

# 纤维及憎水剂对超高强混凝土性能影响试验研究<sup>\*</sup>

Experimenteal Study on the Properties of Ultra-high Strength Concrete with Fiber and Hydrophobic Agent

孟辉江<sup>1,2</sup>, 谢红<sup>1,2</sup>, 于素素<sup>3</sup>

(1. 河北金铎建设工程有限公司, 河北 石家庄 051430; 2. 河北省超低能耗建筑保温材料技术创新中心, 河北 石家庄 051430; 3. 河北三楷深发科技股份有限公司, 河北 石家庄 051430)

**摘要:**为促进超高强混凝土在屋面防水工程中推广与应用,研究纤维及憎水剂对超高强混凝土力学性能和防水性能的影响规律。结果表明:纤维掺量与混凝土抗折强度成正比,纤维掺量为 $8\text{ kg/m}^3$ 时,混凝土抗折强度与抗渗等级均达到最佳值;憎水剂掺量为与混凝土吸水率和抗折强度成反比,憎水剂掺量为 $6\text{ kg/m}^3$ 时,超高强混凝土具有更优异的抗压强度及吸水率性能。

**关键词:**超高强混凝土;屋面防水;纤维;憎水剂

中图分类号: TU528.31

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 05-0022-04

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.05.005

MENG Huijiang<sup>1,2</sup>, XIE Hong<sup>1,2</sup>, YU Susu<sup>3</sup>

(1. Hebei Jinduo Construction Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang 051430, China; 2. Hebei Province Ultra Low Energy Building Insulation Material Technology Innovation Center, Shijiazhuang 051430, China; 3. Hebei Sankai Deeply Developed Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 051430, China)

**Abstract:** To promote the application of ultra-high-strength concrete (UHSC) in roofing waterproofing systems, the effects of fiber and water-repellent agent additions on the mechanical and waterproof properties of UHSC were investigated. The results indicate that the flexural strength of the concrete is positively correlated with fiber content, reaching optimal flexural strength and impermeability when the fiber dosage is  $8\text{ kg/m}^3$ . Conversely, the addition of the water-repellent agent is inversely correlated with both water absorption and flexural strength. At a dosage of  $6\text{ kg/m}^3$ , the UHSC exhibits superior compressive strength and water absorption properties.

**Keywords:** ultra-high strength concrete; roof waterproofing; fiber; hydrophobic agent

## 0 引言

屋面防水工程的质量直接影响着建筑物的安全性、耐久性和使用寿命<sup>[1-2]</sup>。良好的屋面防水工程可有效延长维修周期、降低运营成本、减少施工碳排放、提高工作使用年限。将性能优异的超高强混凝土与保温板进行工厂一体化复合,可简化屋面防水工程施工工艺,缩短施工周期,提高防水系统耐久性<sup>[3-6]</sup>。

<sup>\*</sup> 基金项目: 石家庄市科学技术研究与发展计划项目 (211230153A)。

作者简介: 孟辉江 (1983—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程体系研究与应用。

通信作者: 于素素 (1995—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 建筑材料以及外加剂。

收稿日期: 2024-07-03

超高强混凝土具有超高的力学强度和优异的抗渗性能，加入适量纤维可进一步提升混凝土的力学性能及耐久性能，已应用于大跨度的桥梁、海底隧道、工业建筑梁板柱、高铁电缆沟盖板、地铁人防等混凝土结构工程中<sup>[7-9]</sup>。张丽辉等<sup>[10]</sup>研究了PP纤维和POM纤维对超高强混凝土性能影响，研究结果表明，掺入纤维降低了混凝土的新拌性能和抗压强度，但提高了混凝土劈裂抗拉强度；杜咏等<sup>[11]</sup>研究了不同水胶比和聚丙烯纤维掺量对超高强混凝土密实性和耐高温爆裂性影响，研究结果表明，水胶比为0.15时，具有更低的孔隙率；杜继新等<sup>[12]</sup>研究了不同防水剂、不同处理方式对混凝土耐久性能影响，研究结果表明，不同产品的水性渗透型无机防水剂均可向混凝土内部渗透形成凝胶体填充混凝土毛细孔道，同时防水材料中的活性物质与未发生水化反应的水泥再次作用，形成晶体状凝胶体堵塞裂缝，增强混凝土密实度；裴须强等<sup>[13]</sup>研究了不同硅烷憎水剂掺量的对水泥防水砂浆综合性能影响，研究结果表明，随着硅烷憎水剂的掺入，砂浆流动度和吸水率降低，同时抗折和抗压强度也随之降低，当硅烷憎水剂掺量为5%时水泥防水砂浆综合性能最佳。

综上，超高强混凝土应用于防水工程中研究较少。分析纤维及憎水剂对超高强混凝土力学性能和防水性能作用机理，研究不同配合比的超高强混凝土的综合性能，为其应用于防水工程中提供有力依据。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

水泥为石家庄市曲寨水泥有限公司生产的P·O 42.5普通硅酸盐水泥；粉煤灰为河北汇顺矿业有限公司生产的I级粉煤灰；矿粉为山东问渠新材料科技有限公司生产的超细S95矿粉；硅灰为甘肃三远硅材料有限公司生产的SiO<sub>2</sub>含量≥95%的硅灰；石英砂为济南凌威化工有限公司生产的连续级配石英砂，细度模数2.4；纤维为河北盛烽工程材料有限公司生产的6 mm聚酯纤维；减水剂为河北三楷深发科技股份有限公司生产的JD-9型聚羧酸高效减水剂；憎水剂为广东龙湖科技股份有限公司生产的Powder A型有机硅憎水剂。

1.2 配合比设计

在优选原材料基础上，综合考虑总胶凝材料，粉煤灰、矿粉及硅灰替代量，胶砂比和水胶比，适应生产工艺等因素，初步设计超高强混凝土配合比，见表1。

| 表1 超高强混凝土配合比 / (kg/m <sup>3</sup> )                    |     |     |     |            |     |     |
|--------------------------------------------------------|-----|-----|-----|------------|-----|-----|
| Table 1 Mix proportion of ultra-high strength concrete |     |     |     |            |     |     |
| 水泥                                                     | 粉煤灰 | 硅灰  | 矿粉  | 三级配<br>石英砂 | 水   | 减水剂 |
| 600                                                    | 200 | 150 | 100 | 1 050      | 175 | 8   |

1.3 试验方法

1.3.1 抗压强度试验

按配合比称量物料，行星式搅拌机搅拌180 s，制作尺寸70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm三个试件，机械振动5 s或持续到表面泛浆，不得过振。试件制作后在温度为(20±5)℃的环境下静置(24±2) h，编号、拆模，拆模后应立即放入标准养护室中养护至28 d龄期。依据JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》用WAW-300B级微机控制电液伺服万能试验机进行试件抗压强度测试。

1.3.2 抗折强度试验

参照抗压强度试件制样方法，制备尺寸40 mm×40 mm×160 mm试件，3个试件为一组，在(20±1)℃水中养护至28 d；依据GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》通过BC-300D型电脑恒应力抗折试验机加荷圆柱(50±10) N/s的速率均匀地将荷载垂直地加在棱柱体相对侧面上，直至折断。

1.3.3 抗渗等级试验

在上口直径70 mm、下口直径80 mm、高30 mm的截头圆锥带底金属试模中每组成型6个试件，静置(24±2) h后脱模。试件脱模后放入标准养护室养护至28 d，取出待表面干燥后密封，装入砂浆渗透仪，从0.2 MPa开始加压，恒压2 h后增至0.3 MPa，以后每隔1 h增加0.1 MPa，当6个试件中有3个试件端面是有渗水现象时，即可停止试验，记下当时水压依据JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》进行测试。

1.3.4 吸水率试验

参照抗压强度试件成型及养护方法。试件养护至28 d后，在(78±3)℃温度下烘(48±0.5) h，

材料科学

称其质量，然后将试件成型面朝下放入水槽，下面用 2 根  $\phi 10\text{ mm}$  的钢筋垫起，试件浸入水中的高度为 35 mm，放入温度  $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ ，相对湿度 80% 以上的恒温室中，试件表面不得有结露或水滴，然后在  $(48 \pm 0.5)\text{ h}$  取出，用拧干的湿布擦去表面水，称其质量。

2 试验结果与分析

2.1 纤维对超高强混凝土性能影响

纤维在塑性状态的混凝土中承受干缩而产生的拉应力，在混凝土中掺入纤维可提升混凝土复合机体抗拉强度，使纤维在混凝土三维方向呈均匀分布，利用纤维本身高抗拉强度特性和混凝土高握裹力，提升混凝土整体性能，达到提高混凝土抗折强度目的。混凝土中发生裂缝时裂缝的前端与纤维相交，使得引起裂缝的拉应力得以削弱或消除，降低混凝土前期微裂纹，减少水分渗透路径，阻碍微裂纹的扩大发展，从而提高了混凝土的抗渗性能。掺入过量纤维会增加混凝土基体中界面，引入了更多开放性空隙，降低混凝土密实度和抗渗性能。因此，需深入研究纤维掺量对超高强混凝土强度及抗渗性的具体影响。

在基础配合比上设计掺量纤维分别为 0、2、4、6、8、10  $\text{kg}/\text{m}^3$ ，对比其抗压强度、抗折强度及抗渗等级试验数据，根据试验结果绘制曲线图，结果见表 2、图 1。

实验结果表明，纤维掺量对抗压强度影响不大，抗折强度随纤维掺量增加而增大，掺量为 8  $\text{kg}/\text{m}^3$  时达到峰值，相对空白样提升 13.7%。纤维掺量达到 6~8  $\text{kg}/\text{m}^3$  时，抗渗等级满足 >P12 要求；当纤维掺量达到 10  $\text{kg}/\text{m}^3$  时，会有部分纤维分散不开，在混凝土内部出现部分纤维与水泥浆体团聚现象，导致

表 2 标养 28 d 不同纤维掺量试验结果

Table 2 The results of the formula experiment of 28d different fiber formula

| 编号 | 纤维掺量<br>/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$ | 抗压强度<br>/ $\text{MPa}$ | 抗折强度<br>/ $\text{MPa}$ | 抗渗等级<br>/P |
|----|------------------------------------|------------------------|------------------------|------------|
| 1  | 0                                  | 103.4                  | 12.4                   | 满足 P8 要求   |
| 2  | 2                                  | 104.2                  | 13.1                   | 满足 P10 要求  |
| 3  | 4                                  | 102.7                  | 13.6                   | 满足 P12 要求  |
| 4  | 6                                  | 102.9                  | 13.8                   | 满足 >P12 要求 |
| 5  | 8                                  | 102.1                  | 14.1                   | 满足 >P12 要求 |
| 6  | 10                                 | 101.7                  | 14.0                   | 满足 P10 要求  |

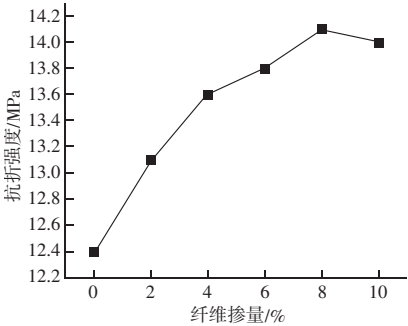
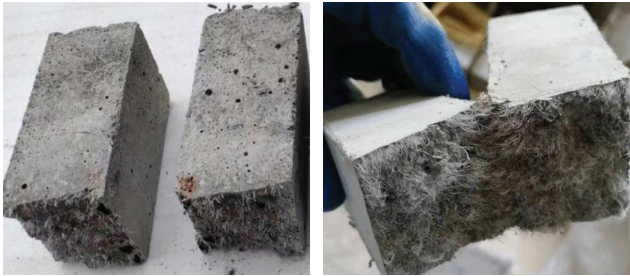


图 1 不同纤维掺量对混凝土抗折强度的影响  
Fig.1 The influence of different fiber contents on the flexural strength of concrete

混凝土整体胶砂比偏离设计值，混凝土整体匀质性下降，导致混凝土抗渗性降低，如图 2 所示。纤维在混凝土中均匀分布，提高混凝土抗折强度，当采用的有机纤维呈三维乱向分布时，可以抑制裂缝的发展，达到抗裂、抗渗、防冻的目的，从而提高混凝土的耐久性。综上所述，满足抗渗等级 >P12 同时抗折强度最高、最优的纤维掺量为 8  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。



(a) 纤维掺量 8  $\text{kg}/\text{m}^3$  (b) 纤维掺量 10  $\text{kg}/\text{m}^3$

图 2 不同纤维掺量试件断裂截面  
Fig.2 Fracture section of specimens with different fiber content

2.2 憎水剂对超高强混凝土性能影响

憎水剂可在混凝土内部的毛细空壁形成憎水膜，降低混凝土毛细孔吸水驱动力，达到降低混凝土吸水率的目的。混凝土中加入憎水剂后，硅烷乳液在水泥基颗粒表面和毛细孔壁上形成疏水薄膜，当水泥基颗粒消耗完内部水分后，表面的疏水薄膜阻断了外部水分补给，影响水泥的持续水化反应，降低混凝土强度。因此，研究憎水剂对混凝土吸水率及强度影响。

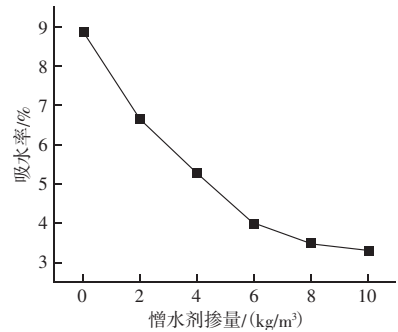
在纤维掺量为 8  $\text{kg}/\text{m}^3$  基础配方上，设计憎水剂掺量分别为 0、2、4、6、8、10  $\text{kg}/\text{m}^3$ ，分析超高强混凝土抗压强度和吸水率，试验结果见表 3 及图 3。

由图 3 可知，憎水剂掺量达到 6  $\text{kg}/\text{m}^3$ ，憎水剂掺量对混凝土吸水率影响减弱（吸水率相对空白样

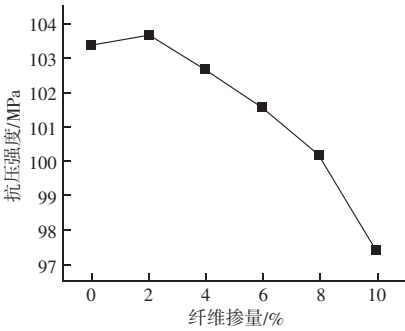
降低 55%)；憎水剂掺量达到 8 kg/m<sup>3</sup>，对混凝土抗压强度影响开始增大，综合考虑性能指标及成本因素，憎水剂最优掺量为 6 kg/m<sup>3</sup>。

表 3 标养 28 d 不同憎水剂掺量试验结果

| Table 3 The results of the formula experiment of 28 d different hydrophobic agent formula |                            |       |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------|----------|
| 编号                                                                                        | 憎水剂掺量/(kg/m <sup>3</sup> ) | 吸水率/% | 抗压强度/MPa |
| 1                                                                                         | 0                          | 8.9   | 103.4    |
| 2                                                                                         | 2                          | 6.7   | 103.7    |
| 3                                                                                         | 4                          | 5.3   | 102.7    |
| 4                                                                                         | 6                          | 4.0   | 101.6    |
| 5                                                                                         | 8                          | 3.5   | 100.2    |
| 6                                                                                         | 10                         | 3.3   | 97.4     |



(a) 憎水剂掺量对吸水率影响



(b) 憎水剂掺量对抗压强度影响

图 3 憎水剂掺量对混凝土性能影响

Fig. 3 The influence of hydrophobic agent dosage on concrete performance

综上所述，可确定超高强混凝土最优配合比，使超高强混凝土性能指标满足建筑屋面工程刚性防水层要求，最优配合比及性能试验结果见表 4、表 5。

表 4 超高强混凝土配合比 / (kg/m<sup>3</sup>)

| Table 4 Mix proportion of ultra-high strength concrete |     |     |     |       |    |     |     |     |
|--------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-------|----|-----|-----|-----|
| 水泥                                                     | 粉煤灰 | 硅灰  | 矿粉  | 石英砂   | 纤维 | 水   | 减水剂 | 憎水剂 |
| 600                                                    | 200 | 150 | 100 | 1 050 | 8  | 175 | 8   | 6   |

表 5 混凝土性能试验结果

| Table 5 Experimental results of concrete performance |          |       |            |
|------------------------------------------------------|----------|-------|------------|
| 抗压强度/MPa                                             | 抗折强度/MPa | 吸水率/% | 抗渗等级/P     |
| 106.2                                                | 14.2     | 3.8   | 满足 >P12 要求 |

4 结论

(1) 随着有机纤维掺量增加，超高强混凝土抗折强度总体呈上升趋势，当掺量达到 8 kg/m<sup>3</sup>时，抗折强度相对空白样提升 13.7%；纤维掺量继续增加，抗折强度变化趋于平缓。

(2) 随着纤维掺量增加，对超高强混凝土抗压强度影响不大，但对抗渗等级有一定影响，纤维掺量达到 6~8 kg/m<sup>3</sup>时，抗渗等级达到 >P12；纤维掺量继续增大，过量纤维影响超高强混凝土密实度，抗渗等级降低为 P10 等级。

(3) 随着憎水剂掺量增加，超高强混凝土吸水率逐渐降低，强度也略有降低，当憎水剂掺量达到 6 kg/m<sup>3</sup>时，吸水率随憎水剂掺量变化不在明显，抗压强度降低趋势变大，确定最优掺量为 6 kg/m<sup>3</sup>，吸水率相对空白样降低 55%。

参 考 文 献

[1] 张斌. 建筑工程屋面防水施工技术及质量控制 [J]. 建材发展导向, 2024, 22 (15): 16-18.

[2] 马崇鹏, 周本强, 顾建辉, 等. 住宅建筑工程中屋面防水施工技术探究 [J]. 屋舍, 2024, (22): 47-50.

[3] 孙秀芳. 防水保温一体化屋面研究 [J]. 山西建筑, 2018, 44 (21): 179-180.

[4] 张浩, 李小溪, 王宇, 等. 防水保温一体化系统在屋面改造工程中的应用 [J]. 中国建筑防水, 2020 (增刊 2): 20-23.

[5] 周明, 黄斯超, 杨磊. “屋特泰” 低碳复合防水系统在轻钢屋面上的应用 [J]. 中国建筑防水, 2023, (1): 35-38, 47.

[6] 张浩, 李小溪. “WiCi 外喜” 防水保温一体化系统在大连辉瑞制药项目屋面上的应用 [J]. 中国建筑防水, 2023 (12): 22-26.

[7] DAS N, NANTHAGOPALAN P. State of the art review on ultra high performance concrete Bal7890 - listic and blast perspective [J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 127: 104383.

[8] 张建媛. 钢纤维对超高性能混凝土力学性能影响研究综述 [J]. 四川建材, 2024, 50 (8): 17-18.

[9] 黄伟. 矿物掺合料对超高性能混凝土的水化及微结构形成的影响 [D]. 南京: 东南大学, 2017.

[10] 张雨辉, 刘建忠, 周华新, 等. 聚甲醛纤维对混凝土性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2018 (1): 58-62.

[11] 杜咏, 严奥宇, 戚洪辉. 纤维增强超高强混凝土防高温爆裂研究 [J]. 建筑材料学报, 2021, 24 (1): 216-223.

[12] 杜继新, 陈晓焕, 郭庆亮, 等. 水性渗透型防水材料提高混凝土耐久性能的试验研究 [J]. 山东交通科技, 2023 (5): 6-9.

[13] 裴须强, 王健, 徐立杰, 等. 硅烷憎水剂改性水泥防水砂浆的性能研究 [J]. 中国建筑防水, 2022 (5): 14-19.