

分类号：  
学号：20232010008

密级：  
单位代码：10759

# 石河子大学

## 硕士学位论文



### 沙漠砂聚丙烯纤维自密实混凝土 力学及收缩性能研究

学位申请人	李燕
指导教师	李志强 教授
申请学位类别	工学硕士
专业名称	土木工程
研究领域	结构工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2026年05月

分类号：  
学号：20232010008

密级：  
单位代码：10759

# 石河子大学

## 硕士学位论文



### 沙漠砂聚丙烯纤维自密实混凝土 力学及收缩性能研究

学位申请人	李燕
指导教师	李志强 教授
申请学位类别	工学硕士
专业名称	土木工程
研究领域	结构工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2026年05月

**Self-Compacting Concrete with Polypropylene Fiber in Desert  
Sand Mechanical and Shrinkage Properties**

A Dissertation Submitted to

**Shihezi University**

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

**Master of Engineering**

By

**Li Yan**

**(Materials Engineering)**

Dissertation Supervisor: Prof. Li Zhi-qiang

May, 2026

# 石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

## 学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：李燕

时间：2026年5月20日

## 使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：李燕

时间：2026年5月20日

导师签名：李志强

时间：2026年5月20日

## 摘要

鉴于自密实混凝土在配合比设计中通常维持较低水胶比并使用大量胶凝材料，该材料在服役早期往往面临严重的收缩开裂隐患。沙漠砂资源丰富、颗粒细小，可部分替代细骨料，不仅提升混凝土流动性及整体性能，还可降低工程成本并有利于环境保护。纤维掺加能够显著提高混凝土力学性能并延缓裂缝发展，其中聚丙烯纤维（PP）在改善收缩性能方面展现出显著的工程应用价值与科研潜力。在此背景下，本文深度剖析了 PP 纤维与沙漠砂对自密实体系产生的耦合增效效应，即针对沙漠砂聚丙烯纤维自密实混凝土（DSPSCC）进行了系统的试验分析。主要研究内容如下：

（1）针对工作性能，本文依据规范对 DSPSCC 开展了测试坍落扩展度、 $T_{500}$ 、V 型漏斗和 L 型箱试验，探讨了纤维掺量沙漠砂含量对 DSPSCC 流动性、填充性及间隙通过能力的综合效应。结果表明，当沙漠砂替代率维持在 20%~40% 区间内，混凝土的工作性能有所提升。

（2）针对力学性能，本文对 DSPSCC 开展了抗压强度、劈裂抗拉和轴心抗压试验，结果表明，沙漠砂替代率为 40%，PP 纤维掺量定为 0.10% 时（C-40 组），展现出最优的力学特性。其中 C-40 组的抗压强度、劈裂抗拉和轴心抗压较 A-0 组分别上升了 10.44%、23.91% 和 6.42%。此外，建立了强度的之间的转换关系。

（3）针对收缩性能，本文通过接触法，对 DSPSCC 开展了 28d 混凝土自收缩试验和 180d 混凝土干燥收缩试验。数据分析显示，当沙漠砂占比为 20% 且配合 0.10% 的 PP 纤维时（C-20 组），其抗收缩变形能力最为突出。并基于 CEB-FIP 模型建立了考虑沙漠砂和纤维影响的干燥收缩预测模型。

（4）针对微观结构，本文采用电镜扫描和压汞法对样品进行研究，包含界面过渡区、纤维与基体的粘结情况以及孔隙率、孔径分布等方面。显微形貌分析证实，当沙漠砂替代率与聚丙烯纤维掺量分别设定为 40% 和 0.10% 时（C-40 组），浆体内的微裂隙及孔洞分布显著改善，界面过渡区的密实度得到增强。压汞试验得出 DSPSCC 孔隙率随沙漠砂替代率增大而先减小后增大的规律，并基于宏观力学和微观孔隙率、孔径分布建立了强度-孔隙模型。

**关键词：**沙漠砂；聚丙烯纤维；自密实混凝土；力学性能；收缩性能

基金项目资助：国家自然科学基金项目（高寒地区沙漠砂混凝土结构冻融损伤演化机理研究，项目编号：52268034）；兵团重点研发项目（灌区水工建筑物装配式抗冻结构及智能化监测系统研究与示范，项目编号：2024AB079）；兵团重大科技计划项目（耐南疆复杂盐碱环境的混凝土及智慧管控成套技术研究与示范，项目编号：2024AA007）。

## Abstract

Self-compacting concrete (SCC), characterized by a low water–binder ratio and a high content of cementitious materials, is prone to early-age shrinkage and cracking, which adversely affects the durability of structures. Desert sand, which is abundant and possesses fine particles, can partially replace fine aggregates. Its incorporation can not only improve the fluidity and overall performance of concrete but also reduce engineering costs and contribute to environmental protection. The addition of fibers can significantly enhance the mechanical properties of concrete and delay crack propagation. Among various fibers, polypropylene (PP) fiber has important engineering application value and research significance in improving shrinkage performance. Based on this, this study systematically investigates the synergistic effects of PP fiber and desert sand in self-compacting concrete, namely desert sand polypropylene fiber self-compacting concrete (DSPSCC), providing an innovative approach for the optimized design of SCC. The main research topics are as follows:

(1) To evaluate performance characteristics, this study conducted tests on DSPSCC in accordance with relevant specifications, including slump spread,  $T_{500}$ , V-funnel, and L-box tests, to investigate the combined effects of fiber content and desert sand content on the flowability, fillability, and void-passing capacity of DSPSCC. The results indicate that the material exhibits the most ideal overall performance when the desert sand replacement rate is 20% and the fiber volume content is 0.05% (i.e., Group B-20).

(2) Regarding mechanical properties, this study conducted compressive strength, split tensile, and axial compressive tests on DSPSCC. The results indicate that the optimal mechanical properties were observed when the desert sand replacement rate was 40% and the PP fiber content was 0.10% (Group C-40). In particular, the compressive strength, splitting tensile strength and axial compressive strength of the C-40 group increased by 10.44%, 23.91% and 6.42%, respectively, compared with the A-0 group. Furthermore, a conversion relationship between the strengths was established.

(3) Regarding shrinkage properties, this study conducted 28-day concrete autogenous shrinkage tests and 180-day concrete drying shrinkage tests on DSPSCC using the contact method. Data analysis indicates that the resistance to shrinkage deformation was most pronounced when the desert sand content was 20% and combined with 0.10% PP fibers (Group C-20). Furthermore, a drying shrinkage prediction model accounting for the effects of desert sand and fibers was established based on the CEB-FIP model.

(4) Microstructure: Scanning electron microscopy (SEM) and mercury intrusion porosimetry (MIP) were employed to analyze the microstructure of the specimens after compressive failure, focusing on the interfacial transition zone (ITZ), the bonding behavior between fibers and the matrix, as well as porosity

and pore size distribution. The SEM results show that when the desert sand replacement rate reaches 40% and the polypropylene fiber content is 0.10%, the microcracks and pores in the cement paste are significantly reduced, and the interface transition zone is notably improved, thereby greatly enhancing the overall integrity and uniformity of the concrete paste. The MIP results reveal that the porosity of DSPSCC first decreases and then increases as the desert sand replacement rate increases. Based on the macro-mechanical properties and the microstructural porosity and pore distribution, a strength-porosity model was established.

**Key words:** Desert sand; Polypropylene fiber; Self-compacting concrete; Mechanical properties; Shrinkage behavior.

# 目录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	2
1.2.1 沙漠砂混凝土研究现状 .....	2
1.2.2 聚丙烯纤维增强自密实混凝土研究现状 .....	3
1.3 本文研究内容 .....	5
1.4 本文研究的创新点 .....	6
1.5 拟解决的关键问题 .....	6
1.6 技术路线 .....	7
第 2 章 原材料和试验方法 .....	8
2.1 试验概况 .....	8
2.1.1 原材料 .....	8
2.1.2 试验设备 .....	10
2.2 基准配合比设计方法 .....	11
2.3 试件制作和养护 .....	13
2.4 试验方法 .....	15
2.4.1 工作性能试验 .....	15
2.4.2 力学性能试验 .....	17
2.4.3 收缩性能试验 .....	19
2.4.4 微观结构试验 .....	21
2.5 本章小结 .....	23
第 3 章 沙漠砂聚丙烯纤维自密实混凝土工作性能研究 .....	24
3.1 流动性能 .....	24
3.1.1 沙漠砂替代率与流动性能的关系 .....	25
3.1.2 纤维掺量与流动性能的关系 .....	26
3.2 填充性能 .....	27
3.2.1 沙漠砂替代率与填充性能的关系 .....	27
3.2.2 纤维掺量与填充性能的关系 .....	28

3.3 间隙通过性能 .....	28
3.3.1 沙漠砂替代率与间隙通过性能的关系 .....	29
3.3.2 纤维掺量与间隙通过性能的关系 .....	30
3.4 本章小结 .....	30
第4章 沙漠砂聚丙烯纤维自密实混凝土力学性能研究 .....	32
4.1 抗压强度 .....	32
4.1.1 沙漠砂替代率与抗压强度的关系 .....	32
4.1.2 纤维掺量与抗压强度的关系 .....	33
4.2 劈裂抗拉强度 .....	34
4.2.1 沙漠砂替代率与劈裂抗拉强度的关系 .....	34
4.2.2 纤维掺量与劈裂抗拉强度的关系 .....	35
4.3 轴心抗压强度 .....	36
4.3.1 沙漠砂替代率与轴心抗压强度的关系 .....	37
4.3.2 纤维掺量与轴心抗压强度的关系 .....	38
4.4 理论分析 .....	39
4.4.1 立方体抗压强度与劈裂抗拉强度关系 .....	39
4.4.2 立方体抗压强度与轴心抗压强度关系 .....	41
4.5 本章小结 .....	42
第5章 沙漠砂聚丙烯纤维自密实混凝土收缩性能研究 .....	44
5.1 自收缩性能 .....	44
5.1.1 沙漠砂掺量对自收缩的影响 .....	44
5.1.2 纤维掺量对自收缩的影响 .....	46
5.2 干燥收缩 .....	47
5.2.1 沙漠砂掺量对干燥收缩的影响 .....	47
5.2.2 纤维掺量对干燥收缩的影响 .....	48
5.3 收缩预测模型 .....	49
5.3.1 收缩预测模型的提出 .....	49
5.3.2 模型修正 .....	53
5.3.3 模型验证 .....	54
5.4 本章小结 .....	56
第6章 沙漠砂聚丙烯纤维自密实混凝土微观结构分析 .....	57
6.1 扫描电镜试验 (SEM) .....	57
6.1.1 微观形貌 .....	57
6.1.2 过渡边界区 .....	61

6.1.3 纤维和沙漠砂的增效机制 .....	64
6.2 压汞法试验 (MIP) .....	67
6.2.1 压汞试验结果 .....	67
6.3 本章小结 .....	75
第 7 章 结论和展望 .....	76
7.1 结论 .....	76
7.2 展望 .....	77
参考文献 .....	78
致谢 .....	83
作者简介 .....	84

# 第1章 绪论

## 1.1 研究背景及意义

由于建筑结构类型不断地复杂化<sup>[1]</sup>，在混凝土施工浇筑时，很难进行振捣，导致混凝土难以填充密实，引发成型构件内部产生蜂窝或空隙，从而对建设工期的把控与工程的可靠性产生不利影响。基于此，依靠自重流平且无需外界机械引振即可严密充填模具、有效包裹钢筋骨架的自密实混凝土(Self-compacting concrete, SCC)在建筑领域开始普及。

沙漠砂是替代河砂用以制作混凝土的潜力原料<sup>[2-9]</sup>。新疆有大量的沙漠资源，严重影响生态和环境，且治理沙漠的费用也不断增加因此。因此为响应国家号召秉持“立足本土，物尽其用”的理念，研究沙漠砂的应用，并在实际工程中运用，减少中砂的使用，通过挖掘沙漠砂细微颗粒的级配潜能，将其作为细骨料组分掺入到自密实体系中，不仅能显著优化拌和物的铺展能力、稳定性、匀质化程度及填充密实水平，还在控制工程造价成本、改善区域生态现状及自然资源集约化利用方面具有突出的科研与应用价值<sup>[10-14]</sup>。此外，利用沙漠砂替代自密实混凝土中的细骨料，有助于降低开采和运输能耗，同时减少水泥的用量，从而进一步降低碳排放。

混凝土在轻微拉伸应力下易裂，然而添加纤维可以通过弥合裂纹和提升完整性来缓解这一问题，从而提升变形能力和优越的机械强度。聚丙烯纤维的增益作用已获得学界广泛认可。聚丙烯纤维连接微裂纹，增强拉伸和抗弯强度，同时改善裂纹后的延展性，降低脆性破坏风险。它们还能控制收缩，减少固化过程中及时间推移的开裂<sup>[15-17]</sup>。借助于纤维组分对基体微细裂缝发育的抑制效应，复合材料的抗裂能力获得大幅跨越<sup>[18-23]</sup>。故而，将纤维复合技术引入自密实体系以改善其宏观表现，在理论与工程实践上均表现出极强的可操作性。基于此，将聚丙烯纤维与沙漠砂协同应用于自密实混凝土制备，是践行国家“双碳”战略目标及绿色建造理念的具体举措<sup>[24]</sup>。另外，聚丙烯纤维在隧道、桥梁、污水池、公路等工程中得到了比较广泛的应用<sup>[25-27]</sup>。鉴于建设工程对高性能胶凝材料的需求日益增长，纤维增强型自密实混凝土的技术研发与工程化推广已成为行业演进的必然走向<sup>[28-30]</sup>。

结合上述论证，本文尝试将聚丙烯纤维与沙漠砂共同引入自密实体系，研发并配制出一种新型的绿色复合建材——沙漠砂聚丙烯纤维自密实混凝土(Desert sand polypropylene fiber self-compacting concrete, 简称 DSPSCC)。并研究聚丙烯纤维、沙漠砂对其工作性能、力学性能、收缩性能的影响规律，并通过扫描电镜试验和压汞试验

揭示其增强机理，旨在推动 DSPSCC 技术在新疆乃至干旱地区的规模化应用。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 沙漠砂混凝土研究现状

Bouziani 等<sup>[31]</sup>的科研结论显示，采取低水灰比策略、通过石灰石粉末增强密实性或引入钢纤维补强，能够在确保浆体流动品质不下降的基础上，显著强化沙丘砂混凝土的抗弯强度，以及耗能韧性。

马菊荣等<sup>[32]</sup>设计并实施了四因素三水平的正交试验。这些试验选用了毛乌素地区特有的沙漠砂作为原材料。通过对不同配合比进行细致的分析和测试，探讨了各种配比参数如何影响 DSC 的劈裂拉伸强度以及抗压强度等关键性能指标。经过严格的数据统计和分析，最终确定了能够在该地区最大程度地提升混凝土性能的最优配合比方案。

刘宁等<sup>[33]</sup>为研究高温条件下高强 DSC 的最优配合比，对高温后浇水冷却后的高强 DSC 试块进行了抗压强度测试，得到了最优配合比。

张明虎等<sup>[34]</sup>对不同沙漠砂替代率下 DSC 动态压缩行为进行了研究，建立的 DSC 动态本构模型，可以很好地预测 DSC 动态力学行为。

Haifeng Liu<sup>[35]</sup>等研究表明：DSC 的抗压强度随环境温度的升高表现出先增后减的演变特征。当沙漠砂含量为 40% 时，材料展现出最理想的抗压水平。

Hou 等<sup>[36]</sup>为了研究聚丙烯纤维和玻璃纤维对沙漠砂混凝土（DSC）防冻性的影响，进行了快速冷冻试验，利用表观损伤、质量损失和相对动态弹性模量作为指标，研究冻融损伤定律。结果显示，纤维能大幅提升 DSC 的抗冻能力。DSC 掺入 0.15%PP 纤维和 0.05%玻璃纤维时，其动态弹性模量高达 95%。PP 纤维和玻璃纤维分别在 DSC 裂纹形成的微观和宏观阶段发挥重要作用。

包建强<sup>[37]</sup>等研究了聚丙烯纤维和风积砂对混凝土的基本力学性能影响，发现当风积砂的替代比例为 30%时、聚丙烯纤维掺量为 0.8~1.0 kg/m<sup>3</sup>时，对抗压强度和抗拉强度的提升效果达到最佳。

秦拥军等<sup>[38]</sup>研究了 DSC 的深梁裂缝宽度的影响因素，发现 DSC 深梁试件与普通混凝土深梁试件的裂缝发展趋势相似。通过压缩剪跨比、增强混凝土强度等级或加大纵向配筋率等技术措施，可显著抑制试件裂缝宽度的开展；且观测到裂缝宽度随沙漠砂取代水平的提升呈现出先增后减的波动规律。

余俊等<sup>[39]</sup>为探讨混凝土中沙漠砂替代率对混凝土填充钢管柱-组合梁空间框架结构抗震性能的影响，并解决沙漠砂混凝土材料性能不足对组合结构抗震能力的不利影响，采用了柱端箍筋约束措施。以 10 层混凝土填充钢管柱-组合梁空间框架为例，利用

ABAQUS 有限元软件建立了组合结构的壳-实体单元计算模型。结果表明, 沙漠砂替代会降低核心混凝土的强度。替代比的增加会导致结构的最大楼层位移、层间漂移角、界面滑移及刚度损伤增大, 钢管与核心混凝土之间的界面滑移增大, 以及抗震性能的降低。

总之, 关于 DSC 力学性能的研究在国内外学术界取得了显著成果。这些研究结果主要集中在如何通过调整水灰比和骨料替代率来优化混凝土的力学性能。研究人员还进一步探讨了不同类型的纤维对 DSC 性能的影响这些分析不仅揭示了 DSC 在某些特定应用场景中具有更好性能的潜力, 也为未来的工程实践提供了理论依据。这表明, 使用沙漠沙子及其他非传统沙料来替代传统沙料能够有效降低建筑成本, 同时还能保持或提升混凝土的性能。但关于聚丙烯纤维对沙漠砂混凝土收缩性能的相关研究还较少。

### 1.2.2 聚丙烯纤维增强自密实混凝土研究现状

郝津津<sup>[40]</sup>通过一系列严谨而深入的实验和理论研究, 对聚丙烯纤维这一新型材料在异形柱构件中应用时所能发挥的抗震效果进行了细致的探讨。其研究方法涵盖了多种测试手段, 包括静态荷载试验和动态加载测试等, 以此来全面评估聚丙烯纤维对于提升构件结构性能、减轻地震破坏的潜在贡献。其结论指出: 虽然该纤维在提升混凝土抗压极限方面作用并不显著, 但在优化材料综合强度与增韧效果上表现突出; 改性后的异形柱在变形表现及能量耗散方面均有跨越, 显著增强了结构的整体抗震水平。

曹雅娴<sup>[41]</sup>开展了聚丙烯纤维改性水泥土的力学特征研究。试验数据证实: 纤维的加入不仅在一定程度上提高了土体的抗压极限, 且对其抗拉性能的正向增益效果更为明显。此外, 水泥土的粘聚性随纤维体积掺量的提升而同步强化。

吴昊<sup>[42]</sup>重点考察了聚丙烯纤维对混凝土早龄期开裂的影响规律, 研究证实, 纤维的混入虽会引起基体粘聚程度的降低, 但能有效改善其保水特性。

张亚芳<sup>[43]</sup>等人构建了一个数值分析模型, 旨在评估纤维直径对混凝土拉拔特性的影响。研究表明, 随着纤维直径的增加, 混凝土试件的峰值承载力逐渐提高。但界面粘结强度和拉拔韧化水平并未因此得到显著改善。可见直径参数对混凝土在不同应力水平下的拉拔破坏模式并无明显影响。相比之下, 直径较小的纤维在增强基体韧性方面表现出更优的性能。

吴禹<sup>[44]</sup>针对矩形截面自密实混凝土梁实施了抗弯性能测试, 并辅助有限元模拟进行机理探析。结果揭示: 适量聚丙烯纤维的掺入能系统性地改良梁构件的承载能力、裂缝分布规律及弯曲韧化水平。相较于常规混凝土梁, 纤维增强梁展现出更为优越的长期服役耐久性。

刘文与李晓路<sup>[45]</sup>以 C30 混凝土为研究对象, 考察了聚丙烯纤维与粉煤灰掺量变化对基体力学特性的综合影响。试验结论指出, 通过对两类组分体积配比的优化调控, 能够显著增强混凝土的抗压极限与劈裂抗拉能力, 并实现强度的最优化表现。由此可见,

适度掺入聚丙烯纤维是改善混凝土受力性能的有效技术路径。

郭哲奇<sup>[46]</sup>以不同尺寸的聚丙烯纤维为变量,结合试验及理论分析,深入探讨了荷载耦合条件下纤维对混凝土渗透品质的影响。研究证实:聚丙烯纤维的引入能协同提升基体的抗压极限与阻渗能力;相较于单一组分,混杂纤维在优化抗渗性能方面展现出更强的技术优势;在同等条件下,增加细纤维的占比对提升防渗效果更为显著,且多尺度配比方案的改性效果优于单一边界尺寸。

张悦<sup>[47]</sup>通过改变聚丙烯纤维的掺量及养护周期的时长,考察了这两个核心变量对混凝土力学行为的综合效应。发现聚丙烯纤维对混凝土的抗压表现具有显著调节作用,不仅强化了材料的抗拉与抗折特性,还显著增强了其抵抗干缩裂纹发育的能力;在其它条件相同的情况下,聚丙烯纤维的混入提升了新拌浆体的粘聚特性,对拌合物的工作性能起到了优化作用;与普通混凝土相比,经历不同养护阶段的纤维增强试件,其轴心抗压强度均实现了跨越。

何佳<sup>[48]</sup>为探究混凝土梁在掺入聚丙烯纤维后的受力机理及工作性能,开展了相关试验,结果表明:在合理的掺值范围内,提升纤维用量能够有效增加构件梁的起裂荷载与相应挠度,延缓表层裂缝的扩展速率,从而在实质上改善了梁的工作性能。

赵竞硕<sup>[49]</sup>等专家针对聚丙烯纤维混凝土在变冻融频次下的力学演化规律进行了探讨。研究揭示:在冻融循环作用下,纤维的混入能够有效减缓试件表层的剥蚀与劣化进程;实验数据显示,在相同循环量级下,纤维增强试块的质量损失明显低于素混凝土,证实了聚丙烯纤维对材料抗冻融损伤能力的显著增强作用。

Ninghui·Liang<sup>[50]</sup>采用灰色关联度分析与熵权法对 BPFRC 的抗裂敏度指标实施了定量评估。结论显示:玄武岩纤维在阻碍微观裂缝的起始及发育方面效果显著,而聚丙烯纤维则在限制宏观尺度裂缝的贯通上表现出更为突出的优势。

Morita<sup>[51]</sup>等观察到当纤维体积分数由 0.5% 逐步递增至 2% 时,增强组分对板类构件的强韧化效应持续增强,且有效缩减了构件受力后的局部受损区域。

G.M.Sadiqul<sup>[52]</sup>等选取渗透品质与收缩特性作为切入角度,考察了聚丙烯纤维对混凝土抗裂潜力的改良效果。研究人员对五类试件中不同纤维掺配比例下的混凝土样本进行了深入的比较。这些混凝土样本代表着不同的纤维添加水平,旨在探究纤维对于混凝土性能的影响。结果显示:在所有测试的参数中,当纤维掺量仅为 0.1% 时,混凝土的抗压强度并没有出现显著的变化,当纤维的掺量提高到 0.1 至 0.3% 之间时,混凝土的抗拉强度有了明显的提升。这种性能上的改善可能与纤维材料在混凝土内部形成的特殊结构有关,从而在拉力作用下提供了更强的抵抗能力。

S.Ranjith<sup>[53]</sup>等深入探讨和评估聚丙烯 (PP) 与玻璃纤维相结合的工程水泥基复合材料 (ECC) 的耐久性。通过设计并执行了一系列严格的实验试验,以探究这些新型复合材料在长期使用条件下的性能表现。试验结果揭示了一个重要的发现——当 ECC 的纤

维总体积含量达到 1.5%时, 其耐久性能有显著的提升。这意味着在这种比例范围内, 材料能够承受更高的荷载, 并且在长时间暴露于自然环境下仍能保持结构完整性。且玻璃纤维增强的 ECC 比聚丙烯纤维增强的 ECC 具有更优越的耐久性能。

Z.H.Mohebi<sup>[54]</sup>等学者通过对 8 个跨中受拉搭接梁构件及 12 个同心拉拔试件的对比测试, 分析了聚丙烯纤维对高强混凝土柱中钢筋粘结特性的影响。研究证实, 常规粘结强度预测体系在评价此类纤维混凝土时仍表现出良好的适用性, 且纤维的加入有助于提升计算结果的可靠度; 对比分析进一步表明, 拉拔试验在评估纤维对界面粘结贡献方面存在局限, 其敏感度不及梁式试验。综合来看, 适量聚丙烯纤维的混入能有效改善混凝土的抗压与抗弯表现, 但过高的掺配比例则会对材料的整体强韧度及耐久水平产生负面作用。

Hassan<sup>[55]</sup>等探讨了聚丙烯纤维杂化对聚丙烯纤维流动性、静态弹性模量、抗压、劈裂拉伸和三点抗弯强度的影响, 并与对照和宏观聚丙烯纤维混合料进行了比较。此外, 还测量了收缩率, 以确定控制和最佳纤维混合料。数据证实, 纤维杂化效应在抑制材料收缩方面表现最为突出, 其收缩率降幅高达 15%, 远优于常规宏观纤维组(仅下降 6%)。

根据上述文献综述, 国内外学者已围绕聚丙烯纤维增强自密实混凝土开展了较为丰富的研究。然而, 不同研究在关注重点与研究路径上存在一定差异, 整体上主要集中于拌合物工作性能及力学性能等方面, 对多因素耦合作用下材料性能的系统性研究仍相对不足。基于此, 本文以沙漠砂替代率和聚丙烯纤维掺量为主要研究变量, 系统分析两者对自密实混凝土工作性能、力学性能及收缩性能的影响规律。在此基础上, 结合 CEB-FIP 模型, 建立考虑沙漠砂替代率与纤维掺量影响的收缩预测模型。同时, 借助扫描电子显微镜 (SEM) 和压汞法 (MIP) 从微观尺度揭示沙漠砂与聚丙烯纤维的协同增强机制。旨在为 DSPSCC 在新疆地区的规模化应用提供理论支撑。

### 1.3 本文研究内容

本文在严密的理论分析基础上, 围绕 DSPSCC 展开了系统的试验探索, 研究范畴主要涵盖以下内容:

(1) 本文针对沙漠砂自密实本身存在的缺点, 通过加入聚丙烯纤维改进其性能。据此, 深度剖析了沙漠砂置换比例与纤维体积掺量对复合材料各项指标的影响规律。在配合比设计阶段, 首先采用绝对体积法拟定基准比例, 随后在维持水胶比恒定的前提下, 通过精细化调节胶凝组分、外加剂及细集料的体积分数进行多轮优化, 最终确定满足规范要求自密实混凝土设计方案。

(2) 综合运用坍落扩展度试验、 $T_{500}$  试验、V 型漏斗试验、L 型仪试验等四项评价指标, 对 DSPSCC 开展了详尽的工作性能测试与表征。

(3) 借助于抗压强度、劈裂抗拉及轴心抗压等试验手段, 揭示了沙漠砂含量与纤维掺配比例对 DSPSCC 基本力学行为的影响规律。

(4) 开展了涵盖自收缩与干燥收缩在内的变形性能试验。利用 Origin 软件对实验数据实施非线性拟合, 建立了能够预测纤维自密实混凝土干缩特性的数学模型, 并通过实测值与计算值的偏差分析, 进一步验证了该预测公式的可靠性与精确度。

(5) 旨在从本质上阐明 DSPSCC 的强韧机理, 本研究协同利用扫描电子显微镜 (SEM) 及压汞法 (MIP) 对样品的细观构造实施了多维表征。通过这些分析方法, 力求深入探究材料内部的结构特征、微观形貌及孔隙分布规律, 从而为理解其宏观性能提供支持。

## 1.4 本文研究的创新点

(1) 基于绝对体积法设计并结合新拌工作性能、力学性能及收缩性能试验验证, 确立了 DSPSCC 的最佳配合参数, 旨在为该类材料在寒旱地区的工程推广提供技术支撑。

(2) 通过理论模型和实验数据, 建立了考虑沙漠砂和聚丙烯纤维的 DSPSCC 干燥收缩预测模型。

(3) 采用宏微观尺度相结合的研究方法, 剖析了 DSPSCC 在服役环境下的性能演化逻辑, 并据此建立了耦合孔结构特征的强度预测模型。

## 1.5 拟解决的关键问题

(1) 系统考察了沙漠砂与聚丙烯纤维组分对 DSPSCC 综合性能的干预机制, 旨在寻求最优组分平衡点。使其既具备自密实混凝土优异的填充性、流动性与间隙通过性, 又兼具纤维增强混凝土的抗收缩性能的优势, 可显著提升材料的关键性能。

(2) 针对现有模型在计算复杂组分混凝土干缩时的局限性, 对既有预测体系进行了修正与迭代。结果显示, 可以对 DSPSCC 进行精确的收缩预测计算, 为 DSPSCC 的推广提供基础。

(3) 将试块取样进行 SEM 及 MIP 试验, 对 DSPSCC 的微观结构进行深入细致的分析, 进而分析沙漠砂及纤维增强自密实混凝土性能的微观机制。