

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20251541

自密实水工混凝土的聚丙烯纤维改性效果及机理研究

张德敏

(华北电力大学基建处, 北京 102206)

摘要: 为提升自密实水工混凝土的力学性能,本研究聚焦聚丙烯纤维的掺入改性作用,系统探究纤维参数(长度、掺量)及养护时间对其抗压强度、破坏应变及微观结构演化的影响规律。通过设计不同聚丙烯纤维参数(纤维长度、掺量)及养护时间的试验方案,结合宏观力学测试与微观结构表征技术进行多尺度研究。宏观层面,采用标准抗压强度试验及破坏应变测定,分析不同参数下混凝土的力学响应;微观层面,依托 SEM 扫描电镜与 CT 扫描技术,揭示纤维与水化凝胶体系的协同作用机制。聚丙烯纤维通过“裂隙桥接”与“能量缓冲”机制显著提升了混凝土的力学性能。当纤维掺量为 0.8% (体积掺量) 时,抗压强度较基准组最高提升 80.3%;抗压强度与破坏应变均随纤维掺量增加呈现先增后减趋势,短切纤维因更优的均匀分散性表现出最佳增益效果。微观分析显示,纤维与水化产物协同形成致密的三维网络结构,有效延缓了破坏进程;然而,当聚丙烯纤维的掺量超过临界值时,团聚效应会削弱自密实水工混凝土的整体力学性能。以 0.8% 掺量、短切纤维形态为关键参数的自密实水工混凝土设计方案,可显著提升力学性能。聚丙烯纤维与水化产物的协同效应是性能改善的核心,同时需平衡纤维掺量与分散性以避免团聚。本研究为水利工程中自密实混凝土的强度提升与耐久性优化提供了理论依据和实践指导。

关键词: 水工结构; 自密实混凝土; 聚丙烯纤维; 材料性能; 机理

中图分类号: TV431

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0104-04

Study on Modification Effect and Mechanism of Polypropylene Fibers on Self-Compacting Hydraulic Concrete

ZHANG De-min

(Construction Office, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: This study focuses on the modification effect of incorporating polypropylene fibers to enhance the mechanical properties of self-compacting hydraulic concrete. It systematically investigates the influence patterns of fiber parameters (length and dosage) and curing time on its compressive strength, failure strain, and microstructural evolution. Experimental programs with varying polypropylene fiber parameters (length and dosage) and curing durations were designed. Multi-scale analysis was carried out through macroscopic mechanical testing and microstructural characterization techniques. At the macro level, standard compressive strength tests and failure strain measurements were conducted to analyze the mechanical response to different parameters. At the micro level, scanning electron microscopy (SEM) and computed tomography (CT) scanning techniques were employed to investigate the synergistic mechanisms between fibers and hydration products. Polypropylene fibers significantly improved the mechanical performance of the concrete through “crack bridging” and “energy dissipation” mechanisms. When the fiber dosage reached 0.8%, the compressive strength increased by up to 80.3% compared to the control group. Both compressive strength and failure strain initially increased and then decreased with increasing fiber content. Short-cut fibers exhibited the best performance due to their superior dispersion uniformity. Microstructural analysis revealed that the fibers and hydration products formed a dense three-dimensional network, effectively delaying the failure process. However, fiber agglomeration occurred when the dosage exceeded the optimal level, which weakened the overall mechanical performance. A self-compacting hydraulic concrete mix design incorporating 0.8% fiber dosage and short-cut fibers can significantly enhance the mechanical performance. The synergistic effect between fibers and hydration products is central to performance improvement, while balancing fiber dosage and dispersion is essential to prevent agglomeration. This research provides a theoretical foundation and practical guidance for improving the mechanical performance of self-compacting hydraulic concrete in hydraulic engineering applications.

Key words: hydraulic structures; self-compacting concrete; polypropylene fibers; material properties; mechanism

收稿日期: 2025-09-03, **修回日期:** 2025-09-27, **接受日期:** 2025-10-10

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2025HGTB0189)

作者简介: 张德敏(1992-),男,硕士研究生,研究方向为建筑材料,E-mail:demzzz@126.com

1 引言

自密实水工混凝土(SCC)是一种高流动性、高稳定性混凝土,无需振捣即可依靠自重填充模板、通过钢筋间隙实现均匀密实成型^[1]。近年来,因能解决复杂结构的施工难题,且具备施工高效、降噪、避免过振缺陷等优势,SCC 被广泛引入水利水电工程复杂结构,如大坝面板、地下洞室和水工隧洞的施工中^[2]。SCC 作为水工结构的核心材料,承担着抵抗围岩压力、防止渗漏及延缓环境侵蚀等多重功能^[3]。在服役过程中,混凝土易产生裂缝,导致结构强度下降、渗漏风险增加甚至引发局部破坏,严重威胁工程安全性^[4]。因此,如何提升 SCC 抗裂性能与力学稳定性,是水利工程领域亟待解决的关键技术难题之一。为保持水工混凝土结构的承载能力和长期稳定性,采用外加剂提升混凝土的性能具有极为重要的作用^[5]。纤维增强混凝土(FRC)因其优异的抗裂性、韧性和耐久性,逐渐成为改善传统水工混凝土性能的重要方向^[6]。聚丙烯纤维具有密度低、耐腐蚀、易分散、成本适中等优点,在水泥基材料中应用广泛,对提升混凝土的抗拉强度、抗渗透性和抗冲磨性能有重要作用^[7]。然而,针对自密实水工混凝土这一特殊应用场景,聚丙烯纤维的加固效果及机理研究仍显不足。对此,本文制备了纤维增强自密实水工混凝土(FRSHC),通过试验结果揭示聚丙烯纤维对混凝土强度、抗裂性及耐久性的影响规律,探讨其在抑制裂缝形成与扩展中的微观机制。研究成果可为自密实水工混凝土材料设计与性能调控提供依据。

2 材料与方法

2.1 材料与试件制备

制备自密实水工混凝土试件时,使用的原材料包括水泥、砂石骨料、粉煤灰、聚羧酸减水剂、引气剂及聚丙烯纤维。其中,碎石骨料的颗粒尺寸为 2~50 mm,整体集料粒度较细。每立方米混凝土的材料质量配比为粗骨料:细骨料:水泥:粉煤灰:水=975:625:325:75:250。遵循《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150-2017)^[8],FRSHC 试件通过一次性灌注成型。将聚丙烯纤维的掺量设定为变量,具体掺量分别为 0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%。聚丙烯纤维具备良好的延展性、力学性能及耐腐蚀性能,延伸率为 28.5%,弹性模量为 122 GPa,抗拉强度为 1 548 MPa。根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》

(GB/T 50081-2019)^[9],混凝土的立方体试件采用标准尺寸 150 mm×150 mm×150 mm。

2.2 试验方法

2.2.1 混凝土制备

为制备 FRSHC 试件,采用混凝土砂浆搅拌机对原材料进行均匀拌合。首先,将已称好重量的粗细骨料、粉煤灰及水泥注入搅拌机中;然后分批次加入短切聚丙烯纤维,进行 120 s 的干拌操作,之后再加入水进行 5 min 的湿拌;随后把搅拌锅取下,将搅拌好的砂浆浇筑至模具之中,同时使用砂浆振捣器实施振捣作业,以此确保物料能够均匀分布;待混凝土砂浆养护至 28 d 龄期后,再拆除模具。

2.2.2 强度测试

选用混凝土抗压试验机测试强度,将加载速率设定为 0.05 mm/min。在开展试验之前,针对承压板与混凝土试件开展预加载操作,以消除二者间的间隙。当混凝土出现破坏后,利用高清晰度摄像机进行记录。同时,使用 VIC-3D8 非接触全应变场的测量系统,开展数字图像相关(DIC)分析以记录试件在不同破坏状态下所呈现出的损伤特征。采用“位移控制”模式进行加载,而非规范所推荐的“力控制”模式。这主要是由于控制位移能够实时获取试件在变形全过程中的力学行为,例如裂纹扩展路径及破坏模式等,有助于对混凝土展开 DIC 分析。

2.2.3 微观试验

运用扫描电子显微镜 SEM 对混凝土断口展开扫描识别工作。从试件中切取厚度约 2 cm 的断口试件用于扫描,鉴于混凝土本身不具备导电性,需对试件的断面实施喷金处理,之后通过扫描获取不同放大倍数下混凝土内部的微观形态特征。

3 结果与分析

3.1 自密实水工混凝土的破坏特征

通过轴心抗压试验测试了养护 28 d 的自密实水工混凝土试件,在 6 种聚丙烯纤维掺量及 3 种纤维长度条件下的强度指标与破坏形态。结果表明,掺入不同长度纤维均提升了试件峰值应力及对应竖向应变,反映出纤维的加筋作用可改善混凝土的塑性变形性能。试件变形破坏过程分为初始压缩、损伤发展及断裂三个阶段,竖向应力随应变呈不同速率变化,且在各阶段产生不同类型的裂隙。未掺纤维的普通混凝土(图 1(a))呈现典型脆性断裂特征,裂缝宽且碎渣掉落多,抗裂与韧性不足。对比不同纤维长度的破坏形态与应变

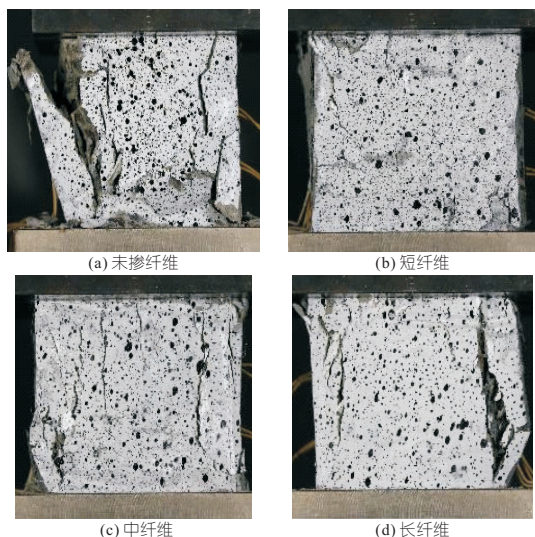


图 1 不同纤维长度下混凝土破坏形态

Fig. 1 Failure morphology of concrete

云图(图 1(b)~(d)),短切纤维混凝土因桥接效应与能量吸收机制,有效延缓裂纹扩展,提升韧性;中纤维试件仍具脆性破坏特征,裂缝分散抑制作用有限;长纤维虽促进多缝分布,但对裂缝宽度控制效果欠佳。这表明适量掺加纤维可同时提升混凝土强度与延性特征。

利用 DIC 技术对 FRSHC 试件在断裂过程中的表面变形进行全场测量。基于对所得应变云图中层面区域颜色梯度演变规律的分析,将裂缝的发展过程划分为四个阶段,分别为起始阶段(I)、萌生阶段(II)、扩展阶段(III)及贯通阶段(IV)。在裂缝初始位置的水平方向上选取一系列连续的点,并通过 DIC 技术计算出这些点的水平和竖向位移数据。如图 2(a)~(d)所示,通过 DIC 方法分析得到的裂缝宽度变化规律存在显著差异。这一结果表明,DIC 技术在采集和计算 FRSHC 在断裂过程中裂缝变化信息方面具有可靠性。断裂

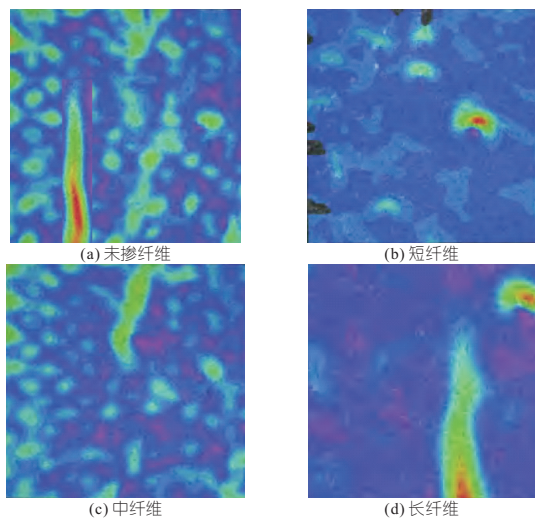


图 2 不同纤维长度下混凝土表面破坏形态

Fig. 2 Failure modes of concrete

试件的应变云图表明了短切聚丙烯纤维在改善自密实混凝土力学性能中的关键作用,为自密实混凝土损伤机理提供了直观的试验依据。

3.2 养护时间和纤维掺量对强度的影响

在短切聚丙烯纤维设定下,针对不同养护时间的 FRSHC 试件展开强度指标分析。由图 3 可知,随着混凝土养护龄期增加,各组别的混凝土强度呈上升态势。在养护时间处于 7~14 d 这个阶段时,抗压强度增长速度较快;而当养护时间处于 14~56 d 范围内时,抗压强度增长趋于稳定。混凝土试件的早期强度有所提高,养护 14 d 时的强度达到较高水平,对于增强周边岩体支撑性能有一定提升效果。不同养护时间条件下,纤维用量增加使得强度呈先升后降的变化趋势。当纤维用量达到 0.8% 时,抗压强度出现转折。当混凝土试件发生损伤,能量会出现耗散和转化,促进损伤裂纹的连通。一般而言,压缩损伤所产生的表面能越高,相应的结构损伤程度也就越大。这主要是因为表面能的增加通常意味着在压缩过程中积累了更多能量,一旦这种能量超过了材料所能承受的极限,就会引发更为严重的损伤状况。在受到外力作用时,未添加纤维的混凝土样品裂纹扩展的范围相对更为广泛。随着短切聚丙烯纤维掺入量的不断增多,自密实混凝土试件的压缩损伤程度会有所降低。然而,当纤维掺入量过多时,可能会致使 FRSHC 的变形性能变差,且对硬化体的整体力学性能产生不良影响。

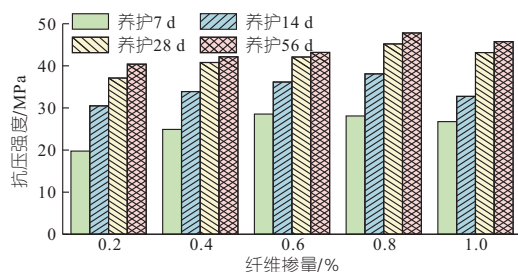


图 3 自密实水工混凝土的强度测试结果

Fig. 3 Compressive strength test results of concrete

如图 4 所示,短切聚丙烯纤维掺量对试件破坏应变的影响呈先增后降趋势。在合理掺量下,纤维通过分散和吸收裂缝尖端能量,提升混凝土试件的韧性与延性,使其能承受更大变形而不破坏;但当掺量超过阈值时,过多纤维加剧了砂浆结构的不均匀性,削弱了韧性与延性,导致破坏应变下降。由此可见,聚丙烯纤维对混凝土抗压强度与破坏应变的影响呈先增后减趋势,体现了纤维掺量与材料性能的非线性关系。合理掺量下,纤维通过形成三维网格结构,增强砂粒与水泥石的黏附及机械阻塞作用,从而提升承载力;但掺量过

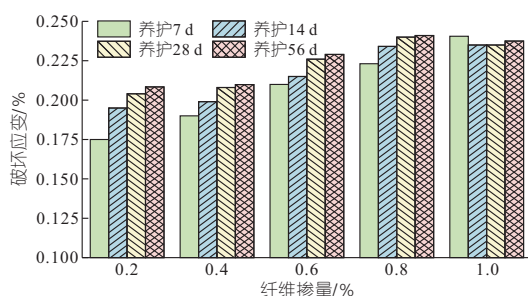


图 4 自密实水工混凝土的破坏应变结果

Fig. 4 Failure strain results of concrete

量时,纤维易发生缠结结团,在试件内部形成聚集区并增加孔隙率,导致强度与变形抵抗能力下降。试验表明,其轴心抗压强度在掺量 0.8%~80.3%、70.9%~77.1%时达到最大值,需通过试验确定合适掺量范围以实现 FRSHC 的最佳增强效果。

3.3 自密实水工混凝土的微观结构特征

以 0.8% 短切聚丙烯纤维掺量、28 d 养护的自密实水工混凝土为例,SEM 测试观察了其初始状态和破坏后的显微结构。图 5(a) 显示,聚丙烯纤维被水化凝胶包裹并形成致密结构,骨料及水泥基体紧密接触。图 5(b) 则表明,受损后纤维未断裂,而是出现拉拔现象,因其高抗拉强度在凝胶体系中发挥了“桥接”作用,可有效遏制裂缝形成、限制扩展,并引导裂缝沿纤维两侧蔓延,改变裂缝形态。微观图像结果表明,纤维掺量过高会削弱力学性能增益效果。图 5(c) 显示,聚丙烯纤维与水泥浆体之间形成良好的接触,使得硬化后的砂浆体具备高强和良好韧性,能承受巨大拉力,进而显著提升 FRSHC 抗拉强度与韧性。图 5(d) 中纤维团聚形成的局部薄弱区易成应力集中点,过量纤维可能阻碍水泥水化反应,影响硬化过程,这种异质化界面结构导致应力传递路径受阻,在外部荷载作用下易形成应力集中源,促使微裂纹优先在团聚体边缘萌生并沿薄弱界面扩展。因此,

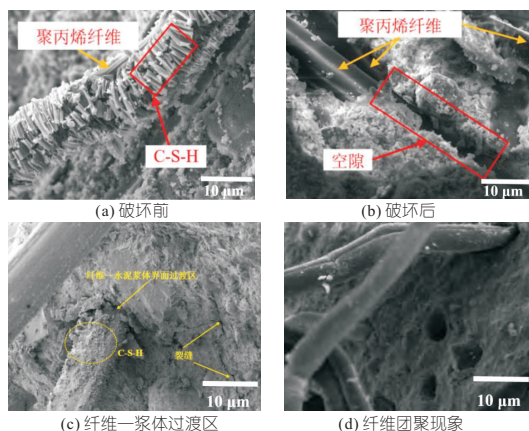


图 5 自密实水工混凝土的微观图像

Fig. 5 Microstructure diagrams of self-compacting hydraulic concrete

当聚丙烯掺量超过 8% 后,自密实水工混凝土的整体强度与稳定性有所降低。

综上所述,聚丙烯纤维与水化凝胶所构建的协同体系,能够显著提升自密实混凝土抗压性能及变形能力。当混凝土受外部压力时,短切聚丙烯纤维可发挥缓冲作用,有效降低压缩破坏的变形程度,进而延长混凝土使用寿命。纤维与胶凝材料的协同体系能大幅增加水工结构的整体结构稳定性,且有助于提升混凝土耐久性。在长期服役过程中,水工结构面临着诸如地下水渗透、岩石压力变化等多种复杂的环境因素影响,支护工作的质量直接关系到整个工程的安全性及稳定性。该协同体系为衬砌围岩支护效果的优化提供了坚实可靠的材料支撑,不仅能够增强衬砌结构支护强度,使其更好地抵御外部压力,还能提升衬砌的抗渗性能,有效防止地下水的侵入对围岩造成损害。聚丙烯纤维相比普通纤维(如钢纤维、玄武岩)具有显著优势,短切聚丙烯纤维通过三维乱向分布有效抑制混凝土的塑性收缩和温度裂缝,提升抗渗与耐久性^[10]。相比之下,普通纤维混凝土的抗拉、抗弯性能虽然更强,但聚丙烯纤维混凝土更适用于防裂和耐久性要求高的水工隧洞衬砌结构场景^[11]。

4 结论

a. 聚丙烯纤维通过桥接裂缝及协同强化机制,大幅提升了自密实水工混凝土的强度与变形性能,短纤维的强度较基准组最高提升了 80.3%

b. 混凝土的抗压强度随掺量增加呈先升后降趋势。综合考虑强度增益效果及工程经济性等多方面因素,0.8% 为聚丙烯纤维的最优掺量,能够实现性能与成本之间的良好平衡。

c. 短切纤维与水泥水化凝胶形成致密包裹结构,可延缓自密实水工混凝土试件的断裂,过量掺加易引发纤维团聚,降低整体强度与稳定性。

参考文献:

- [1] 何世钦,高鹏飞,王纯月,等. 基于深度学习的 SCC 工作性能预测技术[J]. 水电能源科学, 2023, 41(4): 155-158. (HE S Q, GAO P F, WANG C Y, et al. SCC performance prediction technology based on deep learning[J]. Water resources and power, 2023, 41(4): 155-158. (in Chinese))
- [2] 贾毅,宋浩博,柳其钱,等. 高韧性聚丙烯纤维混凝土的配合比及力学性能试验研究[J]. 材料导报, 2024, 38(增刊 2): 657-661. (JIA Y, SONG H B, LIU Q Q, et al. Experimental study on blending ratio and mechanical properties of high toughness polypropylene fiber concrete[J]. Materials reports, 2024, 38(S2): 657-661. (in Chinese))

(下转第 72 页)

流速比工况中前方射流发展到后方射流上方时仍具有较大的速度,从而抑制了后方射流的发展。

4 结论

a. 植被化河道中植被束窄河道使得植被间流速增大,射流横向扩散受到抑制,垂向扩散明显。多孔射流前侧射流对后侧射流的影响与流速比有关,低流速比时前侧射流对后侧射流垂向扩散起到抑制作用,高流速比时则起到促进作用。

b. 在本研究考虑的流速范围内,流速比对射流旋涡特性影响较小。在不同流速比条件下,射流旋涡均表现出展向扩展受到抑制、流向扩展受到促进的发展趋势并呈现一致的衰减规律。

c. 射流轨迹速度在射流孔至第一株植被后的小范围内迅速衰减,衰减率接近 90%,下游稳定区内植被对射流速度衰减影响较小;流速比对射流轨迹速度的衰减速率影响不明显。

参考文献:

- [1] MOSSA M, BEN MEFTAH M, DE SERIO F, et al. How vegetation in flows modifies the turbulent mixing and spreading of jets[J]. Scientific reports, 2017, 7: 6587.
- [2] BEN MEFTAH M, DE SERIO F, MALCANGIO D, et al. Experimental study of a vertical jet in a vegetated crossflow[J]. Journal of environmental & water resources, 2018, 14(1): 1-12.
- [3] 赖晓龙, 邹志云, 谢凤翔, 等. 聚丙烯纤维对改性沥青混凝土性能影响分析[J]. 应用化学, 2025, 42(7): 962-970. (LAI X L, ZOU Z Y, XIE F X, et al. Analysis of the influence of polypropylene fiber on the performance of modified asphalt concrete[J]. Chinese journal of applied chemistry, 2025, 42(7): 962-970. (in Chinese))
- [4] 杨欣, 唐宇, 梁宁慧. 聚丙烯纤维再生混凝土主破裂前兆特征研究[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(4): 1247-1256. (YANG X, TANG Y, LIANG N H. Study on main fracture precursor characteristics of polypropylene fiber recycled concrete[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2024, 20(4): 1247-1256. (in Chinese))
- [5] 雷明锋, 胡子威, 刘凌晖, 等. 基于纤维-骨料细观分布的自密实钢纤维混凝土单调和循环压缩性能研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(9): 3384-3399. (LEI M F, HU Z W, LIU L H, et al. Cyclic compression performance of SFRSCC based on meso-distribution of fiber-aggregate[J]. Journal of central south university (science and technology), 2024, 55(9): 3384-3399. (in Chinese))
- [6] 钟聚光, 宋华涛, 张祥富, 等. 聚丙烯纤维对水利水电混凝土耐久性能的影响[J]. 合成纤维, 2025, 54(7): 87-91. (ZHONG J G, SONG H T, ZHANG X F, et al. Effect of polypropylene fiber on durability of water conservancy and hydropower concrete[J]. Synthetic fiber in China, 2025, 54(7): 87-91. (in Chinese))
- [7] 张培恒, 王正旺, 赵静, 等. 再生粗骨料复合聚丙烯纤维泡沫混凝土配合比设计与力学性能研究[J]. 混凝土, 2025(4): 257-262. (ZHANG P H, WANG

- management, 2015, 164: 19-31.
- [3] GAO M, HUAI W X, XIAO Y Z, et al. Large eddy simulation of a vertical buoyant jet in a vegetated channel[J]. International journal of heat and fluid flow, 2018, 70: 114-124.
- [4] YU D, ALI M S, LEE J H W. Multiple tandem jets in cross-flow[J]. Journal of hydraulic engineering, 2006, 132(9): 971-982.
- [5] 李志伟, 槐文信, 钱忠东. 横流中单排多孔射流的流场与浓度特性数值模拟[J]. 中国科学(技术科学), 2012, 42(12): 1395-1406. (LI Z W, HUAI W X, QIAN Z D. Numerical simulation of flow field and concentration characteristics of single row porous jet in cross flow[J]. Scientia sinica (technologica), 2012, 42(12): 1395-1406. (in Chinese))
- [6] 李少华, 袁斌, 刘利献, 等. 多孔横向紊动射流涡量场的数值分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(23): 100-104. (LI S H, YUAN B, LIU L X, et al. Numerical investigation on the vortices of multiple turbulent jet in crossflow[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(23): 100-104. (in Chinese))
- [7] SHIH T H, LIOU W W, SHABBAR A, et al. A new κ - ϵ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows[J]. Computers & fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [8] XIAO Y, TANG H W, LIANG D F, et al. Numerical study of hydrodynamics of multiple tandem jets in cross flow[J]. Journal of hydrodynamics, ser B, 2011, 23(6): 806-813.
- [9] XIAO Y Z, HUAI W X, GAO M, et al. Evaluating the hydrodynamics of a round jet in a vegetated crossflow through large eddy simulation[J]. Environmental fluid mechanics, 2019, 19(1): 181-201.
- [10] ZHANG P H, LIANG N H, ZHAO J, et al. Research on the mix design and mechanical properties of recycled coarse aggregate composite PP fiber lightweight concrete[J]. Concrete, 2025(4): 257-262. (in Chinese))
- [8] 国家能源局. 水工混凝土试验规程: DL/T 5150-2017[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (National Energy Bureau of the People's Republic of China. Test code for hydraulic concrete: DL/T 5150-2017 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2006. (in Chinese))
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081-2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of The People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081-2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese))
- [10] 朱叶, 宋跃军, 王英俊. 聚丙烯纤维/再生橡胶粉改性混凝土的性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(10): 78-81. (ZHU Y, SONG Y J, WANG Y J. Study on properties of polypropylene fiber/recycled rubber powder modified concrete[J]. Plastics science and technology, 2024, 52(10): 78-81. (in Chinese))
- [11] 梁宁慧, 周侃, 毛金旺, 等. 多尺度聚丙烯纤维混凝土在隧道二衬中的应用[J]. 公路交通科技, 2023, 40(9): 158-165. (LIANG N H, ZHOU K, MAO J W, et al. Application of multi-scale polypropylene fiber concrete in secondary lining of tunnel [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2023, 40(9): 158-165. (in Chinese))