

文章编号:1007-9629(2024)10-0871-08

不同铝铁比铁相固溶体对硅酸三钙水化的影响

李全亮, 吴佳明, 杨庆春, 蒋军, 叶正茂*

(济南大学材料科学与工程学院, 山东 济南 250022)

摘要:主要研究了不同铝铁比的铁相固溶体对硅酸三钙(C_3S)水化性能的影响。结果表明,铁相固溶体对 C_3S 的水化具有抑制作用,并且其铝铁比越低,该抑制作用越明显。借助等温量热仪、电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)等测试手段发现,铁相固溶体水化后产生偏铁酸根离子和偏铝酸根离子,其中偏铁酸根离子会阻碍氢氧化钙的沉淀,从而抑制 C_3S 的水化,而偏铝酸根离子可以减轻偏铁酸根离子对 C_3S 水化的抑制作用。

关键词:铁相固溶体;铝铁比;硅酸三钙;水化

中图分类号:TU525.9

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.10.001

Effect of Iron Phase Solid Solution with Different Aluminum-to-Iron Ratios on the Hydration of Tricalcium Silicate

LI Quanliang, WU Jiaming, YANG Qingchun, JIANG Jun, YE Zhengmao*

(School of Materials Science and Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: The impact of iron phase solid solutions with different aluminum-to-iron ratios on the hydration performance of tricalcium silicate (C_3S) was investigated. The results show that iron phase solid solutions inhibit the hydration of C_3S , and the lower the aluminum-to-iron ratio in the iron phase solid solution, the more significant the inhibition on C_3S hydration. Using testing methods such as isothermal calorimetry and inductively coupled plasma optical emission spectrometer (ICP-OES), it is found that iron phase solid solutions produce metaferrate and metaluminate ions after hydration. The metaferrate ions hinder the precipitation of calcium hydroxide, thereby inhibiting the hydration of C_3S , while the metaluminate ions can mitigate the inhibitory effect of the metaferrate ions on C_3S hydration.

Key words: iron phase solid solution; aluminum-to-iron ratio; tricalcium silicate; hydration

目前,水泥制造业存在高能耗、高碳排放的问题^[1-2],其碳排放量占全国总碳排放量的12%^[3]。据统计,生产1 t水泥熟料的 CO_2 排放量约为0.84 t^[4]。因此,水泥制造业的节能减排对“双碳”政策的实施具有重要意义^[5]。硅酸三钙(C_3S)的水化产物是水泥混凝土强度的主要来源^[6],但该矿物烧制过程需极高的温度和大量的石灰石,因此不利于“双碳”政策的落实^[7-8]。提高水泥中铁相固溶体的含量可以降低 C_3S 的烧成温度,减少石灰石用量,从而达到节能减排的目的。

但铁相固溶体含量的提高会对水泥性能产生不利影响。李传海^[9]制备了仅含有铁酸钙与硅酸盐矿物的熟料;任尊超等^[10]将铁相固溶体与 C_3S 分开制备;通过水化试验,上述研究均得出铁相固溶体抑制 C_3S 水化的结论。此外,Sharma等^[11]对 Fe^{3+} 掺杂 C_3S 的水化活性进行了测试,试验结果表明, Fe^{3+} 的掺杂会抑制 C_3S 的早期水化。还有其他学者^[12]对 Fe^{3+} 掺杂 C_3S 的早期水化行为进行了研究,均得出类似结论。但上述研究中关于铁相固溶体对 C_3S 早期水化抑制的作

收稿日期:2024-05-13; 修订日期:2024-06-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52302021,52172018);山东省重点研发计划项目(2021CXGC010301)

第一作者:李全亮(1998—),男,山东潍坊人,济南大学硕士生。E-mail:li08231013@163.com

通讯作者:叶正茂(1975—),男,河南商丘人,济南大学教授,博士生导师,博士。E-mail:mse_yezm@ujn.edu.cn

用机理尚不明确。

综上所述,研究铁相固溶体对 C_3S 水化的影响有助于开发新型胶凝材料,从而降低水泥生产的能耗及碳排放量^[13]。因此,本研究将 C_3S 与不同铝铁比的铁相固溶体进行混合水化,通过水化热、X射线衍射仪(XRD)、ICP-OES等表征手段,探究不同铝铁比的铁相固溶体对 C_3S 水化的影响规律,并阐明其反应机理。

1 试验

1.1 试验原料

本试验所用主要试剂为 $CaCO_3$ 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 ,药品均来自于国药集团化学试剂有限公司,纯度均为分析纯。

1.2 样品制备

1.2.1 $Ca_2Al_xFe_{2-x}O_5$ 、 C_3S 及 $Ca_2Al_xFe_{2-x}O_5$ - C_3S 体系的制备

按照化学计量比称取 $CaCO_3$ 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 ,使用行星磨机(型号YXQM-1L)将其混匀,通过固相烧结法制备铁相固溶体 $Ca_2Al_xFe_{2-x}O_5$ ($x=0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0$),煅烧温度为 $1300^\circ C$,保温时长 2 h ;按照化学计量比称取 $CaCO_3$ 、 SiO_2 ,通过固相烧结法制备 C_3S ,煅烧温度为 $1500^\circ C$,保温时长 6 h ,反复煅烧3次;按照1:4的质量比称取 $Ca_2Al_xFe_{2-x}O_5$ 与 C_3S ,使用行星磨机将2种样品进行充分混合后得到 $Ca_2Al_xFe_{2-x}O_5$ - C_3S 体系样品,球磨过程中设定转速为 400 r/min ,混合时间为 20 min 。

1.2.2 净浆样品的制备

将不同 $Ca_2Al_xFe_{2-x}O_5$ - C_3S 体系样品与去离子水按照0.5的水灰比(质量比)进行混合,搅拌均匀后置于养护室($(20\pm 1)^\circ C$,相对湿度98%)中,待水化进

行到预设时间后,泡入异丙醇中终止水化。将浸泡 24 h 的样品放入真空干燥箱中烘干并研磨,得到试验用净浆样品。按照1:4的质量比称取参比物刚玉($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)和净浆样品并置于研钵中,向研钵中加入适量异丙醇后研磨 5 min ,使样品混合均匀,将得到的混合物置于真空干燥箱(型号DHG-9140A)中进行烘干,最终得到用于XRD定量分析的水化样品。

1.2.3 孔溶液的制备

按照1:3的质量比称取 $Ca_2Al_xFe_{2-x}O_5$ - C_3S 与去离子水体系样品并在锥形瓶中混合,使用磁力搅拌机持续进行搅拌。在水化时间到达预设时间时,取适量浆体用离心法提取上层清液,使用注射器将上清液移至 $0.22\ \mu\text{m}$ 的滤膜上过滤,用pH计测量滤液的pH值。剩余的孔溶液立即用质量分数为1%的硝酸稀释10倍,以避免溶液中出现沉淀和碳化,经过上述步骤得到后续实验中所使用的孔溶液。

1.3 测试方法

X射线衍射分析:采用D8 ADVANCE X射线衍射仪对样品进行物相组成测试,并使用TOPAS 4.2软件进行Rietveld定量相分析^[14]。

水化热分析:采用TAM Air八通道等温量热仪测试不同样品96 h内的水化放热曲线以及累积放热量,试验水灰比为0.5,测试温度为 $25^\circ C$ 。

离子浓度分析:采用ICAP 7200型ICP-OES对样品水化过程中的 Ca^{2+} 、偏铁酸根离子(FeO_2^-)以及偏铝酸钙离子(AlO_2^-)的浓度进行检测。

2 结果与讨论

2.1 水化热分析

图1为 $Ca_2Al_xFe_{2-x}O_5$ - C_3S 体系样品在96 h内的

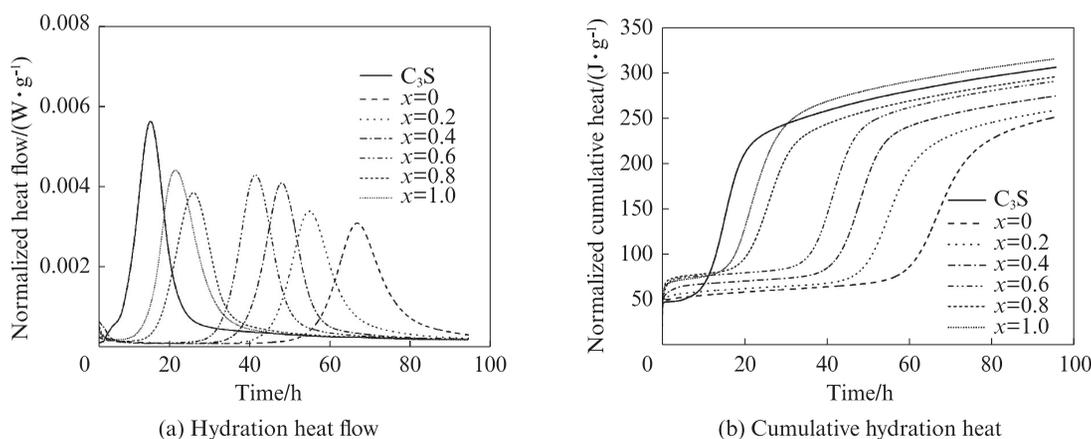


图1 不同 $Ca_2Al_xFe_{2-x}O_5$ - C_3S 体系水化热曲线
Fig. 1 Hydration heat of different $Ca_2Al_xFe_{2-x}O_5$ - C_3S systems

水化放热速率曲线及累积放热曲线。

由图1(a)可见:纯 C_3S 的放热主峰在5 h左右开始出现,在15 h左右到达峰值,并在30 h左右进入稳定期;而当 C_3S 与 $Ca_2Al_xFe_{2-x}O_5$ 混合后,放热主峰的出现发生了不同程度地延后;随着体系中铁相固溶体铝铁比从1.0降低至0, C_3S 水化放热峰的出现时间由15 h逐渐延迟至49 h.这表明 $Ca_2Al_xFe_{2-x}O_5$ 的掺入直接延长了 C_3S 的诱导期,抑制了整个体系水化.值得关注的是,铁相固溶体的铝铁比越小,对 C_3S 水化的抑制作用越明显.

由图1(b)可见,不同体系的累积放热量差距较大,但其累积放热曲线变化趋势相似,均呈现出上升—稳定—上升—稳定的趋势,其中最主要的区别为第1个稳定期即水化诱导期的长度,整体表现为铁相固溶体的铝铁比越小,诱导期时间越长.

综上, $Ca_2Al_xFe_{2-x}O_5$ 对 C_3S 的水化具有抑制作用,并且其铝铁比越小,对 C_3S 水化的抑制作用越明显.

2.2 水化产物分析

为探究不同 $Ca_2Al_xFe_{2-x}O_5$ 对 C_3S 水化产物的影响,本研究对不同体系(x 取值为0、0.6、1.0)、不同水化时间(5、12、24、48、120 h)的水化样品进行了X射线衍射分析,试验结果见图2.由图2可见,虽然不同水化样品中各个物相含量不同,但物相组成均为水合铝/铁酸三钙($C_3(A, F)H_x$)、 $Ca(OH)_2(CH)$ 、 $Ca_2Al_xFe_{2-x}O_5$ 、 $C_3S(\alpha-Al_2O_3$ 为惰性物质,作为定量分析参照物,以20%的掺量掺入水化后样品中,不会对样品的水化产生影响).由此可知,体系中铁相固溶体铝铁比的变化只影响水化进程,不会对水化产物的物相组成造成影响.

2.3 水化程度分析

图3为通过Topas软件对上述XRD图谱中各物相进行定量分析的结果,分析中设定水化0时刻体系中固相总质量为100 g,水化不同时间后体系中各物相质量以克计.由图3可以看出:(1)改变体系中铁相固溶体的铝铁比对水化进程具有很明显的影响,尤其是对 C_3S 水化的影响最为显著.(2)当 x 的取值为0和0.6时,体系中 C_3S 含量的变化趋势相近,均表现为下降—稳定—下降的趋势;而当 x 的取值为1.0时,由于该体系水化诱导期较短,因此 C_3S 的水化未见明显稳定期的出现,只存在一个含量降低速率放缓的阶段.与上述 C_3S 含量变化趋势相对

应的反应为:首先,样品与水接触后开始溶解,大量离子被释放进入孔溶液, C_3S 含量第1次降低;随着水化时间的延长,水化进入诱导期,不同样品中 C_3S 含量的下降速率都发生了不同程度的延缓;最后,水化诱导期结束, C_3S 再次开始水化,其含量再次开始下降.值得注意的是,诱导期的长短与体系中铁相固溶体的铝铁比具有明显相关性,具体表现为铁相固溶体的铝铁比越小,对 C_3S 水化的延缓作用越明显,该试验现象与水化放热曲线得出的结论一致.

结合不同水化样品中的 C_3S 含量变化进行深入分析,结果如图4所示.由图4可见,不同样品中 C_3S 含量的差异主要存在于前期,在水化进行到120 h时,不同样品中 C_3S 的含量均在 $(13 \pm 0.5)\%$ 范围内.因此,不同铝铁比的铁相固溶体主要影响 C_3S 的前、中期水化,不会影响 C_3S 最终的水化程度,这为新型胶凝材料的研发提供了新思路.

2.4 $Ca_2Al_xFe_{2-x}O_5$ 孔溶液- C_3S 体系水化热分析

水化过程分为溶解与沉淀,二者均与溶液中离子的行为密切相关.为进一步探究 $Ca_2Al_xFe_{2-x}O_5$ - C_3S 体系水化异常的原因,本研究开展了以下试验:将不同 $Ca_2Al_xFe_{2-x}O_5$ 按照0.5的水灰比与去离子水混合进行水化,水化进行2 h后使用注射器将浆体通过 $0.22 \mu m$ 的滤膜进行过滤,得到含铝铁水合离子的孔溶液,将该孔溶液与 C_3S 按照0.5的水灰比进行混合并测试其水化热.此试验排除了铁相固溶体水化产物对 C_3S 水化性能的影响,重点探究溶液中的离子在体系中的作用,试验结果见图5.由图5可见,排除水化产物影响后,在铁相固溶体水化孔溶液中水化的 C_3S 依然受到抑制.孔溶液中除含铝铁的水合离子之外还存在大量 Ca^{2+} ,而 Ca^{2+} 的存在会促进 C_3S 水化的进行,这说明含铝铁的水合离子不仅抵消了孔溶液中 Ca^{2+} 对 C_3S 水化的促进作用,还使整体的水化速率慢于对照组(C_3S +去离子水),但由于孔溶液中的含铝铁水合离子无法通过铁相固溶体的溶解进行补充,因此对 C_3S 水化的抑制效果减弱.

2.5 离子浓度变化趋势分析

经过上述试验可以确定 $Ca_2Al_xFe_{2-x}O_5$ 对 C_3S 水化的抑制作用与溶液中的离子行为有关.因此本节通过ICP-OES对不同样品水化过程中各离子的浓度进行表征,从而进一步对本体系的水化机理进行探究.

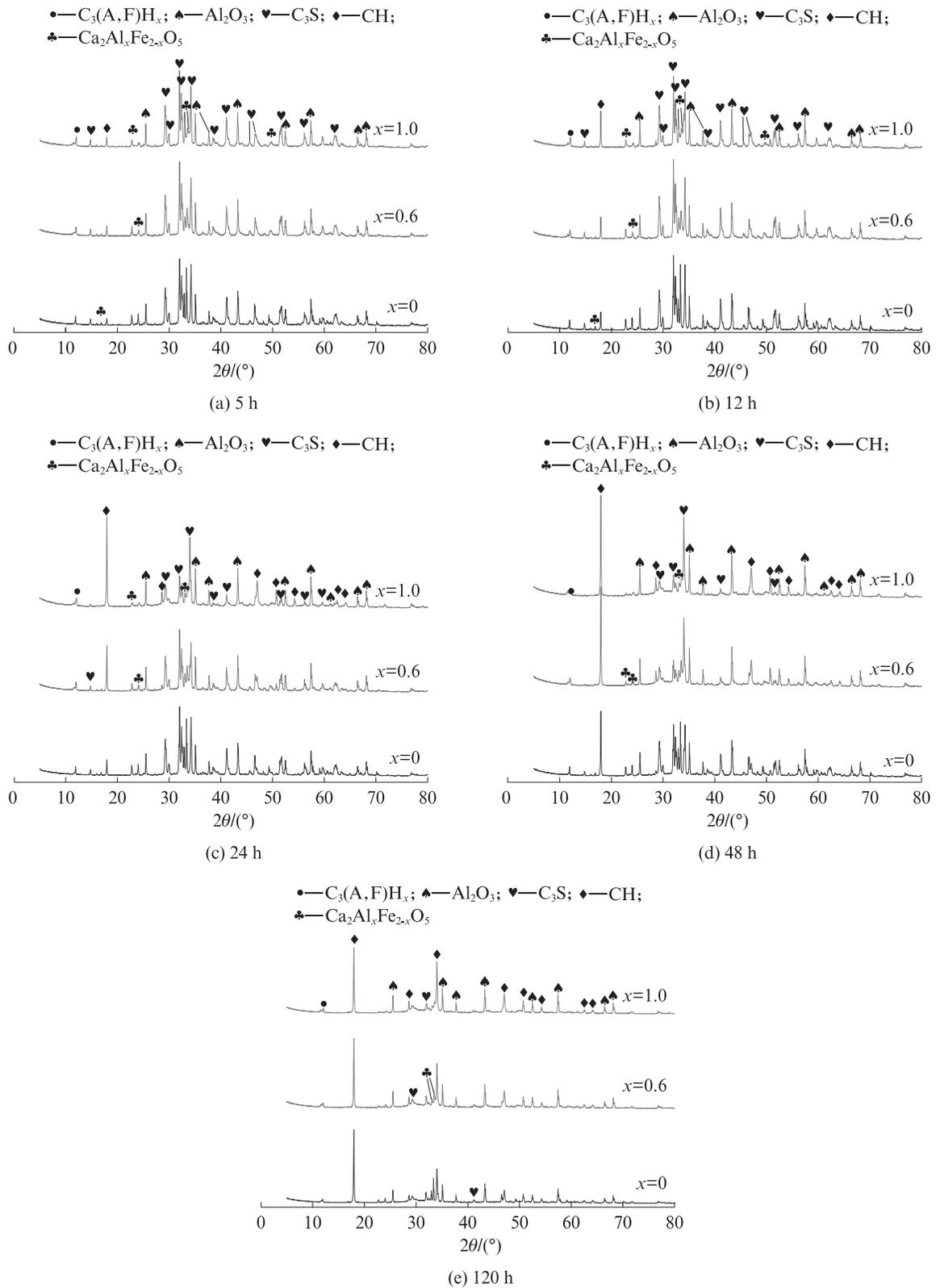


图2 不同体系水化样品的X射线衍射图谱

Fig. 2 XRD patterns of hydrated samples from different systems

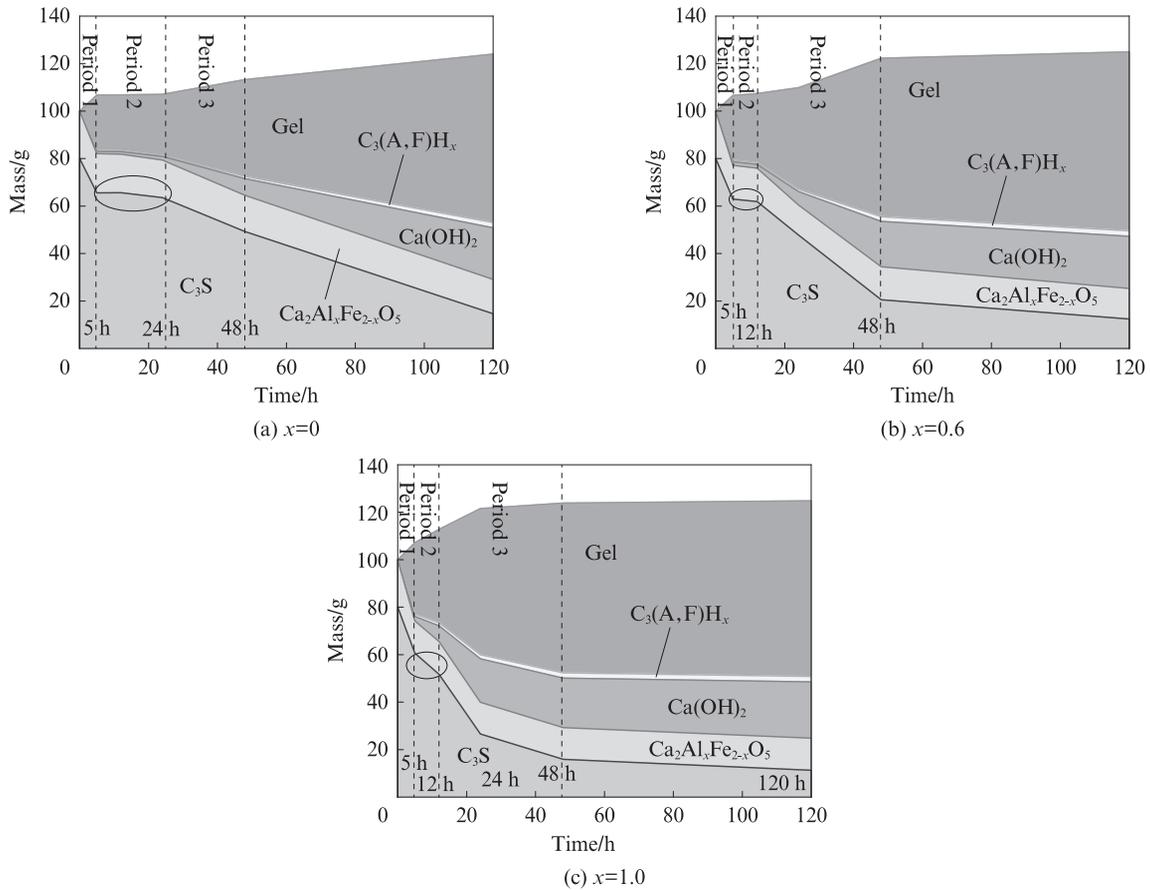


图3 不同 $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5\text{-C}_3\text{S}$ 体系相演化图

Fig. 3 Phase evolution patterns of different $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5\text{-C}_3\text{S}$ systems

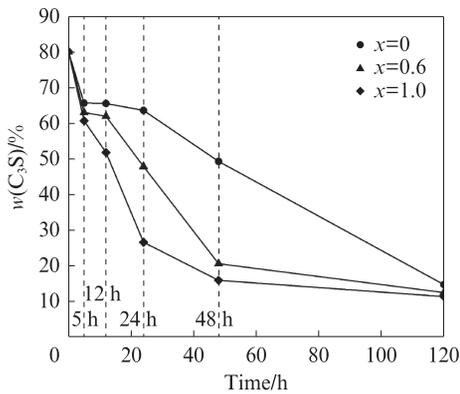


图4 不同 $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5\text{-C}_3\text{S}$ 体系水化样品中的 C_3S 含量
Fig. 4 Content of C_3S in different hydrated $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5\text{-C}_3\text{S}$ systems

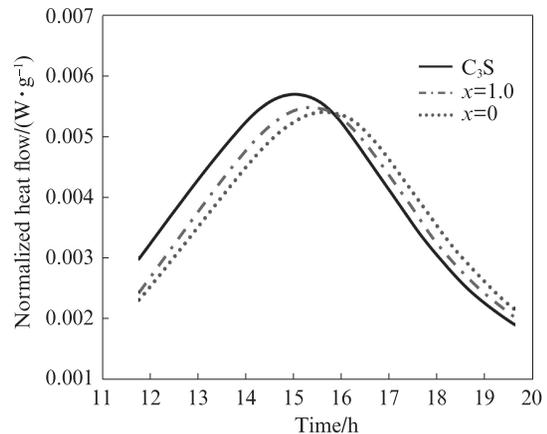


图5 不同 $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5$ 孔溶液- C_3S 体系的水化放热曲线
Fig. 5 Hydration heat flow of different $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5$ pore solution- C_3S systems

图6为不同体系溶液中的 Ca^{2+} 浓度变化曲线.由图6可以看出:(1)不同 $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5\text{-C}_3\text{S}$ 体系的 Ca^{2+} 变化趋势有所不同.当水化样品为纯 C_3S 时,溶液中 Ca^{2+} 浓度的变化趋势为先快速上升至过饱和状态,然后溶液中的 Ca^{2+} 与 OH^- 结合产生沉淀,导致 Ca^{2+} 浓度呈现出下降趋势,最终溶液中的 Ca^{2+} 浓度停留在一个相对稳定的状态,反应进入溶解-沉淀平衡期.(2)当水化样品为 C_3S 与铁相固溶体的混合

物时, Ca^{2+} 浓度的变化趋势均呈现出上升-稳定-上升-下降的变化趋势.相较于纯 C_3S ,在 $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5\text{-C}_3\text{S}$ 体系的水化过程中, Ca^{2+} 浓度拐点的出现时间被明显延迟,且该时间与铁相固溶体的铝铁比呈现很强的相关性,具体表现为铝铁比越大,该拐点出现的时间越早.由此可知,铁相固溶体可以通过延长 Ca^{2+} 浓度到达临界状态的时间来延迟 C_3S

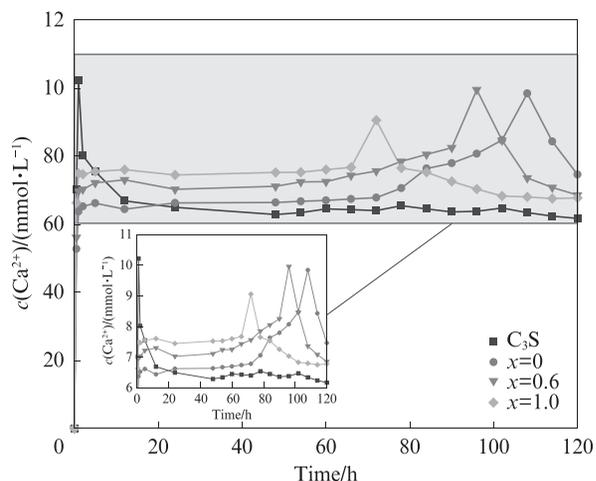
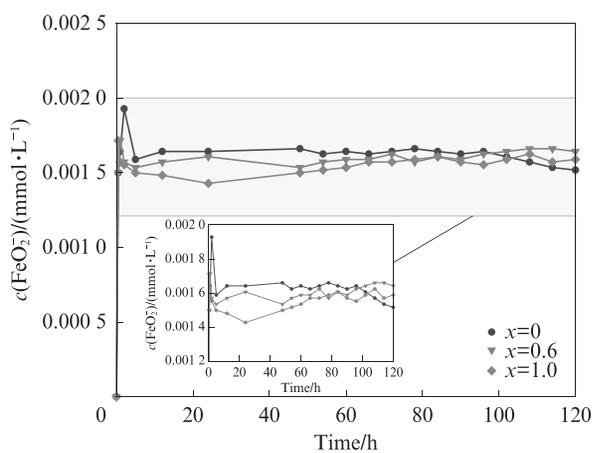
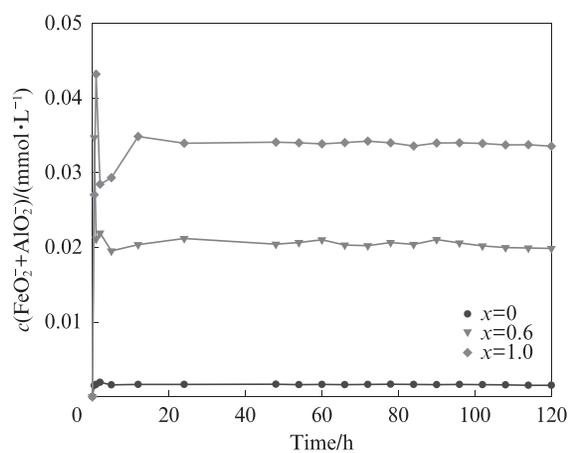


图6 不同 $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5\text{-C}_3\text{S}$ 体系样品中的 Ca^{2+} 浓度
Fig. 6 Ca^{2+} concentration in samples of different $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5\text{-C}_3\text{S}$ systems



(a) Concentration of metaferrate ions



(b) Total concentration of metaferrate and metaluminate ions

图7 不同 $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5\text{-C}_3\text{S}$ 体系样品孔溶液中的偏铁酸根离子和偏铝酸根离子浓度

Fig. 7 Metaferrate and metaluminate ion concentration of different $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5\text{-C}_3\text{S}$ systems

2.6 热力学分析

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 是该体系的主要水化产物之一,Young等^[15]发现诱导期的结束总是伴随 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的大量形成,因此当 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 开始沉淀时,说明水化诱导期已经结束.根据水化动力学, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 沉淀的难易程度可以通过不同样品孔溶液中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和度进行评价. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的饱和度越高,则说明该体系开始沉淀需要累积的成核势能越高,即水化进行越困难.

图8为各 $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5\text{-C}_3\text{S}$ 体系不同龄期时孔溶液中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和度指数.由图8可见:(1)所有样品 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的饱和度指数均大于0,表明所有孔溶液均处于过饱和状态.(2) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和度指数的变化呈现出一定的规律,即随着水化时间的延长,纯 C_3S 样品的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和度指数变化趋势为先上升后下降,而 $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5\text{-C}_3\text{S}$ 体系样品,则多出了一段 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和度指数相对平衡的时期.此

的水化.

图7展示了不同 $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5\text{-C}_3\text{S}$ 体系样品孔溶液中偏铁酸根离子与偏铝酸根离子的浓度变化情况.由图7(a)可见,不同样品孔溶液中偏铁酸根离子的浓度均维持在很低的水平,并且在浓度上无明显区别.而由图7(b)可见,孔溶液中的偏铝/铁酸根离子的总浓度存在明显差别, $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5\text{-C}_3\text{S}$ 样品中偏铝/铁酸根离子的总浓度是 $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5\text{-C}_3\text{S}$ 样品中的10倍左右.结合前文分析,推断水化反应受到抑制的原因是溶液中的偏铁酸根离子浓度过低,使得下一步的水化反应难以进行,而向 $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ 引入与 Fe^{3+} 性质相似的 Al^{3+} 使其变为 $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5$ 后,水化过程中偏铝/铁酸根离子的总浓度显著提高,足以支持水化反应正常进行.

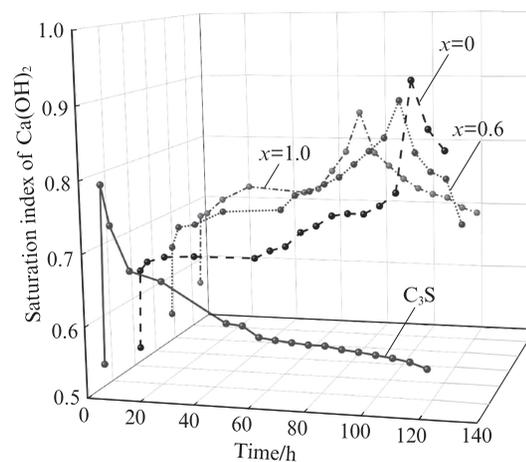


图8 不同 $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5\text{-C}_3\text{S}$ 体系 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和度指数
Fig. 8 Saturation indexes of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in different $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5\text{-C}_3\text{S}$ systems

阶段代表水化反应进入诱导期,而此阶段的持续时长与 $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5$ 的 x 取值有关, x 取值越大,该时

间持续的时间越短,这与先前试验得出的结论一致。而饱和度指数拐点的出现代表着诱导期的结束,此时溶液中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 开始生成沉淀,该拐点的数值与水化诱导期结束的难易程度有关。

图9为不同 $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5\text{-C}_3\text{S}$ 体系的最大饱和度情况。由图9可见,纯 C_3S 体系孔溶液中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的最大饱和度为0.79,当 C_3S 与 $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5$ 混合水化时, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的最大饱和度发生了不同程度的增加,当体系中铁相固溶体的铝铁比在由1.0降低至0的过程中, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的最大饱和度也由0.85逐渐提升至0.92,较纯 C_3S 体系分别提升7.70%和16.96%。由此可知,含铁水合离子的存在会使孔溶液中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的最大饱和度上升,使水化反应难以进行,但提高铁相固溶体的铝铁比可以降低 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的成核难度,从而激发该体系的水化活性。综上所述,铁相固溶体的铝铁比越高, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 最大饱和度越低,水化反应越容易进行。

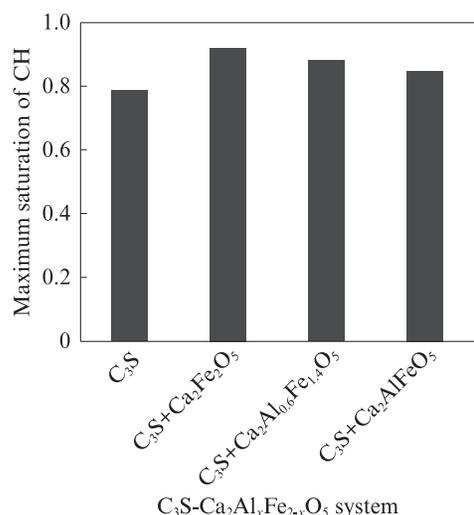


图9 不同 $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5\text{-C}_3\text{S}$ 体系孔溶液中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的最大饱和度
Fig. 9 Maximum saturation of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in pore solution of different $\text{Ca}_2\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_5\text{-C}_3\text{S}$ systems

3 结论

(1)当铁相固溶体与 C_3S 混合水化时, C_3S 的水化受到抑制,并且铁相固溶体的铝铁比越小对 C_3S 的抑制作用越明显。

(2)铁相固溶体与水反应生成的偏铁酸根离子是导致 C_3S 水化受到抑制的因素。偏铁酸根离子的存在提高了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 沉淀所需的饱和度,从而使水化反应难以进行。当体系中存在偏铝酸根离子时, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 沉淀所需的饱和度降低,从而减轻偏铁酸根离子对 C_3S 水化的抑制作用。

参考文献:

- [1] 胡勇. 浅谈水泥行业减碳降碳路径[J]. 中国建材, 2024(4):128-131.
HU Yong. A brief discussion on the path to reducing carbon emissions in the cement industry[J]. China Building Materials, 2024(4):128-131. (in Chinese)
- [2] 饶美娟,王群超,杨旺,等. 高温蒸养与偏高岭土对高铁相水泥性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(4):339-345.
RAO Meijuan, WANG Qunchao, YANG Wang, et al. Effects of high temperature steam curing and metakaolin on properties of high ferrite cement[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(4):339-345. (in Chinese)
- [3] 贺晋瑜,何捷,王郁涛,等. 中国水泥行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2):347-355.
HE Jinyu, HE Jie, WANG Yutao, et al. Pathway of carbon emissions peak for cement industry in China[J]. Research of Environmental Science, 2023, 35(2):347-355. (in Chinese)
- [4] 高旭东. 水泥行业“十四五”绿色低碳发展中期回顾及展望[J]. 中国水泥, 2024(4):6-15.
GAO Xudong. Mid-term review and prospect of green and low-carbon development in the cement industry during the 14th Five-Year Plan period[J]. China Cement, 2024(4):6-15. (in Chinese)
- [5] 胡曙光. 水泥工业在国家“双碳”战略中大有作为[J]. 中国水泥, 2022(4):32-33.
HU Shuguang. A big role of the cement industry in the national “dual carbon” strategy of China[J]. China Cement, 2024(4):32-33. (in Chinese)
- [6] 李相国,柯凯,马保国,等. MnO_2 对硅酸三钙晶粒尺寸及晶型的影响[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(4):544-547
LI Xiangguo, KE Kai, MA Baoguo, et al. Influence of MnO_2 on crystal grain size and polymorphisms of tricalcium silicate[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(4):544-547. (in Chinese)
- [7] 王晓丽,林忠财. 固废基低钙固碳水泥熟料组成设计及烧成过程[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(11):1115-1120.
WANG Xiaoli, LIN Zhongcai. Composition design and sintering process of solid waste-based low-calcium carbon-fixing cement clinker[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(11):1115-1120. (in Chinese)
- [8] 王发洲,麦立强. 无机非金属材料创新助力“双碳”目标[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(9):2126-2127.
WANG Fazhou, MAI Liqiang. Innovation of inorganic non-metallic materials to support “dual-carbon” goal[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(9):2126-2127. (in Chinese)
- [9] 李传海. 分相组合法制备阿利特—硫铝酸盐水泥的研究[D]. 济南: 济南大学, 2019.
LI Chuanhai. Study on preparation of Alite—Sulphoaluminate cement by phase-separation method[D]. Jinan: University of Jinan, 2022. (in Chinese)
- [10] 任尊超. 硅酸盐水泥熟料单矿的匹配水化及其调控[D]. 济南: 济南大学, 2022.

- REN Zunchao. Matching hydration of mineral of Portland cement clinker and its adjustment[D]. Jinan:University of Jinan, 2022. (in Chinese)
- [11] SHARMA G, KUMAR D, TYAGI S, et al. Spin-lattice coupling and complex thermal expansion in $\text{Ca}_2\text{FeAlO}_5$ [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 732: 358-362.
- [12] STEPHAN D, WISTUBA S. Crystal structure refinement and hydration behaviour of doped tricalcium aluminate[J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(11):2011-2020.
- [13] 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)
- [14] 常钧,崔凯. 基于 Rietveld 方法的硫铝酸盐水泥熟料及其水化产物定量相分析[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(2):438-446.
- CHANG Jun, CUI Kai. Quantitative phase analysis calcium sulfoaluminate clinker and its hydration products based on Rietveld method[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(2): 438-446. (in Chinese)
- [15] YOUNG J F, TONG H S, BERGER R L. Compositions of solutions in contact with hydrating tricalcium silicate pastes[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1977, 60(5/6): 193-198.