

文章编号:1007-9629(2024)12-1135-08

微晶 AH_3 含量对高碱碳铝酸盐胶凝材料性能的影响

刘源涛^{1,2,3}, 张戎令^{4,5}, 董必钦^{1,2,3}, 王琰帅^{1,2,3,*}

(1. 深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060; 2. 深圳大学 广东省滨海土木工程耐久性重点实验室, 广东 深圳 518060; 3. 深圳大学 深圳市低碳建筑材料与技术重点实验室, 广东 深圳 518060; 4. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 5. 兰州交通大学 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为研究微晶氢氧化铝凝胶(AH_3)含量对高碱碳铝酸盐胶凝材料性能的影响, 设计了氢氧化钠与氢氧化铝复合溶液、偏铝酸钠溶液复配激发石灰石粉的方案. 结果表明: 随着激发剂中偏铝酸钠溶液的占比从 0% 逐步增至 100%, 基体中的单碳型碳铝酸钙含量相对稳定, 而微晶 AH_3 的含量则逐渐增加, 三水铝石的含量相应减少; 微晶 AH_3 的平均晶粒尺寸约 19.5 nm, 显著小于三水铝石的中值粒径 5.82 μm , 因而微晶 AH_3 具有更大的比表面积和更强的胶凝性能; 随着微晶 AH_3 含量的增加, 基体中凝胶孔的占比提升, 孔隙结构更致密; 试样抗压强度与微晶 AH_3 含量之间呈线性正相关关系, 即微晶 AH_3 的含量越高, 试样的强度越高.

关键词: 高碱碳铝酸盐胶凝材料; 微晶 AH_3 ; 三水铝石; 胶凝性能

中图分类号: TU526

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2024.12.008

Influence of Microcrystalline AH_3 Content on Properties of High-Alkali Carboaluminate Cementitious Materials

LIU Yuantao^{1,2,3}, ZHANG Rongling^{4,5}, DONG Biqin^{1,2,3}, WANG Yanshuai^{1,2,3,*}

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Guangdong Province Key Laboratory of Durability for Marine Civil Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 3. Shenzhen Key Laboratory for Low-Carbon Construction Material and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 4. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 5. Bridge Engineering National Local Joint Engineering Laboratory of Disaster Prevention and Control Technology, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To investigate the impact of microcrystalline aluminum hydroxide gel(AH_3) content on the properties of high-alkali carboaluminate cementitious materials, a composite activation scheme was designed using a co-mixed solution of sodium hydroxide, aluminum hydroxide and a sodium aluminate solution, to activate limestone powder. The results indicate that as the proportion of sodium aluminate solution in the activator mixture increases from 0% to 100%, the content of monocarboaluminate in the matrix remains relatively stable, while the content of microcrystalline AH_3 progressively increases and the content of gibbsite correspondingly decreases. The average

收稿日期: 2024-05-14; 修订日期: 2024-05-28

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2022YFB2602600); 国家自然科学基金-铁路基础研究联合基金资助项目(U2368209); 广东省科技厅粤港科技合作项目(2023A0505010020)

第一作者: 刘源涛(1996—), 男, 湖北黄冈人, 深圳大学博士生. E-mail: 1294126714@qq.com

通讯作者: 王琰帅(1988—), 男, 河南禹州人, 深圳大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: yswang@szu.edu.cn

crystallite size of microcrystalline AH_3 is approximately 19.5 nm, which is significantly smaller than the median particle size of 5.82 μm for gibbsite, thus endowing it with a larger specific surface area and superior cementitious properties. With the increase of microcrystalline AH_3 content, the proportion of gel pores in the matrix increases, resulting in a more compact pore structure. Furthermore, there is a linear positive correlation between compressive strength of samples and the content of microcrystalline AH_3 , suggesting that higher content of microcrystalline AH_3 correlates with greater strength of samples.

Key words: high-alkali carboaluminate cementitious material; microcrystalline AH_3 ; gibbsite; cementitious property

石灰石作为碳酸钙矿物在地球上的主要赋存形式,广泛分布于岩石圈,其储量占沉积岩总量的20%~25%^[1].在建材行业,石灰石是生产水泥的重要原料.然而,水泥生产所采用的“两磨一烧”工艺正面临能耗高和碳排放大的双重问题^[2].

石灰石粉亦可作为水泥混凝土的辅助胶凝材料,用来降低水泥熟料的用量和碳排放.虽然石灰石粉的溶解度较低,但是它能与硅酸盐水泥中的铝酸盐矿物反应.然而,由于硅酸盐水泥中铝酸盐矿物含量有限,石灰石粉在其中的反应程度较低,因此石灰石粉掺量过高会劣化水泥基体的力学性能^[3].

Liu等^[4]和Wang等^[5]利用偏铝酸钠 NaAlO_2 直接激发石灰石粉,得到的材料在4 h内终凝,3 d抗压强度超20 MPa,展现出良好的性能.其主要胶凝物相包括单碳型碳铝酸钙(Mc)和氢氧化铝凝胶(AH_3),被称作碳铝酸盐胶凝材料^[6-7].与常规碳铝酸盐胶凝材料相比,此体系含有较多Na,碱度较高,因此可被视为高碱碳铝酸盐胶凝材料.该材料实现了对石灰石粉的活化激发与大掺量利用,具有绿色低碳的优点;同时,其性能与硫铝酸盐水泥和铝酸盐水泥相似,具有快硬早强的特点,可用于工程快速修复.

AH_3 是硫铝酸盐水泥和铝酸盐水泥中的关键物相^[8].其晶粒尺寸介于10~30 nm之间,在X射线衍射(XRD)图谱上呈现宽化的衍射峰,而在透射电子显微镜(TEM)的选区电子衍射(SAED)模式下表现微弱的同心圆环状,是一种纳米尺度的微晶物相,因此又被称为微晶 AH_3 ^[9].Hu等^[10]发现,相比于钙矾石含量较高的硫铝酸盐水泥基体,微晶 AH_3 含量较高的硫铝酸盐水泥基体展现出更高的弹性模量.此外,常钧等^[11]的研究表明, AH_3 含量的增加有助于提升硫铝酸盐水泥石的力学性能.笔者先前的研究^[4,6]也指出 AH_3 与Mc均是高碱碳铝酸盐胶凝材料中的重要胶凝物相.当 NaAlO_2 掺量变化时,基体中 AH_3 与Mc的含量均会改变.因此,目前尚未明确当 AH_3 含量作为

单一变量时,高碱碳铝酸盐胶凝材料的性能如何演变.

基于此,本文配制了氢氧化钠与氢氧化铝复合溶液、偏铝酸钠溶液,设计了用两者复配来激发石灰石粉的方案.通过调整2种溶液的比例,在保证Mc生成量相对稳定的情况下,实现对 AH_3 含量的调节.并对不同 AH_3 含量下基体的反应过程、物相组成、微观形貌及宏观性能进行了研究,揭示了微晶 AH_3 含量对高碱碳铝酸盐胶凝材料形成过程的影响机理.

1 试验

1.1 原材料与配比

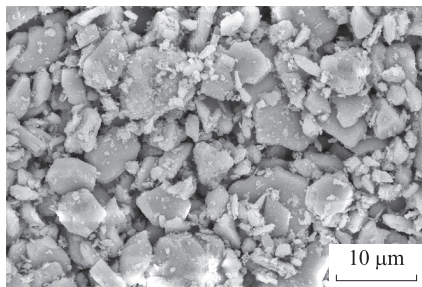
石灰石粉(LM)购自广西贺州市亿泰石粉厂,其基本信息见文献[4].偏铝酸钠 NaAlO_2 、氢氧化铝 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 以及氢氧化钠 NaOH 均由阿拉丁公司提供,分析纯.由 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 NaOH 与水配制成溶液A,由 NaAlO_2 与水配制成溶液B.以这2种溶液复配作为高碱碳铝酸盐激发剂,两者的 Na_2O 含量¹⁾均为15.00%, Al_2O_3 含量均为24.68%,Na与Al的摩尔比均为1:1.由于 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 难溶于水,制备溶液A时会产生大量未溶解的白色物质;而 NaAlO_2 因其良好的水溶性,在制备溶液B时无沉淀物形成.图1展示了 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的颗粒形貌和粒径分布特征,其中 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 为片状,其中值粒径(d_{50})为5.82 μm .

表1列出了高碱碳铝酸盐胶凝材料配合比.石灰石粉与激发剂的质量比固定为62:38. Na_2O 与 Al_2O_3 在胶凝材料(石灰石粉与激发剂)中的含量分别固定为5.70%与9.38%.溶液A与溶液B复配,两者质量比分别设计为100:0、75:25、50:50、25:75、0:100(即溶液B占比 w_B 为0%、25%、50%、75%、100%),旨在调控微晶 AH_3 含量,并研究其对高碱碳铝酸盐胶凝材料性能的影响机制.

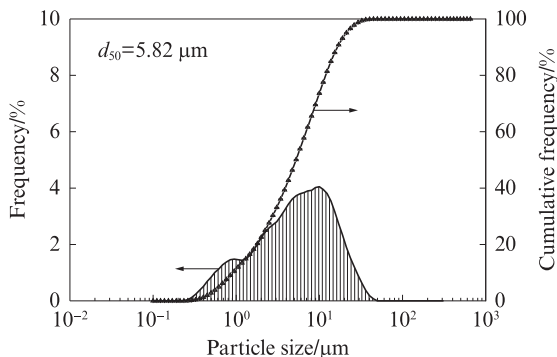
1.2 试样制备与养护

将石灰石粉与激发剂投入搅拌机中,先低速搅

1)文中涉及的含量及占比除特别说明外均为质量分数.



(a) SEM image



(b) Particle size distribution

图 1 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的颗粒形貌与粒径分布特征Fig. 1 Particle morphology and particle size distribution of $\text{Al}(\text{OH})_3$

表 1 高碱碳铝酸盐胶凝材料配合比
Table 1 Mix proportions (by mass) of high-alkali carboaluminate cementitious materials

Unit: %			
Sample	LM	Solution A	Solution B
C1	62.0	38.0	0
C2	62.0	28.5	9.5
C3	62.0	19.0	19.0
C4	62.0	9.5	28.5
C5	62.0	0	38.0

拌 2 min,再高速搅拌 2 min;搅拌均匀后,迅速浇筑成模;12 h 后脱模,将其放置于室温环境下养护。

1.3 试验方法

质子核磁共振 (^1H -NMR) 测试使用 Meso-MR12-060H-I 型低场核磁共振波谱仪.依据 GB/T 17671—2020《水泥胶砂强度检验方法》测试试样的抗压强度.使用 D8-Advance 型 X 射线衍射仪对试样进行 XRD 测试.具体测试参数与定量分析信息见先前研究工作^[7].采用 STA 449 F3 型同步热分析仪进行热重 (TG-DTG) 测试.使用 Advance III 400 MHz 型核磁共振仪测试 ^{27}Al 魔角旋转-核磁共振 (MAS-NMR) 谱.采用 Thermo APREO S 型扫描电子显微镜 (SEM) 进行微观形貌观测,观测前需对试样作喷金处理。

2 结果与讨论

2.1 反应过程

通过 ^1H -NMR 测试获取了试样中液态水的横向弛豫时间 (T_2),结果见图 2.图 2(a)、(c)、(e)、(g)、(i) 分别展示了试样 C1~C5 在 1、24、72 h 时的 T_2 分布图.基于 5 组试样的 T_2 信号,分析了其在 72 h 内的孔隙特征及 T_2 加权平均值 (T_{2w}) 的演变情况,结果也见

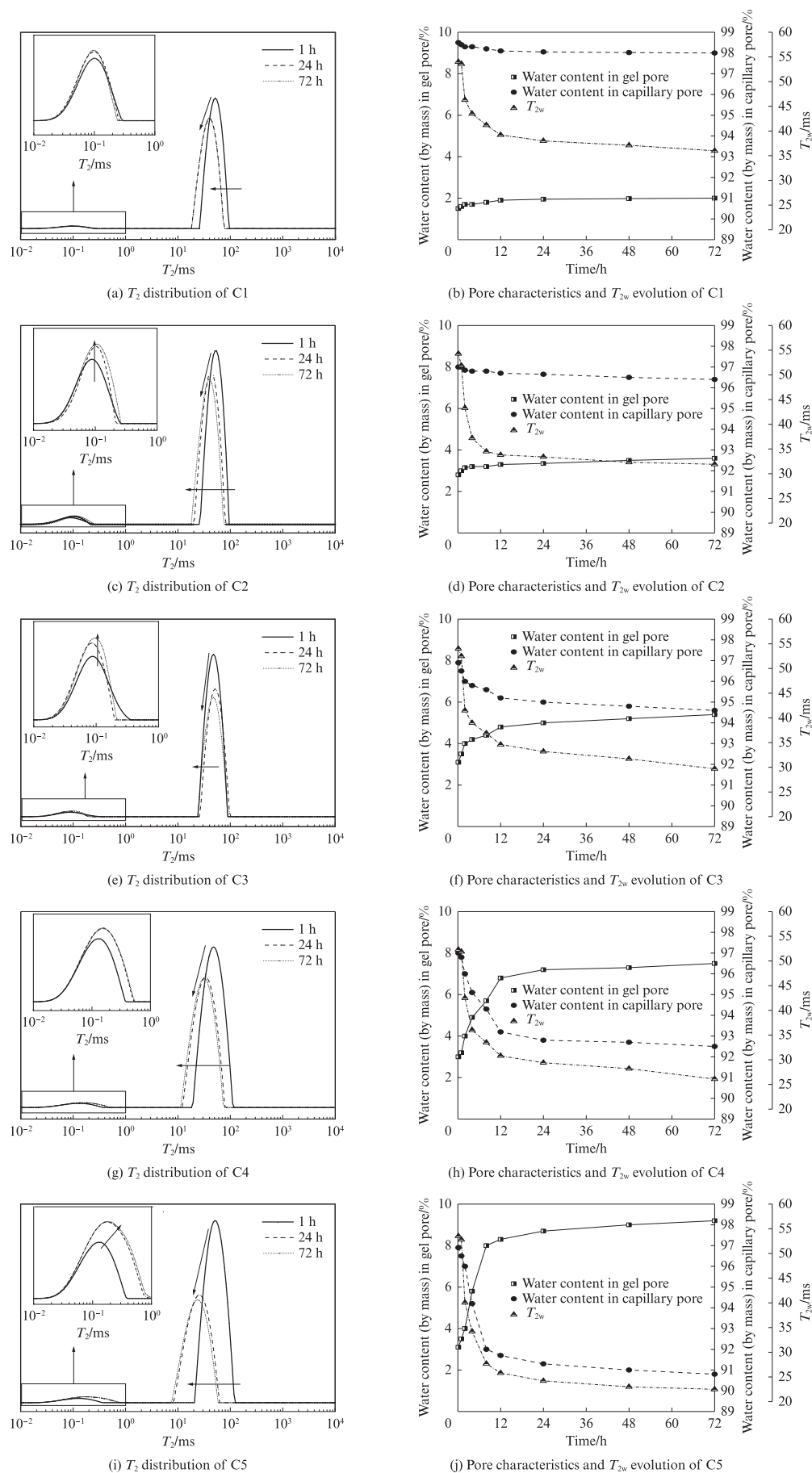
图 2.如图 2(a)、(c)、(e)、(g)、(i) 所示,5 组试样的 T_2 分布图上均显示出 2 个弛豫峰.依据余安明等^[12]的分析, T_2 分布图中小于 1.0 ms 和大于等于 1.0 ms 的弛豫峰所占面积的百分比分别代表凝胶孔水和毛细孔水在可蒸发水分中的相对含量.从试样 C1 到试样 C5, T_2 分布图 1、24、72 h 的变化幅度均逐渐增大.由图 2(b)、(d)、(f)、(h)、(j) 可见,凝胶孔水含量和 T_{2w} 的变化幅度也都同步上升.这表明随着溶液 B 在激发剂中占比的增加,试样中凝胶孔水含量增加,化学结合水的消耗量也随之升高。

基于此,本文分析了激发剂中溶液 B 的占比 w_B 从 0% (试样 C1) 逐步增至 100% (试样 C5) 时,72 h 内凝胶孔水含量及 T_{2w} 降低值 (ΔT_{2w}) 的变化情况,结果如图 3 所示.由图 3 可见,凝胶孔水含量与 ΔT_{2w} 均与溶液 B 的占比呈线性正相关.凝胶孔水含量的提升反映了硬化基体中凝胶孔数量的增加和孔隙结构的细化; ΔT_{2w} 的增加则表明更多水分被转化为化学结合水,意味着水化产物增多.因此,溶液 B 占比的提高导致基体中凝胶产物的增多和孔隙结构的致密化;溶液 A 占比增加则导致基体中凝胶产物减少,孔隙结构粗糙化。

2.2 物相组成

图 4 为试样 C1~C5 在 1、28 d 的 XRD 图谱.基于 XRD/Rietveld 分析得出物相组成,结果见图 5。

由图 4 可见:5 组试样中均观察到了 Mc;试样 C5 在 $18^\circ \sim 21^\circ$ 之间的衍射峰弱且宽,试样 C1~C4 在此区间的衍射峰则高而窄,这表明试样 C1~C4 中含有未完全反应的三水铝石;在试样 C5 的制备过程中未加入含三水铝石的溶液 A,因此其 XRD 图谱中也未观察到高而窄的三水铝石特征峰,其 $18^\circ \sim 21^\circ$ 区间内出现的宽化衍射峰指示微晶 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的存在^[11]。

图2 试样C1~C5的 T_2 分布图、孔特征与 T_{2w} 的演化Fig. 2 T_2 distribution, pore characteristics and T_{2w} evolution of samples C1-C5

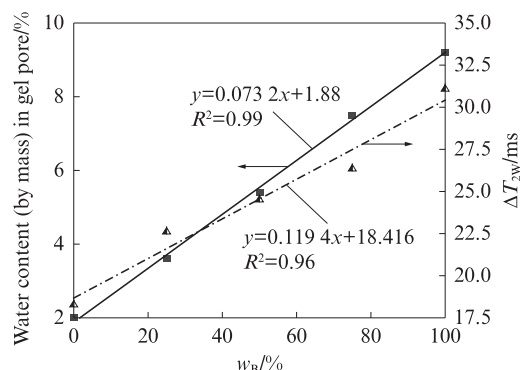


图3 溶液B在激发剂中的占比对试样中凝胶孔水含量与 ΔT_{2w} 的影响

Fig. 3 Influence of the proportion of solution B in the activator on the water content in gel pore and ΔT_{2w} of samples (72 h)

由图5可见:试样C1~C5在28 d时的三水铝石含量分别为14.1%、10.8%、6.8%、3.3%、0%;随着溶液B占比的增加,基体中未反应完全的三水铝石含量也随之下落;除试样C1外,试样C2~C5中均检出了非定量(NQ)相,NQ相通常包括非晶态物质和结晶度较低的微晶相;试样C2~C5在28 d龄期时,其NQ相的含量分别为3.9%、7.6%、11.6%、15.2%,说明溶

液B占比的增加导致基体中NQ相的含量逐渐上升.

为了确定NQ相的组成,使用NMR分析了试样的 ^{27}Al 配位特征,结果如图6所示.由图6可见,试样C1、C3与C5均仅在 $\delta=11.00$ 处出现共振信号峰.在水泥基材料中,四配位、五配位、六配位铝相的共振信号峰分别位于 $\delta=50\sim90$ 、 $20\sim50$ 、 $0\sim20$ 的范围内^[13].由此可以推断,本研究中的硬化试样仅含有六配位的 ^{27}Al ,即 Al^{VI} . AlO_2^- 与非晶型 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 分别表现为四配位、五配位的 ^{27}Al ,其共振信号峰分别位于 $\delta=60\sim80$ 、 $20\sim40$ 之间^[6,14].然而,在图6中,试样均未在 $\delta=60\sim80$ 、 $20\sim40$ 内观察到共振信号峰,这表明本体系中无 AlO_2^- 剩余,也不含非晶 $\text{Al}(\text{OH})_3$.因此图5中NQ相的含量可被视为 AH_3 的含量.

由图5还可知,当溶液A与溶液B的质量比变化时,硬化基体中的Mc含量相对恒定,而三水铝石与微晶 AH_3 的含量改变.据此,进一步分析了激发剂中溶液B占比从0%(试样C1)增至100%(试样C5)时,三水铝石与微晶 AH_3 含量的变化情况,结果如图7所示.由图7可见,三水铝石的含量与溶液B的占比呈线性负相关,微晶 AH_3 的含量则与溶液B的占比呈线性正相关.

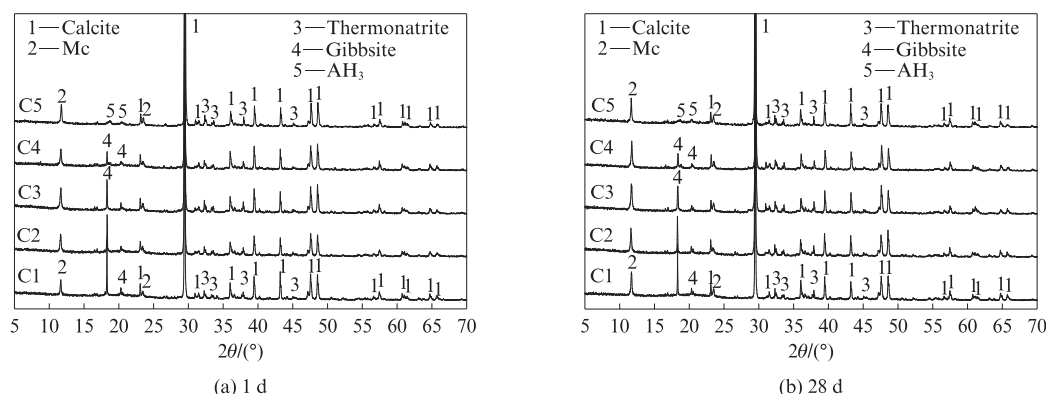


图4 试样C1~C5的XRD图谱

Fig. 4 XRD patterns of samples C1-C5

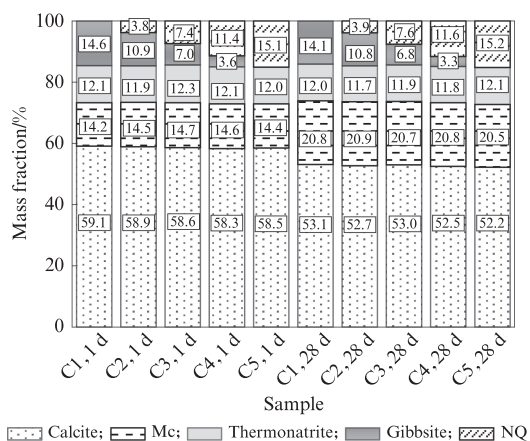


图5 试样C1~C5的物相组成

Fig. 5 Phase compositions of samples C1-C5

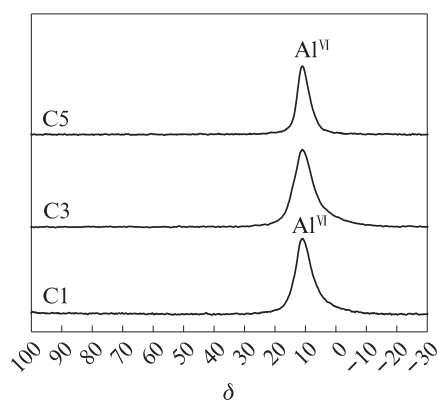
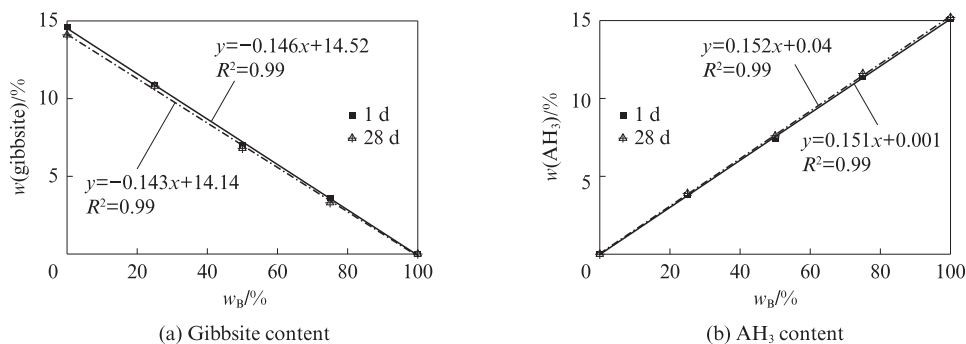


图6 试样C1、C3与C5养护28 d时的 ^{27}Al MAS-NMR谱
Fig. 6 ^{27}Al MAS-NMR spectra of samples C1, C3, and C5 cured for 28 d

图7 溶液B占比对试样中三水铝石与AH₃含量的影响Fig. 7 Influence of the proportion of solution B in the activator on the content of gibbsite and AH₃ in samples

进一步验证试样C1~C5中的物相变化情况,其养护28 d时的TG-DTG曲线见图8.由图8可见:微晶AH₃与三水铝石的主要失重峰分别位于260、290 °C^[9];从试样C1至试样C5,位于260 °C的失重峰逐渐增强,而位于290 °C的失重峰则逐渐减弱.这表明随着激发剂中溶液B占比的增加,三水铝石的含量减少,而AH₃的含量增加,这一现象与XRD的结果一致.

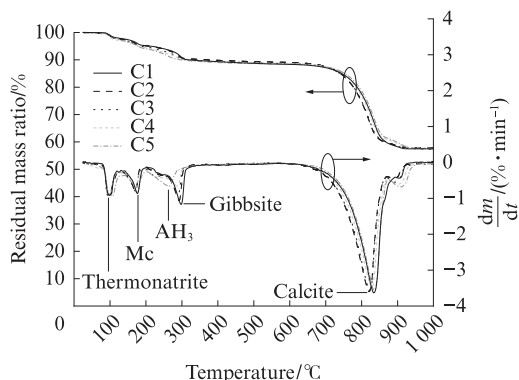


图8 试样C1~C5养护28 d时的TG-DTG曲线

Fig. 8 TG-DTG curves of samples C1~C5 cured for 28 d

2.3 力学性能与微观形貌

图9给出了试样C1~C5的抗压强度.由图9可见:在1 d时,试样C1~C5的抗压强度分别为0.6、

5.1、11.5、16.8、20.5 MPa;由试样C1至试样C5,抗压强度呈逐步增大的趋势;养护至28 d时,试样的抗压强度仍然保持着这种递增趋势.

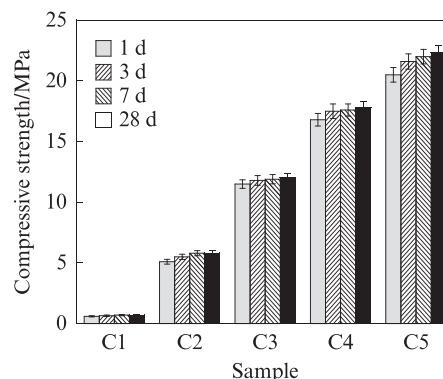
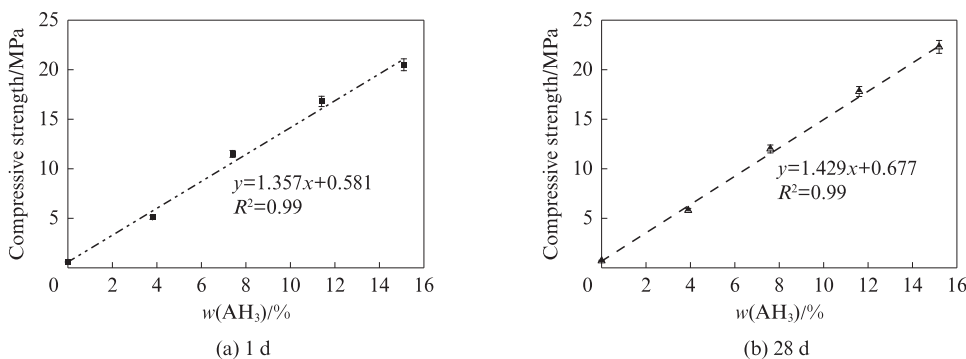


图9 试样C1~C5的抗压强度

Fig. 9 Compressive strength of samples C1~C5

根据2.2的分析结果,随着激发剂中溶液B占比从0%(试样C1)增至100%(试样C5),三水铝石的含量逐渐减少,而微晶AH₃的含量相应增加.为了明确微晶AH₃含量对力学性能的影响,分析了抗压强度与AH₃含量之间的相关性,结果如图10所示.由图10可见,抗压强度与AH₃含量之间呈线性正相关,即AH₃含量越高,抗压强度越大.这一结果与2.1中T₂演变的结果一致.这表明当AH₃含量增加时,基体中

图10 抗压强度与AH₃含量的相关性Fig. 10 Correlation between compressive strength and AH₃ content

会有更丰富的凝胶产物和更致密的孔隙结构,从而提升了材料宏观力学性能。

上述分析表明,微晶 AH_3 相比于三水铝石具有更优的胶凝性能。在水泥基体中,物相的胶凝性能与其比表面积有关。通常情况下,颗粒越细,其比表面积越大,胶凝性能越强^[15]。为了对比分析微晶 AH_3 与三水铝石的胶凝性能,本文计算了 AH_3 的晶粒尺寸,具体方法见笔者前期的研究^[7]。

表2列出了使用衍射数据分析软件Diffraction EVA(EVA)算出的试样C1中 AH_3 的晶粒尺寸(D),以及通过全谱分析软件Total Pattern Solution(TOPAS)采用洛伦兹方程-去卷积法(LVOL-IB)和基于半高宽的洛伦兹方程-高斯方程去卷积法(LVOL-WHM)得到的试样C1中 AH_3 的晶粒尺寸。由表2可见,这些方法算出的数值较为接近,28 d试

样C1中 AH_3 的平均晶粒尺寸大约为19.6 nm。

物相的比表面积 S 可通过下式计算^[16]:

$$S = 6/\rho D \quad (1)$$

式中: ρ 为密度。

三水铝石的晶粒尺寸同图1中 $\text{Al}(\text{OH})_3$,其中值粒径为5.82 μm 。表2中 AH_3 的平均晶粒尺寸大约为19.6 nm。由此可计算出 AH_3 的比表面积是三水铝石的298倍。这表明 AH_3 的胶凝性能远高于三水铝石。因此,随着 AH_3 含量的增加,基体的抗压强度也相应提高。

图11展示了试样的微观形貌及能谱分析结果。在图11(a)、(b)、(c)中均可观察到片状物相。点1位于试样C1的片状物相上,其Ca与Al的摩尔比为2.13:1.00,这表明该处存在Mc。Mc作为一种双金属氢氧化物,呈现片层状的微观形貌^[17]。点2位于试样C1中非常细小的薄片状颗粒上,而点3位于试样C5的一个块状颗粒上。这2个点均主要由Al和O组成,分别对应着微晶 AH_3 和三水铝石。与试样C1中点2处的小颗粒相比,试样C5中点3处的块体具有更大的颗粒尺寸,这进一步证实了 AH_3 与三水铝石在尺寸上的差异,且与表2的分析结果相吻合。

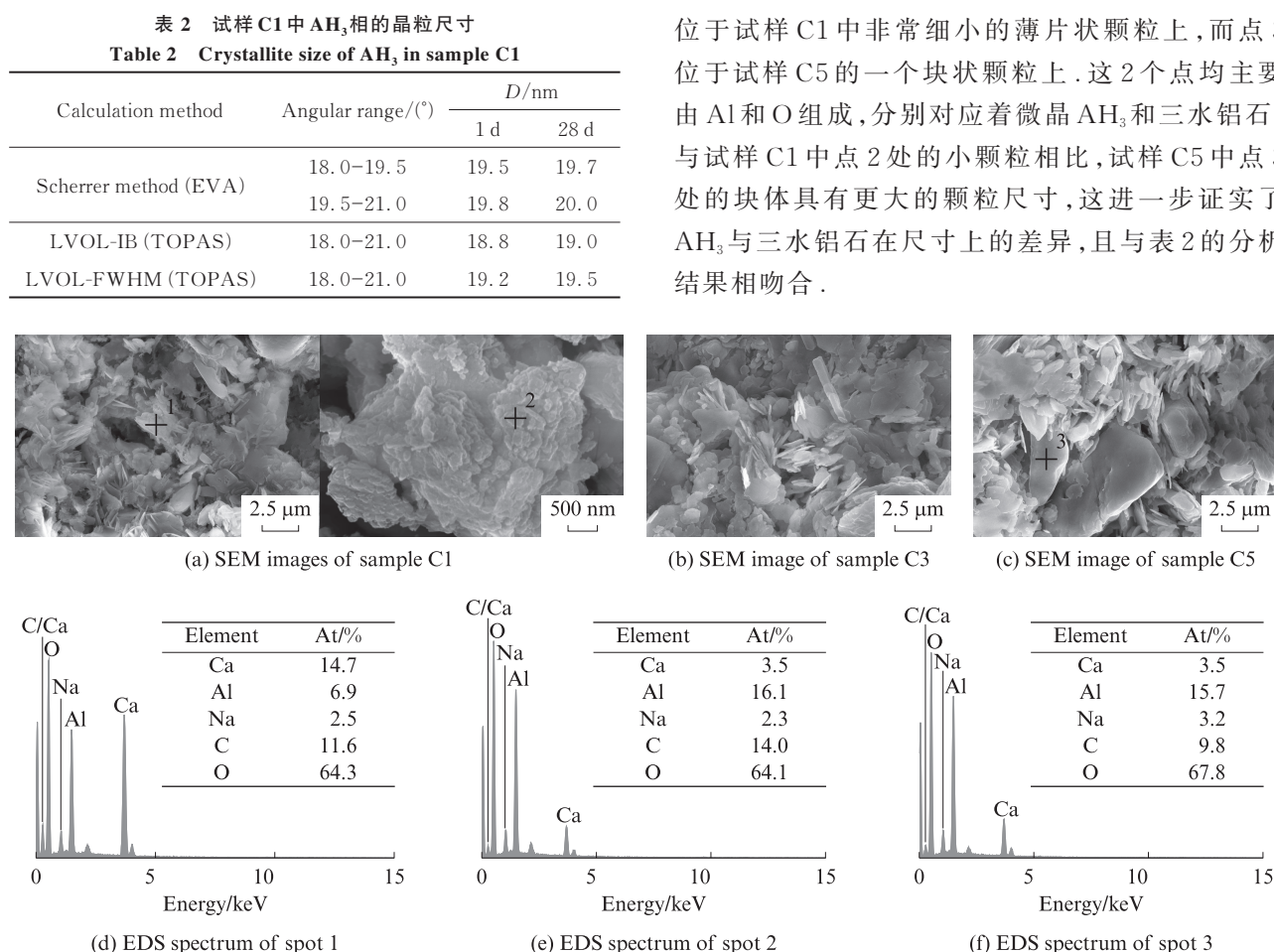


图11 试样养护28 d时的SEM图像和EDS点扫图谱

Fig. 11 SEM images and EDS spectra of spots of samples cured for 28 d

3 结论

(1)当氢氧化钠及氢氧化铝复配溶液与偏铝酸钠溶液的质量比改变,但 Na_2O 与 Al_2O_3 在胶凝材料

中的质量分数保持不变时,硬化基体中的单碳型碳铝酸钙Mc含量相对稳定,而三水铝石与微晶 AH_3 的含量则随之变化。

(2)随着激发剂中偏铝酸钠溶液的占比从0%逐

步增至100%,基体中三水铝石的含量降低,微晶 AH_3 的含量增加.微晶 AH_3 含量的增加导致基体中凝胶孔的占比提高,孔隙结构变得更加致密.

(3)在Mc含量保持基本稳定时,基体的抗压强度与微晶 AH_3 的含量呈线性正相关,即 AH_3 的含量越高,硬化试样的强度也越高.微晶 AH_3 的平均晶粒尺寸约为19.6 nm,显著小于三水铝石的中值粒径 $5.82\text{ }\mu\text{m}$,因此微晶 AH_3 具有更大的比表面积和更强的胶凝性能.

参考文献:

- [1] GOLDSCHIEDER N, CHEN Z, AULER A S, et al. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources[J]. Hydrogeology Journal, 2020, 28(5):1661-1677.
- [2] 蒋正武, 高文斌, 杨巧, 等. 低碳混凝土的技术理念与途径思考[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(11):1143-1150.
JIANG Zhengwu, GAO Wenbin, YANG Qiao, et al. Technical principles and approaches for low carbon concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(11):1143-1150. (in Chinese)
- [3] WANG D H, SHI C J, FARZADNIA N, et al. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures[J]. Construction and Building Materials, 2018, 181:659-672.
- [4] LIU Y T, ZHANG Y Y, DONG B Q, et al. Limestone powder activated by sodium aluminate: Hydration and microstructure[J]. Construction and Building Materials, 2023, 368:130446.
- [5] WANG F, LONG G C, HE J H, et al. Fabrication of energy-efficient carbonate-based cementitious material using sodium meta-aluminate activated limestone powder[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2022, 10(20):6559-6572.
- [6] LIU Y T, DONG B Q, HONG S X, et al. Influence mechanisms of $\text{CaCO}_3/\text{NaAlO}_2$ ratios in carbonaluminate cementitious materials[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25:4700-4719.
- [7] 刘源涛, 董必钦, 邢锋, 等. NaAlO_2 对贻贝质碳铝酸盐胶凝材料水化和性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(11):2763-2779.
LIU Yuantao, DONG Biqin, XING Feng, et al. Influence of NaAlO_2 on hydration and property of mussel shell-based carbonaluminate cementitious materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(11):2763-2779. (in Chinese)
- [8] MAACH N, GEORGIN J F, BERGER S, et al. Chemical mechanisms and kinetic modeling of calcium aluminate cements hydration in diluted systems: Role of aluminium hydroxide formation[J]. Cement and Concrete Research, 2021, 143:106380.
- [9] ZHANG Y, ZHAO Q, GAO Z, et al. Nanostructural evolution of $\text{Al}(\text{OH})_3$ gel formed by the cubic and orthorhombic ye'elimite clinkers of calcium sulfoaluminate cements in an ultra-wide hydration temperature range[J]. Cement and Concrete Research, 2021, 150:106607.
- [10] HU C L, HOU D S, LI Z J. Micro-mechanical properties of calcium sulfoaluminate cement and the correlation with microstructures[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 80:10-16.
- [11] 常钧, 张洋洋, 尚小鹏, 等. AH_3 及水化程度对硫铝酸盐水泥强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(6):1028-1032.
CHANG Jun, ZHANG Yangyang, SHANG Xiaopeng, et al. Effect of AH_3 phase content and hydration degree on the strength of calcium sulfoaluminate cement [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(6):1028-1032. (in Chinese)
- [12] 余安明, 马坤, 王中平, 等. 低场核磁共振低温测孔技术表征硬化水泥浆体孔结构[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5):916-920.
SHE Anming, MA Kun, WANG Zhongping, et al. Characterization of pore structure in hardened cement paste by low field NMR cryoporometry [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5):916-920. (in Chinese)
- [13] 胡传林, 陶永征, TARIQ Jamil, 等. 煅烧黏土反应活性及其影响机理[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(2):179-185, 220.
HU Chuanlin, TAO Yongzheng, TARIQ Jamil, et al. Reactivity of calcined clay and its influence mechanism [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(2):179-185, 220. (in Chinese)
- [14] ISOBE T, WATANABE T, D' ESPINOSE DE LA CAILLERIE J B, et al. Solid-state ^1H and ^{27}Al NMR studies of amorphous aluminum hydroxides [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2003, 261(2):320-324.
- [15] 周俊峰, 陈啸洋, 陈兵, 等. 煅烧沸石粉对硫氧镁水泥耐水性的影响[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(3):197-205.
ZHOU Junfeng, CHEN Xiaoyang, CHEN Bing, et al. Effect of calcined zeolite powder on water resistance of magnesium oxysulfate cement[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(3):197-205. (in Chinese)
- [16] HE M L, WANG N, CHEN M, et al. Distribution and motion behavior of desulfurizer particles in hot metal with mechanical stirring[J]. Powder Technology, 2020, 361:455-461.
- [17] 陈钰婷, 王中平, 彭相, 等. 高温与碳化对铝酸盐水泥水化产物氯离子结合稳定性的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(7):715-721.
CHEN Yuting, WANG Zhongping, PENG Xiang, et al. Effect of high temperature and carbonization on chloride binding stability in calcium aluminate cement[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(7):715-721. (in Chinese)