混凝土
Concrete
ISSN 1002-3550,CN 21-1259/TU

《混凝土》网络首发论文

题目：　几种纳米水泥砂浆氯离子渗透性对比试验研究
作者：　李秋超，范颖芳
收稿日期：　2019-09-06
网络首发日期：　2020-09-02
引用格式：　李秋超，范颖芳．几种纳米水泥砂浆氯离子渗透性对比试验研究．混凝土．
https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1259.TU.20200902.1043.028.html

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间：2020-09-02 11:51:26
网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1259.TU.20200902.1043.028.html

几种纳米水泥砂浆氯离子渗透性对比试验研究

李秋超，范颖芳

(大连海事大学交通运输工程学院，土木工程系，辽宁大连，116026)

摘要：为研究纳米材料对水泥砂浆抵抗氯离子渗透性的改善作用，选用 8 种纳米材料等量替代水泥，采用快速氯离子迁移系数法（RCM 法），测试并分析不同纳米水泥砂浆氯离子扩散系数的变化规律。结果表明：纳米偏高岭土、亲水性纳米 SiO_2 及亲水性纳米 $CaCO_3$ 均有效提高了水泥砂浆抵抗氯离子渗透性能；疏水性纳米 $CaCO_3$ 对水泥砂浆氯离子渗透性无明显影响；纳米凹凸棒石粘土导致水泥砂浆抵抗氯离子渗透性能降低；小掺量（1%）纳米氧化铝和疏水性纳米二氧化硅能够提高水泥砂浆抵抗氯离子渗透性，当掺量增至 3%时，水泥砂浆试件抵抗氯离子渗透性能降低。

关键词：纳米偏高岭土；纳米 SiO_2；纳米 $CaCO_3$；水泥砂浆；氯离子扩散系数

中图分类号：TU528.041　　**文献标识码**：A

Experimental study on the effect of nanomaterials on the chloride diffusion behavior of mortar

LI Qiuchao, FAN Yingfang

(Department of Civil Engineering, College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: To investigate the effect of nano-materials on the chloride resistance of cement mortar, eight kinds of nano-materials were taken into consideration. The Rapid Chloride Migration (RCM) method was applied to examine the chloride diffusion property of the cement mortar with various additions of the nanomaterials. Chloride diffusion coefficients of the nano-cement mortars with various additions of nanomaterials were obtained. It is shown that the addition of nano metakaolin, hydrophilic nano silicon dioxide and hydrophilic nano calcium carbonate effectively improve the chloride resistance of cement mortar; hydrophobic nano calcium carbonate has little effect on chloride resistance of cement mortar; while nano attapulgite clay reduce the chloride resistance of cement mortar. Low content (less than 1%) of nano alumina and hydrophobic nano silicon dioxide improve the chloride resistance of cement mortar. However, higher content (3%) of nano alumina and hydrophobic nano silicon dioxide have a side effect on the chloride resistance of cement mortar.

Key words: nano metakaolin；nano silicon dioxide；nano calcium carbonate；cement mortar；chloride diffusion coefficient

0 引言

混凝土结构在环境、力学双重或多重因素耦合作用下耐久性下降、服役寿命缩短，甚至引发灾难性事故的工程案例不胜枚举。我国现行《混凝土结构耐久性设计规范》（GB/T 50476-2008）通过构造措施来保障结构耐久性，缺乏科学的理论依据，不能满足现实需求（李宗津 孙伟，2009）[1]。为解决混凝土耐久性低的问题，迫切需要发展新型高耐久性现代混凝土结构。纳米材料以其小尺寸效应、量子效应、表面及界面效应等优异特性应用于建筑材料中无疑从材料层次为混凝土耐久性设计开拓了一个新方向。

纳米粘土以其低廉的价格优势得到土木工程人员的青睐，国内外研究学者相继研究了纳米粘土对水泥浆流变性、水泥浆触变性、水泥基材料早期性能、强度、抗渗性等性能的影响，取得了显著的成果。He 和 Shi（2008）[2]对比了五种纳米颗粒对水泥基材料氯离子渗透性的影响；五种纳米材料对水泥砂浆氯离子渗透系数的降低作用顺序依次是：粘土（蒙脱土）>SiO_2>TiO_2>Al_2O_3>Fe_2O_3。然而，纳米粘土种类较多，针对改善水泥基材料的不同特性，纳米粘土的合理掺量也不相同，研究中给出的纳米粘土最优掺量差别较大。如，Hakamy（2014）[3]、Kawashima（2013）[4,5]等学者提出纳米粘土的最佳掺量为 1%，掺量多于 1%

收稿日期：2019-09-06；
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51578099)　　中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（3132019349）

时，便对水泥浆物理力学性能产生负面影响；Al-Salami 等[6]提出纳米粘土最佳掺量为水泥质量 10%，掺10%纳米粘土水泥试件抗压和抗弯强度较普通水泥试件分别提高 50%和 36%。Wang（2014）等[7]的研究表明 0.5%~1%纳米粘土对水泥浆触变性的增加效果最为显著，过量加纳米粘土（>1.3%）效果减弱。迄今，有关纳米粘土掺量、纳米粘土种类及其颗粒直径大小对水泥基材料氯离子渗透性影响的研究尚未见报道。

为了研究纳米粘土对水泥基材料氯离子渗透性的改善效果，探索以提高氯离子渗透性为目标的纳米粘土种类和最佳掺量，本文选用了八种纳米粘土材料，探寻纳米粘土在水中的合理分散方式，考虑纳米材料掺量对水泥砂浆氯离子渗透性的影响，对标准养护条件下养护 28 天水泥胶砂试件进行氯离子渗透性试验，分析和讨论纳米粘土种类、粘土掺量对水泥砂浆氯离子渗透性的影响规律。

1 试验研究

1.1 试件材料

试验水泥为小野田 P O42.5R 普通硅酸盐水泥，其化学成分详见表 1，砂为厦门产 ISO 标准砂，试验用水为自来水。选用的 8 种纳米材料包括：2 种不同粒径纳米偏高岭土（NMK），分别记作 NMK-1、NMK-2；纳米凹凸棒石粘土（NMA）；纳米氧化铝（NA）；2 种纳米二氧化硅（NS），分别为疏水性纳米二氧化硅（NS-1）和亲水性纳米二氧化硅（NS-2）；2 种纳米碳酸钙（NCC），分别为疏水性纳米碳酸钙（NCC-1）和亲水性纳米碳酸钙（NCC-2）。其中，纳米氧化铝纯度为 99.9%，纳米二氧化硅纯度为 98.0%，纳米碳酸钙纯度为 98.5%，纳米偏高岭土和纳米凹凸棒石粘土化学成分详见表 2，8 种纳米材料的平均粒径尺寸见表 3。

表 1 水泥化学成分（质量分数，%）

化学成分	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3
含量	59.3	21.91	6.27	3.78	1.64	4.69

表 2 NMK 和 NMA 化学成分（质量分数，%）

种类	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	TiO_2
NMK-1	49.40	0.27	43.88	0.51	2.66	0.23	1.52	0.14	-
NMK-2	68	0.08	23	0.28	0.89	5.29	0.18	-	0.04
NMA	50.40-61.30	1.80-2.50	9.40-9.50	4.00-5.00	9.30-10.50	0.20-0.60	0.50-1.00	-	-

表 3 几种纳米材料平均粒径

种类	NMK-1	NMK-3	NMA	NA	NS-1	NS-2	NCC-1	NCC-2
平均粒径 /nm	1750	80	20-100	50	50	50	30	50

1.2 纳米材料在水中的分散性

纳米材料颗粒尺寸小，表面活性大，无论将其直接与干料拌合，亦或将其先分散于水中，再与干料拌合，都将出现颗粒团聚，形成二次颗粒，势必造成团聚粒径变大，降低纳米粘土对水泥基材料性能的改善效果[8]。目前，国内外有关纳米粘土的分散技术主要包括物理分散方式（机械搅拌、超声分散以及高能处理法）和化学分散方法。基于国内外研究成果，本文利用 NJ-160 水泥净浆搅拌机和 DS-5510DTH 型超声波清洗机对纳米粘土进行机械分散和超声分散，通过对分散结果的分析，最终确定一种较好的分散方式。鉴于疏水性纳米材料表面疏水基团与水相互排斥，根据极性相似相容原理[9]，在分散前采用试验用水量 3%的无水乙醇进行处理，处理后加入水中分散。

1.3 试件制作

试验中试件水胶比（w/b）为 0.5，考虑配制砂浆的经济性，NMK-1 掺量为水泥替代量的 1%、3%、5%、10%和 15%，其余纳米材料均为水泥替代量的 1%和 3%，详细配合比见表 4。氯离子渗透性试验采用 Φ100mm× 50mm 的圆柱体试件，每组试件 3 个，考虑不同试件制作时间的影响，每种掺量均设对照组。超声设备采用 DS-5510DTH 型超声波清洗机，水泥砂浆拌和设备采用 SJ-15 型砂浆搅拌机。试件制作时，首先将纳米材料加入试验水中超声分散 15min，超声完成后将混合溶液倒入水泥砂浆搅拌锅，再加入水泥；开启搅拌机，低速搅拌 30s 后开始加入标准砂，并在下一个 30s 内完成加砂，再高速搅拌 30s；停拌 90s，在停拌过程中将搅拌锅内壁和叶片上的浆体刮入锅内；继续在高转速下搅拌 60s 完成拌和。试件浇筑成型后，24 小时后拆模，在清水中养护至规定龄期，进行氯离子渗透性试验。

表 4 纳米水泥砂浆配合比

纳米材料掺量/%	水/g	水泥/g	纳米材料/g	标准砂/g
0	450	900	0	1350
1	450	891	9	1350
3	450	873	27	1350
5	450	855	45	1350
10	450	810	90	1350
15	450	765	135	1350

1.4 试验方法及过程

1.4.1 试验方法

为评价水泥基材料氯离子渗透性，国内外相继提出美国国有公路运输管理员协会标准测试方法、体相扩散方法（NordTest NTBuild 443），美国测试和材料协会标准测试方法、电迁移技术、快速试验法（Tang 1992，Spiesz 2012）,电阻率测试技术，压力渗透技术等方法。本文采用 Tang 和 Nilsson（1992）提出的快速氯离子渗透法（RCM）测试水泥胶砂试件的氯离子渗透性能[10,11]，其测试原理是利用外界溶液的浓度梯度驱动氯离子在水泥基材料中的传输，通过外加电场电位梯度加速氯离子的移动速度，根据 Nernst-Planck 方程可得氯离子扩散系数为：

$$D_{RCM} = 2.872 \times 10^{-6} \frac{Th\left(x_d - \alpha\sqrt{x_d}\right)}{t}$$

$$\alpha = 3.338 \times 10^{-3}\sqrt{Th} \qquad (1)$$

式中：D_{RCM}为氯离子扩散系数，m^2/s；T为阳极溶液初始温度和结束温度的平均值，K；h为试件高度，m；x_d为试件氯离子渗透深度，m；t 为试验持续时间，s；α为常数。

1.4.2 试验过程

试件养护至规定龄期后从养护室水池中取出，超声浴 15min 进行饱水处理，采用 RCM-F 型多功能混凝土耐久性综合试验仪进行氯离子扩散性试验，试验设备及工作示意图如图 1 所示。施加初始电流与测试时间见表 5。通电完成后，将测试试件劈开，利用 0.1mol/L 的硝酸银溶液滴定断面，15 分钟后测试氯离子渗透深度。

a.试验仪工作示意图　　b.RCM 法装置示意图

图 1 RCM-F 型多功能混凝土耐久性综合试验仪工作示意图

表 5 初始电流和试验时间

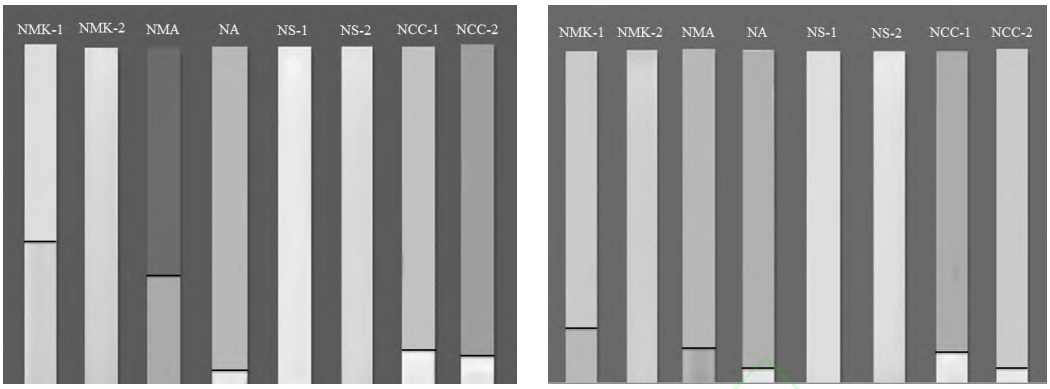
初始电流 I_0/mA	$I_0<5$	$5\le I_0<10$	$10\le I_0<30$	$30\le I_0<60$	$60\le I_0<120$	$120\le I_0$
试验时间/h	168	96	48	24	8	4

2 试验结果分析与讨论

2.1 纳米材料在水中分散性

已有研究表明，机械分散和超声分散均可在不同程度上提高纳米材料在水溶液中的分散性，超声分散能有效打破纳米颗粒间的分子作用力[12,13]，且超声分散 15min 可获得较好的效果[14]。为选择一种合理的分散方式，对纳米材料进行机械分散 15min 和超声分散 15min 后，将分散液倒入方形管并静置 15min，对静置后的所得沉降图像进行灰度处理如图 2 所示。假定采用两种分散方式后同类纳米材料溶液中的颗粒数目

相同，且在分散完成后的零时刻纳米颗粒在溶液中分散均匀，由于观测时间较短，颗粒沉降未完全发生，不考虑颗粒堆积和压缩的影响。沉淀区颗粒越少，沉淀体积越小，即非沉淀区溶液中颗粒越多，则纳米材料在水中的分散性越好。



a.机械分散 15min　　b. 超声分散 15min

图 2 不同分散方式下纳米材料悬浊液沉降图

由图 2 可知，NMK-2、NS-1 和 NS-2 在水中分散性良好，两种分散方式下溶液静置后均无明显沉降发生；NMK-1 和 NMA 受分散方式的影响较大，采用机械分散，静置后沉降体积较超声分散后大幅度增加，NMA 受分散方式影响尤为显著，机械分散后液体分层明显，非沉淀区变为清液，颗粒沉降严重；NA 和 NCC 受分散方式的影响较小，采用超声分散方式较机械分散沉降体积略小。纳米材料在水中的分散性与材料的种类、颗粒直径的大小、分散的方式有关，采用超声分散可以降低纳米颗粒的沉降速度，提高纳米材料在水中分散的均匀性。当纳米颗粒在水溶液中保持稳定时服从 Stokes 公式[13]：

$$V = \frac{2R^2}{9\mu}(\rho_P - \rho_L)\cdot g \tag{2}$$

式中：V 为颗粒沉降速度，m/s；R 为颗粒半径，m；μ为介质的粘度 N·s/m^2；ρ_P为颗粒的密度，g/cm^3；ρ_L为介质的密度，g/cm^3；g 为重力加速度，m/s^2。颗粒的沉降速度随颗粒半径、颗粒与介质密度差的增大而增大，随介质粘度的增大而降低。

2.2 纳米材料对水泥基材料氯离子渗透性的影响

2.2.1 纳米材料种类的影响

为对比几种纳米材料对水泥砂浆氯离子渗透性的影响，将氯离子扩散系数减小率定义为：(普通水泥砂浆试件氯离子扩散系数-纳米材料砂浆试件氯离子扩散系数) /普通水泥砂浆试件氯离子扩散系数×100%，不同掺量 NMK-1 水泥砂浆氯离子扩散系数减小率结果见表 6。可以看出，掺入两种纳米偏高岭土后水泥砂浆的氯离子扩散系数均有所降低，掺 3%NMK-2 水泥砂浆氯离子扩散系数较普通水泥砂浆降低 30.04%，较相同掺量 NMK-1 水泥砂浆氯离子扩散系数减小率提高 140%。因此，NMK-2 能够有效增强水泥砂浆抵抗氯离子侵蚀的能力。

表 6 不同 NMK-1 掺量水泥砂浆氯离子扩散系数减小率

掺量/%	1	3	5	10	15
氯离子扩散系数减小率/%	7.57	12.54	71.55	87.10	93.32

表 7 几种纳米材料水泥砂浆氯离子扩散系数减小率

材料	掺量/%	氯离子扩散系数减小率/%
NMK-2	1	7.31
	3	30.04
NMA	1	-15.04
	3	-18.02

NA	1	9.02
	3	-6.07
NS-1	1	5.40
	3	-15.11
NS-2	1	4.48
	3	36.89
NCC-1	1	-0.11
	3	0.22
NCC-2	1	1.72
	3	10.05

由表 7 可以看出，掺纳米凹凸棒石粘土水泥砂浆氯离子扩散系数增大，当 NMA 掺量为 3%时，砂浆氯离子扩散系数较普通水泥砂浆增加 18.02%，大大降低了砂浆抵抗氯离子侵蚀的能力；掺入纳米氧化铝和疏水性纳米二氧化硅，对氯离子渗透的改善效果与其掺量有关，在掺量为 1%时，水泥砂浆氯离子扩散系数降低，替代量增至 3%，对砂浆抵抗氯离子侵蚀有反作用；亲水性纳米二氧化硅导致水泥砂浆氯离子扩散系数显著下降，掺量为 3%时，水泥砂浆氯离子扩散系数减小率达 36.89%，在 3%掺量下其改善砂浆氯离子渗透的效果最好；掺疏水性纳米碳酸钙对水泥砂浆氯离子扩散系数无明显影响；不同掺量亲水性纳米碳酸钙对水泥砂浆氯离子渗透性的影响规律不同，掺 1%亲水性纳米碳酸钙对水泥砂浆氯离子扩散系数影响不大，当掺量达 3%时，水泥砂浆氯离子扩散系数减小率增至 10.05%，水泥砂浆抵抗氯离子渗透的能力有所提高。当纳米材料为 1%和 3%掺量时，不同纳米材料水泥砂浆氯离子扩散系数减小率如图 3 所示，可以看出：当纳米材料的替代量为 1%时，几种纳米材料对水泥砂浆氯离子渗透性改善效果依次为，NA > NMK-1 > NMK-2 > NS-1 > NS-2 > NC-2；当纳米材料的替代量为 3%时，对水泥砂浆氯离子渗透性改善效果依次为，NS-2 > NMK-2 > NMK-1 > NC-2。

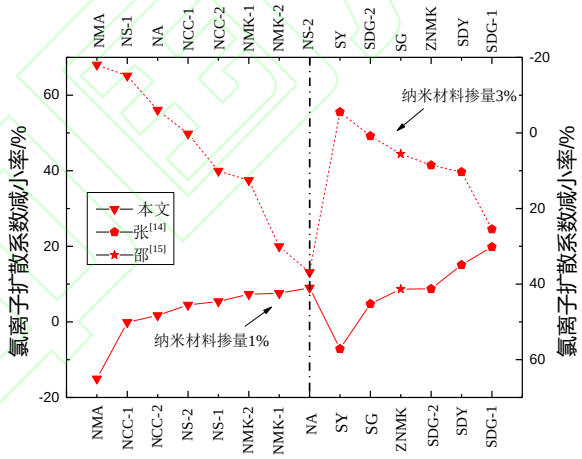


图 3 纳米水泥砂浆氯离子扩散系数减小率

图 3 中 ZNMK 为张世义[14]在水泥砂浆中掺入 1%和 3%的纳米偏高岭土，氯离子扩散系数减小率分别为 8.68%和 8.53%，水泥砂浆抵抗氯离子渗透的能力提高；SY、SG、SDY、SDG-1 和 SDG-2 分别为邵俊丰[15]在水泥砂浆中掺入 1%和 3%的纳米凹凸棒石原矿、超声 15min 高粘矿、煅烧原矿、650℃煅烧高粘矿和 750℃煅烧高粘矿，掺入 SY 水泥砂浆抵抗氯离子渗透的能力降低，掺入 SG、SDY、SDG-1 和 SDG-2 水泥砂浆抵抗氯离子渗透的能力均在不同程度上提高，当 SDG-1 掺量为 3%对水泥砂浆抵抗氯离子渗透的改善效果最为明显，水泥砂浆氯离子扩散系数减小率为 25.48%。当纳米材料替代量为 1%时，纳米材料对水泥砂浆氯离子渗透性改善效果依次为，HM-2 > HM-1 > HNS > SDG-1 > SDY > ZNMK > SDG-2 > SG；当纳米材料的替代量为 3%时，对水泥砂浆氯离子渗透性改善效果依次为，SDG-1 > SDY > ZNMK > SG > SDG-2。

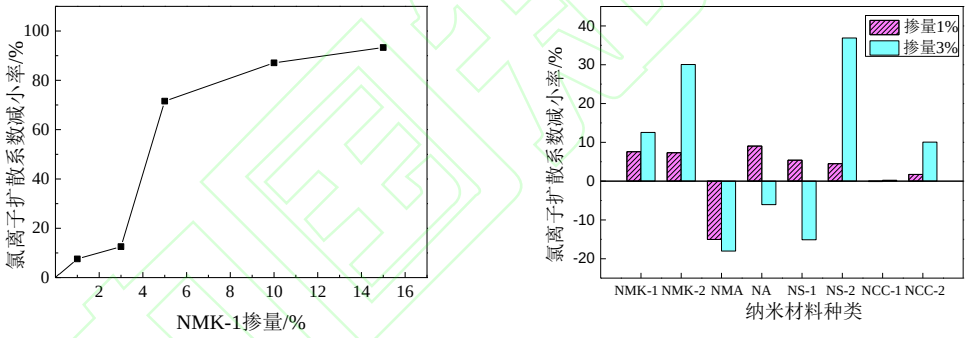
由上述分析可知，掺入亲水性纳米二氧化硅、纳米偏高岭土、亲水性纳米碳酸钙，水泥砂浆抵抗氯离子渗透的能力均有提高；掺入未经处理的纳米凹凸棒石粘土，对水泥砂浆抵抗氯离子渗透性能不利，掺入煅烧后的纳米凹凸棒石粘土，水泥砂浆氯离子扩散系数降低；掺入亲水性纳米碳酸钙对水泥砂浆抵抗氯离子侵蚀的能力无明显影响；纳米氧化铝和疏水性纳米二氧化硅对水泥砂浆氯离子渗透性的影响与纳米材料的掺量有关。

2.2.2 纳米材料粒径的影响

不同粒径的纳米材料对水泥基材料的性能改善效果不同，纳米材料粒径越小，制作过程就越复杂。由图 3 可以看出：NMK-1 和 NMK-2 两种偏高岭土粒径不同，对水泥砂浆氯离子渗透的改善效果不同。在水泥替代量为 1%时，NMK-1 和 NMK-2 对水泥砂浆氯离子扩散系数的减小率分别为 7.57%和 7.31%，改善效果基本相同；当替代量增至 3%时，NMK-1 和 NMK-2 对水泥砂浆的氯离子扩散系数减小率分别为 12.54%和 30.04%，NMK-2 对水泥砂浆氯离子扩散系数降低更明显，掺量 3%时，纳米材料粒径越小，对水泥砂浆氯离子渗透性的改善效果越好。

2.2.3 纳米材料掺量的影响

同种纳米材料的不同掺量对水泥砂浆氯离子渗透性的影响不同，不同 NMK-1 掺量下氯离子扩散系数的减小率如图 4.a 所示，当纳米材料掺量由 1%增至 3%时，水泥砂浆氯离子扩散系数减小率略有提高（不足 5%），当掺量从 3%增至 5%时，水泥砂浆氯离子扩散系数减小率从 12.54%增至 71.55%。当 NMK-1 掺量继续增加时，水泥砂浆氯离子扩散系数减小率继续增加，增长速率变小，当掺量增至 15%时，水泥砂浆氯离子扩散系数减小率增至 93.32%，较掺量 5%时提高 30.43%。因此，掺入 NMK-1 可显著降低水泥砂浆氯离子扩散系数；且随 NMK-1 掺量的增加，水泥砂浆氯离子扩散系数逐渐降低，水泥砂浆抵抗氯离子渗透性能增强。



a. 不同掺量 NMK-1　　b.几种纳米材料掺量 1%和 3%

图 4 纳米材料水泥砂浆氯离子扩散系数减小率

几种纳米材料在 1%和 3%掺量下，氯离子扩散系数减小率如图 4.b 所示。由图中可以看出，与普通水泥砂浆相比，掺 NMK-2 水泥砂浆氯离子扩散系数降低，氯离子扩散系数减小率随 NMK-2 掺量增加而增大。当 NMK-2 掺量为 3%时，水泥砂浆氯离子扩散系数减小率为 30.04%；掺 1%和 3%的 NMA，水泥砂浆氯离子扩散系数均增大，水泥砂浆抵抗氯离子渗透的能力降低；掺 1%NA 和 NS-1 水泥砂浆氯离子扩散系数降低，当掺量增至 3%时，砂浆氯离子扩散系数减小率分别为-6.07%和-15.11%，水泥砂浆抵抗氯离子渗透性能降低；NS-2 能够提高水泥砂浆抵抗氯离子侵蚀的能力，当 NS-2 掺量由 1%增至 3%时，水泥砂浆氯离子扩散系数减小率由 4.48%增至 36.89%，掺 3%NS-2 对水泥砂浆抗氯离子渗透的改善效果最为明显；掺 1%和 3%NCC-1 对水泥砂浆氯离子扩散系数影响甚微；掺 NCC-2 水泥砂浆的氯离子渗透性有一定改善作用，当 NCC-2 掺量为 1%时，水泥砂浆氯离子扩散系数减小率仅为 1.72%，当 NCC-2 掺量增至 3%时，水泥砂浆氯离子扩散系数减小率增至 10.05%。掺入 NMK、NS-2 和 NCC-2 对水泥砂浆抵抗氯离子渗透性能均有一定程度的改善作用，随着纳米材料掺量增加（从 1%增至 3%），改善效果更加明显；NMA 降低了水泥砂浆抵抗氯离子渗透性能，NMA 掺量增大，降低程度越大；NCC-1 对水泥砂浆氯离子渗透性影响不大，随掺量增加，氯离子扩散系数并无明显变化。

3 结论

本文研究了纳米粘土对水泥砂浆氯离子渗透性的影响，确定了纳米粘土在水中的合理分散方式，分析了 NMK-1 五种掺量（1%，3%，5%，10%，15%）及其他七种纳米材料两种掺量（1%，3%）水泥胶砂试件 28 天龄期抵抗氯离子渗透的能力，采用氯离子扩散系数减小率为评价指标，探讨了纳米材料种类、纳米材料掺量对水泥砂浆氯离子渗透性的影响规律。主要得到如下结论：

1. 纳米材料在水中的分散性与材料的种类、粒径的大小以及所采用的分散方式有关，采用超声分散可以将团聚的纳米颗粒有效分散开，减少团聚大颗粒的存在，降低纳米颗粒的沉降速度，提高纳米材料在水中的分散性。

2. 水泥砂浆氯离子渗透性与掺入纳米材料的种类有关，NMK、NS-2 和 NCC-2 均在不同程度上提高了水泥砂浆抵抗氯离子渗透性能，在相同纳米材料掺量下，掺 3%NS-2 对水泥砂浆氯离子渗透性的改善效果最为明显，氯离子扩散系数减小率为 36.89%；NCC-1 对水泥砂浆氯离子渗透性影响不大；NMA 对水泥砂浆抵抗氯离子渗透的性能不利，掺入 3%NMA 水泥砂浆氯离子扩散系数增加了 22.81% 。

3. 纳米材料的掺量影响水泥砂浆的氯离子渗透性，掺 NMK-1 水泥砂浆的氯离子扩散系数随 NMK-1 掺量的增加而增大，当掺量增至 15%时，水泥砂浆氯离子扩散系数减小率增至 93.32%；当 NMK-2、NS-2 和 NCC-2 掺量由 1%增至 3%时，水泥砂浆氯离子扩散系数减小率随之增加；掺 1%NA 和 NS-1 水泥砂浆氯离子扩散系数减小率分别为 9.02%和 5.40%，掺量增至 3%时，水泥砂浆氯离子扩散系数增大，砂浆抵抗氯离子侵蚀的能力降低。

4. 考虑纳米材料砂浆的经济性及其抵抗氯离子渗透性，NS-2 和 NMK-1 为最佳纳米材料，掺入 3%NS-2 对水泥砂浆抵抗氯离子渗透的改善效果最为明显，在相同改善水平下价格仅为 NMK-2 的 1%；NMK-1 在所有纳米材料中价格最低，价格为 NS-2 的 1/3，当 NMK-1 掺量超过 3%时对水泥砂浆抵抗氯离子渗透性能的改善效果显著，掺量为 15%时，水泥砂浆氯离子扩散系数减小率超过 90%。

参考文献

[1] 李宗津，孙伟，潘金龙. 现代混凝土的研究进展[J]. 中国材料进展, 2009, 28(11): 1-7.

[2] He X, Shi X. Chloride permeability and microstructure of Portland cement mortars incorporating nanomaterials[J]. Transportation Research Record, 2008, 2070(1): 13-21.

[3] Hakamy A, Shaikh F U A, Low I M. Characteristics of hemp fabric reinforced nanoclay–cement nanocomposites[J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 50: 27-35.

[4] Kawashima S, Hou P, Corr D J, et al. Modification of cement-based materials with nanoparticles[J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 36: 8-15.

[5] Fan Y, Zhang S, Kawashima S, et al. Influence of kaolinite clay on the chloride diffusion property of cement-based materials[J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 45: 117-124.

[6] Al-Salami A E, Morsy M S, Taha S, et al. Physico-mechanical characteristics of blended white cement pastes containing thermally activated ultrafine nano clays[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 138-145.

[7] Wei J, Meyer C. Sisal fiber-reinforced cement composite with Portland cement substitution by a combination of metakaolin and nanoclay[J]. Journal of materials science, 2014, 49(21): 7604-7619.

[8] 张世义，范颖芳，栾海洋，等. 纳米黏土分散性对水泥性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2013,16 (2): 197-202.

[9] 任俊,卢寿慈,沈健,胡柏星.微细颗粒在水、乙醇及煤油中的分散行为特征[J].科学通报,2000,45(6):583-587.

[10] 郭晓玉，杨琨，范颖芳. 氯盐环境中纳米偏高岭土在水泥砂浆中合理掺量研究[J]. 混凝土, 2018 (5): 110-114.

[11] Wang Y, Fu K. Comparisons of instantaneous chloride diffusion coefficients determined by RCM method and chloride natural diffusion test[J]. Construction and Building Materials, 2019, 223: 595-604.

[12] 高瑞军，姚燕，吴浩，等. 纳米复合粉体分散剂的制备及其分散性能[J]. 材料导报, 2018, 32(22): 3868-3874.

[13] 张笑，宋武林，卢照，等. 纳米二氧化钛分散液稳定性的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(z1): 16-21.

[14] 张世义.纳米偏高岭土水泥基材料耐久性研究[D].大连：大连海事大学,2016.

[15] 邵俊丰. 纳米凹凸棒石粘土对水泥基材料物理力学及耐久性影响研究[D].大连：大连海事大学,2017.

[第一作者]：李秋超（1995-），男，硕士研究生，研究方向：主要从事纳米水泥基材料耐久性研究。

[联系地址]：辽宁省大连市甘井子区凌水街 1 号大连海事大学路桥楼（116026）

[联系电话]：电话 18004085707；E-mail：lqc9508@163.com。

[通讯作者]：范颖芳（1972-），女，河南开封人，大连海事大学教授，博士生导师，研究方向：混凝土结构耐久性、新型混凝土结构耐久性；电话 13998546368；E-mail：fanyf@dlmu.edu.cn。

中国知网