

# 盐碱水溶液条件下改性灌浆材料 耐侵蚀性能研究

周红红<sup>1,2</sup>, 刘军<sup>1</sup>

(1. 沈阳理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110159;

2. 沈阳建筑大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 对灌浆材料进行改性,以提高其在盐碱水溶液条件下的耐侵蚀性能。

**方法** 通过纳米 MgO 对灌浆材料进行改性,选取 H<sub>2</sub>O、NaCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NaOH 的水溶液环境,测试灌浆材料的强度及耐蚀系数,分析不同盐碱水溶液环境对灌浆材料耐侵蚀性能的影响。**结果** 灌浆材料在 H<sub>2</sub>O、NaCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NaOH 等水溶液环境中,均有良好的耐侵蚀能力。掺入纳米 MgO 后,灌浆材料在 NaOH 的耐侵蚀能力最好,耐蚀系数达到 1.524;在 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水溶液中,对掺入纳米 MgO 的灌浆材料长期抗压强度更有利;通过微观分析,在 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水溶液中,掺入纳米 MgO 的灌浆材料生成了碳酸镁盐等物质,在一定程度上提高了灌浆材料的强度。**结论** 150 d 时,纳米 MgO 改性的灌浆材料在 NaOH 水溶液中的耐侵蚀性能最好,在 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 盐溶液中对灌浆材料的抗压强度最有利。

**关键词** 盐碱水溶液;纳米 MgO;灌浆材料;强度;耐蚀系数

中图分类号 TU528

文献标志码 A

## Experimental Study on Corrosion Resistance of Modified Grouting Materials in Saline-alkali Aqueous Solution

ZHOU Honghong<sup>1,2</sup>, LIU Jun<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang, China, 110159; 2. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The grouting material was modified to improve its corrosion resistance in saline-alkali aqueous solution. The grouting material was modified by nano-MgO, and the strength and corrosion resistance coefficient of the grouting material modified by nano-MgO were tested in four kinds of aqueous solutions (H<sub>2</sub>O, NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and NaOH). In this way, the influence of different saline-alkali water solution environment on the corrosion resistance of grouting material

收稿日期:2023-03-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51972214)

作者简介:周红红(1985—),女,博士研究生,主要从事军用建筑材料及固体废弃资源化等方面研究。

can be analyzed. The results showed that the grouting materials had good corrosion resistance in aqueous solution such as  $H_2O$ ,  $NaCl$ ,  $Na_2SO_4$  and  $NaOH$ . After adding nano-MgO, the corrosion resistance of the grouting material in  $NaOH$  is the best, and the corrosion resistance coefficient reaches 1.524. In the aqueous solution of  $Na_2SO_4$ , the long-term compressive strength of the grouting material with nano-MgO is advantageous. Through microscopic analysis, the grouting material with nano-MgO in  $Na_2SO_4$  aqueous solution formed magnesium calcite and other substances, which improved the strength of the grouting material to a certain extent. It is concluded that the corrosion resistance of nano-MgO modified grouting material is the best in  $NaOH$  solution at 150 d, and the compressive strength of grouting material is the best in  $Na_2SO_4$  salt solution.

**Key words:** saline-alkali aqueous solution; nano-MgO; grouting material; strength; corrosion resistance coefficient

混凝土作为建筑工程施工中主要的建筑材料,已广泛应用于商品建筑、水利、隧道、道路等工程的建设当中。鉴于混凝土性能特点与工艺的特殊性,混凝土结构与制品存在的问题也越来越多,如裂缝、鼓包、骨料脱落等问题,其中最常见的就是混凝土结构与制品出现裂缝。混凝土裂缝不仅影响建筑工程的使用寿命,甚至还影响建筑结构的质量安全<sup>[1]</sup>。应用于混凝土修补用的材料种类繁多,以有机类、无机类、复合类为主。其中无机类灌浆材料,因价格低廉、工作性好、耐久性能优良,被广泛应用于混凝土制品的裂缝修补当中<sup>[2]</sup>。

我国幅员辽阔,盐碱地区面积占比很大,从盐碱地区的分布情况上看,主要分布在东北、西北、华北及滨海地区。对于盐碱地区的建筑物,因土壤中含有大量的盐类与碱类物质,在混凝土使用过程中除了常见的质量问题,还会出现侵蚀情况。对于应用在盐碱环境下的混凝土修补材料,也需提升其在盐碱水溶液环境中的服役能力<sup>[3]</sup>。很多学者为了提高灌浆材料的工作性能及服役性能,采用有机聚酯、无机胶凝材料等对其进行改性,也达到了较好的效果。赵卫全等<sup>[4]</sup>通过向环氧灌浆材料中添加碳纳米管,显著提高了灌浆材料的强度和韧性。孙长征等<sup>[5]</sup>通过CNTs复合改性混凝土快速修复灌浆材料,也达到了良好的应用效果。纳米材料因有着

常规材料不具备的特殊性能,如高强度、高韧性,具有非常广阔的研究前景。纳米材料改性水泥基材料的研究已成为研究的热点,且已有研究表明,在水泥中掺入纳米材料制备混凝土可以降低混凝土的空隙率,提高密实程度,进而提高水泥制品的强度<sup>[6-8]</sup>。

现有研究中,纳米氧化物改性无机胶凝材料的研究主要集中在纳米  $SiO_2$  等活性纳米氧化物对混凝土结构等制品的性能影响上,而对于具有膨胀性的纳米  $MgO$  改性后的灌浆材料在不同的盐碱水溶液环境中的耐侵蚀性能还有待进一步研究。基于此,笔者将将纳米  $MgO$  应用到灌浆材料中,使其具备耐盐碱侵蚀的性能,进而能够应用到盐碱水溶液环境下混凝土裂缝的维修与修补中。

# 1 实验

## 1.1 原材料

选用唐山六九水泥有限公司生产的R·SAC42.5级水泥以及诸城市杨春水泥有限公司生产的P·O52.5级水泥,主要成分见表1。选用寿县广茂矿产品加工厂生产的Ⅱ级粉煤灰,主要成分见表2。选用山东鑫瑞杰化工有限公司生产的S95级矿粉,主要成分见表3。石英砂:河南省郑州市巩义市恒鑫滤料厂生产,表观密度为 $2.4\text{ g/cm}^3$ ,堆积密度为 $1\,510\text{ kg/m}^3$ ,细度模数为2.4;自来水。外加剂:河南冠豪化工有限公司生产的

有机硅消泡剂;海臣启化工科技有限公司生产的高效聚羧酸减水剂;河南省郑州市卧龙化工生产的葡萄糖酸钠缓凝剂。纳米 MgO

为清河县科工冶金材料有限公司生产,粒径为 50 nm,密度为 3.60 g/cm<sup>3</sup>,具有中等以上活性。

表 1 水泥的化学成分

Table 1 Chemical composition analysis of cement										%
品种	$\omega(\text{CaO})$	$\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$\omega(\text{SO}_3)$	$\omega(\text{SiO}_2)$	$\omega(\text{MgO})$	$\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$\omega(\text{TiO}_2)$	$\omega(\text{K}_2\text{O})$	$\omega(\text{Na}_2\text{O})$	$\omega(\text{Loss})$
R·SAC42.5 水泥	42.22	24.92	15.13	10.55	3.00	1.76	0.92	0.63	0.50	0.36
P·O52.5 水泥	55.64	8.24	3.41	22.72	3.40	3.37	0.41	1.36	1.10	0.31

表 2 粉煤灰的化学成分

Table 2 Chemical composition analysis of fly ash										%
$\omega(\text{SiO}_2)$	$\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$\omega(\text{CaO})$	$\omega(\text{TiO}_2)$	$\omega(\text{K}_2\text{O})$	$\omega(\text{MgO})$	$\omega(\text{SO}_3)$	$\omega(\text{Na}_2\text{O})$	$\omega(\text{Loss})$	
48.32	37.53	5.45	4.32	1.2	1.11	0.8	0.76	0.3	0.19	

表 3 矿粉的化学成分

Table 3 Chemical composition analysis of mineral powder										%
$\omega(\text{CaO})$	$\omega(\text{SiO}_2)$	$\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$\omega(\text{MgO})$	$\omega(\text{SO}_3)$	$\omega(\text{TiO}_2)$	$\omega(\text{Na}_2\text{O})$	$\omega(\text{K}_2\text{O})$	$\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$\omega(\text{Loss})$	
41.58	28.02	16.03	7.9	2.56	1.61	0.9	0.64	0.37	0.39	

1.2 配合比及实验方案

灌浆材料的制备中,胶凝材料与石英砂的质量比为 1:1,胶凝材料 R·SAC42.5 的掺量为胶凝材料总量的 75%,P·O52.5 为 10%,粉煤灰为 5%,矿粉为 10%,水灰质量比为 0.25,聚羧酸减水剂掺量为 0.35%;缓

凝剂为葡萄糖酸钠,掺量为 0.06%;消泡剂为有机硅消泡剂,掺量为 0.3%。具体配合比见表 4。纳米 MgO 按照 0、0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2.0% 的掺量加入到灌浆材料中,测试纳米 MgO 的力学性能,掺入纳米 MgO 后灌浆材料的实验结果见表 5。

表 4 实验配合比

Table 4 Experimental mix ratio									g
$m(\text{R} \cdot \text{SAC42.5 水泥})$	$m(\text{P} \cdot \text{O52.5 水泥})$	$m(\text{粉煤灰})$	$m(\text{矿粉})$	$m(\text{石英砂})$	$m(\text{水})$	$m(\text{减水剂})$	$m(\text{缓凝剂})$	$m(\text{消泡剂})$	
675	90	45	90	900	225	3.15	0.54	2.7	

表 5 纳米 MgO 对灌浆材料力学性能的影响

Table 5 Effect of nano-MgO on mechanical properties of grouting materials						
纳米 MgO 掺量/%	抗压强度/MPa			抗折强度/MPa		
	1 d	3 d	28 d	1 d	3 d	28 d
0	37.67	53.93	62.68	5.318	6.834	9.469
0.4	40.12	55.51	62.96	5.901	6.877	10.272
0.8	42.26	56.58	63.92	5.953	7.699	10.454
1.2	41.31	55.34	64.07	5.985	7.668	10.780
1.6	38.24	55.12	66.25	5.401	6.911	10.776
2.0	38.30	50.71	65.44	5.321	6.338	11.057

通过纳米 MgO 改性灌浆材料的力学性能结果,选取纳米 MgO 的最优掺量。将制

备好的改性灌浆材料放到环境温度为 15±1℃、湿度为 90% 的养护箱中养护,用以

模拟地下空间环境条件,养护 12 h 后脱模,脱模后的灌浆材料置于盐碱水溶液环境中分别养护 28 d、90 d、150 d。参照《水泥基灌浆材料应用技术规范》(GB/T 50448—2015)<sup>[9]</sup>、《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)<sup>[10]</sup>及《水泥抗硫酸盐侵蚀试验方法》(GB/T 749—2008)<sup>[11]</sup>的要求,采用水溶液全浸泡法,测试改性灌浆材料在盐碱水溶液中的抗压强度、抗折强度,记录实验数据,并计算出耐蚀系数,分析灌浆材料在盐碱水环境中的耐侵蚀性能。

由于我国盐碱地区的盐碱含量高,盐的主要成分为  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ 。根据盐碱含量及成分,针对复杂的盐碱地水溶液条件,实验设定四种溶液环境,溶液一:水环境;溶液二:质量分数为 5% 的  $\text{NaCl}$  溶液;溶液三:质量分数 5% 的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液;溶液四:质量分数为 10% 的  $\text{NaOH}$  溶液。

由表 5 可以看出,掺入纳米  $\text{MgO}$  的灌浆材料,在龄期 1 d、3 d 时早期抗折强度与抗压强度分别在纳米  $\text{MgO}$  掺量为 0.8%、1.2% 时较大;而龄期在 28 d 时,抗折强度随着掺量增加而增加,抗压强度在掺量为 1.6% 时最大,为 66.25 MPa,比未掺纳米  $\text{MgO}$  灌浆材料的抗压强度增加了 5.69%。当掺量为 0~1.6% 时,龄期 1 d、3 d、28 d 的抗压强度、抗折强度均高于未掺入纳米  $\text{MgO}$  的灌浆材料。通过对掺量 0、0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2.0% 纳米  $\text{MgO}$  灌浆材料的力学性能进行测试,考虑灌浆材料的长期耐久性,实验中选取 28 d 抗压强度最优结果作为耐侵蚀实验的掺量。因此,改性灌浆材料制备中,建议所选取纳米  $\text{MgO}$  的掺量为 1.6%。

1.3 实验方法

1.3.1 力学性能测试

参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—2021)<sup>[12]</sup>,使用水泥胶砂抗折抗压试验机进行实验,测定灌浆材料的抗折强度和抗压强度。

1.3.2 耐蚀系数测试

耐蚀系数的计算式为

$$K_{\text{蚀}} = R_{\text{液}} / R_{\text{水}} \tag{1}$$

式中: $K_{\text{蚀}}$  为抗蚀系数; $R_{\text{液}}$  为试件浸泡在侵蚀溶液中至一定龄期时的抗折强度,MPa; $R_{\text{水}}$  为试件浸泡在水中至一定龄期时的折强度,MPa。

当  $K_{\text{蚀}} \leq 0.8$  时,认为试件抗侵蚀不合格,即试件遭受侵蚀破坏。

2 结果与分析

2.1 不同水溶液环境对灌浆材料抗折强度的影响

将纳米  $\text{MgO}$  按照 1.6% 的掺量掺入到灌浆材料中,采用水溶液全浸泡法,将灌浆材料放置在溶液一、溶液二、溶液三、溶液四环境中分别养护 28d、90d、150d,对灌浆材料进行抗折试验测试,结果如图 1 所示。

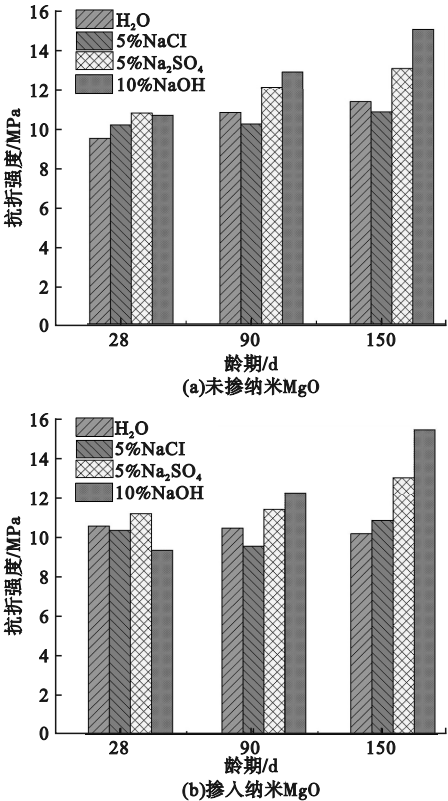


图 1 不同水溶液环境对灌浆材料抗折强度的影响  
Fig.1 Effect of different water solution environments on flexural strength of grouting materials

由图 1(a)可以看出,随着养护龄期的增长,灌浆材料的抗折强度均表现出上升的趋势,且在溶液四中,抗折强度上升的最为明显。在 150 d 龄期时,灌浆材料在溶液四中抗折强度要明显高于在其他水溶液的抗折强度,比在水中要高出 32.3%。由图 1(b)可以看出,掺入纳米 MgO 后,灌浆材料在溶液三和溶液四中的抗折强度随着龄期的增加而增大。28d 时,灌浆材料的抗折强度在溶液三中最高,而龄期为 90 d、150 d 时,灌浆材料在溶液四中的增加趋势最为明显。

对比图 1(a)与图 1(b)可以看出,掺入纳米 MgO 后,灌浆材料在溶液一中的抗折强度能够随龄期保持稳定,而在溶液三与溶液四的水溶液环境中,抗折强度呈现增长趋势。在溶液四中,龄期为 150 d 时,掺入纳米

MgO 灌浆材料的抗折强度相比未掺提高了 2.86%。由于在水泥水化中,纳米 MgO 能够填充灌浆材料的微小孔隙,促进水泥的水化反应,因此灌浆材料的抗折强度增加,此时将其置于水溶液环境中,能够抵抗水溶液的侵蚀<sup>[13]</sup>。而将灌浆材料置于 NaOH 碱性水溶液环境中,为硫铝酸盐水泥的水化提供了碱性条件,能够促进水泥的水化进程,因此灌浆材料的抗折强度呈现出增长的趋势<sup>[14]</sup>。

2.2 不同水溶液环境对灌浆材料耐蚀系数的影响

通过测试改性灌浆材料 28 d、90 d、150 d 的抗折强度,计算出灌浆材料的耐蚀系数。灌浆材料在不同水溶液环境中耐蚀系数的变化规律如图 2 所示。

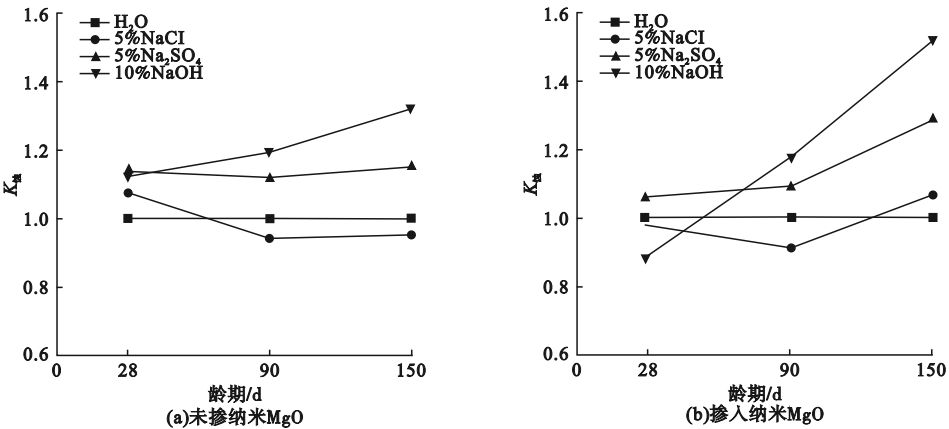


图 2 不同水溶液环境对灌浆材料耐蚀系数的影响

Fig. 2 Effect of different water solution environments on corrosion resistance coefficient of grouting materials

从图 2(a)可以看出,灌浆材料在 28 d、90 d、150 d 时的耐蚀系数  $K_{\text{蚀}}$  均大于 0.8,试件未遭受到侵蚀破坏。在溶液三、溶液四中的耐蚀系数均大于 1.0,表明灌浆材料在溶液三、溶液四中有优异的抗侵蚀能力。90 d 时,在溶液四中的耐蚀系数最大,比在溶液三中提高了 14.9%;而在 150 d 时,灌浆材料在溶液四中的耐蚀系数增长的更为明显,比在水中的耐蚀系数提高了 32.3%。从图 2(b)可以看出,掺入纳米 MgO 后,随着龄期的变化,灌浆材料在溶液三中,耐蚀系数均在 1.0 以上,且在 150 d

时,耐蚀系数为 1.288,比在水中要提高了 28.8%;而在溶液四环境下,耐蚀系数最大,为 1.524,比在水中提高了 52.4%。

对比图 2(a)和图 2(b)可以看出,掺入纳米 MgO 后,灌浆材料的耐蚀系数在龄期 150 d 时均大于未掺纳米 MgO 的,说明掺入纳米 MgO 后灌浆材料的耐侵蚀性能较未掺的要好。在溶液二中,当龄期为 90 d、150 d 时,未掺纳米 MgO 灌浆材料的耐蚀系数小于 1.0,而掺入纳米 MgO 后,耐蚀系数在 150 d 时大于 1.0,说明掺入纳米 MgO 后对



长期的耐侵蚀性能更有利。灌浆材料掺入纳米  $\text{MgO}$  后,在溶液三中,龄期 150d 时的耐蚀系数大于未掺的,提高了 11.90%。而在溶液四中,龄期为 90 d、150 d 时,掺入纳米  $\text{MgO}$  后灌浆材料的耐蚀系数远远超过未掺的,此时的耐侵蚀能力优异。可以看出,在长龄期情况下,掺入纳米  $\text{MgO}$  的灌浆材料有着良好的耐侵蚀能力。

2.3 不同水溶液环境对灌浆材料抗压强度的影响

将灌浆材料浸入到四种水溶液环境中养护至 28 d、90 d、150 d,并对灌浆材料进行相应龄期的抗压强度测试,不同水溶液环境对灌浆材料抗压强度影响的变化趋势如图 3 所示。

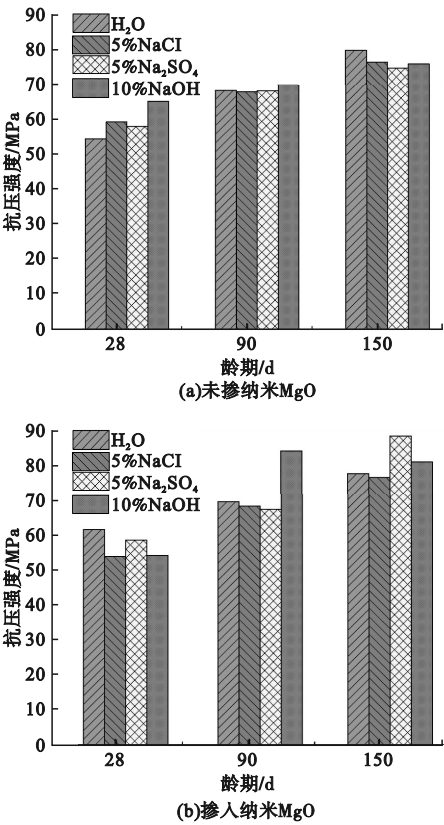


图 3 不同水溶液环境对灌浆材料抗压强度的影响  
Fig. 3 Effect of different water solution environments on compressive strength of grouting materials

从图 3(a) 中可以看出,随着龄期的增长,灌浆材料在溶液一、溶液二、溶液三、溶液四中的抗压强度均逐渐增大。在龄期 28 d

时,灌浆材料在溶液四中的抗压强度最大,随着龄期增长,当龄期为 150 d 时,灌浆材料在水中的抗压强度均大于其在其他水溶液中的抗压强度,说明此时灌浆材料在盐碱水溶液环境中均有侵蚀现象。从图 3(b) 中可以看出,掺入纳米  $\text{MgO}$  后,灌浆材料在溶液一、溶液二、溶液三中的抗压强度均逐渐增加,而在溶液四中为先增加后略有减小。在龄期 28 d 时,掺入纳米  $\text{MgO}$  的灌浆材料在盐碱水溶液中的抗压强度均小于其在水中的抗压强度。龄期 90 d 时,在溶液四中的抗压强度远远高于其他水溶液环境中的抗压强度。龄期 150 d 时,掺入纳米  $\text{MgO}$  灌浆材料在溶液三、溶液四中的抗压强度分别达到 88.38 MPa、81.04 MPa,比在水中分别提高了 13.69%、4.24%。可以看出,龄期为 90 d 时,掺入纳米  $\text{MgO}$  后,溶液四对抗压强度有利;龄期为 150 d 时,溶液三对抗压强度更有利。

对比图 3(a) 和图 3(b) 可以看出,与未掺纳米  $\text{MgO}$  的灌浆材料相比,掺入纳米  $\text{MgO}$  后的灌浆材料抗压强度在溶液三和溶液四中增长趋势最为明显,且长期内对灌浆材料的抗压强度无不利影响。这可能是由于纳米  $\text{MgO}$  能够与水泥的水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应,促进水泥的水化反应进程,生成钙矾石与凝胶等水化产物,能够提高灌浆材料强度<sup>[15-16]</sup>。而在  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  水溶液环境中,硫酸盐水泥水化可能生成各种侵蚀盐类,盐的膨胀性增加了密实度,使得强度增强。而在  $\text{NaOH}$  水溶液中,能为水泥水化提供碱性环境,对强度更有利<sup>[17-18]</sup>。

2.4 灌浆材料在溶液三环境中的 XRD 曲线

掺入纳米  $\text{MgO}$  的灌浆材料在龄期为 150 d 时,其抗压强度在溶液三环境中最高,为 88.38 MPa,选其进行 XRD 测试,结果如图 4 所示。从图中可以看出,未掺纳米  $\text{MgO}$  的灌浆材料与掺入纳米  $\text{MgO}$  的相比,有多个钙矾石的衍射峰,而掺入纳米  $\text{MgO}$  的灌浆材料除了有钙矾石生成外,还生成了镁盐

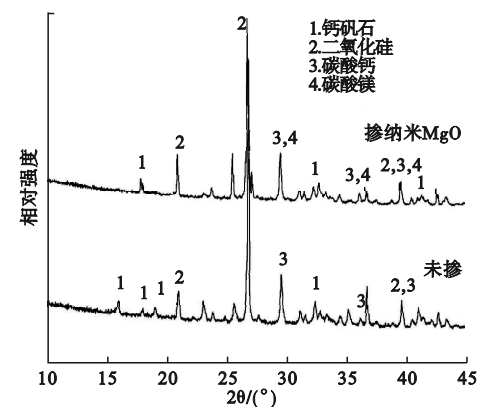


图4 灌浆材料在溶液三环境中的 XRD 曲线

Fig. 4 XRD curves of grouting material in the third solution environment

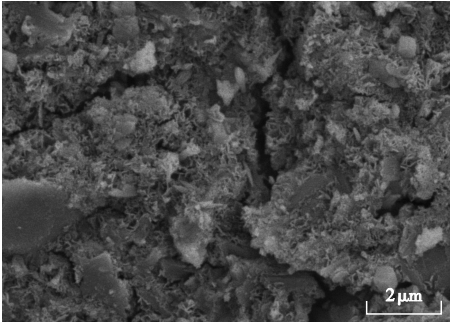
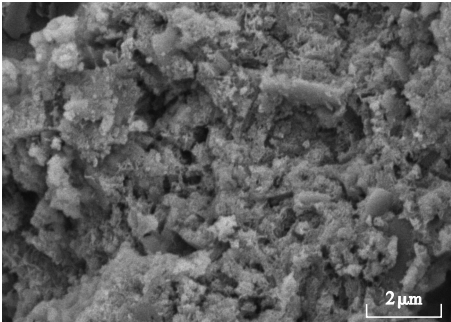
等复杂的盐类。硫铝酸盐水泥在水化过程中,主要生成水化硫铝酸钙、水化硅酸钙凝胶、铝相和铁相<sup>[19]</sup>,当灌浆材料浸入到溶液三中,未掺入纳米 MgO 的灌浆材料在硫酸盐的作用下,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 离子能够进入到灌浆材料的内部,促进水化产物钙矾石的生成<sup>[20]</sup>。在

灌浆材料中掺入纳米 MgO,在硫酸盐的存在下,灌浆材料水化生成的胶凝类物质不断溶出,Mg<sup>2+</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 离子进入到了钙矾石及水化凝胶物质的内部,与碳酸盐类发生了反应,生成碳酸镁盐等物质<sup>[21]</sup>。

2.5 灌浆材料在溶液三环境中的 SEM 图片

将灌浆材料在溶液三环境中浸泡 150 d,取破碎的试块进行烘干,采用扫描电子显微镜对灌浆材料水化产物结构及形貌特征进行观察,结果如图 5 所示。

从图 5(a)中可以看到,存在团簇状的水化产物,这主要是 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水溶液侵蚀灌浆材料后形成的侵蚀性水化产物,在一定程度上填充了灌浆材料的微小孔隙。而在图 5(b)中,存在大量相互交错的水化物质,这是掺入的纳米 MgO 在水化进程中,因 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的侵入产生的镁盐类物质相互交错。



(a)未掺纳米MgO

(b)掺入纳米MgO

图5 灌浆材料在溶液三环境中的 SEM 图

Fig. 5 SEM images of grouting material in the third solution environment

3 结 论

- (1)灌浆材料在四种水溶液环境中,均有良好的耐侵蚀能力。掺入纳米 MgO 后,龄期为 150 d 时,灌浆材料在溶液四环境中的抗折强度要优于其他龄期与水溶液的抗折强度,此时耐侵蚀能力最强。
- (2)在溶液三环境中,龄期为 150 d 时,掺入纳米 MgO 的灌浆材料抗压强度比在其他种类水溶液中要高,比未掺纳米 MgO 的提高了 17.85%。

参考文献

[ 1 ] 冯军波. 混凝土表面爆裂问题研究分析[J]. 建筑技术开发,2022,49(23):125-126.  
(FENG Junbo. Research and analysis for the concrete surface burst problem [J]. Building technology development,2022,49(23):125-126.)

[ 2 ] 卜晓琳. 碱矿渣自流平修补砂浆流动性能与粘结性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2020.  
(BU Xiaolin. Fluidity and adhesion of self-compacting alkali-activated slag repair mortar [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2020.)

[ 3 ] 丁建彤,宁逢伟,王奇. 盐碱地下水环境中桩

- 基混凝土耐腐蚀研究[J]. 混凝土, 2015(6): 153-156.  
(DING Jiantong, NING Fengwei, WANG Qi. Corrosion research on pile concrete in saline ground water environments [J]. Concrete, 2015(6): 153-156.)
- [4] 赵卫全, 汪文昭, 任增增, 等. 碳纳米管改性环保型环氧灌浆材料研究及应用. 中国建筑防水, 2021(5): 16-20.  
(ZHAO Weiquan, WANG Wenzhao, REN Zengzeng, et al. Research and application of carbon nanotube modified environment friendly epoxy grouting material [J]. China building waterproofing, 2021(5): 16-20.)
- [5] 孙长征, 张晓平, 郭志刚. 减水剂及保水剂对超早强灌浆料性能影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(2): 286-294.  
(SUN Changzheng, ZHANG Xiaoping, GUO Zhigang. Effects of water reducing agent and retaining agent on performances of super early strength grouting material [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(2): 286-294.)
- [6] CHITHRA S, KUMAR S R R S, CHINNARAJU K. The effect of colloidal nano-silica on workability, mechanical and durability properties of high-performance concrete with copper slag as partial fine aggregate [J]. Construction and building materials, 2016, 113: 794-804.
- [7] CHITTARANJAN B N, PRATIK P T, UMESH T J, et al. Effect of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{ZnO}$  nano-composites on mechanical and chemical properties of modified concrete [J]. Iranian journal of science and technology, transactions of civil engineering, 2022, 46: 1237-1247.
- [8] RECHES Y, THOMAON K, HELBING M, et al. Agglomeration and reactivity of nanoparticles of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and clays in cement pastes and effects on compressive strength and thermal durability [J]. Construction and building materials, 2018, 167: 860-873.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水泥基灌浆材料应用技术规范: GB/T 50448—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. Technical code for application of cementitious grout: GB/T 50448—2015 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2015.)
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2009 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2009.)
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 水泥抗硫酸盐侵蚀试验方法: GB/T 749—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
(State General Administration of the People's Republic of China for Quality Supervision and Inspection and Quarantine. Test method for determining capability of resisting sulfate corrode of cement: GB/T 749—2008 [S]. Beijing: China Standard Press, 2008.)
- [12] 国家市场监督管理总局. 水泥胶砂强度检验方法(ISO法): GB/T 17671—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.  
(State Administration for Market Regulation. Test method for determining strength of cement mortar (ISO method): GB/T 17671—2021 [S]. Beijing: China Standard Press, 2021.)
- [13] TIAN C J, WANG Y Z, QIU K, et al. Effects of submicron-MgO and nano-MgO on the expansion and microscopic properties of high-performance concrete [J]. Journal of central south university, 2022, 29: 3186-3200.
- [14] 朱航宇. 碱及养护条件对硫铝酸盐水泥性能的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.  
(ZHU Hangyu. Effect of alkali and curing conditions on properties of sulphoaluminate cement [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.)
- [15] WANG Y S, XU Z H, WANG J B, et al. Synergistic effect of nano-silica and silica fume on hydration properties of cement-based materials [J]. Journal of thermal analysis and calorimetry, 2020, 140: 2225-2235.
- [16] MA B G, LI H N, MEI J P, et al. Effect of Nano- $\text{TiO}_2$  addition on the hydration and hardening process of sulphoaluminate cement [J]. Journal of Wuhan university of technology (materials science edition), 2015, 30: 768-773.
- [17] Lü Q F, WANG Z S, GU L Y, et al. Effect of sodium sulfate on strength and microstructure of alkali-activated fly ash based geopolymer [J]. Journal of central south university, 2020, 27: 1691-1702.
- [18] 余睿, 王大勇, 钱雕, 等. 盐碱地区混凝土材料的耐久性评价及对策分析[J]. 防护工程, 2020, 42(3): 71-78.  
(YU Rui, WANG Dayong, QIAN Diao, et al. Durability evaluation and strategy analysis of concrete materials in saline-alkali areas [J]. Protective engineering, 2020, 42(3): 71-78.)
- [19] HE Z, YANG H, HU S G, et al. Hydration mechanism of silica fume-sulphoaluminate cement [J]. Journal of Wuhan university of technology (materials science edition), 2013, 28: 1128-1133.
- [20] JIANG L, NIU D T, SUN Y Z, et al. Ultrasonic testing and microscopic analysis on concrete under sulfate attack and cyclic environment [J]. Journal of central south university, 2014, 21: 4723-4731.
- [21] 王琨. 干湿交替环境下混凝土硫酸盐侵蚀力学性能劣化演变试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.  
(WANG Kun. Experimental study on deterioration of mechanical properties of concrete sulfate erosion under drying-wetting and environments [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)