

六偏磷酸钠对水泥土中钙矾石的抑制作用研究*

崔乔智¹, 范财源¹, 刘金锋^{1,2,3}

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082
2. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东 珠海 519082
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082

摘要: 在工程实践中, 水泥加固硫酸盐渍土易产生钙矾石晶体, 导致水泥土膨胀破坏。六偏磷酸钠可在无杂质离子溶液环境下抑制钙矾石成核反应, 然而在复杂硫酸盐水泥土环境中对钙矾石的抑制效果尚不清楚。借助扫描电镜 (SEM) 和 X 射线衍射 (XRD) 等测试方法, 分析了不同六偏磷酸钠含量对不同硫酸盐环境 (浸泡或内掺) 水泥土中钙矾石晶体成核和生长的影响。结果表明: 添加六偏磷酸钠不能有效抑制硫酸盐水泥土中钙矾石晶体的成核, 但可以有效抑制钙矾石晶体的尺寸生长。

关键词: 水泥土; 钙矾石; 硫酸盐侵蚀; 抑制剂; 微观形貌

中图分类号: TU503 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137 (2022) 02-0117-08

Research on inhibitory effect of sodium hexametaphosphate on ettringite in cement soil

CUI Qiaozhi¹, FAN Caiyuan¹, LIU Jinfeng^{1,2,3}

1. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. Guangdong Provincial Key Lab of Geodynamics and Geohazards, Zhuhai 519082, China
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China

Abstract: In practical engineering, sulfate-rich cement saline soil is prone to produce ettringite crystals, leading to the expansion and destruction of cement soil. Sodium hexametaphosphate can inhibit the nucleation reaction of ettringite in a solution environment without impurity ions. However, its inhibitory effect on ettringite in a complex sulfate cement soil environment is still unclear. In this article, the influence of different sodium hexametaphosphate content on the nucleation and growth of ettringite crystals in cement soil in different sulfate environments (soaked or incorporated) was analyzed by means of scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). The results show that the addition of sodium hexametaphosphate cannot effectively inhibit the nucleation of ettringite crystals in sulfate-rich cement soil, but it can effectively inhibit the size growth of ettringite crystals.

Key words: cement soil; ettringite; sulfate attack; inhibitor; microscopic morphology

工程实践中, 水泥常用于加固土, 形成水泥土, 从而提升土的强度^[1-2], 已在道路、机场、地基建设中广泛应用^[3-5]。我国西部盐渍土分布广

泛, 土中常含有硫酸盐, 例如硫酸钙和硫酸钠^[6-7]。当水泥被用于处理富含硫酸盐的盐渍土路基时, 将会反应生成钙矾石晶体导致路面膨胀甚

* 收稿日期: 2020-11-16

录用日期: 2021-03-01

网络首发日期: 2021-05-28

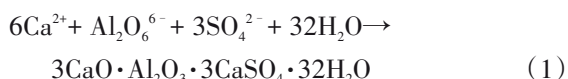
基金项目: 中山大学百人计划启动经费 (32110-18841200)

作者简介: 崔乔智 (1995年生), 男; 研究方向: 水泥土改良; E-mail: cuiqzh@mail2.sysu.edu.cn

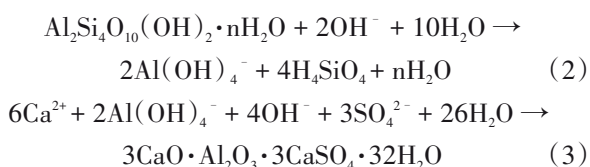
通信作者: 刘金锋 (1985年生), 男; 研究方向: 高温高压岩石力学; E-mail: liujinf5@mail.sysu.edu.cn

至开裂,这一现象被称为“硫酸盐隆起”(Sulfate heaving)^[8-12]。钙矾石(化学式为 $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$)一般呈针棒状,其形成及特性受溶液 pH、水分、温度、黏土颗粒和硫酸盐含量影响^[13-15]。根据水泥水化产物与硫酸盐的反应过程,水泥土中形成钙矾石的硫酸盐侵蚀反应可分为^[16]:

1) I 型侵蚀。水泥水化过程产生游离 Ca^{2+} 和铝化合物 ($\text{Al}_2\text{O}_6^{6-}$),与土中的硫酸盐反应生成钙矾石,其离子反应方程式^[11]为



2) II 型侵蚀。与 I 型侵蚀不同,钙矾石生成所需的铝化合物来源于黏土矿物溶解。水泥水化过程产生 OH^- ,导致溶液 pH 值上升。当 $\text{pH} > 10.5$ 时,黏土矿物(叶蜡石 $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ 等)溶解,并与水化释放的 OH^- 生成 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 与硫酸盐反应形成钙矾石,其反应方程式^[17]为



目前有两种关于钙矾石诱导膨胀机理的主流观点^[8, 18],即结晶膨胀^[19]和吸水膨胀^[20-21]。结晶膨胀基于狭小空间中局部化学反应过程中的钙矾石液相反应结晶-沉淀原理,在高结晶压力下晶体生长填充固体土颗粒之间的空隙,并相互排斥增大固体土颗粒间距,宏观表现为土体体积膨胀^[18]。由于钙矾石溶解度极低导致溶液过饱和度极高,晶体析出时结晶压力极大,可达 5 MPa^[15, 19]。因此,在水泥水化后期,溶液处于高 pH 环境且参与反应的铝、钙、硫酸盐含量充足时,钙矾石将会持续生成,结晶压力足以破坏土体^[10, 22]。吸水膨胀理论则认为膨胀主要来源于胶体状钙矾石吸收大量的水,引起颗粒间排斥,导致体积膨胀^[21, 23]。实验表明,在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和状态下,铝的水合速率会显著降低,导致形成的钙矾石在尺寸和外形上类似于胶体,具备高表面积和净负电荷而吸附大量水分子。这种机制类似于黏土对双极水分子的静电吸引而导致的黏土层膨胀^[24]。另一方面,结晶膨胀和吸水膨胀并非不能共存,部分学者^[25]认为水泥土膨胀是钙矾石晶体生长产生的结晶压力和静电作用吸附大量水共同作用的结果。

选择合适的抑制剂阻止钙矾石的生成是研究焦点之一^[3, 26]。基于不同的抑制机理,实验表明

抗硫酸盐水泥^[27-28]、无定形二氧化硅^[29]、纳米碳酸钙^[30]和高炉矿渣^[31-32]等材料一定程度上能抑制钙矾石生成,例如抗硫酸盐水泥铝含量低,可大幅降低水泥水化产生的 $\text{Al}_2\text{O}_6^{6-}$,减少钙矾石的生成量^[27-28],然而许多土本身含有大量黏土,铝含量高,这种抑制方法局限性大;无定形二氧化硅^[29]和纳米碳酸钙^[30]则能够提高水泥土的抗渗性能,阻止外界溶液环境中的硫酸盐浸入水泥土,即降低钙矾石生成反应所需的硫酸根离子含量,从而增强水泥土抗侵蚀能力,然而该方法并不适用于硫酸盐土^[9, 31]。因此,尽管抑制水泥土硫酸盐侵蚀的研究成果众多,但多数方法都有其缺陷,如何抑制钙矾石生长仍是一个重要课题^[3, 10]。另一方面, Cody 等^[33]测试了 300 多种化学添加剂对钙矾石形貌的影响,发现添加 $(\text{NaPO}_3)_6$ 的样品 9 个月后依旧没有形成钙矾石晶体。 $(\text{NaPO}_3)_6$ 作为一种晶体成核抑制剂,可抑制溶液中钙矾石晶核的形成,即影响钙矾石晶核大小,使其不能达到临界尺寸,无法形成稳定的晶核从而溶解^[34]。Lee 等^[35]的实验表明:体积浓度为 0.1% 的 $(\text{NaPO}_3)_6$ 溶液可明显抑制简单离子溶液环境中钙矾石的合成,在体积浓度为 0.1% 时可完全抑制钙矾石的成核。

但实际工程中硫酸盐渍土存在复杂的化学环境, $(\text{NaPO}_3)_6$ 的抑制作用能否仍然有效仍有待验证。前人发现,当土中硫酸盐含量 $> 3\ 000\ \text{mg/kg}$,水泥加固后就会缓慢发生膨胀破坏。当硫酸盐含量高达 $8\ 000\ \text{mg/kg}$ 时,水泥加固过程中将产生大量钙矾石,实际工程中将发生严重膨胀破坏^[3, 10]。因此,我们采用盐碱中性的土和 $8\ 000\ \text{mg/kg}$ 含量的硫酸钠来模拟恶劣的硫酸盐渍土环境,并进行水泥加固处理、使用 SEM 和 XRD 等手段,以更好地研究 $(\text{NaPO}_3)_6$ 是否在高硫酸盐环境下可以起到抑制水泥土中钙矾石生成的作用。

1 实验方法

设计两组实验探究 $(\text{NaPO}_3)_6$ 溶液对硫酸盐隆起土(硫酸盐渍土)中钙矾石晶体的抑制作用。在水泥掺量、含水量、土成分及质量、养护环境等条件不变的情况下,改变水泥土的 $(\text{NaPO}_3)_6$ 内掺量以及高浓度硫酸盐环境(内掺、浸泡),再利用 SEM 和 XRD 分析水泥土样品中晶体形貌、成分特征,以验证 $(\text{NaPO}_3)_6$ 添加剂对钙矾石的抑制作用。

1.1 水泥土制备

实验用土为中山大学工地土,在 $60\ ^\circ\text{C}$ 温度烘

箱中 24 h 充分干燥。使用 GZS-1 高频振筛机分离出粒径 < 2 mm 的土, 颗粒级配见图 1。筛分土为粗砂土 (粒径 > 0.5 mm 的含量超过 50%)。使用的水泥为标号 42.5 的普通硅酸盐水泥。通过 XRF 和 XRD 测得化学成分, 见表 1 和表 2。

依据设计规程^[36]以及 Puppala 等^[9]、Meng 等^[30]和 Emidio 等^[37]的水泥土制备方法及其材料配比, 水泥掺量 (水泥质量/土质量) 取 10%, 含水量 (水质量/水泥与干土质量) 取 26%。考虑到少量的 $(\text{NaPO}_3)_6$ ($(\text{NaPO}_3)_6$ 体积/水体积为 0.1%) 即可明显抑制简单离子溶液中合成的钙矾石成核; 且随着 $(\text{NaPO}_3)_6$ 浓度的增加, 抑制效果更加显著^[35]。因此, 取 $(\text{NaPO}_3)_6$ 含量 ($(\text{NaPO}_3)_6$ 质量/水泥质量) 为 0%、4%、8% 和 12% (体积分数为 0%、0.6%、1.3% 和 1.9%), 验证 $(\text{NaPO}_3)_6$ 是否可以在复杂离子环境中起到抑制作用。设计两组实验:

1) 用于研究水泥土在硫酸盐溶液浸泡环境中, 不同含量 $(\text{NaPO}_3)_6$ 对钙矾石的作用。将水泥掺量为 10%、含水量为 26% 的水泥土, 与四种含量 (0%、4%、8% 和 12%) 的六偏磷酸钠充分混合。

2) 研究六偏磷酸钠对内掺高浓度硫酸盐的水泥土中钙矾石的抑制作用, 以排除渗透率改变对

添加剂抑制作用的影响。在水泥掺量为 10% 且含水量为 26% 的土中添加硫酸钠, 配置成硫酸钠浓度为 8 000 mg/kg 的水泥土, 并掺入 0% (即不添加) 或 8% 含量的六偏磷酸钠充分混合。

然后, 将调制的水泥土样品注入 50 mm × 50 mm × 10 mm 模具中, 振捣以排出气泡后, 放置在养护箱中进行标准养护 (温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 95% 以上)。48 h 后拆模, 取出模具中的水泥土样品, 并放置在溶液 (硫酸钠溶液或水) 中浸泡 21 d 取出, 自然风干并密封保存, 进行后期分析, 详见表 3。其中, 样品 S0 是不做六偏磷酸钠和硫酸钠溶液处理的原始对照样。

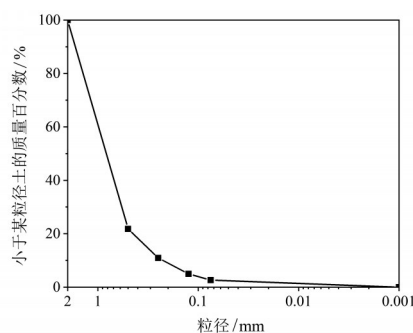


图 1 土的颗粒级配曲线

Fig. 1 The grain size distribution curve of soil

表 1 材料化学成分¹⁾

Table 1 Chemical composition of materials

材料	氧化物组分							
	CaO/%	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	MgO/%	SO ₃ /%	K ₂ O/%	P ₂ O ₅ /%
水泥	55.036	22.156	8.077	3.917	3.205	2.773	1.024	—
粗砂土	1.172	57.994	29.626	4.030	—	—	4.556	0.870

1) “—”表示未检出。

表 2 土的矿物成分及相对含量

Table 2 Mineral components and contents of soil

矿物组分	石英	钾长石	斜长石	云母	蒙脱石	高岭石
相对含量/%	31	29	12	9	5	14

1.2 形貌与成分分析

手工将水泥土样品掰碎, 选择断裂面较为平整的部分, 喷金处理后使用 SEM 背散射模式观察样品中钙矾石的形貌特征, 加速电压为 15 kV。同时, 使用研钵将部分样品研磨成粉末, 使用布鲁克 D8-Advance XRD 分析水泥土矿物成分, 扫描范围为 $5^\circ \sim 80^\circ$, 扫描速度为 $1.20^\circ/\text{min}$, 每个样品进

行两次测试。由于衍射图中石英晶体衍射峰在 2θ 大于 20° 以后太强, 难以观察钙矾石晶体衍射峰, 因此本文仅展示 $5^\circ \sim 20^\circ$ 范围的衍射图结果。由于钙矾石晶体具有特征形态, 在水泥土中呈现为针棒状, 明显区别于氢氧化钙晶体的六方片状^[38]、石膏的粗片状^[39]以及水化硅酸钙的凝胶状^[40]。因此, 前人常通过晶体形态快速识别水泥土中的钙矾石^[3, 22, 41-42], 亦有很多文献使用 SEM 的方法以针棒形态鉴定钙矾石^[31, 43-45]。此外, 结合我们的 XRD 结果, 可以确定钙矾石的存在。

表 3 实验信息

Table 3 Experimental information

实验组	样品编号	六偏磷酸钠含量/%	水泥土制备所用溶液组分	浸泡溶液
1	S0	0	水	水
	S1	0	水	Na ₂ SO ₄ (8 000 mg/kg)
	S2	4	水	Na ₂ SO ₄ (8 000 mg/kg)
	S3	8	水	Na ₂ SO ₄ (8 000 mg/kg)
	S4	12	水	Na ₂ SO ₄ (8 000 mg/kg)
2	S5	0	Na ₂ SO ₄ (8 000 mg/kg)	水
	S6	8	Na ₂ SO ₄ (8 000 mg/kg)	水

2 实验结果

2.1 (NaPO₃)₆含量对钙矾石生长的影响

实验发现,对于未添加硫酸钠和(NaPO₃)₆的水泥土样品S0,仅存在少量钙矾石,XRD也很难检测出钙矾石衍射峰,如图2-3所示。在硫酸钠溶液浸泡实验中,未添加(NaPO₃)₆的样品S1则出现大量钙矾石(图4(a)),并随着(NaPO₃)₆含量的增加(样品S1到S4),钙矾石晶体尺寸显著变小,数量减少(图4)。对于含高剂量(含量为8%和12%) (NaPO₃)₆的样品S3和S4,在同等比例尺下已经难以观察到钙矾石(图4(c)、4(d)),但XRD图中钙矾石衍射峰无明显变化(见图5)。这表明,在硫酸钠浸泡环境中,(NaPO₃)₆并不能有效抑制钙矾石的成核,但能够明显降低钙矾石晶体尺寸。

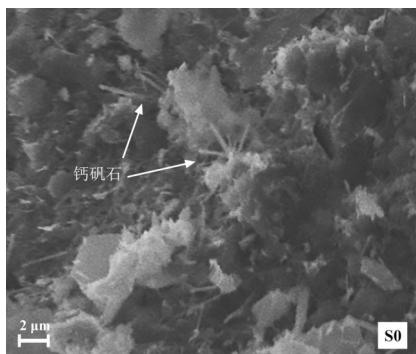


图2 样品S0的SEM图

Fig. 2 SEM image of the sample S0

2.2 内掺硫酸盐环境(NaPO₃)₆的抑制作用

在内掺硫酸钠的实验中,无(NaPO₃)₆的样品S5中钙矾石晶体的尺寸较大(图6(a)),呈针尖状;而含有8%(NaPO₃)₆的样品S6中钙矾石晶体的尺寸非常小(图6(b))。XRD结果显示,在添加(NaPO₃)₆的样品S6中,依然可以检测出钙矾石衍射峰,且峰强与无(NaPO₃)₆样品S5无明显差异

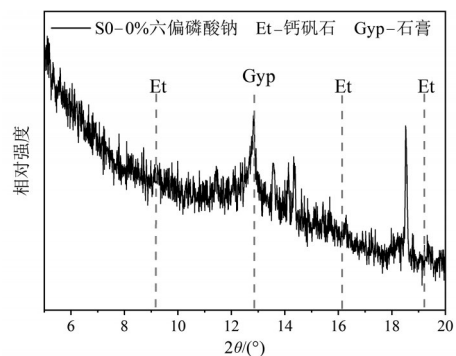


图3 样品S0的XRD图

Fig. 3 X-ray diffractograms for the sample S0

(图7)。这表明在高浓度硫酸钠内掺的情况下,(NaPO₃)₆对钙矾石的抑制效果与硫酸钠浸泡环境的效果一致。

3 讨论

本次研究制备了两组水泥土,需注意水泥土制备规格一般需严格符合《水泥土配合比设计规程》^[36],本次研究重在探究并验证(NaPO₃)₆对硫酸盐水泥土中钙矾石的抑制作用,为了操作方便控制水泥掺量、含水量、试样尺寸、硫酸钠浓度等条件在实验中保持不变即可。微观形貌和成分分析表明,在浓度为8 000 mg/kg的硫酸钠(浸泡或内掺)环境下,(NaPO₃)₆均无法完全抑制钙矾石的成核,但阻止了其生长过程,下面将对实验结果及抑制机理进行详细地讨论。

3.1 (NaPO₃)₆对硫酸盐水泥土中钙矾石的抑制作用

前文提及,钙矾石生成有两种途径:Ⅰ型侵蚀是水泥水化产物直接与硫酸盐反应,Ⅱ型侵蚀则需要黏土矿物的溶解产生可与硫酸盐反应的成分。本次实验采用粗砂土,XRD结果表明黏土矿物含量约为20%(蒙脱石+高岭石),表明实验中水泥土可以通过反应式(2)提供铝化合物,生成

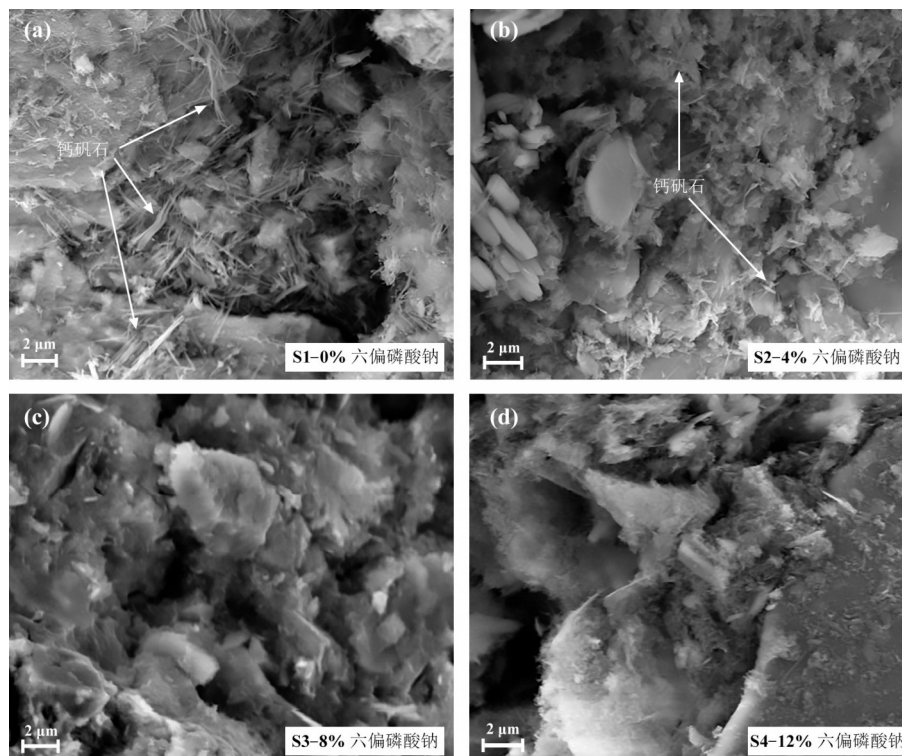
图4 不同 $(\text{NaPO}_3)_6$ 含量的样品S1-S4的SEM图

Fig. 4 SEM images of the samples S1-S4 with different contents of sodium hexametaphosphate

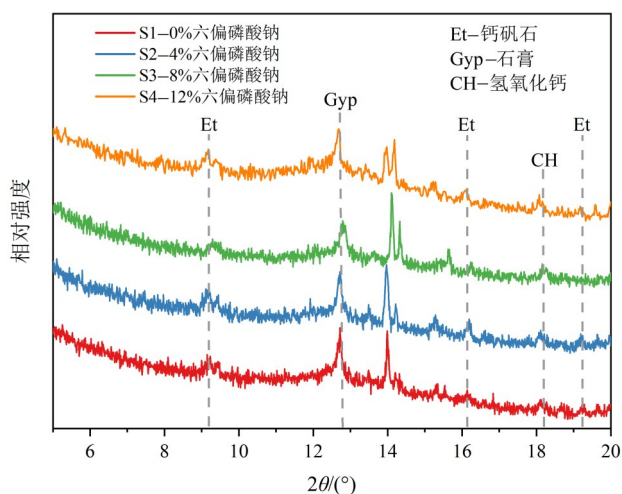
图5 不同 $(\text{NaPO}_3)_6$ 含量的样品S1-S4的XRD图

Fig. 5 X-ray diffractograms for the samples S1-S4 with different contents of sodium hexametaphosphate

钙矾石(Ⅱ型侵蚀)。因此在硫酸盐和黏土矿物的共同存在下,两种侵蚀途径均可发生。本文采用8 000 mg/kg高浓度硫酸盐含量能够很好地促进钙矾石生成反应的进行,且实验设置21 d的浸泡时间给予反应过程较为充足的时间,因此在添加 $(\text{NaPO}_3)_6$ 的条件下,产物的情况可反映 $(\text{NaPO}_3)_6$ 是否具有强抑制作用。根据图2到图7的样品分析结果,添加低含量的 $(\text{NaPO}_3)_6$,水泥土仍有大量钙

矾石存在,而随着 $(\text{NaPO}_3)_6$ 含量提高,水泥土中钙矾石晶体生长(尺寸)受到明显的抑制作用,直至在同比例尺镜下无法被清楚观察到。另外,实验组1中水泥土浸泡于硫酸钠溶液内,硫酸盐是从外界渗透进入水泥土,因此不能确定 $(\text{NaPO}_3)_6$ 到底是可以直接抑制钙矾石的成核反应,还是通过降低水泥土的渗透率从而阻止硫酸盐与水泥土的接触(例如无定形二氧化硅^[29]和纳米碳酸钙^[30])。为了进一步厘清 $(\text{NaPO}_3)_6$ 对水泥土渗透率的作用,我们设计了实验组2,即:在制备水泥土的过程中,将硫酸钠直接掺入水泥土中,保证高浓度硫酸钠与水泥土充分接触。实验组1和2的SEM和XRD结果可以说明,添加 $(\text{NaPO}_3)_6$ 的水泥土并不能有效阻止硫酸盐和水泥土中钙离子和铝化合物的接触,从而抑制钙矾石的成核,但能够抑制钙矾石晶体的尺寸生长,且含量越大,抑制作用越明显。这表明在前人的研究中,简单离子溶液环境下少量 $(\text{NaPO}_3)_6$ 可有效抑制钙矾石成核^[33-35],不适用于治理天然硫酸盐渍土的水泥加固膨胀问题。

本次实验中,含高含量 $(\text{NaPO}_3)_6$ 的水泥土样品S4和S6中难以观察到钙矾石的存在,这与Harris探究高浓度抑制剂抑制性能的实验结果一致^[34]。已知特定的磷酸盐以及羧酸盐具有抑制作用,可

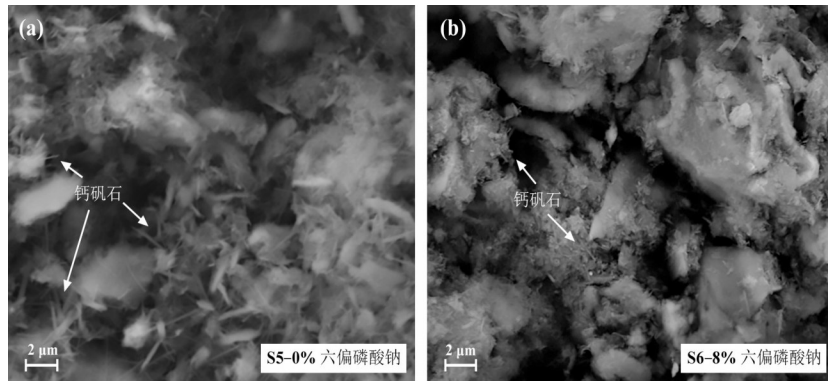
图 6 不同 $(\text{NaPO}_3)_6$ 含量的样品 S5 和 S6 的 SEM 图

Fig. 6 SEM images of the samples S5 and S6 with different contents of sodium hexametaphosphate

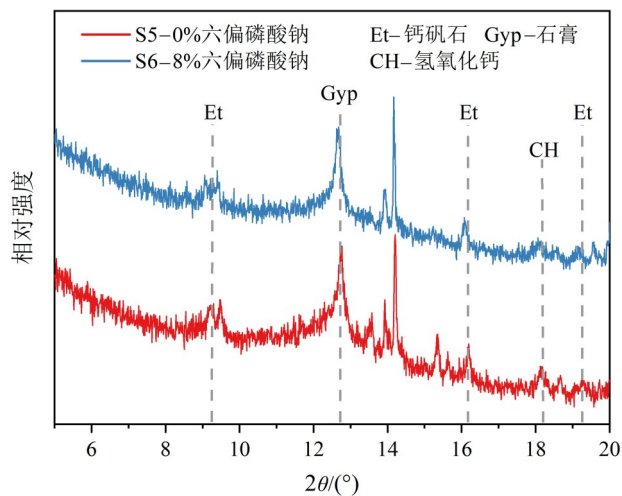
图 7 不同 $(\text{NaPO}_3)_6$ 含量的样品 S5 和 S6 的 XRD 图

Fig. 7 X-ray diffractograms for the samples S5 and S6 with different contents of sodium hexametaphosphate

吸附在钙矾石晶体表面上, 阻碍钙矾石晶体的生长, 从而使钙矾石晶体尺寸显著减小^[33, 46-47]。尽管, XRD 结果说明 $(\text{NaPO}_3)_6$ 不能有效抑制钙矾石的成核, 与 Cody^[33]的研究成果有一定差异。但是, Cody 的实验是用氢氧化钙与硫酸铝合成纯钙矾石, 溶液环境不存在其他杂质离子。本文实验则使用水泥-土-硫酸钠模拟水泥加固硫酸盐渍土, 作为钙矾石生成的环境, 化学条件复杂, 一些杂质可能削弱添加剂的抑制作用, 例如磺酸盐和碳酸氢盐等会影响磷酸盐在水泥土中的抑制效果^[48-49]。根据 XRD 结果, 发现 $(\text{NaPO}_3)_6$ 的含量对其他矿物(如氢氧化钙、石膏)的生成没有显著影响, 且本研究间接证明天然硫酸盐渍土在水泥固化过程中复杂的物相变化(矿物和离子)效应使钙矾石生成及抑制机制更加复杂, 例如黏土矿物溶解、参与反应消耗的硫酸根、溶液的 pH 等变化, 因此需要设计新的实验进行更深入地研究。

同时, $(\text{NaPO}_3)_6$ 添加剂的抑制作用对硫酸盐水泥土强度以及长期稳定性的影响亟需进一步探究。

3.2 抑制剂作用机理

一般来说, 钙矾石晶体的形成包括成核与生长两个过程。某些特定成分(例如磷酸盐、羧酸盐)可被吸附在钙矾石临界晶核表面, 使得成核激活能降低或升高, 进而促使或抑制晶核形成^[33, 50]。也有学者认为, 抑制钙矾石成核的原因是钙矾石晶体能与某些特定的磷酸盐(如 $(\text{NaPO}_3)_6$ 、磷酸三钠)发生络合反应, 生成的络合物消耗钙矾石晶核形成所需的各种物质以及阻碍各种钙矾石生成物的扩散^[46-47]。Darmali^[50]认为 $(\text{NaPO}_3)_6$ 等一些添加剂可以通过三个吸附位置改变晶体生长, 即晶体的扭结点、台阶面和台阶边缘。晶体表面上的吸附点代表一个空间屏障, 阻碍了生长单元扩散, 导致晶体大小发生改变。这些理论解释了 $(\text{NaPO}_3)_6$ 等特定的抑制剂可以抑制纯净溶液环境中钙矾石的成核与生长。然而, 本文直接表明在非纯净化学环境的硫酸盐水泥土中, $(\text{NaPO}_3)_6$ 对钙矾石的强抑制作用受到削弱, 因此在硫酸盐水泥土工程中须谨慎使用。

4 结论

本文设计了两组实验, 制备了不同 $(\text{NaPO}_3)_6$ 含量和不同硫酸盐环境(浸泡或内掺)的水泥土样品, 使用 SEM 和 XRD 分析了水泥土样品的微观形貌和成分, 揭示了钙矾石的生成情况, 并尝试探讨了实验现象背后的机理。主要观点可归纳如下:

- 1) 在硫酸钠浸泡或内掺环境中, 不同含量的 $(\text{NaPO}_3)_6$ 均不能有效抑制水泥土中钙矾石的成核, 但高含量 $(\text{NaPO}_3)_6$ 可明显降低钙矾石晶体尺寸。
- 2) $(\text{NaPO}_3)_6$ 抑制剂应用于改善硫酸盐渍土的

工程中, 需考虑复杂环境中杂质离子对抑制剂效果的干扰, 其抑制作用的影响因素以及对水泥加

固盐渍土强度的影响仍需进行系统的研究。

参考文献:

- [1] SHERWOOD P T. Soil stabilization with cement and lime [M]. England: Her Majesty Stationary Office, 1993.
- [2] RAO S N, RAJASEKARAN G. Reaction products formed in lime-stabilized marine clays [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122(5): 329-336.
- [3] PUPPALA A J, CONGRESS S S C, TALLURI N, et al. Sulfate-heaving studies on chemically treated sulfate-rich geomaterials [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(6): 04019076.
- [4] PUPPALA A J, PEDARLA A, BHEEMASETTI T. Chapter 10 - Soil modification by admixtures: concepts and field applications [C]//INDRARATNA B, et al. *Ground Improvement Case Histories*. Butterworth-Heinemann, 2015: 291-309.
- [5] 许贤敏, 路凡. 水泥土的性能及其在国外的应用[J]. *公路*, 2005(5): 117-124.
- [6] PUPPALA A J, WATTANASANTICHAROEN E, PUNTHUTAECHA K. Experimental evaluations of stabilization methods for sulphate-rich expansive soils [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2003, 7(1): 25-35.
- [7] 温利强. 我国盐渍土的成因及分布特征[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [8] DERMATAS D. Ettringite-induced swelling in soils: state-of-the-art [J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1995, 48(10): 659.
- [9] PUPPALA A J, GRIFFIN J A, HOYOS L R, et al. Studies on sulfate-resistant cement stabilization methods to address sulfate-induced soil heave [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(4): 391-402.
- [10] PUPPALA A J, TALLURI N, CONGRESS S S C, et al. Ettringite induced heaving in stabilized high sulfate soils [J]. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2018, 3(1): 72.
- [11] HIME W G, MATHER B. "Sulfate attack," or is it? [J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(5): 789-791.
- [12] 尧俊凯. 硫酸盐侵蚀水泥改良土膨胀研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2019.
- [13] 李晨, 张正甫, 刘松玉, 等. 水泥石灰固化软土中的钙矾石形成研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(增刊2): 662-665.
- [14] 钱觉时, 余金城, 孙化强, 等. 钙矾石的形成与作用 [J]. *硅酸盐学报*, 2017, 45(11): 1569-1581.
- [15] KNOPP J, MOORMANN C. Ettringite swelling in the treatment of sulfate-containing soils used as subgrade for road constructions [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 143: 128-137.
- [16] ROLLINGS R S, BURKES J P, ROLLINGS M P. Sulfate attack on cement-stabilized sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(5): 364-372.
- [17] HUNTER D, GEOCHEMIST E. Lime-induced heave in sulfate-bearing clay soils [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1988, 114(2): 18.
- [18] 刘开伟, 王爱国, 孙道胜, 等. 硫酸盐侵蚀下钙矾石的形成和膨胀机理研究现状[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(12): 4014-4019.
- [19] MÜLLAUER W, BEDDOE R E, HEINZ D. Sulfate attack expansion mechanisms [J]. *Cement and Concrete Research*, 2013, 52: 208-215.
- [20] MEHTA P K. Mechanism of expansion associated with ettringite formation [J]. *Cement and Concrete Research*, 1973, 3(1): 1-6.
- [21] MEHTA P K, WANG S. Expansion of ettringite by water adsorption [J]. *Cement and Concrete Research*, 1982, 12(1): 121-122.
- [22] PUPPALA A J, INTHARASOMBAT N, VEMPATI R K. Experimental studies on ettringite-induced heaving in soils [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(3): 325-337.
- [23] PUPPALA A J, TALLURI N, CHITTOORI B C S. Calcium-based stabiliser treatment of sulfate-bearing soils [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 2014, 167(3): 162-172.
- [24] LITTLE D N, SYAMNAIR B. Addressing sulfate-induced heave in lime treated soils [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(1): 110-118.
- [25] 薛君珩. 论形成钙矾石相的膨胀[J]. *硅酸盐学报*, 1984(2): 251-257.
- [26] WANG L, ROY A, SEALS R, et al. Stabilization of sulfate-containing soil by cementitious mixtures mechanical properties [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2003, 1837: 12-19.
- [27] IRASSAR E F, GONZÁLEZ M, RAHHAL V. Sul-

- phate resistance of type V cements with limestone filler and natural pozzolana [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2000, 22(5): 361–368.
- [28] NEVILLE A. The confused world of sulfate attack on concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(8): 1275–1296.
- [29] DAVRAZ M, GUNDUZ L. Engineering properties of amorphous silica as a new natural pozzolan for use in concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(7): 1251–1261.
- [30] MENG T, QIANG Y, HU A, et al. Effect of compound nano-CaCO₃ addition on strength development and microstructure of cement-stabilized soil in the marine environment [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 151: 775–781.
- [31] TASONG W A, WILD S, TILLEY R J D. Mechanisms by which ground granulated blastfurnace slag prevents sulphate attack of lime-stabilised kaolinite [J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(7): 975–982.
- [32] CELIK E, NALBANTOGLU Z. Effects of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) on the swelling properties of lime-stabilized sulfate-bearing soils [J]. *Engineering Geology*, 2013, 163: 20–25.
- [33] CODY A M, LEE H, CODY R D, et al. The effects of chemical environment on the nucleation, growth, and stability of ettringite $[\text{Ca}_3\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(5): 869–881.
- [34] HARRIS P, HARVEY O, JACKSON L, et al. Killing the ettringite reaction in sulfate-bearing soils [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2014, 2462(1): 109–116.
- [35] LEE H M, HWANG J Y, Oh J H. A study for crystal growth inhibition of ettringite by solution synthesis experiment [J]. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 2010, 23(1): 51–61.
- [36] 福建省建筑科学研究院. JGJ/T 233—2011 水泥石配合比设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [37] EMIDIO G D, FLORES R D V. Monitoring the impact of sulfate attack on a cement-clay mix [C]//Geo Congress 2012, 2012.
- [38] PEETHAMPARAN S, OLEK J, DIAMOND S. Mechanism of stabilization of Na-montmorillonite clay with cement kiln dust [J]. *Cement and Concrete Research*, 2009, 39(7): 580–589.
- [39] ISMAIL M A, JOER H A, SIM W H, et al. Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128(6): 520–529.
- [40] WU Z, DENG Y, LIU S, et al. Strength and microstructure evolution of compacted soils modified by admixtures of cement and metakaolin [J]. *Applied Clay Science*, 2016(127/128): 44–51.
- [41] PUPPALA A J, CHITTOORI B, SARIDE S. Sulfate induced heaving of a taxiway: a case study [J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2012, 42(4): 257–266.
- [42] RAJASEKARAN G. Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays [J]. *Ocean Engineering*, 2005, 32(8/9): 1133–1159.
- [43] WANG L, ROY A, SEALS R K, et al. Suppression of sulfate attack on a stabilized soil [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2005, 88(6): 1600–1606.
- [44] LI W, YI Y, PUPPALA A J. Utilization of carbide slag-activated ground granulated blastfurnace slag to treat gypseous soil [J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(5): 1496–1507.
- [45] YI Y, LI C, LIU S, et al. Resistance of MgO-GGBS and CS-GGBS stabilised marine soft clays to sodium sulfate attack [J]. *Géotechnique*, 2014, 64(8): 673–679.
- [46] TAN H, ZOU F, LIU M, et al. Effect of the adsorbing behavior of phosphate retarders on hydration of cement paste [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(9): 04017088.
- [47] JANSEN D, NEUBAUER J, GOETZ-NEUNHOEFER F, et al. Change in reaction kinetics of a Portland cement caused by a superplasticizer – calculation of heat flow curves from XRD data [J]. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42(2): 327–332.
- [48] LUBELLI B, HEES R P J. Effectiveness of crystallization inhibitors in preventing salt damage in building materials [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2007, 8(3): 223–234.
- [49] COLOMBO A, GEIKER M, JUSTNES H, et al. The effect of calcium lignosulfonate on ettringite formation in cement paste [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 107: 188–205.
- [50] DARMALI C, MANSOURI S, YAZDANPANAH N, et al. Mechanisms and control of impurities in continuous crystallization: a review [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 58(4): 1463–1479.