DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2026.03.009
文章编号:1671-2579(2026)03-0073-09

花岗岩机制砂超高性能混凝土高温冷却后力学性能研究

李钢[1],周飞龙[1],卢秋菊[1],杜坤[2],刘恺[2*]
(1.中电建路桥集团有限公司,北京市 100160;2.中南大学 资源与安全工程学院,湖南 长沙 410083)

摘要:由于建筑火灾发生频繁,混凝土作为使用最广泛的建筑材料其力学性能在高温下面临严峻的考验。为了探索花岗岩机制砂含量对高温冷却后超高性能混凝土(UHPC)的性能影响,该研究制备出3种不同机制砂含量(0、50%、100%)的UHPC试样,然后通过试验获得机制砂含量、加热温度及冷却方式等因素对UHPC的P波波速和单轴抗压强度的影响。结果表明:随着机制砂含量的增大,UHPC的P波波速和抗压强度都略有上升。当试样由室温25 ℃加热到300 ℃时,其对应的P波波速和抗压强度下降较为平缓。当目标温度升高到600 ℃及900 ℃,其对应的P波波速和抗压强度出现急剧下降。此外,对冷却方式研究发现水冷却下试样的P波波速和抗压强度下降幅度大于自然冷却下的试样,表明水冷却引起的热冲击对试样造成了二次损伤。

关键词:花岗岩机制砂;超高性能混凝土;高温冷却;P波波速;单轴抗压强度
中图分类号:U414 **文献标志码:**A

Study on Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete with Granite Manufactured Sand after Heating and Cooling Treatment

LI Gang[1], ZHOU Feilong[1], LU Qiuju[1], DU Kun[2], LIU Kai[2*]
(1. PowerChina Roadbridge Group Co., Ltd., Beijing 100160, China; 2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: Due to the frequent occurrence of building fires, the mechanical properties of concrete, as the most widely used construction material, are severely challenged under high temperatures. To explore the effect of granite manufactured sand content on the performance of ultra-high performance concrete (UHPC) after heating and cooling treatment, three types of UHPC specimens with different manufactured sand contents (0, 50%, and 100%) were prepared in this study. Then, the effects of manufactured sand content, heating temperature, and cooling regime on the P-wave velocity and uniaxial compressive strength of UHPC were obtained through experiments. The results indicate that the P-wave velocity and compressive strength of UHPC both increase slightly with the increase in manufactured sand content. When the specimen is heated from a room temperature of 25 ℃ to 300 ℃, the corresponding P-wave velocity and compressive strength decline gently. When the target temperature is raised to 600 ℃ and 900 ℃, the corresponding P-wave velocity and compressive strength decrease sharply. In addition, it is revealed by the investigation of cooling regimes that the decrease in P-wave velocity and compressive strength of the specimens under water cooling is greater than that under natural cooling, indicating that secondary damage to the specimens is caused by the thermal shock induced by water cooling.

Keywords: granite manufactured sand; ultra-high performance concrete; heating and cooling treatment; P-wave velocity; uniaxial compressive strength

收稿日期:2025-04-01 **修回日期:**2026-02-26
基金项目:湖南省自然科学基金青年基金资助项目(编号:2023JJ40735)
作者简介:李钢,男,博士,工程师.E-mail: 916246403@qq.com
***通信作者:**刘恺,男,博士,副教授.E-mail: kailiu30@csu.edu.cn

0 引言

火灾是建筑结构所面临的最频繁、最具破坏性的灾害，其中高温因素对工程材料力学性能的影响尤为重要。混凝土以其强度高、耐久性好、造价低等优点在土木交通工程中得到了广泛的应用。然而，混凝土结构承受火灾等极端荷载条件下的能力仍然存在挑战。混凝土材料在高温作用下将从一种致密、高强的材料转变为疏松、多孔、开裂且强度低的物质，产生严重的表面损伤、力学性能退化等一系列问题[1]。这不仅直接削弱了混凝土材料的承载能力，还对其长期安全性和耐久性构成了永久性的威胁。波特兰水泥基超高性能混凝土（Portland Cement-based Ultra-High Performance Concrete，UHPC）是一种具有革命性的水泥基复合材料，具有极其致密的微观结构和优越的力学性能，具体表现为：超高强度、优异韧性、良好的和易性和突出的耐久性[2-6]。在工程建设中采用UHPC能够有效地提升建筑结构的整体性能[7-10]。同时，近年来由于过度开采导致天然砂资源更加匮乏，国内外学者尝试利用人工机制砂代替天然河砂制备UHPC[11-14]。因此，研究高温加热–冷却后机制砂UHPC的力学性能变化及损伤破坏特征具有重要的工程意义。

高温度场通常是指200～1 000 ℃这一温度区间，国内外学者的研究主要集中在高温度场中混凝土的性质变化，如强度变化，损伤扩张等问题[15-16]。朋改非等[17]综合前人的研究结果发现UHPC的残余强度在高温下并非持续衰退，在300 ℃至400 ℃前会经历一个短暂的增强阶段，然后持续下降；牛旭婧等[18]从养护角度出发，研究了热水预养护和干燥空气加热组合养护对UHPC高温力学性能的影响，结果表明，组合养护显著改善了UHPC的力学性能；Chen等[19]对高温加热后的UHPC力学性能进行了试验研究，结果表明UHPC在300 ℃、400 ℃、500 ℃下的残余抗压强度、弯曲强度和劈裂强度没有明显下降，而当温度升高到600 ℃时，残余力学性能则表现出迅速下降的趋势。与此同时，有关机制砂对UHPC材料动静力学性能的影响成为该领域的研究热点。如韩长君等[20]利用玄武岩制备机制砂替代天然砂配制C80混凝土并进行了SHPB冲击力学试验。结果表明：机制砂混凝土的峰值应力和韧性均高于天然砂混凝土；Shen等[21]制备出抗压强度为120 MPa的机制砂混凝土，证明了采用机制砂替代天然砂作为细集料制备UHPC的可行性；冯滔滔等[22]采用机制砂等质量替代河砂用于制备UHPC，进而研究了机制砂对UHPC动静态力学性能的影响。试验结果表明：机制砂替代河砂后，所制备的UHPC抗压强度与仅用河砂配制的UHPC抗压强度相近，机制砂UHPC具有优异的抗冲击性能，可以承受多次冲击行为。尽管机制砂UHPC的动静力学性能方面得到了国内外学者的诸多研究，但是有关机制砂UHPC在高温冷却后的力学性能研究还较为少见。

为了研究高温冷却后机制砂UHPC的力学性质及损伤效应，本次研究首先制备出3种不同花岗岩机制砂含量的UHPC试样，然后将其加热至设置温度300 ℃、600 ℃以及900 ℃，随后通过自然冷却和浸水冷却两种方式将试样冷却至室温。分别通过波速测量仪和单轴压缩试验得到机制砂含量、加热温度及冷却方式等因素变化对试样加热前后的P波波速和强度的影响规律。最后根据试样P波波速、抗压强度变化定量分析其高温后的温度损伤。

1 试验方案设计

前人的研究发现机制砂母岩岩性显著影响混凝土的力学性能，其中徐良等[23]、杨艳华等[24]的研究表明，在固定级配下，采用花岗岩、石灰岩及玄武岩制成的机制砂混凝土，其抗压强度均高于天然砂混凝土。此外，王晓波等[25]进一步指出，花岗岩机制砂因吸水率较低，故在稳定性、耐久性及抗压强度方面表现更优。为此本次研究选用花岗岩机制砂作为细集料来制备UHPC。

1.1 花岗岩机制砂UHPC制备

常规UHPC的制备通常需要以下几种原材料：水泥、硅灰、级配良好的细砂、高效减水剂，此外，为了增强材料内部充填，提高材料强度和韧性，还需要添加纳米材料，如纳米$CaCO_3$和纳米SiO_2，以及纤维材料，如钢纤维、PP纤维和玻璃纤维等。UHPC的制备技术包含以下几个方面：① 通过去除粗骨料，改善细骨料的级配来提高材料的匀质性，减少其内部缺陷；② 优选原料粒径的级配，掺入纳米材料和高效减水剂来提高材料的堆积密度；③ 优化养护方式改善材料内部微观结构；④ 掺入适量钢纤维提高材料韧性。

本次试验制备UHPC所用的原材料包括：42.5R硅酸盐水泥、硅灰、天然细砂、减水剂、纳米碳酸钙、圆直形钢纤维以及水。同时，为了研究花岗岩机制

砂对UHPC的性能影响，本次试验以花岗岩机制砂等质量替代天然细砂，按替代率0、50%、100%制备出3种类型的UHPC试样。表1为各种原料的具体添加比例。表2为本次试验所采用的天然砂和花岗岩机制砂两种细集料对应的表观密度、细度模数等性能参数。图1为天然砂和花岗岩机制砂的粒径分布。

表1　花岗岩机制砂UHPC的配合比

Table 1　Mix proportions of UHPC with granite manufactured sand

试样编号	组成/(kg·m^{-3})							
	42.5R硅酸盐水泥	硅灰	天然砂	花岗岩机制砂	减水剂	纳米碳酸钙	钢纤维	水
M0N100	750	415	1 030	0	16	63.1	156	190
M50N50	750	415	515	515	16	63.1	156	190
M100N0	750	415	0	1 030	16	63.1	156	190

表2　天然砂和花岗岩机制砂性能参数

Table 2　Performance parameters of natural sand and granite manufactured sand

材料	细度模数	含泥量/%	石粉含量/%	孔隙率/%	表观密度/(kg·m^{-3})
天然砂	2.8	0.7	—	30	2 565
花岗岩机制砂	3.0	—	5.9	35	2 643

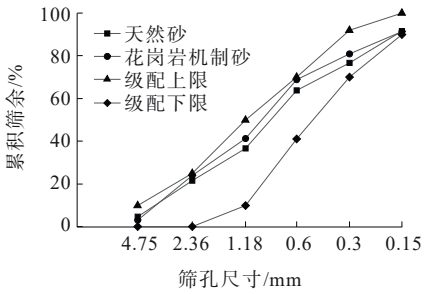

图1　天然砂和花岗岩机制砂级配曲线

Figure 1　Grading curves of natural sand and granite manufactured sand

本次试验所用水泥为42.5 R普通型硅酸盐水泥，满足《硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥》(GB 175—1999)中的各项指标要求。表3为该水泥的基本物理力学性能，表4为其相应的化学成分及含量。

试验所用硅灰的平均粒径为0.1 μm，密度为2 260 kg/m^3，表5为其主要化学成分及含量。

试验选用的钢纤维为圆直型钢纤维，表6为其主要参数和力学性质。

钢纤维的分散性直接决定了其对UHPC中的增强增韧效果，因此将原材料按照配合比以一定的顺序倒入搅拌机中搅拌：首先倒入天然砂或机制砂，然后加入42.5 R硅酸盐水泥、硅灰、纳米碳酸钙，干拌5 min，接着倒入2/3水＋全部减水剂，搅拌5 min，加入剩余水，搅拌5 min，最后放入钢纤维，直至搅拌均匀。将搅拌好的混合物倒入磨具中制备出1 m×1 m×1 m的立方体，在室温下自然养护14 d，然后利用取芯机取出50 mm×1 000 mm(直径×高度)的圆柱体，再利用切割机将其切割为50 mm×100 mm(直径×高度)的圆柱试样用于单轴压缩力学试验，切割好的试样需要用打磨机对其两端端面进行打磨光滑，保证其平整度小于0.02 mm。此外，为了去除试样表面和内部自由水，将打磨好的试样放置于试验室内进行7 d空气干燥，使试样达到一个稳定的干燥状态。

表3　42.5 R水泥基本物理力学性能

Table 3　Basic physical and mechanical properties of 42.5 R cement

初凝时间/min	终凝时间/min	安定性	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
			3 d	28 d	3 d	28 d
122	185	合格	5.6	8.5	28.6	61.3

表4　42.5 R水泥主要化学成分及含量

Table 4　Main chemical components and contents of 42.5 R cement　%

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	烧失量
21.86	4.25	2.66	63.59	2.19	1.75

表5　硅灰主要化学成分及含量

Table 5　Main chemical components and contents of silica fume　%

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	烧失量
92.53	0.82	0.32	1.25	0.40	3.45

表6　钢纤维主要参数和性能

Table 6　Main parameters and properties of steel fibers

型号	直径/mm	长度/mm	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa
MF15	0.12	15	7 800	210	4 295

1.2　试验原理及方案

火灾中混凝土的温度通常为200～1 000 ℃，尤其是公路、铁路桥梁等结构，其所处空间开放，空气流畅，这为火灾提供了充分的燃烧条件，混凝土结构温度将快速升至1 000 ℃。此外UHPC材料内部的致密结构导致其在1 000 ℃高温作用下容易发生爆裂现象。因此，本次试验设置了4个等级的温度，分别为：

室温(25 ℃)、300 ℃、600 ℃以及900 ℃,研究花岗岩机制砂UHPC在高温冷却后的静态力学性能以及温度损伤情况。试验采用加热量程为1 100 ℃的石英管电炉对UHPC试样进行加热。为了避免加热速率过快导致UHPC试样发生爆裂现象,同时减小试样内外部温差,将加热速率设置为3 ℃/min的低速加热[26]。加热方案为:将室温下试样放入电炉膛中,关闭炉门,设置加热速率开始加热,当试样加热到目标温度时,保持该温度2 h用以使试样内外部温度达到一致,然后打开炉门将试样取出进行冷却。因此3个目标温度所需的加热时间分别为:212 min、312 min和412 min。

此外,为了研究不同冷却方式对试样力学性能的影响,本次试验采用了自然冷却和浸水冷却两种冷却方式:

(1) 自然冷却:将加热后的试样从炉中取出,置于空气中,直至冷却至室温。这种冷却方式允许试样以缓慢的速度释放热量和降低温度。

(2) 浸水冷却:将加热后的试样放入水池里进行快速冷却。这种冷却方式使试样表面温度发生急速下降。

图2为试样加热-冷却全过程示意图。

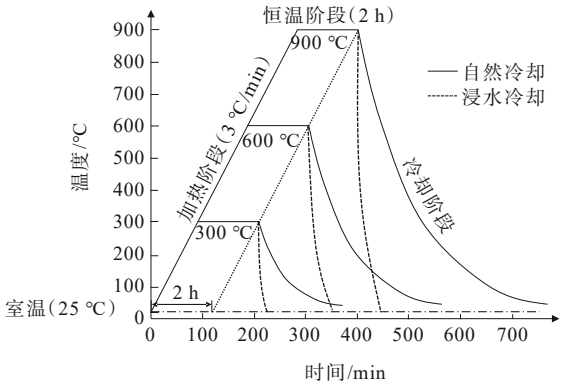

图2 UHPC试样加热-冷却方案示意图

Figure 2 Schematic diagram of heating and cooling scheme for UHPC specimens

由图2可知:试样温度是以线性上升和非线性方式下降,并且水冷却方式的冷却速率远快于自然冷却方式。试验中采用秒表记录两种冷却方式的平均冷却速率,得到自然冷却的平均冷却速率为7.6 ℃/min,而水冷却的平均冷却速率则达到了315.8 ℃/min。如此快的冷却速率容易在试样内外部形成一个较大的温度差,从而使得试样受到二次损伤。材料波速的变化能够反映材料内部缺陷(裂纹、孔隙)的发育情况,为此在试样加热前后对其P波波速进行测量,以求描述UHPC在加热过程中产生的裂纹。最后通过单轴压缩试验研究不同机制砂含量下UHPC试样在高温下的静态力学特性,并定量描述其试样受到的温度损伤。

2 结果分析及讨论

2.1 加热-冷却处理下试样P波波速的变化

P波波速为地震纵波在介质中传播的速度,其大小由介质的弹性性质和密度共同决定。当P波在混凝土中传播时其速度取决于混凝土的弹性模量和密度。高温引起的热应力将在试样内部产生大量微裂纹,导致试样弹性模量和密度发生变化进而引起波速的变化,因此本文通过测量试样在加热-冷却处理前后的P波波速变化来描述试样受到的温度损伤。为了减小混凝土制备过程中的非均质性和试验随机误差,每组试样编号进行3次P波波速测量试验取其平均值。表7为UHPC试样测量的平均P波波速结果。图3为机制砂含量为0情况下,UHPC试样平均P波波速随温度的变化趋势。

表7 高温冷却后不同机制砂含量UHPC的平均P波波速测量结果

Table 7 Measurement results of average P-wave velocity of UHPC with different manufactured sand contents after heating and cooling treatment

试样编号	温度/℃	P波波速/(m·s^{-1})			
		V_{01}	V_{T1}	V_{02}	V_{T2}
M0N100-25	25	4 312	4 312	4 312	4 312
M50N50-25		4 329	4 329	4 329	4 329
M100N0-25		4 346	4 346	4 346	4 346
M0N100-300	300	4 261	3 803	4 155	3 630
M50N50-300		4 302	3 841	4 311	3 796
M100N0-300		4 336	3 894	4 343	3 799
M0N100-600	600	4 221	2 284	4 265	2 058
M50N50-600		4 287	2 326	4 299	2 064
M100N0-600		4 344	2 356	4 318	2 087
M0N100-900	900	4 313	1 701	4 327	1 562
M50N50-900		4 452	1 737	4 389	1 582
M100N0-900		4 410	1 759	4 425	1 591

注:V_{01}为加热-自然冷却前P波波速;V_{02}为加热-浸水冷却前P波波速;V_{T1}为加热-自然冷却后P波波速;V_{T2}为加热-浸水冷却后P波波速。

由图3可知:试样的平均P波波速呈现随加热温度升高而下降的趋势。这主要是由于在高温加热的作用下试样内部产生了大量的微裂纹,变得疏松,从

而导致P波波速的下降。同时，可以发现在300 ℃时，P波波速下降得比较平缓，平均P波波速从4 302 m/s下降到3 841 m/s，下降率只有10.7%。而当温度升高到600 ℃以上，P波波速出现了大幅下降，从4 221 m/s下降到2 284 m/s，下降率为45.9%。温度为900 ℃时，平均P波波速从4 313 m/s下降到1 701 m/s，下降率高达60.6%。这表明试样在300 ℃时受到的温度损伤较小，试样内部只产生了少许微裂纹，而在600 ℃以上高温作用时，试样内部产生了大量微裂纹，导致UHPC材料性能的退化。

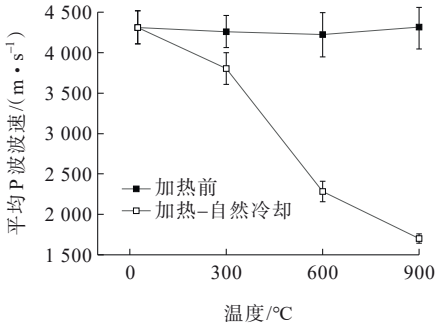

图3　试样平均P波波速随温度的变化趋势

Figure 3　Variation of average P-wave velocity of specimens with temperature

图4为不同冷却方式对UHPC试样（编号M0N100）P波波速影响柱状图。

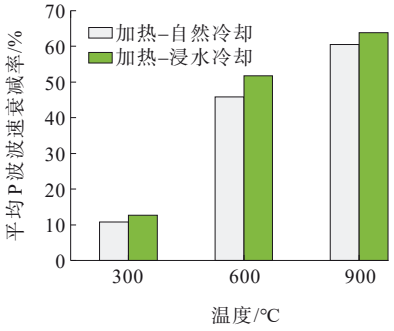

图4　不同冷却方式下试样平均P波波速衰减率

Figure 4　Decrease rate of average P-wave velocity of specimens under different cooling regimes

由图4可知：水冷却下试样P波波速的衰减率大于自然冷却下的衰减率。这表明水冷却比自然冷却对试样造成的内部微裂纹更多。主要是因为水冷却过程中试样表面冷却率要远大于试样内部的冷却率，在试样内部形成了一个较大的温度梯度场，其内部热量无法快速发散，形成了一股热冲击向外扩散，从而在试样内部产生更多微裂纹，对试样造成二次损伤[1]。

图5为加热-自然冷却处理后不同机制砂含量UHPC试样的P波波速变化趋势。

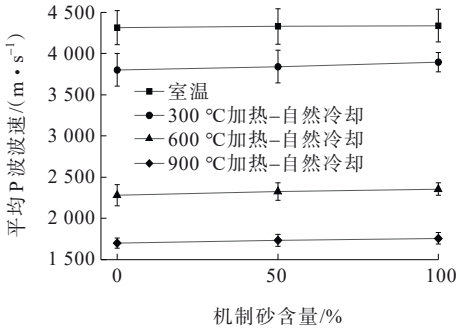

图5　不同机制砂含量下UHPC试样加热-自然冷却后平均P波波速

Figure 5　Average P-wave velocity of UHPC specimens with different manufactured sand contents after heating and natural cooling treatment

由图5可知：在相同加热温度下机制砂含量较多的试样测得波速略大于机制砂含量较少的试样。其原因是花岗岩机制砂在制备过程中产生了微石粉，因此在用机制砂替代天然砂时，机制砂中的微石粉发生填充效应使得UHPC内部的微结构更加致密化，从而提高了材料的P波波速。此外，UHPC试样的波速整体呈现出随加热温度的升高而下降的趋势，与机制砂含量的变化无关，说明机制砂在抵抗高温影响方面与天然砂相差不大。

2.2　加热-冷却处理下试样单轴抗压强度的变化

为了获取UHPC试样准静态抗压强度，利用MTS 322 T型试验机以恒定0.025 mm/min的加载速率进行加载直至试样发生压缩破坏，得到其单轴压缩破坏的应力-应变曲线。同样地，为了降低混凝土材料非均质性影响，每组试样编号进行3次单轴压缩试验，然后选取与平均抗压强度值最接近的试验结果作为每组代表，表8为具体的准静态单轴抗压强度结果。图6为UHPC试样（编号M0N100）在自然冷却下的单轴抗压应力-应变曲线。

由图6可知：随着加热温度的升高，曲线的峰值和斜率都出现了减小趋势。特别是加热到600 ℃以上后，峰值和斜率表现出急剧下降。UHPC在室温下的初始抗压强度为106.5 MPa，而加热到600 ℃和900 ℃并自然冷却后的残余抗压强度分别只剩下49.4 MPa和20.6 MPa（表8）。

图7为不同冷却方式下UHPC试样（编号M0N100）的准静态抗压强度随温度的变化趋势。

表8 不同温度和冷却方式下UHPC的准静态单轴抗压强度

Table 8 Quasi-static uniaxial compressive strength of UHPC under different temperatures and cooling regimes

试样编号	温度/℃	准静态单轴抗压强度/MPa	
		自然冷却 σ_{c1}	浸水冷却 σ_{c2}
M0N100-25	25	106.5	106.5
M50N50-25		114.3	114.3
M100N0-25		126.7	126.7
M0N100-300	300	99.8	101.2
M50N50-300		106.2	107.9
M100N0-300		118.7	120.8
M0N100-600	600	49.4	38.7
M50N50-600		52.2	40.5
M100N0-600		56.3	43.8
M0N100-900	900	20.6	15.2
M50N50-900		21.2	15.6
M100N0-900		22.4	16.4

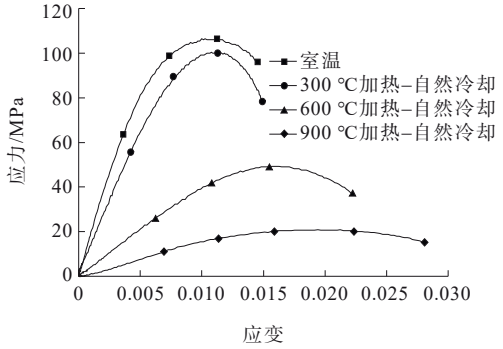

图6 加热-自然冷却处理后UHPC单轴压缩应力-应变曲线

Figure 6 Uniaxial compressive stress-strain curves of UHPC after heating and natural cooling treatment

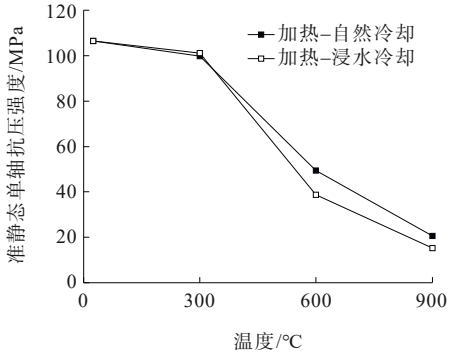

图7 不同冷却方式下UHPC准静态抗压强度对比

Figure 7 Comparison of quasi-static compressive strength of UHPC under different cooling regimes

由图7可知：UHPC的准静态抗压强度在两种冷却方式下均随温度的升高而降低。300 ℃时，UHPC在水冷却下的准静态抗压强度比自然冷却时的高1.40%。而在600 ℃和900 ℃时，UHPC在水冷却下的准静态抗压强度分别比自然冷却时的低21.66%和26.21%。可能的原因是UHPC加热至300 ℃后仍保持较好的力学性能。因此，水冷却引起的热冲击对试样的影响较小。同时，在300 ℃水冷却过程中，游离水进入试样的微裂纹和孔隙，部分未反应膏体的再水化作用提高了试样的强度。当试样加热到600 ℃以上时，由于$Ca(OH)_2$脱水形成CaO，试样遭受了严重的热损伤[27]。而在水冷却过程中高速冷却速率在试样内部形成了巨大的热冲击，促进了微裂纹的进一步发展。此外，水冷却过程中CaO吸收水分后再水化成$Ca(OH)_2$，导致UHPC试样膨胀而解体[28]。因此，UHPC受热后在水冷却下的残余准静态抗压强度进一步降低，低于自然冷却下试样准静态抗压强度。

图8为不同机制砂含量UHPC试样的准静态抗压强度变化趋势。

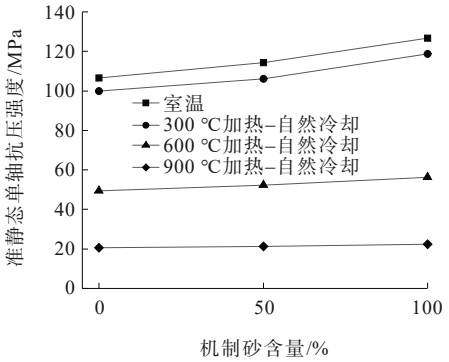

图8 不同机制砂含量下UHPC准静态抗压强度对比

Figure 8 Comparison of quasi-static compressive strength of UHPC with different manufactured sand contents

由图8可知：相同温度下机制砂含量高的试样对应的抗压强度也相对较大，这表明机制砂的掺入能够提高UHPC材料的抗压强度，并且呈正相关关系。主要原因是微石粉充填了UHPC试样内部的微裂缝和空隙，减少界面过渡区，从而提高了材料内部的密实度。此外，机制砂的粗糙形貌可以增大骨料与基体间的机械咬合力，在一定程度上也能够提高混凝土力学性能。进而，可以发现在室温25 ℃以及加热到300 ℃自然冷却状态下，试样机制砂含量由0增大100%后，对应的抗压强度增加了18.97%、18.94%。当加热温度增大到600 ℃自然冷却时，试样机制砂含量由0增大100%，对应的抗压强度只增加了13.97%，而当加热温度增大到900 ℃自然冷却后，试

样机制砂含量由0增大100%，对应的抗压强度增长率下降到8.74%。主要原因可能是在室温及加热温度较低时，试样内部结构密实，其强度主要由制备UHPC材料的成分所决定，而随着加热温度的增大，在试样内部产生了越来越多的裂纹和孔隙，远多于试样的初始缺陷，此时试样内部的裂纹孔隙对其强度占主导地位，从而减小了材料成分对其强度的影响。

2.3　加热-冷却处理下试样温度损伤分析

在加热过程中由于高温作用，试样性能发生了衰减退化，因此可以通过试样加热-冷却前后力学性能指标的变化来定量描述材料受到的温度损伤。本次研究选用P波波速来定义UHPC材料受到的温度损伤。

由P波波速变化定义的温度损伤D_T的表达式如式(1)所示：

$$D_T = 1 - \left(\frac{V_T}{V_0}\right)^2 \tag{1}$$

式中：V_T为试样加热到目标温度T下的P波波速；V_0为试样在室温下的P波波速；D_T的取值范围为[0，1]。当$D_T=0$时，$V_T=V_0$表示试样和初始状态一样没有受到任何损伤。当$D_T=1$时，即$V_T=0$代表着试样发生爆炸剥落现象，爆裂成几瓣。

图9为自然冷却温度损伤变量D_{T1}和浸水冷却温度损伤变量D_{T2}随温度的变化趋势对比。

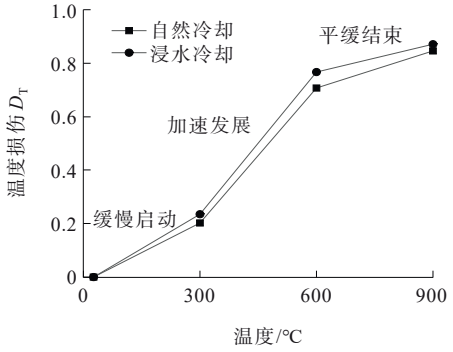

图9　自然冷却和浸水冷却下温度损伤对比

Figure 9　Comparison of thermal damage under natural cooling and water cooling

由图9可知：这两个温度损伤变量的变化趋势是相似的，都是随着温度的升高而增大，只是浸水冷却下的温度损伤D_{T2}略大于自然冷却下的温度损伤D_{T1}。可能原因是在水冷却过程中高速冷却速率在试样内部形成了巨大的热冲击，促进了微裂纹的进一步发展。此外，水冷却过程中CaO吸收水分后再水化成$Ca(OH)_2$，导致UHPC试样膨胀而解体。从图9可以看到：从25 ℃到300 ℃，温度损伤D_T随着温度的升高而缓慢增加，这主要是由于UHPC试样中游离水的蒸发所致。从300 ℃到600 ℃，温度损伤D_T急剧增加。D_T的急剧增加可能是由于$Ca(OH)_2$脱水形成CaO导致孔隙率增加和致密性降低。随后温度损伤D_T逐渐减缓，直到温度达到900 ℃，此时钢纤维强度大部分丧失，钢纤维与膏体界面受损，温度损伤继续累积[26]。

综合上述试验结果分析可知：高温是导致花岗岩机制砂UHPC力学性能退化引起温度损伤的主要因素。同时浸水冷却方式则会进一步加剧UHPC受到的温度损伤程度。Liang等[29]的研究报道中采用了粉煤灰、高炉矿渣等耐火材料制备出一种新型UHPC材料。同时还在材料中加入了PP纤维和钢纤维的混杂纤维。试验结果表明，其制备的UHPC在加热到1 000 ℃时仍展现良好的抗火性能，其残余强度留有初始强度的69.0%。而本文研制的花岗岩机制砂UHPC在600 ℃温度加热-自然冷却后，其残余强度仅留有初始强度的44.44%。对比结果表明：未添加耐火材料的花岗岩机制砂UHPC在室温下能够表现出优异的力学性能，但在高温作用后表现出较差的抗火性能，不仅力学性能退化严重，同时也容易发生爆炸剥落现象。

3　结论

(1) 采用花岗岩机制砂等量(0、50%、100%)替代天然砂制备出UHPC，机制砂含量越高对应UHPC试样的P波波速及单轴抗压强度也略高于天然砂UHPC，表明采用花岗岩机制砂替代天然砂能够制备出力学性能优越的UHPC材料。

(2) 机制砂UHPC在加热到300 ℃冷却后，P波波速及抗压强度下降较为平缓，而加热至600 ℃冷却后，P波波速及抗压强度出现急剧下降，表明花岗岩机制砂UHPC在600 ℃高温作用下其力学性能发生了严重退化，丧失了大部分抗高温能力。

(3) 通过浸水冷却和自然冷却对比发现，浸水冷却下花岗岩机制砂UHPC的P波波速及抗压强度都比自然冷却下试样低，主要原因是浸水冷却由于冷却速率过高，导致试样内外部温差变大，从而在试样内部形成热冲击对试样造成二次损伤。

在火灾事故中相对于冷却方式，温度是导致花岗岩机制砂UHPC力学性能恶化的主要因素。解决火灾中这一潜在威胁最有效的方法是提高UHPC材

料的抗火性能,以保证材料在高温作用下仍有足够的残余力学性能。因此花岗岩机制砂UHPC的耐火性能是今后研究的一个重要方向。

参考文献:

References:

[1] LIU K, WU C Q, LI X B, et al. The influences of cooling regimes on fire resistance of ultra-high performance concrete under static-dynamic coupled loads[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 103336.

[2] 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.
FANG Chi, YANG Weihao, REN Kang, et al. Effect of lightweight aggregate with water-holding capacity on strength and autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2025, 45(2): 65-72.

[3] WANG D H, SHI C J, WU Z M, et al. A review on ultra high performance concrete: Part Ⅱ. Hydration, microstructure and properties[J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 368-377.

[4] 黄赟, 赵华, 涂磊. 钢板–UHPC组合梁抗弯性能试验及有限元分析[J]. 中外公路, 2023, 43(1): 69-76.
HUANG Yun, ZHAO Hua, TU Lei. Test and finite element analysis on flexural properties of steel plate–UHPC composite beam[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(1): 69-76.

[5] 周腾, 裴炳志, 黄政宇, 等. 钢纤维掺量对UHPC轴拉性能的影响[J]. 中外公路, 2022, 42(5): 120-124.
ZHOU Teng, PEI Bingzhi, HUANG Zhengyu, et al. Influence of steel fiber content on UHPC axial tensile performance[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(5): 120-124.

[6] 常诚, 王绪富, 王瑜, 等. 煅烧渣土对超高性能混凝土力学及收缩性能的影响[J]. 中外公路, 2026, 46(1): 63-70.
CHANG Cheng, WANG Xufu, WANG Yu, et al. Effect of calcined construction spoil on mechanical and shrinkage properties of UHPC[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2026, 46(1): 63-70.

[7] 吴新印, 胡方健, 刘兆丰. 预制装配式超高性能混凝土(UHPC)桥梁盖梁施工工艺研究[J]. 中外公路, 2022, 42(2): 138-141.
WU Xinyin, HU Fangjian, LIU Zhaofeng. Construction technology research on prefabricated bridge bent cap made with ultra high performance concrete(UHPC) [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(2): 138-141.

[8] 龙屹宇, 陈双庆, 唐春燕, 等. 基于断裂力学的UHPC加固钢桥面板性能分析[J]. 中外公路, 2023, 43(4): 170-175.
LONG Yiyu, CHEN Shuangqing, TANG Chunyan, et al. Performance analysis of steel bridge deck reinforced by UHPC based on fracture mechanics[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 170-175.

[9] 张欣, 李瑜, 刘勇. 大跨度自锚式悬索桥钢–UHPC轻型组合加劲梁构造设计研究[J]. 中外公路, 2023, 43(4): 147-152.
ZHANG Xin, LI Yu, LIU Yong. Research on structural design of steel–UHPC light composite beam of large-span self-anchored suspension bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 147-152.

[10] NAWY EG. Fundamentals of high-performance concrete [J]. John Wiley & Sons, 2001.

[11] 王稷良, 魏新院, 于波. 花岗岩机制砂特性对混凝土性能影响研究进展[J]. 中外公路, 2025, 45(4): 59-67.
WANG Jiliang, WEI Xinyuan, YU Bo. Effect of granite machine-made sand properties on concrete performance [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2025, 45(4): 59-67.

[12] 葛进进, 高小羽, 陈佩圆, 等. 橡胶–机制砂UHPC压缩破坏特性及能量演化特征[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(8): 2806-2816.
GE Jinjin, GAO Xiaoyu, CHEN Peiyuan, et al. Compressive failure and energy evolution characteristics of rubber–manufactured sand UHPC[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(8): 2806-2816.

[13] 曾旺. 混杂纤维对玄武岩机制砂超高性能混凝土性能影响研究[D]. 抚州: 东华理工大学, 2023.
ZENG Wang. Study on the influence of hybrid fiber on the performance of basalt machine-made sand ultra-high performance concrete[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2023.

[14] 杨益伦, 吴庆雄, 陈智威, 等. 无配筋机制砂UHPC井盖受力性能试验研究[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2023, 44(4): 328-338.
YANG Yilun, WU Qingxiong, CHEN Zhiwei, et al. Experimental study on mechanical performance of machine-made sand UHPC manhole cover without reinforcement[J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2023, 44(4): 328-338.

[15] SAKR K, EL-HAKIM E. Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(3): 590-596.

[16] CHAN Y N, LUO X, SUN W. Compressive strength and pore structure of high-performance concrete after exposure to high temperature up to 800 ℃[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(2): 247-251.

[17] 朋改非, 牛旭婧, 成铠. 超高性能混凝土的火灾高温性能研究综述[J]. 材料导报, 2017, 31(23): 17-23.
PENG Gaifei, NIU Xujing, CHENG Kai. Research on fire resistance of ultra-high-performance concrete: A review [J]. Materials Review, 2017, 31(23): 17-23.

[18] 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.

[19] CHEN H J, YU Y L, TANG C W. Mechanical properties of ultra-high performance concrete before and after exposure to high temperatures[J]. Materials, 2020, 13 (3): 770.

[20] 韩长君, 周海龙, 王海龙. 冲击荷载下高强混凝土动力特性及破碎特征研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(11): 320-326.
HAN Changjun, ZHOU Hailong, WANG Hailong. Dynamic characteristics and crushing features of high-strength concrete under impact load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(11): 320-326.

[21] SHEN W G, LIU Y, CAO L H, et al. Mixing design and microstructure of ultra high strength concrete with manufactured sand[J]. Construction and Building Materials, 2017, 143: 312-321.

[22] 冯滔滔, 蒋金洋, 刘志勇, 等. 机制砂超高性能混凝土的冲击压缩力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1177-1187.
FENG Taotao, JIANG Jinyang, LIU Zhiyong, et al. Impact compression mechanical properties of ultra-high performance concrete with manufactured sand[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(8): 1177-1187.

[23] 徐良, 程华才, 马子宸, 等. 机制砂岩性与级配对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(6): 1973-1980.
XU Liang, CHENG Huacai, MA Zichen, et al. Effects of manufactured sand lithology and gradation on sulfate resistance of concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(6): 1973-1980.

[24] 杨艳华, 魏杰, 冯小伟, 等. 机制砂特性对路面混凝土力学性能及微观形貌的影响研究[J]. 公路, 2024, 69(3): 71-79.
YANG Yanhua, WEI Jie, FENG Xiaowei, et al. Study on influence of manufactured sand characteristics on mechanical properties and micro-morphology of pavement concrete[J]. Highway, 2024, 69(3): 71-79.

[25] 王晓波, 亢泽千, 孔亚宁, 等. 母岩类型和岩性对混凝土骨料性能的影响[J]. 混凝土, 2023(3): 77-80, 85.
WANG Xiaobo, KANG Zeqian, KONG Yaning, et al. Concrete aggregate performance affected by the type and lithology of parent rock[J]. Concrete, 2023(3): 77-80, 85.

[26] LIU K, WU C Q, LI X B, et al. Fire damaged ultra-high performance concrete (UHPC) under coupled axial static and impact loading[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 126: 104340.

[27] 朱茂金. 钢纤维机制砂混凝土高温后力学性能及微观结构研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
ZHU Maojin. Study on mechanical properties and microstructure of steel fiber manufactured sand concrete after high temperature[D]. Nanning: Guangxi University, 2022.

[28] MENDES A, SANJAYAN J G, COLLINS F. Effects of slag and cooling method on the progressive deterioration of concrete after exposure to elevated temperatures as in a fire event[J]. Materials and Structures, 2011, 44(3): 709-718.

[29] LIANG X W, WU C Q, YANG Y K, et al. Experimental study on ultra-high performance concrete with high fire resistance under simultaneous effect of elevated temperature and impact loading[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 98: 29-38.