

文章编号:1007-9629(2024)08-0685-06

# NO<sub>2</sub>-LDH 对减水剂作用效果的影响及机理

井 雪, 宋学锋\*

(西安建筑科技大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**采用焙烧还原法制备了亚硝酸根插层水滑石(NO<sub>2</sub>-LDH),并研究了其对减水剂吸附分散及增强效果的影响.结果表明:NO<sub>2</sub>-LDH的层间距和结晶度较原碳酸根型镁铝水滑石均略有降低;NO<sub>2</sub>-LDH与减水剂之间存在阴离子交换,降低了减水剂的吸附分散效果,且减水剂分散效果的降低程度随着NO<sub>2</sub>-LDH掺量的增加而增大;NO<sub>2</sub>-LDH对掺减水剂砂浆抗折强度的影响不明显,对抗压强度略有提升;NO<sub>2</sub>-LDH对萘系高效减水剂分散效果的影响大于对聚羧酸系减水剂的影响.

**关键词:**亚硝酸根插层水滑石;减水剂;分散效果;离子交换

中图分类号:TB321

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.08.003

## Influence and Mechanism of NO<sub>2</sub>-LDH on Effect of Superplasticizer

JING Xue, SONG Xuefeng\*

(School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Nitrite intercalation hydrotalcite (NO<sub>2</sub>-LDH) was prepared by roasting and reduction method, and its effect on adsorption, dispersion and enhancement of superplasticizer were studied. The results show that the layer spacing and crystallinity of the NO<sub>2</sub>-LDH are slightly lower than that of protocarbonate type Mg-Al hydrotalcite. There is anion exchange between NO<sub>2</sub>-LDH and superplasticizer, which reduces the adsorption and dispersion effect of superplasticizer. The decreasing degree of dispersion effect of superplasticizer increases with the increase of NO<sub>2</sub>-LDH content. NO<sub>2</sub>-LDH has no obvious effect on the flexural strength of mortar mixed with superplasticizer, but the compressive strength is slightly increased. The effect of NO<sub>2</sub>-LDH on the dispersion of naphthalene superplasticizer is greater than that of polycarboxylic acid superplasticizer.

**Key words:** nitrite intercalation hydrotalcite (NO<sub>2</sub>-LDH); superplasticizer; dispersion effect; ion exchange

氯致混凝土钢筋锈蚀是影响混凝土结构耐久性的关键因素<sup>[1]</sup>.掺入阻锈剂是延缓混凝土钢筋锈蚀最常用、最简捷的方法<sup>[2]</sup>.水滑石作为常见的层状双金属氢氧化物(LDH),具有层间阴离子交换特性,其离子交换能力由弱到强的顺序为:NO<sub>3</sub><sup>-</sup><NO<sub>2</sub><sup>-</sup><Cl<sup>-</sup><OH<sup>-</sup><SO<sub>4</sub><sup>2-</sup><CO<sub>3</sub><sup>2-</sup><sup>[3]</sup>.以水滑石为前驱体,通过焙烧还原法制备的亚硝酸根插层水滑石(NO<sub>2</sub>-LDH)作为一种新型智能阻锈剂,已经成为延缓钢筋混凝土锈蚀的研究热点.Cao等<sup>[4]</sup>采用焙烧还原法制备了

NO<sub>2</sub>-LDH,发现其能为钢筋提供有效的防腐保护.Yang等<sup>[5-7]</sup>认为,掺入适量的NO<sub>2</sub>-LDH提高了砂浆对氯离子的抗渗透性能,降低了氯离子的迁移系数,使钢筋腐蚀电位正向移动.Xu等<sup>[8-9]</sup>研究了NO<sub>2</sub>-LDH在氯盐环境下对钢筋的缓蚀作用,认为NO<sub>2</sub>-LDH能有效去除游离氯离子,保证钢筋免受腐蚀<sup>[10]</sup>.

减水剂具有优异的吸附分散与增强效果,已成为钢筋混凝土结构中最重要的外加剂<sup>[11-12]</sup>.常用的混凝土减水剂大多为阴离子表面活性剂,理论上存在

收稿日期:2023-10-23; 修订日期:2024-01-09

基金项目:陕西省科研攻关项目(2018SF-367)

第一作者:井 雪(1999—),女,陕西渭南人,西安建筑科技大学硕士生.E-mail:2668192124@qq.com

通讯作者:宋学锋(1976—),男,河南周口人,西安建筑科技大学教授,博士生导师,博士.E-mail:songxuefeng-2008@163.com

与 $\text{NO}_2$ -LDH之间发生阴离子交换吸附的可能性,会影响其吸附分散及减水效果,进而影响钢筋混凝土的泵送施工性能及硬化体强度.目前,有关 $\text{NO}_2$ -LDH对高效减水剂作用效果的影响尚缺乏系统的研究.

本文以碳酸根型镁铝水滑石( $\text{CO}_3$ -LDH)为原材料,以 $\text{NaNO}_2$ 为离子交换剂,通过焙烧还原法制备了 $\text{NO}_2$ -LDH;以净浆流动度和砂浆强度为评价指标,研究了 $\text{NO}_2$ -LDH对常用聚羧酸系减水剂、萘系高效减水剂作用效果的影响规律,并结合离子交换原理分析了其影响机理.

## 1 试验

### 1.1 原材料

$\text{CO}_3$ -LDH,比表面积为 $8\ 000\ \text{m}^2/\text{kg}$ ,平均粒径为 $0.5\ \mu\text{m}$ ;离子交换剂为 $\text{NaNO}_2$ ,分析纯;阴离子型聚羧酸系高效减水剂,减水率(质量分数,文中涉及的减水率、水灰比等除特别说明外均为质量分数或质量比)为25%,固含量为20%;萘磺酸盐高效减水剂(粉剂),减水率为25%;水泥为海螺牌P·O 42.5普通硅酸盐水泥;砂为标准砂;试验用水均为去离子水.

### 1.2 $\text{NO}_2$ -LDH的制备

首先,将市售水滑石于烘箱中 $105\ ^\circ\text{C}$ 烘干24 h,然后置于马弗炉中,以 $10\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升至 $500\ ^\circ\text{C}$ 并恒温4 h,随炉冷却至室温并密封保存,所得粉末为焙烧态镁铝水滑石(CLDH);其次,取1 g CLDH与200 mL 0.5 mol/L、200 mL 0.2 mol/L的 $\text{NaNO}_2$ 溶液置于250 mL锥形瓶中,在振荡器上以200 r/min的速率振荡24 h,过滤后用去离子水冲洗3次,并在 $80\ ^\circ\text{C}$ 下烘干12 h,所得粉末即为 $\text{NO}_2$ -LDH.

### 1.3 测试方法

#### 1.3.1 $\text{NO}_2$ -LDH的组成结构

采用德国Bruker D8 Advance型X射线衍射仪(XRD),对焙烧前、后CLDH以及 $\text{NO}_2$ -LDH的矿物组成进行分析.测试条件为:Cu靶,扫描范围为 $5^\circ\sim 90^\circ$ ,扫描速率为 $10\ (^\circ)/\text{min}$ ,管电压和管电流分别为40 kV和40 mA.

采用美国Thermo Scientific Nicolet 6700型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)对样品进行红外分析.先将样品与溴化钾研磨均匀,再用压力机将其压成透明的薄片.测试条件为:频率范围为 $4\ 000\sim 400\ \text{cm}^{-1}$ ,分辨率为 $4\ \text{cm}^{-1}$ .

#### 1.3.2 $\text{NO}_2$ -LDH/高效减水剂水泥净浆的流动性

参照GB/T 8077—2012《混凝土外加剂均匀性

试验方法》,测定不同 $\text{NO}_2$ -LDH掺量下水泥净浆的流动度,以评价 $\text{NO}_2$ -LDH对减水剂分散效果的影响.

#### 1.3.3 $\text{NO}_2$ -LDH/高效减水剂水泥砂浆的强度

参照GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》,测定不同 $\text{NO}_2$ -LDH掺量下水泥砂浆的抗压强度和抗折强度,以评价 $\text{NO}_2$ -LDH对减水剂增强效果的影响.

#### 1.3.4 $\text{NO}_2$ -LDH与高效减水剂之间的离子交换

首先,按1.3.2中水泥净浆组成,分别配制相应的聚羧酸系减水剂和萘系高效减水剂水溶液各100 mL,并加入相应计量的 $\text{NO}_2$ -LDH(折合成1.0%、2.0%、3.0%、4.0%的 $\text{NO}_2$ -LDH掺量)组成混合溶液;然后,将上述混合溶液放入锥形瓶中并置于振荡器上以200 r/min的速率振荡,每隔一定时间取少量待测溶液,利用分光光度计测定溶液中置换出的 $\text{NO}_2^-$ 浓度,以此表征 $\text{NO}_2$ -LDH与高效减水剂之间的离子交换能力;最后,将最终的混合溶液固液分离,取烘干后的滤渣进行FTIR测试,分析离子交换产物的官能团结构.

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\text{NO}_2$ -LDH的制备与表征

图1为 $\text{CO}_3$ -LDH、CLDH和 $\text{NO}_2$ -LDH的XRD图谱.

由图1(a)可知,焙烧前 $\text{CO}_3$ -LDH分别在 $11.680^\circ$ 、 $23.529^\circ$ 、 $34.882^\circ$ 、 $39.473^\circ$ 、 $46.993^\circ$ 、 $60.720^\circ$ 和 $62.119^\circ$ 处出现了典型的水滑石类化合物衍射峰,与JCPDS标准卡上Mg/Al LDH的特征衍射峰吻合<sup>[13]</sup>,图谱无杂峰且峰形尖锐,表明其结晶程度良好.利用布拉格方程计算出 $\text{CO}_3$ -LDH的层间距为0.757 nm,与文献[14]的结果接近.经 $500\ ^\circ\text{C}$ 煅烧4 h之后,层状结构的衍射峰消失,说明镁铝水滑石失去了层间碳酸根阴离子及结合水,层状结构塌陷,形成了镁、铝氧化物的混合体.

由图1(b)可知,CLDH与 $\text{NaNO}_2$ 溶液进行离子交换吸附以后获得的 $\text{NO}_2$ -LDH在(003)和(006)晶面位置又重新出现了衍射峰,证明镁铝水滑石层状结构发生了重建,此时的层间距为0.743 nm.由于 $\text{NO}_2^-$ 的半径小于 $\text{CO}_3^{2-}$ ,所以相较于煅烧之前的层间距略有缩小.与 $\text{CO}_3$ -LDH相比, $\text{NO}_2$ -LDH的XRD图谱出现了较宽的衍射峰,且峰强较弱.这是因为制备的 $\text{NO}_2$ -LDH是由尺寸较小的晶体组成,并且由于空气气氛的影响,一些无定形相或混合的阴离子会和 $\text{NO}_2^-$ 一起进入水滑石的层间,导致结晶程度不高.

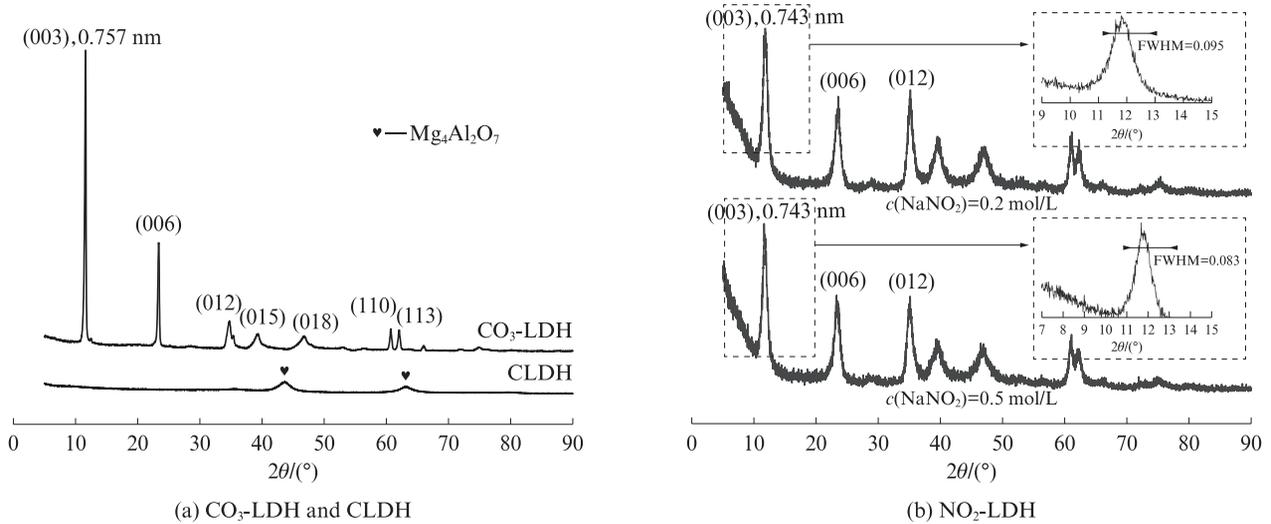


图1 CO<sub>3</sub>-LDH、CLDH和NO<sub>2</sub>-LDH的XRD图谱  
Fig. 1 XRD patterns of CO<sub>3</sub>-LDH, CLDH and NO<sub>2</sub>-LDH

与0.2 mol/L的NaNO<sub>2</sub>溶液中反应生成的NO<sub>2</sub>-LDH相比,在0.5 mol/L的NaNO<sub>2</sub>溶液中反应生成NO<sub>2</sub>-LDH的衍射峰更加尖锐,结晶程度更高.

图2为CO<sub>3</sub>-LDH、CLDH和NO<sub>2</sub>-LDH的FTIR图谱.由图2可见:

(1)在CO<sub>3</sub>-LDH图谱的1365 cm<sup>-1</sup>处观察到了1个较强的CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>特征峰<sup>[5]</sup>,这是由CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>中的C—O键振动引起的;3446 cm<sup>-1</sup>处的强峰属于水分子的O—H拉伸和变形振动或者CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>的C—O键的不对称振动;出现在674、454 cm<sup>-1</sup>处的峰是氢氧化物层Mg—O或Al—O的振动所产生的<sup>[15]</sup>.

(2)CLDH图谱中1365 cm<sup>-1</sup>处属于CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>的强特征峰消失,表明经过煅烧,CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>已经从氢氧双层结构中释放出来.属于氢氧化物层板的Mg—O或Al—O振动峰没有消失,证明煅烧后仅CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>被释放,氢氧化物双层结构未被破坏,能够进行下一步的

结构重建.

(3)NO<sub>2</sub>-LDH图谱在1264 cm<sup>-1</sup>处出现了亚硝酸盐的特征峰,表明成功插入到LDH层间的离子为NO<sub>2</sub><sup>-</sup><sup>[16]</sup>.同时,在1369 cm<sup>-1</sup>处也出现了非常明显的特征峰,这是空气中的CO<sub>2</sub>进入层间结构形成CO<sub>3</sub>-LDH所导致的,与XRD的结果相吻合.

## 2.2 NO<sub>2</sub>-LDH对掺减水剂水泥净浆流动性和砂浆强度的影响

### 2.2.1 NO<sub>2</sub>-LDH对掺减水剂水泥净浆流动性的影响

固定水灰比为0.29、聚羧酸系减水剂掺量为1.0%或萘系高效减水剂掺量为0.6%,NO<sub>2</sub>-LDH的掺量分别为1.0%、2.0%、3.0%、4.0%(等质量替代水泥),测定不同NO<sub>2</sub>-LDH掺量下水泥净浆的流动度,以评价其对减水剂分散效果的影响,结果如图3所示.由图3可知:与基准试样(NO<sub>2</sub>-LDH掺量为零)相比,NO<sub>2</sub>-LDH显著降低了掺聚羧酸系减水剂(萘系高效减水剂)水泥净浆的流动度,且随着NO<sub>2</sub>-LDH掺量的增加,水泥净浆的初始流动度下降,流动度经时损失增大;就聚羧酸系减水剂而言,当NO<sub>2</sub>-LDH掺量由1.0%增加至4.0%时,其水泥净浆的初始流动度相较于基准试样分别降低了44、98、113、155 mm,且当NO<sub>2</sub>-LDH掺量为4.0%时,净浆失去流动性;就萘系高效减水剂而言,当时NO<sub>2</sub>-LDH掺量由1.0%增加至3.0%,其水泥净浆的初始流动度相较于基准试样分别降低了35、155、215 mm,且当NO<sub>2</sub>-LDH掺量为3.0%时,净浆失去流动性,说明NO<sub>2</sub>-LDH对萘系高效减水剂分散效果的影响比聚羧酸系减水剂更大.

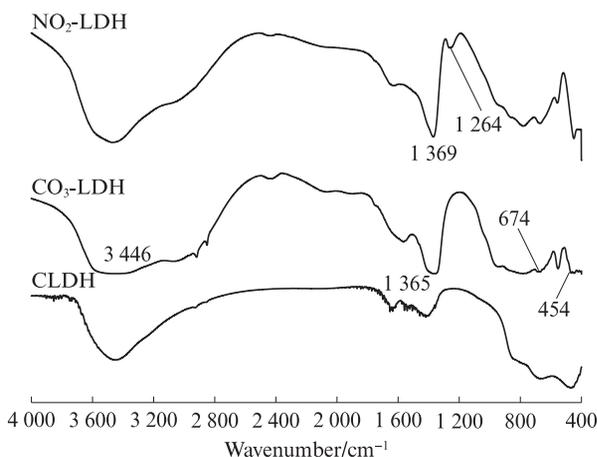


图2 CO<sub>3</sub>-LDH、CLDH和NO<sub>2</sub>-LDH的FTIR图谱  
Fig. 2 FTIR spectra of CO<sub>3</sub>-LDH, CLDH and NO<sub>2</sub>-LDH

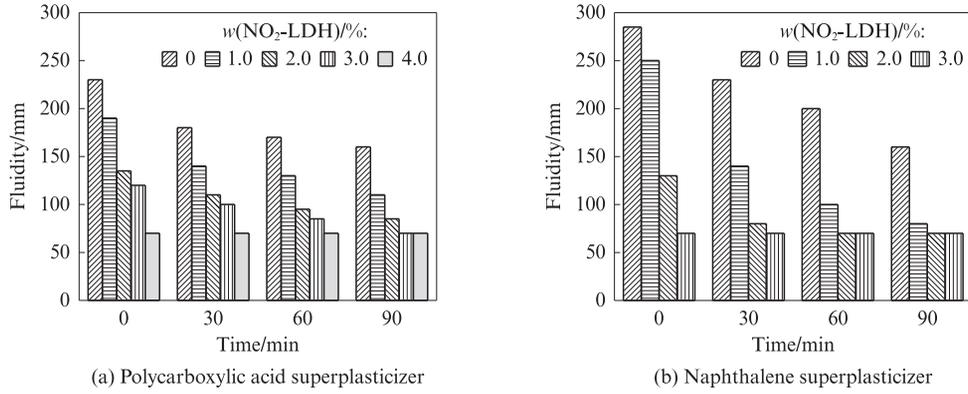


图3 NO<sub>2</sub>-LDH对掺聚羧酸系减水剂和萘系高效减水剂的净浆流动度影响

Fig. 3 Effect of NO<sub>2</sub>-LDH on slurry fluidity of polycarboxylic acid superplasticizer and naphthalene superplasticizer

2.2.2 NO<sub>2</sub>-LDH对掺减水剂水泥砂浆强度的影响

固定水灰比为0.5、胶砂比为1:3、聚羧酸系减水剂掺量为1.0%或萘系高效减水剂掺量为0.6%，调整NO<sub>2</sub>-LDH的掺量分别为0%、1.0%、2.0%、3.0%、4.0%，测定在不同NO<sub>2</sub>-LDH掺量下水泥砂浆的抗折强度和抗压强度，结果如图4、5所示。

由图4可知，NO<sub>2</sub>-LDH对掺聚羧酸系减水剂砂浆的3 d抗折强度基本无影响，28 d抗折强度略有降低，且随着NO<sub>2</sub>-LDH掺量的变化，抗折强度的变化不明显；NO<sub>2</sub>-LDH对掺萘系高效减水剂砂浆的3 d抗折强度基本无影响，28 d抗折强度略有提高，且随着NO<sub>2</sub>-LDH掺量的变化，抗折强度的变化不明显。

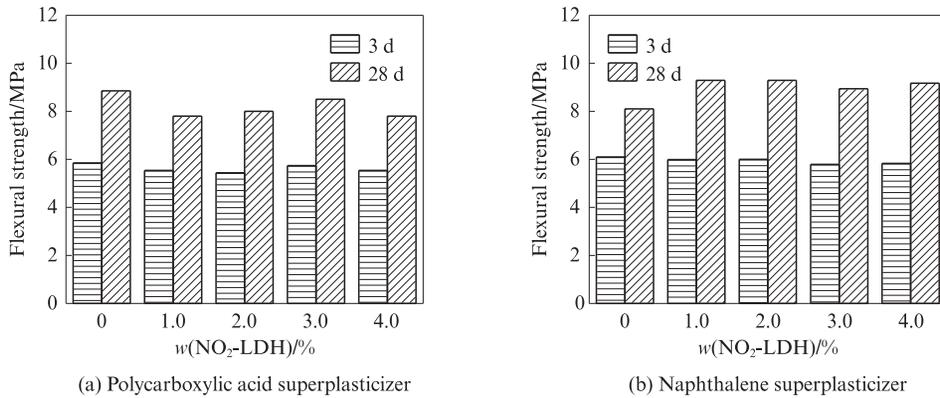


图4 NO<sub>2</sub>-LDH对掺聚羧酸系减水剂和萘系高效减水剂的砂浆抗折强度影响

Fig. 4 Effect of NO<sub>2</sub>-LDH on the bending strength of mortar mixed with polycarboxylic acid superplasticizer and naphthalene series superplasticizer

由图5可知：NO<sub>2</sub>-LDH对掺聚羧酸系减水剂砂浆的3、28 d抗压强度略有提升，且在低掺量下的提

升效果较好；NO<sub>2</sub>-LDH对掺萘系高效减水剂砂浆的3、28 d抗压强度基本无影响。

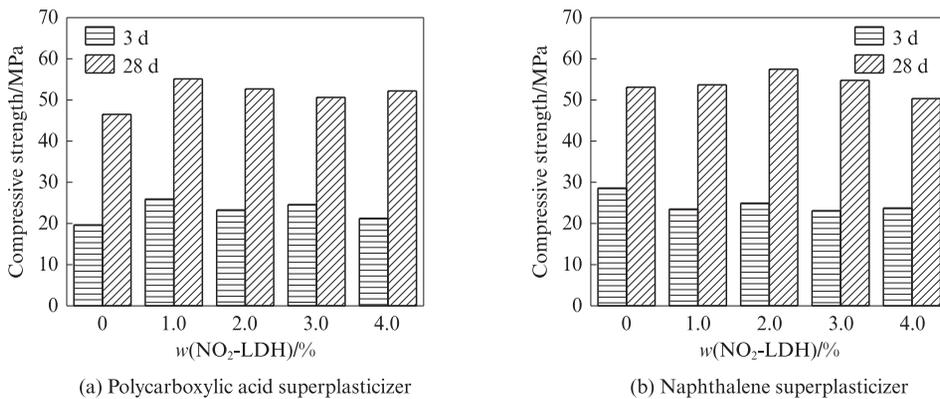


图5 NO<sub>2</sub>-LDH对掺聚羧酸系减水剂和萘系高效减水剂的砂浆抗压强度影响

Fig. 5 Effect of NO<sub>2</sub>-LDH on compressive strength of mortar mixed with polycarboxylic acid superplasticizer and naphthalene series superplasticizer

2.3 机理分析

为分析NO<sub>2</sub>-LDH对掺聚羧酸系减水剂和萘系高效减水剂水泥净浆流动性的影响规律,试验研究了NO<sub>2</sub>-LDH与聚羧酸系减水剂(萘系高效减水剂)之间的离子交换行为,测定了离子交换容量,并且对离子交换产物(M1/M2))进行了分析,结果如图6~8所示.

由图6可知:随着NO<sub>2</sub>-LDH与聚羧酸系减水剂和萘系高效减水剂作用时间的延长,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>溶出的浓度越来越大,且在60 min左右趋于稳定;随着混合溶液中NO<sub>2</sub>-LDH掺量的增加,在相同时间下,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>溶出的浓度呈增大趋势;在相同的NO<sub>2</sub>-LDH掺量下,萘系高效减水剂与NO<sub>2</sub>-LDH之间的阴离子交换能力更强.

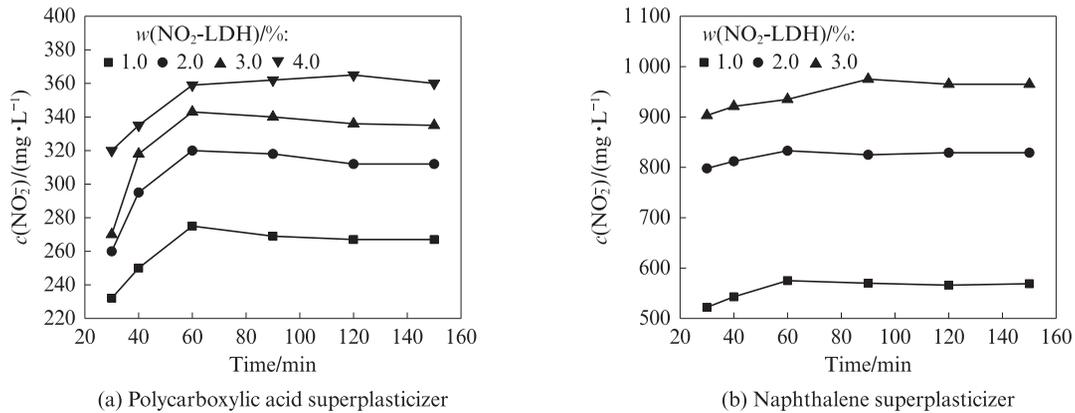


图6 聚羧酸系减水剂和萘系高效减水剂与NO<sub>2</sub>-LDH的离子交换性能

Fig. 6 Ion exchange properties of polycarboxylic acid superplasticizer and naphthalene superplasticizer with NO<sub>2</sub>-LDH

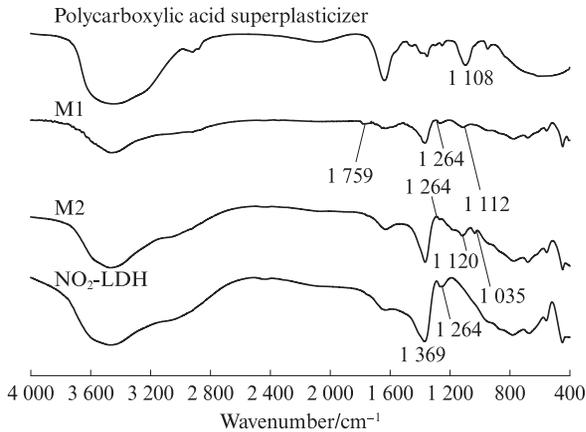


图7 聚羧酸系减水剂、NO<sub>2</sub>-LDH、M1及M2的FTIR图谱  
Fig. 7 FTIR spectra of polycarboxylic acid superplasticizer, NO<sub>2</sub>-LDH, M1 and M2

由图7可知:

(1)与离子交换前NO<sub>2</sub>-LDH的FTIR图谱相比,与聚羧酸系减水剂交换后NO<sub>2</sub>-LDH的FTIR图谱在1 759 cm<sup>-1</sup>处出现了C=O的收缩振动峰,在1 112 cm<sup>-1</sup>处出现了磺酸基的收缩振动峰.对聚羧酸系减水剂原液进行红外光谱分析,发现其在1 108 cm<sup>-1</sup>处出现了磺酸基的振动峰,这与交换产物的FTIR结果相一致,进一步证明NO<sub>2</sub>-LDH与聚羧酸系减水剂之间发生了离子交换.

(2)与萘系高效减水剂交换后,NO<sub>2</sub>-LDH的FTIR图谱在1 120、1 035cm<sup>-1</sup>处分别出现了S=O的伸缩振动峰和S-O的伸缩振动峰,进一步证明NO<sub>2</sub>-LDH与萘高效减水剂之间发生了离子交换.当NO<sub>2</sub>-LDH与减水剂发生离子交换后,在1 264 cm<sup>-1</sup>处均存在亚硝酸盐的特征峰,且与萘系高效减水剂交换后的产物相比,与聚羧酸系减水剂交换后产物的亚硝酸盐特征峰的峰值更高,表明其中NO<sub>2</sub><sup>-</sup>对红外辐射的吸收强度越大,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>的含量越高,这与图6的分析结果一致.

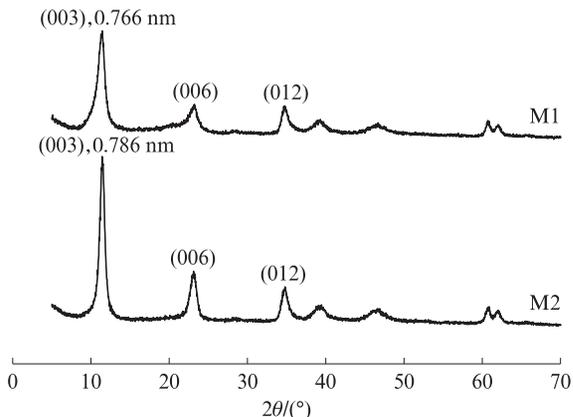


图8 M1和M2的XRD图谱

Fig. 8 XRD patterns of M1 and M2

由图8可知,NO<sub>2</sub>-LDH与聚羧酸系减水剂(萘系高效减水剂)离子交换后的层间距变大,由0.743 nm变成了0.766 nm(0.786 nm),这与磺酸根离子半径>羧酸根离子半径>亚硝酸根离子半径的结果一致.因萘系高效减水剂与水滑石的离子交换作用更强,所以其XRD图谱的衍射峰更加尖锐.

上述研究结果表明,NO<sub>2</sub>-LDH与阴离子型聚羧酸系减水剂和萘系高效减水剂之间存在离子交换行为.减水剂部分离子基团通过交换进入了NO<sub>2</sub>-LDH的层间,降低了减水剂的吸附分散效果,表现为随着NO<sub>2</sub>-LDH掺量的增加,水泥净浆的流动度降低.

NO<sub>2</sub>-LDH对掺减水剂砂浆力学性能的影响表现在两个方面:首先,通过离子交换,NO<sub>2</sub>-LDH降低了减水剂的吸附分散效果,在给定水灰比的情况下,砂浆的可塑性降低,不利于砂浆的密实成型,对其硬化强度有一定的负面影响;其次,NO<sub>2</sub>-LDH与高效减水剂之间通过离子交换,释放出一定的NO<sub>2</sub><sup>-</sup>.亚硝酸盐作为常见的水泥增强剂,当其数量增加时,会促进水泥中铝酸三钙(C<sub>3</sub>A)和硅酸三钙(C<sub>3</sub>S)的水合作用,从而对砂浆硬化后的强度有一定的提升效果<sup>[17-18]</sup>.二者综合作用的结果表现为NO<sub>2</sub>-LDH对掺高效减水剂砂浆力学性能的影响不明显.

### 3 结论

(1)以市售碳酸根型镁铝水滑石为原材料,以不同质量分数的NaNO<sub>2</sub>溶液为离子交换剂,通过焙烧还原法成功制备了亚硝酸根插层镁铝水滑石(NO<sub>2</sub>-LDH),其具有较高的结晶度,且层间距较碳酸根型镁铝水滑石略有减小.

(2)NO<sub>2</sub>-LDH与聚羧酸系减水剂和萘系高效减水剂之间存在阴离子交换,降低了所用减水剂的吸附分散效果,且对萘系高效减水剂的影响程度更大.

(3)NO<sub>2</sub>-LDH对掺聚羧酸系减水剂、萘系高效减水剂砂浆抗折强度的影响不明显,对抗压强度略有提升.

### 参考文献:

- [1] 张坚,刘清风.基于非球形颗粒水化堆积的水泥浆氯离子扩散系数预测[J].建筑材料学报,2023,26(9):955-962.  
ZHANG Jian, LIU Qingfeng. Prediction for chloride diffusivity of cement paste based on accumulation of hydrated imperfect spherical particles[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(9): 955-962. (in Chinese)
- [2] 郭群,李晓珍,宋屹林,等.钢筋阻锈剂在碳化钢筋混凝土中的阻锈作用[J].建筑材料学报,2023,26(1):21-28.  
GUO Qun, LI Xiaozhen, SONG Yilin, et al. Effect of steel bar corrosion inhibitors in carbonated reinforced concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(1): 21-28. (in Chinese)
- [3] 杨宇斌.水滑石对钢筋混凝土抗氯盐、硫酸盐腐蚀性能提升机理研究[D].包头:内蒙古科技大学,2023.  
YANG Yubin. Study on the mechanism of hydrotalc improving the corrosion resistance of reinforced concrete to chlorine salt and sulfate[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [4] CAO Y H, DONG S G, ZHENG D J, et al. Multifunctional inhibition based on layered double hydroxides to comprehensively control corrosion of carbon steel in concrete [J]. Corrosion Science, 2017, 126:166-179.
- [5] YANG Z X, FISCHER H, CERESO J, et al. Aminobenzoate modified Mg-Al hydrotalcites as a novel smart additive of reinforced concrete for anticorrosion applications[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47:1436-1443.
- [6] YANG Z X, FISCHER H, POLDER R. Laboratory investigation of the influence of two types of modified hydrotalcites on chloride ingress into cement mortar[J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 58:105-113.
- [7] YANG Z X, POLDER R, MOL J M C, et al. The effect of two types of modified Mg-Al hydrotalcites on reinforcement corrosion in cement mortar[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 100: 186-202.
- [8] XU J X, SONG Y B, ZHAO Y H, et al. Chloride removal and corrosion inhibitions of nitrate, nitrite-intercalated MgAl layered double hydroxides on steel in saturated calcium hydroxide solution [J]. Applied Clay Science, 2018, 163:129-136.
- [9] XU J X, WEI J F, MA G X, et al. Effect of MgAl-NO<sub>2</sub> LDHs inhibitor on steel corrosion in chloride-free and contaminated simulated carbonated concrete pore solutions [J]. Corrosion Science, 2020, 176:108940.
- [10] WANG X H, XU J X, TAN Q P. Effect of intercalation of magnesium aluminum nitrite hydrotalcite on the durability of mortar in the presence of chloride and sulfate [J]. Journal of Central South University, 2022, 29(2):546-560.
- [11] 关文勋,程冠之,李旺,等.干燥条件对缓释型粉体聚羧酸减水剂性能的影响[J].建筑材料学报,2023,26(3):317-323.  
GUAN Wenxun, CHENG Guanzhi, LI Wang, et al. Effect of drying conditions on properties of slow-release polycarboxylic acid superplasticizers[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(3): 317-323. (in Chinese)
- [12] 孙振平,李祖悦,庞敏,等.聚羧酸系减水剂的缓释效应及机理[J].建筑材料学报,2022,25(3):263-269.  
SUN Zhenping, LI Zuyue, PANG Min, et al. Slow-release effect of polycarboxylate superplasticizers with various functional groups [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(3):263-269. (in Chinese)
- [13] 杜宝中,王汝敏,陈博.室温固相法合成纳米Mg-Al-CO<sub>3</sub>层状双金属氢氧化物[J].材料导报,2009,23(2):77-79.  
DU Baozhong, WANG Rumin, CHEN Bo. Synthesis of nano-layered bimetallic hydroxides Mg-Al-CO<sub>3</sub> by solid phase method at room temperature[J]. Materials Review, 2009, 23(2): 77-79. (in Chinese)
- [14] 吴波.阻锈阴离子插层改性水滑石的制备及其在水泥砂浆中的应用[D].深圳:深圳大学,2019.  
WU Bo. Preparation of antirust anionic intercalation modified hydrotalcite and its application in cement mortar[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2019. (in Chinese)
- [15] HANG T T X, TRUC T A, DUONG N T, et al. Preparation