

# 装配式车站构件与混杂纤维UHPC湿接缝界面 的高温粘结性能研究

李记军, 史力, 汪杰, 张祖雪

无锡地铁建设有限责任公司, 江苏 无锡

收稿日期: 2024年4月30日; 录用日期: 2024年5月20日; 发布日期: 2024年5月29日

## 摘要

UHPC对提升预制结构湿接缝的性能具有重要作用, 但接缝界面在高温环境中存在高温爆裂及性能下降的风险。本文研究了高温环境对钢纤维和聚丙烯纤维混掺的UHPC与预制混凝土界面粘结性能的影响。试验结果表明: 在高温作用下, UHPC-混凝土界面在受热初期(100°C)的粘结强度得到小幅度的提升。随着温度的进一步升高, 界面的粘结强度劣化。而高温作用对粘结性能的影响更显著。当受热温度为500°C时, 体系的粘结强度损失可达30%~40%。综合UHPC湿接缝界面的抗高温爆裂性能和力学性能的高温退化, 当钢纤维和聚丙烯纤维含量分别为2 wt%和0.5 wt%时, UHPC材料与预制混凝土界面具有较好的粘结性能。

## 关键词

高温环境, 超高强混凝土, 混凝土界面, 粘结性能

## Study on High-Temperature Bonding Properties of Prefabricated Station Components and Hybrid Fiber UHPC Wet Joint Interface

Jijun Li, Li Shi, Jie Wang, Zuxue Zhang

Wuxi Metro Construction Co., Ltd., Wuxi Jiangsu

Received: Apr. 30<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 20<sup>th</sup>, 2024; published: May 29<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

UHPC plays a crucial role in enhancing the performance of wet joints in prefabricated structures,

文章引用: 李记军, 史力, 汪杰, 张祖雪. 装配式车站构件与混杂纤维 UHPC 湿接缝界面的高温粘结性能研究[J]. 土木工程, 2024, 13(5): 675-683. DOI: 10.12677/hjce.2024.135073

but there is a risk of high-temperature cracking and performance degradation in joints exposed to high-temperature environments. This study investigates the impact of high-temperature environments on the bonding properties of UHPC mixed with steel fibers and polypropylene fibers at the interface with prefabricated concrete. The experimental results indicate that the bonding strength of the UHPC-concrete interface experiences a slight improvement during the early stages of heating (100°C) under high-temperature conditions. However, with further temperature increases, the bonding strength at the interface deteriorates. The influence of high temperatures on the bonding properties becomes more significant, with a loss of bonding strength ranging from 30% to 40% when the heating temperature reaches 500°C. Considering the high-temperature resistance to cracking and the degradation of mechanical properties at the UHPC wet joint interface, a favorable bonding property with precast concrete interface is achieved when the UHPC material is mixed with 2 wt% of steel fibers and 0.5 wt% of polypropylene fibers.

## Keywords

High-Temperature Environments, Ultra-High Performance Concrete (UHPC), Concrete Interface, Bonding Property

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

预制装配式结构在现代施工技术地下轨道交通工程中占有重要的地位，其结构接缝粘结性能是保证结构整体性能的关键[1] [2]。超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, 简称 UHPC)因其具有优异的力学性能、超高的耐久性能以及极佳的抗氯离子渗透性能，应用于预制结构的接缝处理对装配式结构性能的提升有较大的潜力[3] [4]。

然而，高强混凝土和 UHPC 由于具有十分致密的结构，在受火时较容易发生爆裂，易造成结构的损伤，甚至可能存在倒塌的风险[5] [6]，其与普通混凝土对温度的敏感性有显著的差异[7] [8] [9] [10]。因此，需要对两者界面的粘结性进行深入的研究。目前，国内外已经开展了 UHPC-普通混凝土界面粘结性能的相关研究。在较高温度下，水泥的水化速率可能会增加，从而影响 UHPC 的早期强度和粘结性能，促进胶凝材料与骨料表面的相互作用。特别是在温度循环的环境下，收缩和膨胀可能导致界面剪切应力的增加，从而影响粘结性能[11] [12] [13] [14]。关于环境温度对 UHPC-混凝土的粘结性能方面的研究还不完善。因此，本研究设计了不同的温度环境，研究 UHPC-普通混凝土界面的粘结性能影响，重点关注钢纤维和聚丙烯纤维混掺对 UHPC 对界面粘附性能的影响。

## 2. 原材料及试验方法

### 2.1. UHPC 原材料及基准配合比

UHPC 原材料：P.II 52.5 水泥，由南京江南小野田水泥厂生产，其主要的化学成分见表 1；试验所用硅灰为上海天恺公司生产的 970U 微硅粉，硅灰主要的化学成分见表 2；8000 目石英粉；30~100 目石英砂(比重  $2.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )；PC-200 型聚羧酸减水剂，减水率大于 21%；平直型镀铜钢纤维，由江西大业金属生产，见图 1，技术参数见表 3；束状单丝聚丙烯纤维，产于长沙柠祥建材有限公司，见图 2，纤维技术参数见表 4；混凝土拌和水符合 GJG 63-2006《混凝土用水标准》要求。本试验设计 UHPC 配合比见表 5。



**Figure 1.** Steel fiber  
**图 1.** 钢纤维



**Figure 2.** Polypropylene fiber  
**图 2.** 聚丙烯纤维

**Table 1.** Main chemical composition of P.II 52.5 cement (%)

**表 1.** P.II 52.5 水泥的主要化学成分(%)

Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0.09	0.66	4.33	19.90	2.91	0.03	0.78	3.28

**Table 2.** Main chemical composition of silica fume (%)

**表 2.** 硅灰的主要化学成分(%)

Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO
0.19	0.57	0.19	96.20	1.30	0.03	0.33	0.33

**Table 3.** Technical parameters of steel fiber

**表 3.** 钢纤维的技术参数

直径/mm	长度/mm	长径比/L·D <sup>-1</sup>	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	密度/g·cm <sup>-3</sup>
0.2	13	65	≥2850	200	7.85

**Table 4.** Main technical parameters of polypropylene fiber  
**表 4.** 聚丙烯纤维的主要技术参数

直径/ $\mu\text{m}$	长度/mm	长径比/ $L \cdot D^{-1}$	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	比重	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
40	12	300	>486	>4.8	0.91	0.91

**Table 5.** Mix ratio design of UHPC ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
**表 5.** UHPC 的配合比设计( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

编号	水泥	硅灰	石英粉	30~60 目石英砂	70~100 目石英砂	高效减水剂	水
1	743	90	250	856	214	7.15	193
2	743	90	250	856	214	8.04	193
3	743	90	250	856	214	8.94	193
4	743	90	250	856	214	9.83	193
5	743	90	250	856	214	10.73	193

## 2.2. 试验方法

按照表 5 的配合比称取 UHPC 原材料, 将称量好的胶凝材料与石英砂混合放入搅拌锅中, 将粉体材料搅拌至均匀, 再将高效减水剂和水一同混合, 倒入混合均匀的粉体材料中快搅 2 min, 加入纤维材料, 快搅 2 min 后停机出料。每组制备 3 块边长 70.7 mm 的立方体试块与 3 块尺寸为 40 mm × 40 mm × 160 mm 的长方体试块。20℃湿度 98% 标准养护 28 天, 然后进行高温处理, 最后进行力学性能试验和微观性能测试。

对试块分别进行 200℃、300℃及 500℃的高温加热试验, 升温速率设置为 10℃/min。对处理过的试块进行抗压强度及抗折强度的力学性能试验。试件的抗压强度和抗折强度的测定方法参考《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2019)的相关规定进行, 取三个试件测试所得的平均值作为测试结果。使用 YAW-3000 微机控制压力试验机进行抗压强度和抗折强度加载试验。加载速率为分别设置为 1.5 kN/min 和 0.05 kN/min。试验开始前, 将试件表面处理干净, 将成型时的侧面作为加载承压面, 试件的中心对准压力试验机的中心, 试件表面与压力机均匀接触, 加载至试件强度下降至峰值强度的 70% 停止。

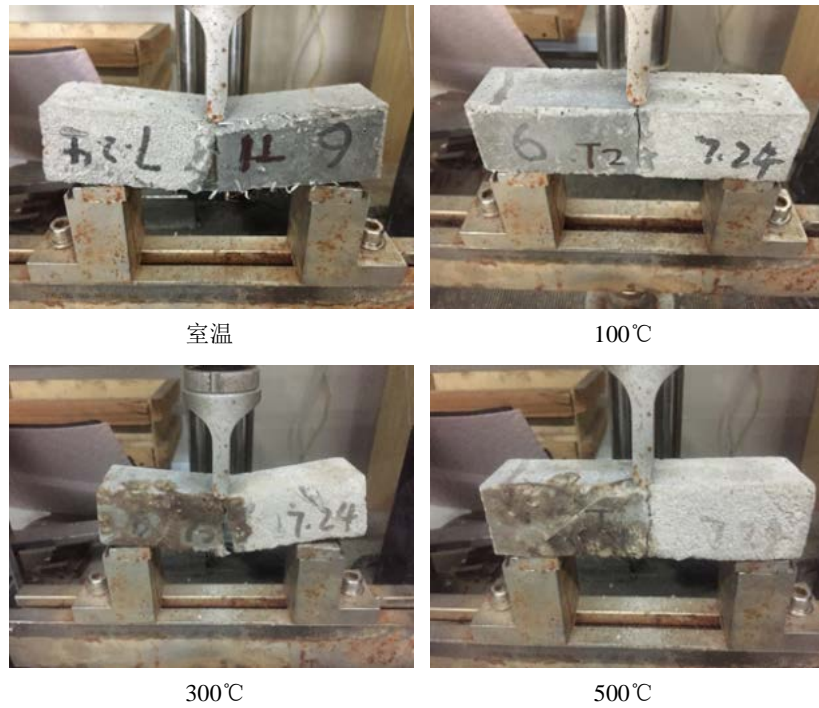
采用 XRD 和 BET 测试分析高温环境样品的组成和孔径分布。XRD 测试采用日本 Rigaku D/max 2550 型 X 射线衍射仪分析, 扫描速度为 5°/min, 2 $\theta$  范围为 5°~75°; BET 测试采用贝式德仪器科技(北京)有限公司制造的 3H-2000PSI/2 型全自动氮吸附比表面仪。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 破坏形态

图 3 展示了 Sf1PP1 样品在不同温度条件下进行的粘结抗折试验结果。试验中, 所有的基体材料都在粘结界面处发生断裂, 导致破坏面相对平坦, 但具体的破坏模式受温度影响而有所不同。

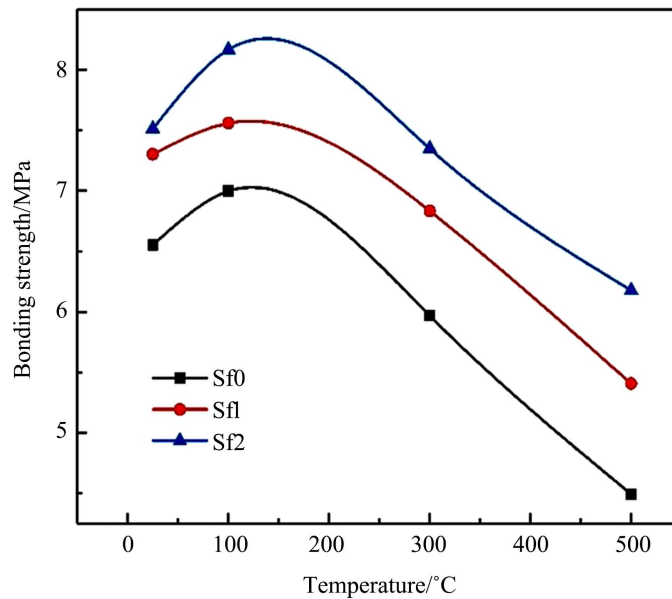
在 25℃到 300℃的温度范围内, 基体材料被破坏时, 可以观察 UHPC 材料的基体残留在普通基体表面的凹坑中。然而, 随着温度的升高, 这些残余 UHPC 基体逐渐减少甚至部分普通浆体也会被去除。这可能是因为普通基体的断面相对疏松, 并且粘结力大于其抗拉能力。当温度升至 500℃时, UHPC 基体几乎没有残留在普通基体一侧的凹坑中。此外, 表面出现了一些细小的裂缝。为了解释宏观破坏的试验现象, 接下来从粘结性能和微观结构进行详细说明。



**Figure 3.** Bonding failure test at different temperatures  
**图 3.** 不同温度下的粘结破坏试验

### 3.2. 高温作用下 UHPC 基体的粘结性能测试

UHPC 与基体在高温环境下粘结性能的测试结果如图 4 所示。各组基体在高温后的粘结强度剩余百分率见图 5。由图 4 可知，从 25℃ 升至 100℃、300℃ 和 500℃ 的变化过程中，各组 UHPC-基体混凝土的粘结强度表现出相似的趋势。在升温初期阶段，粘结强度略有增加，但随着温度的进一步上升，基体界面粘结强度开始下降。



(a) 钢纤维

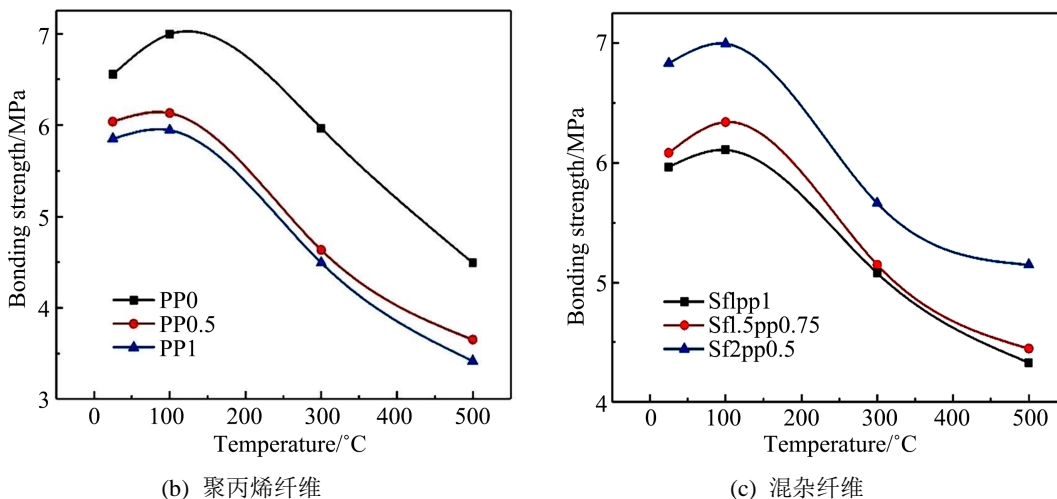


Figure 4. Change of bonding strength of different matrixes at high temperature  
图 4. 高温作用下不同基体的粘结强度变化

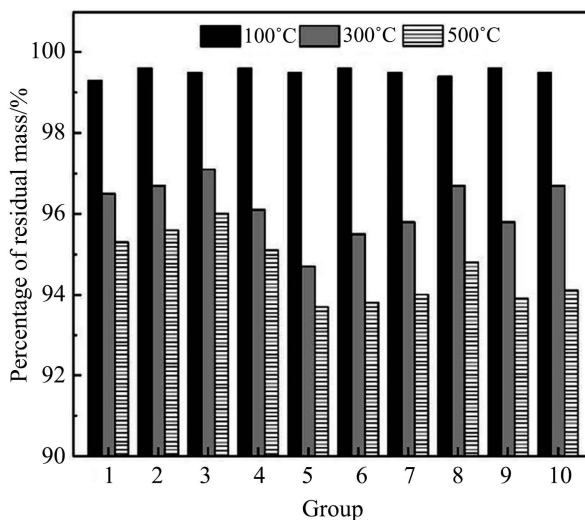


Figure 5. Residual percentage of bonding strength at high temperature  
图 5. 高温作用下粘结强度剩余百分率

对于 Sf0、Sf1 和 Sf2 组基体，从图 4(a)可以看出，不论是在室温还是高温条件下，添加钢纤维可以有效提高基体的粘结强度，其中 2% 钢纤维组表现出最佳的粘结性能。这是因为钢纤维不仅限制了 UHPC 层在硬化过程中的干缩变形，减少了粘结界面的收缩应力，还在界面处增强了新旧混凝土之间的机械咬合作用，进一步提升了粘结强度。此外，在高温条件下，钢纤维具有良好的传热性质，有助于保持基体内外温度均匀，减小温度应力，改善高温下的粘结性能。

根据图 5，在 100°C 时，基体粘结强度略有提升。Sf0、Sf1、Sf2 组的粘结强度剩余百分率分别为 106.8%、103.5%、108.7%。这一提升可能是由于高温养护促进了基体的进一步水化，产生了更多有利于粘结的水化产物。然而，当温度升至 300°C 时，基体粘结强度较 25°C 下有所下降，Sf0、Sf1、Sf2 组的粘结强度剩余百分率分别为 91.1%、93.6%、97.8%。随着钢纤维掺量的增加，基体的粘结强度剩余百分率逐渐提高，表明钢纤维的添加可以有效抵抗高温对基体粘结性能的不利影响。当温度达到 500°C 时，界面处的胶凝材料水化产物在高温下受损，Sf0 组基体的粘结强度显著下降，剩余百分率仅为 68.6%。而掺有钢纤维的

Sf1 组和 Sf2 组的剩余百分率分别为 74.0%和 82.2%。再次证明了钢纤维的添加可以有效地降低高温对基体粘结性能的不利影响。

对于 PP0、PP0.5 和 PP1 组基体, 根据图 4(b)的结果, 基体粘结强度的整体变化规律仍然是在受热初期有小幅提升, 但在较高温度下出现性能劣化。不论在室温还是高温条件下, 添加聚丙烯纤维都会对基体的粘结性能产生一定的负面影响。在 25℃下, PP0.5 组和 PP1 组的粘结强度分别较 PP0 组降低了 8.0%和 10.7%。这可能是因为相对于钢纤维而言, 有机纤维的体积和表面积更大, 导致界面处的粘结作用减少, 从而引起了基体粘结性能的下降。且随着聚丙烯掺量的增加, 基体粘结性能的下降越明显。

根据图 5, 当温度从 25℃升至 100℃时, 基体粘结强度的变化规律与钢纤维组相似, 表现出小幅提升。PP0、PP0.5、PP1 组的粘结强度剩余百分率分别为 106.8%、101.5%、101.6%。然而, 当温度升至 300℃时, 掺有聚丙烯纤维的 PP0.5 和 PP1 组的粘结强度出现较大幅度的下降。PP0 组的粘结强度剩余百分率为 91.1%, 而 PP0.5 和 PP1 组的粘结强度剩余百分率仅为 76.8%和 76.7%。这是因为此温度已经超过了聚丙烯纤维的熔点, 导致界面处原本由纤维占据的区域变成了孔道, 减小了 UHPC 材料与普通浆体有效粘结面积。当温度为 500℃时, PP0、PP0.5、PP1 组的粘结强度剩余百分率分别为 68.6%、60.5%、58.4%, 同样显示出掺入聚丙烯纤维的基体比未掺入的基体具有更低的粘结强度剩余百分率, 不过与 300℃时相比, 降低幅度较小, 这表明在此时水化产物的破坏成为主要因素。

对于混杂纤维的影响, 如图 4(c)所示, 三种混杂方式的基体粘结强度变化趋势与单一纤维添加相似, 随着温度的增加, 粘结强度在受热初期有小幅提升, 然后下降。从图 5 的结果来看, Sf1PP1、Sf1.5PP0.75 和 Sf2PP0.5 基体在 100℃时的粘结强度剩余百分率分别为 102.3%、104.2%、102.4%, 与单一纤维添加的结果基本一致。在 300℃时, 它们的粘结强度剩余百分率分别为 85.1%、84.6%、82.9%。当温度为 500℃时, 它们的粘结强度剩余百分率分别为 72.5%、73.1%、75.3%。混杂纤维的组合方式不仅发挥了聚丙烯纤维在高温条件下的性能, 还兼具钢纤维在提高粘结性能和减小劣化程度方面的作用。因此, 在高温条件下, 2%钢纤维和 0.5%聚丙烯纤维的混杂方式表现出更卓越的性能。

### 3.3. 微观结构

图 6 为 UHPC 在高温条件下进行的 X 射线衍射(XRD)分析结果, 包含了 25℃、100℃、300℃和 500℃环境下的测试数据(分别代表为 T1、T2、T3 和 T4)。通过谱图分析, 发现随着升温, UHPC 中的各种组分的 XRD 峰值都在不同程度上减弱。

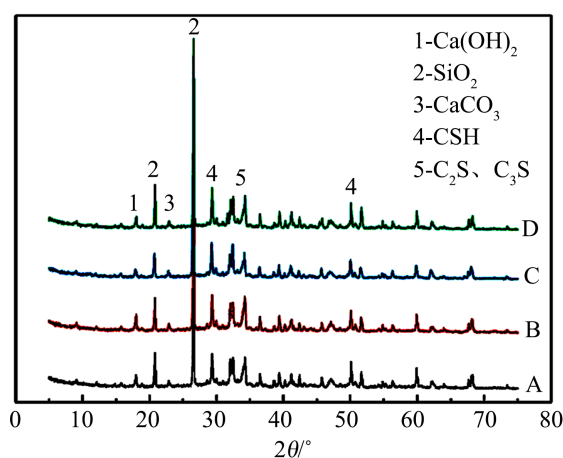


Figure 6. XRD pattern of UHPC at high temperature  
图 6. 高温作用下 UHPC 的 XRD 图谱

对于  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  而言, 从室温升至  $100^\circ\text{C}$  再到  $300^\circ\text{C}$ , 其特征峰基本维持不变, 仅略有减弱。然而, 当温度达到  $500^\circ\text{C}$  时,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的衍射峰已经无法检测到, 表明在这个温度下,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  已经完全分解。对于  $\text{C}_2\text{S}$  和  $\text{C}_3\text{S}$ , 可以观察到当温度从室温升至  $100^\circ\text{C}$  时, 其衍射峰明显减弱, 进一步证实了适度高温条件下相当于进行了“热养护”, 有助于促进 UHPC 中未水化的水泥颗粒继续水化。因此,  $\text{C}_2\text{S}$  和  $\text{C}_3\text{S}$  的衍射峰显著减弱。然而, 随着温度的持续上升,  $\text{C}_2\text{S}$  和  $\text{C}_3\text{S}$  的特征峰几乎未发生明显变化。这表明 UHPC 中的这些矿物能够抵御  $500^\circ\text{C}$  的高温作用。此外, 图谱还显示, 在  $500^\circ\text{C}$  温度下, CSH 凝胶仍然具有相对稳定的衍射峰, 受到的影响相对较小, 这表明在  $25^\circ\text{C}$  至  $500^\circ\text{C}$  范围内, CSH 凝胶能够相对持久存在。

### 3.4. 高温对 UHPC 孔结构的影响

在高温环境下, UHPC 的孔隙分布表现如图 7 所示。从图中可观察到, 随着升温, UHPC 材料的孔隙度逐渐增加。在  $300^\circ\text{C}$  以下的温度范围内, UHPC 孔径分布保持相对平稳。在  $100^\circ\text{C}$  至  $300^\circ\text{C}$  间呈现轻微波动。然而, 当温度超过  $300^\circ\text{C}$  时, 通过微分孔体积曲线可明显观察到孔结构经历了显著变化, 孔体积急剧增加。在约  $350^\circ\text{C}$  左右的温度阈值附近, 高性能混凝土的孔隙率发生显著变化。这一现象的出现可能是因为当温度达到  $100^\circ\text{C}$  时, UHPC 中的自由水分蒸发, 留下较多毛细孔, 导致孔体积增加, 孔径分布曲线上升[15]。而在  $100^\circ\text{C}$  至  $300^\circ\text{C}$  的温度范围内, 大部分自由水蒸发。随着温度升高, UHPC 材料内部形成一种特殊的自蒸养状态, 未完全水化的颗粒开始进一步水化, 生成的水化产物填充了部分由水分蒸发造成的毛细孔。因此, 在这个阶段, 孔径可能会随着温度的升高而变细。当受热温度达到  $300^\circ\text{C}$  时, UHPC 材料内的结合水几乎完全蒸发, 导致混凝土开始出现微裂缝, 孔隙率迅速增加。而在  $500^\circ\text{C}$  时, UHPC 中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  等物质开始分解, 从而裂缝迅速扩大, 导致 UHPC 的孔结构的劣化进一步加剧。

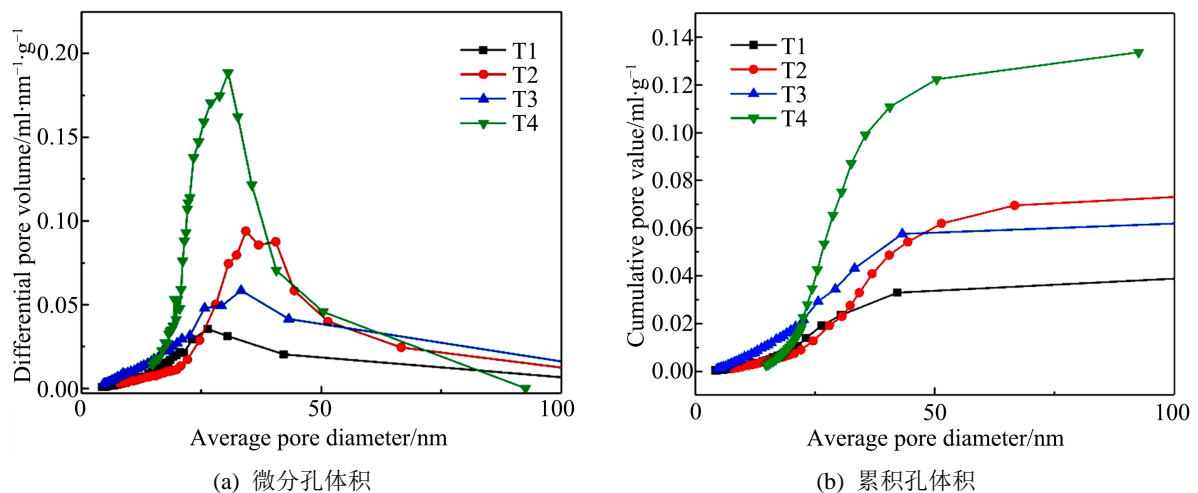


Figure 7. Pore size distribution of UHPC at high temperature

图 7. 高温作用下 UHPC 的孔径分布

### 3.5. 高温作用下 UHPC 基体的粘结退化机理分析

在高温环境下, 基体的粘结性能呈现特定模式。初期阶段, 类似于高温养护, 粘结强度略有增加。然而, 随着温度的升高, 粘结强度显著下降。这是由于高温对基体和 UHPC 材料的影响以及温度应力对基体结构的破坏。

高温导致三个主要方面的危害: 首先, 高温下普通浆体与 UHPC 材料浆体的变形不协调, 导致内部应力和微裂缝的形成。其次, 粘结面的脱水和水泥水化产物的分解使界面材料受损, 尤其在温度超过  $300^\circ\text{C}$



时, 粘结性能明显下降。第三, 高温引发 C-S-H 凝胶疏松破坏, 导致界面的咬合力降低, 同时高温下的产物膨胀增加了内应力。此外, 温度应力对基体结构也造成了破坏。升温 and 恒温阶段外部产生压应力, 内部产生拉应力, 但随着时间内外温度均匀, 应力减小为零。在冷却阶段, 外部产生拉应力, 内部产生压应力, 导致界面粘结性能下降。而掺杂纤维能够缓解高温带来的危害。一方面, 有机纤维熔化并挥发, 留下均匀分布的孔道, 有利于排出水蒸气和热量, 降低孔压力, 改善混凝土的防火性能和抗爆裂性能。另一方面, UHPC 内的钢纤维提高抗拉能力, 减小高温下的力学性能损失。

#### 4. 结论

本文研究了掺入钢纤维和聚丙烯纤维的 UHPC 材料在高温环境中的界面粘结性能变化规律, 主要结论如下:

1) 在高温环境下, 钢纤维的添加有效提高了基体与 UHPC 的粘结强度, 而聚丙烯纤维的掺入对粘结性能产生负面影响。当钢纤维和聚丙烯纤维混杂时, 2% 钢纤维和 0.5% 聚丙烯纤维的混合方式表现出最佳性能。

2) UHPC-混凝土的界面粘结强度呈现出复杂的温度依赖性, 高温破坏了材料结构和界面, 同时产生了温度应力, 最终界面的粘结性能下降。另外, 有机纤维的熔化和挥发以及增韧钢纤维的作用有助于降低高温引起的力学性能损失, 提高了混凝土的防火性能和抗爆裂性能。

3) 在高温环境下, UHPC 中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  分解,  $\text{C}_2\text{S}$  和  $\text{C}_3\text{S}$  得以继续水化, 而 C-S-H 凝胶可以相对稳定存在。

#### 参考文献

- [1] 黄叙钦, 鄢晓光, 安平和, 肖凯龙. 装配式梁桥湿接缝合理宽度研究及开裂分析[J]. 铁道建筑, 2018, 58(6): 21-24.
- [2] 霍书亚. 装配式 NC-UHPC 湿接缝轴拉性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [3] 曾敏, 胡方杰, 于洋, 田知典, 朱爱珠. UHPC 湿接缝抗剪性能模型试验研究[J]. 桥梁建设, 2023, 53(6): 86-94.
- [4] 谢剑, 杨云涛, 陈玉洁等. 氯盐环境下 UHPC-NC 界面黏结性能试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2024, 57(1): 11-20.
- [5] 洪柳. 建筑火灾事故损失特性研究[J]. 建筑安全, 2020, 35(1): 59-64.
- [6] 卢麒. 建筑火灾风险及财产损失评估技术的发展[J]. 企业改革与管理, 2016(4): 216.
- [7] 牛子铨. 高温后普通混凝土力学性能的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
- [8] 杜咏, 李国强. 大跨度建筑钢结构抗火性能研究进展与趋势[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(1): 53-66.
- [9] 谢松平, 王凯星, 杨泽沛, 等. 超高性能混凝土(UHPC)高温力学性能研究进展[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(7): 135-138.
- [10] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1-24.
- [11] 吴佳. 高温对高性能混凝土微观结构与蒸汽压的影响[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [12] 吕天启, 赵国藩, 林志伸, 等. 高温后静置混凝土的微观分析[J]. 建筑材料学报, 2003, 6(2): 135-141.
- [13] 郭进军. 高温后新老混凝土粘结的力学性能研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2003.
- [14] 陈猛, 李鹭, 张通. 混杂聚丙烯纤维-回收轮胎钢纤维增强 UHPC 高温后力学性能[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(7): 716-722.
- [15] 葛晨, 杨鼎宜, 张军. 高温后纤维混凝土微结构与力学性能研究[J]. 混凝土, 2022(7): 53-58+66.