

文章编号:1007-9629(2022)11-1128-08

硫酸盐干湿循环下再生复合微粉 混凝土的劣化机理

刘 超^{1,2,*}, 姚羿舟¹, 刘化威¹, 胡天峰¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 西安建筑科技大学 理学院, 陕西 西安 710055)

摘要:将再生砖粉和再生混凝土粉混合组成再生复合微粉,取代部分水泥制备再生复合微粉混凝土,对其进行干湿循环下硫酸盐侵蚀试验和微观结构表征,并基于其微观结构演化过程建立了 SO_4^{2-} 侵蚀模型,揭示了硫酸盐侵蚀下再生复合微粉混凝土的劣化机理.结果表明:再生复合微粉混凝土的抗压强度损失率随着干湿循环次数的增加先降低后升高,且随着再生复合微粉取代率的增加,其变化幅度增大;低取代率的再生复合微粉较好地发挥了填充效应和成核作用,促进水泥水化,但其多孔性的初始缺陷提供了大量侵蚀通道,并造成孔隙内部压力分布不均,导致再生复合微粉混凝土的耐久性性能加速劣化.

关键词:再生复合微粉混凝土;硫酸盐侵蚀;干湿循环;微观结构

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.11.004

Deterioration Mechanism of Recycled Composite Powder Concrete under Dry-Wet Cycles of Sulfate

LIU Chao^{1,2,*}, YAO Yizhou¹, LIU Huawei¹, HU Tianfeng¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Recycled composite powder concrete was prepared by mixing recycled brick powder and recycled concrete powder to replace part of the cement. Sulfate attack tests and microstructure characterization under dry-wet cycles were carried out to analyze the pore structure parameters and the evolution process of interfacial transition zone. Based on its microstructure evolution process, SO_4^{2-} attack model was established, which revealed the deterioration mechanism of recycled composite powder concrete under sulfate attack. The results show that compressive strength loss rate of the recycled composite powder concrete decreases and then increases with the increase of the number of dry-wet cycles, and the change is greater with the increase of the replacement rate of recycled composite powder. The recycled composite powder with low replacement rate has played a better role in filling effect and nucleation to promote cement hydration, but the initial defect of high porosity provides a large number of attack channels, which is the main reason for the accelerated deterioration of the durability performance of recycled composite powder concrete.

Key words: recycled composite powder concrete; sulfate attack; dry-wet cycle; microstructure

收稿日期:2022-04-26; 修订日期:2022-06-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878546,52178251);陕西省杰出青年科学基金资助项目(2020JC-46);陕西省创新人才推进计划项目(2018KJXX-056);陕西省重点研发计划项目(2018ZDCXL-SF-03-03-02);陕西省科技创新基地项目(2017KTPT-19)

第一作者(通讯作者):刘 超(1982—),男,河北张家口人,西安建筑科技大学教授,博士生导师,博士.E-mail:chaoliu@xauat.edu.cn

废弃黏土砖和混凝土占建筑垃圾总量的 80% 以上^[1],其在破碎、筛选和分离时会产生粒径小于 0.16 mm 的再生微粉.将再生微粉作为辅助胶凝材料替代水泥,既可实现建筑垃圾全资源化,又可降低碳排放^[2].再生微粉的细度和取代率是研究再生微粉混凝土的重要变量^[3-5],高细度再生微粉会降低混凝土的工作性能,但也起到密实基体、促进水化的作用^[3-4].当再生微粉的取代率小于 15% 时,混凝土具有更高的强度和更低的渗透性,但随着取代率的继续增大,混凝土强度降低且渗透性增高^[6-7].盐碱地的混凝土结构会遭受严重的硫酸盐侵蚀,产生较大的危害性^[8].Xie 等^[9]发现对于再生骨料混凝土,内部氢氧化钙的含量决定了其抵抗硫酸盐侵蚀能力的强弱,同时多孔老砂浆区域硫酸盐溶液的扩散速率更快.再生微粉活性及其对混凝土力学性能的影响等研究备受关注^[10],而对其耐久性能的研究鲜有报道.

本文通过开展再生复合微粉混凝土(RPC)的硫酸盐侵蚀试验,探究了不同干湿循环次数下 RPC 力学性能的变化规律;通过压汞试验(MIP)、X 射线衍

射分析仪(XRD)和扫描电子显微镜(SEM),表征了 RPC 微观结构的演化过程,并基于此建立了 SO_4^{2-} 侵蚀模型,揭示了硫酸盐侵蚀下 RPC 的劣化机理,为再生微粉混凝土的应用推广提供理论支撑.

1 试验

1.1 原材料

陕西省冀东水泥厂生产的盾石牌 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥(C);粗骨料(CA)为粒径 5~20 mm 的连续级配碎石;细骨料(FA)为细度模数 2.62 的普通中砂;陕西建新环保科技有限公司生产的再生黏土砖和再生混凝土粗骨料,经颚式破碎机破碎成粒径为 0.16~4.75 mm 的再生细骨料,用球磨机根据不同时间段研磨成粒径 0.16 mm 以下的再生砖粉(BP)和再生混凝土粉(CP),并以不同质量比混合组成再生复合微粉(RP);外加剂为聚羧酸液体高效减水剂(HPWR)和高性能引气剂(AE).再生砖粉、再生混凝土粉和水泥的化学组成¹⁾及物理性能见表 1.

表 1 再生砖粉、再生混凝土粉和水泥的化学组成及物理性能
Table 1 Chemical compositions and physical properties of recycled brick powder, recycled concrete powder and cement

Material	Chemical composition (by mass)/%							Specific surface area/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	Water demand ratio (by mass)/%	Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	SO_3	MgO			
BP	63.47	17.51	8.26	1.84	2.85	0.13	1.19	424	104	2 620
CP	30.20	7.81	3.05	42.66	1.43	0.45	2.14	457	103	2 560
C	20.42	4.16	2.83	60.74	0.46	2.75	1.60	343	35	3 150

1.2 配合比

再生复合微粉中再生砖粉和再生混凝土粉的质量比 $m_{\text{BP}}:m_{\text{CP}}$ 为 8:2、6:4,并分别记为 I、II,以其制备的 RPC 分别记为 RPC-I、RPC-II;再生复合微粉的取代率 w 为 0%(对照组纯水泥混凝土 NAC)、15%、30%.再生复合微粉混凝土试件尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,其配合比见表 2.

1.3 试验方法

1.3.1 硫酸盐溶液干湿循环

根据 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》,试件在养护至 28 d 龄期的前 2 d 从标准养护室取出,擦干表面水分,烘干冷却.采用室温自然浸泡和电热鼓风干燥箱来模拟干湿循环过程:将试件置于装有质量分数为 5% Na_2SO_4

表 2 再生复合微粉混凝土的配合比
Table 2 Mix proportions of RPC

Specimen	Mix proportion/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)								Slump/mm
	C	BP	CP	FA	CA	W	HPWR	AE	
NAC	370.000	0	0	610.000	1 140.000	178.000	1.443	0.148	95
RPC-15%-I	314.500	44.400	11.100	610.000	1 140.000	178.000	1.998	0.148	99
RPC-15%-II	314.500	33.300	22.200	610.000	1 140.000	178.000	1.702	0.148	92
RPC-30%-I	259.000	88.800	22.200	610.000	1 140.000	178.000	2.146	0.148	92
RPC-30%-II	259.000	66.600	44.400	610.000	1 140.000	178.000	2.497	0.148	95

1) 文中涉及的组成、掺量、比值等除特殊说明外均为质量分数或质量比.

溶液的试件盒中浸泡16 h(浸泡过程中保持溶液质量分数不变);取出试件并擦干其表面水分,冷却2 h;将试件放入80℃的电热鼓风干燥箱干燥6 h,此为1个循环.每隔15次循环进行1次抗压强度测试,当循环次数 $n=90$ 时,结束试验.每组3个试件,结果取平均值.

1.3.2 力学性能

根据GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》,采用WAW-1000型电液伺服万能试验机测试干湿循环前后混凝土的抗压强度,并计算其抗压强度损失率.

1.3.3 微观结构

对于干湿循环前后NAC和RPC试件进行干燥养护,表面喷金镀膜处理后采用Quanta600 FEG型场发射环境扫描电子显微镜(SEM),分析其侵蚀产物和微观结构形貌.采用Autopore IV 9500压汞仪对于干湿循环前后NAC和RPC试件进行压汞测试,表征其孔隙率(体积分数)、孔径 d 等孔结构特征参数,最大和最小压力分别为400.0 MPa、1.4 kPa.将干湿循环前后NAC和RPC试件破碎后,用乙醇终止其水化,并在40℃下干燥48 h,研磨成粉末试样,采用D/MAX2200X射线衍射分析仪(XRD)表征其产物组成,扫描范围为 $10^{\circ}\sim 70^{\circ}$.

2 结果与讨论

2.1 抗压强度

硫酸盐干湿循环下NAC和RPC抗压强度的损失率见图1.由图1可见:NAC和RPC抗压强度损失率均呈先降低后持续升高的趋势;干湿循环前期,各

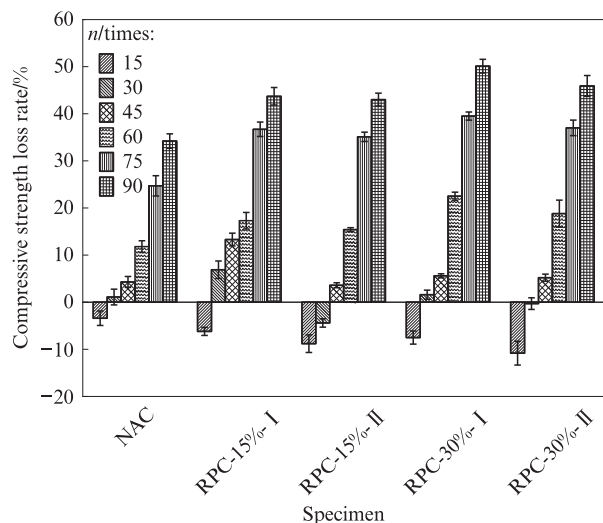


图1 硫酸盐干湿循环下NAC和RPC抗压强度的损失率

Fig. 1 Compressive strength loss rate of NAC and RPC under dry-wet cycle of sulfate

组RPC抗压强度损失率较为接近;当 $n=15$ 时,RPC的抗压强度增大,且RPC-30%-II的抗压强度最高,比其干湿循环前增大了10.8%,这是因为再生复合微粉的多孔性增加了硫酸盐的原始侵蚀通道并具有更大的结晶空间,膨胀性侵蚀产物钙矾石(Aft)可以更快地在原始孔隙中生成并聚集,提高了混凝土内部密实度,进而提高了抗压强度;随着干湿循环的继续进行,各组试件抗压强度损失率均增大;RPC-II的抗压强度损失率相对较小,RPC-I抗压强度损失率较大,并在干湿循环中后期出现较大波动,说明当 $m_{BP}:m_{CP}=6:4$ 时,RPC具有更好的抗硫酸盐侵蚀能力.这是因为再生混凝土粉含有的水化产物可以补充 Ca^{2+} ,同时作为成核点促进水泥水化^[3].当 $n<60$ 时,RPC-15%-I的抗压强度大于NAC,且其余RPC的抗压强度与NAC相差不大.这是因为随着龄期的增加,再生微粉开始发挥火山灰活性,消耗氢氧化钙(CH),生成密实的水化硅酸钙凝胶(C-S-H),CH的减少和C-S-H的增加减缓了硫酸盐的侵蚀,使RPC抗压强度提高.当 $n=90$ 时,RPC-30%-I的抗压强度损失率为50.1%,高于RPC-15%-I的43.7%,这说明随着RP取代率的增大,RPC的抗压强度损失更加严重.这是因为RP取代率增加造成水泥胶凝材料减少,胶凝体系的水化进程受到影响,水化产物C-S-H凝胶大幅减少^[11],同时因 SO_4^{2-} 侵蚀造成CH含量不断减少,孔隙溶液pH值降低,为维持平衡,C-S-H凝胶会发生脱钙现象^[12].随着干湿循环周期的增加,Aft的膨胀应力和硫酸钠盐的结晶应力造成混凝土表面的砂浆逐渐脱落,内部微裂缝增多且连通,基体内部的CH和铝相不断被 SO_4^{2-} 消耗,抑制了RP的火山灰活性,而裂缝的生成和开展又反过来加速了 SO_4^{2-} 的侵蚀,造成混凝土内部形成侵蚀-损伤劣化.下文研究中,干湿循环后均指干湿循环次数 $n=90$.

2.2 孔隙结构演化过程

2.2.1 孔隙率和孔径分布

NAC、RPC的孔隙率和孔径分布见图2.由图2可见:随着RP取代率的增加,RPC的孔隙率整体上呈增大趋势;RPC-15%-II、RPC-30%-II的孔隙率分别比NAC高1.43%、11.10%.这是由于RP的多孔性,且高取代率的RP会造成混凝土水化产物量减少,使得RPC-30%-II孔隙率增长幅度较大,内部孔隙率增高.干湿循环90次后,NAC、RPC-15%-II、RPC-30%-II孔隙率分别增加了4.67%、10.76%、12.54%,RPC-30%-II孔隙率增幅最大.这是因为随着RP取代率的增加,多孔RP提高了 SO_4^{2-} 的渗透速率,且RP

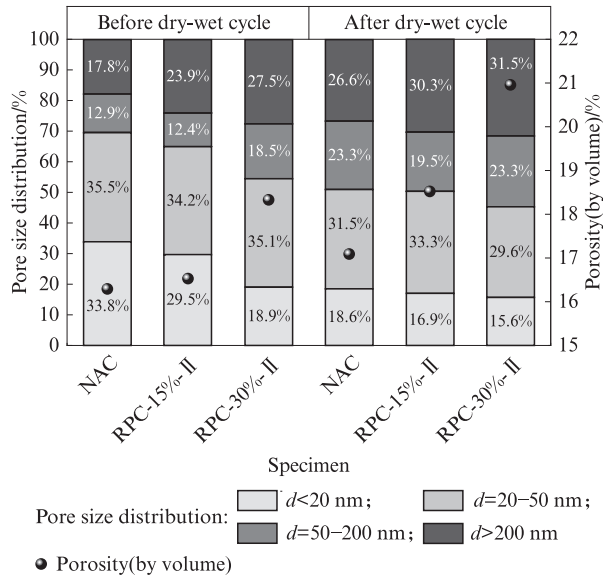


图 2 NAC、RPC 的孔隙率和孔径分布
Fig. 2 Porosity and pore size distribution of NAC and RPC

自身抵抗硫酸盐侵蚀的能力较弱,从而加速了RPC孔隙结构的劣化^[13].

依据孔级配理论^[14],将混凝土内部孔隙分为无害孔($d < 20$ nm)、少害孔($d = 20 \sim 50$ nm)、有害孔($d = 50 \sim 200$ nm)、多害孔($d > 200$ nm)4个级别,其中有害孔和多害孔的体积分布对于RPC的抗硫酸侵蚀能力有直接影响.通过对不同孔累积注汞量的计

算,得到各级别孔的占比.干湿循环前各组混凝土主要是无害孔和多害孔占比的区别,NAC组无害孔占比最大,RPC-15%-II、RPC-30%-II多害孔占比比NAC分别增加了6.1%、9.7%.这表明虽然RP在一定程度上促进了水泥的水化,但从混凝土基体来看,RP的多孔性以及较低的水化程度造成混凝土内部孔径增大^[3].干湿循环后,因为Aft不断在毛细孔内部聚集,孔隙被挤压开裂造成孔径增大,使得无害孔和少害孔不断向有害孔和多害孔转化,RPC渗透性增强,进一步加快 SO_4^{2-} 的渗透扩散速率,造成RPC基体结构劣化.

2.2.2 特征孔隙尺寸

NAC和RPC的压汞孔隙分布见图3.由图3可见:干湿循环前,各组试件孔隙分布主要集中在 $10^1 \sim 10^2$ nm,且分布峰强度随着RP取代率的增加未呈现规律性变化,RP取代率为0%、15%、30%的混凝土试件分布峰强度分别为0.045、0.050和0.041 mL/g.干湿循环后,除 $10^1 \sim 10^2$ nm的孔隙分布峰,NAC在 $10^3 \sim 10^4$ nm、RPC在 $10^4 \sim 10^5$ nm出现了第2分布峰,且分布峰强度随着RP取代率的增加而增强.孔隙分布峰的增多和分布峰强度的增大表明硫酸盐侵蚀造成混凝土基体孔隙率增加和大毛细孔数量急剧增多,这与前文孔隙率试验结果一致.

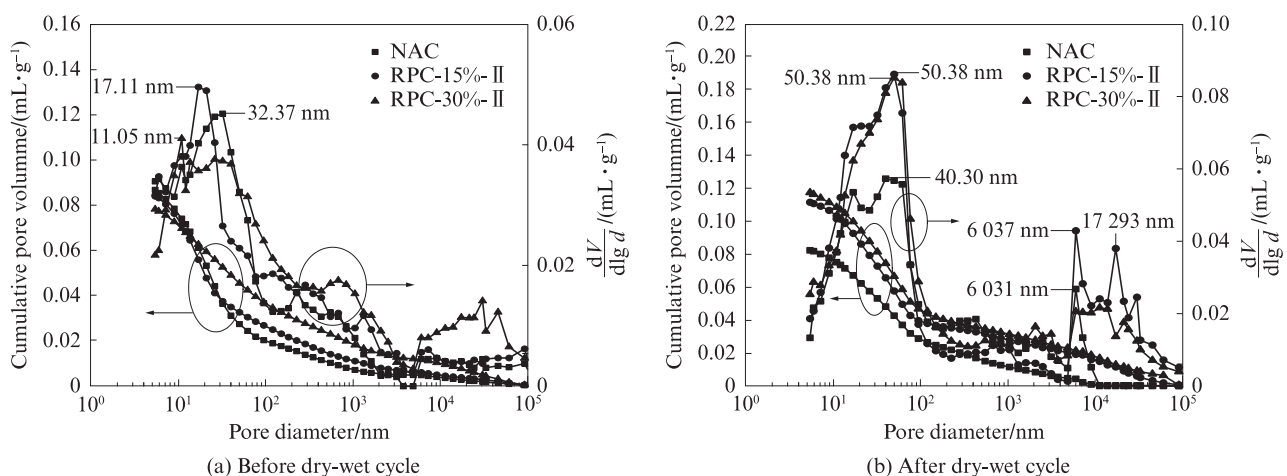


图 3 NAC和RPC的压汞孔隙分布
Fig. 3 Mercury intrusion pore distribution of NAC and RPC

临界孔径的大小对多孔材料的渗透性、离子扩散和物质传输具有重要影响^[15].干湿循环前,NAC、RPC-15%-II、RPC-30%-II的临界孔径分别为32.37、17.11、11.05 nm,这表明RP的填充效应和成核作用使C-S-H凝胶更加致密,连通孔径更小^[6].干湿循环后,NAC、RPC-15%-II、RPC-30%-II的

临界孔径分别为40.30、50.38、50.38 nm,RPC临界孔径大幅度的增长表明在硫酸盐侵蚀下RPC的孔隙结构劣化比NAC更严重.这可能是因为多孔RP提供了大量原始侵蚀通道, SO_4^{2-} 加速在孔隙中聚集,侵蚀产物的生成导致孔隙开裂和连通,孔隙结构的曲折度降低,连通性增加,导致RPC的孔隙结

构劣化。

2.3 侵蚀产物

NAC和RAC的XRD图谱见图4。由图4可见:干湿循环前,NAC和RAC的主要物相均为CH、C-S-H、石英、AFt、方解石、珍珠云母;与NAC相比,RPC的CH特征衍射峰强度减弱,这是因为水泥含量的减少导致水化产物减少;RPC-II的 CaCO_3 衍射峰增强,这是因为混凝土粉引入了较多的 Ca^{2+} ,其可以作为成核点促进水泥水化,从而可使混凝土强度提高;干湿循环后,各试样在 $2\theta=20.9^\circ$ 出现了石膏衍射峰,但衍射峰强度较低,AFt衍射峰数量增多,CH衍射峰基本消失。这是因为随着干湿循环的进行,CH

在硫酸盐侵蚀和RP火山灰活性的双重作用下不断反应生成AFt和C-S-H凝胶。CH含量的降低造成混凝土基体内部pH值的降低,引起C-S-H凝胶出现脱钙现象,大量析出 Ca^{2+} ,与 SO_4^{2-} 反应结合生成更多溶解度较低的石膏^[12],石膏再与混凝土中的铝相反应生成AFt。RPC-30%-I的AFt和石膏衍射峰强度远高于其他试样,这说明高取代率的RPC内部水化产物不足,增加了 SO_4^{2-} 渗透的原始通道,加剧了硫酸盐侵蚀,混凝土基体受到快速劣化损伤。RPC-15%-II各种产物衍射峰与NAC相差不大,具有较好的抗硫酸盐侵蚀性能,与抗压强度结果表现一致。

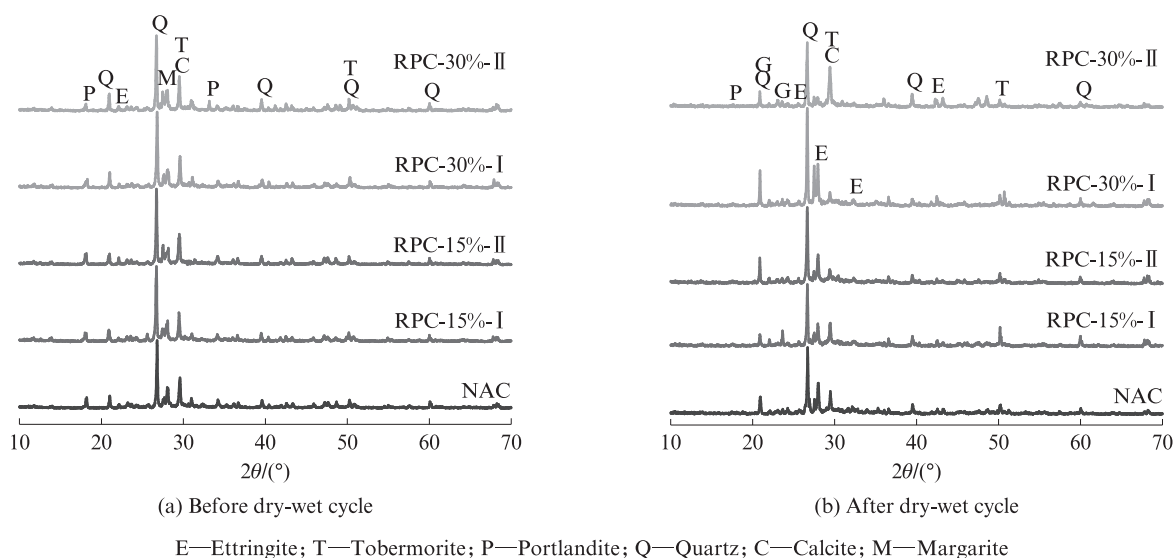


图4 NAC和RAC的XRD图谱
Fig. 4 XRD patterns of NAC and RAC

2.4 基体和界面过渡区的演化

RPC-15%-II砂浆基体和界面过渡区(ITZ)的微观形貌见图5。由图5可见:干湿循环前,RPC砂浆基体较为致密,骨料和砂浆黏结良好,这是因为RP比表面积大,在水化产物之间发挥的填充效应增加了RPC的密实度,但同时基体有许多微孔隙,这是由于RP的多孔特点以及RP自身水化程度较低造成的^[3];干湿循环后,砂浆基体出现开裂现象,骨料和砂浆之间黏结性变差,出现了1条狭长且贯通的裂缝。ITZ和砂浆基体均有大量的针状和簇状AFt从界面和裂缝边缘向内部生长,其生长表现为垂直于界面的方向性,且呈现不均匀分布状态。这是因为干湿循环前ITZ比砂浆基体存在更多的孔隙以及更大的孔径,在再生微粉多孔性的耦合作用下,离子更易向ITZ传输聚集,加速了AFt在ITZ的生成和结晶;随着干湿循环的进行,化学反应不断进行,不均匀分布

的膨胀应力逐渐增大,造成微裂缝在ITZ和基体处形成、扩展和连通;最后在ITZ处生成了较大的贯通性裂纹,砂浆和骨料的黏结性降低,砂浆基体不断开裂,混凝土出现疏松剥落,强度降低^[16]。

2.5 干湿循环下 SO_4^{2-} 侵蚀模型

SO_4^{2-} 侵蚀模型示意图见图6。由图6可见,在干湿循环前期, SO_4^{2-} 多聚集于RPC表面,而内部的 SO_4^{2-} 浓度较低,其与水化产物CH、C-S-H凝胶反应生成膨胀性和无黏聚性的结晶产物。结合上文XRD和SEM可知,随着CH、C-S-H凝胶逐渐被侵蚀,ITZ和孔隙中不断生成AFt,这有利于提高RPC的密实度和强度。随着干湿循环的继续进行, SO_4^{2-} 通过RPC原始孔隙通道持续侵入混凝土基体内部,ITZ和孔隙逐渐被AFt填充,而AFt产生的膨胀应力、硫酸钠盐产生的结晶压力持续增大,RPC内部损伤持续累积,造成孔隙的开裂、扩展和连通,混凝土内部

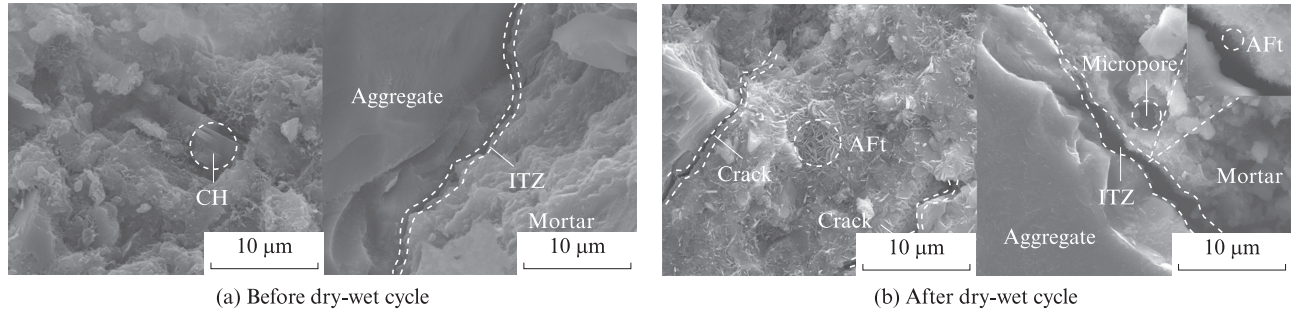
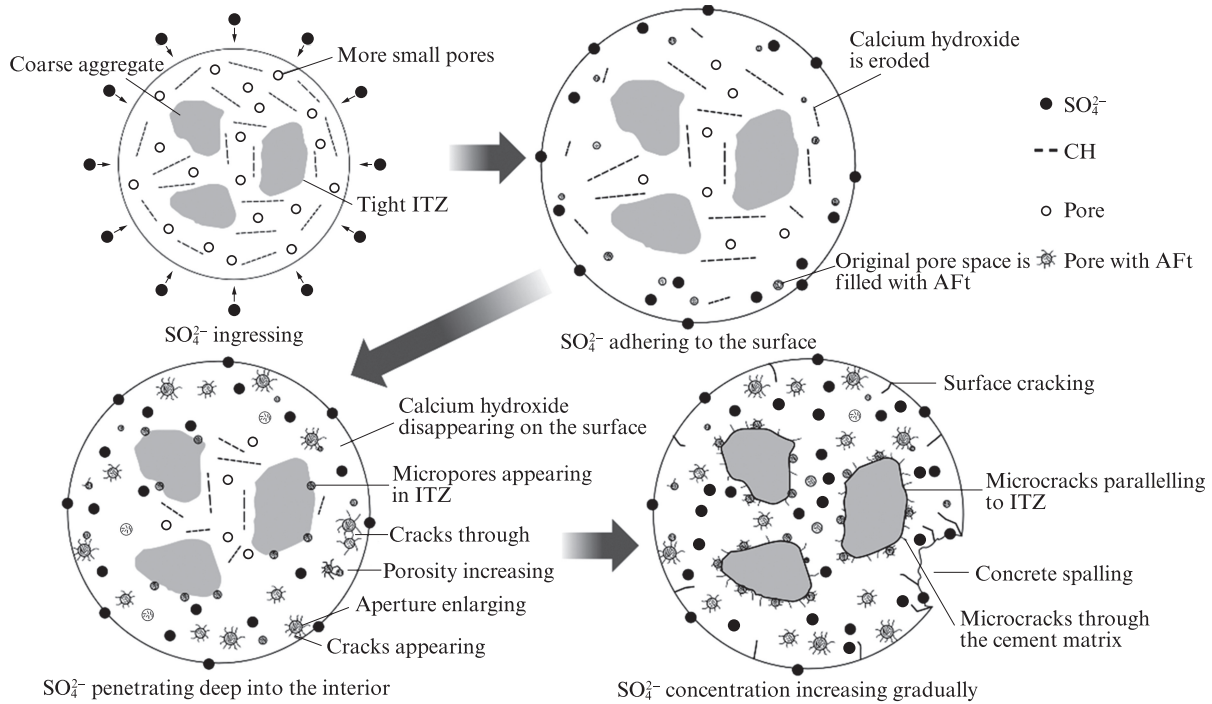


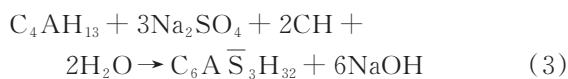
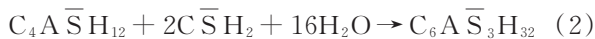
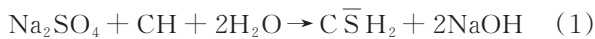
图 5 RPC-15%-II 砂浆基体和界面过渡区(ITZ)的微观形貌

Fig. 5 Morphologies of mortar matrix and interface transition zone(ITZ) of RPC-15%-II

图 6 SO_4^{2-} 侵蚀模型示意图Fig. 6 Schematic diagrams of SO_4^{2-} attack model

结构变得疏松多孔.当膨胀应力超过混凝土基体抗拉强度时,混凝土出现开裂和剥落现象.

为阐明硫酸盐干湿循环下RPC的劣化机理^[17],建立膨胀应力与不同位置坐标和侵蚀时间 SO_4^{2-} 浓度之间的函数关系.混凝土在硫酸盐侵蚀下的膨胀应力主要来自以下3个方面^[18]:(1)氢氧化钙(CH)转化为石膏($\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$);(2)单硫型硫铝酸钙($\text{C}_4\text{A}\bar{\text{S}}\text{H}_{12}$)转化为AFt($\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{32}$);(3)水化铝酸钙(C_4AH_{13})转化为AFt.主要化学反应式为:



又根据Fick第二定律, SO_4^{2-} 浓度是动态变化的,是1个随时间由低到高、逐渐达到饱和的过程^[18].因此

在其内部任一位置坐标 (x, y, z) 处取微单元体,体积为 V' ,在硫酸盐侵蚀后微单元体体积膨胀为 $V' + \Delta V'$,硫酸盐在时间 t 引起的微单元体体积膨胀率 $\rho_v((x, y, z), t)$ 为:

$$\rho_v((x, z, y), t) = \frac{V' + \Delta V'((x, z, y), t)}{V'} \quad (4)$$

$$\text{令: } \Delta V'((x, z, y), t) = Sc(t)\beta V' \quad (5)$$

$$\text{即: } \rho_v((x, z, y), t) = 1 + Sc(t)\beta \quad (6)$$

式中: S 为水泥相关系数; $c(t)$ 为基体内任一点 (x, y, z) 在时间 t 的 SO_4^{2-} 浓度; β 为生成物的膨胀率.

基体内微单元体的体积应变 ϵ 为:

$$\epsilon = \rho_v((x, y, z), t) - 1 = Sc(t)\beta \quad (7)$$

假设混凝土为各向同性,则由体积膨胀引起的膨胀应力相同,即:

$$\sigma = B\epsilon = BSc(t)\beta \quad (8)$$

式中: σ 为基体内任一点在 t 时间的膨胀应力; B 为混凝土体积模量.

当膨胀应力 σ 大于混凝土内部毛细孔壁的极限拉应力时,孔隙和ITZ处将产生沿骨料和垂直于骨料方向的膨胀性裂缝,并不断向水泥基体延伸,最终形成贯通裂缝和空洞.

基于上述分析,在硫酸盐化学侵蚀和物理结晶作用下,RP的多孔性为 SO_4^{2-} 提供了原始侵蚀通道和侵蚀产物的结晶空间,造成 SO_4^{2-} 更易向RP区域扩散,侵蚀产物在RP孔隙内部快速生长结晶,导致裂缝在RP区域快速发展.由于RP抵抗开裂的能力较弱,RP区域快速退出工作,这导致RPC基体内部侵蚀通道增多,加速了 SO_4^{2-} 朝基体内部扩散,最终造成RPC劣化比NAC更严重,这是RPC抵抗硫酸盐侵蚀能力弱于NAC的根本原因.

3 结论

(1)再生复合微粉(RP)等质量替代水泥后,再生复合微粉混凝土(RPC)的抗压强度损失率随着干湿循环次数的增加先降低后升高,且随着RP取代率的增加其变化幅度增大,RP取代率为15%、再生砖粉和再生混凝土粉的质量比 $m_{\text{BP}}:m_{\text{CP}}=6:4$ 的再生复合微粉混凝土(RPC-15%-II)抗硫酸侵蚀性能最优.

(2)再生复合微粉的掺入改善了混凝土的孔隙结构,RPC-15%-II的孔隙率略增、临界孔径减小、孔隙结构的连通性降低.但随着干湿循环的进行,其初始缺陷提供了大量的侵蚀通道并造成孔隙内部压力分布不均,加速了孔隙结构的劣化.

(3)低掺量再生复合微粉可以较好地发挥填充效应和成核作用,促进水泥水化,增强骨料和浆体的黏结力,提高砂浆基体和界面过渡区(ITZ)的密实度.但再生复合微粉的多孔性加速了侵蚀产物在ITZ处的聚集,降低了骨料和砂浆的黏结能力,ITZ出现了垂直于和平行于界面的贯通裂缝.再生复合微粉的多孔性成为RPC耐久性能加速劣化的主要原因.

(4) SO_4^{2-} 侵蚀模型阐明了硫酸盐侵蚀下混凝土内部损伤劣化过程,建立了膨胀应力与 SO_4^{2-} 浓度之间关系的定量表述,可用于评估和预测硫酸盐干湿循环下再生复合微粉混凝土内部损伤和劣化程度.

参考文献:

[1] XIAO J Z, MA Z M, SUI T B, et al. Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction

and demolition waste[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188:720-731.

[2] SUN C, CHEN L L, XIAO J Z, et al. Compound utilization of construction and industrial waste as cementitious recycled powder in mortar[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 170: 105561.

[3] TANG Q, MA Z M, WU H X, et al. The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review [J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 114:103807.

[4] ZHAO Y S, GAO J M, LIU C B, et al. The particle-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 242: 118521.

[5] 刘超, 胡天峰, 刘化威, 等. 再生复合微粉对混凝土力学性能及微观结构的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4):726-735. LIU Chao, HU Tianfeng, LIU Huawei, et al. Effect of recycled composite micro-powder on mechanical properties and microstructure of concrete [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4):726-735.(in Chinese)

[6] WU H X, YANG D Y, XU J G, et al. Water transport and resistance improvement for the cementitious composites with eco-friendly powder from various concrete wastes [J]. Construction and Building Materials, 2021, 290:123247.

[7] MA Z M, LI W, WU H X, et al. Chloride permeability of concrete mixed with activity recycled powder obtained from C&D waste [J]. Construction and Building Materials, 2019, 199: 652-663.

[8] 高润东. 复杂环境下混凝土硫酸盐侵蚀微-宏观劣化规律研究 [D]. 北京:清华大学, 2010.

GAO Rundong. Micro-macro degradation regularity of sulfate attack on concrete under complex environments [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.(in Chinese)

[9] XIE F, LI J P, ZHAO G W, et al. Experimental investigations on the durability and degradation mechanism of cast-in-situ recycled aggregate concrete under chemical sulfate attack [J]. Construction and Building Materials, 2021, 297(5):123771.

[10] LIKES L, MARKANDEYA A, HAIDER M M, et al. Recycled concrete and brick powders as supplements to Portland cement for more sustainable concrete [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 364:132651.

[11] WU H X, WANG C Q, MA Z M. Drying shrinkage, mechanical and transport properties of sustainable mortar with both recycled aggregate and powder from concrete waste [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 49:104048.

[12] 刘开伟, 程星星, 孙道胜, 等. 硫酸钠溶液 pH 值对硅酸盐水泥砂浆析钙及侵蚀产物的影响 [J]. 建筑材料学报, 2019, 22(2): 179-185.

LIU Kaiwei, CHENG Xingxing, SUN Daosheng, et al. Effects of pH value of sulfate solution on calcium leaching and products of cement mortars [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(2): 179-185.(in Chinese)

[13] GUO Y C, WU S L, LYU Z H, et al. Pore structure

- characteristics and performance of construction waste composite powder-modified concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 269:121262.
- [14] 吴中伟, 廉惠珍. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999:22-25.
- WU Zhongwei, LIAN Huizhen. High performance concrete [M]. Beijing: China Railway Press, 1999:22-25.(in Chinese)
- [15] ALIGIZAKI K K. Pore structure of cement-based materials: Testing, interpretation and requirements[M]. London: Chemical Rubber Company Press, 2005:48-52.
- [16] YANG R W, ZHANG M L, LI Z P, et al. Microstructural insight into the deterioration mechanism of the mortar subject to the combined action of external sulfate attack and cyclic wetting-drying [J]. Construction and Building Materials, 2022, 317:125484.
- [17] 余红发. 盐湖地区高性能混凝土的耐久性、机理与使用寿命预测方法[D]. 南京: 东南大学, 2004.
- YU Hongfa. Study on high performance concrete in salt lake: Durability, mechanism and service life prediction[D]. Nanjing: Southeast University, 2004.(in Chinese)
- [18] 左晓宝, 孙伟. 硫酸盐侵蚀下的混凝土损伤破坏全过程[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(7):1063-1067.
- ZUO Xiaobao, SUN Wei. Full process analysis of damage and failure of concrete subjected to external sulfate attack[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2009, 37(7):1063-1067.(in Chinese)