

# 矿物掺合料对硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥复合体系凝结时间及强度的影响

丁向群,徐晓婉

(沈阳建筑大学材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 研究硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥复掺后的凝结时间及力学性能. 方法 分别测试不同硅酸盐水泥、矿物掺合料掺量下硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥复合体系的凝结时间及胶砂强度,并利用X射线衍射仪和扫描电子显微镜进行矿物组成和结构分析. 结果 硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥复合体系的凝结时间随硅酸盐水泥掺量的增大先减小再增大,随掺合料掺量的增大先减小再增大. 硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥复合体系的强度随着硅酸盐水泥的增加先减小后增大,硅酸盐水泥掺量为10%时,3 d抗压强度减小10.67%;随着掺合料的增大而降低,掺合料掺量为40%时,矿粉、粉煤灰3 d抗压强度分别减小44.5%和47.9%. 结论 两种水泥复掺会缩短凝结时间,降低强度,水化产物减少,结构疏松;粉煤灰和矿粉的掺入会延长凝结时间,减小强度,水化产物减少.

**关键词** 硅酸盐水泥;硫铝酸盐水泥;掺合料;凝结时间;抗压强度

中图分类号 TU502

文献标志码 A

## Effect of Mineral Admixture on Setting Time and Strength of Portland-Sulphoaluminate Composite Cement

DING Xiangqun, XU Xiaowan

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The paper aims at study the setting time and mechanical properties of portland cement-sulphoaluminate cement composite system. Effect of different addition quantity of the Portland cement and mineral admixture on setting time and strength of portland-Sulphoaluminate composite cement were tested. The mineral composition and microstructure were analyzed by XRD and SEM. The results showed that the setting time of portland cement-sulphoaluminate cement decreased first and then increased with the increase of portland cement content, and then decreased with the increase of the amount of the admixture. The strength of portland cement-sulfur cement decreased first and then increased with the increase of portland cement. When the dosage of portland cement

收稿日期:2017-10-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51678374);沈阳市重点科技研发计划项目(17-209-9-00)

作者简介:丁向群(1970—),男,教授,博士,主要从事水泥混凝土高性能化方面研究.

was 10% ,the 3 d compressive strength decreased by 10. 67% . The 3 d compressive strength decreased with the increase of mineral admixture. When the amount of mineral admixture was 40% the 3d compressive strength of mineral powder and fly ash respectively decreased by 44. 5 % and 47. 9 % . The two kinds of cement mixing will shorten the setting time and reduce the strength ,reduce the hydration products and loosen the structure. The addition of mineral powder and fly ash prolongs the setting time ,reduces the strength and hydration products.

**Key words:** portland cement ;sulfoaluminate cement ;mineral admixture ;setting time ;strength

硅酸盐水泥以硅酸钙为主要组分,是世界上用量最高的水泥品种,其历史悠久,原料易得,价格低廉,性能可靠,因此在工程上广泛应用.但硅酸盐水泥一些明显缺点,也在影响它的使用,比如凝结时间长,初期强度不足以致不能应用于对小时强度有需求的工程<sup>[1]</sup>;体积稳定性较差,易产生干缩现象;耐化学侵蚀的能力弱等,因此水泥材料科学一直致力于改善硅酸盐水泥性能的研究<sup>[2]</sup>.以C<sub>4</sub>A<sub>3</sub> $\bar{S}$ 与C<sub>2</sub>S为主要成分的硫铝酸盐水泥熟料的易烧、易磨性能好,生料易磨性好,因此可以降低综合能耗,具有早期强度高、自由膨胀率低、抗渗抗蚀性能好等特点,但其价格较高,后期强度易倒缩<sup>[3-4]</sup>.所以为了实现硫铝酸盐水泥与硅酸盐水泥性能的互补,研究复合型胶凝材料受到关注.矿物掺合料的掺入,可以废渣利用,降低能耗,减小资源浪费和环境污染,实现可持续发展.所以用矿物掺合料来代替一部分水泥,在经济及技术上都具有重大意义.掺合料种类有很多,但当前在混凝土中使用最普遍的是矿渣和粉煤灰<sup>[5]</sup>.目前,关于硅酸盐水泥与硫铝酸盐水泥复掺的

研究较多<sup>[6-12]</sup>,两种水泥互掺不但可以发挥各自优点,还可以缩短凝结时间.但研究仅限于两种水泥互掺,并未深入探究矿物掺合料对两种水泥复合体系的影响,矿物掺合料的掺加,既可以改善硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥复合体系的性能又可以节约环保降低成本.笔者测试了不同硅酸盐水泥、矿物掺合料掺量下硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥复合体系的凝结时间及胶砂强度,并利用X射线衍射仪和扫描电子显微镜进行了矿物组成和结构分析,研究矿物掺合料对硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥复合体系的净浆凝结时间及胶砂强度的影响.

1 原材料与试验方法

1.1 原材料及仪器

普通硅酸盐水泥:冀东水泥有限公司生产,42.5级普通硅酸盐水泥,化学组成如表1所示.

硫铝酸盐水泥:内蒙古丹峰特种水泥有限公司生产,42.5级硫铝酸盐水泥,化学组成如表1所示.

表1 水泥化学组成及烧失量

Table 1 Cement compositions							%
材料	w(SiO <sub>2</sub> )	w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(CaO)	w(MgO)	w(SO <sub>3</sub> )	烧失量
普通硅酸盐水泥	21.44	5.95	3.05	61.42	3.79	2.12	2.23
硫铝酸盐水泥	10.96	28.93	3.71	45.25	1.45	8.88	0.09

聚羧酸减水剂:聚羧酸系高性能减水剂,减水率37%.

矿粉:比表面积520 m<sup>2</sup>/kg,化学组成如表2所示.

粉煤灰:沈阳红阳热电厂,化学组成如表2所示.

消泡剂:有机硅消泡剂,市售.

砂:普通河沙,细度模数2.6.

表 2 矿粉、粉煤灰化学组成及烧失量

Table 2 Chemical and mineral compositions of mineral powder and fly ash									%
材料	w(SiO <sub>2</sub> )	w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(CaO)	w(MgO)	w(K <sub>2</sub> O)	w(Na <sub>2</sub> O)	w(SO <sub>3</sub> )	烧失量
矿粉	28.15	16.00	1.10	34.54	6.00	0.45	0.46	0.32	2.88
粉煤灰	54.88	26.89	6.49	4.77	1.31	1.05	0.88	1.66	3.10

主要设备:水泥砂浆搅拌机;水泥胶砂震实台;水泥强度试验机;维卡仪;X 射线衍射仪;扫描电镜.

1.2 试验方法

凝结时间:按照《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2011)中水泥净浆的凝结时间测试方法进行.

水泥胶砂强度:按照《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—1999)进行,胶砂质量比为 1:3,试体长宽高为 40 mm×40 mm×160 mm,分别测试其 1 d、3 d 和 28 d 的抗折强度和抗压强度.

X 射线衍射分析:经过标准养护至龄期的试样,在 60 ℃ 的干燥箱内进行干燥,研磨后,利用日本理学 D/MAX—RB 型 X 射线衍射仪分析水化产物.

扫描电子显微镜分析:经过标准养护至龄期的试样,取样,在 60 ℃ 的干燥箱内干燥,利用日立公司生产的扫描电镜 S—4800 观察试样的微观结构.

2 结果与分析

2.1 硅酸盐水泥及掺合料对凝结时间的影响

图 1 为硅酸盐水泥—硫铝酸盐水泥复合体系的凝结时间随硅酸盐水泥掺量增加的变化.由图 1 可见,硅酸盐水泥掺量由 0% 增大到 20% 时,随硅酸盐水泥掺量增大凝结时间减小,而当硅酸盐掺量大于 90% 时,硅酸盐水泥掺量增大,凝结时间延长.这是由于硫铝酸盐水泥碱度低,在硫铝酸盐水泥中掺加硅酸盐水泥会使体系的碱度增大,体系中的 C<sub>4</sub>A<sub>3</sub> $\bar{S}$  水化速率增大,生成的铝胶和 AFt 数

量增多<sup>[13]</sup>,使凝结时间减小;当硅酸盐水泥掺量大于 90% 时,体系中硫铝酸盐水泥含量大幅降低,C<sub>4</sub>A<sub>3</sub> $\bar{S}$  含量降低导致凝结时间延长,100% 硅酸盐水泥时,体系中不含 C<sub>4</sub>A<sub>3</sub> $\bar{S}$ ,因此凝结时间达到最大.

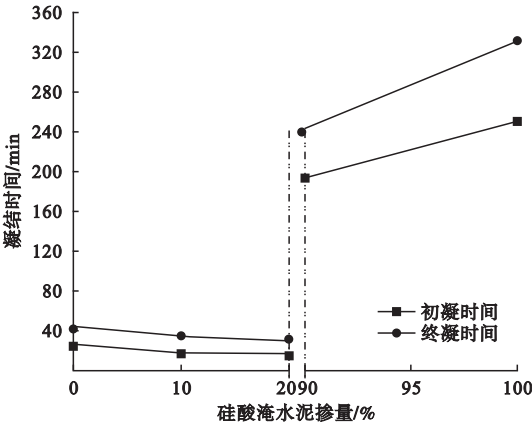


图 1 硅酸盐水泥掺量对体系凝结时间的影响

Fig. 1 Influence of portland cement admixture on setting time

在硅酸盐水泥掺量 10%、硫铝酸盐水泥掺量 90%、聚羧酸减水剂掺量 0.6% 条件下,掺合料的掺量对硅酸盐水泥—硫铝酸盐水泥复合体系凝结时间的影响如图 2 所示.

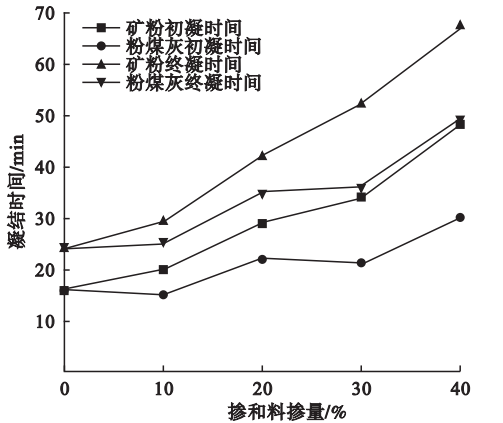


图 2 掺合料掺量对体系凝结时间的影响

Fig. 2 Influence of mineral admixture on setting time

由图2可见,掺合料的掺加会使硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥复合体系的初凝和终凝时间延长,并且随掺合料掺量的增大,净浆凝结时间随之延长,初凝与终凝的时间间隔增大;并且掺加矿粉体系的凝结时间比掺加粉煤灰体系的凝结时间长.掺合料的掺加,替代了部分水泥,使材料中硫铝酸盐水泥的占比减小, $C_4A_3\bar{S}$ 和 $C_2S$ 的数量也减小,水泥水化程度减弱,放热减少,水化产物也减少,不能很好地激发矿粉、粉煤灰的活性,所以凝结时间延长<sup>[14]</sup>;其次是因为掺合料粒径很小,具有填充效应,补充在水泥颗粒间,减小了水分子与水泥的接触,使胶凝材料的水化速度减慢<sup>[15]</sup>,并且随其掺量的增大,减慢效果越显著,使体系的凝结时间延长.掺加矿粉的体系的凝结时间比掺加粉煤灰体系的凝结时间长说明矿粉对体系的早期水化产生抑制作用.

2.2 硅酸盐水泥及掺合料对胶砂强度的影响

图3为硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥复合体系的胶砂强度随硅酸盐水泥掺量增大的变

化.由图可见,硅酸盐水泥掺量由0%增大到20%时,胶砂抗折、抗压强度均随硅酸盐水泥掺量的增大而减小.硅酸盐水泥掺量由90%到100%时,1 d、3 d的胶砂抗折、抗压强度随着硅酸盐水泥掺量的增加而增大,28 d胶砂抗折强度随硅酸盐水泥掺量增加而减小,抗压强度增大;对比硅酸盐水泥掺量为0%~20%的试件,硅酸盐水泥掺量高于90%的试件1 d、3 d抗折、抗压强度降低,28 d抗折、抗压强度提高.这是由于掺少量硅酸盐水泥时,体系水化快,形成的水化产物晶体粗大,因为来不及均匀分散在水泥浆体中,在浆体内部产生了微裂纹,从而形成薄弱点<sup>[16]</sup>,使强度降低;当硅酸盐水泥掺加到90%时,体系中硫铝酸盐水泥含量大幅降低,控制水泥早期水化速率的 $C_4A_3\bar{S}$ 减少,因此1 d、3 d胶砂强度降低,而体系胶砂试件的28 d强度提高,考虑是因为龄期增长,硅酸盐水泥的强度逐渐上升,弥补了硫铝酸盐水泥后期强度发展不良的缺点.

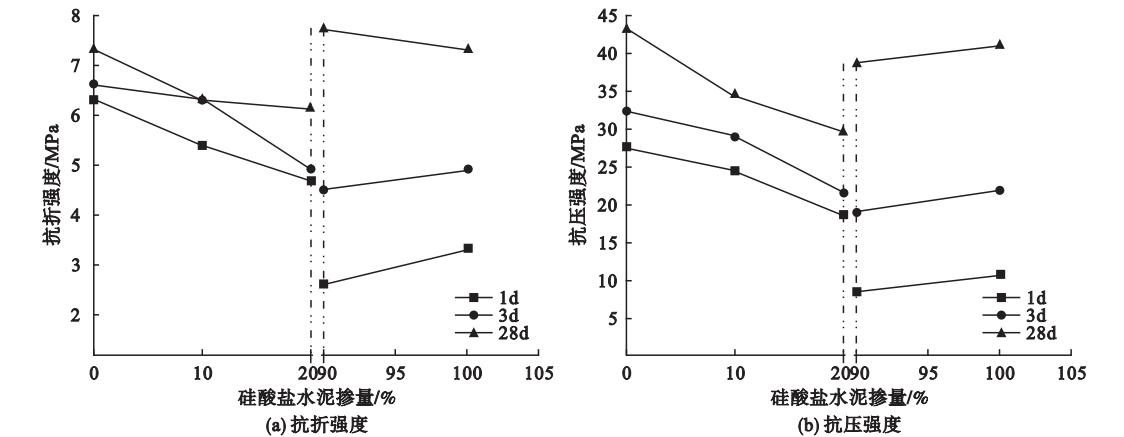


图3 硅酸盐水泥掺量对复合体系强度的影响

Fig. 3 Influence of portland cement admixture on strength of the system

在硅酸盐水泥掺量10%、硫铝酸盐水泥掺量90%、聚羧酸减水剂掺量0.6%、消泡剂掺量0.02%条件下,掺合料对硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥复合体系胶砂强度的影响如图4所示.由图可见,随掺合料掺量的增大,水泥胶砂1 d、3 d和28 d的抗折、抗压强度均降低.掺矿粉的水泥胶砂试件强度大于掺粉

煤灰试件强度.掺合料替代部分水泥使体系中硫铝酸盐水泥和硅酸盐水泥含量减小,体系中主要控制早期水化反应的 $C_4A_3\bar{S}$ 减少,进而使其水化产物减少,所以初期强度降低,同时由于硫铝酸盐水泥是低碱度水泥,掺合料取代后,原本掺量就低的硅酸盐水泥的相对含量也减小,水泥中的矿物成分含量也减

小,石膏与水化产物 CH 也减小,碱度过低使矿物掺合料的活性不能很好地激发<sup>[17]</sup>,因此强度降低.粉煤灰具有火山灰活性是因为硅和铝的氧化物是粉煤灰玻璃体的主要矿物组成,粉煤灰可以与 CH 反应产生 C-S-H 和水化铝酸钙.由 Si、Al、Ca 的氧化物是矿粉玻璃体结构的主要矿物组成,与此同时,其中少

量的硅酸钙和铝酸钙发生水化反应,因此矿粉活性比粉煤灰活性高<sup>[9]</sup>;另外,试验采用的矿粉粒径小于粉煤灰,相比于粉煤灰,矿粉可以更好的填充在水泥颗粒间,使胶砂试件结构更加致密.因此掺矿粉的胶砂试件强度略高于掺粉煤灰试件强度.

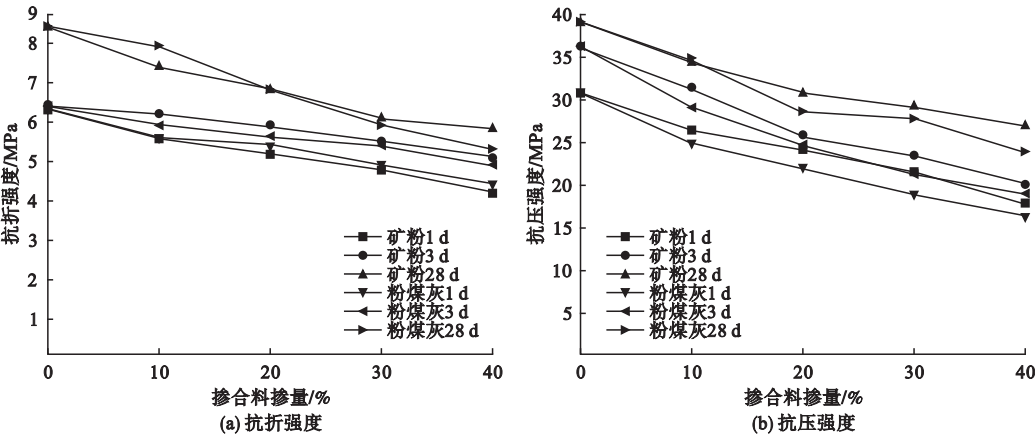


图 4 矿物掺合料掺量对复合体系强度的影响  
Fig. 4 Influence of mineral admixture on strength of the system

2.3 微观分析

2.3.1 XRD 分析

对不同条件下水化 3 d 的试样进行了 XRD 分析(见图 5).由图可知,掺加 10% 硅酸盐水泥的水泥石中水化产物主要含 AFt, 仍有较多未水化的  $C_2S$ 、 $C_3S$ 、 $C_4A_3\bar{S}$ ,说明加水后水泥与水迅速反应产生 AFt.掺加聚羧酸减水剂后水化产物 AFt 衍射峰稍有增强,  $C_2S$ 、 $C_3S$ 、 $C_4A_3\bar{S}$  衍射峰有所减弱,这是由于减水剂的掺加分散了水泥颗粒,使水化更加充分,水化产物增多,强度提高<sup>[18]</sup>.掺加 20% 的矿粉后,在  $18.8^\circ$ 、 $15.76^\circ$  的水化产物 AFt 的衍射峰均稍有减弱,没有水化的  $C_2S$ 、 $C_3S$ 、 $C_4A_3\bar{S}$  衍射峰也降低,是由于矿粉的掺入减小了水泥用量,使水化产物减少<sup>[19]</sup>,强度降低,但衍射峰尖锐,说明结晶情况良好.掺加 20% 粉煤灰后 AFt 衍射峰减弱,  $C_2S$  衍射峰稍有减弱,掺合料替代水泥,使水泥减少,水化产物减少.

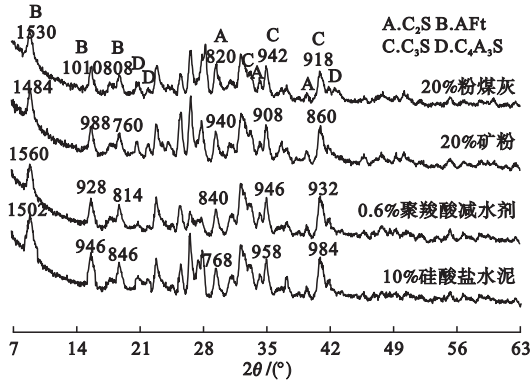


图 5 试样水化 3d 的 XRD 图谱  
Fig. 5 The XRD analysis of specimen at 3d

2.3.2 SEM 分析

水化 3d 试样的 SEM 分析如图 6 所示.水化 3d 的水泥石中,主要为水化硅酸钙凝胶和钙矾石以及未水化的水泥颗粒,这与 XRD 分析的水化产物结果一致.由图 6(a) 可见,水泥石中棒状和针状的 AFt 相互搭接,很多絮状的 C-S-H 凝胶填充其中,结构致密.由图 6(b) 可见,掺入 10% 硅酸盐水泥的水泥石结构疏松,有较多裂纹,且凝胶量相对较



少,可见少量细针状钙矾石。硅酸盐水泥的掺入使水化加速,水化产物瞬间增多,对水泥石产生造成不均匀膨胀,进而产生裂纹,这也从微观方面很好地解释了试验中在硫铝酸盐水泥中掺入硅酸盐水泥会使强度降低的现象。由图 6(c)可见,掺加 0.6% 聚羧酸减水剂的水泥石中有粗棒状 AFt 晶体相互搭接,大量絮状 C-S-H 填充其间,水化产物明显增多,结构较图 6(b)更致密,强度提高。由图 6(d)、(e)可见矿粉和粉煤灰的掺加水泥石中有棒状或柱状 AFt 及絮状 C-S-H 交错相

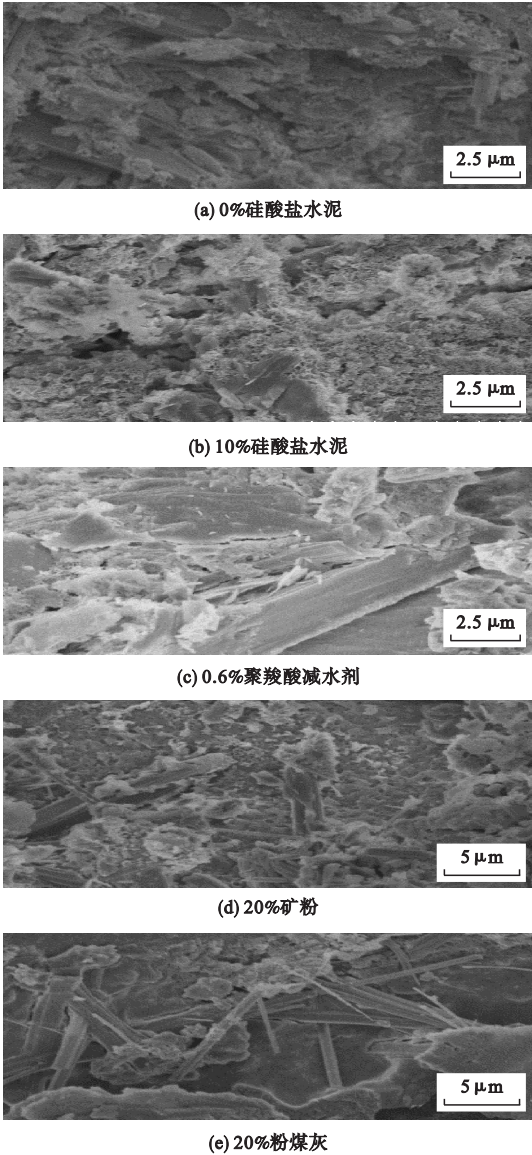


图6 试样水化3d的SEM分析

Fig. 6 The SEM photos of specimen at 3d

生,没有水化的水泥颗粒与矿物掺合料颗粒填充其中,凝胶状的 C-S-H 明显减少。矿物掺合料的掺入,替代了部分水泥,使水泥含量降低,水化产物减少,强度降低<sup>[20]</sup>。由图 6(d)、(e)对比可见掺粉煤灰的试件较多空隙,结构相比掺矿粉试件更加疏松,导致了掺粉煤灰胶砂试件强度小于矿粉。

3 结 论

(1)两种水泥互掺使体系凝结时间缩短,强度降低,并且随硅酸盐水泥掺量的不同呈规律性变化。硅酸盐水泥掺量由 0% 增加到 20%,体系的凝结时间缩短,胶砂强度减小;硅酸盐水泥掺量高于 90% 时,凝结时间延长,胶砂强度增大,此时体系的 28 d 胶砂强度发展良好。

(2)当矿粉、粉煤灰掺量由 0% 增加到 40% 时,硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥复合体系的凝结时间逐渐延长,胶砂强度逐渐降低。掺入粉煤灰试件的凝结时间及强度小于掺矿粉试件。

(3)在纯种水泥中加入另一种水泥,水化加快,水化产物减少,结构疏松;矿物掺合料掺加后,水泥水化 3 d 的产物中 AFt 有所减少,AFt 结晶程度良好,掺矿粉试件较掺粉煤灰试件结构致密。

参考文献

[ 1 ] 吴明霞. 硅酸盐水泥物理指标及其试验方法研究[J]. 科技创新与应用,2012(28):118.  
(WU Mingxia. Study on physical index and test method of portland cement[J]. Scientific and technological innovation and application, 2012(28):118. )

[ 2 ] 钱觉时. 建筑材料科学[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2010.  
(QIAN Jueshi. Architectural materials science [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press,2010. )

[ 3 ] 扶庭阳,罗玉萍,郭保林. 超早强硫铝酸盐水泥胶砂的制备与性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2017,36(2):449-453.  
(FU Tingyang, LUO Yuping, GUO Baolin, Preparation and performance of ultrahigh early strength sulphoaluminate cement mortar[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society,2017,

- 36(2):449-453.)
- [4] PELLETIER L, WINNEFELD F, LOTHEN-BACH B. The ternary system portland cement-calcium sulpoaluminate clinker-anhydrite: hydration mechanism and mortar properties[J]. Cement & concrete composites, 2010, 32(7): 497-507.
  - [5] 简险峰,王栋民,黄天勇,等.普通硅酸盐水泥基矿物掺合料对硫铝酸盐水泥性能的影响[J].硅酸盐通报,2014,33(4):984-987.  
(JIAN Xianfeng, WANG Dongmin, HUANG Tianyong, et al. Effect of silicate cement and mineral admixtures on sulpoaluminate cement[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2014, 33(4): 984-987.)
  - [6] 杨林,严云,胡志华,等.硫铝酸盐水泥与硅酸盐水泥复配性能研究[J].水泥,2012(7):7-10.  
(YANG Lin, YAN Yun, HU Zhihua, et al. Study on the compound properties of sulpoaluminate cement and portland cement[J]. Cement, 2012(7): 7-10.)
  - [7] 李伟,王高明,江芸,等.硅酸盐-硫铝酸盐复合水泥体系物理性能及水化机理研究[J].材料导报,2014,28(24):407-442.  
(LI Wei, WANG Gaoming, JIANG Yun, et al. Research of physical properties and hydration mechanism of silicate-sulpoaluminate cement compound system[J]. Materials review, 2014, 28(24): 407-442.)
  - [8] 于锦,马素花,李伟峰,等.硫铝酸盐对硅酸盐水泥水化及性能的影响[J].混凝土,2016(4):86-90.  
(YU Jin, MA Suhua, LI Weifeng, et al. Influence of sulpoaluminate cement on the hydration properties of portland cement[J]. Concrete, 2016(4): 86-90.)
  - [9] 刘元鹏.外加剂与矿物掺合料对硫铝酸盐水泥水化过程的影响[D].西安:西安建筑科技大学,2016.  
(LIU Yuanpeng. Effect of additives and mineral admixture on hydration process of sulpoaluminate cement pastes[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.)
  - [10] 黄政宇,孙庆丰,周志敏.硅酸盐-硫铝酸盐水泥超轻泡沫混凝土孔结构及性能研究[J].硅酸盐通报,2013,32(9):1894-1899.  
(HUANG Zhengyu, SUN Qingfeng, ZHOU Zhimin. Study on pore structure and properties of ultra-light foam concrete made with opc-sac mixture[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2013, 32(9): 1894-1899.)
  - [11] 杨志强.硅酸盐水泥熟料改性硫铝酸盐水泥性能[D].重庆:重庆大学,2016.  
(YANG Zhiqiang. Properties of sulpoaluminate cement modified by portland cement clinker[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.)
  - [12] LIU Xiaocun, LI Baoliang, QI Tao, et al. Effect of  $\text{TiO}_2$  on mineral formation and properties of alite-sulpoaluminate cement[J]. Materials research innovations, 2009, 13(2): 92-97.
  - [13] 聂光临,孙诗兵,姚晓丹,等.普通硅酸盐水泥与快硬硫铝酸盐水泥复配砂浆性能研究[J].混凝土与水泥制品,2014(3):11-12.  
(NIE Guanglin, SUN Shibing, YAO Xiaodan, et al. Performance research on mortar with ordinary Portland cement mixed with rapid hardening sulpoaluminate cement[J]. China concrete and cement products, 2014(3): 11-12.)
  - [14] GARCÍA-MATÉ M, DE LA TORRE A G, LEÓN-REINA L, et al. Hydration studies of calcium sulfoaluminate cements blended with fly ash[J]. Cement & concrete research, 2013(54):12-20.
  - [15] 蒋卓,雷学文,廖宜顺,等.粉煤灰对硫铝酸盐水泥水化历程的影响[J].硅酸盐通报,2016,35(12):4088-4103.  
(JIANG Zhuo, LEI Xuewen, LIAO Yishun, et al. Influence of sulpoaluminate cement on the hydration and performance of portland cement[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2016, 35(12): 4088-4103.)
  - [16] 李沛然.硅酸盐-硫铝酸盐复合胶凝材料的低温水化与微观特征[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.  
(LI Peiran. Hydration and micro performance of ordinary portland cement blending with calcium sulfoaluminate cement at low temperature[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.)
  - [17] 马保国,韩磊,朱艳超,等.掺合料对硫铝酸盐水泥性能的影响[J].新型建筑材料,2014,41(9):20.  
(MA Baoguo, HAN Lei, ZHU Yanchao, et al. Impact of mineral admixture on the performance of sulphate aluminum cement[J]. New building materials, 2014, 41(9): 20.)
  - [18] 孙长征,张晓平,郭志刚.减水剂及保水剂对超早强灌浆料性能影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2015,31(2):286-294.  
(SUN Changzheng, ZHANG Xiaoping, GUO Zhigang. Effects of water reducing agent and retaining agent on performances of super early strength grouting material[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(2): 286-294.)
  - [19] 方永浩,朱琦,岑奕侃.大掺量超细矿渣粉水泥基胶凝材料的性能与结构及磷石膏的影响[J].硅酸盐学报,2008,36(4):447.  
(FANG Yonghao, ZHU Qi, CEN Yikan. Properties and structure of high volume superfine blast furnace slag power cementing materials and the effect of phosphorous gypsum addition[J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2008, 36(4): 447.)
  - [20] ISMAIL I, BERNAL S A, PROVIS J L, et al. Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash[J]. Cement and concrete composites, 2014, 45(1):125-135.