文章编号:1008-1542(2026)01-0021-08

后续水化对掺矿渣粉高强混凝土性能的影响

李　斌[1,2],郭建业[1,2],张泽南[1,2],徐　硕[3],管忠正[3]

(1.中铁铁工城市建设有限公司,山东济宁　250000;
2.中国铁工投资建设集团有限公司,北京　101300;
3.道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室(石家庄铁道大学),河北石家庄　050043)

摘　要:针对长期在潮湿或水环境中服役的高强混凝土(high-strength concrete,HSC)可能发生的膨胀开裂问题,通过模拟后续水化试验,研究其对 HSC 性能的影响。首先,探讨了矿渣粉掺量对 HSC 物理力学性能和渗透性能的影响;其次,分析了后续水化对掺矿渣粉混凝土强度的影响机理;最后,阐述了加载度对预损伤混凝土强度的影响。结果表明:掺矿渣粉前后混凝土抗压强度和超声波声速值变化幅度均不明显,而电通量降低幅度随矿渣粉掺量增大先减小后增大;抗压强度降低幅度随加载度增大先增大后减小,劈裂抗拉强度增长幅度则呈增大趋势;后续水化产物不断填充预损伤混凝土初始裂缝,当其内部空间不足以容纳产物时,产物体积膨胀导致微裂缝生成,强度下降;后续水化后期,新生微裂缝为外界水分进入提供通道,新生产物填充其内部孔隙和缺陷,强度升高。研究给出了后续水化作用下矿渣粉和加载度对 HSC 性能的影响机制,为 HSC 的性能评价与设计提供了参考。

关键词:非金属建筑材料;高强混凝土;后续水化;矿渣粉;加载度;强度

中图分类号:TU528.31　　**文献标识码**:A　　**DOI**:10.7535/hbkd.2026yx01003

Influences of further hydration on properties of high-strength concrete with slag powder

LI Bin[1,2], GUO Jianye[1,2], ZHANG Zenan[1,2], XU Shuo[3], GUAN Zhongzheng[3]

(1. China Railway Engineering Urban Construction Company Limited, Jining, Shandong 250000, China;
2. China Railway Engineering Investment & Construction Group Company Limited, Beijing 101300, China;
3. Key Laboratory of the Ministry of Education for Road and Railway Engineering Safety Assurance (Shijiazhuang Tiedao University), Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: Aiming at the problems of expansion and cracking that may occur in high-strength concrete(HSC) serving in long-term humid or water environments, the influence of further hydration on HSC property was studied by simulation test. Firstly, the influence of slag powder content on the physical and mechanical properties and permeability of HSC was discussed. Secondly, the influence mechanism of further hydration on the strength of concrete with or without slag powder was analyzed.

收稿日期:2025-09-03;修回日期:2025-11-30;责任编辑:冯民
基金项目:国家自然科学基金(52308272)
第一作者简介:李斌(1989—),男,河南南阳人,高级工程师,主要从事混凝土施工技术方面的研究。
通信作者:徐硕,博士。E-mail:a15733179894@163.com

李斌,郭建业,张泽南,等.后续水化对掺矿渣粉高强混凝土性能的影响[J].河北科技大学学报,2026,47(1):21-28.
LI Bin,GUO Jianye,ZHANG Zenan,et al. Influences of further hydration on properties of high-strength concrete with slag powder[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology,2026,47(1):21-28.

Finally, the influence of loading degree on the strength of pre-damage concrete was expounded. The results show that the variation ranges of the compressive strength and ultrasonic sound velocity value for concretes with or without slag powder are both not obvious, while the decreased degree of the electric flux first decreases and then increases with an increase in the slag powder content. The decreased degree of compressive strength first increases and then decreases with an increase in loading degree and moreover, the increase in splitting tensile strength shows an increasing trend. The further hydration products continuously fill the initial cracks of pre-damage concrete. When the internal space of concrete is not sufficient to accommodate the products, the volume expansion of products leads to the formation of microcracks and a decrease in strength. However, during the late stage of further hydration, the new microcracks provide channels for the entry of extraneous water again, and the new products fill its internal pores and defects. This ultimately causes an increase in strength. The influence laws of slag powder and loading degree on the performance of HSC under further hydration effect are put forward, which provides some reference for the performance evaluation and design of HSC.

Keywords: nonmetallic building material; high-strength concrete; further hydration; slag powder; loading degree; strength

随着服役环境的多样化,现代混凝土朝着高强、高耐久的方向发展。通常认为,高强混凝土(high-strength concrete,HSC)是指强度等级大于C60的混凝土。HSC致密坚硬,抗渗性、抗冻性、耐蚀性好,是跨海桥梁和超高层建筑等重大工程的主要结构材料[1]。随着减水剂技术的快速发展,在满足工作性的前提下,HSC的水胶比可下降至0.24[2]。当水胶比≤0.42时,水泥水化不完全[3],导致大量未水化水泥存在于混凝土内部,当其接触到外界水分后会发生水化反应,即后续水化。在潮湿或水环境下,后续水化可能诱发混凝土材料膨胀开裂,这可为外界有害物质的侵入提供通道,加速混凝土材料性能的劣化。

目前关于后续水化作用机理的研究主要涉及到增强作用[4-6]、填充作用[7-10]和损伤作用[11-16],且现有研究多关注低水胶比混凝土基体或砂浆的后续水化问题。粗骨料和矿渣粉作为HSC的重要组分,可通过影响其内部未水化水泥颗粒数量以及水分在其内部的迁移难度直接影响后续水化反应的强弱。粗骨料在HSC中引入了大量界面过渡区,而界面过渡区具有孔隙率高、水胶比大等特点,这可为外界水分进入混凝土内部提供通道,改变水分在混凝土内的传输效率;而矿渣粉可通过替代水泥大幅减少水泥-矿渣粉二元复合材料中未水化水泥颗粒数量,同时矿渣粉在养护阶段的火山灰效应可加快水泥水化,导致水泥石中未水化水泥颗粒进一步减少,且矿渣粉的掺入也可改变养护阶段结束后水泥石的总孔隙率和孔隙连通性,直接影响后续水化过程中的水分迁移难度。而且,在外部荷载作用下,混凝土内部微裂纹进一步延伸和聚集,最终形成宏观裂缝,而裂缝扩展又直接影响到混凝土材料的后续水化历程,进而影响其长期服役性能。因此,在研究HSC的后续水化时,需考虑粗骨料、矿渣粉及其初始损伤状态的影响,但是目前尚缺乏关于HSC以及预损伤HSC的后续水化问题的系统认识。

本文针对长期潮湿或水环境中服役的HSC可能发生的膨胀开裂问题,通过模拟后续水化试验,研究后续水化作用下矿渣粉和加载度对其性能的影响,为HSC性能评价及设计提供理论参考。

1 试验方案

1.1 原材料

采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥,其比表面积和密度分别为339 m^2/kg和3.04 g/cm^3,熟料中C_3A质量分数为6.8%,掺入的混合材料中,石灰石的质量分数为3.6%,脱硫石膏质量分数为4.2%;采用S95级矿渣粉,其比表面积和密度分别为432 m^2/kg和2.87 g/cm^3;采用河砂,其细度模数为2.8(中砂),级配区为二区;采用5~10 mm和10~20 mm两级配碎石,其岩性为石灰岩;采用聚羧酸减水剂,减水率为38%,固含量为50%;采用石家庄地区的自来水。采用的混凝土配合比如表1所示,其中,在研究矿渣粉掺量对后续水化的影响机制时,设计的矿渣粉占胶凝材料的质量分数分别为0%、15%、30%和45%,其配合比代号分别为HSC2000、HSC2015、HSC2030、HSC2045;而在研究后续水化对预损伤混凝土性能的影响时,采用的混凝土配合比代号为HSC3021。

表 1　混凝土配合比

Tab.1　Concrete mix ratios

kg/m^3

代号	水泥	矿渣粉	河砂	碎石(5～10 mm)	碎石(10～20 mm)	水	减水剂	水胶比
HSC2000	690	0	572	319	743	130	17.00	0.2
HSC2015	586	104	572	319	743	130	17.00	0.2
HSC2030	483	207	572	319	743	130	17.00	0.2
HSC2045	380	310	572	319	743	130	17.00	0.2
HSC3021	322	88	693	452	678	128	7.48	0.3

注：表格中代号“HSC2030”代表水胶比 0.2、矿渣粉掺量 30%的 HSC，其他代号以此类推。

1.2　试件制备、养护和后续水化制度

在研究矿渣粉掺量对后续水化的影响机制时，试件成型后将其置于常温环境下 1 d，拆模后将其放入 75 ℃水中养护 3 d；将养护后的试件放入 35 ℃水浴箱中进行后续水化试验，当后续水化至 0、14、28 和 45 d 时，分别测定其抗压强度、超声波声速、电通量、化学结合水量、微观形貌和孔结构的变化。在研究后续水化对预损伤混凝土性能的影响时，试件成型后将其置于常温环境下 1 d，然后拆模并将其放进标准养护室(温度(20±2)℃，相对湿度 RH≥95%)养护至 28 d 龄期。首先对养护 28 d 后的试件进行抗压强度测定，明确其破坏荷载为 756 kN，然后再按照破坏荷载的 0%、25%和 75%对试件施加不同的预加载度(0%、25%和 75%)；将通过施加不同加载度得到的预损伤混凝土置于 30 ℃水中模拟后续水化，当后续水化至 0、7、14、28 和 45 d 时，分别测定其抗压强度、劈裂抗拉强度、化学结合水量和微观形貌的变化。

1.3　试验方法

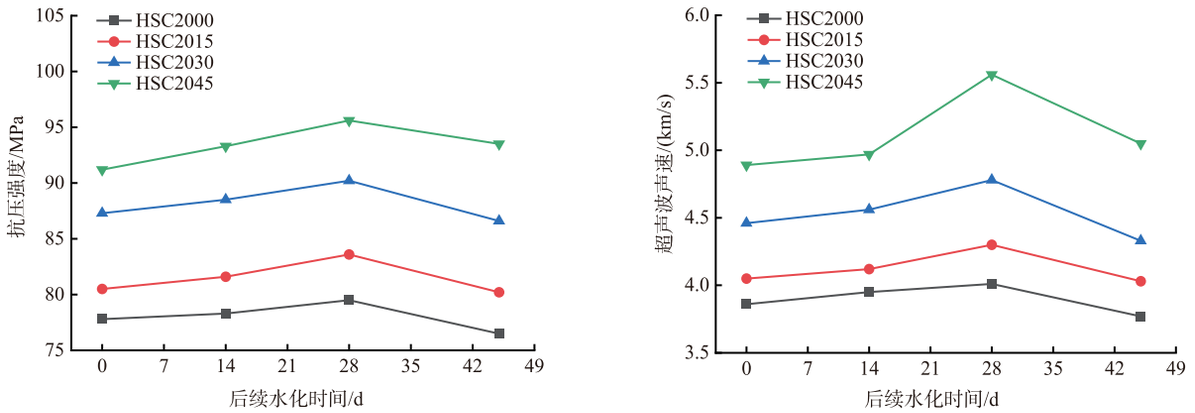
抗压强度和劈裂抗拉强度测定按照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》执行，试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm，每组 3 个试件，抗压强度测定时的加载速率为 9 kN/s，劈裂抗拉强度测定时的加载速率为 1 kN/s。采用 HC-U91 型混凝土超声波检测仪测定超声波声速值，试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm，每组 3 个试件，测试面取试件的 2 个端面，采用对侧法沿测试面的对角线等间距取 3 个点，测试结果取其平均值。电通量测定按照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》执行，每组 3 个试件。采用烧失量法测定结合水量，每组 3 个试样：首先将碎块样品研成粉末至能够全部通过 0.080 mm 孔径的筛，之后将粉末样品放置于干燥器中；测定时试样质量约为 2 g，将粉末样品放进高温炉中并升温到 105 ℃，在此温度下保持 3 h 以上(至恒重)，样品冷却后称取质量，样品称取质量后再将其放进高温炉中并升温到 950 ℃，在此温度下保持 3 h 以上(至恒重)，样品冷却后再次称取质量；结合水量计算方法按照文献[17]执行。采用 SU8010 型扫描电子显微镜观测试样微观形貌的变化，样品为 5 mm 左右薄片状颗粒，工作电压为 20 kV，测试前需要对样品进行喷金处理。采用 3H-2000PS1-RC 型比表面及孔径分析仪测定试样孔结构的变化，样品质量约为 3 g，测定前将试样置于 100 ℃的电热鼓风干燥箱中进行烘干处理。

2　试验结果与分析

2.1　矿渣粉掺量对后续水化的影响机制

2.1.1　矿渣粉掺量对物理力学性能的影响

矿渣粉掺量对物理力学性能的影响如图 1 所示。由图可知，不同矿渣粉掺量试件抗压强度和超声波声速值均随后续水化时间增长先增大后减小，并在后续水化 28 d 时达到最大值。后续水化 45 d 时，HSC2000、HSC2015、HSC2030 和 HSC2045 抗压强度值分别下降至 76.5、80.2、86.6 和 93.5MPa，其中 HSC2000、HSC2015 和 HSC2030 抗压强度值较后续水化前分别减小了约 1.7%、0.4%和 0.8%，而 HSC2045 抗压强度值则增大约 2.5%；四者超声波声速值分别下降至 3.8、4.0、4.3 和 5.0 km/s，其中 HSC2000、HSC2015 和 HSC2030 超声波声速值较后续水化前分别减小约 2.3%、0.5%和 2.9%，而 HSC2045 超声波声速值则增大约 3.3%。分析可知，后续水化过程中，不同矿渣粉掺量混凝土抗压强度和超声波声速值变化幅度均不明显。究其原因，养护阶段结束后试件内部结构非常致密，水分在试件中迁移难度较大，而且由于采用矿渣粉等量替代了水泥，后续水化反应物数量减少，造成后续水化反应减弱，生成的氢氧化钙不足，也抑制了矿渣粉的二次水化反应，导致抗压强度和超声波声速值变化幅度并不明显。



a）抗压强度 b）超声波声速值

图 1 矿渣粉掺量对物理力学性能的影响

Fig. 1 Influences of slag powder content on physical and mechanical properties

2.1.2 矿渣粉掺量对渗透性能的影响

矿渣粉掺量对电通量的影响如图 2 所示。由图可知，不同矿渣粉掺量试件电通量值随后续水化时间增长先减小后增大，并在后续水化 28 d 时达到最小值。后续水化 45 d 时，HSC2000、HSC2015、HSC2030 和 HSC2045 电通量值分别增大至 433、347、296 和 267 C，四者电通量降低幅度分别约为 14.4%、8.0%、1.0%和 6.3%。分析可知，在后续水化过程中，电通量降低幅度随矿渣粉掺量增大先减小后增大，并在矿渣粉掺量为 30%时达到最小值。究其原因，养护阶段结束后，在低矿渣粉掺量（0%～30%）范围内，试件初始致密性随矿渣粉掺量增大而增大，造成后续水化阶段水分在试件中的迁移难度增大，减弱了后续水化反应，导致电通量降低幅度减小；而当矿渣粉掺量超过 30%后，混凝土材料内部致密，当其内部空间逐渐不足以容纳 C-S-H 凝胶等产物时，产物体积膨胀致使内应力增大并生成微裂缝[18]，导致电通量降低幅度增大。

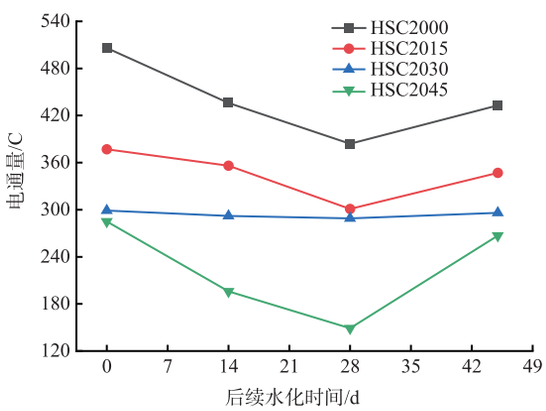


图 2 矿渣粉掺量对电通量的影响

Fig. 2 Influences of slag powder content on electric flux

2.1.3 后续水化对掺矿渣粉混凝土强度的影响机理

矿渣粉掺量对结合水量的影响如图 3 所示。由图可知，不同矿渣粉掺量试样结合水量均随后续水化时间增长呈增大趋势。后续水化 45 d 时，HSC2000、HSC2015、HSC2030 和 HSC2045 结合水量分别达到 14.8%、17.8%、19.6%和 23.5%，四者结合水量值较后续水化前分别增大约 8.9%、7.9%、8.3%和 13.0%。分析可知，后续水化过程中，结合水量增长率随矿渣粉掺量增大呈先减小后增大趋势，并在矿渣粉掺量为 15%时达到最小值。究其原因，养护阶段结束后，在矿渣粉掺量不高于 15%时，试件初始致密性随矿渣粉掺量增大而增大，造成后续水化阶段水分在试件中的迁移难度增大，减弱了后续水化反应，导致结合水量增长率降低；而当矿渣粉掺量超过 15%时，后续水化产物的生成导致试件内部膨胀开裂，而新生裂缝又为后续水化反应和矿渣粉的二次水化反应供应水分，促进了后续水化产物的生成，导致结合水量增长率增大。

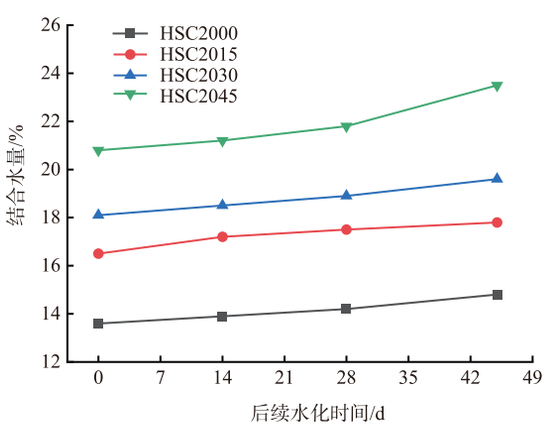
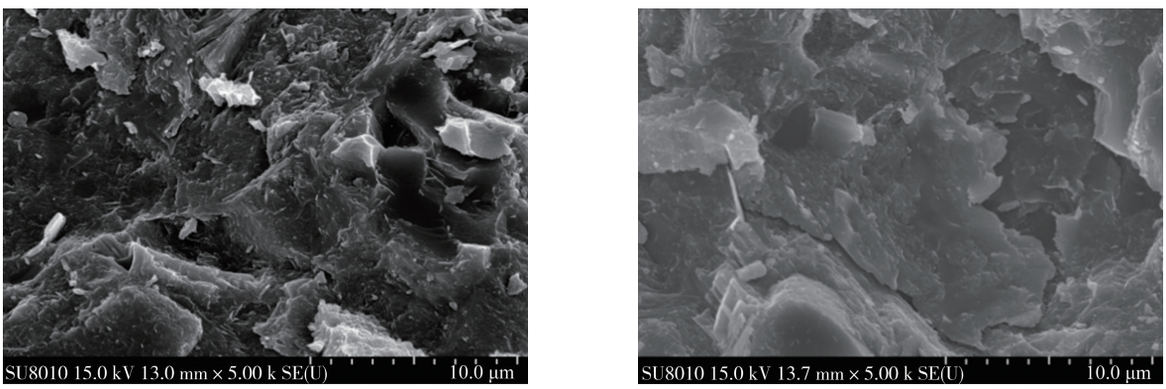


图 3 矿渣粉掺量对结合水量的影响

Fig. 3 Influences of slag powder content on bound water content

为了进一步分析后续水化对掺矿渣粉混凝土强

度的影响机理，以 HSC2045 为例，给出了其微观形貌及孔结构测定结果，如图 4、5 所示。后续水化前，HSC 微观形貌较疏松，最可几孔径为 14.1 nm；后续水化 45 d 时，结合水量增长率达到 13.0%，HSC 微观结构变得更为密实，最可几孔径减小至 10.7 nm，此时抗压强度提高约 2.5%。分析可知，后续水化可能表现为增强、填充和损伤作用，HSC 抗压强度的发展规律与后续水化的表现形式密切相关，当填充作用占主导时，孔结构细化，混凝土强度增大。



a）后续水化前　　b）后续水化45 d

图 4　后续水化对微观形貌的影响

Fig. 4　Influences of further hydration on microscopic appearance

2.2　后续水化对预损伤混凝土性能的影响

2.2.1　加载度对预损伤混凝土强度的影响

加载度对预损伤混凝土强度的影响如图 6 所示。由图 6 a)可知，不同预损伤混凝土抗压强度随后续水化时间增长呈先减小后增大趋势，且在后续水化 7 d 时达到最小值。后续水化 7 d 时，加载度为 0%、25% 和 75%的混凝土抗压强度分别降低至 71.1、61.5 和 64.4 MPa，相较于后续水化前，强度值分别降低约 6.0%、22.5%和 13.3%。分析可知，后续水化前期(0～7 d)，抗压强度降低幅度随加载度增大先增大后减小。究其原因，后续水化前期，当加载度较低(25%)时，外界荷载使混凝土内部结构更为致密，且后续水化前期，后续水化产物不断填充初始孔隙，但当混凝土内部空间不足以容纳后续水化产物时，产物体积膨胀导致其内部产生微裂缝，后续水化的损伤作用起主导作用，抗压强度降低幅度较大；但是当加载度过高(75%)时，混凝土致密程度小于低加载度混凝土，导致其抗压强度增长幅度反而减小。

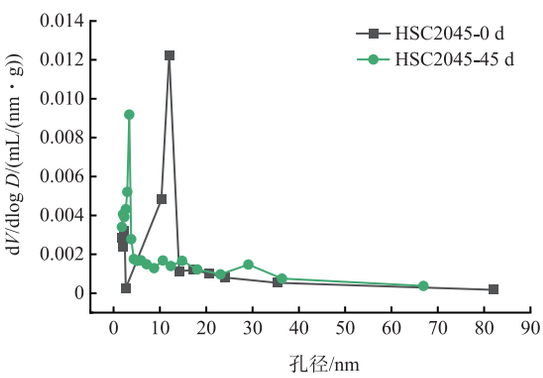
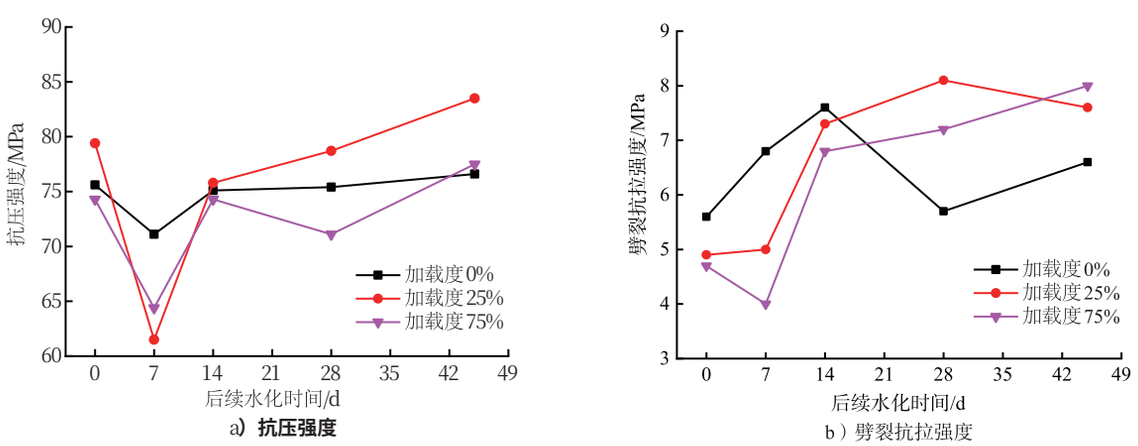


图 5　后续水化对孔结构的影响

Fig. 5　Influences of further hydration on pore structure



a) 抗压强度　　b）劈裂抗拉强度

图 6　加载度对预损伤混凝土强度的影响

Fig. 6　Influences of loading degree on strengths of pre-damage concrete

由图 6 b)可知,低加载度(0%和 25%)混凝土劈裂抗拉强度随后续水化时间增长呈增大和减小交替出现趋势,而高加载度(75%)混凝土劈裂抗拉强度则呈先减小后增大趋势。加载度 0%和 25%混凝土劈裂抗拉强度分别在后续水化 14 和 28 d 时达到最大值,其值分别为 7.6 和 8.1 MPa,相较后续水化前,强度值分别增大约 35.7%和 65.3%,而加载度 75%混凝土后续水化 45 d 时劈裂抗拉强度则增大约 70.2%。分析可知,后续水化过程中,加载度越大,劈裂抗拉强度达到最大值的时间越晚,强度增长率也越高。这是由高加载度对骨料与混凝土基体的界面黏结性能劣化较严重、后续水化对界面过渡区的填充修复时间较长所造成的。

2.2.2 后续水化对预损伤混凝土强度的影响机理

加载度对预损伤混凝土后续水化结合水量的影响如图 7 所示。由图可知,不同加载度的预损伤混凝土后续水化结合水量随后续水化时间增长均呈增大趋势。后续水化 7 d 时,加载度 0%、25%和 75%混凝土后续水化结合水量分别为 1.489%、1.194%和 1.249%;后续水化 45 d 时,三者后续水化结合水量分别为 5.627%、7.187%和 6.146%。分析可知,后续水化前期(0～7 d),后续水化结合水量随加载度增大先减小后增大,而后续水化后期(28～45 d),后续水化结合水量则随加载度增大先增大后减小。究其原因,后续水化前期,当加载度较低(25%)时,外界荷载的挤压使混凝土内部结构更为致密,水分迁移难度变大,导致后续水化结合水量最小;而当加载度较高(75%)时,外界荷载导致混凝土内部产生微裂缝,这些微裂缝为外界水分的进入提供了通道,后续水化反应变强,造成后续水化结合水量升高。后续水化后期,当加载度较低(25%)时,早期后续水化对混凝土产生的损伤较为严重,新生微裂缝为外界水分进入提供了更多通道,造成后期的后续水化结合水量较大;而当加载度较高(75%)时,早期后续水化对混凝土初始损伤起到填充修补作用,初始裂缝逐渐减少,水分迁移难度逐渐增大,后续水化反应减弱,导致后期的后续水化结合水量反而较小。

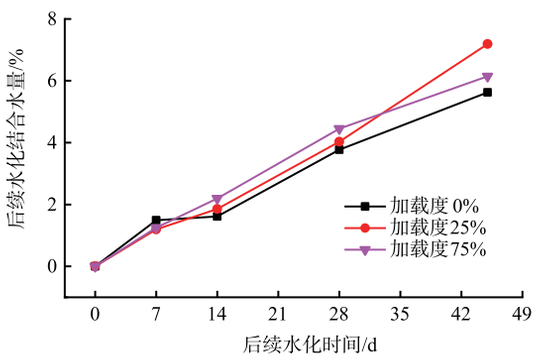
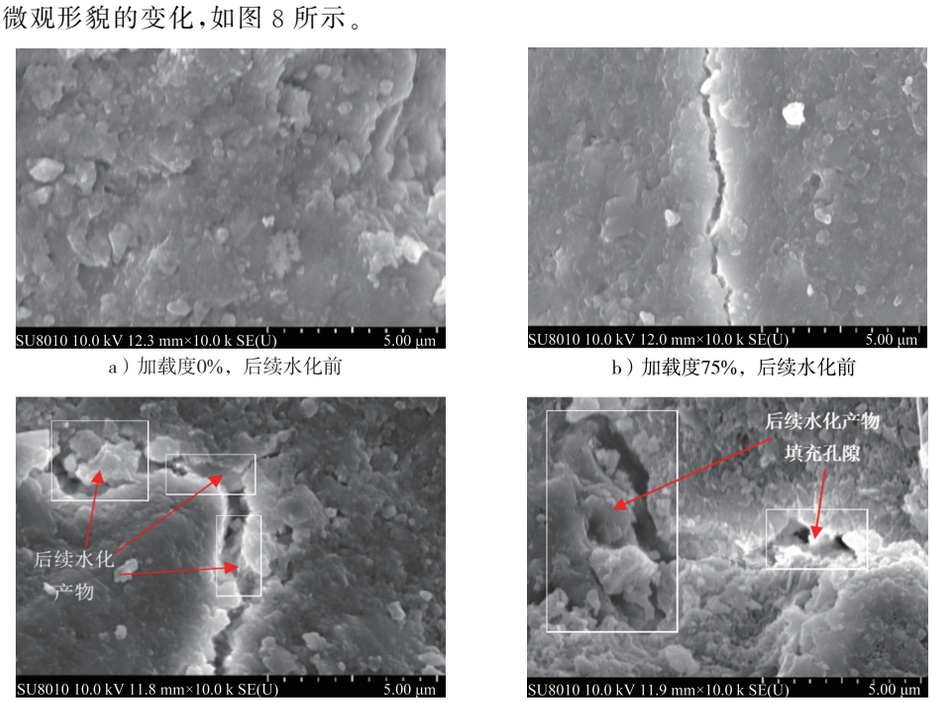


图 7 加载度对预损伤混凝土后续水化结合水量的影响

Fig. 7 Influences of loading degree on bound water contents of pre-damage concrete for further hydration

为了分析后续水化对预损伤混凝土抗压强度的影响机理,以加载度 75%为例,给出了后续水化过程中预损伤混凝土微观形貌的变化,如图 8 所示。



a) 加载度0%, 后续水化前　b) 加载度75%, 后续水化前

c) 加载度75%, 后续水化7 d　d) 加载度75%, 后续水化45 d

图 8 后续水化过程中加载度 75%混凝土微观形貌变化

Fig. 8 Variation in microscopic appearance of concrete with the loading degree of 75% during the further hydration process

后续水化前，加载度 0%混凝土微观结构致密（见图 8 a)），而施加 75%加载度后，混凝土内部出现了微裂缝（见图 8 b)），其长度和宽度分别约为 9 μm 和 233 nm；后续水化 7 d 时，后续水化结合水量增大至 1.249%，混凝土内部出现了明显的微裂缝（见图 8 c)），其长度和宽度分别高达 12 μm 和 581 nm，此时抗压强度较后续水化前降低约 13.3%；后续水化 45 d 时，后续水化结合水量继续增大至 6.146%，后续水化产物填充了混凝土内部孔隙和缺陷（见图 8 d)），此时抗压强度较后续水化前增大约 4.3%。综上所述，HSC 结构致密，外界荷载使其内部产生微裂缝；后续水化前期（0～7 d)，初始裂缝为外界水分的进入提供了通道，未水化水泥颗粒发生剧烈的后续水化反应，后续水化产物不断填充混凝土初始裂缝，当其内部空间不足以容纳后续水化产物时，产物体积膨胀导致内应力变大并生成微裂缝，强度下降；后续水化后期（28～45 d)，新生微裂缝又为外界水分进入提供了通道，新生产物不断填充混凝土内部孔隙和缺陷，强度升高。

3　结　语

通过模拟后续水化试验，考虑矿渣粉、初始损伤状态等的影响，研究了后续水化对 HSC 性能的影响，主要结论如下。

1）后续水化过程中，不同矿渣粉掺量的混凝土抗压强度和超声波声速值变化幅度均不明显，而电通量降低幅度随矿渣粉掺量增大先减小后增大，并在掺量为 30%时达到最小值。后续水化至 45 d 时，矿渣粉掺量为 45%的混凝土抗压强度增长幅度和超声波声速值增长幅度分别约为 2.5%和 3.3%，而矿渣粉掺量为 30%的混凝土电通量值降低幅度仅约为 1.0%。

2）后续水化过程中，结合水量增长率随矿渣粉掺量增大呈先减小后增大趋势，并在掺量 15%时达到最小值。HSC 的抗压强度发展规律与后续水化的表现形式密切相关，当填充作用占主导时，孔结构细化，混凝土强度增长幅度约为 2.5%。

3）后续水化前期（0～7 d)，预损伤混凝土抗压强度降低幅度随加载度增大先增大后减小；后续水化过程中，加载度越大，预损伤混凝土劈裂抗拉强度达到最大值的时间越晚，强度增长幅度也越高。

4）HSC 结构致密，外界荷载使其内部产生微裂缝，初始裂缝为外界水分的进入提供了通道，后续水化产物填充混凝土初始裂缝，当其内部空间不足以容纳后续水化产物时，产物体积膨胀导致内应力变大并生成微裂缝，强度下降；后续水化后期，新生微裂缝又为外界水分进入提供了通道，新生产物填充混凝土内部孔隙和缺陷，强度升高。

长期在潮湿或水环境中服役的 HSC 等低水胶比混凝土材料存在显著的后续水化现象，在进行低水胶比混凝土结构耐久性和可靠度评估时，不应忽视后续水化的影响。本文得到了后续水化作用下矿渣粉和加载度对 HSC 性能的影响规律，可为低水胶比混凝土材料的性能评价与设计提供参考。

本文仅考虑了掺加矿渣粉的情况，且关注的后续水化时间相对较短。综合考虑复杂胶凝材料体系，研究 HSC 等低水胶比混凝土材料的长期水稳定性和微结构演化规律，是未来的研究方向。

参考文献/References：

[1] 祖坤，熊二刚，宋良英，等. 高强混凝土构件力学性能研究综述[J]. 硅酸盐通报，2019，38(10)：3178-3192.
ZU Kun，XIONG Ergang，SONG Liangying，et al. Review on mechanical properties of high-strength concrete members[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society，2019，38(10)：3178-3192.

[2] 宋少民，郭宇轩. 基于大掺量复合掺合料的高强混凝土性能研究[J]. 混凝土，2024(10)：111-115.
SONG Shaomin，GUO Yuxuan. Study on properties of high-strength concrete based on large dosage of compound mineral admixtures[J]. Concrete，2024(10)：111-115.

[3] JENSEN O M，HANSEN P F. Water-entrained cement-based materials(Ⅰ)：Principles and theoretical background[J]. Cement and Concrete Research，2001，31(4)：647-654.

[4] 安明喆，刘亚州，张戈，等. 再水化作用对超高性能混凝土基体显微结构和水稳定性的影响[J]. 硅酸盐学报，2020，48(11)：1722-1731.
AN Mingzhe，LIU Yazhou，ZHANG Ge，et al. Influence of rehydration effect on microstructure and water stability of ultra-high performance concrete matrix[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society，2020，48(11)：1722-1731.

[5] LIU Yazhou，TANG Zhouyang，TIAN Hu，et al. Influence of further hydration on UHPC matrix properties[J]. Materials Letters，2024. DOI：10.1016/j.matlet.2024.137489.

[6] TANG Zhouyang，LIU Yazhou，KONG Lijuan，et al. Influence mechanism of further hydration on the compressive strength of ultra-high

performance concrete with coarse aggregates[J]. Construction and Building Materials,2024. DOI:10. 1016/j. conbuildmat. 2024. 138063.

[7] HUANG Haoliang,YE Guang,PEL L. New insights into autogenous self-healing in cement paste based on nuclear magnetic resonance (NMR) tests[J]. Materials and Structures,2016,49(7):2509-2524.

[8] HUANG Haoliang,YE Guang,DAMIDOT D. Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste[J]. Cement and Concrete Research,2013,52:71-81.

[9] LI Liangshun,WANG Yue,YU Peiyao,et al. Characterization of self-healing in cement-based materials with a low water-to-cement ratio during subsequent hydration[J]. Journal of Building Engineering,2024. DOI:10. 1016/j. jobe. 2024. 109553.

[10] YANG Zaixin,MIAO Chengxiang,DENG Wenqin,et al. Multi-scale characterization of SAP impact on self-healing behavior in UHPC under varied crack widths and environments[J]. Construction and Building Materials,2024. DOI:10. 1016/j. conbuildmat. 2024. 135649.

[11] WANG Yue,AN Mingzhe,YU Ziruo,et al. Impacts of various factors on the rehydration of cement-based materials with a low water-binder ratio using mathematical models[J]. Construction and Building Materials,2016,125:160-167.

[12] LIU Yazhou,AN Mingzhe,WANG Yue,et al. Rehydration model for ultrahigh-performance concrete matrix[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2021. DOI:10. 1061/(ASCE)MT. 1943-5533. 0003524.

[13] WANG Yue,AN Mingzhe,LU Jing,et al. Effect of rehydration on the performance of mechanically loaded UHPC[J]. Frontiers in Materials,2022. DOI:10. 3389/fmats. 2022. 836201.

[14] AN Mingzhe,LIU Yazhou,ZHANG Ge,et al. Properties of cement-based materials with low water-binder ratios and evaluation mechanism under further hydration effect[J]. Applied Sciences,2023. DOI:10. 3390/app13179946.

[15] 刘亚州,魏策策,王磊,等. 水分迁移对水泥基材料后续水化与微结构的影响[J]. 建筑材料学报,2024,27(11):1033-1038.
LIU Yazhou,WEI Cece,WANG Lei,et al. Influence of moisture migration on further hydration and microstructure of cement-based materials[J]. Journal of Building Materials,2024,27(11):1033-1038.

[16] LIU Yazhou,AN Mingzhe,ZHANG Ge,et al. Expansion strain model and damage risk control for cement-based materials with low water-binder ratios under rehydration[J]. Construction and Building Materials,2021. DOI:10. 1016/j. conbuildmat. 2021. 122996.

[17] AN Mingzhe,WANG Yue,YU Ziruo. Damage mechanisms of ultra-high-performance concrete under freeze-thaw cycling in salt solution considering the effect of rehydration[J]. Construction and Building Materials,2019,198:546-552.

[18] 刘亚州. 后续水化作用下低水胶比水泥基材料的长期性能与微结构演化规律研究[D]. 北京:北京交通大学,2021.
LIU Yazhou. Research on the Evolution Rules of Long-Term Performance and Microstructure of Cement-Based Materials with Low Water-Binder Ratios under Further Hydration Effect[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2021.