第 40 卷　第 4 期
2025 年 8 月

实　验　力　学
JOURNAL OF EXPERIMENTAL MECHANICS

Vol. 40　No. 4
Aug. 2025

文章编号：1001-4888(2025)04-0528-11

高温冷却后超高性能混凝土残余力学性能研究*

周超锋[1,2]，朱重澳[1]，庞瑞[1,2]，薛建阳[3]，李亚东[1]

（1. 河南工业大学 土木工程学院，河南郑州 450001；2. 河南省粮油仓储建筑与安全重点实验室，河南郑州 450001；
3. 西安建筑科技大学 土木工程学院，陕西西安 710055）

摘要： 为研究不同冷却方式对高温后超高性能混凝土（UHPC）单轴受压力学性能的影响，以冷却方式、受热温度为变化参数，设计制作了 45 个 100 mm×100 mm×300 mm 的试块进行高温后的单轴抗压试验。通过观察高温后试块的表观特征、质量损失及破坏形态，分析了冷却方式及受热温度对抗压强度的影响规律。结果表明：随着受热温度升高，试块表面裂纹增多，不同冷却方式下的质量烧失率均增大；相同温度下，自然冷却时试块烧失率大于浸水冷却烧失率，自然冷却下烧失率呈先快后慢的增长趋势，浸水冷却下烧失率近似呈线性增长；抗压强度均呈现先小幅增大后减小的趋势，与常温工况相比，自然冷却、浸水冷却时最大抗压强度分别提高了 18.3％和 13.4％；受热温度为 800 ℃时，自然冷却、浸水冷却抗压强度分别降低至常温下的 20.8％和 18.8％；受热温度超过 600 ℃时，试块表现出较好的轴向变形能力；相较于自然冷却，浸水冷却下峰值应变发展较快，但 800 ℃时基本趋于一致，自然冷却、浸水冷却下峰值应变分别增大至常温工况下峰值应变的 2.22 倍、2.24 倍；与自然冷却相比，浸水冷却下弹性模量相对较小，且均经历慢降、快降、慢降 3 个阶段。基于试验，提出了浸水冷却后的 UHPC 残余强度计算方法，该方法可为建筑消防灭火后混凝土承载能力评估提供依据。

关键词： 超高性能混凝土；高温作用；冷却方式；力学性能；残余强度

中图分类号： TU528.01；TU317　　**文献标志码：** A　　DOI：10.7520/1001-4888-24-062

0　引言

目前火灾已成为城市灾害的重要形式之一，混凝土作为城市建筑中被广泛使用的建筑材料，国内外学者对普通混凝土高温自然冷却后的力学性能研究较多[1−6]，研究结果均表明随着受热温度的升高，在内部蒸汽压力作用下，混凝土内部会产生大量裂纹及角部剥落现象，从而导致抗压强度逐渐降低。

消防灭火是城市建筑火灾不可或缺的重要举措，消防灭火时混凝土快速降温，内部温度应力分布极不均匀，加速了混凝土裂缝的扩展甚至爆裂，从而引起建筑结构的倒塌。部分学者研究了不同冷却方式对高温后混凝土力学性能的影响。ZHAI 等[7]研究表明加热温度达到 400 ℃之前，水冷试样的强度高于自然冷却；加热温度高于 400 ℃时，水冷试样的强度显著下降。柯晓军等[8]研究发现高温后再生混凝土试块残余强度随着温度的升高而逐渐降低；与自然冷却相比，喷水冷却后的残余强度呈现先高后低、再高再低的变化趋势。陈宗平等[9]研究表明冷却方式对再生混凝土抗压强度影响较大，受热温度越高，喷水冷却下再生混凝土强度退化越快。郑钰涛等[10]研究表明在喷水冷却快速降温过程中，混凝土内外

* **收稿日期：** 2024-04-11；**修回日期：** 2024-07-15
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(52278172)；河南省粮油仓储建筑与安全重点实验室开放课题(2020KF-B06)；河南省教育厅自然科学基金项目(24A560006)
通信作者： 周超锋(1989－)，男，工学博士，副教授。主要从事工程抗震及防灾减灾研究。Email：zhouchaofeng163@163.com

温度应力分布不均匀致使裂缝扩展延伸，造成试块抗压强度显著降低。王连坤等[11]研究表明在 500 ℃高温及以上温度时，喷水冷却方式下试块的抗压强度及轴心抗压强度下降更为显著。曲海坤等[12]研究发现高温混凝土经自然冷却后出现强度反弹迹象，在 400 ℃时达到峰值，喷淋冷却使混凝土抗压强度在 500 ℃达到峰值。朱俊儒[13]研究表明浸水冷却方式加速了混凝土裂缝的开展，进而显著影响其受压破坏特征及承载能力。

超高性能混凝土（Ultra-High Performance Concrete，简称 UHPC）致密的微观结构使其具有超高的力学性能，从而被广泛应用。目前，已有部分学者[14-16]对高温后采用自然冷却方式降温的 UHPC 力学性能进行了研究，研究结果均表明高温后 UHPC 残余强度随着目标温度的升高而呈现先升高后降低的趋势。但目前对高温后在浸水冷却方式下 UHPC 力学性能的相关研究较少，因此，本文通过 UHPC 高温后不同冷却方式下的力学性能试验，观察 UHPC 的表观特征、质量损失，分析不同冷却方式对 UHPC 材料基本力学性能退化的影响规律，以期揭示 UHPC 在高温后浸水冷却条件下力学性能的劣化机理。

1　试验概况

1.1　试块设计、制作及养护

以受热温度 T(20 ℃、200 ℃、300 ℃、400 ℃、500 ℃、600 ℃、700 ℃、800 ℃）、冷却方式（N 为自然冷却、W 为浸水冷却）为设计参数，制作了 45 个棱柱体（100 mm×100 mm×300 mm）试块进行高温后的单轴受压试验，试验设计参数见表 1。

表 1　试验设计参数

Tab. 1　Design parameters of test

试块	冷却方式	受热温度 T/℃							
		20	200	300	400	500	600	700	800
棱柱体	N	3 个	3 个	3 个	3 个	3 个	3 个	3 个	3 个
	W		3 个	3 个	3 个	3 个	3 个	3 个	3 个

UHPC 材料由 P·O 52.5 硅酸盐水泥、硅灰、粉煤灰、石英砂、镀铜平直钢纤维、水、减水剂等混合配制而成，水胶比为 0.18，具体配合比见表 2。综合考虑 UHPC 的力学及工作性能，钢纤维体积掺量取为 2%，钢纤维基本物理特性见表 3。采用容积为 300 L 的立式移动搅拌机对 UHPC 原料进行拌和，待原料充分混合且浆体具有较好的流动性后，倒入模具、振捣密实后封膜，如图 1 所示。已有研究表明[17]采用标养＋干热的组合养护制度可以显著改善 UHPC 的高温爆裂性能，基于此，本文分别进行了 12 h 150 ℃干热养护与 12 h 200 ℃干热养护的预试验，根据预试验结果，发现 150 ℃养护的试块仍存在爆裂现象。因此本试验采用的组合养护制度为标准养护（温度 20 ℃、相对湿度 95%）28 d 后再进行 12 h 200 ℃干热养护。

表 2　UHPC 试验配合比

Tab. 2　Mix proportion of UHPC

材料	水泥	硅灰	粉煤灰	石英砂	钢纤维	水	减水剂
含量/(kg/m^3)	900	100	100	900	157	200	23

表 3　钢纤维基本物理特性

Tab. 3　Basic physical properties of steel fiber

长度/mm	直径/mm	密度/(g/cm^3)	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
12	0.12	7.85	3000	200

1.2　高温试验方案

采用 1200 ℃双门快速高温炉进行高温试验，试验温度分别为 200 ℃、300 ℃、400 ℃、500 ℃、

图 1　UHPC 试块浇筑现场

Fig. 1　Block pouring site for UHPC

600 ℃、700 ℃、800 ℃，平均升温速率为 5 ℃/min[18]，炉内升温曲线如图 2 所示。为保证高温后试块内外温度一致，达到目标温度后恒温 90 min。高温后试块分别采用自然冷却、浸水冷却方式冷却至环境温度。其中，自然冷却是指恒温受热 90 min 后，打开高温炉炉门，自然降温，待试件冷却后取出试块；浸水冷却是指恒温受热 90 min 后，立即取出并浸入装满 100 L(水温为常温)的水箱中，冷却至环境温度。

1.3　观测方案及加载方案

1)高温试验：高温中记录发出的声音及气味；待试块冷却至环境温度并静置 48 h 后，观察 UHPC 试块的表观特征(颜色、裂纹)变化，记录试块的质量损失。

2)强度试验：采用图 3 所示的 YAJ-12000 型微机控制电液伺服加载试验机进行单调受压试验，加载速率为 0.2 mm/min；试验中观测试块的裂缝发展，并通过布置在试块侧面中部的横向、竖向混凝土应变片来观测 UHPC 的横向、纵向应变发展。

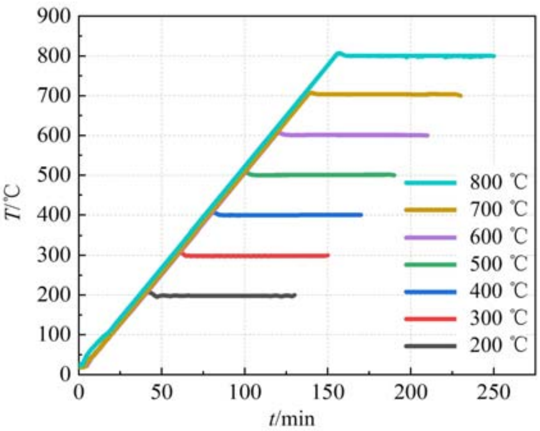


图 2　炉温升温及恒温曲线

Fig. 2　Curve of furnace temperature rise and constant

图 3　加载装置

Fig. 3　Loading device

2　高温试验结果分析

2.1　高温及冷却过程现象分析

当炉温达到 300 ℃时，钢纤维铜镀层被氧化而形成 CuO，减水剂受热分解并随水蒸汽挥发，此时有微弱的刺激性气味逸出；炉温达到 400 ℃～600 ℃时，炉膛内发出钢纤维“撕裂声”，并伴有强烈的刺激性气味；600 ℃后，钢纤维“撕裂声”基本消失，刺激性气味依然存在。

浸水冷却过程中，当受热温度为 200 ℃～400 ℃时，出现少许白色烟雾，并伴有轻微且短暂的“嘶嘶”声；当受热温度为 500 ℃～800 ℃时，出现大量白色烟雾和气泡，并伴有较大“嘶嘶”声，持续约 10 min且不断有气泡冒出；试块在整个浸水冷却过程中出现轻微颗粒状表皮剥落现象，特别是受热温度为 800 ℃的试块，浸水冷却后水体较为浑浊。图 4 所示为高温浸水冷却试块，水箱中铺垫的钢丝网有利

于试块底面受冷均匀且能够有效避免试块遇水爆裂时碎体对水箱造成损坏。

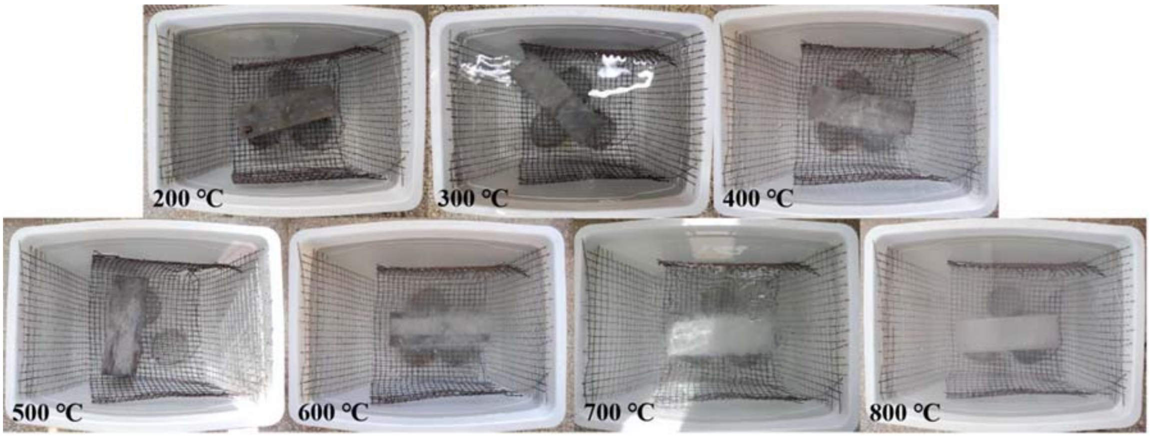


图 4　高温浸水冷却试块

Fig. 4　Water cooling blocks

2.2　表观特征分析

图 5 所示为高温后不同冷却方式下 UHPC 棱柱体试块的表观特征，由图可知，随着温度的升高，UHPC 试块的表观颜色逐渐由深变浅，表面孔隙和微裂纹逐渐增多，试块的敲击声音变得清脆。具体特征如下：

图 5　高温后 UHPC 棱柱体表观特征

Fig. 5　Superficial characteristics of UHPC after high temperature

1）受热温度为 200 ℃时，不同冷却方式下的试块表观特征与常温时基本一致，表面无孔隙及可见裂缝，颜色呈深(青)灰色。

2）受热温度为 300 ℃时，试块表面由深灰色变为浅灰色，表面出现细微裂纹；受热温度为 400 ℃～500 ℃时，不同冷却方式下的试块表面裂纹均有所发展，自然冷却的试块表面无剥落现象，浸水冷却的试块边角有轻微剥落现象，试块敲击声音略显清脆。

3)受热温度为600 ℃～700 ℃时,试块表面由浅灰色变为灰白色,表面裂纹较多,自然冷却的试块表面出现黄棕色灼烧点并有少量钢纤维灼烧裂纹,浸水冷却的试块边角UHPC剥落较为严重,试块敲击声音清脆。

4)受热温度为800 ℃时,试块表面由灰白色变为灰棕色;自然冷却的试块表面有较多钢纤维灼烧裂纹;浸水冷却的棱柱体试块表面未见明显剥落,但水冷干燥后表面裂纹交错相接,深度为2 mm～3 mm的局部表面变得酥软,失去承载能力。

2.3　质量损失

定义 I 为质量烧失率,即试块高温前后损失的质量与高温前质量的比值,来反映内部微观结构的物理和化学变化,其计算公式为

$$I=\frac{m-m_{T}}{m}\times 100\% \tag{1}$$

式中:m 为高温前试件的质量;m_{T} 为高温后试件的质量。

试块质量烧失率随温度变化的曲线如图6所示,由图可知:

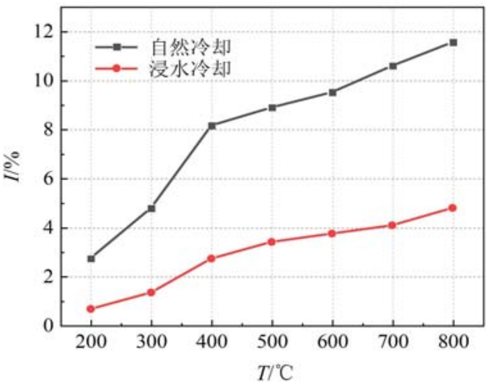


图6　质量烧失率变化

Fig. 6　Change in mass loss rate

1)试块质量烧失率随温度升高而逐渐增大,呈先快后慢趋势;经历800 ℃高温后,自然冷却条件下质量烧失率达到11.56%,浸水冷却条件下质量烧失率达到4.79%;与自然冷却相比,浸水冷却时试块质量烧失率较小且增长速度较慢。

2)自然冷却条件下,受热温度不高于400 ℃时,质量损失率增长较快,主要是由于UHPC基体内自由水蒸发、水泥浆体中C-S-H凝胶中的结合水蒸发,同时伴有 $Ca(OH)_2$ 吸热性脱水所致。受热温度不高于600 ℃时,质量损失较为平缓,此阶段的质量损失主要是水泥水化产生的 $Ca(OH)_2$ 受热分解后产生的结合水受热蒸发造成的。受热温度不高于800 ℃时,基体内部结晶水完全丧失,由于混凝土内部 $Ca(OH)_2$ 碳化、$CaCO_3$ 受热分解,加剧了UHPC基体内结合水蒸发,其质量损失率增长较快。

3)受热温度高于400 ℃时,UHPC内部分解出大量的CaO、SiO_2 等碱性氧化物,浸水冷却时能够与自由水结合并重新生成水化晶体(水化硅酸钙),致使质量损失呈先快后慢的增长趋势;相较于自然冷却试块,质量损失增长幅度较小。

3　单轴受压试验结果

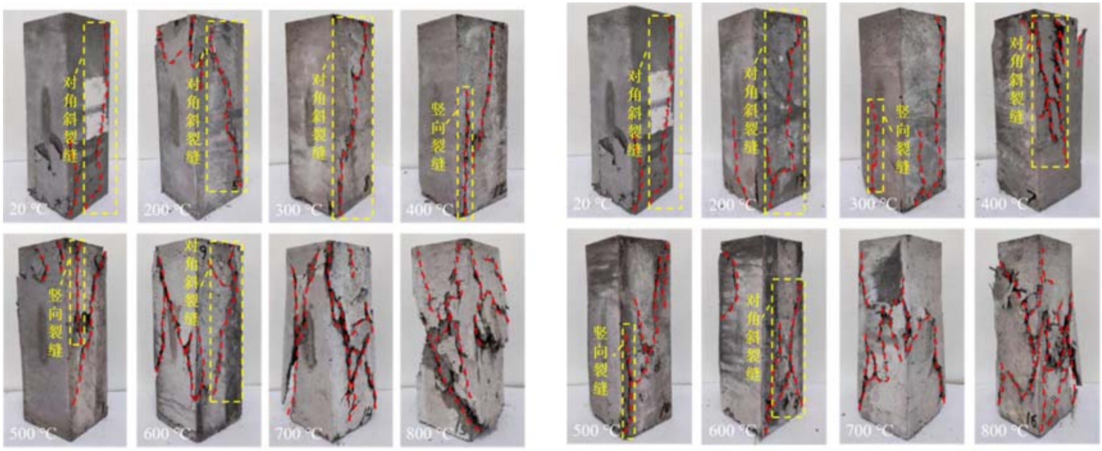
3.1　破坏过程

随着受热温度的升高,钢纤维与水泥基体的黏结作用逐渐削弱,试块的脆性降低,破坏模式由剪切破坏转为劈裂破坏。具体破坏形态如图7所示,由图可知:

1)受热温度为20 ℃～300 ℃时,随着荷载的增大,试块表面无明显变化;接近峰值荷载时,有轻微撕裂声,且出现贯穿性对角斜裂缝;峰值荷载时,可听到“嘭”的爆裂声,并有少量碎屑向四周飞溅,之后裂缝迅速贯穿发展,直至失效。

2)受热温度为400 ℃～600 ℃时,当接近峰值荷载时,可听到钢纤维与基体脱黏的撕裂声,破坏时仍能观察到对角斜裂缝,也存在较多的细微竖向裂缝,说明在此温度区间内钢纤维与水泥基体的黏结作用有所削弱,试件破坏后仍保持较好的完整性。

3)受热温度为700 ℃～800 ℃时,正式加载前,试块表面已有较多宽粗裂纹连成一片;随着荷载增大,原有裂纹迅速发展并形成贯穿裂缝,试件的破坏过程较为平缓,且无撕裂声;试件破坏后基体横向膨胀明显,竖向裂缝发展充分,呈现出劈裂破坏特征,并伴有粉末状颗粒或表皮部分脱落。



(a)自然冷却　　(b)浸水冷却

图 7　高温后 UHPC 破坏形态

Fig. 7　Failure mode after high temperature

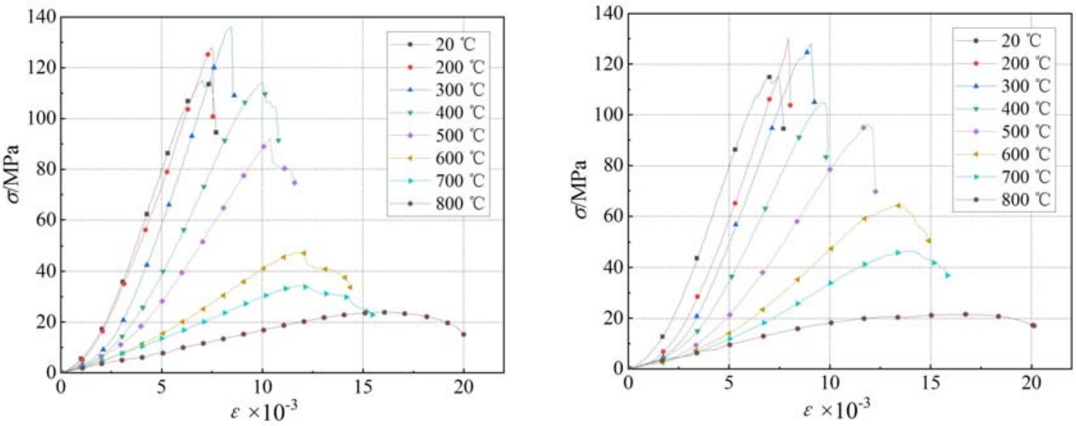
3.2　应力-应变曲线

图 8 所示为试块的单轴受压应力-应变曲线，由图可知：

1)随着受热温度的升高，试块的峰值应变逐渐增大，浸水冷却时试块的峰值应变相对较大，说明高温作用与浸水冷却耦合作用加速了基体内部裂缝的开展，弹性模量下降幅度较大。

2)受热温度为 500 ℃时，UHPC 峰值应力仍保持在 90 MPa 左右，强度较高，混凝土脆性特征明显，因此受热温度不高于 500 ℃时，达到峰值应力后，应力-应变曲线陡然下降；受热温度为 600 ℃～800 ℃时，达到峰值应力后，应力-应变曲线下降较为缓慢，变形增幅远大于荷载降低幅度，说明经历600 ℃高温后，UHPC 材料的脆性特征发生改变，弹性模量下降较为明显。

3)随着温度的升高，应力-应变曲线逐渐趋于扁平化，曲线包络面积逐渐下降，耗能能力降低。



(a)自然冷却　　(b)浸水冷却

图 8　应力-应变曲线

Fig. 8　Stress-strain curve

3.3　轴心抗压强度

不同高温及冷却方式下 UHPC 试块的单轴抗压强度见表 4，其中 f_c 表示实测的单轴抗压强度。轴心抗压强度与温度及冷却方式的关系曲线如图 9 所示。由图 9 及表 4 可知：

1)随着受热温度升高，不同冷却方式下抗压强度均呈现先增大后减小趋势，自然冷却时最大抗压强度为 136.2 MPa，浸水冷却时最大抗压强度为 130.5 MPa，与 20 ℃工况相比，分别提高了 18.3%和 13.4%。原因在于高温使水泥水化反应更充分，促进了硅灰和粉煤灰中的活性 SiO_2 与水泥水化产物 $Ca(OH)_2$ 之间的火山灰反应，生成 C-S-H 凝胶，并消耗了对强度有不利影响的部分 $Ca(OH)_2$，从而提

高了 UHPC 的强度。受热温度较低时，自然冷却后试块损伤较小，高温养护环境对强度起增强作用；浸水冷却时，试块表面快速降温，内外温度应力分布不均，导致基体内部裂纹快速发展，从而浸水冷却时最大轴心抗压强度相对较小。

表 4 单轴抗压强度

Tab. 4 Uniaxial compressive strength

T/℃	f_c/MPa	
	自然冷却	浸水冷却
20	115.1	115.1
200	128.0	130.5
300	136.2	128.1
400	113.9	104.8
500	92.0	96.2
600	47.4	64.2
700	34.4	46.6
800	24.0	21.6

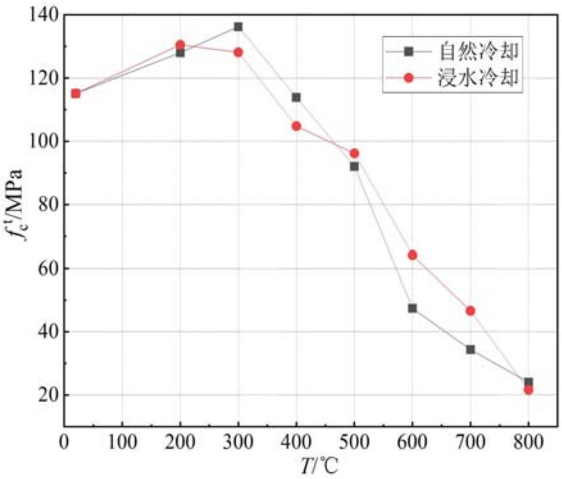


图 9 轴心抗压强度

Fig. 9 Axial compressive strength

2)受热温度超过 300 ℃后，轴心抗压强度显著下降；与常温相比，受热温度为 600 ℃时自然冷却、浸水冷却后轴心抗压强度分别降低了 58.8%和 44.2%；受热温度为 800 ℃时，自然冷却、浸水冷却后轴心抗压强度分别降至常温下抗压强度的 20.8%和 18.8%。说明高温作用下 UHPC 基体内二次水化反应和火山灰反应持续进行，但随着受热温度升高，基体内积聚的蒸汽压力在骨料介质间产生的外张力、钢纤维脱碳氧化、浸水冷却时基体内温度应力的不均匀分布，均会导致大量的裂缝和孔隙形成，对 UHPC 轴心抗压强度的不利影响更为显著。

3)不同冷却方式下，经历不同高温后的 UHPC 轴心抗压强度表现出不同规律：①受热温度为 200 ℃时，与自然冷却试块相比，浸水冷却试块轴心抗压强度略有提高，增幅约为 2%，原因在于高温下 UHPC 基体内虽然有自由水和少量结合水损失，但仍有部分基体凝胶未大量分解，浸水冷却后生成水化硅酸钙，基体内部变得致密，且部分水泥熟料产生水化反应，致使浸水冷却条件下轴心抗压强度略高。②受热温度为 300 ℃～400 ℃时，相比于自然冷却，浸水冷却条件下试块轴心抗压强度较小，降幅为 5.9%～8.0%，这是由于浸水冷却使试块内部温度应力分布不均，内部裂缝发展更加充分所致。③受热温度为 500 ℃～700 ℃时，相比于自然冷却，浸水冷却条件下试块轴心抗压强度有所增大，特别是历经 600 ℃高温后，强度提升了 35%，其原因是高温下基体内 C-S-H 结晶变化显著，孔隙率增大，$Ca(OH)_2$ 被大量分解，致使强度急速降低，浸水冷却后 CaO 和 SiO_2 分解物产生部分水化晶体，导致强度较自然冷却试块有所提高。④经历 800 ℃高温后，与自然冷却相比，浸水冷却条件下轴心抗压强度下降，降幅为 10%，这是由于浸水冷却加剧了基体内部温度应力的不均匀分布，表面 2 mm～3 mm 深度内变得酥软起皮，从而失去承载能力所致。

3.4 峰值应变

随着荷载的增大，试块表面大面积开裂鼓起，应变片所测数据已不能真实反映应变情况，因此定义试块上、下端面相对位移与棱柱体高度之比为平均峰值应变，并以此分析试块的应变发展规律。经受不同高温及冷却方式后，UHPC 试块峰值应变如图 10 所示，由图可知：

1)常温下试块的平均峰值应变 ε_0 约为7.430×10^{-3}，随着温度的升高，不同冷却方式下试块平均峰值应变大小的差异性逐渐变大。

2) $T\leqslant300$ ℃时，2 种冷却方式下的峰值应变相差不大，且基本保持同一水平；$T\geqslant400$ ℃时，相较于自然冷却，浸水冷却条件下峰值应变增长较快，并在 700 ℃时峰值应变相差最为明显，此时自然冷却下

平均峰值应变约为 1.197×10^{-2}（$1.61\varepsilon_0$），浸水冷却下平均峰值应变约为 1.394×10^{-2}（$1.87\varepsilon_0$）。

3）$T=800$ ℃时，两者峰值应变基本趋于一致，此时自然冷却下峰值应变约为 1.613×10^{-2}（$2.22\varepsilon_0$），浸水冷却下峰值应变约为 1.667×10^{-2}（$2.24\varepsilon_0$）。

3.5　弹性模量

取 $0.5f_c^t$ 所对应的割线模量记为试块的弹性模量 E_c^t，不同受热温度及冷却方式下试块 E_c^t 相对值变化关系如图 11 所示，其中 E_c^t 相对值是指不同高温下的 E_c^t 与常温下的 E_{c0}^t 之比。由图 11 可知：

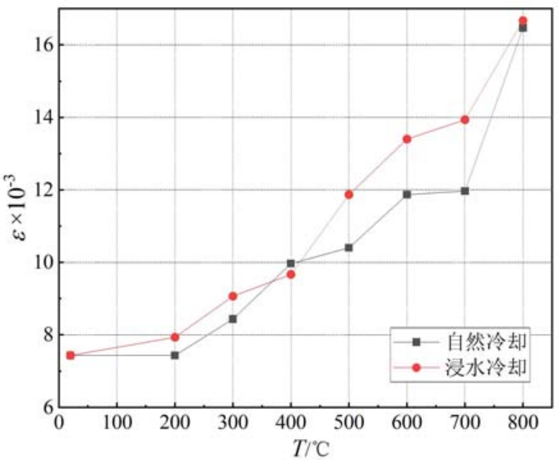


图 10　峰值应变

Fig. 10　Peak strain

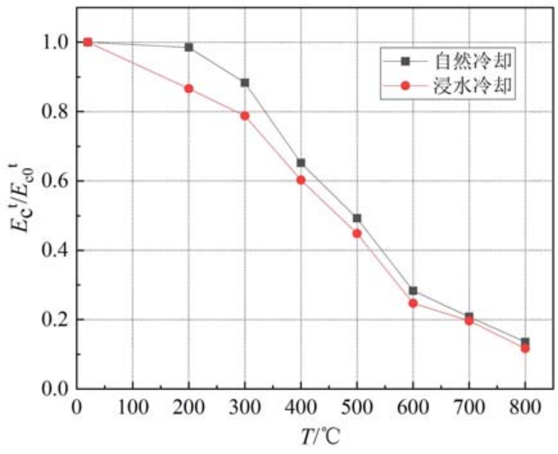


图 11　E_c^t 相对值变化曲线

Fig. 11　Curve of relative value of E_c^t

1）随着受热温度的升高，试块 E_c^t 逐渐降低，大致经历慢降（20 ℃≤T<300 ℃）、快降（300 ℃≤T<600 ℃）、慢降（600 ℃≤T<800 ℃）3 个阶段，且 E_c^t 差异性逐渐缩小并趋于一致。受热温度由 500 ℃升至 600 ℃时，E_c^t 降幅较为显著，自然冷却、浸水冷却下 E_c^t 下降幅度分别为 20.9%、20.1%。

2）不同冷却方式下，E_c^t 下降趋势大致相同，但下降幅度不同。受热 300 ℃时，自然冷却下 E_c^t 降低幅度约为 11.7%，浸水冷却下 E_c^t 降低幅度约为 21.2%。受热温度为 600 ℃时，自然冷却条件下，E_c^t 降低幅度约为 71.6%；浸水冷却条件下，E_c^t 降低幅度约为 75.3%。受热温度为 800 ℃时，自然冷却、浸水冷却下 E_c^t 分别降至常温下 E_{c0}^t 的 13.6%、11.7%，降幅基本趋于一致。

3.6　浸水冷却后的残余强度计算

为便于研究高温水冷后 UHPC 轴心抗压强度的变化规律，定义 UHPC 高温后的抗压强度 f_c^t 与常温下抗压强度 f_{c0}^t 之比为相对抗压强度 f_c^t/f_{c0}^t；对温度进行无量纲化处理，定义相对温度 $R_T=(T-20)/800$（20 ℃≤T≤800 ℃）。归一化处理的高温水冷后相对抗压强度与相对温度关系试验曲线如图 12 所示。

对试验曲线进行数据分段回归分析，其中 20 ℃～200 ℃采用线性函数拟合，200 ℃～800 ℃采用多项式拟合，得到高温水冷后 UHPC 抗压强度与温度关系拟合曲线如图 12 所示，其相关系数 $R^2=0.974$，试验结果与拟合结果具有较好的一致性，具体表达式如下：

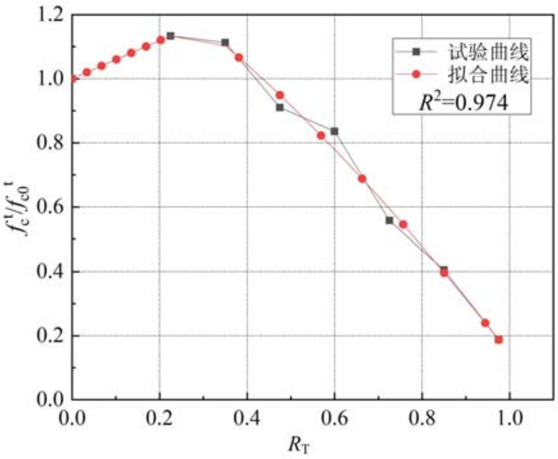


图 12　f_c^t/f_{c0}^t 与 R_T 关系曲线

Fig. 12 Relationship between f_c^t/f_{c0}^t and R_T

$$f_c^t/f_{c0}^t=1+0.595R_T\quad(0\leqslant R_T<0.225)\tag{2}$$

$$f_c^t/f_{c0}^t=1.438-0.734R_T-0.679{R_T}^2+0.119{R_T}^3\quad(0.225\leqslant R_T\leqslant0.975)\tag{3}$$

利用式(2)、式(3)对水冷后UHPC相对抗压强度进行计算,结果见表5,由表可知,计算值与试验值之比的平均值为1.001,标准差为0.04,说明计算方法合理可靠。

表5 相对抗压强度拟合计算值与试验值对比

Tab.5 Comparison of Relative compressive strength between experimental values and fitting formula calculations

T/℃	R_T	f_c'/f_{c0}试验值	f_c'/f_{c0}计算值	计算值/试验值
20	0.000	1.00	1.00	1.00
200	0.225	1.13	1.13	1.00
300	0.350	1.11	1.10	0.99
400	0.475	0.91	0.95	1.04
500	0.600	0.84	0.78	0.93
600	0.725	0.56	0.59	1.05
700	0.850	0.40	0.40	1.00
800	0.975	0.19	0.19	1.00

4 结论

通过对45个UHPC试块进行高温试验,研究了试块在不同冷却方式下的受压力学性能,根据试验现象及数据分析,得出如下结论:

1)随着温度的升高,UHPC质量烧失率增大;自然冷却下烧失率先快后慢的增长趋势较为明显,浸水冷却下烧失率大致呈线性增长。

2)随着温度的升高,钢纤维与水泥基体的黏结作用削弱,试块表现出较好的塑性变形能力,受热温度超过600 ℃时,试块轴向变形能力显著增强,破坏模式由剪切破坏转为劈裂破坏。

3)高温冷却后,试块抗压强度均呈现先小幅增大后降低的变化规律,与常温下相比,自然冷却、浸水冷却时最大抗压强度分别提高18.3%和13.4%;目标温度800 ℃时,自然冷却、浸水冷却抗压强度分别降低至常温下抗压强度的20.8%和18.8%。

4)随着温度的升高,相较于自然冷却,浸水冷却下峰值应变发展较快,但最终趋于一致;与常温工况相比,800 ℃时自然冷却、浸水冷却下峰值应变分别达到常温工况峰值应变的2.22倍、2.24倍;与自然冷却相比,浸水冷却下弹性模量相对较小,且均经历慢降、快降、慢降3个阶段。

5)基于试验建立了考虑火灾高温、冷却方式等影响的UHPC残余强度计算方法,计算结果与试验数据吻合良好。

参考文献:

[1] YE H W, FENG N Q, YAN L H, et al. Research on fire resistance of ultra-high-performance concrete[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2012, 2012:530948.

[2] 卞瑞, 张研, 蒋林华, 等. 高温作用后的混凝土力学性能研究[J]. 混凝土, 2017(11):10-12, 18 (BIAN Rui, ZHANG Yan, JIANG Linhua, et al. Research of the mechanical properties of concrete after high temperature[J]. Concrete, 2017(11):10-12, 18 (in Chinese))

[3] MA Q M, GUO R X, ZHAO Z M, et al. Mechanical properties of concrete at high temperature: A review[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93:371-383.

[4] ISMAIL M, ELGELANY I M, MUHAMMAD B. Influence of elevated temperatures on physical and compressive strength properties of concrete containing palm oil fuel ash[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(5): 2358-2364.

[5] 陈宗平, 王欢欢, 陈宇良. 高温后混凝土的力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2015(1):13-17 (CHEN Zongping, WANG Huanhuan, CHEN Yuliang. Test study on mechanical properties of concrete after a fire high temperature

[J]. Concrete，2015(1):13-17 (in Chinese))

[6] 张白，陈俊，杨鸥，等. 高温后混凝土质量损失及抗压强度退化规律试验研究[J]. 建筑结构，2019，49(4):76-81 (ZHANG Bai，CHEN Jun，YANG Ou，et al. Experimental study on mass loss and compressive strength degradation law of concrete after high temperature exposure[J]. Building Structure，2019，49(4):76-81 (in Chinese))

[7] ZHAI Y，LI Y，LI Y B，et al. Impact of high-temperature-water cooling damage on the mechanical properties of concrete[J]. Construction and Building Materials，2019，215:233-243.

[8] 柯晓军，杨春辉，苏益声，等. 冷却方式对高温后再生混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报，2017，20(5):794-800 (KE Xiaojun，YANG Chunhui，SU Yisheng，et al. Influences of cooling methods on mechanical properties of recycled aggregate concrete after exposure to high temperature[J]. Journal of Building Materials，2017，20(5):794-800 (in Chinese))

[9] 陈宗平，班茂根，周济. 冷却方式对高温后不同类型混凝土残余力学性能的影响研究[J]. 实验力学，2022，37(1):52-62 (CHEN Zongping，BAN Maogen，ZHOU Ji. Influence of cooling methods on residual mechanical properties of concrete after exposed to high temperatures[J]. Journal of Experimental Mechanics，2022，37(1):52-62 (in Chinese))

[10] 郑钰涛，李玉成，彭晨鑫. 高温后不同冷却方式对混凝土力学特性的影响[J]. 水资源与水工程学报，2019，30(4):189-194 (ZHENG Yutao，LI Yucheng，PENG Chenxin. Effect of different cooling methods on mechanical properties of concrete after high temperature[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering，2019，30(4):189-194 (in Chinese))

[11] 王连坤，蔡凯鹏，陈伟杰，等. 高温后不同冷却方式下自密实混凝土力学性能研究[J]. 消防科学与技术，2022，41(2):191-196 (WANG Liankun，CAI Kaipeng，CHEN Weijie，et al. Study on mechanical properties of self-compacting concrete under different cooling methods after high temperature[J]. Fire Science and Technology，2022，41(2):191-196 (in Chinese))

[12] 曲海坤，周林聪，王丽，等. 不同冷却方式下高温混凝土性能研究[J]. 新型建筑材料，2017，44(8):119-122 (QU Haikun，ZHOU Lincong，WANG Li，et al. Study on properties of high temperature concrete under different cooling methods[J]. New Building Materials，2017,44(8):119-122 (in Chinese))

[13] 朱俊儒. 高温冷却后自密实混凝土抗压性能研究[D]. 绵阳：西南科技大学，2023 (ZHU Junru. Mechanical properties of self-compacting concrete after cooling regimes from elevated temperatures[D]. Mianyang：Southwest University of Science and Technology，2023 (in Chinese))

[14] 朋改非，杨娟，石云兴. 超高性能混凝土高温后残余力学性能试验研究[J]. 土木工程学报，2017，50(4):73-79 (PENG Gaifei，YANG Juan，SHI Yunxing. Experimental study on residual mechanical properties of ultra-high performance concrete exposed to high temperature[J]. China Civil Engineering Journal，2017，50(4):73-79 (in Chinese))

[15] DING Y N，ZHANG C，CAO M L，et al. Influence of different fibers on the change of pore pressure of self-consolidating concrete exposed to fire[J]. Construction and Building Materials，2016，113:456-469.

[16] 杨婷，杨烨凯，刘中宪，等. 高温后超高性能混凝土力学性能试验研究[J]. 工程力学，2025，42(4):97-109 (YANG Ting，YANG Yekai，LIU Zhongxian，et al. Investigation on mechanical properties of ultra-high performance concrete after high temperature[J]. Engineering Mechanics，2025，42(4):97-109 (in Chinese))

[17] 牛旭婧，乜颖，朋改非，等. 养护制度对超高性能混凝土抗高温爆裂性能的影响[J]. 硅酸盐学报，2020，48(8):1212-1222 (NIU Xujing，NIE Ying，PENG Gaifei，et al. Influence of curing regime on resistance of ultra-high performance concrete to explosive spalling under high temperature[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society，2020，48(8):1212-1222 (in Chinese))

[18] 中国国家标准化管理委员会. 建筑构件耐火试验方法:GB/T 9978.1－2008[S]. 北京:中国标准出版社，2008 (Standardization Administration of the People's Republic of China. Fire resistance tests elements of building construction：GB/T 9978.1－2008[S]. Beijing：China Standard Press，2008 (in Chinese))

Study on the residual mechanical properties of UHPC after high temperature with different cooling methods

ZHOU Chaofeng[1,2], ZHU Chongao[1], PANG Rui[1,2], XUE Jianyang[3], LI Yadong[1]

(1. School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, Henan, China; 2. Henan Key Laboratory of Grain and Oil Storage Facility & Safety, Zhengzhou 450001, Henan, China; 3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: To investigate the effect of different cooling methods on the uniaxial compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) after high temperature, 45 specimens with the dimension of 100 mm × 100 mm × 300 mm were designed and fabricated. The cooling methods and heating temperature were chosen as test variable parameters. Observe the apparent characteristics, quality loss, and failure mode were observed after different high temperatures and cooling methods. The variation law of compressive strength was analyzed. The experimental results show that as the temperature increases, the surface cracks increase. The mass loss rate increases under different cooling methods. A higher mass loss rate occurs under natural cooling with the same temperature. Under natural cooling, the mass loss rate increases rapidly at first and then slowly. An approximately linear increase is presented under water cooling. The compressive strength shows a trend of first slightly increasing and then decreasing. Compared with the normal temperature, with the temperature increase, the maximum compressive strength increased by 18.3% and 13.4% respectively under natural cooling and water cooling. When the temperature reaches 800 ℃, the compressive strength under natural cooling and water cooling decreases to 20.8% and 18.8% of compressive strength at normal temperature, respectively. When the temperature exceeds 600 ℃, the axial deformation ability of blocks is significantly enhanced. Compared with natural cooling, the peak strain under water cooling develops rapidly, but tends to be consistent at 800 ℃. The peak strain under natural cooling and water cooling increases to 2.22 times and 2.24 times the peak strain under normal temperature conditions, respectively. Compared with natural cooling, the elastic modulus under water cooling is relatively small and undergoes three stages: slow decrease, fast decrease, and slow decrease. Based on the experiments, a formula for calculating the residual strength of UHPC after water cooling is proposed, which can provide a basis for evaluating the load-bearing capacity of a building after fire.

Keywords: ultra high performance concrete; high temperature action; cooling method; mechanical property; residual strength