

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.04.063

# UHPC 养护温度对力学性能的影响

杨峻一, 刘艳, 黄俊强, 时建刚, 王杰  
(重庆特铺路面工程技术有限公司, 重庆市 400026)

**摘要:** 众所周知, 热养护能够显著提升 UHPC 的早期强度, 但目前工程应用中, 较高的养护温度 ( $\geq 80^{\circ}\text{C}$ ) 通常实现较为困难, 与日益增长的绿色环保需求相违背。为了推广 UHPC 应用与指导工程项目的施工, 提出相对容易实现的低温 ( $30\sim 70^{\circ}\text{C}$ ) 热养护, 研究  $30^{\circ}\text{C}$ 、 $50^{\circ}\text{C}$ 、 $70^{\circ}\text{C}$ 、 $90^{\circ}\text{C}$  条件下先分别热水养护 1 d、2 d、3 d 和 4 d 的力学性能发展情况, 同时与标养 28 d 之后的力学性能进行对比。结果表明, 在  $30^{\circ}\text{C}$ 、 $50^{\circ}\text{C}$  和  $70^{\circ}\text{C}$  条件下养护 4 d 后, 抗压强度分别是  $90^{\circ}\text{C}$  热水养护 2 d 的 69.4%、88.6% 和 92.9%, 是标养 28 d 的 83.8%、107.0% 和 112.2%。抗弯拉强度随温度和养护时间增长的变化幅度相对较小, 几种养护温度 4d 的抗弯拉强度偏差在 4% 以内。可见相对低温的热养护能够满足对 UHPC 力学性能的要求。

**关键词:** UHPC; 养护温度; 养护时间; 低温热养护

中图分类号: U444

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)04-0271-03

## 0 引言

超高性能混凝土(UHPC)从 1994 年提出至今, 以超高的力学性能和耐久性能成为炙手可热的新型建筑材料<sup>[1-2]</sup>, 广泛应用于道桥、海港、建筑、外墙装饰、核工程和军事设施等方向, 并且呈现出日益增多的趋势<sup>[3]</sup>。近几年中国 UHPC 的应用快速增长, 得益于越来越多的 UHPC 相关研究, 加快了 UHPC 技术进步与积累, 为工程应用与行业发展增添了新动力<sup>[4]</sup>。在桥梁工程方面, 邵旭东等<sup>[5]</sup>将 UHPC 用于钢结构的桥面铺装, 辅以  $80^{\circ}\text{C}$ 、3 d 的高温蒸汽养护, 使之快速形成强度并减小收缩。该方案在 2011 年肇庆马房大桥成功应用后, 迅速地推广到全国各种钢桥的新建或翻修项目中。受制于材料养护温度 ( $80^{\circ}\text{C}$ ) 的实施难度, 研究逐渐朝向常温养护发展。

目前对于 UHPC 养护温度方面的研究, 主要着重于常温或者超高温 ( $\geq 100^{\circ}\text{C}$ ) 对 UHPC 力学性能和微观结构的影响。罗遥凌等<sup>[6]</sup>研究了不同温度与养护条件下 UHPC 长期力学性能发展变化及对材料水化程度的影响。结果表明, 热养护能够促进 UHPC 早期水化, 显著提升早期抗压强度。干热养护达到  $200^{\circ}\text{C}$  后, UHPC 后期强度明显降低<sup>[6-7]</sup>。蒋睿<sup>[8]</sup>研究了  $20$ 、 $40$ 、 $60$ 、 $90^{\circ}\text{C}$  四种养护温度, 以及湿热、自热保温等养护方式对 UHPC 性能与结构发展的影响, 发

现 UHPC 的早期抗压强度随着养护温度的升高而增加, 但龄期的增加会使强度趋于一致。基于此, 本文研究了不同养护温度、不同养护时间对 UHPC 早期力学性能的影响, 以指导 UHPC 低温 ( $\leq 70^{\circ}\text{C}$ ) 热养护工程的施工。

## 1 试验

### 1.1 原材料

胶凝材料中水泥采用的是小南海的 42.5 普通硅酸盐水泥。骨料为 20~140 目石英砂, 粒径范围 0.1~0.9 mm。石英粉规格为 325 目, 平均粒径为  $50\ \mu\text{m}$ 。掺和料采用 92 级非压缩硅灰,  $\text{SiO}_2$  含量 92.28%, 比表面积  $18\ 500\ \text{m}^2/\text{kg}$ , 外形为灰黑色粉末。纤维采用长度 13 mm 的端勾型镀铜钢纤维, 直径 0.2 mm, 长径比 65。助剂为聚羧酸型高效减水剂, 减水率不低于 30%。

### 1.2 试验设计

本文 UHPC 采用的配比为  $m(\text{水泥}) : m(\text{硅灰}) : m(\text{石英砂}) : m(\text{石英粉}) = 1 : 0.25 : 1.2 : 0.2$ 。其中, 减水剂用量为水泥和硅灰总量的 2%, 钢纤维掺量为干混料体积的 2%。基准配合比详见表 1。

表 1 UHPC 试验配比

水泥	硅灰	石英砂	石英粉	水胶比
1	0.25	1.2	0.2	0.19

本文采用  $40\ \text{mm} \times 40\ \text{mm} \times 160\ \text{mm}$  的尺寸成型 UHPC 胶砂试件, 按照表 1 的配比成型试件后, 存放

收稿日期: 2023-04-12

作者简介: 杨峻一(1993—), 男, 本科, 工程师, 从事道桥材料研发工作。

24 h 并脱模,进行后续不同养护制度的试验。

其中一组试件测试放入标准养护室,测试 28 d 龄期的强度,其余试件采用 30℃、50℃、70℃和 90℃ 四种养护温度,热养护时间分别为 1 d、2 d、3 d 和 4 d。养护完成并降温至室温后,进行力学性能测试,其实际试验龄期分别为 2 d、3 d、4 d、5 d 加上降温时间。养护升温、降温过程控制温度变化速率不超过 15℃/h。养护制度见表 2。

表 2 养护制度

养护温度	热养 / 标养时间				
	1 d	2 d	3 d	4 d	28 d
30℃	√	√	√	√	—
50℃	√	√	√	√	—
70℃	√	√	√	√	—
90℃	√	√	√	√	—
标养	—	—	—	—	√

### 1.3 试验方法

按照《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—1999)测试 UHPC 胶砂试件的抗压与抗弯拉强度。抗弯拉试验采用 300 kN 智能压折一体机,加抗压试验采用压力试验机,加载速率按照规范要求进行。

## 2 结果与讨论

试件热养护后,1~4 d 的抗压强度结果见表 3 和图 1。对比表 3 与图 1 可知,30、50、70℃ 养护温度下,UHPC 抗压强度随龄期的增加而增长,且增长的趋势没有出现拐点,说明还未达到最终强度。随着养护温度的升高,相同龄期的抗压强度变化更加明显,50℃ 热水养护 1 d 的抗压强度已经高于 30℃ 热水养护 4 d 的强度。不过,70℃ 养护温度下,养护 3 d 与养护 4 d 的抗压强度偏差不到 1%。90℃ 热水养护 2 d 后,抗压强度出现拐点,继续增加养护时间,强度没有明显增长,说明 90℃ 热水养护 2 d 已经达到该配方 UHPC 的最终强度。标养 28 d 抗压强度为 90℃ 热水养护 2 d 强度的 82.8%,说明标养 28 d 还未达到材料的最终强度。热水养护 4 d 后,30、50、70℃ 养护条件下 UHPC 的抗压强度分别达到 90℃ 养护 2 d 强度的 69.4%、88.6%和 92.9%,分别达到标养 28 d 强度的 83.8%、107.0%和 112.2%。

从表 4 和图 2 中可以看出,对比不同温度下养护 1 d 的抗弯拉强度,30℃ 与 50℃ 强度接近,0℃ 与 90℃ 强度接近。在 90℃ 养护温度下,前 2 d 的抗弯拉强度增长明显,2~4 d 强度变化较小,波动范围

表 3 UHPC 不同养护条件下的抗压强度

养护条件	抗压强度 /MPa				
	1 d	2 d	3 d	4 d	28 d
30℃	93.5	114.5	126.4	136.1	
50℃	143.6	155.1	162.7	173.7	
70℃	155.5	171.8	180.5	182.2	
90℃	178.1	196.1	193.7	196.6	
标养					162.4

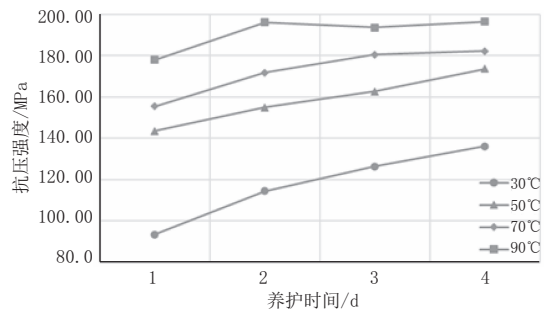


图 1 抗压强度对比

2.2%。考虑到试验误差,可以说 90℃ 热水养护 2 d 即达到了最终的抗弯拉强度。在 70℃ 养护条件下,养护 1~3 d,抗弯拉强度有一定增长;3 d 之后增加养护时间,没有出现明显变化。在 50℃ 养护条件下,前 3 d 抗弯拉强度随养护时间增长而显著增加,养护 3 d 后继续增加养护时间,抗弯拉强度没有继续增长。30℃ 养护条件下,整个养护过程中,材料的抗弯拉强度都在增长。至第 4 d,与其他三组强度基本一致。以 90℃ 热水养护 2 d 为基准,各养护温度下,随着养护时间变化而出现拐点的抗弯拉强度与之对比,标养 28 d 抗弯拉强度为 90℃ 热水养护 2 d 强度的 102.7%;30℃ 热水养护 4 d、50℃ 热水养护 3 d、70℃ 热水养护 3 d 的抗弯拉强度分别为 90℃ 热水养护 2 d 的 98.0%、98.4%和 96.8%。

表 4 UHPC 不同养护条件下的抗弯拉强度

养护条件	抗压强度 /MPa				
	1 d	2 d	3 d	4 d	28 d
30℃	26.0	27.3	28.4	30.3	
50℃	26.3	27.9	30.5	30.4	
70℃	29.2	29.2	29.8	29.9	
90℃	28.7	30.1	30.8	30.7	
标养					30.9

## 3 结论

(1)90℃ 热水养护 2 d,强度达到终值,增加养护时间,抗压强度与抗弯拉强度无明显增长。标养 28 d

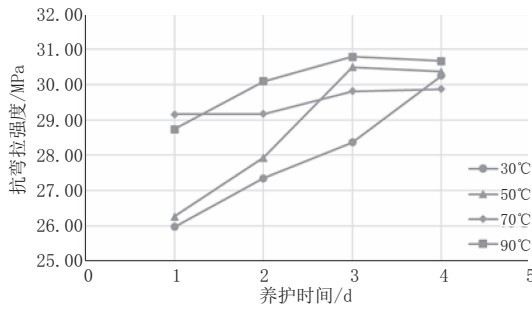


图2 抗弯拉强度对比

抗压强度未达到终值,抗弯拉强度已达到终值。

(2)在 50°C 和 70°C 条件下养护 4 d 后,抗压强度超过标养 28 d 的强度,30°C 热水养护 4 d 达到标养 28 d 强度的 83.8%。

30°C 热水养护 4 d、50°C 热水养护 3 d、70°C 热水养护 3 d 的抗弯拉强度与 90°C 热水养护 2 d 强度基本相当,与标养 28 d 强度基本相当,总体波动范围不超过 4%。

(3)低温(30~70°C)热养护能够快速帮助 UHPC 达到甚至超过标准养护 28 d 的抗压和抗弯拉强度,在施工条件不足或者施工进度要求紧迫时,可以通过采用低温(30~70°C)热养护的方式解决问题。

参考文献:

[1] RICHARD P,CHEYREZY M.Reactive powder concretes with high ductility and 200 - 800 MPa compressive strength [J].ACI Mater J, 1994,144:507-518.

[2] AHLBORN T M,PEUSE E J,MISSEON D L,et al.Durability and strength characterization of ultra-high performance concrete under variable curing regimes [C]//Proceedings of the 2nd international symposium on ultra-high performance concrete.Kassel,Germany, 2008:197-204.

[3] 周维.探究高耐久性混凝土的特点及应用[J].低碳世界,2014(12): 266-267.

[4] 中国混凝土与水泥制品协会超高性能水泥基材料与工程技术(CCPA-UHPC)分会.2021年中国超高性能混凝土(UHPC)技术与应用发展报告(上)[J].混凝土世界,2022(2):24-33.

[5] 邵旭东,邱明红,晏班夫,等.超高性能混凝土在国内外桥梁工程中的研究与应用进展[J].中国医学发展银行,2017,31(23):33-43.

[6] 罗遥凌,杨文,谢昱昊,等.养护温度对 UHPC 水化及力学性能影响研究[J].硅酸盐通报,2021,40(2):431-438.

[7] 雍晨茜.聚乙烯纤维对超高性能混凝土性能影响研究[D].成都:西南科技大学,2021.

[8] 蒋睿.早期养护方式对超高性能混凝土性能的影响[J].硅酸盐学报, 2020,48(10):1659-1668.

# 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: [cdq@smedi.com](mailto:cdq@smedi.com)