

工业钛白废酸制备硫酸铝型无碱速凝剂的性能及水化机理研究

邓林^{1,2*}, 毛雪华¹

(1. 攀枝花学院生物与化学化工学院, 四川 攀枝花 617000;
2. 四川省钒钛资源综合利用重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘要:采用工业钛白废酸和氢氟酸解氢氧化铝, 合成了含氟硫酸铝型无碱速凝剂。考察了不同掺量下含氟无碱速凝剂对水泥浆料性能的改变, 同时通过 XRD 和 SEM 分析了加入速凝剂后水泥水化产物的组成和微观结构; 提出水化概念模型, 模拟含氟无碱速凝剂水化反应机理。结果表明, 钛白废酸结合氢氟酸能更好地溶解氢氧化铝, 且加入氢氟酸有利于提高速凝剂中铝元素的含量, 使得含氟速凝剂质量分数最高可达 48%, 性能更佳; 在 7% 含氟速凝剂掺量下, 水泥基体初凝时间和终凝时间分别为 3.17 min 和 5.33 min, 所制备的无碱速凝剂符合 GB/T 35159—2017《喷射混凝土用速凝剂》中合格品的要求。该技术为废硫酸重复再利用提供了一种参考方式。

关键词:工业废硫酸; 无碱速凝剂; 水化机理; 概念模型

中图分类号: X781.3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2022)11-0211-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.11.039

Properties and hydration mechanism of aluminum sulfate type alkali-free accelerator prepared from waste sulfuric acid from titanium dioxide production

DENG Lin^{1,2*}, MAO Xue-hua¹

(1. College of Biological and Chemical Engineering, Panzhihua University, Panzhihua 617000, China;
2. Sichuan Provincial Key Laboratory for Comprehensive Utilization of Vanadium and Titanium Resources, Panzhihua 617000, China)

Abstract: Aluminum sulfate type fluorine-containing alkali-free accelerators are prepared by acid hydrolysis of Al(OH)₃ with hydrofluoric acid and waste sulfuric acid from titanium dioxide production. The effect of different dosages of fluorine-containing alkali-free accelerator on the performance of cement paste is investigated. The composition and microstructure of cement hydration products after adding accelerator are analyzed by means of XRD and SEM. The hydration conceptual model is proposed to simulate the hydration reaction mechanism of fluorine-containing alkali-free accelerator. Results show that waste sulfuric acid combined with hydrofluoric acid can dissolve aluminum hydroxide better, and the addition of hydrofluoric acid is beneficial to increase the content of aluminum in accelerator, making the performance of the accelerator better, and the maximum mass fraction can reach 48%. The initial setting time and final setting time of cement matrix are 3.17 min and 5.33 min, respectively when the dosage of fluorine-containing alkali-free accelerator is 7%. The prepared fluorine-containing alkali-free accelerator meets the requirements of qualified products in GB/T 35159—2017 Flash Setting Admixtures for Shotcrete. The preparation technology provides a treatment method for the reuse of waste sulfuric acid.

Key words: waste industrial sulfuric acid; alkali-free accelerator; hydration mechanism; conceptual model

喷射混凝土是隧洞、矿山施工中广泛采用的一种结构支护技术。在地下开挖施工过程中, 因荷载过大导致岩崩坍塌等安全问题时有发生。为了防止隧道、矿山或高架区域产生坍塌、掉落, 喷射混凝土必须具有快速凝结和早期强度高的特点, 通过混凝土中添加速凝剂可以实现这些需求^[1]。速凝剂包括一系列影响水泥水化速率的化学物质, 从而缩短凝结时间, 并可以提高早期强度。加入速凝剂后可

以改变混凝土的物理、化学和力学性能。喷射混凝土中使用的速凝剂主要有碱性和无碱性 2 种。根据其化学组成和变化, 可以解释对早期水化动力学的不同影响^[2-3]。

碱性速凝剂主要由铝酸钠或硅酸钠组成, Na⁺和 [Al(OH)₄]⁻ 离子被掺入到水泥基体中。[Al(OH)₄]⁻ 离子与水泥浆体液相中的 Ca²⁺、SO₄²⁻ 离子发生反应, 形成 AFt 和 AFm 相, 有助于减少基

收稿日期: 2021-11-24; 修回日期: 2022-09-02

基金项目: 四川省钒钛资源综合利用重点实验室项目(2020FTGC-YB-03)

作者简介: 邓林(1985-), 女, 博士生, 讲师, 主要研究方向为钒钛资源综合利用及锂电池, 通讯联系人, 330988578@qq.com。

体的凝固时间^[4]。碱性速凝剂具有在施工现场气味浓烈、腐蚀性强、对工人危害严重、后期危害大、喷涂过程中强度降低等缺陷。无碱速凝剂的主要成分是硫酸铝,通常通过添加无机或有机酸稳定在水溶液中。当这种类型的外加剂用于水泥基质时,混合水中富含 Al^{3+} 、 SO_4^{2-} 和 H^+ 离子,与溶液中的钙离子和硫酸盐离子发生反应,钙矾石是基体中形成的主要产物。钙矾石纳米晶的形成和生长是减少凝固时间和提高强度的主要过程。此类无碱或低碱速凝剂具有污染小、腐蚀性低、后期强度高的特点,得到了越来越广泛的应用^[5-6]。

水泥在干态时主要由硅酸三钙 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S)、硅酸二钙 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S)、铝酸三钙 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)、铁铝酸四钙 $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF) 以及少量的硫酸化物(钾盐、钠盐)、石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)组成。在水泥水化过程中, C_3A 、 C_3S 和 C_2S 与水泥中其他组分发生复杂的水化反应。其中钙矾石的形成最符合热力学反应过程,这种铝酸盐水合物的生成也是取决于硫酸盐的含量,在硫酸根充足的情况下,生成钙矾石(Aft),即三硫型水化硫酸铝钙型,在后期硫酸根消耗不足的情况下,生成单硫型水化硫酸铝钙(AFm),此外还有氢氧化钙CH和硅酸钙C—A—H凝胶。

钛白废酸是我国硫酸法生产钛白粉产生的废酸,每年约产生 500 万 t 左右。目前钛白废酸的最主要的处理方式是与硫铁矿掺烧制备硫酸,但该方法消耗量有限,故而大部分的钛白废酸仍是用石灰中和为石膏达标后堆放。这类处理方式本质上是将废酸转化为废渣堆放,并不是真正的绿色处理方式。用钛白废酸酸解氢氧化铝制备硫酸铝型无碱速凝剂则是一种全新的废硫酸处理方式,在制备过程中,钛白废酸的成分完全转化为速凝剂中的有用成分,并且是产品优异性能的关键组分。可降低速凝剂产品成本甚至拓展钛白粉生产的工艺路线。

目前对含有铝氟络合体系的速凝剂的研究主要倾向于配方和性能研究,有必要对水泥水化作用的机制进行研究。因此,笔者主要研究了不同含量、不同掺量的含氟硫酸铝型无碱速凝剂的化学成分对水泥水化的影响。并对速凝剂的制备和性能、速凝剂掺入水泥制样后的 XRD 和 SEM 进行分析。通过水化机理的概念模型,提出含氟速凝剂性能差异变化的主要原因。

1 实验过程

1.1 原料

无碱速凝剂中硫酸铝采用攀枝花地区硫酸法生产钛白所产废酸酸解工业氢氧化铝制备而成。钛白废酸就是硫酸法钛白工艺中的水解母液, H_2SO_4 质量分数在 20%~23%。废酸的主要成分如表 1 所示。为提高酸解效率还加入了氢氟酸一起进行酸解反应,实验中不同的浓度的氢氟酸由 40% 的工业氢氟酸加自来水配置而成。酸解氢氧化铝制备硫酸铝和氟化铝主要的反应为:

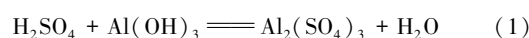


表 1 钛白废酸主要的化学成分

| 化学成分 | H_2SO_4 | Fe | Ca | Mg | Ti | Al |
|---|-------------------------|----|-----|-----|-----|-----|
| 质量浓度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) | 198 | 30 | 0.7 | 6.1 | 2.6 | 1.5 |

水泥采用普通的硅酸盐水泥(瑞丰 P. O 42.5)。其中 C_3S 约占 58%, C_2S 占 12%左右, C_3A 占 4.8%左右, C_4AF 占 13.5%左右,另外,其他含钙物质占剩余 10%左右。水泥的水化产热主要以 C_3S 和 C_2S 为主。

1.2 无碱速凝剂的制备

无碱速凝剂的制备方法主要有 2 个阶段:①钛白废酸与氢氟酸酸解工业氢氧化铝制备含氟硫酸铝型无碱速凝剂。氢氧化铝分解反应需要 130℃ 以上才能进行,加入腐蚀性极强的氢氟酸后反应剧烈,并且放出大量的热,反应不需要额外热量就可以自发进行,同时辅助搅拌设施。固定氢氧化铝、钛白废酸和氢氟酸的质量比为 1:3:1,改变氢氟酸的加入浓度,合成含有不同氟离子浓度的络合溶液;②趁热合成速凝剂。生成的硫酸铝是一种极易凝胶化的结晶物质,特别是温度降低到 60℃ 以下。 AlF_3 配合物的形成有利于提高速凝剂中铝离子的浓度和稳定性。当 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 完全分解后,在 95℃ 左右加入自来水,最后加入约 2% 的二乙醇胺稳定剂。同时,可加入少量 NaOH 调节 pH 在 2 以上。通过以上步骤,成功制备了含氟离子的硫酸铝型无碱或低碱速凝剂。

1.3 性能测试及表征

性能测试方法参照国家标准 GB/T 35159—2017 喷射混凝土外加剂和 GB/T 8076—2008 混凝土外加剂中关于水泥净浆凝结时间、稳定性、1 d 抗压强度和 28 d 强度比测试。此外,还对加入速凝剂后的水泥样品进行了 X 射线衍射分析(XRD)和扫

描电子显微镜(SEM)分析测试。

2 结果与讨论

2.1 钛白废酸酸解制备硫酸铝型无碱速凝剂及其性能测试

硫酸和氢氧化铝反应温度在 130℃ 以上,选用油浴锅加热。废硫酸按化学计量比过量 10% 进行反应。对酸解反应而言,25% 的酸度较低,反应时间在 10 h 以上才能完全溶解,在 150℃ 下需要 8 h,提高酸度和反应温度可以大大降低反应时间。在加入一定量的氢氟酸后,因其酸度提高和强烈的腐蚀性,可以溶解更多的氢氧化铝并且缩短反应时间在 6 h 以下。加入 10% 的氢氟酸后,保温在 80℃ 以上能反应完全;加入 20% 的氢氟酸保温 50℃ 在 2.5 h 内反应完全;在 30% 的氢氟酸下,反应不需要加热即可自发进行,反应时间短,2 h 即可完全反应;在 40% 的氢氟酸下,反应最为剧烈,实验过程需要转移产生的热量,防止爆沸。另外,氟化铝络合物的产生,有利于提高速凝剂的稳定性和铝离子的含量。制备的含氟离子和不含氟离子的硫酸铝型无碱速凝剂主要成分如表 2 所示,不同掺量的速凝剂性能如表 3 所示。

表 2 无氟及含氟无碱速凝剂主要组分

| 性质 | 无氟速凝剂 | 含氟速凝剂 |
|-------------------------------|-------|-------|
| 质量分数/% | 39.6 | 48 |
| $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$ | 11.2 | 12.5 |
| $w(\text{SO}_4^{2-})/\%$ | 20.6 | 20.2 |
| $w(\text{F}^-)/\%$ | — | 7.1 |
| $w(\text{Na}_2\text{O})/\%$ | 0.02 | 0.04 |
| pH(20℃) | 2.2 | 2.5 |
| 稳定性/d | 18 | >30 |

表 3 不同掺量的无碱速凝剂性能测试

| 速凝剂 | 无氟速凝剂 | | 含氟速凝剂 | |
|--------------------------|-------|------|-------|------|
| | 掺量/% | 掺量/% | 掺量/% | 掺量/% |
| 掺量/% | 4 | 7 | 4 | 7 |
| 水泥浆体凝结时间 | | | | |
| 初凝时间/min | 5.25 | 4.42 | 4.08 | 3.17 |
| 终凝时间/min | 11.01 | 7.68 | 7.20 | 5.33 |
| 浆体强度 | | | | |
| 1 d 强度/MPa | 11.2 | 10.4 | 9.5 | 9.2 |
| 28 d 强度比 ^① /% | 105 | 103 | 97 | 95 |

注:①28 d 抗压强度为水泥制样标准强度,28 d 强度比为速凝剂加入后水泥制样与标准制样比值。

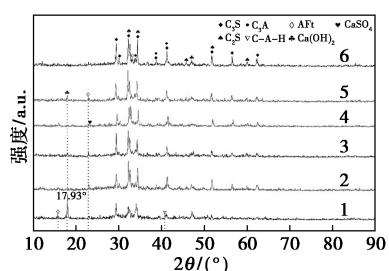
含铝和硫酸根的化学物质总量的质量分数是速凝剂品质的重要指标。实验中发现,无氟速凝剂质量分数在 40% 以下才能保持稳定;含氟速凝剂因生成 AlF_3 ,其质量分数可以达到 48%,更高则会导致失稳。制备的 2 种速凝剂均能达到无碱速凝剂合格品的要求,其中含氟络合物速凝剂表现出更优异的性能。

2.2 含氟无碱速凝剂对水泥水化作用的 XRD 和 SEM 分析

硅酸盐水泥的水化是一个非常复杂的、非均质的多相化学反应过程。自加水开始,水泥的水化反应就会一直进行,水泥基体的结构会随着水泥水化反应逐渐演变,由流动状态逐渐变为塑性状态,最后到凝结硬化状态。通过水泥的水化反应,将松散的水泥粉体颗粒变成了具有胶结性的水泥浆体,进而粘结各种不同粒径的粗细骨料,形成混凝土这种水泥基体材料。水泥的水化作用就是这些复杂化学反应的集合,包括生成结晶性较好的水化晶体 AFt 、 AFm 和 CH ,还有结晶性不好的无定形 C—A—H 。 AFt 、 AFm 和 CH 呈针状、棒状、无序态,这是造成水泥脆性的根本原因。为研究含氟络合物无碱速凝剂不同用量对水泥的水化作用机理,以表 2 中含氟速凝剂为配方,分析使用速凝剂后水化产物的组成和微观结构,并利用 XRD 和 SEM 对其进行表征。

2.2.1 XRD 分析

对未使用速凝剂和使用含氟速凝剂在不同掺量、不同水化时间下的水泥水化作用产物进行 X 射线衍射分析。实验过程发现,不添加速凝剂,1 h 后水泥浆体基本变为塑性状态,此时可以检测到各种晶体物质的衍射峰;4% 和 7% 掺量下,40 min 可以检测到衍射峰,说明速凝剂的确加快了水化作用进程。对水化产物进行 XRD 衍射分析,结果如图 1 所示。由图 1 可以看出,水泥水化特征产物如 AFt 和 C—A—H 仅检测到很弱的峰,而 AFm 与 C—A—H 基本未检出,可知水化反应产物基本结晶度不高。钙矾石 AFt 在 4% 掺量下 40 min 后峰强略高于其他。在 17.93°,掺量 4% 速凝剂 28 d 后,水化产物检测到非常明显的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,说明水泥中主要成分 C_2S 和 C_3S 反应后产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 因硫酸铝掺量低,使水泥浆体中缺少 SO_4^{2-} ,而无法继续反应保持了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的晶体特征。XRD 图谱中未检出含氟元素的产物,原因是水泥浆体中氟离子含量低于检出限。总的来说,XRD 中显示的水化反应的信息有限。



1—4%—28 d; 2—4%—40 min; 3—7%—28 d; 4—7%—40 min;
5—0%—28 d; 6—0%—1 h

图 1 不同掺量和不同水化时间下水化产物 XRD 图谱

2.2.2 SEM 分析

对不同掺量的水泥浆体在水化反应 24 h 和 28 d 后进行扫描电镜分析,如图 2 所示。由图 2(a)和图 2(b)中可以看出,未加入无碱速凝剂情况下,24 h 后可以在水泥颗粒相上观察到大量水和沉淀物,水泥表面水化产物覆盖面积大。这些纤维状水化产物主要是 C—S—H 凝胶,有较高的水化产物密度,是水泥强度主要来源。同时,C—S—H 的凝胶结构影响对水的吸收,对水泥干燥收缩产生影响,C—S—H 凝胶形成的覆盖层会减缓水泥的水化作用,一定程度上影响凝结时间,以致水泥初终凝时间延长。所以无掺量时,其强度最大,而初终凝时间最长。同时局部位点观察到数量不多的晶须。

由图 2(c)~图 2(f)中可以看出,在加入无碱速凝剂后,24 h 下观察到大量的针棒状、棱面清晰的 AFt 晶体互相交织在一起形成三维网状结构。AFm 晶体为六方板状、片状晶体,成簇或呈花朵状生成,一般在水化后期会观察到。无碱速凝剂中的氢离子、铝离子和硫酸根离子会促使水泥中铝酸三钙和硅酸三钙加速溶解生成 AFt,并放出大量的热,影响水泥的流动性,迅速凝固,使得初终凝时间大大减小。AFt 质量分数越高,初终凝时间越少。同时,少量晶体对水泥早期强度贡献大,但是过量会使强度降低,因为生成三维网状结构 AFt 时,孔隙变大,会使水泥体积膨胀,容易形成内应力,使结构破坏。这样的结果导致加入无碱速凝剂后,初终凝时间会缩短,而强度下降,同时,掺量越高,这种变化趋势越明显。这些结论与表 3 中关于初终凝时间和强度的变化的结论一致。在时长 24 h 下,水泥浆体保持水化反应继续进行。

从图 2(d)~图 2(f)中可以看出,随着水泥水化

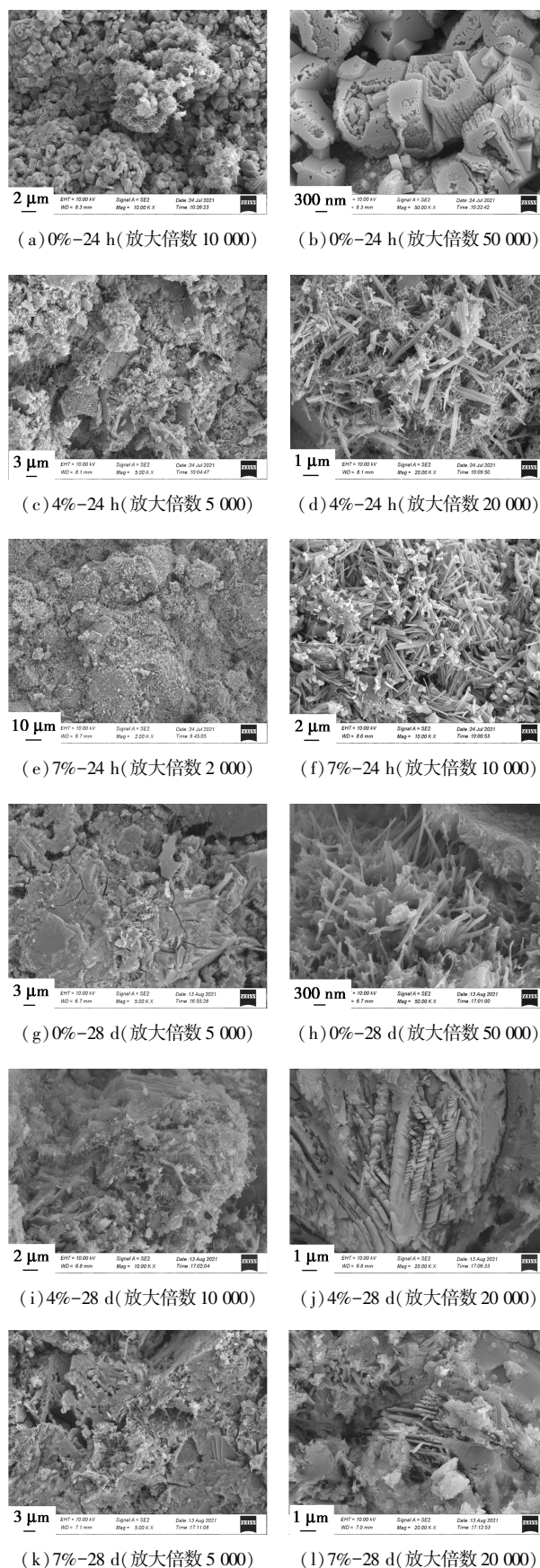


图 2 不同掺量和不同水化时间下水化产物的 SEM 表征

反应进行到 28 d 后,水泥水化作用基本结束。相较于 24 h 下,浆体的形貌发生了巨大的改变。在未加入无碱速凝剂的情况下,还能观察到类似 C—H—S 凝胶物质和长晶须钙矾石。加入无碱速凝剂时,4% 和 7% 的掺量下,水泥浆体形貌已经没有太大的差别。均能观察到大量成熟的片状晶体 AFt 和 AFm,成层状有序的排列,C—H—S 凝胶物质与晶体 AFt 和 AFm 共同存在。

2.3 水泥水化作用概念模型

水化是水泥具有胶凝性本质因素之一,也是保证水泥作为混凝土主要成分的重要保障^[7-9]。参考文献[10-12]并结合本实验中的数据结果,由于水泥熟料相中主要成分为硅酸三钙(C₃S),因此 C₃S 的水化主导着硅酸盐水泥的早期水化。主要历程诱导前期、诱导期、加速期、减速期和稳定期 5 个时期^[13]。水化概念模型如图 3 所示。

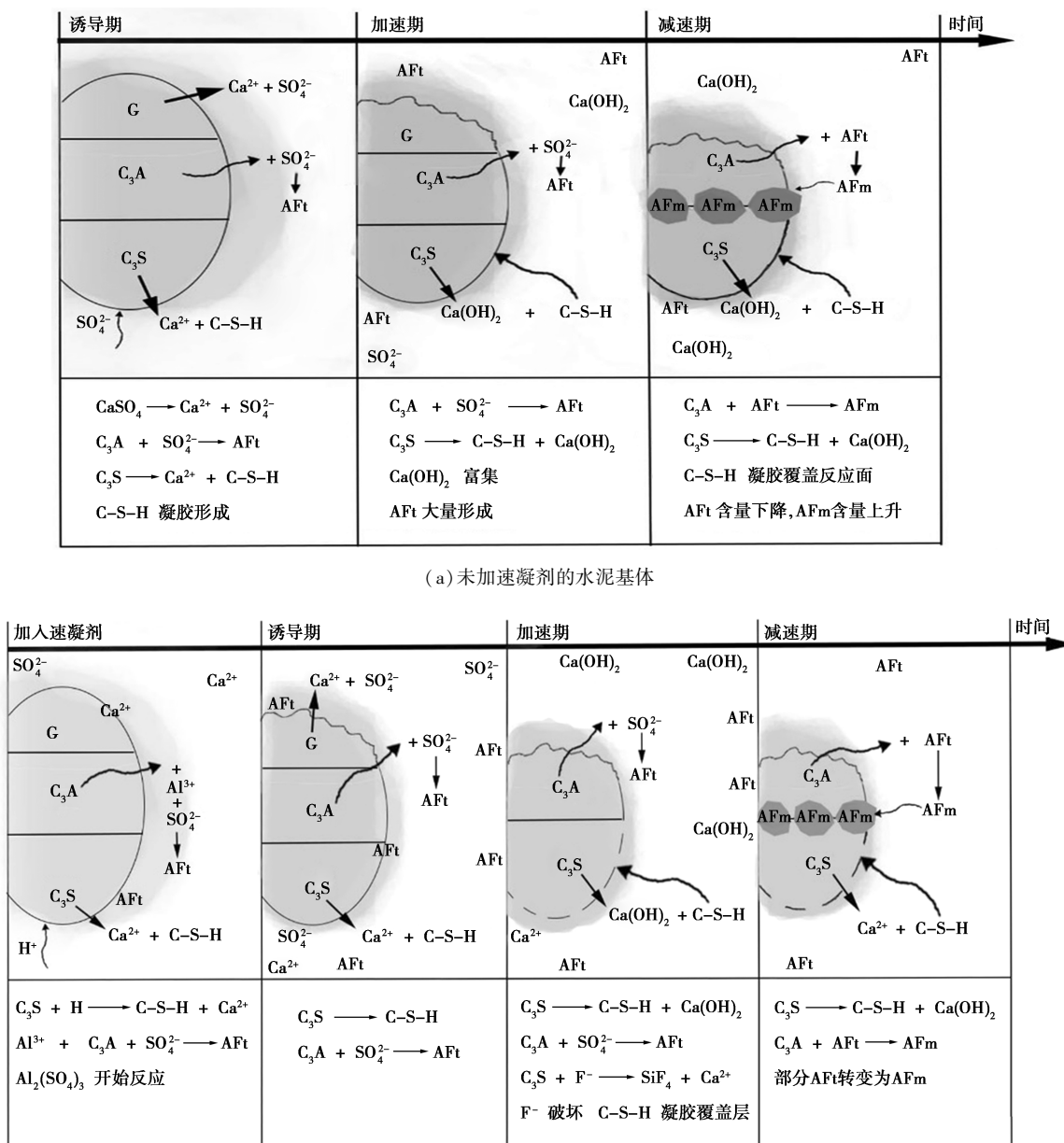


图 3 水化概念模型

由图 3(a) 中可以看出,在无外加硫酸根离子的情况下,硫酸根主要是来源于石膏的溶解。这有利于 C₃A 与硫酸根反应生成钙矾石 AFt。同时,C₃S

水化生成 C—S—H 凝胶。进入加速期,储存的 Ca²⁺ 离子浓度达到饱和,氢氧化钙开始结晶沉淀。C—S—H 凝胶以一种较为松散的形式沿水泥表面生长,

且这种凝胶生成到一定速度后开始减慢。水化后期,在介质中没有硫酸盐的情况下, C_3A 水化过程中会形成 AFm 。

由图 3(b)中可以看出,在加入无碱速凝剂的情况下,由于速凝剂中富含氢离子和硫酸根离子, C_3A 快速水化,促进反应形成主要产物 AFt ,同时钙离子富集在水泥界面处。在加速阶段,由于覆盖作用使反应缺乏空间, $C-S-H$ 的形成可能受到抑制,早期形成的铝酸盐水合物占据了空间,水化受到抑制不能正常进行。但是由于速凝剂中加入了氟离子,与 C_3S 中的硅发生反应生成了 SiF_4 气体溢出,在水泥的表面打开形成孔道和通路,使得表面不被覆盖,水化可以正常进行。水泥水化的化学和物理作用共同存在,含氟无碱速凝剂对水泥基体的机械强度发展有主要的影响。含有无碱速凝剂的水泥基体比未使用速凝剂的基体具有更快的凝结时间,但是在氟离子的存在下,也不利于 1 d 强度的发展,这与表 3 的结论是一致的。

3 结论

(1) 仅使用废硫酸制备硫酸铝型速凝剂的酸解时间长,加入氢氟酸后时间大大减少。 AlF_3 络合物可提高铝元素的质量分数和速凝剂体系稳定性。所制备的速凝剂为合格的无碱速凝剂。

(2) 含氟速凝剂中氟离子的作用是双面的。一方面,氟离子可能破坏 $C-S-H$ 在水泥界面处的覆盖作用,有利于减少水泥凝结时间,起到快速凝结的作用;另一方面,氟元素与硅元素产生 SiF_4 导致形成的 AFt 网络结构产生孔洞,不致密的结构会使水泥基体强度降低,且氟质量分数越高影响越大。因此,氟离子的含量应加以控制。

(3) 在速凝剂制备技术方面提出了用废硫酸制

备硫酸铝型无碱速凝剂的完整过程。根据其制备过程,可以推断用废氢氟酸和硫酸也可制备出符合本实验结论的速凝剂。

参考文献

- [1] 仲津男.缓释型聚羧酸减水剂的合成及性能研究[D].西安:西安理工大学,2015.
- [2] Dinoa T P, Sandberg P J. Alkali-free shotcrete accelerator interactions with cement and admixtures [M]. London: Taylor & Francis Group, 2004: 137-144.
- [3] Xu Q, Stark J. Early hydration of ordinary Portland cement with an alkaline accelerator [J]. Adv Cem Res, 2005, 17: 1-8.
- [4] Taylor, Fw H. Cement chemistry [M]. 2nd ed. London: Thomas Telford, 1997.
- [5] Bati G. Hydration products of C_3A , C_3S and Portland cement in the presence of $CaCO_3$ [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30: 1073-1077.
- [6] Knapen E, Gemert D V. Cement hydration and microstructure formation in the presence of water-soluble polymers [J]. Cement & Concrete Research, 2009, 39(1): 6-13.
- [7] Minard H, Garrault S, Regnaud L, et al. Mechanisms and parameters controlling the tricalcium aluminate reactivity in the presence of gypsum [J]. Cem Conc Res, 2007, 37: 1418-1426.
- [8] Pourchet S, Regnaud L, Perez J P, et al. Early C_3A hydration in the presence of different kinds of calcium sulfate [J]. Cement & Concrete Research, 2009, 39(11): 989-996.
- [9] Juilland P, Gallucci E, Flatt R, et al. Cement and concrete research dissolution theory applied to the induction period in alite hydration [J]. Cem Conc Res, 2010, 40: 831-844.
- [10] Taylor H, Taylor L, Taylor F W, et al. Cement chemistry [J]. Chemistry for Engineers, 1998, 134: 214-237.
- [11] Nicoleau L, Nonat A. A new view on the kinetics of tricalcium silicate hydration [J]. Cement and Concrete Research, 2016, 86: 1-11.
- [12] Bullard J W, Jennings H M, Livingston R A, et al. Mechanisms of cement hydration [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(12): 1208-1223.
- [13] Renan, P, Salvador, et al. Early age hydration of cement pastes with alkaline and alkali-free accelerators for sprayed concrete [J]. Construction & Building Materials, 2016, 111(15): 386-398. ■

巴斯夫 CircleStar™ 催化剂助力生物乙烯生产

巴斯夫推出一种适用于加工处理可再生原料的创新乙醇脱水催化剂 CircleStar™。这种新颖的星形催化剂在乙醇制乙烯(E2E)转化过程中实现了 99.5% 的选择性。与传统工艺相比, CircleStar™ 的操作温度在保持性能不变的情况下降低 25°C 以上,有助于将生物乙烯价值链中从航空燃料到塑料等产品的碳排放减少 10% 以上。

这种创新催化剂的前沿性能是基于其独特的星形形状,可以最大限度地提高催化剂在反应器的活性比表面积。此外,与传统形状的催化剂相比,反应器床层中的堆积密度明显降低,这有助于反应器的整体成本优化。新颖的几何

形状可提供更佳传质,并因有利的操作温度和压降曲线而延长催化剂的使用寿命。

乙醇制乙烯工艺在化工行业向气候中和转型与实现其净零目标方面发挥着根本作用。巴斯夫在乙醇制乙烯催化剂领域拥有超过 25 年的资深经验,并进行专门的催化剂开发和测试。现有的乙烯 99% 为化石基原料,而巴斯夫的乙醇制乙烯催化剂为改变乙烷及其下游价值链成为生物基原料提供了可能性。在这个过程中, CircleStar™ 通过实现低温操作、延长使用寿命和降低催化剂床层的压降,助力进一步减少生物基途径乙烯生产的二氧化碳排放。(李天宇)