

# 膨胀页岩掺量对 UHPC 水化与收缩性能影响

张 宇

(自贡市第四人民医院, 自贡 643000)

**摘 要:** 超高性能混凝土 (UHPC) 因胶凝材料含量高而具有较大收缩变形, 易引发开裂问题。基于此, 采用轻质膨胀页岩砂 (ES) 部分替代河砂, 开展不同 ES 掺量时 UHPC 的抗压强度、水化放热和收缩变形试验, 研究 ES 掺量对抗压强度、水化放热特性、自收缩变形、干燥收缩变形的影响规律。结果表明: ES 替代 40% 河砂时 UHPC 混合料的抗压强度仅损失 1.2%; 随 ES 掺量增加, UHPC 的水化放热速率和累计水化放热量增大、自收缩和干燥收缩变形减小、内部相对湿度和质量变化率提高; 掺 40% ES 时, 自收缩、干燥收缩变形分别降低 65.7%、26.3%, 内部相对湿度提高 18.6%; 钢纤维可通过内约束机制降低干燥收缩变形, 但会提供水分迁移通道而增加水分蒸发, 引起附加收缩, 当 ES 掺量低于 20% 时, 因约束作用干燥收缩减小, 高于 20% 后因水分蒸发干燥收缩增大。研究成果可为控制 UHPC 收缩变形提供理论依据。

**关键词:** 轻骨料膨胀页岩砂; UHPC; 水化放热; 自收缩变形; 干燥收缩变形

**中图分类号:** TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 05-0014-07

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.05.003

## Effect of Expanded Shale Sand Dosage on Hydration and Shrinkage Properties of UHPC

ZHANG Yu

(Zigong Fourth People's Hospital, Zigong 643000, China)

**Abstract:** Ultra-high performance concrete (UHPC) exhibits significant shrinkage deformation due to its high cementitious content, which readily induces cracking issues. Therefore, lightweight expansive shale sand (ES) partially replaced river sand. Tests were conducted on the compressive strength, hydration heat release, and shrinkage deformation of UHPC at different ES dosages. The study investigated the influence patterns of ES dosage on compressive strength, hydration heat release characteristics, autogenous shrinkage deformation, and drying shrinkage deformation. Results indicate: When ES replaces 40% of river sand, UHPC mixture compressive strength decreases by only 1.2%; As the ES content increased, the hydration heat release rate and cumulative hydration heat of UHPC rose, while self-shrinkage and drying shrinkage decreased. Internal relative humidity and mass change rate also increased. At 40% ES content, self-shrinkage and drying shrinkage decreased by 65.7% and 26.3%, respectively, while internal relative humidity increased by 18.6%. Steel fibers reduce drying shrinkage deformation through internal confinement mechanisms but also provide pathways for moisture migration, increasing evaporation and inducing additional shrinkage. When the ES content is below 20%, drying shrinkage decreases due to confinement effects; above 20%, drying shrinkage increases due to moisture evaporation. These findings provide theoretical support for controlling shrinkage

deformation in UHPC.

**Key words:** lightweight aggregate expanded shale sand; UHPC; hydration heat release; self shrinking deformation; dry shrinkage deformation

0 引言

超高性能混凝土 (UHPC) 具有出色的力学和耐久性能, 在桥梁和道路工程中得到广泛应用; 由于其胶凝材料用量高、水灰比低, 会产生较大的自收缩和干燥收缩变形<sup>[1-2]</sup>, 在约束构件中使用工程结构易开裂, 对其使用寿命产生不利影响, 控制 UHPC 的收缩变形已成为其工程应用的关键。UHPC 收缩变形主要分为自收缩变形和干燥收缩变形, 因水化作用导致的水分蒸发是其产生收缩的主要原因<sup>[3]</sup>; 采用轻质骨料通过提供内养护水分, 改善水化反应进程, 不仅可降低 UHPC 的收缩变形, 还可获得轻质建筑材料, 具有较高的工程应用前景。

采用轻骨料作为吸水载体, 在胶凝材料水化反应需水时释放, 可促进水化反应持续进行, 以及补偿化学收缩<sup>[4]</sup>。由于轻骨料相比天然河砂抗压强度、弹性模量小, 会显著劣化 UHPC 的强度性能; 但轻骨料可通过改善水化反应, 提高胶凝材料与骨料界面过渡区强度, 仍可获得力学强度满足要求的 UHPC 建筑材料<sup>[5-6]</sup>。徐彬彬等<sup>[7]</sup> 研究了粉煤灰陶粒轻骨料对 UHPC 自收缩变形的影响, 结果表明, 饱水后的轻骨料通过提供内养护作用, 可显著减小自收缩变形; 方驰等<sup>[8]</sup> 研究了饱水火山石与粗骨料混掺对 UHPC 性能影响, 结果表明, 火山石通过内养护作用减小自收缩变形, 但掺量过高时会劣化抗压强度; 韦亚平等<sup>[9]</sup> 研究表明, 吸水膨胀骨料具有显著的膨胀和内养护协同作用, 可提高 UHPC 的力学强度以及抗收缩变形性能; 陈友治等<sup>[10]</sup> 采用预处理粉煤灰漂珠部分替代河砂制备 UHPC, 结果表明, 粉煤灰漂珠掺量为 15% 时水化程度提高了 20%, 抗压强度仅略有降低, 自收缩程度呈现显著下降; 范海洋<sup>[11]</sup> 开展固废多孔骨料抑制 UHPC 收缩变形试验, 结果表明, 掺 25% 煤矸石陶粒可促进水化反应进行, 收缩应变降了 63.3%, 从微观结果中发现中等毛细孔隙增加是减少自收缩变形的主要原因; 黄维蓉等<sup>[12]</sup> 研究表明, 粗骨料的吸水率相比粒径分布, 对收缩影

响更大; 鄢亦斌等<sup>[13]</sup> 研究了骨料预湿度对轻质 UHPC 性能的影响, 结果表明, 骨料预湿可提高抗压强度、降低收缩变形; 易双秦等<sup>[14]</sup> 研究了珊瑚砂对 UHPC 性能影响, 结果表明, 掺 20% 珊瑚砂 (吸水率为 19%) 抗压强度提高 1.3%, 自收缩变形下降 42.2%; 蒋志鹏等<sup>[15]</sup> 通过神经网络模型分析了骨料内养护、聚丙烯纤维掺量对 UHPC 早期收缩变形影响, 结果表明, 二者对早期干燥收缩和自收缩有抑制作用, 纤维掺量不宜超过 0.1%。

综上, 骨料吸水提供的内养护机制抑制 UHPC 的收缩变形已得到确认, 但膨胀页岩砂掺量对 UHPC 收缩变形特性的影响规律尚不清晰。鉴于此, 开展了不同膨胀页岩砂掺量的 UHPC 收缩变形试验, 研究了抗压强度、水化放热特性、自收缩变形、干燥收缩变形的变化规律, 研究成果可为控制 UHPC 收缩变形提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 原材料

胶凝材料: P · O 52.5 普通硅酸盐水泥, 普通硅灰, I 级低钙粉煤灰, 物理性能指标见表 1, 化学成分见表 2。骨料: 河砂, 粒径区间范围为 0.15 ~ 2.36 mm; 细砂, 密度 2.61 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.4%; 膨胀页岩砂 (ES), 粒径区间范围为 0.15 ~ 4.75 mm, 密度 1.76 g/cm<sup>3</sup>, 24 h 吸水率为 16.8%, 筒压强度为 17.6 MPa。胶凝材料、骨料颗粒级配曲线如图 1 所示。镀铜端钩钢纤维, 长度 19 mm, 直径 0.22 mm, 抗拉强度为 3.2 GPa, 杨氏模量为 200 GPa。HRWR 型聚羧酸系高效减水剂, 减水率为 28%。

| 表 1 胶凝材料物理性能指标                                     |          |                             |                           |        |             |
|----------------------------------------------------|----------|-----------------------------|---------------------------|--------|-------------|
| Table 1 Physical properties cementitious materials |          |                             |                           |        |             |
| 化学成分                                               | 中值粒径 /mm | 比表面积 / (m <sup>2</sup> /kg) | 密度 / (kg/m <sup>3</sup> ) | 烧失量 /% | 28 d 活性指数/% |
| 水泥                                                 | 20       | 365                         | 3 150                     | 2.4    |             |
| 粉煤灰                                                | 12       | 542                         | 2 430                     | 1.2    | 97          |
| 硅灰                                                 | 2        | 2 435                       | 2 450                     | 4.7    | 125         |

材料科学

表 2 胶凝材料化学成分

Table 2 Chemical composition of cementitious materials /%

| 化学成分 | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO | SO <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O |
|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-----------------|-------------------|------------------|
| 水泥   | 19.6             | 4.7                            | 3.5                            | 63.1 | 3.4 | 2.7             | 0.4               | 1.3              |
| 粉煤灰  | 64.1             | 22.7                           | 6.7                            | 2.5  | 0.1 | 1.2             | 0.5               | 0.6              |
| 硅灰   | 95.3             | 1.2                            | 0.3                            | 0.7  | 0.2 | 0.4             | 0.1               | 0.4              |

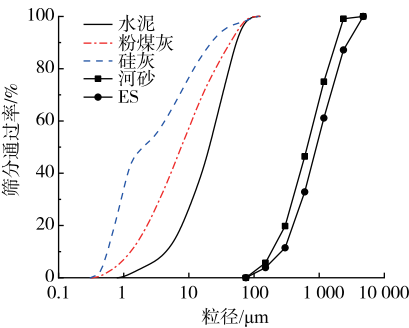


图 1 胶凝材料、骨料粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of cementitious materials and aggregates

1.2 试验方案

UHPC 配合比设计见表 3，采用 ES 以体积分数 10%、20%、30%、40% 替代河砂，基准组 ES00 骨料全部采用河砂，不掺钢纤维，所有掺 ES 的 UHPC 试件分为掺钢纤维和不掺钢纤维两种情况，钢纤维体积掺量为 2%；粉煤灰掺量为胶凝材料质量的 25%，硅灰掺量为胶凝材料质量的 20%。水灰比为 0.2，减水剂掺量为胶凝材料的 1%。

表 3 轻骨料 UHPC 配合比

Table 3 Mix proportion of lightweight aggregate UHPC / (kg/m<sup>3</sup>)

| 编号    | 水泥  | 粉煤灰 | 硅灰  | 河砂  | ES    | 钢纤维 | 水   | 减水剂  |
|-------|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|------|
| ES00  | 726 | 330 | 264 | 750 |       |     | 264 | 13.2 |
| ES10  | 726 | 330 | 264 | 675 | 50.6  |     | 264 | 13.2 |
| ES20  | 726 | 330 | 264 | 600 | 101.1 |     | 264 | 13.2 |
| ES30  | 726 | 330 | 264 | 525 | 151.7 |     | 264 | 13.2 |
| ES40  | 726 | 330 | 264 | 450 | 202.3 |     | 264 | 13.2 |
| ES10F | 726 | 330 | 264 | 675 | 50.6  | 157 | 264 | 13.2 |
| ES20F | 726 | 330 | 264 | 600 | 101.1 | 157 | 264 | 13.2 |
| ES30F | 726 | 330 | 264 | 525 | 151.7 | 157 | 264 | 13.2 |
| ES40F | 726 | 330 | 264 | 450 | 202.3 | 157 | 264 | 13.2 |

1.3 试件制备和试验方法

1.3.1 试件制备

试验前 24 h 将 ES 浸水饱和处理，消除 ES 高吸水性的影响。采用三档速度的搅拌机进行搅拌，加入水泥、硅灰、粉煤灰、骨料低速搅拌 2 min；再加入 70% 拌合水中速搅拌 3 min；随后加入钢纤维再搅

拌 2 min（未掺钢纤维试件无该步骤）；最后加入剩余拌合水、减水剂高速搅拌 2 min。搅拌完成后将混合料立即倒入模具成型，拆模后放置标准养护室养护至设定龄期。

1.3.2 试验方法

根据 GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》中的跳桌法，进行不含钢纤维的 UHPC 混合料流动度试验；将搅拌完成后的混合料倒入流动锥中，静置 2 min 使混合料在自由状态下流动，测量其静态流动扩展度。

根据 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法》进行 UHPC 的抗压强度试验，试件在 20±1℃、相对湿度≥95% 的标准养护室分别养护 3、7、28 d 进行试验，试验采用 40 mm×40 mm×160 mm 的棱柱体试件，试验仪器为 MTS 电液伺服控制试验机，加载速率为 1.0 MPa/s。

收缩变形试验分为自身收缩试验和干燥收缩试验，分别采用 GB/T50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》波纹管法和非接触法进行。自身收缩试验在标准养护室内进行，以 UHPC 混合料终凝时刻为起点进行收缩变形测量，记录 60 d 内试件长度变形。干燥收缩采用 100 mm×100 mm×515 mm 的棱柱体试件，试件在标准养护室养护 7 d，之后在 23±1℃、相对湿度为 50% 环境中进行 90 d 干燥收缩变形测量，试验采用 YC-NES 混凝土收缩变形测定仪。

内部相对湿度试验采用直径 100 mm、高度 200 mm 圆柱形试件，试件中心处预留直径 20 mm 圆孔，圆孔深度 150 mm，圆孔内插入湿度传感器，孔口处采用密封胶封闭，避免水分散失；试验在标准养护室内进行。

采用 TAM-Air 等温量热仪在 20±1℃ 恒温条件下进行 UHPC 砂浆的水化放热速率和累计水化放热测量，取 24 g 拌砂浆密封在玻璃小瓶中并放入等温量热仪内，测量 48 h 内水化放热。

2 结果与讨论

2.1 流动扩展度和抗压强度

由图 2 可知，未掺 ES 的基准组 ES00 流动扩展度为 232 mm，而掺入 ES 的 ES10、ES20、ES30、ES40

试件流动扩展度分别为 238、245、254、263 mm；与 ES00 试件相比，采用 ES 替代河砂分别为 10%、20%、30%、40% 时，流动扩展度分别增加了 2.6%、5.6%、9.5%、13.4%。这表明，随 ES 掺量增加 UHPC 拌合物的流动扩展度呈增大趋势，且随 ES 掺量增加扩展度近似线性增长，但拌合物的扩展度增幅不高，仍具有较好的均质性。ES 相比天然河砂，其颗粒形态呈圆球形，浸水后可产生滚珠效应，从而提高拌合物的扩展度；另外，ES 吸水率远大于河砂，在拌合过程中，饱和的 ES 会释放一定量的水分，也会提高扩展度，但拌合物的扩展度增幅不高，这可以认为 ES 内部所含水分仅少量析出，多数水分仍赋存于颗粒内部。

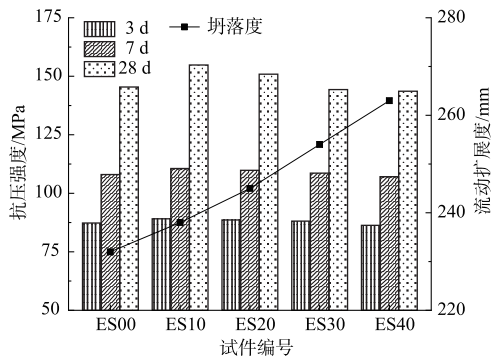


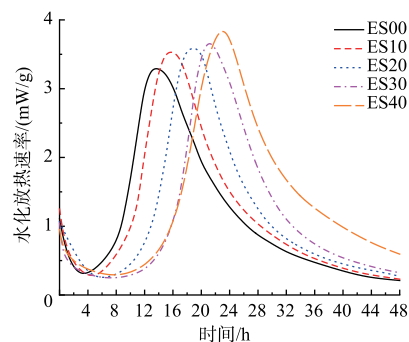
图 2 ES 掺量对 UHPC 流动扩展度和抗压强度影响  
Fig. 2 The influence of ES dosage on the flow expansion and compressive strength of UHPC

不同 ES 掺量的 UHPC 试件在 3、7、28 d 龄期的抗压强度变化规律基本相近，3 d 抗压强度在 85~90 MPa，7 d 抗压强度在 105~110 MPa，28 d 抗压强度达到了 140~155 MPa。抗压强度随 ES 掺量增加呈现先增大后减小趋势，与基准组 ES00 试件相比，ES 替代河砂分别为 10%、20%、30%、40% 时，28 d 抗压强度分别增加了 6.5%、3.8%、-0.7%、-1.2%；可见，ES 掺量不超过 20% 时，UHPC 的抗压强度略有增长，掺量超过 20% 后抗压强度略有降低。上述分析表明，ES 轻骨料掺量不超过 40% 时，对 UHPC 抗压强度的影响不大，不同掺量未有显著差异性；ES 轻骨料的强度虽小于河砂，但其具有的内养护效应可促进胶凝材料水化反应进行，通过生成更多的 C-S-H 凝胶提高拌合物的密实性能，改善因掺入轻质材料而引起的强度劣化；ES 掺量不超过 20% 时水化反应增强效应超过材料劣化因素，抗压

强度表现为提高，掺量超过 20% 后，轻质材料产生劣化效应超过水化增长效应，抗压强度呈现略有降低，这说明采用轻质 ES 骨料制备 UHPC 强度性能满足要求。

## 2.2 水化放热特性

由图 3 可知，随着 ES 掺量增加，UHPC 的水化放热速率和累计水化放热量均呈现增大趋势，这是因为掺入 ES 引入了额外水分，变相增加了水胶比，且 ES 中的水分可缓慢释放，提高了胶凝材料的水化程度，故增大了累计水化放热量，并使水化放热峰值相对延后。基准组 ES00 试件在 13.6 h 时水化放热速率达到峰值，峰值速率为 3.30 mW/g；掺入轻质骨料的 ES10、ES20、ES30、ES40 试件的放热速率分别在 15.7、19.1、21.0、23.8 h 达到峰值，水化放热峰值速率分别为 3.54、3.61、3.69、3.78 mW/g。ES00、ES10、ES20、ES30、ES40 试件在 48 h 内累计水化放热分别为 91.2、95.7、99.1、103.8、111.9 J/g；与基准组 ES00 相比，ES 替代河砂分别为 10%、20%、30%、40% 时累计水化放热量分别增加了 5.0%、8.7%、13.9%、22.8%。可见，ES 掺量超过 20% 后，UHPC 的累计水化放热量增长较为显著，这主要是由于轻骨料含量增加，水化过程中内养护水分释放大，使未水化的胶凝材料充分水化，加速了水化反应进程。水化放热量的增加会提高基体的温度和热膨胀变形，高水化放热速率会加速材料内部水分蒸发，加速材料的收缩变形。水化放热量增加会增大水分蒸发，提高 UHPC 的收缩变形，但因水化放热升温而引起的热膨胀效应同样会抵消部分收缩变形，水化放热对 UHPC 收缩变形影响存在复杂的多元耦合机制。



(a) 水化放热速率

## 材料科学

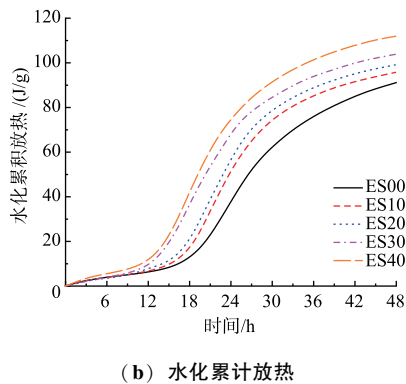


图3 ES 掺量对 UHPC 水化放热的影响

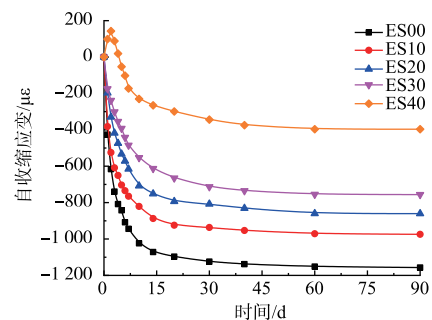
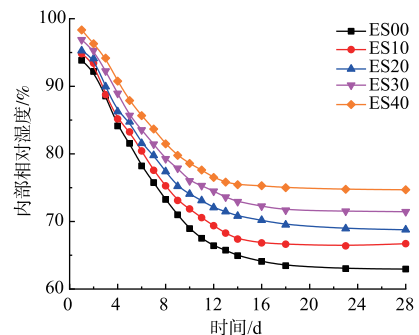
Fig. 3 The effect of ES dosage on the hydration heat of UHPC

## 2.3 自收缩变形

由图4可知,自收缩变形发展大致可分为4个阶段,第1阶段为0~7 d,该阶段内发展速度最快,收缩变形逐渐增大,这是由于初期水化反应剧烈,引起大量水分蒸发而导致收缩变形迅速发展;第2阶段为7~28 d,该阶段收缩变形速率逐渐减缓,这源于水化反应后期生成大量具有膨胀性的钙矾石、氢氧化钙,抵消部分收缩变形;第三阶段为28~60 d,收缩变形发展缓慢并逐渐趋于平稳;60 d后自收缩变形基本完成,该时期水化反应逐渐停止,UHPC的强度发展基本完成,可抵抗自干燥效应引起的收缩变形。90 d基准组ES00试件自收缩变形为1156.9  $\mu\epsilon$ ,而掺入轻质骨料的ES10、ES20、ES30、ES40试件自收缩变形分别为974.4、860.6、755.8、396.6  $\mu\epsilon$ ;与ES00试件相比,ES替代河砂分别为10%、20%、30%、40%时自收缩变形分别减小了15.7%、25.6%、34.7%、65.7%。可见,掺入ES显著降低了UHPC的自收缩变形,ES掺量为40%时自收缩变形规律与其他各组显著不同,在0~3 d内表现为膨胀,这显著降低了其90 d时自收缩变形,这可能源于较高的内养护水分含量时水化反应放热量较高,促使了钙矾石、C-S-H晶体结晶膨胀,从而抵消了基体的化学收缩,表明高ES掺量的UHPC试件受到高温膨胀和自收缩变形的双重作用。

UHPC的自收缩和材料内部相对湿度的变化存在线性相关性,由图5可知,掺入ES的UHPC试件内部相对湿度显著高于未掺ES的基准组试件;内部相对湿度在0~7 d迅速降低,7~14 d降幅逐渐减小,

14~28 d逐渐趋于平稳。内部相对湿度变化规律与自收缩变形发展基本一致,这表明二者之间存在显著相关性。含有ES的UHPC试件内部相对湿度更高,这源于轻质骨料的内养护效应,缓解了自干燥效应;与基准组ES00试件相比,28 d时ES10、ES20、ES30、ES40试件的内部相对湿度分别提高了6.0%、9.2%、13.5%、18.6%,这说明轻质骨料所携带水分可调控基体内部相对湿度,降低因水分蒸发而引起的自收缩变形,轻骨料内养护方法是降低UHPC自收缩变形的有效手段。

图4 ES 掺量对 UHPC 自收缩应变的影响  
Fig. 4 The effect of ES content on the self shrinkage strain of UHPC图5 ES 掺量对 UHPC 内部相对湿度的影响  
Fig. 5 The effect of ES dosage on the relative humidity inside UHPC

## 2.4 干燥收缩变形

由图6可知,UHPC试件的干燥收缩变形14 d内发展最显著,14~60 d干燥收缩变形逐渐放缓。未掺钢纤维的ES00、ES10、ES20、ES30、ES40试件90 d时干燥收缩应变分别为706.0、659.5、618.1、561.8、520.3  $\mu\epsilon$ ,与基准组ES00试件相比,ES掺量分别为10%、20%、30%、40%时干燥收缩应变分别减小了6.6%、12.5%、20.4%、26.3%;可见随着轻质骨料ES掺量的增加,UHPC的干燥收缩变形呈现减小趋势。这源于掺入ES可在混合料中提供额

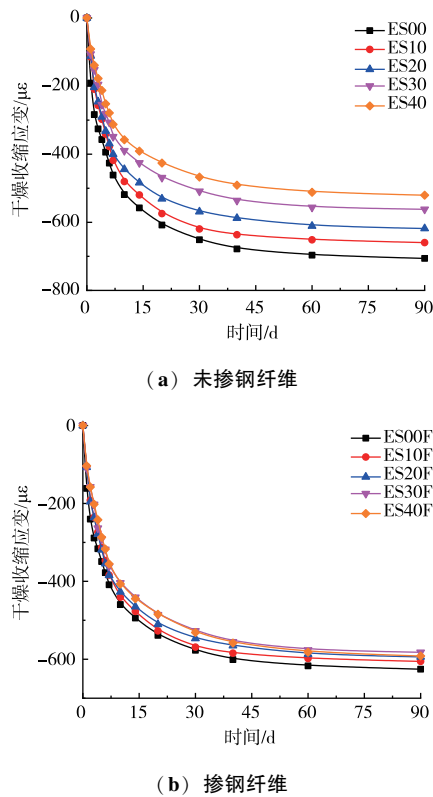


图 6 ES 掺量 UHPC 干燥收缩变形的影响  
Fig. 6 The effect of ES content on drying shrinkage deformation of UHPC

外的水分以补偿外部蒸发,随着 UHPC 表面蒸发进行,ES 孔隙中赋存的水分通过毛细孔隙流向水泥浆体,这将减小胶凝材料的干燥收缩变形;因水分蒸发而引起的质量变化率随 ES 掺量增加而增大,掺入钢纤维的试件质量变化率更为显著。由图 7 (a) 可知, UHPC 的质量变化率曲线与干燥收缩应变曲线变化规律基本一致,随着龄期增长试件质量逐渐趋于恒定,90 d 时 ES00、ES10、ES20、ES30、ES40 试件的质量变化率分别为 -0.69%、-0.73%、-0.79%、-0.83%、-0.88%,ES 掺量由 0 增加至 40%,质量变化率增加 0.19%。

掺入钢纤维会降低 ES 对 UHPC 的干燥收缩的影响,同样,试件的质量变化率也会显著增大。掺入钢纤维的 ES00F、ES10F、ES20F、ES30F、ES40F 试件 90 d 时干燥收缩应变分别为 623.4、605.5、594.0、582.1、591.6  $\mu\epsilon$ ,与未掺钢纤维试件相比,ES 掺量在 0~20% 时干燥收缩变形表现为减小,分别降低了 11.7%、8.2%、3.9%;ES 掺量超过 20% 后

干燥收缩变形表现为增加,分别增大了 3.6%、13.7%;可以看出,ES 掺量越大,掺入钢纤维的试件干燥收缩变形增幅更高。钢纤维通过两种途径影响 UHPC 的干燥收缩变形,一种是通过提供内部约束和桥接微裂缝来减少收缩,另一种为通过增加蒸发质量损失而增加收缩;钢纤维可在基体内形成额外的水分传输路径,使内部水分更快向基体表面迁移和蒸发。从图 7 (b) 可知,ES40F 试件质量变化率增加至 1.06%,显著高于 ES40 试件,其相比 ES00F 质量变化率增加了 0.33%,掺入钢纤维引起试件内部水分蒸发的现象是显著的。

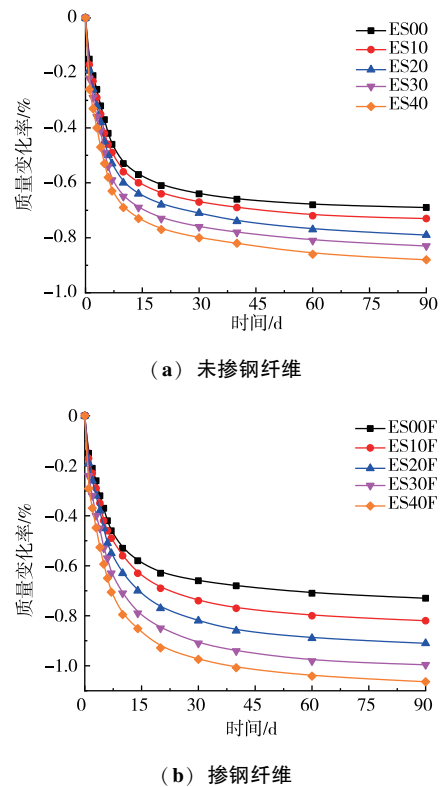


图 7 ES 掺量 UHPC 质量变化率的影响  
Fig. 7 The Influence of ES content on the quality change rate of UHPC

综上,掺入 ES 可通过提供内养护水分而降低 UHPC 的干燥收缩变形,但不能消除干燥收缩现象,这是因为多余的水分最终会以蒸发形式散发至外部环境,而引起干燥收缩变形;添加钢纤维可为基体提供约束作用而减小干燥收缩变形,但纤维会提供水分迁移通道,加速内部水分蒸发而导致干燥收缩变形增加;故应控制 UHPC 中钢纤维掺量,或掺纤维的 UHPC 中限制 ES 掺量。

## 材料科学

## 3 结论

通过研究不同轻骨料 ES 掺量时 UHPC 的水化放热和收缩变形试验,分析 ES 内养护机制对 UHPC 自收缩和干燥收缩变形的影响规律,得出以下结论:

(1) 随 ES 掺量增加 UHPC 混合料的流动扩展度呈增大趋势,抗压强度呈先增大后减小趋势,ES 掺量为 40% 时,流动扩展度增加了 13.4%,抗压强度减小了 1.2%;ES 掺量为 40% 时对 UHPC 混合料的流动扩展度和抗压强度影响较小,轻骨料 UHPC 建筑材料仍具有较高的抗压强度。

(2) 掺入 ES 可促进胶凝材料的水化反应发展,随 ES 掺量增加,UHPC 的水化放热速率和累计水化放热量增大,峰值水化放热速率延后;ES 掺量为 40% 时累计水化放热量增加了 22.8%,放热量增加会使 UHPC 产生热膨胀而抵消早期收缩变形,但会加速水分蒸发而引起干燥收缩。

(3) UHPC 的自收缩变形随 ES 掺量增加而减小,内部相对湿度随 ES 掺量增加而增大,自收缩变形与内部相对湿度存在显著线性相关性,ES 通过提供内养护水分增大内部相对湿度来降低自收缩变形;ES 掺量为 40% 时自收缩变形降低了 65.7%,内部相对湿度提高了 18.6%。

(4) 随 ES 掺量增加,UHPC 的干燥收缩呈减小趋势,质量变化率呈增大趋势;掺入钢纤维会改变 UHPC 的干燥收缩变化规律,提高质量变化率,ES 掺量为 0~20% 时约束作用占主导,干燥收缩减小,ES 掺量大于 20% 后水分迁移效应增强,干燥收缩变形增大;钢纤维通过内部约束机制降低干燥收缩变形,但会给内部水分迁移提供通道,增大水分蒸发量而引起额外干燥收缩。

## 参 考 文 献

[1] 刘瑞朝,董恩来,马先伟,等.超高性能混凝土收缩研究进展

- [J]. 建筑结构, 2024, 54 (6): 91-98.
- [2] 刘勇强.低收缩早强超高性能混凝土制备与性能研究[J].粉煤灰综合利用, 2025, 39 (5): 14-19.
- [3] 顾炳伟,王景正,龚致远,等.超高性能混凝土早期收缩性能的研究[J].粉煤灰综合利用, 2025, 39 (2): 11-17.
- [4] 吴晓刚,杨健辉,袁冬冬,等.骨料种类对超高性能混凝土性能影响机理研究[J].硅酸盐通报, 2024, 43 (9): 3164-3172.
- [5] 黄贵旗,徐建光,冯海暴,等.页岩陶粒内养护对超高性能混凝土力学性能与微观结构的调控机制[J/OL].复合材料学报, 1-14 [2025-12-05]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20251127.002>.
- [6] 刘雨珊,庞建勇,姚韦靖.页岩陶粒轻骨料混凝土高温后蠕变特性[J].建筑材料学报, 2021, 24 (5): 1096-1104.
- [7] 徐彬彬,欧忠文,罗伟,等.饱水轻骨料和减缩剂对 UHPC 水化过程和自收缩的影响[J].材料导报, 2020, 34 (22): 22065-22069.
- [8] 方驰,杨伟浩,任康,等.保水轻骨料对超高性能混凝土强度和自收缩的影响[J].中外公路, 2025, 45 (2): 65-72.
- [9] 韦亚平,李绍成,王有志,等.多尺度 MgO 膨胀剂与 SAP 协同作用对 UHPC 力学及收缩性能的影响[J].硅酸盐通报, 2023, 42 (9): 3154-3165.
- [10] 陈友治,姚广一,殷伟淞,等.漂珠自养护超高性能混凝土配制及性能研究[J].武汉理工大学学报, 2019, 41 (10): 12-18.
- [11] 范海洋.固废多孔骨料免蒸养 UHPC 的减缩机理及应用研究[D].广西:广西大学, 2025.
- [12] 黄维蓉,杨玉柱,崔通,等.含粗骨料超高性能混凝土收缩变形性能的研究[J].混凝土, 2021 (8): 99-103.
- [13] 鄢亦斌,刘开志,高立强,等.轻骨料预湿度对轻质 UHPC 性能及微观结构的影响[J].混凝土与水泥制品, 2024 (12): 14-21.
- [14] 易双秦,刘开志,邱晶,等.吸水珊瑚砂作为超高性能混凝土(UHPC)内养护介质的研究[J].硅酸盐通报, 2019, 38 (8): 2506-2512.
- [15] 蒋志鹏,高畅,汤金辉,等.超高性能混凝土早期收缩性能及神经网络预测模型[J].硅酸盐学报, 2025, 53 (5): 1098-1109.