

纤维含量和几何尺寸对玄武岩纤维增强混凝土耐久性能的影响研究

杨立君¹, 李 焱², 魏云龙²

(1.山东高速河南发展有限公司,河南 许昌 461000; 2.山东高速集团河南许禹公路有限公司,河南 许昌 461000)

摘 要:氯离子侵蚀是钢筋混凝土结构长期性能退化的主要原因,其与保护层抗渗性和抗拉性能密切相关,为提高混凝土的耐久性本研究开展了玄武岩纤维增强混凝土快速氯离子侵蚀试验及劈裂抗拉强度试验,通过分析不同纤维含量、长度下的玄武岩纤维增强混凝土的性能,确定混凝土抗氯离子渗透性能和劈裂抗拉性能提升的最优纤维掺量和几何尺寸。结果表明:加入 0.1% 的长度为 9 mm 纤维且长径比在 529:1 左右时,短切玄武岩纤维对混凝土的抗氯离子渗透能力和劈裂抗拉强度均有显著提升;纤维的桥联作用改善了混凝土的破坏行为提高了混凝土的抗拉强度,同时由于纤维的不透水性,使得氯离子传输路径受阻以及改善混凝土内孔隙率,使得混凝土抗渗性提高。

关键词:混凝土保护层;耐久性;玄武岩纤维;氯离子扩散系数;抗拉强度

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)11-0233-04

0 引 言

长期以来,混凝土结构的耐久性是困扰其运营维护的难题,受氯离子的侵蚀作用,混凝土结构易发生钢筋锈蚀导致性能退化。随着跨海桥梁的建成和海洋强国战略的提出,混凝土结构的耐久性问题愈发受到重视。为提高混凝土结构的耐久性,改善保护层的抗渗性和抗裂性显得尤为重要。纤维混凝土,作为近年迅速发展的新型复合材料,可以通过纤维的设置提高混凝土抗拉强度和抗渗性,从而改善混凝土的抗裂性,提升结构整体性能。

国内外学者对纤维增强混凝土的力学性能和耐久性开展了大量研究。解国梁等^[4]的研究表明玄武岩纤维的掺入提高了混凝土的抗压强度并减弱了冻融循环对混凝土的破坏。刘茜等^[6]对 12 根短切玄武岩纤维增强混凝土梁的四点弯曲静力试验表明,短切玄武岩纤维能有效改善混凝土的力学性能、较好地抑制裂缝开展,提高混凝土梁的承载力。张野^[5]的试验研究表明混凝土工作性能并非随纤维掺量的

增加而提高,通过对纤维体积掺量为 0.1%~0.35% 的短切玄武岩纤维混凝土的立方体抗压、轴心抗压、劈裂抗拉、抗折试验,掺入长度 30 mm 和直径 15 μm 的纤维,其最佳掺量为 0.1%~0.2%。Liu^[7]等利用数值模型预测纤维增强混凝土氯离子扩散系数,分析发现纤维直径、纤维体积分数,骨料的直径和体积分数等显著影响纤维增强混凝土的氯离子扩散的过程。尽管国内学者通过各种方法研究了纤维及其掺入方式和掺量等对混凝土的抗拉性能和氯离子扩散性能的影响,但由于纤维类型和掺量的不同,纤维混凝土的力学性能呈现一定的复杂性,尤其是缺乏综合考虑纤维含量与几何尺度的最优选择的研究。

本文将通过对不同掺量、不同长度纤维的试块开展玄武岩纤维增强混凝土快速氯离子侵蚀试验及劈裂抗拉强度试验,深入研究对于保护层混凝土抗氯离子渗透性能和劈裂抗拉性能提升最合适的纤维含量和几何尺寸。

1 纤维增强混凝土耐久性试验

为研究纤维含量与几何尺度对混凝土抗拉性能和氯离子扩散性能的协同影响,将通过快速氯离子扩散系数测定试验和劈裂抗拉试验对玄武岩纤维增强混凝土的耐久性分析分析,对纤维含量为 0.05%、0.10%、0.15%,纤维长度为 6、9、12 mm 的试件组合

收稿日期: 2023-12-27

作者简介: 杨立君(1978—), 学士, 工程师, 从事高速公路养护工作。

通信作者: 李焱(1990—), 男, 学士, 工程师, 从事道路交通运输工作。电子信箱: 960090109@qq.com

来进行试验研究。

1.1 原材料及混凝土配合比

水泥采用张家港海螺水泥有限公司海螺牌 P·Ⅱ 52.5 硅酸盐水泥。水泥品质各项指标见表 1。粗骨料采用重庆绿岛源碎石, (5~10)mm : (10~25)mm=3 : 7 连续级配。细骨料采用洞庭湖 2 区中砂, 细度模数 2.72。外加剂采用安徽中铁工程材料科技有限公司 RAWY101 高性能减水剂(缓凝型)。减水剂的各项性能指标如表 2 所列。拌合水采用实验室普通自来水。

表 1 P·Ⅱ 52.5 硅酸盐水泥各项品质指标

凝结时间	抗折强度 / 抗压强度 /				烧失 量 /%	MgO/ %	SO ₃ / %	Cl ⁻ / %
	MPa		MPa					
	3 d	28 d	3 d	28 d				
初凝 190 min; 终凝 4 h	6.4	8.9	35.0	65.1	2.86	0.95	2.19	0.022

表 2 RAWY101 高性能减水剂各项性能指标

减水 率 /%	抗压强 度比 /%		含气 量 /%	泌水率 比 /%	含固 量 /%	Cl ⁻ / %	密度 / (g·cm ⁻³)	pH 值
	7 d 28 d							
32	172	156	3.0	24	23.26	0.07	1.051	3.8

玄武岩纤维采用江苏天龙玄武岩连续纤维股份有限公司玄武岩纤维短切纱 BCS17-230-6、BCS17-

表 4 玄武岩纤维用量表

编号	L6V5	L9V5	L12V5	L6V10	L9V10	L12V10	L6V15	L9V15	L12V15
纤维含量 /%		0.05			0.10			0.15	
纤维长度 /mm	6	9	12	6	9	12	6	9	12

1.2 试件制作及试验方法

1.2.1 试件制作

RCM 试验根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)^[1]中的要求制作 $\phi 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的圆柱体试件, 试件成型 24 h 后进行脱模操作, 并运至养护水箱中, 温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, 养护 21 d, 然后用切割机切割成 $\phi 100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的标准试件, 并继续在养护水箱中养护至试验龄期 28 d。

劈裂抗拉强度试验根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[2]中的要求制作 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的标准正方体试件, 试件成型 24 h 后进行脱模操作, 并运至标准养护室养护至试验龄期 28 d。

230-9、BCS17-230-12, 如图 1 所示。其物理力学指标见表 3 所列。



图 1 短切玄武岩纤维(6mm)

表 3 短切玄武岩纤维的基本参数

参数	数值
单丝直径 / μm	17
密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2700
弹性模量 / $(\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2})$	10 000~11 000
拉伸强度 /MPa	4 150~4 800
长度 /mm	6~12

玄武岩纤维混凝土配合比设计参照《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)^[3]进行。混凝土设计强度等级为 C50, 十组玄武岩纤维混凝土配合比相同, 具体配合比为水 : 水泥 : 细骨料 : 粗骨料 : 减水剂 = 155 : 470 : 708 : 1062 : 4.7。各试件加入的玄武岩纤维的含量和长度见表 4。

1.2.2 试验方法

RCM 试验根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)^[1]的流程规范对养护好的标准试件进行试验。在试验开始前需对标准试件在真空保水机中进行真空保水处理 24 h, 结束后再将试件装入 RCM 试验设备中进行试验。试验结束后, 尽快用压力机将试件沿轴向劈开, 然后在劈开的试件断面立即喷涂浓度为 0.1 mol/L 的 AgNO_3 溶液显色指示剂。约 15 min 后测量各试件的氯离子扩散深度 X_d , 并根据公式(1)计算出氯离子扩散系数 D_{RCM} 。

$$D_{\text{RCM}} = \frac{0.023\ 9 \times (273 + T)^L}{(U - 2)t} \left[X_d - 0.023\ 8 \sqrt{\frac{(273 + T)LX_d}{U - 2}} \right] \quad (1)$$

式中: D_{RCM} 为氯离子扩散系数; T 为阳极溶液的初始温度和结束温度的平均值, $^{\circ}\text{C}$; L 为试件厚度, m ; U 为电压绝对值, V ; t 为验持续时间, h ; X_d 为氯离子扩散深度, mm 。

劈裂抗拉强度试验流程根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[2]的规范来进行操作。宜把垫条及试件安装在定位架上使用。注意因本次试验混凝土采用 C50 混凝土,所以加荷速度宜取 0.05~0.08 MPa/s,本次试验采用 0.08 MPa/s。试验结束后根据公式(2)计算混凝土劈裂抗拉强度值 f_{ts} 。

$$f_{ts} = \frac{2F}{\pi A} = 0.637 \frac{F}{A} \quad (2)$$

2 试验结果及分析

2.1 RCM 试验结果分析

图 2 为氯离子渗透系数随纤维长度不同的变化规律。总体上而言,随着纤维长度由 6 mm 增大到 12 mm,氯离子渗透系数呈先减小后增加,在 9 mm 时氯离子扩散系数达到最小;对比不同体积分数下的氯离子渗透系数可以看出,纤维体积分数为 0.10% 时氯离子渗透系数最低,与文献[5]中的结论一致。纤维体积分数为 0.10% 时,纤维不容易发生团聚现象,使混凝土更加密实。不过,值得注意的是纤维体积分数大于 0.15% 后,氯离子扩散系数比不加入纤维的大,说明加入体积分数为 0.15% 的纤维会降低混凝土的抗氯离子渗透能力。其主要原因是过量体积纤维的加入会发生团聚行为,导致混凝土中有害孔增多,孔隙率增加。图 3 为不同纤维含量下随着纤维长度变化氯离子扩散系数的变化规律图,可以发现,加入体积分数 0.10%、长度为 9 mm 的玄武岩纤维对混凝土抗氯离子渗透能力的提升最明显。图 4 展示了不同长径比下体积分数变化与氯离子扩散系数变化的规律,可以看出长径比约为 529:1 对混凝土抗氯离子渗透能力有比较好的提升,低于或高于这个数值则提升效果不明显。综上所述,加入纤维含量为 0.10%、纤维长度为 9 mm 且长径比约为 529:1 的玄武岩纤维对混凝土的抗氯离子渗透能力提升比较显著。

2.2 劈裂抗拉试验分析

图 5 为不同纤维长度下随着体积分数变化劈裂抗拉强度的变化规律图,可以看出体积分数为 0.05%、0.10% 和 0.15% 时,抗拉强度随纤维长度增大

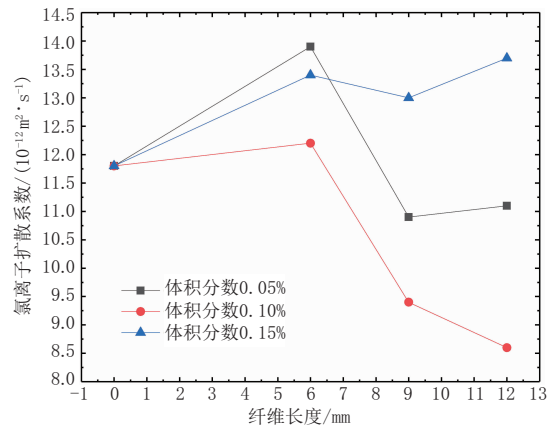


图 2 不同纤维长度下氯离子扩散系数变化

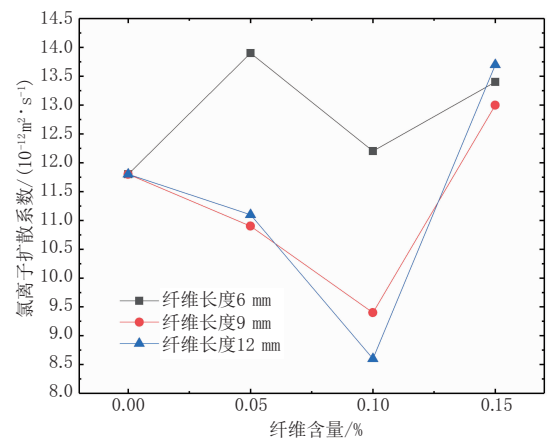


图 3 不同纤维含量下氯离子扩散系数变化

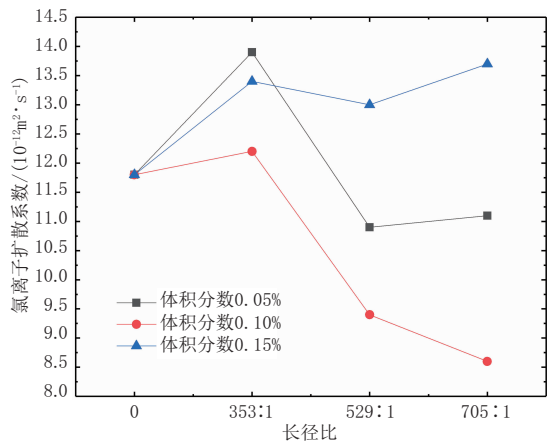


图 4 不同长径比下氯离子扩散系数变化

呈先增加后减少的趋势,其中长度为 9 mm 时的劈裂抗拉强度最大。可见纤维对混凝土抗拉能力的提升最明显,纤维的加入提高混凝土致密性进而增强混凝土抗拉强度,但过长或过短的纤维则使得孔隙率增加,导致抗拉强度减弱。从不同的体积分数可以看出,纤维体积分数为 0.10%、长度为 6 mm 和 9 mm 时,劈裂抗拉强度与未不添加纤维时有所增大,而 0.05% 和 0.15% 两个体积分数时,只有体积分数为 0.05%、长度 9 mm 时,抗拉强度较未添加纤维时增

大,其余均减小。尽管纤维的加入能通过其桥联作用改变混凝土抗拉性能,但纤维的加入也将导致砂浆内的有害孔隙增多而削弱砂浆的力学性能。对于混凝土抗拉性能,纤维掺量与长度、长径比须有最优组合,才能发挥纤维改善混凝土抗拉性能的作用。图6的不同纤维含量的混凝土劈裂抗拉强度随纤维长度变化的规律可见,加入体积分数0.10%、长度为9 mm的玄武岩纤维对混凝土抗拉强度的提升最明显,这与文献[11-13]中的所得规律是相似的。在混凝土中加入体积分数0.10%玄武岩纤维后,其较好的变形能力使得纤维能够更迅速地分担荷载,从而有效延缓裂纹的发展。与此同时,纤维在裂纹产生时能够承担一部分拉应力,导致应力在裂纹附近重新分布。这一机制有效地约束了裂纹的进一步扩展,使得裂缝周围的混凝土仍能够承受一部分荷载,从而减缓了裂纹的生长速度^[11]。在混凝土的早期阶段,混凝土强度尚未完全发展,而纤维与混凝土基体的黏结效应相对较弱。试件的强度主要受到纤维分散情况的影响,纤维分散性好的情况下,增强效果更显著。纤维长度的选择也对混凝土性能产生重要影响,较长的纤维在水泥基体中的分散较差,而9 mm长度的纤维在后期能够起到较好的黏结增强作用,表现出最优的抗拉性能^[13]。故加入体积分数0.10%、长度为9 mm的玄武岩纤维对混凝土抗拉强度的提升明显。图7所示为不同长径比下随着体积分数变化劈裂抗拉强度的变化规律,可以看出长径比约为529:1时对混凝土抗拉强度有比较好的提升,低于或高于这个数值则提升效果不明显甚至有反作用。综上所述,加入纤维含量为0.10%、纤维长度为9 mm且长径比约为529:1时的玄武岩纤维对混凝土的抗拉强度提升比较显著。

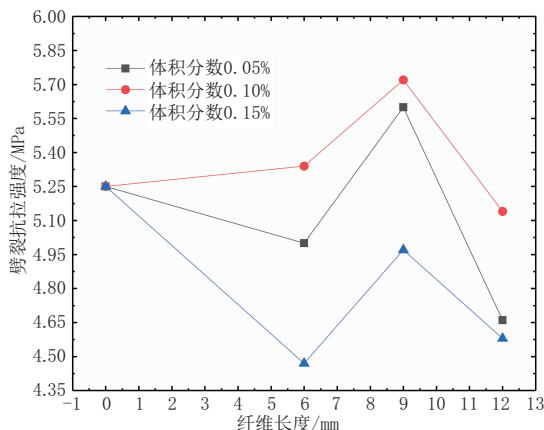


图5 不同纤维长度下劈裂抗拉强度的变化

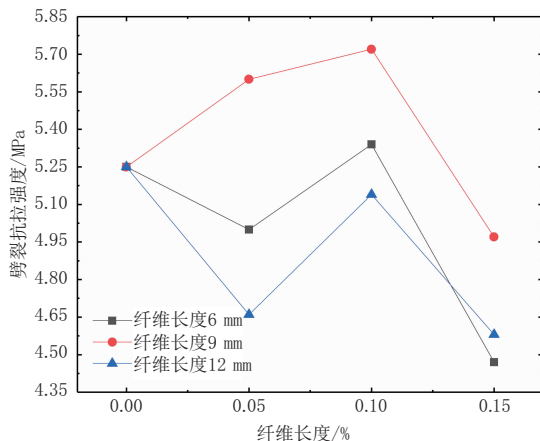


图6 不同纤维含量下劈裂抗拉强度的变化

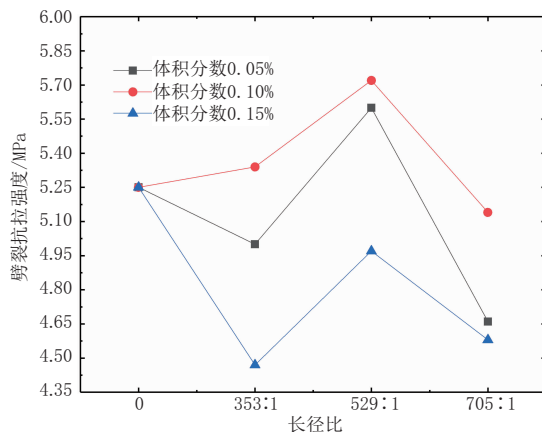


图7 不同长径比下劈裂抗拉强度的变化

3 结 语

通过玄武岩纤维增强混凝土快速氯离子侵蚀试验及劈裂抗拉强度试验,对不同纤维含量和几何尺寸下的玄武岩纤维加入混凝土对其耐久性能进行了研究,得到如下主要结论。

- (1)加入纤维含量为0.10%、纤维长度为9 mm且长径比约为529:1时的玄武岩纤维对混凝土的抗氯离子渗透能力提升比较显著。
- (2)加入纤维含量为0.10%、纤维长度为9 mm且长径比在529:1左右的玄武岩纤维对混凝土的抗拉强度提升比较显著。
- (3)作为参考加入纤维含量为0.10%、纤维长度为9 mm且长径比约为529:1时的玄武岩纤维对混凝土保护层的性能提升作用最明显。

参考文献:

- [1] GB/T 50082—2009,普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S].
- [2] GB/T 50081—2019,普通混凝土力学性能试验方法标准[S].
- [3] JGJ 55—2011,普通混凝土配合比设计规程[S].
- [4] 解国梁,申向东,刘金云,等.短切玄武岩纤维对混凝土抗氯离子侵

- [2] 陈超,范子然,李闯民.基于高黏剂改性透水沥青混合料的工艺对比研究[J].中外公路,2020,40(3):237-240.
- [3] 胡芙蓉. 沥青特征官能团对高黏改性沥青及混合料的影响研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2021.
- [4] 钟华斌.钢桥面铺装层 SMA-10 沥青混合料材料设计及使用性能试验研究[D].合肥:合肥工业大学,2023.
- [5] 杨振富.高弹改性沥青 SMA-10 路用性能研究及其在桥面铺装中的应用[J].北方交通,2019(7):36-39.
- [6] Fakhri M, Kheiry P T, Mirghasemi A A. Modeling of the permanent deformation characteristics of SMA mixtures using discrete element method[J]. Road Materials and Pavement Design, 2012, 13(1):67-84.
- [7] Voskuilen J L M, Verhoef P. Causes of renmatre Raveling Value in Porous asphalt[C]. IPARTLM NA. Sith ntenclion IILEM Symposim on Perfomance Testing and Ervlation of Bituminous Materials. Paris: RILEM Publications SARL.2003:191-197.
- [8] 王玉恒. 大型钢桥桥面铺装高黏沥青及混合料的研究[D]. 济南:山东建筑大学,2016.
- [9] Wang J, Ji B, Chen B, *et al.* Application of high-viscosity modified asphalt mixture in curved bridge pavement[J]. Sustainability, 2023, 15(4).
- [10] Khedmati M, Khodaii A, Haghshenas H F. A study on moisture susceptibility of stone matrix warm mix asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2017(30):42-49.
- [11] Fakhri M, Shahryari E. The effects of Nano Zinc Oxide (ZnO) and Nano Reduced Graphene Oxide(RGO) on moisture susceptibility property of Stone Mastic Asphalt (SMA)[J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 15:e00655.
- [12] Ai C F, Qiu S, Xin C F, *et al.* Evaluation and optimisation of stone matrix asphalt(SMA-13) mix design using weight-matrix method[J]. Road Materials and Pavement Design, 2016, 17(4):1-10.

(上接第 236 页)

- 蚀性能的影响[J]. 复合材料科学与工程, 2020(12):10-14.
- [5] 张野.短切玄武岩纤维混凝土基本力学性能研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2011.
- [6] 刘茜,张津滔,高子祁,等.短切玄武岩纤维混凝土简支梁正截面受弯性能试验研究[J].建筑结构学报,2022,43(12):189-198.
- [7] Liu J, Jia Y, Wang J. Calculation of chloride ion diffusion in glass and polypropylene fiber-reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 215: 875-885.
- [8] Niu D, Huang D, Fu Q. Experimental investigation on compressive strength and chloride permeability of fiber-reinforced concrete with basalt-polypropylene fibers[J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(10):2278-2288.
- [9] 王振山,李亚坤,韦俊,等.玄武岩纤维混凝土氯盐侵蚀行为及力学性能试验研究[J].实验力学,2020,35(6):1060-1070.
- [10] 陈亚迪,洪丽,蒋津,等.水泥砂浆基体中玄武岩纤维的拔出试验研究[J].硅酸盐通报,2019,38(9):2985-2991.
- [11] 戴勇.玄武岩纤维对混凝土抗压和劈裂抗拉强度的影响[J].合成纤维,2023,52(10):75-78.
- [12] 谢金东,武亮,刘志洪等.短切玄武岩纤维混凝土力学性能试验研究[J].贵州大学学报(自然科学版),2022,39(4):105-109,117.
- [13] 王志杰,徐成,王嘉伟,等.玄武岩纤维长度对喷射混凝土力学性能影响规律研究[J].隧道建设(中英文),2020,40(增刊1):9-16.