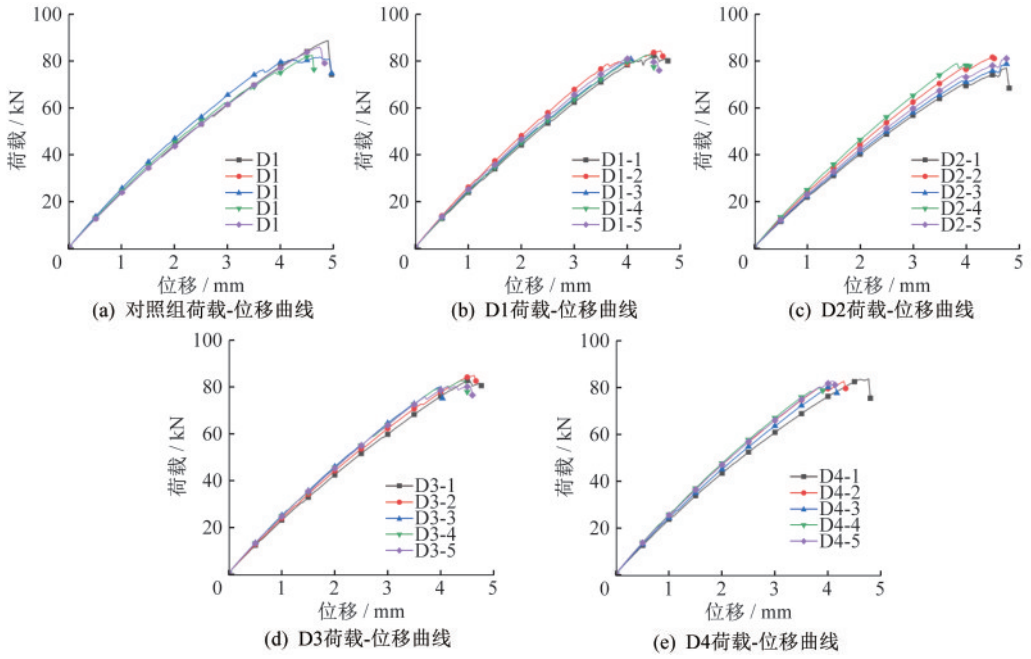


图6　BFRP试件盐碱腐蚀荷载-位移曲线图

Fig.6　Load-displacement curves of BFRP specimens at different stages of ultraviolet aging

老化对材料整体性的协同破坏效应。此外，pH=12组的荷载-位移数据离散性（如标准差增大）显著高于其他组，推测因碱性腐蚀的不均匀性导致局部纤维束优先失效，加剧了性能波动。

表3　BFRP腐蚀各个阶段基本力学性能测试平均值

Table 3　Average mechanical properties of BFRP at different corrosion stages

试件编号	抗拉强度平均值/MPa	下降率	弹性模量平均值/MPa	下降率	断裂伸长率平均值/%	下降率
D0	801.52		30736.32		3.32	
D1	767.33	4.27%	30267.00	1.53	3.30	0.60
D2	762.76	4.84%	29859.29	2.85	3.27	1.51
D3	764.83	4.58%	29548.47	3.86	2.96	10.84
D4	759.50	5.62%	29257.21	4.81	2.88	13.25

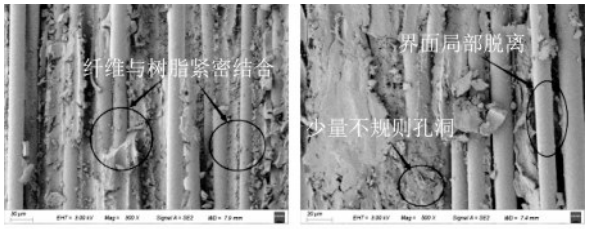
由表3可以看出，在pH=10环境中，老化1个月和2个月的抗拉强度分别下降4.27%和4.84%，弹性模量下降1.53%和2.85%，断裂伸长率降幅较小（0.60%~1.51%），表明短期老化对延展性影响有限；而在pH=12的高碱环境中，老化1个月和2个月的抗拉强度下降率增至4.58%和5.62%，弹性模量下降率升至3.86%和4.81%，断裂伸长率则急剧恶化，降幅达10.84%和13.25%，说明碱性增强显著加速材料脆化。此外，时间延长对性能衰减具有累积效应，同一pH下老化2个月的抗拉强度与弹性模量下降率均高于1个月，且高pH环境下断裂伸长率的时间敏感性更强。

3　微观形貌及劣化机理分析

通过扫描电子显微镜对盐碱环境浸泡后的试件微观形貌进行分析，结合不同pH值（pH=10、pH=12）及浸泡时间（1个月、2个月）的对比分析，深入探讨其劣化机理。

在pH=10环境中浸泡1个月后，试件表面呈现轻微腐蚀特征[图7(a)]。纤维表面局部出现纳米级裂纹（宽度为50~100 nm），但整体形貌仍保持连续。基体与纤维界面结合较为紧密，未观察到明显脱粘现象。浸泡时间延长至2个月后，纤维表面裂纹扩展为微米级（宽度为1~2 μm），部分区域形成不规则孔洞[图7(b)]。界面处出现局部脱粘（脱粘长度为5~10 μm）。

由于pH=10环境下OH^-浓度较低，反应速率较慢，腐蚀主要局限于表面，未深入纤维内部。浸泡2个月后，OH^-对纤维的化学侵蚀加剧。界面脱粘则归因于基体树脂的溶胀与纤维表面羟基化



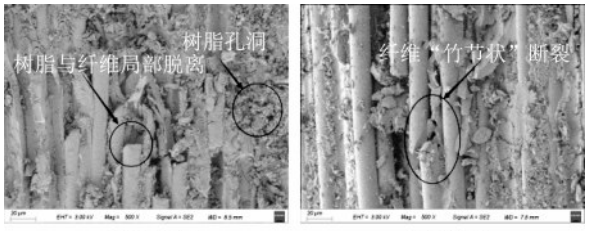
(a) 1个月 (b) 2个月

图7 pH=10盐碱环境下的电镜扫描图

Fig.7 Scanning electron microscopy of pH=10 saline-alkali environment

(-OH)导致的界面结合能降低。

pH=12环境中浸泡1个月后,纤维表面粗糙度显著增加,纵向裂纹长度达10~20 μm[图8(a)]。基体局部出现直径3~5 μm的孔洞,界面处可见纤维与基体的部分剥离。浸泡2个月后,纤维断裂现象增多,部分纤维呈"竹节状"断裂[图8(b)]。基体中出现蜂窝状结构,界面脱粘范围扩大至20~30 μm。



(a) 1个月 (b) 2个月

图8 pH=12盐碱环境下的电镜扫描图

Fig.8 Scanning electron microscopy of pH=12 saline-alkali environment

玄武岩纤维作为硅酸盐玻璃,其网络结构除Si-O-Si键外,还含有14%~18%的Al_2O_3。铝通常以[AlO_4]四面体形式参与网络构建,形成对碱性环境敏感的Al-O-Si键[14]。在强碱性条件下(pH=12),氢氧根离子优先腐蚀Al-O-Si键位,反应方程为

$$Al\text{-}O\text{-}Si+5OH^- \rightarrow [Al(OH)_4]^- + SiO_3^{2-} + H_2O \quad (1)$$

Al^{3+}的溶出导致纤维玻璃相结构松散,表面能降低,裂纹沿晶界优先扩展。同时,基体树脂中的酯键在碱性环境中发生皂化反应,导致基体交联度下降,形成孔洞。浸泡2个月后,纤维内部硅氧网络彻底解体,纤维强度丧失。Ca^{2+}与溶液中的CO_3^{2-}结合生成$CaCO_3$沉淀,其体积膨胀效应进一步加剧基体开裂。

盐碱环境对玄武岩纤维复合材料的劣化具有显著的时间与pH依赖性。pH=10环境下以表面腐蚀为主,pH=12环境引发界面失效。

4 结 论

本文通过模拟不同pH值盐碱环境,进行拉伸以及微观试验,分析了玄武岩纤维复合材料的腐蚀劣化规律及机理。结果表明,BFRP的耐久性受环境碱性强度与腐蚀时间的显著影响,获得的主要结论如下:

(1) 在不同盐碱环境中,BFRP材料的腐蚀形貌呈现显著差异。弱碱性环境(pH=10)下,试件表面仅出现轻微粗糙和纳米级裂纹,无明显脱粘现象;中等碱性环境(pH=12)中,纤维表面粗糙度增加,基体局部出现孔洞,界面部分剥离;腐蚀程度随pH值升高和时间延长显著加剧。

(2) 抗拉强度测试表明,BFRP的力学性能退化与盐碱环境的pH值及腐蚀时间密切相关。pH=10环境中,腐蚀2个月后抗拉强度仅下降4.84%;pH=12环境中,2个月后强度下降5.62%,但仍保持较高承载能力;

(3) 微观机理研究表明,盐碱环境通过化学键断裂和界面失效导致材料退化。pH=10时,OH^-与纤维表面硅酸盐发生离子交换,引发表层微区溶解;pH=12时,Al-O-Si键水解导致纤维玻璃相松散,基体皂化反应形成孔洞;微观形貌与力学性能变化一致,揭示了BFRP在极端碱性环境中快速失效的化学与物理机制。研究结果为BFRP在盐碱地光伏支架等严苛环境中的应用提供了重要理论依据。

参 考 文 献

[1] 胡显奇.我国连续玄武岩纤维的进展及发展建议[J].高技术纤维与应用,2008,1(6):112-115.
Hu Xianqi.Progress and suggestions for development of continuous basalt fiber in China[J].High-tech Fibers and Applications,2008,1(6):112-115.(in Chinese)

[2] 谢尔盖,李中邹.玄武岩纤维材料的应用前景[J].纤维复合材料,2003,13(2):17-20.
Sergei, Li Zhongzou. Application prospects of basalt fiber materials[J].Fiber Composites,2003,13(2):17-20.(in Chinese)

[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[J].高技术纤维及应用,2005,30(6):33-38.

Hu Xianqi, Shen Tunian. Applications of continuous basalt fibers in military and civil fields[J]. High-tech Fibers and Applications, 2005, 30(6): 33-38. (in Chinese)

[4] 霍冀川,雷永林,王海滨,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(6):382-385.
Huo Jichuan, Lei Yonglin, Wang Haibin, et al. Research progress in preparation of basalt fiber and its composite materials[J]. Material Bulletin, 2006, 20(6):382-385.(in Chinese)

[5] 江迪.酸碱盐环境下玄武岩纤维复合材料耐久性试验研究[D].成都:西南交通大学,2022.
Jiang Di. Experimental study on durability of basalt fiber reinforced composites in acid, alkali and salt environment [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2022.(in Chinese)

[6] 张文斌,陶燕,李鑫鑫,等.玄武岩纤维水泥基复合材料基本力学性能试验研究[J].新型建筑材料,2022,49(6):17-22.
Zhang Wenbin, Tao Yan, Li Xinxin, et al.Experimental study on basic mechanical properties of basalt fiber reinforced cementitious composites[J]. New Building Materials,2022,49(6):17-22.(in Chinese)

[7] 高杰.玄武岩纤维在酸碱及相对湿度环境下的老化性研究[D].上海:东华大学,2016.
Gao Jie.Study on the aging of basalt fiber in acid-base and relative humidity environment [D]. Shanghai: Donghua University,2016.(in Chinese)

[8] 霍文静,张佐光,王明超,等.复合材料用玄武岩纤维耐酸碱性实验研究[J].复合材料学报,2007(6):77-82.
Huo Wenjing, Zhang Zuoguang, Wang Mingchao, et al. Experimental study on acid and alkali resistance of basalt fiber for composite materials [J]. Journal of Composite Materials, 2007, (6):77-82.(in Chinese)

[9] 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[J].玻璃钢/复合材料,2006(1):24-27.
Huang Genlai, Sun Zhijie, Wang Mingchao, et al. Experimental study on basic mechanical properties of basalt fiber and its composites[J]. FRP/Composites, 2006(1):24-27.(in Chinese)

[10] 魏斌.玄武岩连续纤维及其混杂复合材料性能评价[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
Wei Bin. Performance evaluation of basalt continuous fiber and its hybrid composites[D]. Harbin : Harbin Institute of Technology,2008.(in Chinese)

[11] 朱莹,张光超,吴刚.BFRP片材在腐蚀溶液环境下耐腐蚀性能试验研究[J].高科技纤维与应用,2013,38(1):43-47.
Zhu Ying, Zhang Guangchao, Wu Gang. Experimental study on corrosion resistance of BFRP sheets in corrosive solution environment [J]. High-tech Fibers and Applications,2013,38(1):43-47.(in Chinese)

[12] Sim J, Park C, Moon J, et al. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures [J]. Composites Part B: Engineering, 2005, 36(6): 504-512.

[13] Xiao B, Li H, Xian G J. Hygrothermal ageing of basalt fiber reinforced epoxy composites[C]//Ye L, Feng P, Yue Q. Advances in FRP Composites in Civil Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 356-359.

[14] 葛茂林.玄武岩纤维的耐碱-氯盐性能及其复合材料对混凝土抗弯性能的影响[D].大连:大连理工大学,2022.
Ge Maolin. Alkali-chloride resistance of basalt fiber and its composite′s effect on the flexural behavior of concrete[D].Dalian: Dalian University of Technology, 2022.(in Chinese)