

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220504003

硫酸盐侵蚀作用下纳米混凝土力学特性及 微观结构劣化机制研究*

张嘉成¹, 万旭升¹, 路建国¹, 高佳佳², 刘骏霓¹, 周晓曼³

(1. 西南石油大学土木工程与测绘学院, 四川 成都 610500; 2. 西南石油大学教务处, 四川 成都 610500;
3. 西南油气田分公司安全环保与技术监督研究院, 四川 成都 610000)

摘要: 硫酸盐侵蚀一直是影响混凝土耐久性的重要因素之一, 特别是在西北寒旱及沿海盐渍土区。基于试验研究了硫酸盐侵蚀作用下, 掺纳米 SiO₂ 和纳米 CuO 混凝土的抗压强度、轴向应力-应变以及微观特性, 并分析了硫酸盐侵蚀环境下纳米材料的改性效果。试验结果表明: 随着纳米 CuO 掺量的提高, 混凝土的抗压强度、剩余强度系数逐渐降低; 当纳米 SiO₂ 掺量增加时, 混凝土的抗压强度、剩余强度系数先降低后升高。相比于未掺加纳米材料混凝土, 掺入纳米材料能显著提高混凝土的延性。同时, 对于提高混凝土的抗压强度纳米材料具有最佳掺入量, 纳米 SiO₂ 和纳米 CuO 的最佳掺量分别为 3% 和 1% (质量分数)。此外, 纳米材料具有桥接和填充效应, 能抑制混凝土裂缝的发展、细化孔隙结构、提高密实度, 进而提高混凝土的力学性能。

关键词: 纳米材料; 抗压强度; 应力-应变; 微观特性; 硫酸盐侵蚀

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)06-1425-09

Study on Mechanical Properties and Microstructure Deterioration Mechanism of Nano-concrete under Sulfate Attack

ZHANG Jiacheng¹, WAN Xusheng¹, LU Jianguo¹, GAO Jiajia², LIU Junni¹, ZHOU Xiaoman³

(1. School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
2. Dean's Office, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. Institute of Safety, Environment
Protection and Technical Supervision, Petro China Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610000, China)

Abstract: Sulfate attack has always been an important factor affecting the durability of concrete, especially in the northwest cold and arid regions, and coastal saline soil area of China. Based on experiments, the compressive strength, axial stress-strain and microstructure properties of concrete modified with nano-SiO₂ and nano-CuO under the influence of sulfate attack were studied, and the strengthened effect of nano-materials was analyzed. The results show that with the increase of nano-CuO content, the compressive strength and residual strength coefficient of concrete gradually decreased. When the content of nano-SiO₂ increases, the compressive strength and residual strength coefficient first de-

* 收稿日期: 2022-05-04; 修回日期: 2022-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(42101136, 42071087)、四川省自然科学基金(2022NSFSC0429)、中国博士后科学基金(2021M692697)、冻土工程国家重点实验室开放基金(SKLFSE202007)、四川省科技计划项目(2021YFQ0021)资助

作者简介: 张嘉成(1997—), 男, 硕士研究生。主要从事纳米改性混凝土的研究。E-mail: 1084092511@qq.com

通讯作者: 路建国(1991—), 男, 讲师, 博士后。主要从事寒区工程与材料研究。E-mail: jianguoguo@swpu.edu.cn

crease and then increase. Compared with the concrete without adding nano-materials, the addition of nano-materials can improve the ductility of concrete. With the increase of erosion time, the ductility of nano-concrete is better. Meanwhile, there is an optimum content of nano-materials for improving the compressive strength of concrete, and the optimum contents of nano-SiO₂ and nano-CuO are 3% and 1% (quality score), respectively. Additionally, nano-materials have a certain bridging and filling effect, which might affect the degree of crack propagation, refine the pore structure and improve the compactness of nano-concretes, thereby improving the mechanical properties of concrete.

Keywords: nano-materials; compressive strength; stress-strain; microstructure; sulfate erosion

0 引言

我国西北寒旱及沿海盐渍土区广泛分布着高浓度的侵蚀性离子(如硫酸根离子、氯离子、镁离子等),严重影响着混凝土结构的耐久性及使用寿命^[1-3]。其中,硫酸盐的侵蚀作用是影响混凝土结构耐久性的最主要因素之一^[4,5]。硫酸盐首先通过孔隙通道侵入结构内部,随之发生一系列侵蚀化学反应,生成石膏和钙矾石等化学产物,这些产物逐渐积累产生膨胀应力和结晶压力,改变了混凝土孔隙结构,影响离子迁移,导致混凝土结构劣化^[6-8]。王海龙等^[9]、梁咏宁等^[10]分别研究了硫酸钠和硫酸镁对混凝土的侵蚀机理,发现在硫酸钠侵蚀条件下,侵蚀产物的膨胀应力以及盐结晶压力造成了混凝土试样的损伤;而在硫酸镁侵蚀环境中,镁离子会与水化产物反应生成无胶凝性的M-S-H凝胶,这种凝胶结构会导致浆体-集料之间的松散,加速混凝土表面浆体剥落。

近些年,纳米材料因其优异的高活性而在混凝土材料中广泛使用^[11,12]。纳米材料具有小尺寸效应,能减少微裂缝数量并致密微观结构,降低混凝土的孔隙率,提高混凝土的水化率^[13,14]。纳米二氧化硅具有高火山灰活性,能提高水泥砂浆的力学性能和耐久性^[15,16]、抗渗性^[17]和抗腐蚀性^[18]。徐晶等^[19]研究发现纳米SiO₂具有火山灰效应,能降低混凝土的坍落度和扩展度,还能与Ca(OH)₂反应生成C-S-H凝胶,提高界面过渡区的粘性。A. Joshaghani^[20]用纳米二氧化钛和碳纳米纤维取代部分水泥,发现纳米粒子作为水泥的部分替代品能增大混凝土结构的密实性,增强混凝土性能。A. Nazari等^[21]通过在混凝土中掺入含量为4%的纳米TiO₂粒子,发现混凝土试样的抗水渗透性能和弯曲性能得到显著

改善,而当掺量大于4%时,纳米颗粒的改性效果降低。A. H. Shekaria等^[22]发现纳米氧化锆、纳米四氧化三铁、纳米二氧化钛和纳米氧化铝均能提高高性能混凝土的耐久性和力学性能。J. I. Tobón等^[23]通过研究发现纳米颗粒对孔隙细化和毛细抽吸有积极作用,可以防止硫酸盐侵蚀。

目前,关于纳米材料增强混凝土强度及结构特性的研究成果很多,但是没有系统的研究Na₂SO₄溶液侵蚀作用下掺纳米SiO₂和纳米CuO混凝土的力学性能及微观特性,同时未指出Na₂SO₄溶液侵蚀作用下纳米SiO₂和纳米CuO的最佳掺量。鉴于此,本文基于室内试验对Na₂SO₄溶液侵蚀作用下掺纳米SiO₂和纳米CuO混凝土的抗压强度、应力-应变特性、微观结构等进行了测定,分析了Na₂SO₄溶液侵蚀作用下掺纳米SiO₂和纳米CuO混凝土力学性能及微观结构演化规律与改性机理,以期为硫酸盐盐渍土地区混凝土结构耐盐设计及结构修复等提供参考。

1 试验方法

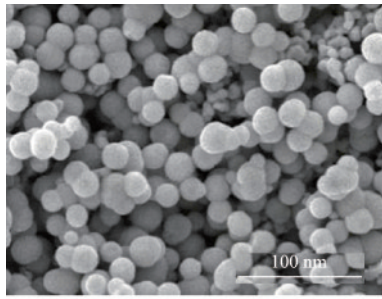
1.1 原材料

使用拉法基牌普通硅酸盐水泥(P·C42.5R),其基本性能参数见表1。所用纳米SiO₂和纳米CuO由安徽科润纳米有限公司生产,所用纳米材料的微观结构如图1所示,纳米材料基本参数和杂质成分表分别见表2和表3。细骨料采用细度模数为2.58的河

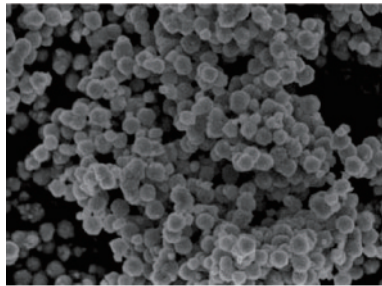
表1 水泥性能参数

Table 1 Physical and mechanical properties of cement

比表面积 m ² /kg	凝结时间/ min		抗压强度/ MPa		抗折强度/ MPa	
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
366	204	267	28.9	49.2	5.7	7.9



(a) 纳米SiO₂



(b) 纳米CuO

图1 纳米材料微观结构

Fig.1 Microstructure of nano-materials

砂,粗骨料采用粒径10~30 mm连续级配的卵石;采用科龙化工试剂厂生产的无水硫酸钠配置硫酸盐溶液;减水剂为聚羧酸型减水剂,其减水率为24%。

1.2 配合比

试验以纳米 SiO₂(简称 NS)以及纳米 CuO(简

表2 纳米材料参数

Table 2 Parameters of nano-materials used in this experiments

成分	平均粒径/nm	比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	表观密度/(g·cm ⁻³)	密度/(g·cm ⁻³)	晶型	颜色
NC	30	120	0.34	6.4	球形	黑
NS	20	240	0.06	2.4	球形	白

表3 纳米材料杂质成分

Table 3 Impurity composition of nano-materials

成分	Fe	Cl ⁻	Al	Mg	Ca	Mn	Zn	Pb
NC	0.28	0.11	0.01	—	—	0.01	0.01	0.03
NS	0.08	—	0.06	0.05	0.04	0.04	—	0.03

单位:%₀₀

称 NC)取代率(替代水泥质量的比例)作为参考,研究纳米混凝土的力学性能与微观特性。

试验中混凝土的配合比见表4,混凝土试样的水灰比均为0.42,OPC为混凝土的参考组(不添加纳米材料)。按重量计算NS的水泥替代量为1%、2%和3%的混凝土样品分别以NS1、NS2和NS3命名;类似地,按重量计算NC的水泥替代量为1%、2%和3%的混凝土样品分别以NC1、NC2和NC3命名。

表4 混凝土试样的配合比

Table 4 Mixing proportion of concret esamples

单位:kg/m³

样品	水灰比	水泥	砂	石	减水剂	纳米材料质量	纳米材料含量/%	硫酸钠溶液浓度/%
OPC	0.42	416.20	636.8	1 236.0	4.0	0.00	0	
NS1	0.42	412.04	636.8	1 236.0	4.0	4.16	1	
NS2	0.42	407.88	636.8	1 236.0	4.0	8.32	2	
NS3	0.42	403.72	636.8	1 236.0	4.0	12.48	3	5
NC1	0.42	412.04	636.8	1 236.0	4.0	4.16	1	
NC2	0.42	407.88	636.8	1 236.0	4.0	8.32	2	
NC3	0.42	403.72	636.8	1 236.0	4.0	12.48	3	

1.3 纳米材料分散

为使纳米粒子均匀分散,本实验采用高速研磨搅拌的方法对纳米粒子进行分散,这是一种提高纳米材料在水泥材料水溶液中分散效果的有效方法^[24]。减水剂被用作表面活性剂,先将其溶于水中,然后加入纳米材料,搅拌分散至少30 min^[25]。

1.4 样品制备

为获得均匀的纳米改性混凝土试样,放置材料

进入搅拌器的顺序以及设定的搅拌时间如下,首先将粗骨料和细骨料倒入强制搅拌机混合干拌90 s,接着加入水泥继续干拌90 s,最后加入纳米材料悬浮液搅拌180 s。试验采用100 mm×100 mm×100 mm标准试样,所有材料混合均匀后,将混合物浇筑到模具中,将模具放在振动台上振动密实,将其放入养护室中固化24 h。24 h后,将样品脱模,并放入标准环境20±2℃的水中养护28 d,28 d养护完成后进行后续试验。

1.5 测试方法

1.5.1 抗压强度试验

采用图2所示的美特斯工业系统(中国)有限公司生产的承载力为1 000 kN的WAW-1000B型电液伺服万能试验机测试了混凝土样品未侵蚀以及不同侵蚀时长(30 d、60 d、90 d)的抗压强度。抗压强度测试根据GB/T 50081—2002^[26]标准进行,控制方式采用应力控制,应力控制率为0.3 MPa/s。试验中使用位移传感器测量缩短量,通过计算机记录的压缩缩短和压缩荷载绘制应力-应变曲线。

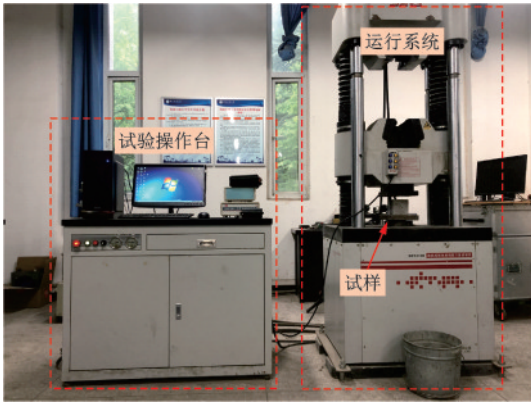


图2 万能试验机

Fig.2 Universal testing machine

引入残余强度系数来更加全面地评估 Na_2SO_4 溶液侵蚀作用下掺纳米 SiO_2 和纳米 CuO 混凝土的抗压强度变化,其计算如下:

$$K_f = \frac{F_d}{F_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, K_f 表示混凝土残余强度系数, F_d 表示标准养护28 d后侵蚀 d 天的混凝土试样的抗压强度(MPa); F_0 表示标准养护28 d后的同种混凝土试样的抗压强度(Mpa)。

1.5.2 SEM 试验

抗压强度试验结束后,从混凝土试样碎片中选择平端小砂浆样品进行微观结构试验。首先将收集的样品放在60℃的真空干燥箱中干燥24 h,用导电胶带将样品固定在台上进行喷金,最后通过扫描电子显微镜(SEM)观察微观形貌。

1.5.3 XRD 试验

XRD由DX-2700型X射线衍射仪测得,主要对纳米混凝土试样研磨成的干燥粉末进行。取28 d水泥砂浆样品浸泡在无水乙醇中7 d以后,在烘箱中干燥24 h,之后将样品研磨成粉末并通过孔径为

75微米的筛子。扫描角度范围设定为 $5^\circ \sim 80^\circ$,可以确定样品的衍射强度数据(纵坐标)以及对应检测位置(横坐标),绘制出衍射图谱。

2 试验结果及分析

2.1 抗压强度

硫酸盐溶液侵蚀环境中不同掺量(0%、1%、2%、3%)纳米改性混凝土的抗压强度值如图3所示。由图可知,随着硫酸钠溶液侵蚀时长的增加,纳米混凝土抗压强度整体上呈降低趋势,与对照组混凝土的趋势一致。纳米材料取代部分水泥可以提高混凝土强度,例如NC1掺入量为1%时,NC1在硫酸盐侵蚀30、60、90 d下的抗压强度值分别为46.8、41.3、35.7 MPa,比对照组(OPC)混凝土同侵蚀时长抗压强度分别高出11.1%、3.25%和5.6%。但纳米材料分散性较差,随着掺量增加会降低混凝土的抗压强度,如NC3组混凝土试样,这是由于掺入过量的纳米材料,使得混凝土在搅拌过程中纳米

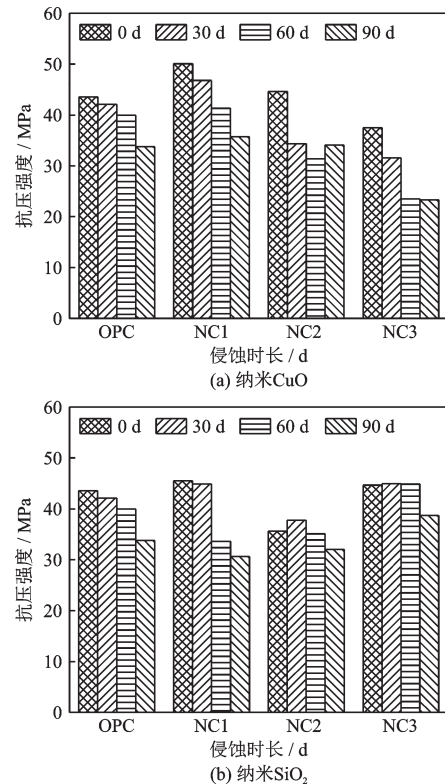


图3 硫酸钠溶液侵蚀下纳米材料种类对混凝土抗压强度的影响

Fig.3 Influence of nano-materials on the compressive strength of concretes under the erosion of sodium sulfate solution

材料体系难以维持稳定,会互相缠绕、团聚,导致纳米材料与混凝土基体的相容性变差,微孔隙增加,混凝土的抗压强度降低。

相同侵蚀时长下,随着NS掺量的增加,混凝土的抗压强度呈先降低后上升的趋势,这是因为NS粒径更小,团聚程度更低,较高掺量更能发挥纳米材料的改性效果。例如,在侵蚀30 d时,NS1组和NS3组混凝土试样的抗压强度分别为44.9 MPa和45 MPa,均高于对照组混凝土试样;但在硫酸盐侵蚀60 d和90 d时,NS3组混凝土抗压强度更高,较普通混凝土提高12.3%和14.5%,但此时NS1组强度降低明显,NS掺量为3%对混凝土抗压强度的改性效果较好。因此,侵蚀时长、纳米材料种类和掺量共同影响了硫酸盐侵蚀下混凝土的抗压强度。

图3还可以看出,添加NS、NC均能提高未侵蚀混凝土试样的抗压强度。当纳米材料掺量为1%时,NC和NS组未侵蚀混凝土试样的强度分别为50.1 MPa和45.5 MPa,相比于对照组分别提高了14.9%和10.7%。

2.2 应力-应变

图4为未侵蚀以及不同侵蚀时长(30、60、90 d)

下纳米改性混凝土的轴向应力-应变曲线。总体上看,应力-应变曲线可以分为五个阶段,即:初始孔隙压缩阶段、弹性压缩阶段、塑形屈服阶段、下降阶段以及残余应力阶段(图5)。

其中,初始孔隙压缩阶段混凝土试样的应力随着应变非线性增加,该阶段应变主要来自于混凝土的孔隙压缩;弹性压缩阶段混凝土试样的应力随着应变线性变化,该阶段混凝土发生弹性变形;随着应力增大,混凝土试样进入塑性屈服阶段,此阶段应力-应变曲线呈非线性变化,试样内部裂纹增多;随着应力继续增大,应力随着应变的增加急剧减小;最后,混凝土试样进入残余应力阶段,该阶段混凝土试样的应变继续增大而应力保持稳定。图4还可以看出,相比于对照组,纳米改性混凝土的破坏过程缓慢,需要较长的时间才能达到峰值应变,这是由于纳米材料的桥接效应。添加纳米材料后,纳米材料在混凝土内部形成类似“桥梁”的结构,提高了组分间的粘结性能,有效阻止了裂缝的发展,这与纳米材料的种类和含量有关。

图4可以看出,对照组(OPC)混凝土的应力以及残余应变峰值低于纳米改性混凝土试样。应力峰值以NC1为例,未侵蚀、侵蚀30 d、60 d和90 d时

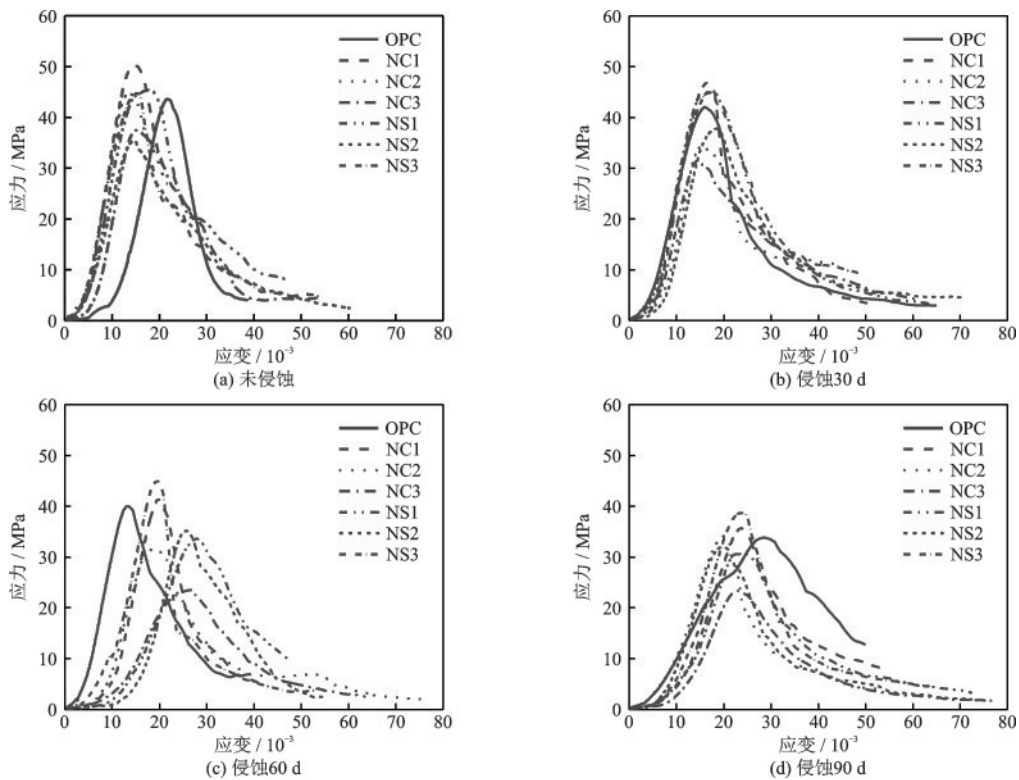


图4 纳米材料改性混凝土的轴向应力-应变曲线

Fig.4 Axial stress-strain curve of concret modified with nano-materials

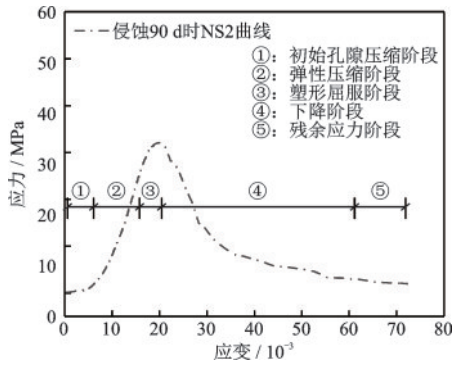


图5 NS2侵蚀90 d的轴向应力-应变曲线
Fig.5 Axial stress-strain curve of NS2 eroded for 90 d

的峰值应力分别为 50.04、46.78、41.27、35.67 MPa，这比对照组混凝土分别高出 14.9%、11.1%、3.25% 和 5.6% (图 3)。同时，在未侵蚀、侵蚀 30 d、60 d、90 d 时 NS2 组试样的残余应变峰值分别为 0.060、0.073、0.055 和 0.074，比对照组分别高 50%、14%、37.5% 和 48% (图 4)。

2.3 强度损失率

图 6 和图 7 分别是硫酸盐溶液侵蚀下，掺 NC 和 NS 混凝土试样的残余强度系数 (K_f)。如果 $K_f > 1$ ，表明混凝土强度增加，反之表示混凝土强度降低。由图 6 和图 7 可知，总体上各组混凝土的 K_f 值小于 1，表明在硫酸盐侵蚀下，混凝土抗压强度呈降低趋势。对于 NC 改性的混凝土试样，随着纳米材料的掺入， K_f 值逐渐减小 (图 6)；而对于 NS 改性的混凝土试样， K_f 值先增大后减小 (图 7)。此外，与对照组相比 NC 改性混凝土的 K_f 值更低。而对于掺入 NS 的混凝土试样，当 NS 掺量为 2% 时，试样各侵蚀时期的 K_f 值高于对照组。在侵蚀 30 d 时，NS 掺量为 2% 的混凝土试样的 K_f 值大于 1，表明掺入 2% 的 NS 对混凝土改性效果显著。以上研究表明，存在一个纳米材料掺入量以显著提高混凝土的残余强度系数，可以得出 NS 和 NC 的最佳掺入量分别为 2% 和 1%。

硫酸盐溶液对于混凝土的侵蚀分为外部侵蚀和内部侵蚀，外部侵蚀指环境中的硫酸盐溶液对混凝土外表皮的侵蚀作用，造成混凝土四周表皮脱落；而内部侵蚀的本质是硫酸根离子透过微裂缝进入混凝土内部的扩散作用。一般情况下，掺入适量的纳米材料时，纳米材料均匀分散于水泥砂浆内部，当混凝土承受荷载作用时，纳米材料粘结在混凝土内部结构中，大的比表面积能够与基体产生较好的结合，填充混凝土微细部结构中存在的空隙，

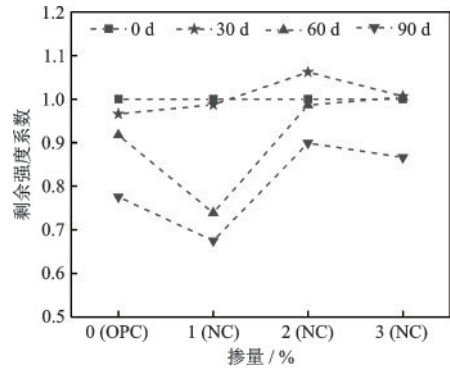


图6 硫酸盐侵蚀下掺纳米氧化铜混凝土残余强度系数
Fig.6 Residual strength coefficient of concrete samples modified with NC under the sulfate erosion

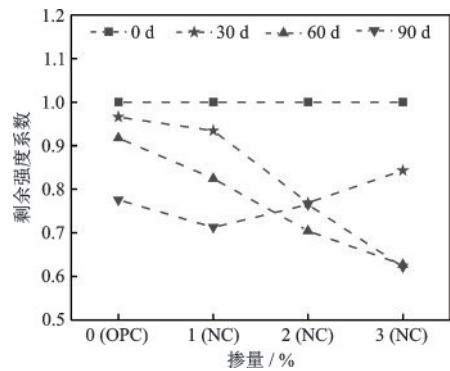
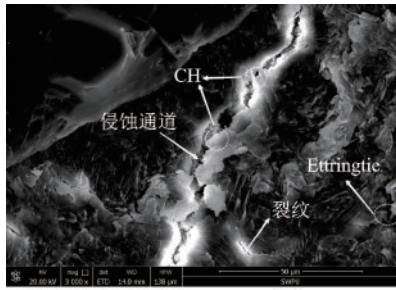


图7 硫酸盐侵蚀下掺纳米氧化硅混凝土残余强度系数
Fig.7 Residual strength coefficient of concrete samples modified with NS under the sulfate erosion

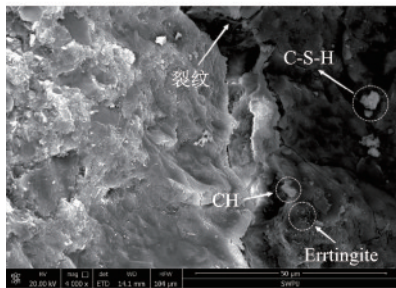
在裂缝之间形成“桥梁”结构，提高了混凝土的密度，限制了裂缝的发展，这将推迟混凝土试样的破坏，因此提高了混凝土的抗压强度^[27]；反之，纳米材料掺入过量，一方面将消耗更多的水泥包裹纳米材料，导致水泥浆体和骨料之间的粘结性降低，混凝土内部可能产生一些薄弱部分。另一方面，纳米材料在拌合过程中会消耗更多水分，导致水泥水化过程水分不足，降低混凝土水化产物，混凝土抗压强度会降低。因此，试验中确定纳米材料的最优掺入范围有益于实际工程。

2.4 微观形貌分析(SEM)

图 8 和图 9 分别为 NC 和 NS 混凝土样品侵蚀 60 d 后的 SEM 电镜扫描结构图。混凝土微观结构中能观察到钙矾石 (Ettringite)、氢氧化钙 (CH) 以及水化硅酸钙 (C-S-H) 等水化产物以及一些裂缝。硫酸盐侵蚀造成混凝土微观结构劣化，侵蚀过程中硫酸根离子通过试样的微孔隙和缝隙渗透进混凝土内部，导致试样内部形成相互贯通的较大的孔隙，



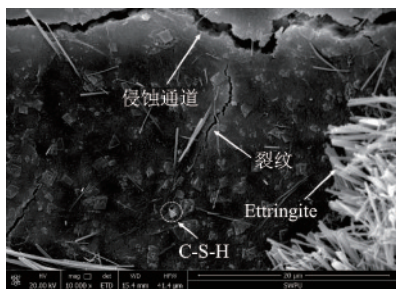
(a) 纳米CuO



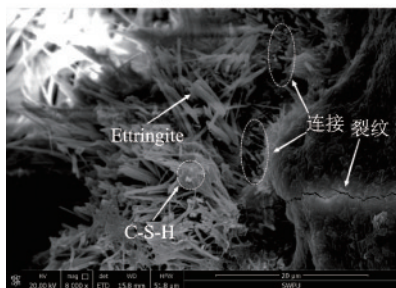
(b) 纳米SiO₂

图8 不同纳米改性混凝土的微观形貌(50 μm)

Fig.8 Micromorphology of concretes modified with nano-materials(50 μm)



(a) 纳米CuO



(b) 纳米SiO₂

图9 不同纳米改性混凝土的微观形貌(20 μm)

Fig.9 Micromorphology of concretes modified with nano-materials(20 μm)

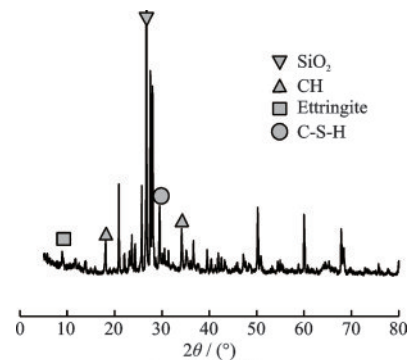
降低了混凝土的密实度,形成了一条侵蚀通道;随着侵蚀作用的进行,一些腐蚀性的水化产物和膨胀性的晶体,例如盐结晶、石膏、钙矾石会形成,这些侵蚀产物会填充混凝土结构内部较大的孔隙。随着硫酸盐化学反应的进行,氢氧化钙不断消耗而生成石膏、钙矾石等膨胀性产物,这些侵蚀产物的结晶压力和膨胀应力不断累积从而挤压水泥浆体,导

致浆体受拉开裂,引起混凝土的膨胀、开裂和解体以及孔隙结构的破坏,进而导致混凝土试样力学性能下降。

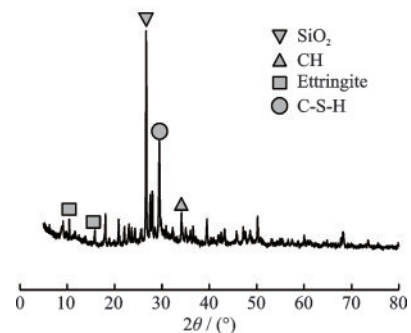
纳米材料改性混凝土性能是因其具有小尺寸效应,可以填充混凝土内部的微孔隙,改善孔隙结构,提高试件密实度。此外,纳米材料能在混凝土内部结构间形成“桥梁”,加强其他组分之间的连接作用(图9(b)),进而改善界面结构,减少了微裂缝的危害。但与NC混凝土相比,NS混凝土的内部结构显然更加致密,这是因为NC相比NS可以与氢氧化钙反应,并生成凝胶物质。提高抗压强度的同时,使微观结构更致密。

2.5 水化产物分析(XRD)

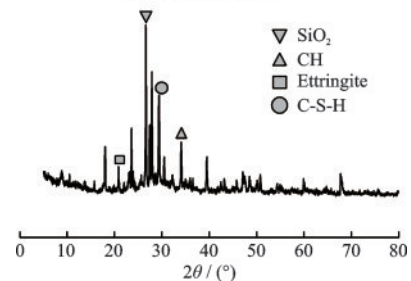
图10为侵蚀28 d后混凝土样品的XRD分析图谱,样品的衍射强度数据(纵坐标)以及对应检测位



(a) 普通混凝土



(b) 纳米氧化硅混凝土



(c) 纳米氧化铜混凝土

图10 混凝土样品XRD分析

Fig.10 XRD analysis of concrete samples

置(横坐标)。其中混凝土的水化产物主要是无定形水化硅酸钙(C-S-H)、氢氧化钙(CH)晶体以及少量钙矾石(Ettringite)。

将XRD试验数据导入JADE分析软件中,通过物相检索功能寻找特征峰,标记出SiO₂、CH、Ettringite以及C-S-H的特征峰^[28]。由图可知,侵蚀30 d时,三种样品中SiO₂的主特征峰最高,说明此时水化反应还不充分,生成的水化产物(CH、C-S-H、Ettringite)较少。三种样品C-S-H特征峰的峰强度有明显差别,OPC样品的C-S-H特征峰的峰强度低于其他两个样品,表明纳米材料的添加增强了水泥水化反应,混凝土中产生了更多的C-S-H晶体,提高了混凝土的强度。而NC的CH特征峰的峰强度高于NS和OPC组,表明此浆体中生成更多CH晶体。此外,三种样品Ettringite的特征峰强度差异不大,表明掺入纳米材料不会影响混凝土水化过程中钙矾石的产生。

3 结 论

本文通过试验探究了硫酸盐侵蚀条件下,不同纳米材料以及纳米材料掺量对混凝土力学性能以及微观结构的影响,可得出以下结论:

(1)不同纳米改性混凝土的应力-应变曲线相似,可以分为初始孔隙压缩阶段、弹性压缩阶段、塑形屈服阶段、下降阶段以及残余应力阶段等五个阶段。掺入纳米材料,提高了混凝土的延性。相比于对照组,纳米改性混凝土的破坏过程缓慢,需要较长的时间才能达到峰值应变。

(2)掺入NC后,改性混凝土各侵蚀时长抗压强度均得到提高,但相同侵蚀时长下抗压强度随NC掺量增加而降低,强度损失率逐渐提高。

(3)掺入NS后,随着掺量的增加,混凝土的抗压强度先降低后上升,强度损失率逐渐降低。当NS的掺量为3%时,NS改性混凝土的强度损失最小。

(4)纳米材料的掺入能够有效改善混凝土结构,促进水化反应过程,生成更多C-S-H,但过量纳米材料会在基体中互相缠绕、团聚,导致结构内部相容性降低,从而降低混凝土的力学性能。因此,NC和NS的掺量分别在1%和3%时改性效果最佳。

参考文献:

- [1] 张洪亮,王黎,赵金东.盐渍土地区混凝土结构的耐硫酸盐腐蚀研究[J].中外铁路,2016,36(3):317-321.
Zhang H L, Wang L, Zhao J D. Research on sulfate corrosion resistance of concrete structure in saline soil area[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2016, 36(3): 317-321. (in Chinese)
- [2] 侯泽宇,王家滨,郭庆军,等.复合盐侵蚀再生混凝土耐久性能退化试验研究[J].硅酸盐通报,2021,40(11):3617-3626.
Hou Z Y, Wang J B, Guo Q J, et al. Experimental study on durability degradation of recycled concrete by compound salt corrosion[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(11): 3617-3626. (in Chinese)
- [3] 余红发,孙伟,王甲春,等.盐湖地区侵蚀性离子在混凝土中的扩散及其相互作用[J].东南大学学报(自然科学版),2003,33(2):156-159.
Yu H F, Sun W, Wang J C, et al. Diffusion of corrosive ions into concrete exposed to salt lake and interaction between corrosive ions and concrete[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2003, 33(2): 156-159. (in Chinese)
- [4] Binici H, Aksoğan O. Sulfate resistance of plain and blended bement[J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28(1): 39-46.
- [5] Dehawi H, Maslehuddin M, Austin S A. Long-term effect of sulfate ions and associated cation type on chloride-induced reinforcement corrosion in Portland cement concretes[J]. Cement and Concrete Composites, 2002, 24(1): 17-25.
- [6] Ikumi T, Segura I. Numerical assessment of external sulfate attack in concrete structures. A review[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 121: 91-105.
- [7] Sun D, Wu K, Shi H, et al. Effect of interfacial transition zone on the transport of sulfate ions in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 192: 28-37.
- [8] 颜汉军.复合纳米材料对混凝土及水泥砂浆性能的影响[J].材料导报,2008,22(增2):167-170.
Yan H J. Influence of composite nano-materials on performance of concrete and cement mortar[J]. Materials Reports, 2008, 22(Sup2): 167-170. (in Chinese)
- [9] 王海龙,董宜森,孙晓燕,等.干湿交替环境下混凝土受硫酸盐侵蚀劣化机理[J].浙江大学学报(工学版),2012,46(7):1255-1261.
Wang H L, Dong Y S, Sun X Y, et al. Damage mechanism concrete deteriorated by sulfate attack in wet-dry

- cycle environment [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(7): 1255-1261. (in Chinese)
- [10] 梁咏宁, 袁迎曙. 硫酸钠和硫酸镁溶液中混凝土腐蚀破坏的机理[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(4): 504-508. Liang Y N, Yuan Y S. Mechanism of concrete destruction under sodium sulfate and magnesium sulfate solution[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(4): 504-508. (in Chinese)
- [11] Mukharjee B B, Barai S V. Influence of incorporation of nano-silica and recycled aggregates on compressive strength and microstructure of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 71: 570-578.
- [12] Gowda R, Narendra H, Nagabushan B M, et al. Investigation of nano-alumina on the effect of durability and micro-structural properties of the cement mortar [J]. Materials today : proceedings, 2017, 4(11): 12191-12197.
- [13] Flores-vivian I, Pradoto R, Moini M, et al. The effect of SiO₂ nanoparticles derived from hydrothermal solutions on the performance of Portland cement based materials [J]. Frontiers of Earth Science, 2017, 11(4): 436-445.
- [14] Singh L P, Karade S R, Bhattacharyya S K, et al. Beneficial role of nanosilica in cement based materials - A review [J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 1069-1077.
- [15] Arel H S. Effects of curing type, silica fume fineness, and fiber length on the mechanical properties and impact resistance of UHPFRC [J]. Results in Physics, 2016, 6: 664-674.
- [16] Amin M, El-Hassan K A. Effect of using different types of nano materials on mechanical properties of high strength concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 80: 116-124.
- [17] Shafiq N, Kumar R, Zahid M, et al. Effects of modified metakaolin using nano-silica on the mechanical properties and durability of concrete [J]. Materials, 2019, 12(14): 2291.
- [18] Arel H S, Thomas B S. The effects of nano- and micro-particle additives on the durability and mechanical properties of mortars exposed to internal and external sulfate attacks [J]. Results in Physics, 2017, 7: 843-851.
- [19] 徐晶, 王彬彬, 赵思晨. 纳米改性混凝土界面过渡区的多尺度表征 [J]. 建筑材料学报, 2017, 20(1): 7-11. Xu J, Wang B B, Zhao S C. Multi-scale characterization of interfacial transition zone in nano-modified concrete [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1): 7-11. (in Chinese)
- [20] Joshaghani A. Evaluating the effects of titanium dioxide (TiO₂) and carbon-nanofibers (CNF) as cement partial replacement on concrete properties [J]. MOJ Civil Engineering, 2018, 4(1): 29-38.
- [21] Nazari A, Riahi S. The effect of TiO₂ nanoparticles on water permeability and thermal and mechanical properties of high strength self-compacting concrete [J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 528(2): 756-763.
- [22] Shekari A H, Razzaghi M S. Influence of nano particles on durability and mechanical properties of high performance concrete [J]. Procedia Engineering, 2011, 14: 3036-3041.
- [23] Tobón J I, Payá J, Restrepo O J. Study of durability of Portland cement mortars blended with silica nanoparticles [J]. Construction and Building Materials, 2015, 80: 92-97.
- [24] 董健苗, 马铭彬. 分散方法对纳米 SiO₂ 增强水泥基材料性能的影响 [J]. 混凝土, 2011, (4): 95-96. Dong J M, Ma M B. Study of nanometer SiO₂ strengthens the cement base material performance on different dispersing method [J]. Concrete, 2011, (4): 95-96. (in Chinese)
- [25] Du H, Du S, Liu X. Durability performances of concrete with nano-silica [J]. Construction and Building Materials, 2014, 73: 705-712.
- [26] 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002 [S]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2002.
- [27] 张筱逸. 纳米 TiO₂ 改性水泥混凝土的制备及其力学和耐久性能研究 [J]. 功能材料, 2021, 52(12): 12079-12083. Zhang X Y. Preparation, mechanics and durability of nano-TiO₂ modified cement concrete [J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(12): 12079-12083. (in Chinese)
- [28] 吴庆, 朱袁洁, 许耀, 等. 基于 SEM 和 XRD 微观测试下单掺矿物掺合料透水混凝土性能分析 [J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2020, 34(3): 112-118. Wu Q, Zhu Y J, Xu Y. Performance analysis of permeable concrete with single mineral admixture based on SEM and XRD micro-tests [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 34(3): 112-118. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)