

玄武岩纤维增强水泥长期力学性能试验研究

朱春琪¹, 田稳苓¹, 姜磊², 杨佩剑¹, 周健¹, 张文韬¹

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘要:为研究玄武岩纤维在普通硅酸盐水泥(OPC)和高贝利特硫铝酸盐水泥(HB-CSA)环境下的长期增强效果, 分别对配置玄武岩纤维的普通硅酸盐水泥板(BTR-O)和高贝利特硫铝酸盐水泥板(BTR-H)进行不同龄期下的老化处理和弯曲试验, 对比分析不同老化龄期下水泥板的力学性能变化情况, 并采用微观测试手段对其进行机理分析。结果表明:未老化时, BTR-O板和BTR-H板的抗弯强度分别是相应基体板的2.20和2.21倍, 老化21 d后变为1.10和1.90倍。老化后期, BTR-O板底部纯弯段裂缝数量明显减少, 而BTR-H板裂缝数量基本保持不变, BTR-H板的长期力学性能优于BTR-O板; HB-CSA的pH值在各龄期都低于OPC, 且水化产物中未发现 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 从而弱化了HB-CSA对纤维的侵蚀, 使得BTR-H板在长期使用过程中具有更加优异的力学效果。

关键词:玄武岩纤维; 力学性能; 加速老化; 水泥基复合材料; 增强效果

中图分类号: TU528.581

文献标志码: A

Experimental study on long-term mechanical properties of basalt fiber reinforced cement

ZHU Chunqi¹, TIAN Wenling¹, JIANG Lei², YANG Peijian¹,

ZHOU Jian¹, ZHANG Wentao¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: In order to study the long-term strengthening effect of basalt fiber in ordinary portland cement (OPC) and high belite calcium sulfoaluminate cement (HB-CSA), the aging treatments and bending tests under different ages were carried out for basalt fiber reinforced ordinary portland cement (BTR-O) and basalt fiber reinforced high belite calcium sulfoaluminate cement (BTR-H). The mechanical properties of cement under different aging periods were compared and the mechanism was analyzed by performing microscopic tests. The results show that the bending strength of unaged BTR-O and BTR-H is 2.20 and 2.21 times respectively of the original matrix, and then become 1.10 and 1.90 times after aging for 21 days. The fracture numbers in bending section of the BTR-O are significantly decreased, while the fracture numbers of BTR-H remain unchanged in the later aging stage, indicating that the long-term mechanical properties of BTR-H are better than BTR-O. The pH value of HB-CSA is lower than OPC at different ages and no $\text{Ca}(\text{OH})_2$ is found in hydration products of HB-CSA, which weakens the corrosion of HB-CSA on the fiber and makes BTR-H have more excellent mechanical effect in long-term use.

Key words: basalt fiber; mechanical properties; accelerated aging; cement-based composite; strengthening effect

水泥基材料属于脆性材料, 其抗拉和抗弯强度均较低, 极限应变较小, 易开裂, 对建筑物的耐久性造成了

收稿日期: 2020-04-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878238)

作者简介: 朱春琪(1994—), 女, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事纤维混凝土及其耐久性方面的研究。

田稳苓(1961—), 女, 河北大城人, 教授, 博士, 主要从事纤维混凝土及砌体加固等方面的研究, 本文通信作者。

E-mail: wltian126@126.com

很大影响,使其在土木建筑领域的应用中受到了很大限制。近年来,针对碳纤维和玻璃纤维对水泥基材料进行增强的工程实例和科学研究较多^[1-2],碳纤维具有较高的抗拉强度,但价格较高、制作工艺复杂;玻璃纤维价格低廉但抗拉强度较低,并且在水泥基材料中易受碱腐蚀^[3]。玄武岩纤维是我国自主研发的一种新型无机环保材料,价格较低,不仅具有良好的力学性能,还具有耐高温、隔音、电绝缘、防辐射等优点^[4-7],而且玄武岩纤维的化学成分与水泥相似^[8],使得两者具有良好的黏结性能。因此,作为应用于水泥基中的增强材料,玄武岩纤维具有更广泛的应用价值。

然而,玄武岩纤维力学性能的发挥与其所处水泥碱性环境有关。玄武岩纤维中含有大量的 SiO_2 和 Al_2O_3 ^[9],当其处于水泥碱环境中时,会与水泥孔隙液中的 OH^- 发生化学反应,使得构成纤维结构的硅氧键发生断裂,进而降低纤维对水泥的增强效果,且在整个服役期内, OH^- 会对玄武岩纤维造成持续性伤害,并导致复合材料长期力学性能下降。目前关于玄武岩纤维耐碱性的研究多采用配制化学溶液方法来模拟碱性环境,以纤维质量损失率和拉伸强度保留率表征其耐碱性^[10-12],这与玄武岩纤维实际工作时的水泥碱性环境差别较大,不能作为玄武岩纤维能否在水泥材料中具有长期增强效果的标准,且关于玄武岩纤维增强水泥材料长期力学性能的研究相对较少。为此,课题组对玄武岩纤维增强水泥长期力学性能开展研究,探究玄武岩纤维对水泥材料的长期增强效果,并通过微观测试手段对长期力学性能的变化进行机理解释。

1 试验概况

1.1 试验材料

1) 水泥。普通硅酸盐水泥(ordinary portland cement, OPC)和快凝快硬高贝利特硫铝酸盐水泥(hardening high belite calcium sulfoaluminate cement, HB-CSA),水泥等级均为 42.5 级,两种水泥的主要化学组成如表 1 所示。

表 1 水泥的化学组成
Tab. 1 Chemical compositions of cement

水泥种类	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	TiO_2	LOI
HB-CSA	18.39	14.64	0.96	46.02	5.41	12.57	0.63	0.55
OPC	19.79	5.31	2.88	64.31	2.52	2.47	0.34	1.46

2) 玄武岩纤维。采用绞织玄武岩纤维编织网,网格尺寸 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,玄武岩纤维原丝直径 $13.1\text{ }\mu\text{m}$,线密度 133 Tex。

3) 砂子。为了使拌合后的水泥砂浆可以顺利通过纤维网网孔,控制砂子最大粒径不超过 1.2 mm ,并将 $0 \sim 0.6\text{ mm}$ 砂定义为细砂, $0.6 \sim 1.2\text{ mm}$ 砂定义为粗砂,两种砂均为水洗后烘干砂。

4) 水。试验室自来水。

5) 减水剂。使用聚羧酸系高效减水剂,减水率为 26%。

6) 缓凝剂。在 HB-CSA 中掺加缓凝剂以利于试件制作,缓凝剂使用柠檬酸类(粉体),掺量为 0.2%。

1.2 试验设计

1.2.1 弯曲试验试件制作

制作尺寸为 $250\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的有机玻璃模板,将玄武岩纤维网固定于距板底 8 mm 位置处,如图 1 所示,其中用于制作素水泥砂浆板的模板中不铺设网格布。按照表 2 配合比拌制基体材料,将拌制好的基体材料均匀的浇筑于模板内,之后置于振动台振动密实,对表面进行抹面处理,在试件终凝前用厚度为 0.3 mm 的刀片将其切割成 6 块尺寸为 $250\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的小板。切割完成后带模放入 $20 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 且相对湿度高于 95% 的标养室中,1 d 后进行脱模。每组工况制作 3 块试件,并将脱模后的试件分为两部分:一部分放置于标养室养护 6 d 后取出进行后续加速老化;另一部分继续置于标养室养护 27 d。

按照基体类型将成型后的试件分为 4 类:以 OPC 水泥为基体胶凝材料制作的复合板记为 BTR-O 板;以 HB-CSA 水泥为基体胶凝材料制作的板记为 BTR-H 板;不配置玄武岩纤维网的素 OPC 水泥砂浆板记为素 OPC 板;不配置玄武岩纤维网的素 HB-CSA 水泥砂浆板记为素 HB-CSA 板。

1.2.2 微观测试试件制作

使用三联模制作 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 水泥净浆试件,水灰比为 0.4,在 HB-CSA 水泥净浆试件制作时加入 0.2% 缓凝剂。制作完成后带模放入标养室,1 d 后拆模,拆模后的养护方式与弯曲试验试件相同。

1.3 试验方法

1.3.1 加速老化方法及弯曲试验

1) 加速老化方法。将标养室养护 6 d 后的试件取出放入聚丙烯保鲜盒,盒内浸水使其漫过最上层试件后封盖,将盒放入 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温养护箱内,继续加速老化 5、10 和 21 d。

2) 弯曲试验。参照《玻璃纤维增强水泥性能试验方法》(GB/T 15231—2008)^[13] 对不同老化龄期试件进行弯曲试验,如图 2 所示。试验采用量程为 20 kN 的电子万能试验机,加载过程采用位移控制,加载速率为 1 mm/min ,荷载及位移均由试验机自带系统采集,使用坐标纸记录试件底部裂缝。

1.3.2 微观测试方法

1) pH 值测试^[14]。将不同老化龄期的水泥净浆试件去除两侧碳化层取核心部分,使用无水乙醇终止水化后烘干,用玛瑙研钵研磨,过 0.075 mm 筛。称取不同老化龄期样品各 3 g,分别加入 30 mL 去离子水,利用磁力搅拌机搅拌 30 min,在室温下静置 2 h 后用 pH 计测其上清液 pH 值。

2) 水泥水化分析。取出部分 pH 值测试中的样品,使用美国 TA-SDTQ600 热分析仪对不同老化龄期水泥水化产物进行分析,升温区间 $20\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$,升温速率 $20\text{ }^{\circ}\text{C/min}$,保护气体 N_2 。

2 试验结果与分析

2.1 弯曲试验结果分析

2.1.1 强度分析

图 3 为试验测得的两种不同水泥基复合板和两种素水泥砂浆板的抗弯强度随老化龄期的数值变化关系。从图中可以看出,对于两种素水泥砂浆板,其抗弯强度随老化时间呈现明显的差异。素 OPC 板抗弯强度随龄期增长而持续增加,老化前期的增长速率明显高于老化后期,表明 OPC 水泥的水化反应随时间增加

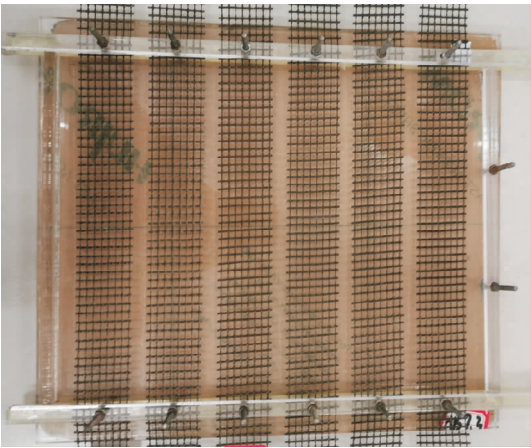


图 1 编织网固定示意图

Fig. 1 Fixation of textile

表 2 水泥基材料配合比

Tab. 2 Mix proportion of cementitious-based materials

材料	水泥	水	细砂	粗砂	减水剂	水灰比
用量/(kg/m^3)	675	270	460	920	4.59	0.4

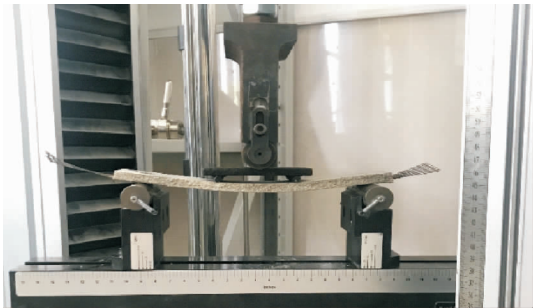


图 2 弯曲试验测试

Fig. 2 Four-point bending test

而持续进行,后期水化速率逐渐减缓。素 HB-CSA 板的抗弯强度在老化前期出现轻微下滑,老化后期又逐渐上升,这可能是由于温度的升高加快了钙矾石(Aft)的生成^[15],使得水泥砂浆内部产生微裂缝,从而抗弯强度下降。但总体而言,HB-CSA 水泥相较于其他早强型水泥仍能保持一定的后期强度。对于两种不同水泥基复合板,老化 0、5、10 和 21 d 后,BTR-O 板的抗弯强度分别是同龄期下素 OPC 板的 2.20、1.80、1.48 和 1.10 倍,而 BTR-H 板的抗弯强度分别是同龄期下素 HB-CSA 板的 2.21、2.29、2.10 和 1.90 倍。这说明:未老化时,玄武岩纤维对 OPC 材料和 HB-CSA 材料均具有较好的增强效应;而随着老化龄期的增加,玄武岩纤维在两种水泥中的强度增强效果均出现衰退,但其在 OPC 水泥环境中的衰退速率明显高于在 HB-CSA 水泥环境中。值得注意的是,老化 21 d 后,BTR-O 板的抗弯强度较未老化前下降了 42.05%,而 BTR-H 板的抗弯强度仅下降 10.26%,这说明长期老化后,玄武岩纤维对 OPC 水泥材料的增强效果显著降低,而在 HB-CSA 环境中仍可以对板起到良好的增强效果。

2.1.2 变形分析

图 4 和图 5 分别为 BTR-O 板和 BTR-H 板在不同老化龄期下的荷载-位移曲线。从图中可以看出,未老化时,两种不同水泥基复合板的受力过程均可分为 3 个阶段:第 1 阶段为弹性受力阶段,从初始加载到第一条裂缝产生,荷载-位移曲线呈线性关系增长,荷载主要由水泥基材料承担;第 2 阶段为多缝开裂阶段,曲线中出现第一个转折点时说明薄板的第一条裂缝产生,裂缝处水泥基材料退出工作,应力由玄武岩纤维网承担,随着荷载的继续施加,薄板纯弯段相继出现多条横向贯通裂缝;第 3 阶段为主裂缝发展阶段,荷载主要由玄武岩纤维网承担,且有较大提高,随着荷载进一步增大,部分玄武岩纤维丝开始被拉断,荷载-位移曲线呈现“小波浪式”上升特点,随着荷载的增大,薄板底部纯弯段主裂缝宽度不断扩大直至此处玄武岩纤维网全部拉断,整个薄板失去承载能力而破坏。

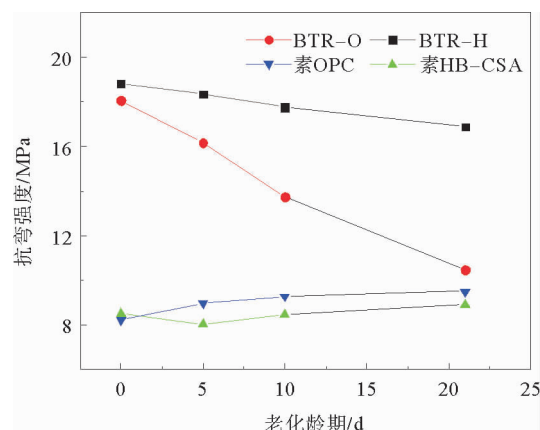


图 3 抗弯强度与老化龄期关系

Fig. 3 Relationship between flexural strength and aging time

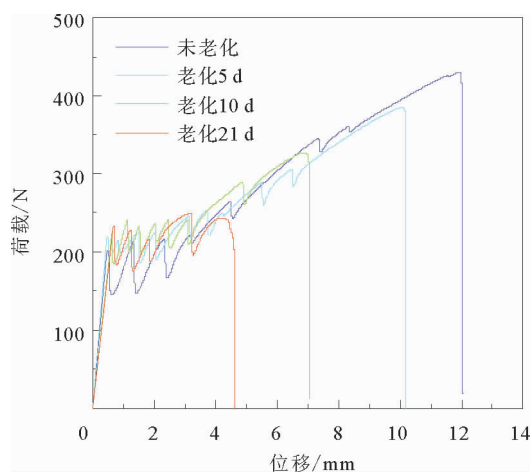


图 4 BTR-O 板各老化龄期荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-deflection curves of BTR-O with various aging times

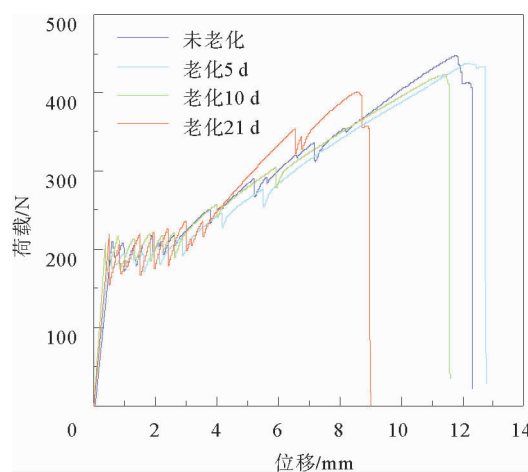


图 5 BTR-H 板各老化龄期荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-deflection curves of BTR-H with various aging times

为了直观分析两种不同水泥基复合板随老化龄期的变化,分析图 4 和图 5 并进行对比。从图 4 可以看出,随着老化龄期的增长,BTR-O 板的极限荷载显著减小,主裂缝发展阶段逐渐变短,板的整体变形能力下

降明显。并且,老化 21 d 后,BTR-O 板底部纯弯段裂缝数量明显减少,裂缝间距变长(图 6)。综上说明,随着老化龄期的增长,玄武岩纤维在 OPC 环境下的增强效果出现明显衰退。

从图 5 可以看出,随着老化龄期的增长,BTR-H 板的极限荷载也呈现降低的趋势,但下降幅度明显低于图 4 中 BTR-O 板极限荷载的下降幅度,变形能力在老化前期变化不明显,直至老化 21 d 后板的变形能力才出现明显下降。并且,老化 21 d 后,BTR-H 板底部纯弯段裂缝数量与未老化时相比变化不大(图 7),这说明玄武岩纤维在 HB-CSA 中与在 OPC 中相比,仍具有良好的增韧效果,从而使 BTR-H 板表现出良好的变形能力。



图 6 老化前后 BTR-O 板的裂缝数量

Fig. 6 Fracture numbers of BTR-O before and after aging



图 7 老化前后 BTR-H 板的裂缝数量

Fig. 7 Fracture numbers of BTR-H before and after aging

2.2 微观测试结果分析

从 2.1 节抗弯试验数据可以看出,玄武岩纤维在未老化前对水泥板增强效果显著,随着老化龄期的增加,BTR-O 板和 BTR-H 板的力学性能下滑幅度呈现明显差异,为进一步解释以上现象,需对玄武岩纤维的工作环境做出微观测试,分析水泥环境的 pH 值及水化产物。

2.2.1 pH 值测试分析

图 8 为两种水泥不同老化龄期的 pH 值变化。在纯 OPC 水泥体系中 pH 值的变化可反映体系中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (简称 CH) 含量,并且 CH 含量可以对其水化程度进行表征^[16]。由图 8 可知,OPC 水泥 pH 值增长速度由快变缓,老化后期 pH 值基本保持不变,这说明 OPC 水泥水化程度随时间增加而加深,后期水化速度减小且基本保持稳定。并且,OPC 水泥水化过程中 pH 值始终保持在 12.2 以上;对于 HB-CSA 水泥,随着龄期的增长,pH 值则呈现先降低后升高的趋势,且在整个水化龄期,任一阶段的 pH 值都要显著低于 OPC 水泥。

2.2.2 水泥水化产物分析

pH 测试结果表明,OPC 中含有大量 CH 使得水泥 pH 值始终高于 12.2,且文献[17]指出完全水化的 OPC 水泥中可含原水泥质量 15%~30% 的 CH,因此在整个服役期内,OPC 水泥环境始终保持高碱

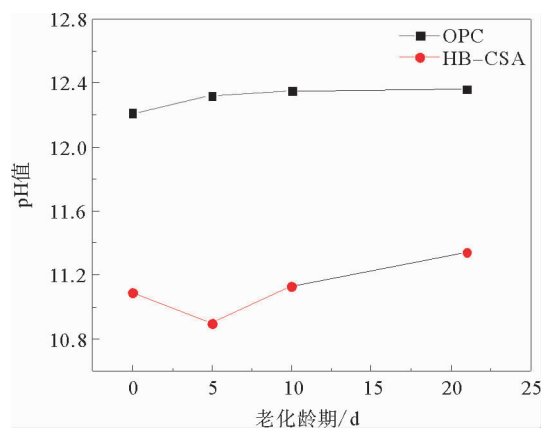


图 8 OPC 和 HB-CSA 水泥不同老化龄期的 pH 值

Fig. 8 The pH value of OPC and HB-CSA with various aging times

性。考虑到关于 HB-CSA 水泥的水化研究较少,故针对 HB-CSA 水泥进行水化分析。

图 9 为 HB-CSA 水泥不同老化龄期的微商热重(derivative thermogravimetry,DTG)曲线图。由图可知,HB-CSA 水泥在任一龄期的水化产物中都含有大量的 AFt,与未老化时相比,老化 5 d 时 AFt 量明显增多,说明高温高湿的环境促进了 HB-CSA 水化,并且在此温度下 AFt 可以稳定存在,采用 60 °C 对高含量 AFt 水泥体系进行加速老化是合理的,同时也解释了 HB-CSA 水泥老化 5 d 时抗弯强度的轻微下降是由于 AFt 的突然增多而引起的。另外,HB-CSA 水泥中掺有大量矿渣,老化后期矿渣活性可能被激发,与 CH 发生反应生成 C-S-H 凝胶,后期凝胶材料的形成填充了孔隙,基体变得密实,在一定程度上填充了微裂缝和孔隙,使得 HB-CSA 水泥具有良好的后期强度,同时说明 CH 只作为中间产物出现,随着水化的进行而被消耗,所以在任一龄期都没有发现 CH 的存在,水化产物中不含 CH 是与 OPC 相比保持低碱性的根本原因。

2.3 机理分析

玄武岩纤维增强水泥板抗弯强度的下降与玄武岩纤维拉伸性能、基体强度的变化和基体与玄武岩纤维的黏结性能的变化等均相关。2.1 节抗弯试验结果显示 OPC 水泥水化随时间增加而持续进行,从而使得基体强度有一定的增加,但抗弯强度却显著下降,结合 2.2 节微观分析可知,OPC 水泥水化后产生了大量的 CH,使得 OPC 环境呈高碱性,认为玄武岩纤维在 OPC 高碱性的环境中发生反应^[18]: $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv + \text{OH}^- \rightarrow \equiv\text{Si}-\text{OH} + \equiv\text{Si}-\text{O}^-$,从而使得玄武岩纤维骨架发生破坏,纤维拉伸性能下降,进而导致 BTR-O 板长期老化过程中强度和变形能力显著下降。而在长期老化过程中,HB-CSA 水泥水化产物中均未发现 CH 相,降低了水泥基体的碱度,从而减轻了对纤维的侵蚀。因此,当玄武岩纤维长期处于 HB-CSA 环境中时仍能保持良好的力学性能,可以对水泥基材料起到优异的长期增强效果。

3 结论

1) 未老化时,BTR-O 板和 BTR-H 板的抗弯强度分别为素 OPC 板和素 HB-CSA 板的 2.20 和 2.21 倍,两种 BTRC 板在弯曲荷载作用下均呈现多缝开裂,并表现出良好的变形能力,玄武岩纤维对 OPC 水泥材料和 HB-CSA 水泥材料均具有较好的增强效应。

2) 长期老化处理后,BTR-H 板的老化速度远远低于 BTR-O 板的老化速度。老化 21 d 后 BTR-O 板抗弯强度下降 42.05%,底部纯弯段裂缝数量明显减少,老化 5 d 时变形能力已经开始下降。而 BTR-H 板老化 21 d 后抗弯强度仅下降 10.26%,底部纯弯段裂缝数量变化不明显,且在老化 21 d 后其变形能力才出现明显下降。

3) HB-CSA 水泥水化产物中未发现 CH 相,因此减轻了对玄武岩纤维的化学腐蚀和物理侵蚀。长期老化后,玄武岩纤维仍能对 HB-CSA 水泥材料起到良好的增韧效果,使得 BTR-H 板与 BTR-O 板相比具有更加优异的长期力学性能,HB-CSA 水泥可以作为玄武岩纤维增强水泥的基体胶凝材料进行推广应用。

参考文献:

[1]倪鑫.碳纤维增强水泥基复材加固前后中度劣化 RC 梁力学性能研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.

NI Xin.Study on mechanical properties of RC beams with degraded before and after reinforcement by carbon fiber reinforced cement-based materials[D].Xuzhou:China University of Mining and Technology,2019.

[2]刘赛,朱德举,李安令,等.应变率和温度对耐碱玻璃纤维织物增强水泥基复合材料弯曲力学行为的影响[J].复合材料学

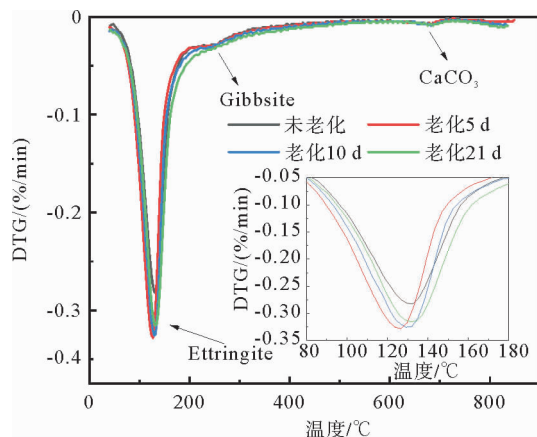


图 9 HB-CSA 水泥不同老化龄期的 DTG 图

Fig. 9 DTG patterns of HB-CSA cement with various aging times

- 报,2017,34(3):675-683.
- LIU Sai,ZHU Deju,LI Anling,et al.Effects of strain rate and temperature on the flexural mechanical properties of alkali resistant glass fabric reinforced cementitious matrix compo-site[J].Acta Materiae Compositae Sinica,2017,34(3):675-683.
- [3] LARNER L J, SPEAKMAN K, MAJUMDAR A J. Chemical interactions between glass fibres and cement[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1976, 20(1): 43-74.
- [4] 王钧,文慧,王志彬.玄武岩纤维增强高强轻骨料混凝土基本力学性能试验[J].建筑科学,2017,33(11):48-53.
- WANG Jun,WEN Hui,WANG Zhibin.Basic mechanical properties experiment of basalt fiber reinforced high-strength light-weight aggregate concrete[J].Building Science,2017,33(11):48-53.
- [5] ÖZTURK B,ARSLAN F,ÖZTURK S.Hot wear properties of ceramic and basalt fiber reinforced hybrid friction materials [J].Tribology International,2007,40(1):37-48.
- [6] FENU L,FORNI D,CADONI E.Dynamic behaviour of cement mortars reinforced with glass and basalt fibres[J].Composites Part B:Engineering,2016,92:142-150.
- [7] IPBUKER,CAGATAY,GULIK,et al.Radiation shielding properties of a novel cement-basalt mixture for nuclear energy applications[J].Nuclear Engineering and Design,2015,284:27-37.
- [8] 胡琳娜,尚德库,李世杰,等.植物纤维/玄武岩纤维复合材料的界面作用机理[J].高分子材料科学与工程,2004(6):29-32.
- HU Linna,SHANG Deku,LI Shijie,et al.Study on the interfacial functionary mechanism of plant fiber/basalt fiber composite material[J].Polymer Materials Science & Engineering,2004(6):29-32.
- [9] WEI B,CAO H,SONG S.Degradation of basalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater[J].Corrosion Science,2011,53(1):426-431.
- [10] LEE J J,SONG J,KIM H.Chemical stability of basalt fiber in alkaline solution[J].Fibers and Polymers,2014,15(11): 2329-2334.
- [11] FORSTER T,SCHEFFLER C,MAEDER E,et al.Dissolution behaviour of model basalt fibres studied by surface analysis methods[J].Applied Surface Science,2014,322:78-84.
- [12] 胡欣欣,杨鼎宜,张帅.环境溶液碱度对混凝土用纤维性能的影响[J].混凝土,2017(10):96-99.
- HU Xinxin,YANG Dingyi,ZHANG Shuai.Impact of the alkalinity of environmental solutions on the properties of fibre used in concrete[J].Concrete,2017(10):96-99.
- [13] 玻璃纤维增强水泥性能试验方法:GB/T 15231—2008 [S].北京:中国标准出版社,2008.
- Test methods for the properties of glassfibre reinforced cement:GB/T 15231—2008[S].Beijing:Standards Press of China, 2008.
- [14] 廖国胜,徐路,廖宜顺.硅灰对硫铝酸盐水泥水化行为的影响机理[J].建筑材料学报,2017,20(6):840-845.
- LIAO Guosheng,XU Lu,LIAO Yishun.Influence of silica fume on the hydration behavior of calcium sulphoaluminate cement[J].Journal of Building Materials,2017,20(6):840-845.
- [15] 张金山.钙矾石形貌调控及其机理研究[D].北京:中国建筑材料科学研究总院,2017.
- ZHANG Jinshan.Study on the regulation of ettringite morphology and its mechanism[D].Beijing:China Building Materials Academy,2017.
- [16] 王培铭,丰曙霞,刘贤萍.水泥水化程度研究方法及其进展[J].建筑材料学报,2005(6):646-652.
- WANG Peiming,FENG Shuxia,LIU Xianping.Research approaches of cement hydration degree and their development[J]. Journal of Building Materials,2005(6):646-652.
- [17] 施锦杰,孙伟.混凝土中钢筋锈蚀研究现状与热点问题分析[J].硅酸盐学报,2010,38(9):1753-1764.
- SHI Jinjie,SUN Wei.Recent research on steel corrosion in concrete[J].Journal of the Chinese Ceramic Society,2010,38 (9):1753-1764.
- [18] SCHEFFLER C,FORSTER T,MADER 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(52/53/54): 2588-2595.

(责任编辑:吕海亮)