

氧化铝纤维增强混凝土力学性能试验研究

王伟涛¹, 洪刚^{2,3}, 贺盛文², 夏伟^{4*}

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 云南建投第四建设有限公司, 陕西 西安 710082; 3. 西安市浐灞生态区空工机场工程技术咨询部, 陕西 西安 710051; 4. 空军工程大学航空工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:为探究氧化铝纤维对混凝土力学性能的影响, 制作了不同氧化铝纤维长度(4 mm、8 mm、12 mm、16 mm)及体积掺量(0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%)的氧化铝纤维增强混凝土试件, 并且分别对其开展了抗压及抗折性能测试。结果表明, 随着氧化铝纤维体积掺量的增加, 混凝土的抗压强度和抗折强度均呈现出先逐渐增加而后有所下降的变化趋势; 掺入长度为 8 mm 的氧化铝纤维比另外 3 种长度的氧化铝纤维对于混凝土抗压、抗折强度的提升作用更加明显。当氧化铝纤维长度为 8 mm、体积掺量为 0.2% 时, 氧化铝纤维增强混凝土的抗压强度相较于素混凝土提高了 10.59%; 当氧化铝纤维长度为 8 mm、体积掺量为 0.3% 时, 氧化铝纤维增强混凝土的抗折强度相较于素混凝土提高了 26.18%。通过微观形貌分析可知, 氧化铝纤维能够与混凝土基体紧密结合, 充分发挥阻裂作用、桥接作用, 进而有效改善混凝土材料的基本力学性能。

关键词: 混凝土; 氧化铝纤维; 抗压强度; 抗折强度; 折压比; 微观形貌

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)S1-0124-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S1.023

Experimental study on mechanical properties of alumina fiber reinforced concrete

WANG Wei-tao¹, HONG Gang^{2,3}, HE Sheng-wen², XIA Wei^{4*}

(1. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China;

2. Yunnan Construction Investment Fourth Construction Co., Ltd., Xi'an 710082, China;

3. Konggong Airport Engineering Technical Consulting Department, Xi'an Chanba Ecological Zone, Xi'an 710051, China;

4. School of Aeronautical Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In order to explore the influence of alumina fibers on the mechanical properties of concrete, alumina fiber reinforced concrete specimens with different lengths (4 mm, 8 mm, 12 mm, 16 mm) and different volume additions (0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%) of alumina fibers are manufactured, and their compressive and flexural properties are tested respectively. Study results indicate that with the increase of alumina fiber dosage, the compressive strength and flexural strength of concrete show a trend of gradually increasing firstly and decreasing then. In general, the addition of alumina fibers with a length of 8 mm has a more significant effect on improving the compressive and flexural strength of concrete than the addition of alumina fibers with other three lengths. The compressive strength of alumina fiber reinforced concrete when alumina fiber with a length of 8 mm is added in a volume content of 0.2% is 10.59% higher than that of plain concrete. The flexural strength of alumina fiber reinforced concrete when alumina fiber with a length of 8 mm is added in a volume content of 0.3% is 26.18% higher than that of plain concrete. Through microscopic morphology analysis, it can be concluded that alumina fibers can closely bond with concrete matrix, fully exert their crack resistance and bridging effects, and effectively improve the basic mechanical properties of concrete materials.

Key words: concrete; alumina fiber; compressive strength; flexural strength; flexural compression ratio; microstructural morphology

混凝土是民用基础设施和军事防护工程中应用最广泛的建筑材料之一。传统混凝土作为一种复杂的非均质、准脆性水泥基复合材料, 存在韧性差、易开裂、抗拉强度低等自身缺陷, 难以很好地满足现代工程建设的需求^[1]。伴随着材料科学的日益进步, 混凝土不断融合新技术、新方法与新工艺, 正在加速

向超高强、环保型、智能化方向发展。

近年来, 纤维增强混凝土在土木工程以及交通运输等领域变得越来越流行, 掺加纤维已经成为提高混凝土力学性能的一种重要手段^[2]。到目前为止, 许多类型的纤维被应用于混凝土材料中, 常见的纤维包括钢纤维^[3-5]、碳纤维^[6-8]、玄武岩纤维^[9-12]

收稿日期: 2024-01-23; 修回日期: 2024-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(51908548)

作者简介: 王伟涛(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为地铁高架车站站房设计, WwtWwt12321@163.com; 夏伟(1996-), 男, 博士生, 研究方向为防护工程结构与材料, 通讯联系人, xiaweifeu@163.com。

等。但是在工程实践中,钢纤维容易锈蚀,导致钢纤维增强混凝土耐久性不足,而且结构表层的钢纤维难免会使人员和设备受到损害^[13];碳纤维表面光滑,与混凝土基体的粘结性能差,在强烈外荷载作用下,碳纤维增强混凝土容易发生界面失效破坏^[14];玄武岩纤维掺量较大的新拌混凝土工作性差,纤维的均匀分散无法实现,造成施工困难^[15]。值得关注的是,近年来,氧化铝纤维作为一种新型的高性能无机增强材料而备受青睐。氧化铝纤维的主要成分为氧化铝的多晶质体,该种纤维耐化学腐蚀性能强,弹性模量大,抗拉强度高,而且其表面活性较好,易与树脂、金属、陶瓷等基体复合,从而形成结构良好、性能优异的复合材料,已经被研究人员应用于多种领域^[16-19]。由此可见,氧化铝纤维在复合材料的改性增强方面具有较大的应用潜力和发展前景。然而,现有关于氧化铝纤维在水泥基复合材料中的研究与报道相对较少,有必要针对氧化铝纤维增强混凝土的性能表现以及氧化铝纤维对混凝土的改性机制开展深入的研究,从而为氧化铝纤维增强混凝土在实际工程建设中的推广应用提供一定的数据支持与理论参考。

有鉴于此,本文通过在素混凝土中掺加氧化铝纤维,设计制备出不同氧化铝纤维长度(4 mm、8 mm、12 mm、16 mm)及体积掺量(0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%)的氧化铝纤维增强混凝土,并且对其开展了力学性能测试与分析,研究了氧化铝纤维掺量和长度对混凝土抗压强度、抗折强度、折压比等基本力学指标的影响规律,并基于扫描电镜微观测试,阐释了氧化铝纤维对混凝土材料的作用机理。

1 试验材料与方法

1.1 试件制备

原材料:水泥(C)为普通硅酸盐水泥(P·O 42.5),3 d 抗压强度 24.2 MPa,28 d 抗压强度 53.9 MPa;3 d 抗折强度 5.5 MPa,28 d 抗折强度 8.0 MPa。细骨料(S1)为洁净中砂,堆积密度 1 460 kg/m³,细度模数 2.7。粗骨料(S2)为石灰岩碎石,粒径 5~22 mm,表观密度 2 695 kg/m³,堆积密度 1 650 kg/m³。水(W1)为实验室的普通自来水。减水剂(W2)为高效能减水剂,减水率为 25%。选用美国 3M 公司生产的氧化铝纤维,型号为 312 900d Nextel,短切长度分别为 4 mm、8 mm、12 mm、

16 mm。

依据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011),通过进行多次试配与调整,最终确定混凝土的配合比如表 1 所示。

表 1 混凝土的配合比

编号	L/ mm	F/ %	C/ (kg· m ⁻³)	S1/ (kg· m ⁻³)	S2/ (kg· m ⁻³)	W1/ (kg· m ⁻³)	W2/ (kg· m ⁻³)
PC	—	—	440	559	1251	154	4.4
1AC4	4	0.1	440	559	1251	154	4.4
1AC8	8						
1AC12	12						
1AC16	16						
2AC4	4	0.2	440	559	1251	154	4.4
2AC8	8						
2AC12	12						
2AC16	16						
3AC4	4	0.3	440	559	1251	154	4.4
3AC8	8						
3AC12	12						
3AC16	16						
4AC4	4	0.4	440	559	1251	154	4.4
4AC8	8						
4AC12	12						
4AC16	16						
5AC4	4	0.5	440	559	1251	154	4.4
5AC8	8						
5AC12	12						
5AC16	16						

注:L代表纤维长度,F代表纤维掺量。

表 1 中,PC 表示未掺加氧化铝纤维的素混凝土,1AC4 表示掺有 0.1% 体积率、短切长度为 4 mm 氧化铝纤维的氧化铝纤维增强混凝土,其余编号代表的意义以此类推。在原材料拌合过程中,为确保氧化铝纤维在基体中均匀分散,需将其少量多次地加入搅拌机中并适当延长搅拌时间。经过 28 d 标准养护后,2 种规格的混凝土试件制备完成,其中尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件用于抗压试验,尺寸为 150 mm×150 mm×600 mm 的棱柱体试件用于抗折试验。

1.2 试验方法

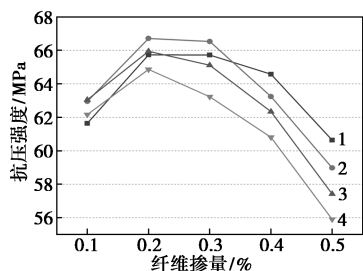
参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)进行混凝土的抗压、抗折试验。抗压试验使用无锡德佳意试验仪器有限公司生

产的 DYE-3000S 型全自动压力试验机开展,试验时加荷速度取 0.8 MPa/s,控制荷载连续均匀施加,直至试块破坏,停止加载并记录试验数据。抗折试验采用无锡新路达仪器设备有限公司制造的 TZA-100 型电液式试验机进行,试验时加荷速度取 0.08 MPa/s,采取双点加荷的方式施加荷载,直至试件破坏,停止加载并记录试验数据。为防止测试结果存在较大的离散性而造成有效数据不足,每种类型的混凝土试件在进行抗压、抗折试验时,需要取 3 个试件进行重复试验,并以 3 个试件测值的算术平均值作为该组试件的强度测试结果。

2 结果与讨论

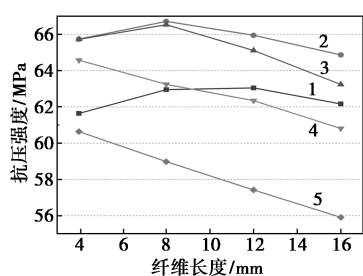
2.1 抗压强度

分别以氧化铝纤维体积掺量和氧化铝纤维长度作为研究变量,不同掺量及长度的氧化铝纤维增强混凝土试件抗压强度的试验结果如图 1 和图 2 所示。



1—4 mm;2—8 mm;3—12 mm;4—16 mm

图 1 抗压强度随氧化铝纤维掺量的变化



1—0.1%;2—0.2%;3—0.3%;4—0.4%;5—0.5%

图 2 抗压强度随氧化铝纤维长度的变化

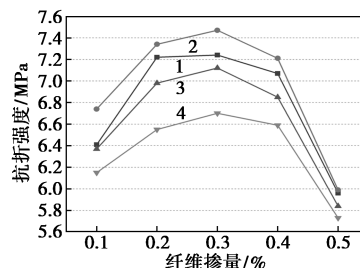
由图 1、图 2 可知,掺入氧化铝纤维在一定程度上改变了混凝土的抗压强度,混凝土抗压强度受到氧化铝纤维的长度及掺量 2 种因素的影响;掺量-强度曲线整体形状为倒“U”形,随着氧化铝纤维掺量的增大,混凝土抗压强度先增大后减小,当氧化铝纤维掺量处于较低水平时,例如纤维体积掺量为 0.1% 的试验组,掺入不同长度的氧化铝纤维(依次为 4 mm、8 mm、12 mm、16 mm)对混凝土抗压强度

分别具有 2.18%、4.36%、4.51%、3.05% 的提升效果,因此,在较低掺量下,纤维即可对混凝土基体性能有所强化;继续提高氧化铝纤维掺量,当其体积掺量为 0.2% 时,氧化铝纤维长度为 8 mm、12 mm、16 mm 的试验组抗压强度达到最大值,并且相较于素混凝土分别提升了 10.59%、9.32%、7.53%;进一步增大氧化铝纤维的体积掺量,以上 3 种纤维长度试件的抗压强度会略微降低,而纤维长度为 4 mm 试验组抗压强度则缓慢增长,至掺量为 0.3% 后也开始下降。

综合来看,在所有试验组之中,抗压强度最大的为纤维长度 8 mm、纤维掺量 0.2% 试验组;通过图中曲线位置进行分析可得,在氧化铝纤维体积掺量小于 0.3% 时,8 mm 长度的试验组明显优于其他试验组,在体积掺量大于 0.3% 时,4 mm 长度的试验组明显优于其他试验组;纤维长度过长及纤维掺量过高都对试件抗压强度产生了削弱,纤维掺量大于 0.4%、纤维长度大于 8 mm 将会使试件强度低于素混凝土。

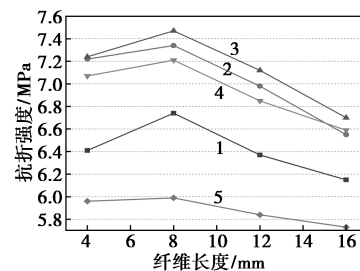
2.2 抗折强度

分别以混凝土基体内不同氧化铝纤维体积掺量与纤维长度为自变量,氧化铝纤维混凝土试件的抗折强度如图 3 和图 4 所示。



1—4 mm;2—8 mm;3—12 mm;4—16 mm

图 3 抗折强度随氧化铝纤维掺量的变化



1—0.1%;2—0.2%;3—0.3%;4—0.4%;5—0.5%

图 4 抗折强度随氧化铝纤维长度的变化

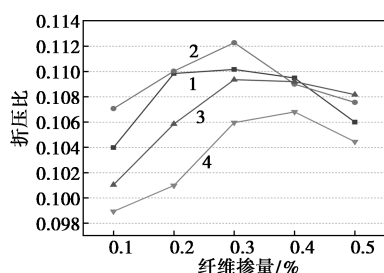
由图 3、图 4 可知,掺入氧化铝纤维在一定程度上改变了混凝土的抗折强度,氧化铝纤维的掺量与

长度均会对抗折强度产生影响;以体积掺量为横坐标,抗折强度曲线的基本形态大致呈现为倒置的“V”形,伴随氧化铝纤维掺量的增大,不同长度的氧化铝纤维混凝土抗折强度的影响表现出先增大后减小的特点,且长度为4 mm和8 mm时,抗折强度曲线的斜率大于12 mm与16 mm的试件组,这表明在氧化铝纤维长度过长时,纤维掺量的大小对于整体抗折强度的变化影响较低;长度为12 mm与16 mm、体积掺量为0.4%与0.5%的部分试验组抗折强度反而低于素混凝土,较素混凝土抗折强度的下降幅度在1.41%~9.71%之间,这表明纤维过长及掺量过大都将降低氧化铝纤维增强混凝土的抗折性能。

整体而言,在试验范围之内,氧化铝纤维体积掺量0.3%、长度8 mm试验组的抗折强度明显高于其他组试件,表现出最佳的抗折性能。

2.3 折压比

折压比即混凝土抗折强度与抗压强度之比,可以表征混凝土材料的韧性^[20]。氧化铝纤维增强混凝土的折压比见图5。



1—4 mm;2—8 mm;3—12 mm;4—16 mm

图5 氧化铝纤维增强混凝土的折压比

由图5可知,氧化铝纤维对于混凝土试件抗压强度与抗折强度的提升程度不尽相同,以2种静态强度提升幅度最大的2组试件进行对比,氧化铝纤维的掺入对于抗折强度的提升效果近乎为抗压强度提升效果的2.5倍;在氧化铝纤维体积掺量为0.3%时,4 mm、8 mm两种纤维长度的试件折压比曲线达到极值,在氧化铝纤维体积掺量为0.4%时,12 mm、16 mm两种纤维长度的试件折压比曲线达到极值;对4种不同纤维长度试件的折压比曲线进行综合分析,当氧化铝纤维体积掺量从0.4%提升为0.5%时,4种不同纤维长度试件的折压比曲线降低幅度在1.3%~3.2%之间,这也说明氧化铝纤维的掺量并不是越多越好,过量的氧化铝纤维降低了混凝土试件的韧性。

3 微观机理分析

基于上述抗压、抗折试验数据分析,又利用扫描电镜对氧化铝纤维增强混凝土的微观形貌进行了测试。扫描电镜测试所用试样选取抗压试验中试件破坏后的碎块制备,样品准备方法为:在混凝土试件受压破坏后的中间部位选取粒径大约为5 mm的碎块,将所选样品用无水乙醇清洗、浸泡,48 h后取出并置于干燥箱内烘干备用。扫描电镜测试时,需首先对样品表面进行镀金处理,以获得更高质量的观察效果,测试结果如图6、图7所示。

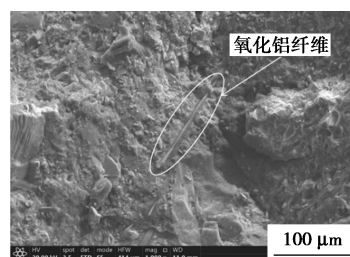


图6 分布在混凝土基体中的氧化铝纤维

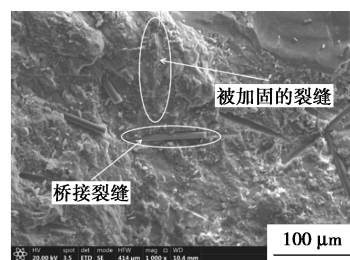


图7 氧化铝纤维发挥增强效果

混凝土是由水泥浆体、粗细骨料和界面过渡区等组成的多相复合材料,分析可知,与砂石骨料相似,分散在混凝土基体中的氧化铝纤维大部分被水泥水化产物所包裹,氧化铝纤维与混凝土基体之间粘结紧密。混凝土本身作为一种多相复合材料,从结构上可以大致将其划分为框架体系与填充体系,水泥水化产物作为混凝土框架体系的构造成分,是通过已有的骨料作为搭建框架体系的平台,利用平台为基础建立起包裹框架体系;混凝土内部骨料的主要作用为在框架体系形成的前期为其提供反应平台,并在反应开始后填充框架体系的空余部分,使得材料的整体结构更加紧致密实。氧化铝纤维增强混凝土中的氧化铝纤维介于框架体系与填充体系之间,其作为水泥基复合材料的增强组分,具有优异的强度特性,在基体之中将互相分离的区域桥接融合,同时连接不同单位区块下的框架体系,使得混凝土基体框架体系的稳定性能获得强化。同时,氧化铝

纤维还可以作为混凝土的“修补剂”，在一定程度上将其存在的孔洞、缝隙等缺陷填补密实。综上所述，氧化铝纤维能够与混凝土基体紧密结合，充分发挥阻裂、桥接作用，其在混凝土基体之中既发挥了框架性能，又发挥了修补性能，进而有效提升混凝土材料的基本力学性能。

4 结论

通过制备氧化铝纤维增强混凝土并对其进行静力特性试验，研究了氧化铝纤维掺量和长度对混凝土抗压强度、抗折强度、折压比的影响规律，并基于扫描电镜微观测试，分析了氧化铝纤维对混凝土的作用机理。所得主要结论如下：

(1) 掺入适量体积与长度的氧化铝纤维对混凝土的抗压、抗折性能具有增强效果，在本试验中，纤维掺量 0.2%、长度 8 mm 的试验组表现出最佳的抗压与抗折强度。

(2) 氧化铝纤维长度过长和掺量过大都会对混凝土的力学性能产生负面影响，并且随着纤维掺量与长度的增大，其所造成的不利效果有所增强。

(3) 氧化铝纤维增强混凝土的抗折性能比抗压性能提升幅度更大，其抗压强度相较于素混凝土最大提高了 10.59%，抗折强度相较于素混凝土最大提高了 26.18%。

(4) 氧化铝纤维能够与混凝土基体紧密结合，充分发挥阻裂、桥接作用，进而有效提升混凝土材料的力学性能。

参考文献

- [1] Lu S, Xia W, Bai E L, *et al.* Interfacial modification; The dynamic compression properties and enhancement mechanism of concrete added with micro-nano hierarchical carbon-based fiber [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 247: 110340.
- [2] 菅士良, 侯莉娜, 黄炜, 等. 纤维混凝土抗冻性能研究现状及展望 [J]. *应用化工*, 2023, 52(11): 3153-3157, 3162.
- [3] 卿龙邦, 毕梦迪, 慕儒, 等. 水平定向钢纤维混凝土的制备与力学性能 [J]. *硅酸盐学报*, 2023, 51(5): 1210-1218.
- [4] Niu Y F, Wei J X, Jiao C J. Crack propagation behavior of ultra-high-performance concrete (UHPC) reinforced with hybrid steel fibers under flexural loading [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 294: 123510.
- [5] 张冬梅, 张鑫. 基于直接拉伸试验的钢纤维混凝土损伤特性研究 [J]. *中国公路学报*, 2023, 36(4): 146-156.
- [6] 夏伟, 陆松, 许金余, 等. 碳纳米管/碳纤维对混凝土静力特性的影响及微观机理分析 [J]. *化工新型材料*, 2022, 50(9): 278-281.
- [7] Akbar A, Kodur V K R, Liew K M. Microstructural changes and mechanical performance of cement composites reinforced with recycled carbon fibers [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 121: 104069.
- [8] 王志航, 白二雷, 许金余, 等. 聚合物改性碳纤维增强混凝土的动态压缩力学性能 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(3): 1586-1597.
- [9] 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.
- [10] 王钧, 方雪琪, 焦裕裕, 等. 玄武岩纤维混凝土板冲切试验与承载力分析 [J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(1): 100-110.
- [11] 王学鹏, 王亮, 王浩, 等. 玄武岩纤维支护砂浆动态力学性能 [J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(30): 13078-13084.
- [12] 李福海, 高浩, 唐慧琪, 等. 短切玄武岩纤维混凝土基本性能试验研究 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(2): 419-427.
- [13] Granju J L, Balouch S U. Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks [J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(3): 572-577.
- [14] Yao H W, Sui X H, Zhao Z B, *et al.* Optimization of interfacial microstructure and mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites via carbon nanotube sizing [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 347: 583-590.
- [15] 许金余, 赵德辉, 范飞林. 纤维混凝土的动力特性 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013.
- [16] 张翔, 甘春雷, 黎小辉, 等. 氧化铝纤维含量对陶瓷基摩擦材料性能的影响 [J]. *材料导报*, 2018, 32(20): 3517-3523.
- [17] Song X L, Zhang K C, Song Y, *et al.* Morphology, microstructure and mechanical properties of electrospun alumina nanofibers prepared using different polymer templates: A comparative study [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 829: 154502.
- [18] 戴小亚. 连续氧化铝纤维增强铝基复合材料残余应力表征与调控 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [19] 郑周. 氧化铝纤维增强陶瓷基复合材料的制备及力学性能研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
- [20] Xia W, Lu S, Bai E L, *et al.* Strengthening and toughening behaviors and dynamic constitutive model of carbon-based hierarchical fiber modified concrete: Cross-scale synergistic effects of carbon nanotubes and carbon fiber [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 63: 105482. ■