

Influence Research Review on Common Anions on the Formation and Transformation of AFm Phase

Chuqiao Wang¹, Qiang Wang¹, Yetao He², Yuanming Song^{1*}

¹School of Environmental and Materials Engineering, Yantai University, Yantai Shandong

²Yantai Hongteng Building Materials Co. Ltd., Yantai Shandong

Email: *871465133@qq.com

Received: Jun. 24th, 2020; accepted: Jul. 21st, 2020; published: Jul. 28th, 2020

Abstract

AFm phase is one of the main hydration products of cement. Limestone powder, concrete admixture and cement-based materials can introduce various anions into cement-based materials in the service environment, which will affect the formation of AFm phase in all aspects, and then affect the performance and durability of cement-based materials. In this paper, the influence of several common anions on the formation and transformation of AFm phase in cement is reviewed, and the influence rules of Cl^- , CO_3^{2-} , NO_3^- and NO_2^- on AFm phase in cement are analyzed and summarized. Some problems and directions that need further study and discussion are proposed.

Keywords

Cement, Hydration, AFm Phase, Anionic

常见阴离子对AFm相的生成及转化的影响研究综述

王楚乔¹, 王 强¹, 贺业涛², 宋远明^{1*}

¹烟台大学环境与材料工程学院, 山东 烟台

²烟台市宏腾建材有限公司, 山东 烟台

Email: *871465133@qq.com

收稿日期: 2020年6月24日; 录用日期: 2020年7月21日; 发布日期: 2020年7月28日

*通讯作者。

摘要

AFm相是水泥的主要水化产物之一。石灰石粉、混凝土外加剂及水泥基材料的服役环境都可向水泥基材料中引入各种不同的阴离子,对AFm相的生成产生各方面的影响,进而影响水泥基材料的各项性能及耐久性。论文综述了国内外学者近几年来关于几种常见阴离子对AFm相的生成及转化的影响研究,分析总结了 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 NO_3^- 和 NO_2^- 对水泥中AFm相的影响规律,提出了一些当前需要深入研究和讨论的问题及方向。

关键词

水泥,水化,AFm相,阴离子

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

AFm ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-mono}$)是水泥的主要水化产物之一。在水泥的水化过程中,当石膏与CaO同时存在时,铝酸三钙(C_3A)会水化生成多硫型水化硫铝酸钙(钙矾石,AFt),钙矾石生成之后,若系统中的石膏已耗尽,铝酸三钙(C_3A)会继续与先前生成的钙矾石发生反应生成单硫型水化硫铝酸钙(AFm),通常人们所说的AFm,其实指的是 $\text{SO}_4\text{-AFm}$ 。事实上,AFm并非指单一矿物,而是一系列具有特定结构的含铝化合物的统称,它们均属由主层和中间层构成的双层结构,主层带正电荷,表示为 $[\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe})(\text{OH})_6]^+$,中间层带负电荷,表示为 $\text{X}\cdot\text{mH}_2\text{O}$,因而AFm的组成通式可表示为 $[\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe})(\text{OH})_6]^+\text{X}\cdot\text{mH}_2\text{O}$,其中的X表示可变换的阴离子,用来平衡阳离子电荷,可为 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 SO_4^{2-} 或 OH^- ,变换X的种类可以表示不同类型的阴离子单取代水化铝酸钙,如X为 Cl^- 时,表示 Cl-AFm 。

鉴于以上所述的一系列矿物具有结构上的相似性,有文献[1][2]提出了“AFm family”的概念,即“AFm家族”,又由于上述矿物基本都是以单独相而不是固溶体的形式存在,因此便有国外学者[3][4]建议将此类矿物统一称作“AFm phases”,即“AFm相”,但上述两个概念实际上只是称谓不同,所指的矿物均为同一种。因此,为统一起见,本文一律将其称为“AFm相”。

石灰石粉作为水泥生产的混合材或混凝土配制的掺合料,可向水泥基材料中引入 CO_3^{2-} ;混凝土早强剂、防冻剂或防锈剂的广泛使用可引入 NO_3^- 或 NO_2^- ;水泥基材料的服役环境(如海洋、盐湖、地下水等)则可引入 Cl^- ,因此 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 NO_3^- 、 NO_2^- 在水泥中是普遍存在的,使得AFm相的种类、数量乃至生成速率产生显著变化,从而使得AFm相在胶凝系统中的作用更加凸显。需要特别指出的是,上述阴离子在胶凝体系中可能会涉及其他反应,如 Cl^- 还可通过物理吸附与水化硅酸钙(C-S-H)结合,此类反应与 Cl-AFm 的生成及转化无直接联系,本文不作阐述。

2. 阴离子与AFm相

2.1. Cl^- 与AFm相

当 Cl^- 的以内掺的方式进入混凝土情况下,如加入氯化钠或氯化钙等氯化物速凝剂。Larsen等[5][6][7]认为水泥熟料中的铝酸三钙可与 Cl^- 反应生成Friedel's盐,即 Cl-AFm ,其化学式为 $\text{C}_3\text{A}\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 。

在此基础上,人们普遍认为铝酸三钙的含量与水泥的 Cl^- 结合能力成正比,而 Hewlett 等[8]却研究发现,此结论仅在内掺 Cl^- 的情况下才能够成立,在外掺 Cl^- 时不能体现此规律。不仅仅是铝酸三钙,水泥中的铁铝酸四钙(C_4AF)同样可以与 Cl^- 结合生成类似 Friedel's 盐的产物[5] [6],与 Friedel's 盐不同的是,此类盐产物以 Fe 置换了 Friedel's 盐中的 Al。此外,普遍认为水泥中 SO_4^{2-} 的存在会使铝酸三钙优先同 SO_4^{2-} 进行反应生成钙矾石,只有当 SO_4^{2-} 被全部消耗掉以后,铝酸三钙才会继续与 Cl^- 反应生成 Friedel's 盐,直到 Cl^- 完全反应完以后, C_3A 才会与钙矾石反应生成 $\text{SO}_4\text{-AFm}$,一定程度上使钙矾石得以稳定[9] [10]。

当 Cl^- 以外掺方式进入的时候,如由海水或除冰盐引入。Glasser 等[10]通过实验证实水化后的铝酸三钙(水化铝酸钙, C-A-H)同样也可以与 Cl^- 反应生成 Friedel's 盐,而水化后体系中的 $\text{SO}_4\text{-AFm}$ 与钙矾石则不会与其发生反应[7]。由于此时已经生成了 $\text{SO}_4\text{-AFm}$, Balonis 等[11]研究发现引入的 Cl^- 可将 $\text{SO}_4\text{-AFm}$ 中的 SO_4^{2-} 置换出来,且当 Cl^- 浓度较高时生成 Friedel's 盐,浓度较低时则生成 Kuzel's 盐,化学式为 $\text{C}_3\text{A}\cdot 0.5\text{CaCl}_2\cdot 0.5\text{CaSO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$,也属于 Cl-AFm 的一种,且被置换出的 SO_4^{2-} 可再次与 C-A-H 反应生成钙矾石,导致混凝土体积膨胀,对其耐久性产生不利形象。然而 Cl^- 也可以置换出 $\text{CO}_3\text{-AFm}$ 中的 CO_3^{2-} 生成 Friedel's 盐,被置换出的 CO_3^{2-} 则会进一步形成方解石并且不会引起膨胀。

由于混凝土早强剂和水泥基材料的服役环境常常会向材料中引入 Cl^- ,而 Cl^- 又是导致混凝土中钢筋腐蚀的重要原因之一,因此针对其在水泥中所参与的反应及作用的研究报道相对较多。无论是内掺还是外掺,各学者的研究结果均呈现出了一个统一的事实: Cl^- 可参与水泥水化反应生成 Friedel's 盐,从而影响到水泥中 AFm 相生成的数量及种类,进而影响到钙矾石的稳定性。

2.2. CO_3^{2-} 与 AFm 相

Nehdi 等[12]认为碳酸钙电离出的 CO_3^{2-} 可与铝酸三钙反应生成单碳型水化碳铝酸钙(Mc),即 $\text{CO}_3\text{-AFm}$,化学式为 $\text{C}_3\text{A}\cdot \text{CaCO}_3\cdot 11\text{H}_2\text{O}$ 。在此基础上,周明凯等[13]最早研究发现石灰石粉能够加速和参与水泥水化,在水泥水化过程中起核心作用, CO_3^{2-} 与 C_3A 反应可生成单碳型水化碳铝酸钙,该反应能够抑制钙矾石向 $\text{SO}_4\text{-AFm}$ 的转化,从而提高了钙矾石的稳定性,且当石灰石粉粒径小于 $10\ \mu\text{m}$ 时,对钙矾石稳定性的提高效果更加显著。刘焕芹等[14] [15]在水化后的掺有石灰石粉的水泥样品中发现了单碳型水化碳铝酸钙的存在,且石灰石粉的掺入有效阻止了钙矾石向 $\text{SO}_4\text{-AFm}$ 的转化,使得钙矾石得以稳定,进一步验证了周明凯等的结论。周少龙等[16]通过向硫铝酸盐水泥中掺加石灰石粉,也得出了相同的研究结果,认为其原因是 $\text{CO}_3\text{-AFm}$ 的稳定性高于 $\text{SO}_4\text{-AFm}$,使得在水化过程中 $\text{CO}_3\text{-AFm}$ 比 $\text{SO}_4\text{-AFm}$ 优先生成,即当 CO_3^{2-} 与钙矾石同时存在时,铝酸三钙会优先与 CO_3^{2-} 反应,待 CO_3^{2-} 消耗完毕后,铝酸三钙才会与钙矾石发生反应,从而使钙矾石得以稳定。石灰石粉中的 CaCO_3 作为一种难溶性碳酸盐其电离产生的 CO_3^{2-} 数量极少,在不含石灰石粉的混凝土中,即使其发生了一定程度的碳化,但进入混凝土内部的 CO_3^{2-} 也是非常有限的,因此也有资料[17]将石灰石粉视为一种惰性材料。

石灰石粉在水泥生产和混凝土配制中的大量应用也使得人们对其进行了大量的研究,大多数学者认为水泥中 CO_3^{2-} 的存在不仅可以加速水泥水化的过程,而且对 AFm 相的生成及转化的影响也是不可忽视的, CO_3^{2-} 可参与水泥水化反应生成 $\text{CO}_3\text{-AFm}$,与 Cl^- 类似,同样可对钙矾石的稳定性产生影响。

2.3. NO_3^- 、 NO_2^- 与 AFm 相

Balonis 等[18]发现 NO_3^- 或 NO_2^- 可以轻易取代出 AFm 相结构中的 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 或 OH^- ,分别形成 $\text{NO}_3\text{-AFm}$ 和 $\text{NO}_2\text{-AFm}$,化学式分别为 $\text{C}_3\text{A}\cdot \text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{C}_3\text{A}\cdot \text{Ca}(\text{NO}_2)_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$,且相比水泥中的其他常见阴离子, NO_2^- 在 AFm 相中具有最高的热力学稳定性。Falzone 等[19]通过向铝酸盐水泥中掺入硝酸钙,发现在水泥水化过程中 NO_3^- 能够参与生成 $\text{NO}_3\text{-AFm}$,在长达 90 天的时间内 $\text{NO}_3\text{-AFm}$ 可以稳定存在,

由于 $\text{NO}_3\text{-AFm}$ 的空间填充/刚度效应, 在相同的水灰比条件下, 掺有硝酸钙的水泥体系比不含硝酸钙的水泥体系表现出更低的孔隙率和更高的强度, 并且能够绕过亚稳态水化铝酸钙相的形成。戴燕华[20]等将水泥净浆试块浸泡于水中, 发现随着龄期的增长, 先前生成的 $\text{NO}_2\text{-AFm}$ 的 XRD 衍射峰逐渐减弱, 最后甚至消失, 认为这是由于水分子的渗入改变了试块内部的 pH, 导致了 $\text{NO}_2\text{-AFm}$ 的分解或向其它物质进行了转化。同时还发现浸泡在含有 Cl^- 的溶液中的试块, 其生成的 $\text{NO}_2\text{-AFm}$ 被 Cl^- 取代形成了 Friedel's 盐。而 NO_3^- 或 NO_2^- 却无法取代出 Cl-AFm 中的 Cl^- , 且 NO_3^- 或 NO_2^- 的掺入改变了 AFm/AFt 的平衡, 使钙矾石的生成量增多。此外, 亚硝酸盐在钢筋混凝土中可作为防锈剂, Cl^- 渗透是引起钢筋混凝土中钢筋锈蚀的重要原因之一, 加入亚硝酸盐可有效削弱游离态 Cl^- 对钢筋的锈蚀, Balonis 等[18]认为这与 AFm 相对 Cl^- 的化学结合有关, 其机理为 Cl^- 可置换出 $\text{NO}_2\text{-AFm}$ 中的 NO_2^- 形成 Cl-AFm , 释放出游离 NO_2^- , 使 $[\text{NO}_2^-]:[\text{Cl}^-]$ 的比值增大, 有利于钢筋的钝化[21]。

目前关于 NO_3^- 或 NO_2^- 的研究大多集中在其作为防冻剂或防锈剂对水泥基材料的性能产生的影响, 对比起 Cl^- 和 CO_3^{2-} , 虽有文献涉及到 NO_3^- 或 NO_2^- 与 AFm 相生成及转化的关系, 但很少有文献提到该关系对钙矾石稳定性的影响。

3. 阴离子取代顺序

上述研究表明, 向水泥中引入不同类型的阴离子, 可生成对应类型的 AFm 相, 且生成的 AFm 相之间是可以进行转化的, 因此一个问题便应运而生了: 不同类型的 AFm 相之间将按照何种规律进行转化? 即当存在两种及以上的阴离子时, “哪种阴离子会优先生成其对应的 AFm 相” 的问题, 于是人们便也对其进行了探索, 但针对此问题的研究报道仅存在以下少数。

王绍东等[1]认为阴离子与 AFm 相的作用顺序(即阴离子取代能力顺序)是不同的, 优先顺序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{CO}_3^{2-} > \text{Cl}^-$, 即在水泥中 $\text{SO}_4\text{-AFm}$ 最为稳定且优先生成, 其次是 $\text{CO}_3\text{-AFm}$, 最后是 Cl-AFm 。Balonis 等[18][19]通过实验并建立热力学模型进行计算, 认为在 25°C 下, 阴离子取代顺序应为 $\text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{NO}_2^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{OH}^-$ 。Zheming Ni 等[22]则通过静电势能模型加以理论分析, 认为该取代顺序应为 $\text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{OH}^- > \text{F}^- > \text{Cl}^- > \text{Br}^- > \text{NO}_3^-$ 。

由于对于 AFm 相中阴离子取代能力顺序的研究本来就为数不多, 再加之在学术界尚存争议, 于是便更加给此问题蒙上了一层神秘的面纱。虽然各学者关于 AFm 相的阴离子取代顺序的研究结果并不统一, 甚至相互矛盾, 但是在目前所能查阅到的各类文献资料中, 支持 Balonis 等观点的学者占据多数, 且根据大量文献的实验现象来看, 有多数更加符合 Balonis 等的理论。

4. 阴离子与材料性能

根据以上文献报道, 水泥基材中普遍存在的 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 NO_3^- 和 NO_2^- 均可以参与水泥水化反应并形成对应的 AFm 相, 与此同时, 人们也对上述阴离子对材料性能的影响展开了大量的研究。

冷达等[23]研究发现, 掺入 1% 的氯化钙之后, 灌浆料试样的 1 d 抗压强度从 11.4 MPa 提高到了 23.1 MPa, 其 28 d 抗压强度也有所提高。王中平[24]等研究了不同温度下氯离子对水泥性能的影响, 发现在掺有 2% 氯化钠铝酸盐水泥砂浆试件各龄期抗压强度均为最大, 且不同温度下水化产物的组成是不同的, 在 20°C 的条件下, 适量氯化钠的掺入对砂浆强度的发展十分有利, 而在 5°C 和 40°C 的条件下氯化钠对强度的发展是不利的。叶东忠等[25]向水泥砂浆中掺入 1%~3% 的氯化钙, 发现其 1 d 抗压强度从 8 MPa 提高到了 14 MPa 以上, 3d 抗压强度从 21 MPa 提高到了 28 MPa。

Scholer 等[15]认为掺加水泥质量 2%~5% 的石灰石粉能使水泥中的钙矾石稳定, 显著提高水泥中后期(28 d 以后)的抗压强度, 而对早期(7 d 以前)强度没有显著影响, 石灰石粉掺量过低或过高均不利

于强度的发展。周少龙等[16]发现石灰石微粉可以增加硫铝酸盐水泥净浆中钙矾石的稳定性,显著提高硫铝酸盐水泥净浆的抗压强度,在石灰石粉掺量为10%时,对3 d和7 d的抗压强度提高不明显,而到了14 d和28 d龄期,石灰石粉的掺入使得胶凝体系的抗压强度相对空白试样均提高了约20%。孙志芳[26]等研究发现石灰石粉掺量在15%以下时可降低硅酸盐水泥标准稠度用水量,还可以缩短凝结时间,使得水泥胶砂3 d强度有所提高,但28 d强度影响不利,当石灰石粉掺量超过15%时,对上述性能均不利。

Alan [27]发现向水泥中掺入1.5%的硝酸钙,其抗压强度与没有掺加早强剂的混凝土相当。向混凝土中加入亚硝酸钙,可使其1 d抗压强度提高66%,7 d抗压强度提高29%。姚燕等[28]在50℃下将硝酸钙掺入到铝酸盐水泥中,发现在1~28 d龄期内与未掺加硝酸钙的基准试样相比,掺加8%~15%硝酸钙试样的抗压强度明显大于基准试样,尤其是7 d与28 d龄期,其强度已达基准试样的2倍以上。刘红杰等[29]将亚硝酸钙掺入硫铝酸盐水泥中,发现亚硝酸钙可提高硫铝酸盐水泥强度,在掺加2%亚硝酸钙时,与对照组相比其28 d抗折强度提高了1.3%,28 d抗压强度提高了43.7%。

上述报道说明,向水泥中掺入 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 NO_3^- 和 NO_2^- 除可生成相应的AFm相之外,若用量得当,还可显著提升水泥性能,在工程实际中有着一定的实用价值。多数学者认为根本原因在于:引入的阴离子通过影响AFm相的生成及转化,从而影响钙矾石的生成量及稳定性,进而影响到材料的宏观性能。

5. 结语

综上所述,水泥基材中普遍存在的 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 NO_3^- 和 NO_2^- 均可以参与水泥水化反应并形成对应的AFm相,且生成的AFm相之间能够通过阴离子取代反应进行转化,对水泥基材料的性能产生一定影响。普遍认为阴离子取代能力由高到低依次为 $\text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{NO}_2^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{OH}^-$ 。由于Cl-AFm或 CO_3 -AFm比 SO_4 -AFm更加稳定,因此 Cl^- 或 CO_3^{2-} 可通过与钙矾石竞争,优先同铝酸三钙反应生成Cl-AFm或 CO_3 -AFm,从而对钙矾石起到一定的稳定作用,势必会对水泥基材料的性能产生一定的影响,但是关于 NO_3^- 或 NO_2^- 对钙矾石稳定性的影响却几乎未见有关报道。所以,基于以上结论,在未来的研究中,还需从以下两方面进行更加深入的思考和探索:

1) 根据多数学者认同的阴离子取代能力顺序, Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 NO_3^- 和 NO_2^- 对应的AFm相的稳定性均高于 SO_4 -AFm,所以 NO_3^- 或 NO_2^- 不仅可以生成其对应的AFm相,理论上应该也可对钙矾石的稳定性产生一定影响,其影响程度应该介于 CO_3^{2-} 与 Cl^- 之间,但是针对此理论上的猜测,还需通过实践进行进一步的验证。

2) 对于阴离子取代能力顺序的研究,尚存在着一定争议,不同学者有着不同的研究结果,这些结果甚至是相互矛盾的。究其原因,可能是外界条件(如温度、pH值等)或离子强度的不同造成了不同结果的产生。因此,通过在不同温度、不同pH值等条件下,以离子强度为变量,针对以上四种阴离子的取代能力顺序进行进一步深入研究,是解决这一争议的关键。

参考文献

- [1] 王绍东,黄煜焱,王智. 水泥组分对混凝土固化氯离子能力的影响[J]. 硅酸盐学报, 2000, 28(6): 570-574.
- [2] Zhou, X., Zhou, M., Wu, X., *et al.* (2017) Studies of Phase Relations and AFm Solid Solution Formations in the System $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaCl}_2\text{-CaCrO}_4\text{-H}_2\text{O}$. *Applied Geochemistry*, **80**, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.02.014>
- [3] Zajac, M., Bremseth, S.K., Whitehead, M., *et al.* (2014) Effect of $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ on Hydrate Assemblages and Mechanical Properties of Hydrated Cement Pastes at 40°C and 60°C. *Cement and Concrete Research*, **65**, 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.07.002>
- [4] Machner, A., Zajac, M., Haha, M.B., *et al.* (2017) Portland Metakaolin Cement Containing Dolomite or Limestone—Similarities and Differences in Phase Assemblage and Compressive Strength. *Construction and Building Materials*, **157**, 214-225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.056>

- [5] Larsen, C. (1998) Chloride Binding in Concrete, Effect of Surrounding Environment and Concrete Composition. Ph.D. Thesis, NTNU, Trondheim.
- [6] Suryavanshi, A., Scantlebury, J. and Lyon, S. (1995) The Binding of Chloride Ions by Sulphate Resistant Portland Cement. *Cement and Concrete Research*, **25**, 581-592. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00047-G](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00047-G)
- [7] Mehta, P. (1977) Effect of Cement Composition on Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete. In: Tonini, D. and Dean, S., Eds., *Chloride Corrosion of Steel in Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 12-19. <https://doi.org/10.1520/STP27949S>
- [8] Hewlett, P. (2003) *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [9] Enevoldsen, J., Hansson, C. and Hope, B. (1994) Binding of Chloride in Mortar Containing Admixed or Penetrated Chlorides. *Cement and Concrete Research*, **24**, 1525-1533. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90167-8](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90167-8)
- [10] Glasser, F. (1999) Role of Chemical Binding in Diffusion and Mass Transport. *International Conference on Ion and Mass Transport in Cement-Based Materials*, Toronto, Canada, 129-154.
- [11] Balonis, M., Lothenbach, B., Le Saout, G., et al. (2010) Impact of Chloride on the Mineralogy of Hydrated Portland Cement Systems. *Cement and Concrete Research*, **40**, 1009-1022. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.002>
- [12] Nehdi, M., Mindess, S. and Pierre-Claude, A. (1996) Optimization of High Strength Limestone Filler Cement Mortars. *Cement and Concrete Research*, **26**, 883-893. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00071-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00071-3)
- [13] Zhou, M.K., Peng, S.M., Xu, J., et al. (1996) Effect of Stone Powder on Stone Chippings Concrete. *Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition)*, **11**, 29-34.
- [14] 刘焕芹, 徐志峰, 李维滨, 等. 石灰石粉对硅酸盐水泥水化的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2015, 33(2): 185-188.
- [15] Scholer, A., Lothenbach, B., Winnefeld, F., et al. (2015) Hydration of Quaternary Portland Cement Blends Containing Blast-Furnace Slag, Siliceous Fly Ash and Limestone Powder. *Cement & Concrete Composites*, **55**, 374-382. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.10.001>
- [16] 周少龙, 郝璟珂, 赵宇, 等. 石灰石微粉对硫铝酸盐水泥水化和性能影响[J]. 广东建材, 2018, 34(10): 37-39.
- [17] Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D., 著. 混凝土[M]. 吴科如, 张雄, 姚武, 等, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005: 83.
- [18] Balonis, M. (2010) *The Influence of Inorganic Chemical Accelerators and Corrosion Inhibitors on the Mineralogy of Hydrated Portland Cement Systems*. University of Aberdeen, Aberdeen.
- [19] Falzone, G., Balonis, M. and Sant, G. (2015) X-AFm Stabilization as a Mechanism of Bypassing Conversion Phenomena in Calcium Aluminate Cements. *Cement and Concrete Research*, **72**, 54-68. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.022>
- [20] 戴燕华, 柳俊哲, 邢祥伟, 杨梦娜. 氯离子对水泥净浆内游离态亚硝酸根离子的影响[J]. 绍兴文理学院学报(自然科学), 2018, 38(3): 9-14.
- [21] Ann, K.Y., Jung, H.S., Kim, H.S., et al. (2006) Effect of Calcium Nitrite-Based Corrosion Inhibitor in Preventing Corrosion of Embedded Steel in Concrete. *Cement & Concrete Research*, **36**, 530-535. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.09.003>
- [22] Ni, Z.-M., Pan, G.-X., Wang, L.-G., et al. (2006) Structure and Properties of Hydrotalcite Using Electrostatic Potential Energy Model. *Chinese Journal of Chemical Physics*, **19**, 277-280.
- [23] 冷达, 张雄, 沈中林. 减水剂和早强剂对水泥基灌浆材料性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2008, 35(11): 21-25.
- [24] 王中平, 杨浩宇, 赵亚婷, 徐玲琳. 不同养护温度下氯化钠对铝酸盐水泥水化的影响[J]. 材料导报, 2019, 33(14): 2343-2347.
- [25] 叶东忠. 早强剂对掺硅灰的水泥砂浆强度与结构影响的研究[J]. 北京工商大学学报(自然科学版), 2009, 27(2): 8-11.
- [26] 孙志芳. 石灰石粉对水泥基复合材料性能的影响与机理研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.
- [27] Alan, R. (2007) Strength Development of Plain Concrete Compared to Concrete with a Non-Chloride Accelerating Admixture. *Structural Survey*, **25**, 418-423. <https://doi.org/10.1108/02630800710838455>
- [28] 姚燕, 王宏霞, 刁桂芝, 刘光华. 硝酸钙对铝酸盐水泥强度及水化性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(2): 207-213.
- [29] 刘红杰, 李九苏, 赵明博, 徐小龙, 唐斌, 范涛涛. 亚硝酸钙对硫铝酸盐水泥水化和强度的影响[J]. 交通科学与工程, 2017, 33(4): 10-13.