

文章编号:1007-9629(2026)03-0372-08

纳米二氧化硅改性磷酸镁水泥砂浆的 性能优化与微观机理

贾亮*, 贾伟伟, 吴旋

(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:以纳米二氧化硅(NS)等质量取代过烧氧化镁(MgO),制备了不同NS掺量(0%~4%)的磷酸镁水泥(MPC)砂浆,系统研究了NS对砂浆性能的影响。结果表明:当NS掺量为4%时,MPC凝结时间较基准组缩短22.7%;在3%掺量下,砂浆标准养护28 d的抗压强度较未掺NS组提升29.9%;浸水养护(7 d标准+28 d浸水)后,掺3%NS的砂浆表现出最优耐水性,其抗压与抗折强度保留率分别达1.170和1.023。微观分析表明,NS通过双重机制优化MPC砂浆性能:其一,纳米颗粒有效填充材料孔隙,提升微观致密度;其二,NS参与二次水化反应生成M-S-H凝胶,在孔隙内部形成致密保护层,从而显著增强耐水性。本研究明确了NS改性MPC砂浆的作用机理,确定3%为最佳掺量,为开发高性能混凝土修补材料提供了理论依据与技术参考。

关键词:磷酸镁水泥;纳米二氧化硅(NS);力学性能;耐水性能;微观机理

中图分类号:TQ172.7

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2026.03.012

Performance Optimization and Microscopic Mechanism of Nano-silica Modified Magnesium Phosphate Cement Mortar

JIA Liang*, JIA Weiwei, WU Xuan

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China)

Abstract: This study prepared magnesium phosphate cement-nano-silica (MPC-NS) composite mortars with different NS contents (0%–4%) by replacing dead-burned magnesium oxide (MgO) with nano-silica (NS) at equal mass, and systematically investigated the effect of NS on the properties of the mortars. The results showed that when the NS content was 4%, the setting time of the mortar was shortened by 22.7% compared with the reference group; at 3% NS content, the compressive strength after 28 days of standard curing was increased by 29.9% compared with the group without NS addition; after immersion curing (7 days of standard curing followed by 28 days of immersion), MPC-3NS exhibited the optimal water resistance, with the retention rates of compressive and flexural strengths reaching 1.170 and 1.023, respectively. Microscopic analysis indicated that NS optimized the properties of MPC through a dual mechanism: first, the nanoparticles effectively filled the pores of the material and improved the micro-density; second, NS participated in the secondary hydration reaction to generate M-S-H gel, forming a dense protective layer inside the pores, thus significantly enhancing water resistance. This study clarified the modification mechanism of NS on MPC and confirmed that 3% is the optimal NS content, providing a theoretical basis and technical reference for the development of high-performance concrete repair materials.

Key words: magnesium phosphate cement; nano-silica; mechanical property; water resistance; microstructure; hydration mechanism

收稿日期:2025-05-20; 修订日期:2025-07-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51568944)

第一作者(通讯作者):贾亮(1978—),男,甘肃白银人,兰州理工大学副教授,硕士生导师,博士。E-mail:jialiang@lut.edu.cn

在长期荷载与环境侵蚀共同作用下,混凝土结构易出现开裂、碳化及表层剥蚀等病害,严重影响其耐久性与安全性。磷酸镁水泥(MPC)作为一种快速修补材料^[1-2],具备可低温施工、耐高温等优点,在混凝土快速修补等领域展现出良好的应用前景^[3-8]。

为解决MPC水化放热剧烈与耐水性不足等问题,已有研究提出了多种改性方法,其中矿物掺合料改性效果尤为突出。常用的矿物掺合料包括粒化高炉矿渣^[9]、粉煤灰^[10-11]与偏高岭土^[12],它们通过物理填充与化学活性共同优化MPC的微观结构与力学性能^[13-14]。此外,纳米材料因其小尺寸效应、高比表面积及火山灰活性等特性,能够显著改善胶凝材料的力学性能与微观结构。例如,在普通硅酸盐水泥中掺入2%~4%的纳米Al₂O₃可显著提高混凝土的致密性^[15-18]。近年来,纳米二氧化硅(NS)凭借其优异的物理化学特性,在水泥基材料中受到广泛关注^[19-20]。为探究NS在MPC中的作用机制,Xie等^[21]研究了含硅灰的MPC水化过程,发现在MgO-SiO₂-K₂HPO₄体系中可生成硅酸镁及无定型磷酸硅凝胶。然而,关于NS对MPC耐水性能的改善效果及其改性机理的系统研究仍较为缺乏。

为此,本文通过以0%、1%、2%、3%和4%的NS等质量取代MgO,制备NS改性MPC砂浆(MPC-NS砂浆),研究NS掺量对MPC凝结时间及MPC砂浆抗压强度、抗折强度及耐水性的影响。并借助X射线衍射(XRD)、扫描电镜-能谱(SEM-EDS)及热重(TG-DTG)分析等手段,分析MPC-NS砂浆的微观结构演变与反应过程,揭示NS对MPC砂浆的增强机制与耐水提升机理。

1 试验

1.1 材料和配合比

MPC基料包括:高温煅烧氧化镁(1700℃,棕色粉末,简写M,化学组成(质量分数,本文涉及的组成、胶砂比等除特别说明外均为质量分数或质量比)见表1)、磷酸二氢钾(KH₂PO₄,KDP)和硼砂(Na₂B₄O₇·10H₂O,NBO)。砂为标准砂(S)。水(W)为自来水。选用平均粒径30nm的NS作为改性材料。通过前期试验优化,确定MPC-NS砂浆的最佳配合比:胶(B)砂比(m_B/m_S)为1,水胶比(m_W/m_B)为0.18,KDP与M和NS的质量比(m_{KDP}/m_{M+NS})为1/3,NBO与B的质量比(m_{NBO}/m_B)为0.04。该配比可有效避免拌合物出现干凝无法成型或泌水现象。

表1 过烧氧化镁的化学组成

Table 1 Chemical composition (by mass) of dead-burned magnesium oxide

Unit: %					
MgO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Other
95.25	2.14	1.53	0.25	0.60	0.23

1.2 试样制备

按表2的配合比将MPC基料、NS、S和W加入搅拌机中,先慢速搅拌30s,再快速搅拌90s至均匀。参照GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》,将拌合物注入40mm×40mm×160mm的三联模,振捣密实后覆膜养护。将脱模后试样置于标准养护箱((20±2)℃,相对湿度不小于95%)中至规定龄期。

表2 MPC-NS砂浆的配合比

Table 2 Mix Proportions of MPC-NS mortars

Group	$\omega(\text{NS})/\%$	$m_{\text{KDP}}/m_{\text{M+NS}}$	m_{NBO}/m_B	m_W/m_B	m_B/m_S
MPC-0NS	0	1/3	0.04	0.18	1
MPC-1NS	1	1/3	0.04	0.18	1
MPC-2NS	2	1/3	0.04	0.18	1
MPC-3NS	3	1/3	0.04	0.18	1
MPC-4NS	4	1/3	0.04	0.18	1

1.3 试验方法

1.3.1 凝结时间

参考GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》,采用维卡仪测定MPC-NS胶凝体系(表2中不含标准砂的MPC-NS体系)的凝结时间。测试初期每30s记录试针下沉深度;接近初凝时提高至15s/次,直至连续2次结果稳定,记录时间为初凝时间。由于MPC-NS胶凝体系水化迅速,初凝与终凝间隔短,本研究以初凝时间作为其凝结特性的评价指标。

1.3.2 力学性能测试

按照GB/T 17671—2021标准执行,采用WDW-100D型万能试验机。MPC-NS砂浆的抗压强度测试加载速率为(2.4±0.2)kN/s;抗折强度测试采用三点弯曲法,加载速率(0.05±0.01)kN/s。所有测试均在无侧限条件下完成,根据破坏荷载计算强度值。

1.3.3 耐水性测试

以强度保留率(K)评价MPC-NS砂浆的耐水性。“7d标准养护+28d浸水养护((20±2)℃)”的制度,简写“7d+28d”。分别测定MPC-NS砂浆标准养护7d的基准强度 f_{7d} 与浸水28d后强度 f_{7d+28d} ,按式(1)计算K。

$$K = \frac{f_{7d}}{f_{7d+28d}} \quad (1)$$

1.3.4 微观性能测试

将规定龄期的MPC-NS砂浆试块用无水乙醇浸泡终止水化, (60±2) °C真空干燥后研磨成粉。采用XRD-7000X衍射仪进行晶相分析;使用JSM-5600LV型SEM-EDS进行形貌观测与元素分析;使用PYRIS-1型热重分析仪,在氮气氛围下以(20~1 000) °C进行TGA-DTG测试,以探究NS的火山灰活性及水化产物演变。

2 试验结果与讨论

2.1 NS掺量对MPC-NS胶凝体系凝结时间的影响

图1展示了NS掺量对MPC-NS胶凝体系凝结时间的影响规律。由图1可见,随着NS掺量从0%提高至4%,MPC-NS胶凝体系凝结时间显著缩短,由22 min降至最低值17 min,降幅达22.7%。这种加速凝结效应主要归因于NS的双重作用机制:其一,NS具有高比表面积及丰富的表面硅羟基,为水化反应提供了大量成核位点,显著提高了MgKPO₄·6H₂O等水化产物的形成速率^[22-23];其二,NS颗粒对自由水具有较强的吸附

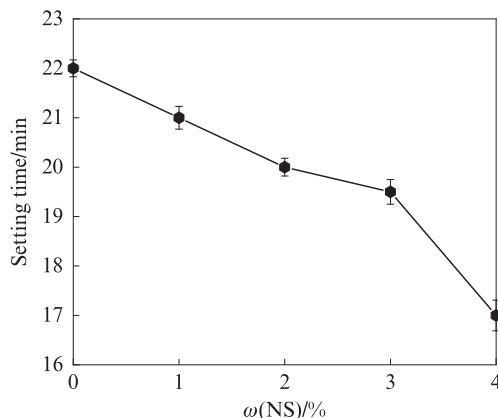


图1 NS掺量对MPC-NS胶凝体系凝结时间的影响
Fig. 1 Effect of NS content on setting time of MPC-NS binding system

能力,有效降低了颗粒间水膜厚度,从而增强了固体颗粒间的范德华力与机械咬合作用^[24-25]。上述“物理-化学”协同作用共同提高了MPC-NS胶凝体系的内聚能与摩擦阻力,最终表现为凝结时间的明显缩短。

2.2 NS掺量对MPC-NS砂浆力学性能的影响

通过力学性能试验揭示了NS掺量对MPC-NS砂浆抗压和抗折强度的影响规律,结果如图2所示。

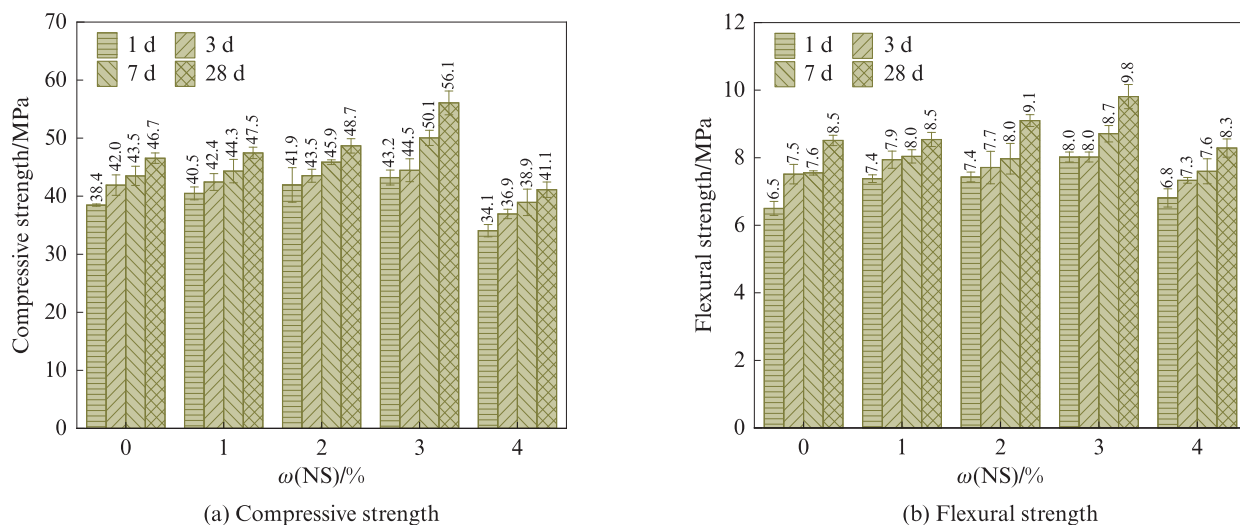


图2 NS掺量对MPC-NS砂浆抗压和抗折强度的影响

Fig. 2 Effect of NS content on compressive and flexural strength of MPC-NS mortars

由图2可见:(1)当NS掺量为3%时,砂浆表现出最优力学性能,其1 d抗压强度达43.2 MPa,较基准组(MPC-0NS)试件提高12.5%;28 d后,试件MPC-3NS的抗压强度进一步增至56.1 MPa,较同期基准组试件MPC-0NS提升20.1%。总体来看,砂浆抗压强度随NS掺量变化呈先升后降趋势,在3%掺量时达到峰值;继续提高掺量至4%时,因纳米颗粒

团聚效应,强度出现回落。(2)NS改性MPC砂浆的抗折强度发展规律与抗压强度趋势基本一致。除4%掺量外,其余掺量的抗折强度均高于基准组。在7 d和28 d龄期下,抗折强度随NS掺量增加同样呈现先升高后降低的变化。当NS掺量为3%时,7 d抗折强度达8.7 MPa,较基准组提升14.5%;28 d抗折强度达9.8 MPa,较基准组提升15.3%。

2.3 MPC-NS砂浆的耐水性能

表3给出了浸水养护(7 d标准养护+28 d浸水养护)前后MPC-NS砂浆试件的抗压与抗折强度保留率(K)。由表3可知,经浸水养护后,未掺NS的砂浆试件MPC-0NS抗压与抗折强度保留率分别为0.862和0.868。相比之下,掺入NS的MPC砂浆(除1%掺量组的抗折强度外)强度保留率均大于1,其中3% NS掺量的试件MPC-3NS表现最为突出,抗压与抗折强度保留率分别达到1.170和1.023,表明其具有优异的耐水性能。NS通过双重机制提升砂浆

耐水性:其一,纳米颗粒有效填充砂浆孔隙,使微观结构更致密;其二,在浸水养护期间,NS持续参与二次水化,促进新胶凝产物生成。可见3% NS掺量能在保证砂浆初始性能的同时,最大程度地提高其长期耐水性。

2.4 MPC-NS砂浆的反应机理

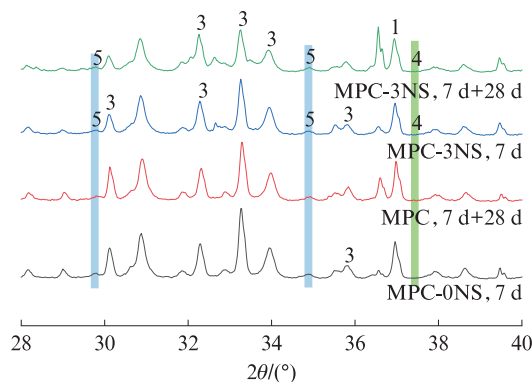
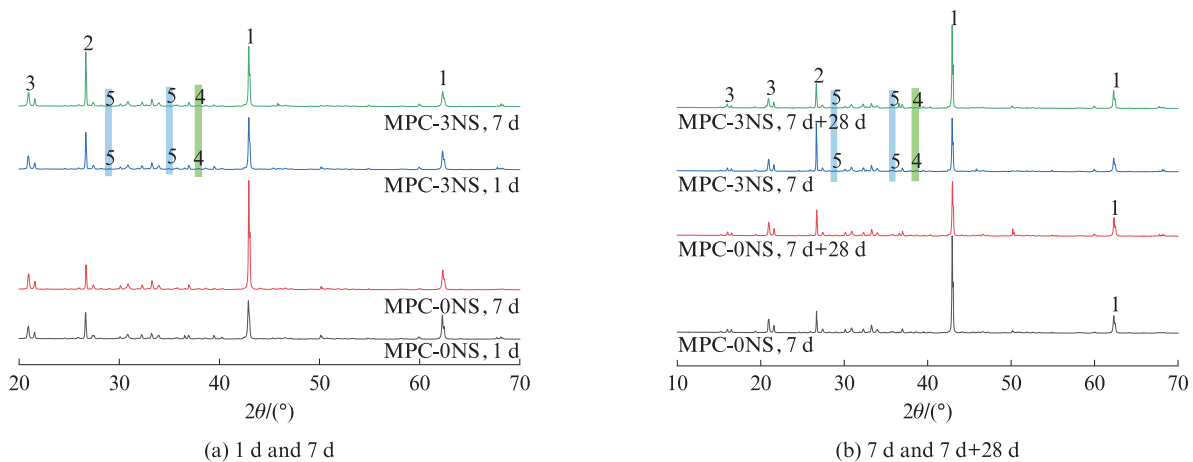
为探究NS的作用机理,对MPC-0NS和MPC-3NS砂浆进行XRD、SEM-EDS和TG-DTG测试与分析。

2.4.1 XRD分析

MPC-NS砂浆的XRD测试结果如图3所示。

表3 MPC-NS砂浆试件的抗压和抗折强度保留率
Table 3 Retained coefficients for compressive and flexural strength of MPC-NS mortar specimens

Specimen	Compressive strength/MPa		K	Flexural strength/MPa		K
	7 d	7 d+28 d		7 d	7 d+28 d	
MPC-0NS	43.5	37.5	0.862	7.6	6.6	0.868
MPC-1NS	44.3	46.2	1.043	8.0	7.6	0.950
MPC-2NS	46.1	52.6	1.141	8.0	8.2	1.025
MPC-3NS	50.0	58.5	1.170	8.7	8.9	1.023
MPC-4NS	39.9	40.8	1.023	7.6	8.5	1.118



(c) Angular range from 28° to 40°

1—MgO; 2—SiO₂; 3—MgKPO₄·6H₂O; 4—Mg(OH)₂; 5—M-S-H gels

图3 MPC-NS砂浆的XRD图谱

Fig. 3 XRD patterns of MPC-NS mortars

由图3可见:(1)MPC主要水化产物为K-鸟粪石($\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$),并存在未反应MgO($2\theta=42.5^\circ$)。掺入3%NS后,MgO衍射峰强度明显降低,表明NS促进了MgO的水解反应。其作用机制主要包括两方面:首先, KH_2PO_4 分解产生的 H^+ 加速了MgO水解生成 Mg^{2+} 与 OH^- ;随后,这些离子与NS反应形成M-S-H凝胶,该凝胶具有优异的填充性能,可有效密实砂浆内部的孔隙与微裂缝。(2)MPC-NS中存在大量未反应MgO($2\theta=42.5^\circ$ 和 $2\theta=62.3^\circ$),与Qiao等^[26]的研究结果一致,说明在MgO与磷酸盐摩尔比为4:1的条件下,仅约20%的MgO参与了反应。K-鸟粪石在所有样品中均被检测到,为MPC主要水化产物。浸水养护后,MgO与K-鸟粪石的衍射峰强度均降低,前者反映了MgO的持续溶解或水化,后者则与砂浆耐水性下降直接相关;同时,检测到少量 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 中间产物。这表明NS的引入显著改变了水化进程:一方面,未反应MgO含量进一步减少;另一方面,检测到M-S-H凝胶的形成。与未掺NS的MPC-0NS组相比,其它MPC-NS组在浸水后K-鸟粪石的衍射峰强度更高,证实NS对耐水性的提升作用。

综上,NS通过双重机制改善MPC-NS砂浆性

能:促进MgO持续水化,以及通过M-S-H凝胶填充孔隙、形成致密微观结构,从而协同提高砂浆的力学性能与耐水性。

2.4.2 SEM-EDS测试

图4展示了0%与3%NS掺量下MPC-NS砂浆标准养护7d后的SEM图像。由图4可见:(1)未掺NS的MPC砂浆试样中存在大量晶体和较大的球状颗粒(Area 1),EDS分析表明其主要成分为Mg和O,推测其为未反应的MgO颗粒。这些晶体与颗粒周围分布着较多细小孔洞,形成较为连续的网状孔隙结构。(2)掺入3%NS后,MPC-NS砂浆试样的水化产物呈现更明显的柱状结晶形态。EDS分析(Area 2)显示该区域含有Si、O、Al、K等元素,推测为NS颗粒及其反应产物,微观结构更致密,且表面覆盖一层致密的絮状凝胶,这种二次水化产物有效填充孔隙,显著改善整体微观形貌。结合XRD分析可证实,NS的引入促使溶液中生成 SiO_3^{2-} ,进而与 Mg^{2+} 发生二次水化反应,生成 MgSiO_3 、 Mg_2SiO_4 等硅酸镁凝胶物质。这表明NS不仅作为填充相存在,更通过化学反应参与水化进程,从而提升砂浆的致密性与耐久性。

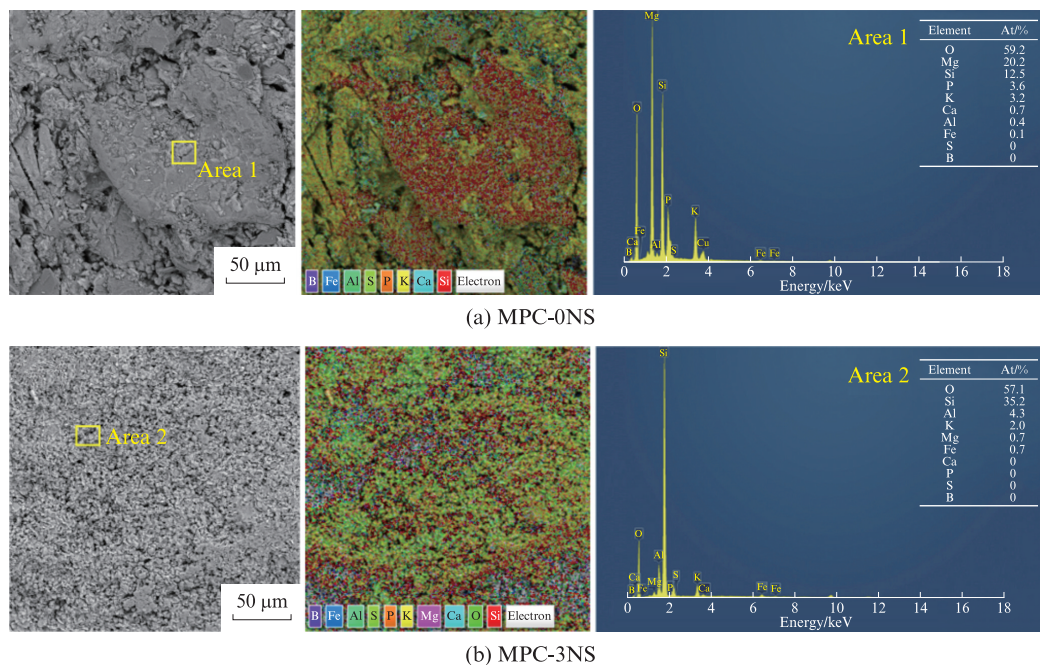


图4 养护龄期为7d时MPC-NS的SEM图像与EDS图谱
Fig. 4 SEM images and EDS spectra of MPC-NS at a curing time of 7 d

为进一步揭示浸水养护条件下MPC-NS砂浆强度提升的机理,本研究对比了浸水养护28d后MPC-0NS与MPC-3NS砂浆试样的微观结构变化,如图5所示;并对图5样品进行EDS分析,结果如图6所示。

由图5、6可见:(1)浸水前,MPC-NS中的K-鸟粪石呈棒状晶体簇团形态,周围被未反应MgO包裹,结

构较为密实(见图5(a));浸水28d后,K-鸟粪石发生部分溶解、晶体尺寸减小,砂浆中形成明显裂隙(图5(b))。对图5(b)中细长棒状结晶(Area 1)进行EDS分析(图6(a)),其主要成分为Mg、O、P、K、Si、Ca,其中Mg与K原子百分比分别为16.49%与14.56,原子比接近1:1,证实该区域为K-鸟粪石。其部分溶解被

认为是导致 MPC 砂浆强度下降、界面劣化的主要原因之一。(2)尽管浸水后 MPC-3NS 砂浆中亦出现不规则微断裂,其微观结构仍保持较高的完整性与致密性。对图 5(c)中 Area 2 进行 EDS 分析(图 6(b)),该区域含有 Mg、P、K、O、Si 等元素,其中 Mg 含量仅下降 3.26%,显著低于 MPC 砂浆的损失程度。

上述结果表明,NS 通过双重机制提升 MPC 的耐水性:其一,NS 凭借高比表面积与丰富表面羟基

吸附 K^+ 、 Mg^{2+} 等离子,降低溶液中离子浓度,抑制 K-鸟粪石的溶解;其二,NS 促进生成 M-S-H 凝胶,在晶体表面形成致密保护层,有效阻隔水分侵蚀,从而维持砂浆的微观结构稳定性与力学性能。

2.4.3 TG-DTG 分析

通过 TG-DTA 分析了未掺与掺入 3% NS 的 MPC-NS 砂浆的热分解行为,以明确 NS 对水化产物组成的影响,结果如图 7 所示。由图 7 可见:(1)

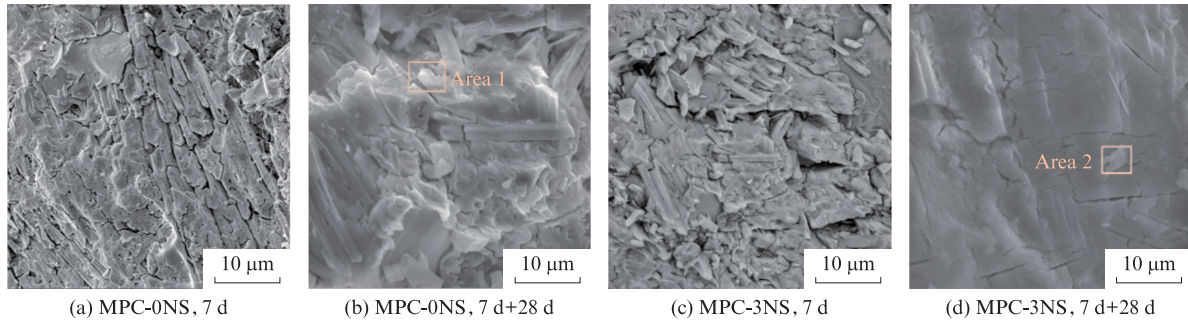


图 5 MPC-NS 砂浆浸水前后 SEM 图片

Fig. 5 SEM images of MPC-NS mortars before and after water immersion:

Element	w/%	At/%
Mg	19.00	16.49
P	14.82	12.10
O	48.11	67.44
K	15.86	14.56
Si	1.06	0.80
Ca	0.90	0.47

Element	w/%	At/%
Mg	14.27	12.23
P	16.56	12.05
K	21.70	12.51
O	40.25	56.70
Si	5.86	4.70
Ca	0.87	0.49
Al	0.26	0.22

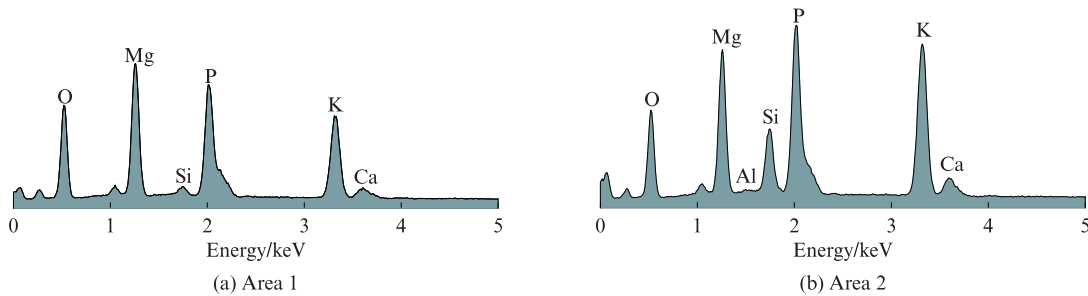


图 6 EDS 分析结果

Fig. 6 EDS analysis results

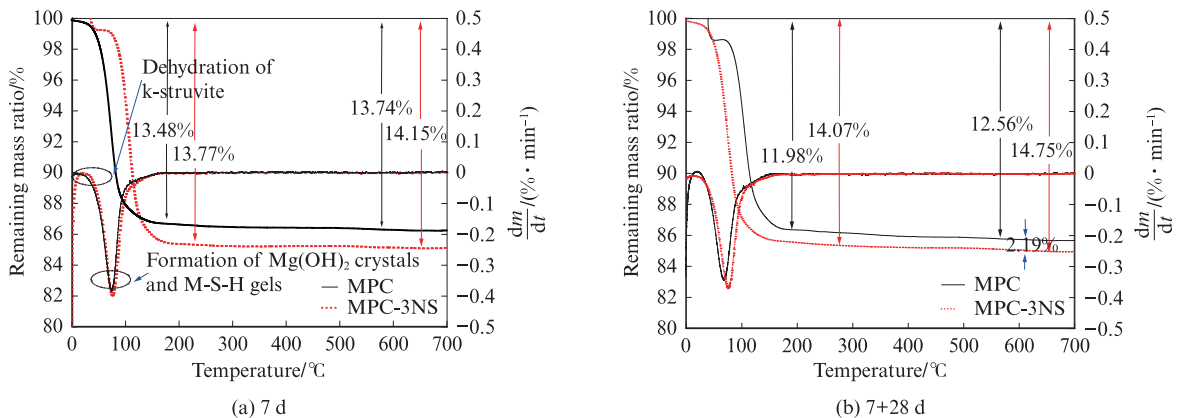


图 7 不同养护条件下样品 MPC-0NS 和 MPC-3NS 的 TG-DTG 曲线

Fig. 7 TG-DTG curves of sample MPC-0NS and MPC-3NS under different curing conditions

MPC-0NS浆体在20~700℃范围内的质量损失为13.74%，而MPC-3NS浆体的质量损失为14.15%。NS的掺入使浆体质量损失略有增加，这可能归因于其促进更多水化产物（尤其是M-S-H凝胶）的生成。NS通过部分替代MgO，增加了体系中的颗粒数量，为水化结晶提供了更多成核位点，从而使反应更为充分。(2)浸水养护后，MPC-0NS砂浆的质量损失减少1.18%，说明水分侵蚀加速了K-鸟粪石的溶解，这是其耐水性差的主要原因。相比之下，MPC-3NS的质量损失进一步增至14.75%，证实NS在浸水条件下仍能促进更充分的水化反应，有助于维持产物的稳定性与结构的致密性。

3 结论

(1)纳米二氧化硅(NS)显著加速了磷酸镁水泥(MPC)的水化进程，当掺量达到4%时，MPC凝结时间缩短至17 min，较不掺时降低22.7%。这主要归因于NS的高比表面积为水化产物提供了大量成核位点，促进反应进行。

(2)当NS掺量为3%时，MPC-NS砂浆的早期强度未见明显下降，而后期的抗折与抗压强度均显著提高。在标准养护28 d条件下，其抗压强度较未掺NS时提升29.9%，表明NS对MPC早期力学性能影响较小，但对长期强度发展具有显著的增强作用。

(3)掺3%NS的MPC-NS砂浆在7 d标准养护+28 d浸水养护后，其抗压与抗折强度保留率分别达到1.170和1.023，明显优于不掺NS组(0.862和0.868)，证实NS改性可有效改善MPC耐水性不足的问题。

(4)未掺NS的MPC砂浆耐水性较差的主要原因在于其水化产物K-鸟粪石在水中易发生溶解，导致孔隙率上升、强度下降。而在MPC-NS体系中，水化生成的M-S-H凝胶能够有效填充产物内部孔隙，提高结构致密性，并在表面形成致密保护层，从而显著增强砂浆的耐水性能。

参考文献：

- [1] 刘进, 冯润华, 张增起. 磷酸镁水泥性能的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(23): 23068-23075.
LIU Jin, GUO Runhua, ZHANG Zengqi. Research progress of properties of magnesium phosphate cement [J]. Materials Reports, 2021, 35(23): 23068-23075. (in Chinese)
- [2] ROY D M. New strong cement materials: Chemically bonded ceramics[J]. Science, 1987, 235(4789): 651-658.
- [3] LIU F, PAN B F, ZHOU C J. Experimental study on a novel modified magnesium phosphate cement mortar used for rapid repair of Portland cement concrete pavement in seasonally frozen areas[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(3): 04021483.
- [4] 周宇, 金海森, 周子涵, 等. 干湿循环作用下磷酸镁水泥硬化体性能劣化与机理[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(8): 707-716.
ZHOU Yu, JIN Haisen, ZHOU Zihan, et al. Study on the law and mechanism of damage and deterioration of magnesium phosphate cement under the action of dry-wet cycle[J]. Journal of Building Materials, 2025, 28(8): 707-716. (in Chinese)
- [5] LI Z H, ZHANG T S, HU J, et al. Characterization of reaction products and reaction process of MgO-SiO₂-H₂O system at room temperature[J]. Construction and Building Materials, 2014, 61: 252-259.
- [6] 杨建明, 史才军, 常远, 等. 掺复合缓凝剂的磷酸钾镁水泥浆体的水化硬化特性[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1): 43-49.
YANG Jianming, SHI Caijun, CHANG Yuan, et al. Hydration and hardening characteristics of potassium magnesium phosphate cement slurry mixed with composite retarder [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1): 43-49. (in Chinese)
- [7] ZHANG T, VANDEPERRE L J, CHEESEMAN C R. Formation of magnesium silicate hydrate (M-S-H) cement pastes using sodium hexametaphosphate [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 65: 8-14.
- [8] CAO X, ZHANG Q S, YANG W C, et al. Lead-chlorine synergistic immobilization mechanism in municipal solid waste incineration fly ash (MSWIFA)-based magnesium potassium phosphate cement[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 442: 130038.
- [9] LIU Y T, CHEN B. Research on the preparation and properties of a novel grouting material based on magnesium phosphate cement [J]. Construction and Building Materials, 2019, 214: 516-526.
- [10] SUN D D, WU K, KANG W, et al. Characterisation of water stability of magnesium phosphate cement blended with steel slag and fly ash[J]. Advances in Cement Research, 2020, 32(6): 251-261.
- [11] 刘进, 韩达, 张增起. 单掺粉煤灰和矿渣粉对磷酸镁水泥水化进程及强度的影响[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(7): 2472-2478.
LIU Jin, HAN Da, ZHANG Zengqi. Effects of single-doped fly ash and GGBS on hydration process and strength of magnesium phosphate cement [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(7): 2472-2478. (in Chinese)
- [12] MO L W, LV L M, DENG M, et al. Influence of fly ash and metakaolin on the microstructure and compressive strength of magnesium potassium phosphate cement paste [J]. Cement and Concrete Research, 2018, 111: 116-129.
- [13] 蒋晚晚, 朱金才, 孟晓凯, 等. 石灰石粉复合磷酸镁水泥的高温性能及机理[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(6): 499-507.
JIANG Wanwan, ZHU Jincai, MENG Xiaokai, et al. The properties and mechanisms of limestone powder blended MPC under high-temperature [J]. Journal of Building Materials, 2025,

- 28(6):499-507. (in Chinese)
- [14] 李东旭,李鹏晓,冯春花. 磷酸镁水泥耐水性的研究[J]. 建筑材料学报, 2009,12(5):505-510.
LI Dongxu, LI Pengxiao, FENG Chunhua. Study on water resistance of magnesium phosphate cement[J]. Journal of Building Materials, 2009,12(5):505-510. (in Chinese)
- [15] 肖建庄,李标,张凯建,等. 纳米二氧化硅改性再生混凝土的单轴受压动态力学性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021,49(1):30-39.
XIAO Jianzhuang, LI Biao, ZHANG Kaijian, et al. Dynamic mechanical properties of nano-silica modified recycled aggregate concrete under uniaxial compression [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(1):30-39. (in Chinese)
- [16] 鲍玖文,张洪锐,方晓龙,等. 纳米二氧化硅改性再生粗骨料混凝土性能的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2023,51(8):2045-2053.
BAO Jiuwen, ZHANG Hongrui, FANG Xiaolong, et al. Properties of recycled coarse aggregate concrete modified by silica nanoparticles: A short review [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(8):2045-2053. (in Chinese)
- [17] FENG H, ZHAO X Y, CHEN G, et al. The effect of nano-particles and water glass on the water stability of magnesium phosphate cement based mortar[J]. Materials, 2019, 12(22):3755.
- [18] FENG H, SHEN S H, PANG Y Y, et al. Mechanical properties of fiber and nano- Al_2O_3 reinforced magnesium phosphate cement composite[J]. Construction and Building Materials, 2021, 270:121861.
- [19] 王娟,王文超,许耀群,等. 纳米 SiO_2 对橡胶混凝土断裂行为的影响[J]. 建筑材料学报, 2023,26(7):731-738.
WANG Juan, WANG Wenchao, XU Yaoqun, et al. Effect of nano- SiO_2 on fracture behavior of rubber concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023,26(7):731-738. (in Chinese)
- [20] 栾轶博,李志刚,刘聪,等. 纳米二氧化硅乳化沥青的制备与Pickering乳化机理分析[J]. 建筑材料学报, 2020,23(1):150-155.
LUAN Yibo, LI Zhigang, LIU Cong, et al. Preparation of nano- SiO_2 emulsified asphalt and Pickering emulsification mechanism [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):150-155. (in Chinese)
- [21] ODERJI S Y, CHEN B, AHMAD M R, et al. Fresh and hardened properties of one-part fly ash-based geopolymer binders cured at room temperature: Effect of slag and alkali activators[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 225:1-10.
- [22] WANG J B, ZHOU T T, XU D Y, et al. Effect of nano-silica on the efflorescence of waste based alkali-activated inorganic binder [J]. Construction and Building Materials, 2018, 167:381-390.
- [23] GU L N, LI H X, YANG X J, et al. Leakage behavior of toxic substances of naphthalene sulfonate-formaldehyde condensation from cement based materials [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 255:109934.
- [24] XU B W, LOTHENBACH B, LEEMANN A, et al. Reaction mechanism of magnesium potassium phosphate cement with high magnesium-to-phosphate ratio [J]. Cement and Concrete Research, 2018, 108:140-151.
- [25] LIU Y T, CHEN B, QIN Z H. Effect of nano-silica on properties and microstructures of magnesium phosphate cement [J]. Construction and Building Materials, 2020, 264:120728.
- [26] QIAO F, CHAU C K, LI Z J. Property evaluation of magnesium phosphate cement mortar as patch repair material[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(5):695-700.