

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2020.10.006

玄武岩纤维表面改性及在混凝土环境中的应用研究

宋进朝¹, 韩文静^{2*}, 陶 勇³

(1. 永城职业学院 建筑工程系, 河南 永城 476600; 2. 永城职业学院 机电工程系, 河南 永城 476600; 3. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 玄武岩纤维由于自身的力学性能、耐热性、生态友好性和耐化学性优势, 引起了人们对在基础设施和土木工程领域应用的关注。主要介绍玄武岩纤维进行表面改性的必要性, 阐述玄武岩纤维表面改性工艺, 主要有酸/碱刻蚀、偶联剂改性、表面涂层以及等离子体改性。重点综述了国内外玄武岩纤维表面涂层改性在水泥基复合材料研究方面的进展。

关键词: 玄武岩纤维; 表面改性; 混凝土; 应用

中图分类号: TU503

文献标识码: A

Progress in Surface Modification of Basalt Fiber and Its Application in Concrete Environment

SONG Jinchao¹, HAN Wenjing^{2*}, TAO Yong³

(1. Department of Architectural Engineering, Yongcheng Vocational College, Yongcheng 476600, China; 2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Yongcheng Vocational College, Yongcheng 476600, China; 3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Due to the advantages of mechanical properties, thermal resistance, ecological friendliness and chemical resistance, basalt fibers have become intriguing for infrastructural and civil engineering applications. This paper mainly introduces the necessity of surface modification of basalt fiber, expounds the surface modification process of basalt fiber, mainly including acid/alkali etching, coupling agent modification, surface coating and plasma modification. The research progress of basalt fiber surface coating modification in cement-based composite materials at home and abroad is reviewed.

Keywords: basalt fibers; surface modification; concrete; application

玄武岩纤维(BF)是由火山岩在1450~1500℃熔融后,在漏板拉丝工艺下形成的^[1]。玄武岩纤维的化学成分与普通合成玻璃纤维非常相似,它的基本成分是SiO₂(主要成分)、Al₂O₃、CaO等^[1-3]。因此,

在很多情况下,玄武岩纤维是替代玻璃纤维和碳纤维的非常好的候选材料。此外,玄武岩纤维比电子玻璃纤维具有更好的拉伸强度,比碳纤维具有更大的破坏应变以及良好的抗化学侵蚀性。因此,玄武

收稿日期: 2020-04-09

修回日期: 2020-06-29

作者简介: 宋进朝(1981—),男,研究生学历,讲师, email: 15938371957@163.com

通信作者: 韩文静, email: hanwenjing19850122@126.com

基金项目: 河南省高等学校青年骨干教师培养项目(2017GGJS295)

岩纤维作为结构加固材料的潜力是显而易见的^[4]。

玄武岩纤维可使用传统方法和设备进行加工,并且在单一生产过程中不需要任何额外增加其他工序,因此在成本方面具有突出的优势^[5]。玄武岩纤维具有环保安全性,其直径大于9 μm ,且不受纵向断裂的影响,因此被认为不是可吸入材料。综合以上特点,玄武岩纤维被誉为“二十一世纪的绿色工业材料”^[6]。玄武岩纤维可以广泛应用于许多领域,在建筑领域中主要应用为增强材料等^[7-9]。除此之外,玄武岩纤维还可以制成如垫子、织物和带材等各种产品。玄武岩纤维作为一种高性能的新一代纤维,受到了很多国家的关注。玄武岩连续纤维生产技术的研究较多,但是相应的表面改性报道相对不多^[10]。玄武岩纤维表面不均匀易导致应力集中,促进裂缝发育,增强水吸附。因此,对玄武岩纤维改性技术的探索,有助于满足市场应用的广泛需求。

玄武岩纤维在建筑领域的重要应用是加固结构材料中的混凝土,特别是应用于具有重大意义的历史结构和建筑中,以减少水泥和天然水石灰(NHL)灰浆收缩开裂的不利影响。玄武岩纤维加固及增强水泥基复合材料目前可以应用在高层建筑、机场跑道以及沥青路面等方面^[11]。玄武岩纤维在应用到复合材料上时由于表面能较低,不容易与树脂基体界面结合^[11],因此为了增强协同效应,有必要对玄武岩纤维进行有效的表面处理。

1 玄武岩纤维表面改性工艺

酸/碱刻蚀、偶联剂改性、表面涂层以及等离子体改性^[6]是玄武岩纤维表面改性的主要工艺方法。涂层技术可以修复几百纳米范围内的表面缺陷,延长许多传统材料的使用寿命,既不会改变纤维的主体结构,而且结构设计方面具有灵活多样性。特别是有机/无机杂化涂层技术,已经引起越来越多的关注。

1.1 酸/碱刻蚀改性

在酸性或碱性溶液中浸润纤维进行表面刻蚀的改性。改性效果由所用溶液决定。酸/碱溶液可以与其成分中的氧化物发生化学反应,使表面产生层状脱落、沟槽或凹陷,且形成“锚固”或“钉合”的机械结合力。酸碱溶液还可增加表面反应性硅醇

的数量^[4]。但酸刻蚀改性会牺牲纤维的自身性能,在实际中必须予以综合考虑。王广健等^[12]探讨了酸、碱、水等介质对玄武岩纤维的刻蚀以及对其性质影响的可能性。Manikandan V等^[13]研究证实采用 H_2SO_4 与 NaOH 改性均有助于改进玄武岩纤维布/不饱和聚酯复合材料界面的黏合状况,其中酸蚀改性效果更佳。Nasir V等^[14]对硫酸侵蚀作用下BF表面裂纹的形成机理进行了离子消耗深度模型描述。王宁等^[15]研究了酸处理对BF微观结构的影响,表明其表面仍保持玻璃态结构。

1.2 等离子体改性

等离子体包括离子、电子、自由基以及光子等部分或者全部离子化的气体组成。等离子体改性效果取决于气体^[4]。等离子体处理提高纤维表面的粗糙度;改变BF表面能,提高浸润性,可以避免废液污染,同时会赋予纤维表面新的特性,大大提高增强纤维对基体树脂的黏着性^[16]。Kim M T等^[17]采用低温氧等离子体对玄武岩纤维布进行改性并与环氧树脂复合,结果证实复合材料的层间断裂韧性提高16%。Kurniawan D等^[18]通过等离子体聚合手段将丙烯酸引入带有浸润剂的BF的表面,证明玄武岩纤维布/聚乳酸复合材料的力学性能随着等离子体处理时间的增加先降低后提高。复合材料的强度和模量分别比未处理时提高45%和18%。毕松梅等^[19]研究证实等离子体改性可以提高玄武岩纤维与聚丙烯的界面相容性,提高复合材料的力学性能。

1.3 偶联剂改性

亲无机的官能团与纤维表面发生交换反应,亲有机的则与树脂反应利用偶联剂的“桥接”作用将BF与聚合物基体连接在一起^[20]。常用的偶联剂包括硅烷偶联剂(KH550、KH560、KH570等)和铝锆偶联剂、铝酸酯偶联剂等^[4]。刘亚兰等^[21]研究了硅烷偶联剂KH550、KH560、KH570对玄武岩纤维布/环氧树脂复合材料性能的影响,结果表明经KH550改性后,复合材料的弯曲性能、拉伸性能以及层间剪切强度最优。偶联剂改性提高BF与聚合物基体界面的机械摩擦力,改善黏结性能。还可以在一定程度上弥补其生产工艺的不足。采用硅烷偶联剂改性过程中需要消耗大量的水,浪费资源,同时还污染环境^[22]。傅宏俊等^[23]发现当KH550质量分数

为 10 % 时的改性效果最佳。宋秋霞等^[24]采用 KH550 与玄武岩单丝表面发生了偶联反应,并附着在其表面形成了一层薄膜,有利于改善玄武岩单丝和有机聚合物的界面黏结。张莉等^[25]研究证实经 KH550 改性的玄武岩纤维布与酚醛树脂基体的界面间形成了 C-N-C 键与 C-O-Si 键,当 KH550 质量分数为 10 % 时,复合材料的层间剪切强度比 1.0 % 时高 13 MPa。洪晓东等^[26]采用偶联剂 KH570 对玄武岩纤维进行表面改性,复合材料的力学性能显著提高。

1.4 表面涂层改性

表面涂层改性通过添加纳米 SiO₂、氧化石墨烯或偶联剂改性的纳米粒子等制备无机-有机复合浆料涂覆在纤维表面^[27]。通过涂层改性,能保护纤维,提高纤维的集束性和浸润性;涂层中若存在反应性官能团还可将纤维与基体树脂有机结合在一起,进一步提高界面黏合性能。王军杰等^[27]以尼龙 6 热塑性树脂为基体,以纳米尺度的纳米 SiO₂、碳纳米管(CNTs)和石墨烯(GR)涂覆到微米尺度的玄武岩纤维表面,制备了多尺度纤维增强体。Wei B 等^[28]证实当纳米 SiO₂质量分数为 5 % 时,改性效果最佳。将纳米 SiO₂用 KH550 改性,证实 KH550 可有效降低纳米 SiO₂的团聚。叶国锐等^[29]证实在上浆剂中引入氧化石墨烯可以有效提高 BF 的力学性能以及 BF/环氧树脂的层间剪切强度。张晓颖等^[30]采用物理涂覆法成功制备改性玄武岩纤维(MBF),采用壳聚糖制得的 MBF 表面粗糙度为 209.04 nm,接触角为 66.62°。

2 国内玄武岩纤维表面涂层改性的研究进展

曹海琳等^[31-32]采用溶胶-凝胶技术制备有机/无机纳米复合涂层材料,并用合成环氧树脂/SiO₂纳米杂化浆料对玄武岩纤维表面进行改性,改善复合材料的界面结合强度。陈国荣等^[33]对玄武岩纤维的浸润剂配方进行了研究。玄武岩纤维的断裂强度和拉伸强度分别达到 62 N/tex 和 2400 MPa。经 KH550 改性的纳米 SiO₂粒子(150 nm),有效地改善了纤维表面粗糙度,使断裂强力提高 18.75 %,层间剪切强度提高 18.76 %^[34],使玄武岩连续纤维与环氧树脂的界面相容性大大提高。

魏斌^[35]成功地将环氧树脂大分子接枝到纳米

SiO₂颗粒上。用合成的杂化材料对玄武岩纤维进行改性形成了杂化涂层。随着 SiO₂浓度的增大,粗糙度增加。涂层改性提高了玄武岩纤维的拉伸强度,当 SiO₂为 5 wt.% 时,如图 1 所示,改性效果达到最佳。研究发现,玄武岩纤维的层间剪切强度(ILSS)提高了 10 %,拉伸强度提高了 15 %^[35]。

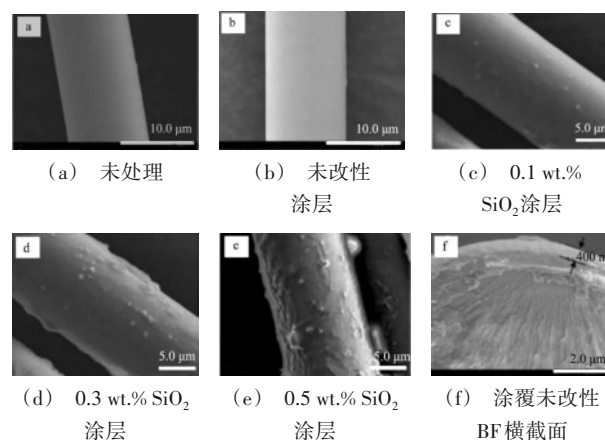


图 1 玄武岩纤维表面形貌 SEM 分析^[35]

Fig.1 SEM morphologies of composite materials reinforced by basalt fibers^[35]

靳婷婷等^[36]对样品进行低温等离子体处理后,再浸泡在质量分数为 0.8 % 的烷偶联剂的 KH550 溶液。纤维接触角从 132.23°下降到 75.22°,浸润性得到大幅度的改善。处理后的玄武岩纤维增强环氧树脂复合材料力学性能得到提高。杨佳慧^[37]采用新型的水性聚氨酯溶液对玄武岩织物进行表面涂层处理,出现明显的聚氨酯薄膜,促成了各组分之间的协同效应,增强了与树脂基体的界面强度。

BF 在道路工程中主要用于 SMA 型沥青混合料,其加筋和缠绕作用可显著增强沥青混凝土的路用性能。柳力等^[38]为提升 BF 在沥青混合料中的加筋和增强效果,采用硅烷偶联剂(KH550)对 BF 进行表面处理。改性 BF 具有良好的耐热性,其吸持沥青能力比原来提升了 40.3 %,同时离析分散性得到了明显改善。改性 BF 表面明显附着一层较厚的沥青膜,而未改性 BF 表面沥青膜很薄,这从侧面证实对 BF 进行表面改性可提升其吸持沥青的能力。

曾瑶等^[39]采用上浆工艺,将具有特殊三维结构的(GNP₃/SiO₂)杂化材料引入玄武岩纤维表面改善

界面性能,获得不同 SiO_2 粒径的石墨烯/二氧化硅($\text{GNP}_s/\text{SiO}_2$)杂化材料,可在 GNP_s 片层表面实现 SiO_2 粒径可控;在界面中杂化材料以铆钉形式增加微裂纹,有效地增加了界面黏结强度。特别当 SiO_2 粒径增大到170 nm时,纤维复合材料的断裂强度提高了78.03%,断裂伸长率是未改性断裂伸长率的3倍。

3 国外玄武岩纤维表面涂层改性的研究进展

玄武岩纤维由于自身的力学性能、耐热性、生态友好性和耐化学性,在基础设施和土木工程领域的应用受到越来越多的关注。研究在混凝土环境中应用玄武岩纤维的还不多。然而,室内和高温下玄武岩纤维早期阶段在碱性条件下表现出极佳的不可渗透性^[40]。Afroz M等^[40]对比研究了改性玄武岩纤维和未改性玄武岩纤维的化学耐久性。考虑适用于不同条件下混凝土介质采用12种不同的溶液。混凝土介质条件下将纤维浸入12种溶液中62 d。研究了改性纤维在高性能普通硅酸盐混凝土(OPC)和高掺量粉煤灰(HVFA)混凝土中的强度保持率。结果表明,改性后的纤维比未改性的纤维具有更好的性能。力学试验结果还表明,改性玄武岩纤维即使在56 d后还可以显著改善HVFA混凝土的间接拉伸和弯曲性能,但对抗压性能影响不大。实验使用了两种不同类型的玄武岩纤维。A组产自俄罗斯,B组产自中国吉林,A组纤维由硅烷(SiH_4)表面涂层剂改性。硅烷改性玄武岩纤维具有长期适宜的特性,即使在恶劣环境下也能用作混凝土纤维加固。氢氧化钙和钙盐化合物表示质量保留率低于氢氧化钠及其化合物。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液的最大质量减轻率约为30%。这可能是由于孔隙的存在造成水溶液渗透到硅连接中并分解。为了了解玄武岩纤维在混凝土中的破坏特性,采用扫描电镜对玄武岩纤维混凝土的表面进行了分析。图2证实了纤维和水化水泥基体之间的强化学结合。此外,由于良好的连锁作用,纤维在失效表面断裂(图3)。

然而,Wang M C^[41]指出玄武岩的耐酸性比耐碱性强。此外玄武岩纤维具有很强的耐腐蚀性,特别是在自来水溶液^[42]。在碱性溶液中,羟基离子与 Si-O-Si 组发生反应,从而导致硅键断裂。这种腐

蚀速率取决于纤维的化学成分和溶液的碱度以及时间和温度^[43]。在饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中,玄武岩纤维表现出较好的稳定性,重量减小相对较少,然而在浸泡3个月后强度会降低到60%^[44]。如果玄武岩纤维浸入1 mol/L NaOH溶液中,则在28 d内强度降低到80%^[45]。在大多数情况下,这些方法实验时间较短,不足以解释改性纤维和非改性纤维的长期差异。从现有文献中看,对玄武岩纤维在碱性、氯化物、硫酸盐介质中化学稳定性的研究还远远不够,这些介质往往会出现在混凝土材料的建筑和施工中。

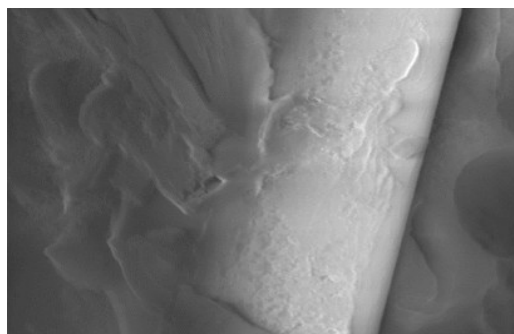


图2 玄武岩纤维与水泥基体的黏结^[40]

Fig.2 Bonding of basalt fiber with cement matrix^[40]



图3 玄武岩纤维断裂^[40]

Fig.3 Fracture of basalt fiber^[40]

Afroz M等^[40]研究还发现:在室温下,62 d后的pH测量也证实了碱性介质中改性玄武岩纤维比未改性玄武岩纤维稳定性更强。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液破坏了纤维的织构,在浸泡62 d,玄武岩纤维在溶液中的质量减少了约30%。然而 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在纤维表面形成不光滑的表面,可以在混凝土基体之间形成更好的连锁。表面处理是实现混凝土介质所需纤维抗降解性能的关键步骤。在极端碱性溶液中,涂层玄武岩纤维的长期(62 d)质量劣化率相对较低。

与 OPC 混凝土相比,即使在 56 d 后,硅烷涂层玄武岩纤维也能显著提高 HVFA 混凝土的长期间接抗拉和抗拉强度能力,而抗压强度没有显著提高。

Zahra T 等^[46]对玄武岩纤维采用溶胶-凝胶法和常压干燥法进行表面改性。用 FTIR、FE-SEM 和氮气吸附分析二氧化硅气凝胶颗粒的表征。结果表明,其介孔结构为 7 nm,孔隙率高,密度低。表面改性玄武岩纤维的密度降低了 42%,吸声系数提高了 25%。结果表明,二氧化硅气凝胶结构可以影响改性玄武岩纤维的物理性能。

Iorio M 等^[47]使用不同的硅烷水溶液对玄武岩纤维表面进行改性,以生成各种聚有机硅氧烷涂层。在通过煅烧和活化过程去除纤维的商用涂层后,聚硅氧烷被接枝到纤维表面。三种水溶液用于硅烷化:(1) γ -氨基丙基三乙氧基硅烷,APTES;(2) γ -氨基丙基甲基二乙氧基硅烷,APDES;(3)两种 APTES+APDES 重量的 50% 的混合物。用异硫氰酸荧光素对硅烷化纤维进行化学标记,然后浸入不同的水溶液(pH=7)中,研究聚硅氧烷涂层的水解降解。通过在不同温度下的稳态荧光监测水解现象,进而研究水解过程的动力学。通过监测溶液的 pH 来研究硅烷化纤维浸泡在其中的时间函数。结果表明,虽然聚硅氧烷涂层的水解速率按 APDES<APDES+APTES<APTES 的顺序增加,但机理上的差异并不是导致该顺序的原因;能够水解硅氧烷键的初始浓度是导致该顺序的原因。

Iorio M 等^[48]还采用硅烷偶联剂对玄武岩纤维进行表面处理,以提高混凝土基复合材料中纤维基体界面的黏附性和耐久性。玄武岩纤维表面浆胶被去除后,玄武岩纤维表面用三种氨基硅烷(APTES、APDES 和 APTES+APDES)进行处理。研究发现玄武岩纤维与混凝土的黏结性能得到明显提高。涂层溶液中三乙氧基硅烷的含量越高,沉积在玄武岩纤维上的有机物越多,从而导致了形貌上的不均匀性。三维原子力显微镜图像观察当使用 APTES 时,能在涂层表面观察到明显的“山脉状”突起形状。这种“山脉状”不均匀性可能是造成基体和纤维之间黏附性最强的原因。

4 结语

玄武岩纤维表面处理工艺对界面性能有很大

影响,对提高复合材料的整体性能也是十分必要的。目前,玄武岩纤维表面处理技术尚处于起步阶段,对其改性机理的研究尚不成熟和完善,因此玄武岩纤维表面改性的方法还有很大的研究空间。目前的实际应用是将玻璃纤维涂层技术直接应用于连续玄武岩纤维,这不利于连续玄武岩纤维的性能的实现。在混凝土环境下玄武岩纤维研究中,还需要针对改性制备工艺、后制品等做大量研发工作,推动改性玄武岩纤维在建筑领域的产业化和持续发展。

参考文献

- [1] 王颢鹏,张伟.玄武岩纤维的性能与应用[J].建材技术与应用,2002,(4):17-18.
Wang B P, Zhang W. Properties and application of basalt fiber[J]. Research & Application of Building Materials, 2002, (4): 17-18 (in Chinese).
- [2] Rabinovich F N, Zueva V N, Makeeva L V. Stability of basalt fibers in a medium of hydrating cement [J]. Keramika, 2001, (12): 29-32.
- [3] Quagliarini E, Monni F, Lenci S, et al. Tensile characterization of basalt fiber rods and ropes: a first contribution[J]. Construction and Building Materials, 2012, 34: 372-380.
- [4] 肖同亮,李卓,赵树高.连续玄武岩纤维表面改性方法研究进展[J].化工新型材料,2016,44(11):26-30.
Xiao T L, Li Z, Zhao S G. Research progress on surface modification of continuous basalt fiber[J]. New Chemical Materials, 2016, 44 (11): 26-30 (in Chinese).
- [5] Dhand V, Mittal G, Yop K, et al. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites [J]. Composites Part B, 2015, 73: 166-180.
- [6] Wei B, Cao H L, Song S H. Surface modification and characterization of basalt fibers with hybrid sizings [J]. Composite Part A, 2011, 42: 22-29.
- [7] Jiang C H, Fan K, Wu F, et al. Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete [J]. Materials and Design, 2014, 58: 187-193.
- [8] Kabay N. Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber [J]. Construction and Building Materials, 2014, 50(50): 95-101.
- [9] Singha K. A short review on basalt fiber [J]. International Journal of Textile Science, 2012, 1(4): 19-28.
- [10] Fiore V, Scalici T, Bella G D, et al. A review on basalt fibre and its composites [J]. Composites Part B, 2015, 74: 74-94.

- [11] 贾明皓, 肖学良, 钱坤. 玄武岩纤维及其增强水泥基复合材料研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(11): 3467-3474.
- Jia M H, Xiao X L, Qian K. Research progress in basalt fiber and its reinforced cement-based composites [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37 (11): 3467-3474 (in Chinese).
- [12] 王广健, 尚德库, 胡琳娜, 等. 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, (1): 38-44.
- Wang G J, Shang D K, Hu L N, et al. Investigation of modification of basalt fibers and preparation of composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, (1): 38-44 (in Chinese).
- [13] Manikandan V, Winowlin Jappes J T, Suresh Kumar S M, et al. Investigation of the effect of surface modifications on the mechanical properties of basalt fibre reinforced polymer composites [J]. Composites Part B, 2012, 43(2): 812-818.
- [14] Nasir V, Karimipour H, Taheri-Behrooz F, et al. Corrosion behaviour and crack formation mechanism of basalt fibre in sulphuric acid [J]. Corrosion Science, 2012, 64: 1-7.
- [15] 王宁, 刘敏, 庄忱, 等. 酸处理对玄武岩纤维微观结构和力学性能的影响[J]. 功能材料, 2013, 44(1): 84-87.
- Wang N, Liu M, Zhuang C, et al. Effect of acid treatment on microstructure and mechanical properties of basalt fiber [J]. Functional Materials, 2013, 44 (1): 84-87 (in Chinese).
- [16] 周正刚. 高性能有机纤维表面等离子体改性研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009, (1): 77-79.
- Zhou Z G. Research on plasma surface modification of organic high-performance fiber [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009, (1): 77-79 (in Chinese).
- [17] Kim M T, Kim M H, Rhee K Y, et al. Study on an oxygen plasma treatment of a basalt fiber and its effect on the inter laminar fracture property of basalt/epoxy woven composites [J]. Composites Part B, 2010, 42 (3): 499-504.
- [18] Kurniawan D, Kim B S, Lee H Y, et al. Atmospheric pressure glow discharge plasma polymerization for surface treatment on sized basalt fiber/polylactic acid composites [J]. Composites Part B (Engineering), 2012, 43 (3): 1010-1014.
- [19] 毕松梅, 朱钦钦. 离子体改性对玄武岩/聚丙烯复合材料性能的影响[J]. 产业用纺织品, 2013, (6): 32-35.
- Bi S M, Zhu Q Q. Influence of plasma modification treatment on basalt [J]. Fiber/Polypropylene Composites Technical Textiles, 2013, (6): 32-35 (in Chinese).
- [20] 乌云其其格. 偶联剂对玻璃纤维增强塑料的界面作用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2000, (4): 12-15.
- Wu Y Q Q G. Effect of coupling agent on the interface of glass fiber reinforced plastics [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2000, (4): 12-15 (in Chinese).
- [21] 刘亚兰, 申士杰, 许小芳, 等. 工艺参数对玄武岩连续纤维增强环氧树脂力学性能的影响[J]. 林业机械与木工设备, 2011, 39(2): 28-32.
- Liu Y L, Shen S J, Xu X F, et al. Influence of process parameters on mechanical properties of basalt continuous fiber reinforced epoxy resin [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2011, 39(2): 28-32 (in Chinese).
- [22] Rohchoon P, Jyongsik J. Impact behavior of aramid fiber/glass fiber hybrid composite; Evaluation of four-layer hybrid composites [J]. Journal of Materials Science, 2001, 36(9): 2359.
- [23] 傅宏俊, 马崇启, 王瑞. 玄武岩纤维表面处理及其复合材料界面改性研究[J]. 纤维复合材料, 2007, 24 (3): 11-13.
- Fu H J, Ma C Q, Wang R. Investigation on surface treatment of basalt-fiber and interfacial modification of composites [J]. Fiber Composites, 2007, 24 (3): 11-13 (in Chinese).
- [24] 宋秋霞, 刘华武, 钟智丽, 等. 硅烷偶联剂处理对玄武岩单丝拉伸性能的影响[J]. 天津工业大学学报, 2010, 29(1): 19-22.
- Song Q X, Liu H W, Zhong H L, et al. Effect of silane coupling agent treatment on tensile properties of single basalt filament [J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2010, 29(1): 19-22 (in Chinese).
- [25] 张莉, 申世杰, 刘亚兰. 玄武岩纤维-酚醛树脂复合材料界面结合机理[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(3): 38-41.
- Zhang L, Shen S J, Liu Y L. Mechanism of basalt fiber reinforced phenolic resin [J]. Aerospace Materials & Technology, 2012, 42(3): 38-41 (in Chinese).
- [26] 洪晓东, 杨东旭, 邓恩燕. 改性玄武岩纤维增强环氧树脂复合材料的力学性能[J]. 工程塑料应用, 2013, 41(2): 20-24.
- Hong X D, Yang D X, Deng E Y. Mechanical properties of basalt fiber with surface modification reinforced epoxy resin composites [J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(2): 20-24 (in Chinese).
- [27] 王军杰. 玄武岩纤维表面纳米调控及其复合材料力学和摩擦磨损性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.

- [28] Wei B, Song S H, Cao H I. Strengthening of basalt nano-SiO₂-epoxy composite coating[J]. *Materials and Design*, 2011, 32(8-9): 4180-4186.
- [29] 叶国锐, 晏义伍, 曹海琳. 氧化石墨烯改性玄武岩纤维及其增强环氧树脂复合材料性能[J]. *复合材料学报*, 2014, 31(6): 1402-1408.
- Ye G Y, Yan Y W, Cao H L. Basalt fiber modified with graphene oxide and properties of its reinforced epoxy composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(6): 1402-1408 (in Chinese).
- [30] 张晓颖, 荣新山, 徐吉成, 等. 玄武岩纤维表面改性对生物膜附着性能的影响[J]. *材料工程*, 2019, 47(5): 129-136.
- Zhang X Y, Rong X S, Xu J C, et al. Effect of surface modification of basalt fiber on biofilm attachment [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(5): 129-136 (in Chinese).
- [31] 曹海琳, 张春红, 张志谦, 等. 玄武岩纤维表面涂层改性研究[J]. *航空材料学报*, 2007, (5): 77-82.
- Cao H L, Zhang C H, Zhang Z Q, et al. Study on sizing modification of basalt fibers [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2007, (5): 77-82 (in Chinese).
- [32] 曹海琳, 晏义伍, 岳利培, 等. 玄武岩纤维[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [33] 陈国荣, 曹海琳, 姜雪, 等. 表面涂层对玄武岩连续纤维力学性能的影响[J]. *材料科学与工艺*, 2011, 19(2): 19-22+27.
- Chen G R, Cao H L, Jiang X, et al. Effect of exterior coating on the mechanical property of continuous basalt fiber[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2011, 19(2): 19-22+27 (in Chinese).
- [34] 陈国荣, 曹海琳, 姜雪, 等. 纳米SiO₂改性玄武岩纤维涂层浆料的制备及应用[J]. *涂料工业*, 2010, 40(6): 29-32.
- Chen G R, Cao H L, Jiang X, et al. Preparation and application of nano-SiO₂ modified sizing for basalt fiber[J]. *Paint & Coating Industry*, 2010, 40(6): 29-32 (in Chinese).
- [35] 魏斌. 玄武岩纤维的化学稳定性能及其涂层改性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [36] 靳婷婷, 申士杰, 李静, 等. 低温等离子处理对玄武岩纤维表面及复合材料性能的影响[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2015, (6): 29-35.
- Jin T T, Shen S J, Li J, et al. Impact on the surface of basalt fiber and composite material properties of low-temperature plasma treatment[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2015, (6): 29-35 (in Chinese).
- [37] 杨佳慧. 玄武岩纤维的表面处理及其复合材料性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2015.
- [38] 柳力, 刘朝晖, 向宇, 等. 硅烷偶联剂改性玄武岩纤维的机理及其路用性能[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(4): 623-629.
- Liu Li, Liu Z H, Xiang Y, et al. Mechanism and road performance of basalt fiber modified by silane coupling agent[J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 37(4): 612-618 (in Chinese).
- [39] 曾瑶, 俞科静, 钱坤. 玄武岩纤维表面改性及界面效应[J]. *材料科学与工程学报*, 2019, 37(4): 612-618.
- Zeng Y, Yu K J, Qian K. Study on surface modification and interfacial effect of basalt fiber[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2019, 37(4): 612-618 (in Chinese).
- [40] Afroz M, Patnaikuni I, Yenkatesan S, et al. Chemical durability and performance of modified basalt fiber in concrete medium [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 154: 191-203.
- [41] Wang M C. Chemical durability and mechanical properties of alkali-proof basalt fiber and its reinforced epoxy composites[J]. *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, 2008, 27(4): 393-407.
- [42] Wu G, Wang X, Wu Z, et al. Durability of basalt fibers and composites in corrosive environments[J]. *Journal of Composite Materials*, 2015, 49(7): 873-887.
- [43] Scheffler C, Förster T, Mäder E, et al. Aging of alkali-resistant glass and basalt fibers in alkaline solutions: evaluation of the failure stress by Weibull distribution function [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2009, 355: 52-54.
- [44] Lee J J, Song J, Kim H. Chemical stability of basalt fiber in alkaline solution[J]. *Fibers and Polymers*, 2014, 15(11): 2329-2334.
- [45] Myadaraboina H, Atmaja E S. Stability of basalt fibers in concrete medium [C] // Raikar Memorial International Conference, Mumbai, India, 2015: 29-35.
- [46] Zahra T, Negar H, Ali Z. Surface modification of basalt fibers by nanostructured silica aerogel [J]. *Fibers and Polymers*, 2018, 19(9): 1843-1849.
- [47] Iorio M, Olmos D, Santarelli M L, et al. Fluorescence study of the hydrolytic degradation process of the polysiloxane coatings of basalt fibers [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 475: 754-761.
- [48] Iorio M, Santarelli M L, Gonz&lezfaitano G, et al. Surface modification and characterization of basalt fibers as potential reinforcement of concretes [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 427: 1248-1256.