第 49 卷第 6 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 49，No. 6
2021 年 6 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　June，2021
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20200477

荷载－温度耦合作用下超高性能混凝土的损伤行为

刘志勇[1,2]，夏溪芝[3]，张云升[1,2]，蒋金洋[1,2]

(1. 东南大学，江苏省土木工程材料重点实验室，南京 211189；2. 东南大学材料科学与工程学院，南京 211189；
3. 中国矿业大学力学与土木工程学院，江苏 徐州 221116)

摘　要：利用超声波速、质量损失、体积密度以及导热系数等指标，对荷载–温度耦合作用下超高性能混凝土(UHPC)的损伤行为进行评价。结果表明：随着荷载的增加，UHPC 的超声波速显著下降，损伤逐渐加剧，而温度对 UHPC 损伤的作用并不明显，超声波速值在 4.55 km/s 左右浮动；体积密度随着荷载和温度的增加逐渐降低，但下降幅度很小，在应力比为 0.5 和温度为 90 ℃时分别仅降低了 0.73%和 1.80%，质量损失率的试验结果表现出相似的规律性；荷载和温度对 UHPC 的导热系数具有较大影响，随着两者的增加，导热系数都有明显的下降；当应力比为 0.5 时 UHPC 的导热系数相较于无荷载作用下降了 21.80%，90 ℃时 UHPC 的导热系数较 30 ℃时下降了 14.90%；在假定 UHPC 固相导热系数随着混凝土饱和度的增大而线性增大和忽略荷载及温度对 UHPC 孔隙率影响的基础上，建立了一种 UHPC 导热系数细观模型，模型计算的理论值与实测值较为吻合。

关键词：超高性能混凝土；荷载–温度；损伤；超声波速；耐久性
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)06–1238–09
网络出版时间：2021–04–06



Damage Behavior of Ultra-High Performance Concrete under Load–Temperature Coupling

LIU Zhiyong[1,2], *XIA Xizhi*[3], *ZHANG Yunsheng*[1,2], *JIANG Jinyang*[1,2]
(1. Jiangsu Key Laboratory for Construction Materials, Southeast University, Nanjing 211189, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;
3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: The damage of ultra-high performance concrete (UHPC) under load-temperature coupling was evaluated by using the indexes of ultrasonic pulse velocity, mass loss rate, bulk density and thermal conductivity. The results show that the ultrasonic pulse velocity (UPV) of UHPC decreases, and the damage increases gradually with the increase of load. The temperature has little effect on the UHPC damage and the UPV fluctuates at 4.55 km/s. The bulk density decreases slightly with the increase of load and temperature, *i.e*., only 0.73% and 1.80%, respectively, at a stress ratio of 0.5 and a temperature of 90 ℃. The test results of mass loss rate show the similar regularity. Load and temperature both have a greater influence on the thermal conductivity of UHPC. The thermal conductivity decreases with the increase of the increase of load and temperature. At 3 d, the thermal conductivity of UHPC in the presence of a stress ratio of 0.5 is decreased by 21.80%, compared to that in the absence of load, and the thermal conductivity of UHPC at 90 ℃ is decreased by 14.90%, compared to that at 30 ℃. A meso model of thermal conductivity of the UHPC under load-temperature coupling was proposed based on the assumption that the thermal conductivity of solid phase in UHPC could increase linearly with increasing saturation and eliminate the effects of load and temperature on the UHPC porosity. It is indicated that the theoretical values calculated by the model could be in reasonable agreement with the measured data.

Keywords: ultra-high performance concrete; load–temperature; damage; ultrasonic pulse velocity; durability

收稿日期：2020–06–29。　修订日期：2020–08–06。
基金项目：国家杰出青年科学基金(51925903)；国家自然科学基金面上项目(51778613，52078125)。
第一作者：刘志勇(1985—)，男，博士，研究员。
通信作者：蒋金洋(1974—)，男，博士，教授。

Received date: 2020–06–29.　**Revised date:** 2020–08–06.
First author: LIU Zhiyong(1985–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: liuzhiyong0728@163.com
Correspondent author: JIANG Jinyang(1974–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: jiangjinyang16@163.com

超高性能混凝土(UHPC)是近 30 年来发展起来的新一代建筑材料。因为其具有超高的力学性能和优异的耐久性能，能够满足建筑结构高层化、轻量化、大跨化以及长寿命的要求[1−2]，因此在地下结构、大跨桥梁、海上平台、核反应堆安全壳以及军事防护工程等领域中具有广阔的应用前景[3]。

与普通混凝土结构相同，UHPC 结构的服役寿命取决于 UHPC 材料本身的性能以及它所处的服役环境。在各种环境因素和荷载因素的共同作用下，UHPC 的损伤劣化过程极其复杂，同时这些损伤也会对 UHPC 的耐久性能产生极为不利的影响。而在混凝土的损伤研究中，常常采用残余力学强度[4]、超声波速[5]、质量损失[6]、压汞[7]、吸水率[8]、渗透性[9]以及相对动弹[10]等指标进行评价。

在关于 UHPC 耐久性的研究中，最常用的指标主要是动弹性模量、强度以及渗透性。Lee 等[11−12]采用相对动弹性模量对冻融循环后的活性粉末混凝土和高强度聚合物砂浆进行了评价，结果表明活性粉末混凝土相对动弹性模量损失远低于后者，具有极佳的抗冻性。安明喆等[13]的研究结果也验证了这一点。李忠等[14]采用一次加压法测得 UHPC 的相对渗水高度为 2.2×10^{-8} mm/s，其渗透性极低。叶青等[15]测试了活性粉末混凝土的电通量，结果表明其具有极高的抗氯离子渗透性。

上述研究针对的都是单一因素下 UHPC(即完好的 UHPC)的耐久性，而在实际工程应用中，UHPC 一般都处于多种因素耦合作用的环境中，这必然会对其产生一定的损伤，继而影响其耐久性。苏建杰[16]采用抗压强度指标对加载损伤的 UHPC 在硫酸盐干湿循环和冻融循环耦合作用下的耐久性进行了研究，发现其抗压强度始终处在较高的水平。Parant 等[17]也发现在弯曲荷载和环境因素(氯离子渗透，干湿循环)耦合作用下 UHPC 的力学性能时几乎不变。王月[18]的研究表明在氯盐冻融循环与侵蚀耦合作用下活性粉末混凝土的抗压强度则会有较大的下降。在关于 UHPC 渗透性研究方面，Charron 等[19−20]研究了在拉应力作用后 UHPC 的抗渗性，发现其渗透系数提高显著，上升近 3 个数量级。

结合国内外的研究现状可以发现，单因素作用下的 UHPC 耐久性的较多，公认其具有极佳的耐久性，而多因素耦合作用下 UHPC 的耐久性研究还很欠缺。在有限的研究中，主要考虑的是弯曲荷载、侵蚀溶液、干湿循环以及冻融循环等因素的相互耦合，很少有涉及到压荷载和温度等因素，而处于地下环境中的混凝土常常会受到高地应力、高地温的耦合作用，因此研究了采用超声波速、质量损失率、体积密度以及导热系数等指标对荷载−温度耦合作用下 UHPC 的损伤行为进行评价。

1　实　验

1.1　原材料

水泥：南京江南−小野田生产的 P·Ⅱ52.5R 硅酸盐水泥。硅灰：郑州易旺化工产品有限公司生产的微硅灰。沉珠：深圳道特科技有限公司生产的超细粉煤灰精细沉珠。细骨料：最大粒径为 2.5 mm 的普通河砂，堆积密度为 1.6 g/cm^3，表观密度为 2.5 g/cm^3。粗骨料：南京地区产的 5~10 mm 玄武岩，堆积密度为 1.8 g/cm^3，表观密度为 2.8 g/cm^3。减水剂：西卡(江苏)建筑材料有限公司生产的 visconcrete 3301 型高效减水剂，固体含量 28%，减水率≥30%。钢纤维：武汉恒驰达新材料有限公司生产的 HCD 镀铜钢纤维，直径 0.2 mm，长度 13 mm，长径比 65，抗拉强度≥2 800 MPa。

胶凝材料的化学组成与物理性质具体见表 1 和表 2。

表 1　胶凝材料的化学成分

Table 1　Chemical composition of cementitious material

w/%

Material	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	MgO	Na_2O+0.625K_2O	f-CaO	Loss
Cement	64.7	20.4	4.7	3.38	1.88	0.87	0.82	0.9	2.35
Fly ash	12.0	52.0	22.0	4.00	1.88			<0.1	<1.00
Silica fume	0.40	96.0	1.1	0.90		0.70			<0.90

w is mass fraction.

表 2　胶凝材料的物理性质

Table 2　Physical properties of cementitious material

Material	Specific surface area/($m^2\cdot kg^{-1}$)	Density/ ($kg\cdot m^{-3}$)
Cement	362	3 150
Fly ash	458	2 500
Silica fume	20 500	2 200

1.2　配合比与实验方案设计

超高性能混凝土主要由胶凝材料(其中水泥占 50%，硅灰占 10%，粉煤灰占 40%)，砂子(砂胶比为 0.8)，粗骨料(粗骨料与胶凝材料的比值为 0.5)，水(水胶比为 0.16)，减水剂(掺量为胶凝材料的 1%)以及钢纤维(体积掺量为 2%)组成。

采用控制变量法，考虑温度及荷载 2 种因素。探究荷载影响时，温度恒为 70 ℃，应力比分别为 0，0.3 以及 0.5。探究温度影响时，应力比恒为 0.3，温度分别为 30、50、70 ℃以及 90 ℃。

1.3 样品制备

采用试块的尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm。首先将水泥，沉珠，硅灰以及细骨料混合搅拌 4~5 min；然后加入水和减水剂后，继续搅拌 5~7 min，直至获得较好的工作性；再加入钢纤维，搅拌 2~3 min，使钢纤维在基体中分布均匀；最后加入粗骨料，搅拌 1 min；装模振捣 1~2 min，带模标准养护 24 h；脱模后，90 ℃蒸汽养护 3 d。

1.4 实验方法

为了对 UHPC 实现荷载–温度的耦合作用，需要一种加载装置和加温装置。加温装置采用高低温交变湿热试验箱，而加载装置由 3 块钢板、碟簧和 6 根螺杆组成。

首先将试块与加载装置组合安装好。然后将加载装置放置于压力机的下承压板上，根据应力比设定所需的压力，当达到设置参数后，压力机将持压一段时间，在这段时间内用扳手拧紧螺栓，实现保压。最后将加载装置放入高低温交变湿热试验箱中，设定所需的温度，且湿度不控制，实现对 UHPC 的荷载－温度耦合作用。

UHPC 的力学性能测试参照《活性粉末混凝土》(CB/T31387–2015)进行，抗压强度值为 161.2 MPa。采用非金属超声检测仪测量不同工况下 UHPC 的超声波速，进而评价混凝土的损伤程度，测距为 100 mm，为了避免试件表面与探头接触不紧密而造成的误差，测试时涂抹一定的凡士林作为耦合剂。利用排水法和电子秤测量不同工况下 UHPC 的体积与质量，利用式(1)计算其体积密度，利用式(2)计算其质量损失率。采用导热系数测定仪对不同工况下 UHPC 进行导热系数测试。

$$\rho_t = \frac{m_t}{v_t} \tag{1}$$

$$n = (m_0 - m_t)/m_0 \tag{2}$$

其中：m_t 为作用 t 时刻 UHPC 的质量，g；V_t 为作用 t 时刻 UHPC 的体积，cm^3；ρ_t 为作用 t 时刻 UHPC 的体积密度，g/cm^3；m_0 为作用 0 时刻 UHPC 的初始质量，g；n 为 UHPC 的质量损失率。

2 结果与讨论

2.1 荷载-温度耦合作用下 UHPC 的物理性能

2.1.1 UHPC 的超声波速 混凝土中声波的传播速率与混凝土密实度紧密相关，混凝土中微裂纹越多，超声波在其中传播受到的阻碍越多，声速越小。因此，可以根据声速的变化来表征混凝土的损伤程度。

荷载对 UHPC 超声波速的影响如图 1 所示。由图 1 可见，荷载对 UHPC 超声波速具有显著的影响，超声波速随着荷载的增加逐渐减小，如在 t=0 d 时，随着应力比从 0 增加到 0.5，超声波速也从 4.65 km/s 逐渐减小到 4.47 km/s。造成这种结果的主要原因是随着荷载的增加，UHPC 内部的原有的微裂纹得到了扩展且伴有新裂纹的产生，损伤逐渐加剧，阻碍了超声波的传播。此外，也可以发现随着时间的增加，超声波速波动很小，基本保持不变。

图 2 为不同温度下 UHPC 的超声波速。可以发现，相较于荷载的影响，温度(100 ℃以内)对 UHPC 的损伤影响并不显著，其值在 4.55 km/s 值附近波动，说明由温度产生的温度应力很小，并没有对混凝土的内部结构产生不利影响。整体来看，随着时间的增加，UHPC 的超声波速略有提高，这是因为温度促进了未水化水泥颗粒的水化以及硅灰和沉珠的火山灰反应，在一定程度上提高了 UHPC 的密实度[21]，使得混凝土内部的损伤略有改善。

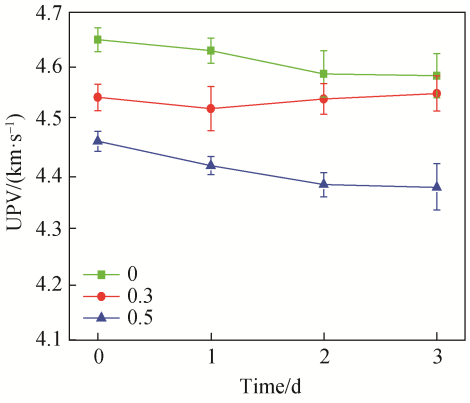


图 1 不同应力比下超高性能混凝土(UHPC)的超声波速(UPV)

Fig. 1 Ultrasonic pulse velocity (UPV) of UHPC at different stress

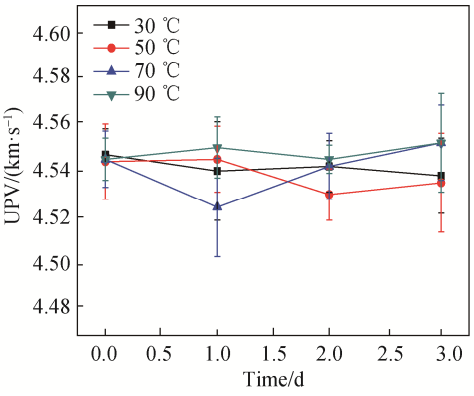


图 2 不同温度下 UHPC 的 UPV

Fig. 2 UPV of UHPC at different temperatures

2.1.2　UHPC 的体积密度　　荷载对 UHPC 体积密度的影响如图 3 所示。结果表明：随着荷载的增加，UHPC 的体积密度也随之降低，并且随着时间的增加，差距也越来越大。由于掺入大量的钢纤维和粗骨料，提高了 UHPC 的弹性模量和其对干缩的抑制效果，由荷载和干缩而造成的体积变化对体积密度的影响很小(这也是荷载水平比较低的原因)，因此体积密度主要与试件的质量变化相关。随着荷载的增加，混凝土内部的裂纹会逐步扩展并产生更多的裂纹，增加了水分流失的通道，造成试件的质量减小，这对 UHPC 的体积密度产生了较大的影响。同时也可以发现，在第 3 d 时，相较于无荷载作用，应力比为 0.3 和 0.5 时 UHPC 的体积密度仅分别降低了 0.28%和 0.73%，这也说明荷载对 UHPC 体积密度的影响并不显著。

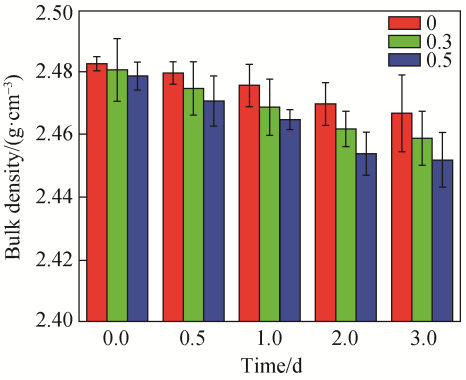


图 3　不同应力比下 UHPC 的体积密度

Fig. 3　Bulk density of UHPC at different stress

图 4 为不同温度下 UHPC 的体积密度。由图 4 可见，随着温度的增加，UHPC 的体积密度逐渐减小，同时随着时间的增加，不同温度作用下 UHPC 的体积密度逐渐降低并且差距也越来越大。与荷载基本一致，这也与混凝土内部水分流失有关。温度量越小，即体积密度也越低，体积密度下降的速度也越快。但在第 3 d 时，90 ℃情况下的 UHPC 体积密度相较于 30 ℃仅降低了 1.8%，说明温度(100 ℃以内)对 UHPC 体积密度的影响并不大。

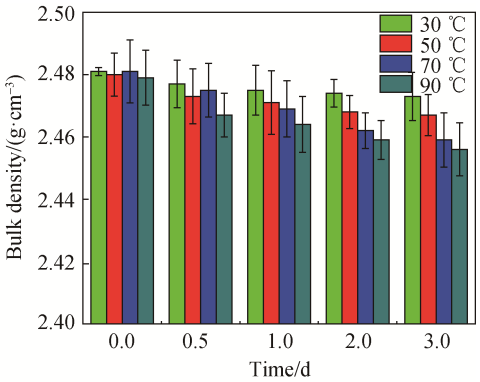


图 4　不同温度下 UHPC 的体积密度

Fig. 4　Bulk density of UHPC at different temperatures

对不同工况下的 UHPC 体积密度进行拟合，如图 5、图 6 所示，拟合方程见式(3)、式(4)。对数据进行拟合后，拟合方程的相关系数均大于 0.9，拟合曲线与数据拟合较好，说明荷载−温度耦合作用下 UHPC 体积密度的变化规律较符合指数函数形式。在早期，体积密度下降的速度较快，而随着时间的推移，下降的趋势逐渐变得平缓，并最终趋于稳定，这也与实际情况相符。各拟合方程随着温度和应力的不同，方程内各待定系数有所改变。

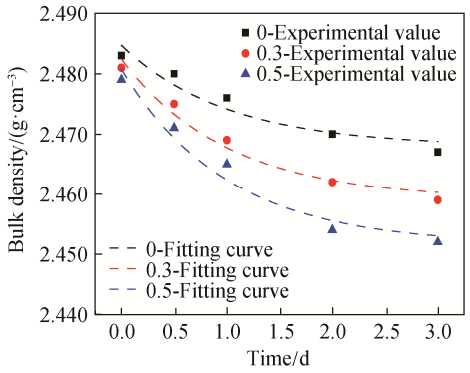


图 5　不同应力比下 UHPC 体积密度

Fig. 5　Bulk density of UHPC at different stress

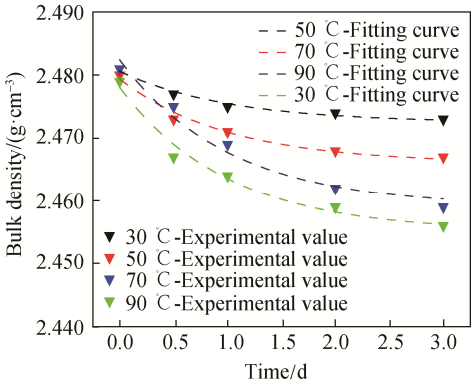


图 6　不同温度下 UHPC 体积密度

Fig. 6　Bulk density of UHPC at different temperatures

$$\begin{cases} n=0,\ \rho=2.467\ 93+0.016\ 76\mathrm{e}^{-t},\ R^2=0.902\ 69 \\ n=0.3,\ \rho=2.45\ 91+0.023\ 31\mathrm{e}^{-t},\ R^2=0.966\ 47 \\ n=0.5,\ \rho=2.45\ 91+0.023\ 31\mathrm{e}^{-t},\ R^2=0.966\ 47 \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} T=30\ ℃,\ \rho=2.472\ 46+0.008\ 16e^{-t},\ R^2=0.974\ 97 \\ T=50\ ℃,\ \rho=2.466\ 02+0.013\ 34e^{-t},\ R^2=0.977\ 26 \\ T=70\ ℃,\ \rho=2.459\ 1+0.023\ 31e^{-t},\ R^2=0.966\ 47 \\ T=90\ ℃,\ \rho=2.455\ 03+0.023\ 6e^{-t},\ R^2=0.975\ 02 \end{cases} \tag{4}$$

式中：n 为应力比；T 为温度；ρ为体积密度；t 为时间。

2.1.3 UHPC 的质量损失率 图 7 反映了荷载对 UHPC 质量损失率的影响。由图 7 可见，随着时间的增加，UHPC 的质量损失率近乎呈线性增长，引起质量损失的原因与 2.1.2 所述一样。相较于无荷载作用，低应力情况下(应力比小于 0.3)质量损失率的变化不大，而高应力情况下(应力比大于 0.3)质量损失率则变化的很快，这说明 UHPC 在低应力时裂纹略有扩展，但损伤程度较低，而随着荷载的增加，其内部快速形成更多的裂纹，损伤加剧。应力比为 0.3 和 0.5 时质量损失率的增加速率大约分别是无荷载作用的 1.1 倍和 2.3 倍，因此可通过质量损失率的上升速率来反应出混凝土的损伤程度。此外，第 3 d 时，质量损失率的增长并没有放缓的趋势，还需要较长的时间质量损失才能达到稳定。

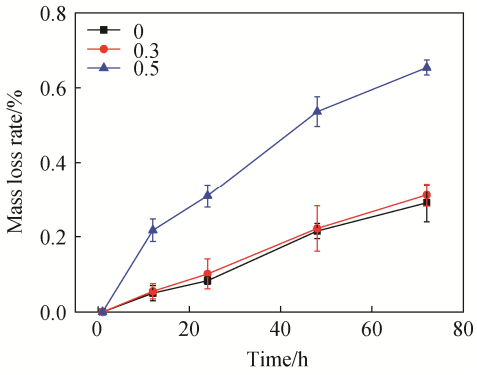


图 7 不同应力下 UHPC 的质量损失率

Fig. 7 Mass loss rate of UHPC at different stress

温度对 UHPC 质量损失率的影响如图 8 所示。随着时间的增加，UHPC 的质量损失率也逐渐增加。在早期($t \leqslant 24$ h)，不同温度下 UHPC 的质量损失率都近乎呈线性增长，温度越高，增加的速率也越快，90 ℃作用时 UHPC 质量损失率的增加速度是 30 ℃时的近 3 倍，这与温度越高导致混凝土内部水分流失的速度越快有关。同时可以发现，与荷载作用下质量损失率变化类似，随着时间的推移，其增长速度略有所变缓但并不明显，还需要较长的时间质量损失才能达到稳定。

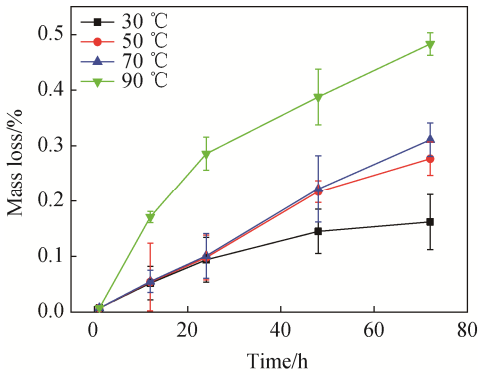


图 8 不同温度下 UHPC 的质量损失率

Fig. 8 Mass loss rate of UHPC at different temperatures

2.2 荷载–温度耦合作用下 UHPC 的热工性能

导热系数是评价混凝土热工性能的重要指标，也是研究混凝土温度场分布的主要参数，而温度场分析又是混凝土耐久性劣化过程和服役寿命预测的重要依据，因此探究不同因素作用对损伤 UHPC 导热系数的影响至关重要。

荷载对 UHPC 导热系数的影响如图 9 所示。由图 9 可见，随着荷载的增加，导热系数会逐渐下降。

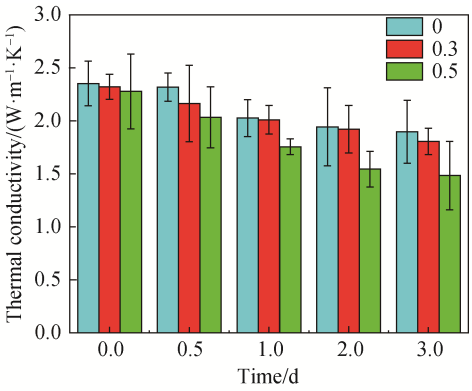


图 9 不同应力比下 UHPC 的导热系数

Fig. 9 Thermal conductivity of UHPC at different stress

这种差距在初期并不显著，相较于无荷载作用，应力比为 0.5 时 UHPC 的导热系数及降低了 3.2%。而随着时间的增加，导热系数都逐渐下降，下降的速率随着荷载的增加而增加。当 t=3 d 时，相较于无荷载作用，应力比为 0.3 和 0.5 时 UHPC 的导热系数分别下降了 4.8%和 21.8%。因此，荷载对 UHPC 的导热系数具有较大的影响。其原因在于：混凝土内部的水分随着时间的增加会逐渐流失，孔隙逐渐被空气所占据，而空气的导热系数又远远小于水的导热系数，因此导致导热系数下降，同时随着水分的减少，界面热阻的影响越发显著，也会致使导热

系数下降；而随着荷载的增加，在混凝土内部形成会更多的裂纹与孔隙，由于荷载水平较低，因此初期差距较小；混凝土的水分流失速率会随着荷载的增加而加快，因此荷载越大，导热系数下降的速率也会更快。

图 10 反映了温度对 UHPC 导热系数的影响。由图 10 可见，不同温度下的 UHPC 导热系数在初期几乎无区别，但随着时间的增加都逐渐的下降，且下降的速率随着温度的增加而加快，当 t=3 d 时，30、50、70 ℃以及 90 ℃作用下 UHPC 的导热系数相较于 0 d 时分别降低了 16.0%、18.0%、22.2%以及 28.7%。温度对 UHPC 导热系数也有着很大的影响。原因为温度越高，水分的流失速率也越快，换句话说，相同时间下，温度越高，混凝土的含水量越少，空气占据的空间越多，热量传递过程中受到界面热阻的影响越显著，导热系数下降的越快。

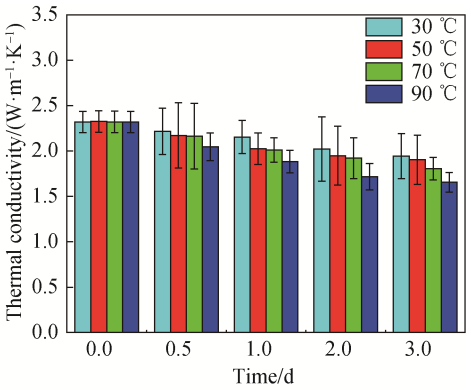


图 10　不同温度下 UHPC 的导热系数

Fig. 10　Thermal conductivity of UHPC at different temperatures

3　UHPC 导热系数的细观模型

在现有的混凝土导热系数模型中，主要是将混凝土看作由连续相水泥砂浆和分散相粗骨料组成的两相复合材料，再利用两相复合材料等效导热系数理论模型计算混凝土的等效导热系数。两相复合材料导热系数模型大体分为不考虑界面热阻的串并联模型、不考虑界面热阻的 Maxwell 模型及其推广模型以及考虑界面热阻的基于 Maxwell 模型的推广模型等[22]。

UHPC 在荷载－温度耦合作用下会导致内部水分的流失，降低饱和度，而饱和度是影响混凝土导热系数最主要的因素之一[23]。本研究将 UHPC 内部的孔隙 v_p 分为气相孔隙 v_a 和液相孔隙 v_w，假设气相孔隙和液相孔隙均匀的分布在混凝土中，在不考虑界面热阻的并联模型基础上，将 UHPC 看作由连续相固相、液相孔隙和气相孔隙组成的三相复合材料，得到的 UHPC 导热系数：

$$\lambda_e = v_s\lambda_s + v_a\lambda_a + v_w\lambda_w \tag{5}$$

式中：λ_e 为三相复合材料等效导热系数；λ_w 为液相孔隙导热系数，取λ_w=0.605 W/(m·K)；λ_s 为连续相固相的导热系数；λ_a 为气相孔隙导热系数，取λ_a=0.025 W/(m·K)；v_s 为连续相固相的体积分数；v_a 为气相孔隙的体积分数；v_w 为液相孔隙的体积分数。

为了利用式(5)进行 UHPC 导热系数的计算，必须知道 3 个量，即连续相固相的导热系数、孔隙率以及饱和度。由于无法制取不含孔隙的混凝土固相试件，因此导热系数λ_s不能通过试验测得。本研究主要是在较低应力比(≤ 0.5)和较低温度(≤ 100 ℃)条件下，因此作出如下 2 个假设：1) 假设荷载与温度的耦合作用仅影响了 UHPC 的饱和度，忽略对孔隙率的影响。以应力比为 0.3，温度 70 ℃作用下的 UHPC 为基准组，由蒸发水量法测得 UHPC 的孔隙率为 3.4%，测得饱和状态(t=0)和干燥状态下的导热系数分别为 2.321 W/(m·K)和 1.010 W/(m·K)，根据式(5)即可求得相应状态下连续相固相的导热系数：饱和状态下λ_s=2.381 W/(m·K)，干燥状态下λ_s=1.045 W/(m·K)；2) 近似假定混凝土固相的导热系数λ_s 值随饱和度线性增加，以考虑界面热阻的影响[22]。

3.1　荷载作用下 UHPC 的导热系数模型

基于以上的假设，可将式(5)转化为含饱和度的等效导热系数方程，如式(6)所示：

$$\begin{aligned}\lambda_e &= \lambda_s(1-P) + \lambda_a P(1-S_r) + \lambda_w P S_r \\ &= (1.336S_r + 1.045)(1-P) + \lambda_a P(1-S_r) + \lambda_w P S_r\end{aligned} \tag{6}$$

式中：S_r 为 UHPC 的饱和度，取 0~100；P 为 UHPC 的孔隙率，取 3.4%。

结合 UHPC 饱和状态质量和孔隙率，可将 2.1.3 节的质量损失率试验结果转变为饱和度随时间的变化关系，并对数据进行指数函数形式拟合，如图 11 所示。由图 11 可见，拟合方程的相关系数都达到了 0.85 以上，拟合结果较好。

以应力比为 0.3 作用下的 UHPC 为基准组，对应的拟合方程为基准方程。定义应力影响系数 $\eta_n = \dfrac{S_{r,t=2}}{S_{r,n=0.3,t=2}}$，其中，$S_{r,\ t=2}$ 为 t=2 时不同工况下 UHPC 饱和度拟合值，$S_{r,\ n=0.3,t=2}$ 为 t=2 时基准组的饱和度拟合值。对不同荷载下的应力影响系数进行多项式拟合[如式(7)所示]，相关系数达到 1，说明拟合效果很好，最终得到了引入应力影响系数的 UHPC 饱和度方程，如式(8)所示：

$$\eta_n = 1.01 + 0.787n - 2.733n^2, R^2 = 1 \tag{7}$$

$$S_{r,n}=\eta_n S_{r,n=0.3}=(1.01+0.787n-2.733n^2)\times(80.06+22.61\times e^{-t}) \quad (8)$$

将式(8)代入式(6)即可求得 UHPC 导热系数的理论值，如果方程计算出的饱和度大于 100，修改为 100。不同应力下 UHPC 导热系数理论值与实测值比较如图 12 所示。

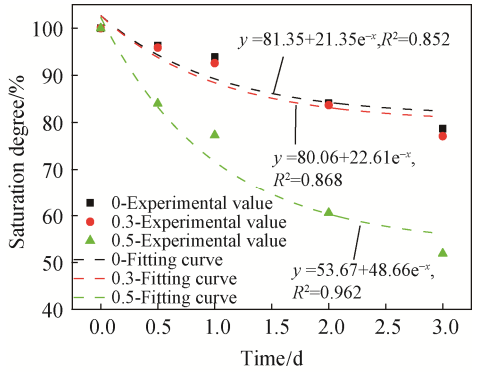


图 11 不同应力比下 UHPC 的饱和度

Fig. 11 Saturation degree of UHPC at different stress

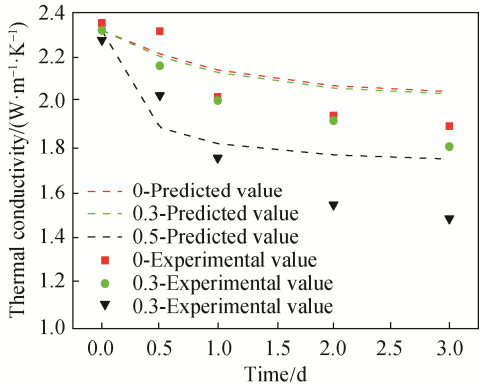


图 12 不同应力比下 UHPC 导热系数理论值与实测值比较

Fig. 12 Comparison of predicted values and experimental values of thermal conductivity of UHPC at different stress

由图 12 可见，通过模型计算得到的理论值要大于实测值，这与其他学者基于并联模型得到的结论一致[22–24]。在早期两者的差别并不大，相对误差仅在 0.1%~7%，而随着时间的增加，误差也越来越大，应力比为 0.5 时尤为显著，最大误差达到了 18%。造成这种现象的原因主要有两点：1) 在应力比大于 0.3 时，混凝土内部的裂纹会有所扩展，孔隙率增加，导热系数会降低。而本模型假定了 UHPC 的孔隙率不变，也就导致了模型的理论值偏高；2) 随着时间的增加，UHPC 的饱和度逐渐降低，在早期孔隙内部仍有大量水分，界面热阻的作用还不明显，此时理论值与实测值差别不大；而到后期，随着水分的减少，界面热阻的作用越发显著，导致实测值下降的较快。虽然本模型通过近似假定混凝土固相的导热系数 λ_s 值随饱和度线性增加以考虑界面热阻的影响，但事实上，该假设并没有很好地考虑界面热阻的阻碍作用，且越到后期假设越偏于保守，在导致理论值大于实测值的同时，也使两者的差距越来越大。

3.2 不同温度作用下 UHPC 的导热系数模型

结合 UHPC 饱和状态质量和孔隙率，可将 2.1.3 节的质量损失率试验结果转换为饱和度随时间的变化关系，并对数据进行指数函数形式拟合，如图 13 所示。由图 13 可见，拟合方程的相关系数都达到了 0.85 以上，拟合结果较好。

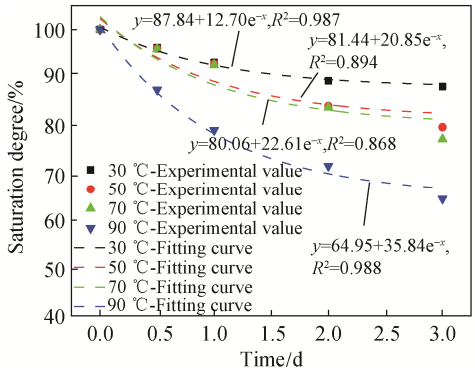


图 13 不同温度下 UHPC 的饱和度

Fig. 13 Saturation degree of UHPC at different temperatures

以温度为 70 ℃作用下的 UHPC 为基准组，对应的拟合方程为基准方程。定义温度影响系数 $\eta_T=\frac{S_{r,t=2}}{S_{r,T=70°C,t=2}}$，其中，$S_{r,\ t=2}$ 为 t=2 时不同工况下 UHPC 饱和度拟合值，$S_{r,\ T=70℃,t=2}$ 为 t=2 时基准组的饱和度拟合值。对不同温度下的温度影响系数进行多项式拟合[如式(9)所示]，相关系数达到 1，说明拟合效果很好，最终得到了引入温度影响系数的 UHPC 饱和度方程，如式(10)所示：

$$\eta_T=1.792-0.040T+6.81\times10^{-4}T^2-3.958\times10^{-6}T^3,R^2=1 \quad (9)$$

$$S_{r,T}=\eta_T S_{r,T=70℃}=(1.792-0.040T+6.81\times10^{-4}T^2-3.958\times10^{-6}T^3)\times(80.06+22.61\times e^{-t}) \quad (10)$$

将式(10)代入式(6)即可求得 UHPC 导热系数的理论值，如果方程计算出的饱和度大于 100，修改为 100。不同温度下 UHPC 导热系数理论值与实测值比较如图 14 所示。

由图 14 可见，模型计算得到的理论值要大于实测值，在早期两者的差别并不大，而随着时间的增加，误差也越来越大，这与荷载作用得到的规律一致。与荷载作用相比，除个别点外，理论值与实测值的相对误差都在 0~8%之间，最大误差也仅有 14.5%，说明模型更适应于温度作用的情况，原因在于温度(100 ℃以下)对混凝土的孔隙率很小，更符合孔隙率保持不变的假设。造成理论值大于实测值和随着时间增加两者差距越来越大的原因主要是随着时间的增加，UHPC 的饱和度逐渐降低，在早期孔隙内部仍有大量水分，界面热阻的作用还不明显，此时理论值与实测值差别不大；而到后期，随着水分的减少，界面热阻的作用越发显著，导致实测值下降的较快。虽然本模型通过近似假定混凝土固相的导热系数λ_s值随饱和度线性增加以考虑界面热阻的影响，但事实上，该假设并没有很好地考虑界面热阻的阻碍作用，且越到后期假设越偏于保守，在导致理论值大于实测值的同时，也使两者的差距越来越大。

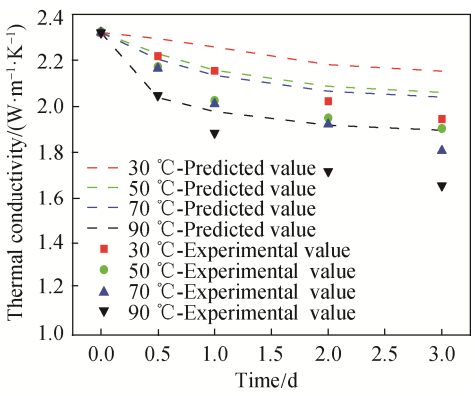


图 14　不同温度下 UHPC 导热系数理论值与实测值比较

Fig. 14　Comparison of predicted values and experimental values of thermal conductivity of UHPC at different temperatures

4　结　论

1) 荷载对 UHPC 的损伤有较大的影响，随着荷载的增加超声波速也逐渐降低，UHPC 损伤加剧。温度(100 ℃以内)对 UHPC 的损伤影响并不显著，整体上看，随着温度越高，UHPC 的超声波速稍有提高，说明混凝土内部的损伤略有改善。

2) 随着荷载和温度的增加，UHPC 的体积密度也随之降低，但下降的幅度很小，说明温度和荷载对 UHPC 体积密度的影响并不显著。质量损失率的试验结果也具有相似的规律。

3) 荷载和温度对 UHPC 的导热系数都有较大影响，随着两者的增加，导热系数都有明显的下降。

4) 在假定 UHPC 固相导热系数随着混凝土饱和度的增大而线性增大和忽略荷载及温度对 UHPC 孔隙率影响的基础上，建立荷载–温度耦合作用下 UHPC 导热系数细观模型，在早期模型计算结果与实测值较吻合，但后期两者的差距略大，因此针对荷载–温度耦合作用下 UHPC 的导热系数预测模型方面仍需要进一步的研究。

参考文献:

[1] 赵素晶. 超高性能水泥基复合材料的力学性能和微结构研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
ZHAO Sujing. Study on mechanical properties and microstructure of ultra-high performance cementitious composite(in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2016.

[2] 牛旭婧, 朋改非, 尚亚杰, 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, PENG Gaifei, SHANG Yajie, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(8): 1212–1222.

[3] 张云升, 张文华, 陈振宇. 综论超高性能混凝土: 设计制备·微观结构·力学与耐久性·工程应用[J]. 材料导报, 2018, 31(23): 1–16.
ZHANG Yunsheng, ZHANG Wenhua, CHEN Zhenyu. A Mater Rep(in Chinese), 2018, 31(23): 1–16.

[4] WU Y, WU B. Residual compressive strength and freeze–thaw resistance of ordinary concrete after high temperature[J]. Constr Build Mater, 2014, 54: 596–604.

[5] 俞秋佳. 受损结构混凝土的耐久性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
YU Qiujia. Study on durability of damaged structure concrete(in Chinese, dissertation). Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[6] ARIOZ O. Effects of elevated temperatures on properties of concrete[J]. Fire Saf J, 2007, 42(8): 516–522.

[7] 吴慧萍. 聚丙烯纤维高强混凝土高温后的抗压强度和微结构分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
WU Huiping. Research on compressive strength and microstructure of high strength concrete with polypropylene fiber subjected to high temperature(in Chinese, dissertation). Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.

[8] 陆文攀, 赵铁军, 马志鸣. 荷载损伤对混凝土毛细吸收作用影响[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(1): 50–54.
LU Wenpan, ZHAO Tiejun, MA Zhiming. Bull Chin Soc(in Chinese), 2015, 34(1): 50–54.

[9] CHOINSKA M, KHELIDJ A, CHATZIGEORGIOU G, et al. Effects and interactions of temperature and stress-level related damage on permeability of concrete[J]. Cem Concr Res, 2007, 37(1): 79–88.

[10] PIASTA W G, SAWICZ Z, PIASTA J. Sulfate durability of concretes under constant sustained load[J]. Cem Concr Res, 1989, 19(2): 216–227.

[11] LEE M G, CHIU C T, WANG Y C. The study of bond strength and bond durability of reactive powder concrete[J]. J ASTM Int, 2005, 2(7): 1–10.

[12] LEE M G, WANG Y C, CHIU C T. A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material[J]. Constr Build Mater, 2007, 21(1): 182–189.

[13] 安明喆, 杨新红, 王军民, 等. RPC 材料的耐久性研究[J]. 建筑技术, 2007, 38(5): 367–368.
AN Mingzhe, YANG Xinhong, WANG Junmin, et al. Architecture Technol(in Chinese), 2007, 38(5): 367–368.

[14] 李忠, 黄利东. 钢纤维活性粉末混凝土耐久性能的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2005, (3): 42–43.
LI Zhong, HUANG Lidong. Chin Concr Cem Prod(in Chinese), 2005, (3): 42–43.

[15] 叶青, 朱劲松, 马成畅, 等. 活性粉末混凝土的耐久性研究[J]. 新型建筑材料, 2006(6): 33–36.
YE Qing, ZHU Jinsong, MA Chengchang, et al. New Build Mater(in Chinese), 2006(6): 33–36.

[16] 苏建杰. 预加载活性粉末混凝土在硫酸盐作用下的耐久性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
SU Jianjie. The effect of sulfate on the durability of preloaded reactive powder concrete(in Chinese, dissertation). Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.

[17] PARANT E, PIERRE R, LE M F. Durability of a multiscale fibre reinforced cement composite in aggressive environment under service load[J]. Cem Concr Res, 2007, 37(7): 1106–1114.

[18] 王月. 氯盐冻融循环与侵蚀作用下活性粉末混凝土的耐久性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
WANG Yue. Study on the durability of reactive powder concrete under the action of chloride salt freeze-thaw cycle and erosion(in Chinese, dissertation). Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.

[19] CHARRON J P, DENARIÉ E, BRÜHWILER E. Permeability of ultra high performance fiber reinforced concretes (UHPFRC) under high stresses[J]. Mater Struct, 2007, 40(3): 269–277.

[20] CHARRON J P, DENARIÉ E, BRÜHWILER E. Transport properties of water and glycol in an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under high tensile deformation[J]. Cem Concr Res, 2008, 38(5): 689–698.

[21] 顾春平. 弯曲荷载作用下 UHPFRCC 的氯离子传输性能和服役寿命预测[D]. 南京: 东南大学, 2016.
GU Chunping. Chloride transport property and service life prediction of UHPFRCC under flexural load(in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2016.

[22] 张伟平, 童菲, 刑益善, 等. 混凝土导热系数的试验研究与预测模型[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(2): 183–189.
ZHANG Weiping, TONG Fei, XING Yishan, et al. J Build Mater(in Chinese), 2015, 18(2): 183–189.

[23] 肖建庄, 宋志文, 张枫, 等. 混凝土导热系数试验与分析[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(1): 17–21.
XIAO Jianzhuang. SONG Zhiwen, ZHANG Feng, et al. J Build Mater(in Chinese), 2010, 13(1): 17–21.

[24] 周顺鄂, 卢忠远, 严云, 等. 泡沫混凝土导热系数模型研究[J]. 材料导报, 2009, 23 (3): 69–74.
ZHOU Shun'e, LU Zhongyuan, YAN Yun, et al. Mater Rep(in Chinese), 2009, 23(3): 69–74.