

文章编号:1007-9629(2024)09-0789-07

DEIPA 和 C-S-H-PCEs 复掺对水泥-粉煤灰体系 早期性能的影响

刘 驰^{1,2}, 郭君渊^{1,2}, 杨晓杰^{1,2}, 陈雪婷^{1,2}, 李好新^{1,2,*}

(1. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804;
2. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要:为提高水泥-粉煤灰体系的早期性能,将二乙醇-单异丙醇胺(DEIPA)和水化硅酸钙晶核(C-S-H-PCEs)这 2 种早强剂进行复掺,研究其对水泥-粉煤灰体系凝结时间、流动度和抗压强度的影响规律,同时结合 X 射线衍射仪(XRD)、热重-差示扫描量热(TG-DSC)分析和扫描电镜(SEM)探讨其作用机理.结果表明:DEIPA 和 C-S-H-PCEs 复掺可缩短水泥-粉煤灰净浆的凝结时间,增加其流动度,提高砂浆抗压强度;0.03% DEIPA 和 2.00% C-S-H-PCEs 复掺效果最优,净浆流动度增加 217.5 mm,初凝和终凝时间分别缩短 120、127 min,砂浆 1、3 d 抗压强度分别提高 6.6、6.1 MPa.

关键词:水泥-粉煤灰体系;二乙醇-单异丙醇胺;水化硅酸钙晶核;早强剂;早期强度

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.09.003

Effects of DEIPA and C-S-H-PCEs on Early Properties of Cement-Fly Ash Systems

LIU Chi^{1,2}, GUO Junyuan^{1,2}, YANG Xiaojie^{1,2}, CHEN Xueting^{1,2}, LI Haoxin^{1,2,*}

(1. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to improve the early performance of cement-fly ash system, the effects of diethanol-monoisopropanolamine (DEIPA) and calcium silicate hydrate crystal nucleus (C-S-H-PCEs) on the setting time, fluidity and compressive strength of the system were studied. X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric-differential scanning calorimetry (TG-DSC) and scanning electron microscopy (SEM) were used to investigate the mechanism of the two early strengthening agents. The results show that the combination of the two early strengthening agents can shorten the setting time, increase the fluidity and enhance the compressive strength. The combined effect of 0.03% DEIPA and 2.00% C-S-H-PCEs is the best, the fluidity increases by 217.5 mm, the initial and final setting time decreases by 120, 127 min, respectively, and the compressive strength increases by 6.6, 6.1 MPa at 1, 3 d, respectively.

Key words: cement-fly ash system; diethanol-monoisopropanolamine; calcium silicate hydrate crystal nucleus; early strengthening agent; early strength

2020 年度中国建筑材料工业碳排放报告显示,水泥工业 CO₂ 排放量高达 12.3 亿 t, 约占建材行业 CO₂ 总排放量的 83%^[1]. 工业废弃物作为辅助胶凝材

料 (SCM) 可减少水泥熟料用量, 降低水泥 CO₂ 排放^[2]. 矿粉和粉煤灰作为 SCM 在水泥中广泛应用^[3], 但通常情况下, 两者活性较低, 导致水泥-矿粉/粉煤

收稿日期:2023-11-20;修订日期:2024-01-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578412,51878479,52078372,52108239)

第一作者:刘 驰(1999—),女,四川德阳人,同济大学硕士生.E-mail:2130599@tongji.edu.cn

通讯作者:李好新(1978—),男,甘肃静宁人,同济大学研究员,博士生导师,博士.E-mail:lhx10034@tongji.edu.cn

灰体系早期强度发展缓慢.激发矿粉、粉煤灰活性是一种比较有效的提高水泥-矿粉/粉煤灰体系早期强度的方法.Fank等^[4]通过添加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (CH)和可溶性钙盐,使水泥-矿渣体系28 d强度从36 MPa提高至53 MPa,但 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的添加增加了硬化浆体中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量,导致在服役过程中更易遭受硫酸盐的侵蚀,增加膨胀开裂风险.氯盐^[5]、硫酸盐^[6]和硝酸盐^[7]等传统早强剂虽可促进水泥早期强度发展,但通常收效甚微.此外,氯盐的使用还会导致钢筋锈蚀.水化硅酸钙(C-S-H)凝胶是水泥水化的主要产物,对水泥的早期强度和耐久性至关重要^[8].水化硅酸钙晶核(C-S-H-PCEs)能促进水泥中硅酸盐相水化,加速C-S-H凝胶生成,提高水泥早期强度,且不会影响水泥后期强度^[9-10].除硅酸盐相外,水泥-矿粉/粉煤灰体系中还有铝酸盐.已有研究表明,二乙醇-单异丙醇胺(DEIPA)可络合金属离子,促进水泥中铝酸盐相和铁铝酸盐相水化,加速水化产物的形成^[11].与矿粉相比,水泥-粉煤灰体系强度发展更加缓慢^[12],该问题一直未得到较好解决^[13-15].为此,本文以DEIPA和C-S-H-PCEs为复合早强剂,研究两者复掺对水泥-粉煤灰体系早期性能的改善效果,以期为提高水泥-粉煤灰体系早期性能提供基础数据.

1 试验

1.1 原材料

水泥采用抚顺水泥股份有限公司产P·I 42.5基准水泥,比表面积为 $357.5 \text{ m}^2/\text{kg}$,密度为 $3.1 \text{ g}/\text{cm}^3$;粉煤灰(FA)选用自燃煤电厂I级粉煤灰,粒径主要分布在 $0.5\sim 110 \mu\text{m}$,密度为 $2.6 \text{ g}/\text{cm}^3$;砂为ISO标准砂;拌和水为实验室自来水.采用X射线荧光分析对水泥和粉煤灰的化学组成(文中涉及的组成、水灰比等均为质量分数或质量比)进行表征,结果见表1.

表1 水泥和粉煤灰的化学组成

Table 1 Chemical compositions (by mass) of cement and fly ash
Unit: %

Material	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Other
Cement	21.1	4.4	3.2	63.4	2.9	0.6	4.4
Fly ash	43.0	23.0	2.5	5.6	1.0	0.8	24.1

醇胺类早强剂二乙醇-异丙醇胺(DEIPA)来自优索化工科技有限公司,试剂级,有效含量为85%,结构式如图1所示.水化硅酸钙晶核(C-S-H-PCEs)来自上海三瑞高分子材料股份有限公司,粒径主要

分布在 $75\sim 190 \text{ nm}$,固含量为20%,其中聚羧酸含量为10%.图2为C-S-H-PCEs的透射电镜(TEM)照片.需要说明的是,试验中的DEIPA和C-S-H-PCEs掺量均为固含量.

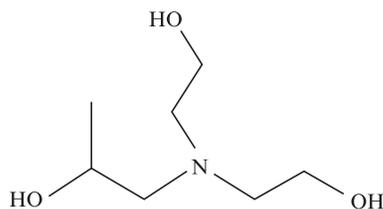


图1 DEIPA的结构式

Fig. 1 Structural formula of DEIPA

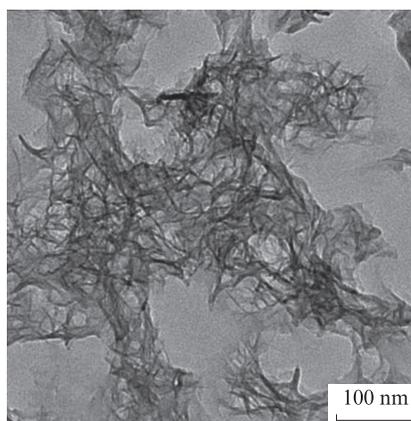


图2 C-S-H-PCEs的TEM照片

Fig. 2 TEM image of C-S-H-PCEs

1.2 试验配合比

为探究DEIPA和C-S-H-PCEs复掺对水泥-粉煤灰体系早期性能的影响,设计了试验配合比,如表2所示.本研究水泥与粉煤灰的质量比为7:3,水灰比为0.5,胶砂比为1:3.

1.3 样品测试及表征

根据GB/T 8077—2012《混凝土外加剂均质性试验方法》测定净浆流动性;根据GB/T 17671—2021《水泥砂浆强度检验方法(ISO法)》测定砂浆强度;根据GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》测定净浆凝结时间.采用Rigaku Ultima IV X射线衍射仪(XRD)表征水化试样的物相组成,其中靶材为Cu,扫描速率为 $10 (^{\circ})/\text{min}$,扫描范围为 $10^{\circ}\sim 70^{\circ}$;采用日本HITACHI STA200型同步热分析仪(温度范围为室温 $\sim 1000^{\circ}\text{C}$;测试气体为氮气)对水化产物进行热重-差示扫描量热(TG-DSC)分析;采用日本HITACHI S-2360N型扫描电镜(SEM)进行微观形貌观察.

表 2 试验配合比
Table 2 Mix proportions of test

Sample	w (DEIPA)/%	w(C-S-H- PCEs)/%	Cement/ g	FA/ g	Water/ g	Sand/ g	Sample	w (DEIPA)/%	w(C-S-H- PCEs)/%	Cement/ g	FA/ g	Water/ g	Sand/ g
A0	0	0	315	135	225	1 350	A5	0.02	1.00	315	135	225	1 350
A1	0.01	0.50	315	135	225	1 350	A6	0.02	2.00	315	135	225	1 350
A2	0.01	1.00	315	135	225	1 350	A7	0.03	0.50	315	135	225	1 350
A3	0.01	2.00	315	135	225	1 350	A8	0.03	1.00	315	135	225	1 350
A4	0.02	0.50	315	135	225	1 350	A9	0.03	2.00	315	135	225	1 350

2 结果与讨论

2.1 流动度

不同DEIPA和C-S-H-PCEs掺量下水泥-粉煤灰净浆的流动度如图3所示。由图3可见:随着DEIPA和C-S-H-PCEs掺量的增加,净浆流动度逐渐增大,复掺0.03%DEIPA和2.00%C-S-H-PCEs后,净浆流动度达到最大值299.0 mm,较空白组试样A0增加217.5 mm;试样A2的流动度较试样A1增加83.0 mm,试样A9流动度较A6增加27.5 mm,表明DEIPA和C-S-H-PCEs均对水泥-粉煤灰净浆流动度具有增大效果。这是因为PCE的羧基能吸附在水泥颗粒表面,并且其长侧链在水泥颗粒之间形成了空间位阻效应^[16];同时DEIPA可以增大水泥颗粒间的内阻^[17]。在二者共同作用下,水泥颗粒的分散得以促进,增大了净浆流动度。总体而言,DEIPA和C-S-H-PCEs复掺能够显著提高水泥-粉煤灰体系的流动度。

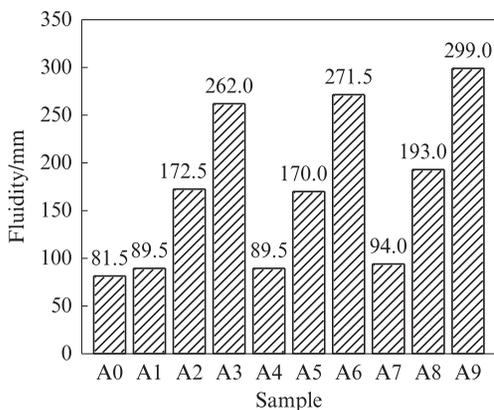


图3 不同DEIPA和C-S-H-PCEs掺量下水泥-粉煤灰净浆的流动度

Fig. 3 Fluidity of cement-fly ash slurry under different use levels of DEIPA and C-S-H-PCEs

2.2 凝结时间

不同DEIPA和C-S-H-PCEs掺量下水泥-粉煤灰净浆的凝结时间如图4所示。由图4可见,随着

DEIPA和C-S-H-PCEs掺量的增加,净浆凝结时间呈缩短趋势,复掺0.03%DEIPA和2.00%C-S-H-PCEs后,净浆的凝结时间最短,初凝和终凝时间分别为103、183 min,较空白组缩短120、127 min。这是因为,一方面C-S-H-PCEs提供了水泥-粉煤灰体系水化反应的成核位点,降低了成核能垒^[18-19],缩短了成核时间,形成了更多的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶,从而加速了浆体的凝结;另一方面由于DEIPA通过络合Al³⁺促进了水泥中铝酸三钙(C₃A)的水化,加速了钙矾石(Aft)的生成,也促进了浆体的凝结^[20]。

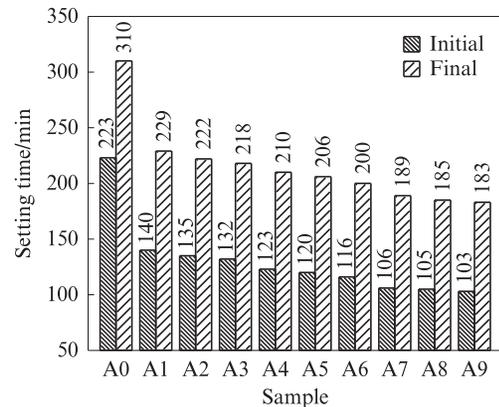


图4 不同DEIPA和C-S-H-PCEs掺量下水泥-粉煤灰净浆的凝结时间

Fig. 4 Setting time of cement-fly ash slurry under different use levels of DEIPA and C-S-H-PCEs

2.3 力学性能

不同DEIPA和C-S-H-PCEs掺量下水泥-粉煤灰砂浆的抗压强度如图5所示。由图5可见:(1)随着DEIPA和C-S-H-PCEs掺量的增加,水泥-粉煤灰砂浆1、3 d抗压强度显著提高,复掺0.03%DEIPA和2.00%C-S-H-PCEs后,水泥-粉煤灰砂浆1、3 d抗压强度达到最大值16.8、23.8 MPa,较空白组提高6.6、6.1 MPa。(2)28 d龄期时,掺入DEIPA和C-S-H-PCEs的砂浆抗压强度与空白组基本持平。复掺DEIPA和C-S-H-PCEs提高水泥-粉煤灰早期强度可能是:

C-S-H-PCEs为C-S-H凝胶提供了成核位点,缩短了C-S-H凝胶的成核诱导期,加速了C-S-H凝胶的形成^[18];DEIPA能够络合 Al^{3+} 和 Fe^{3+} ,加速铝酸盐相和

铁铝酸盐相的水化,生成更多的水化产物^[11].综上所述,DEIPA和C-S-H-PCEs复掺能显著提高水泥-粉煤灰的早期强度,且不会对后期强度产生不利影响.

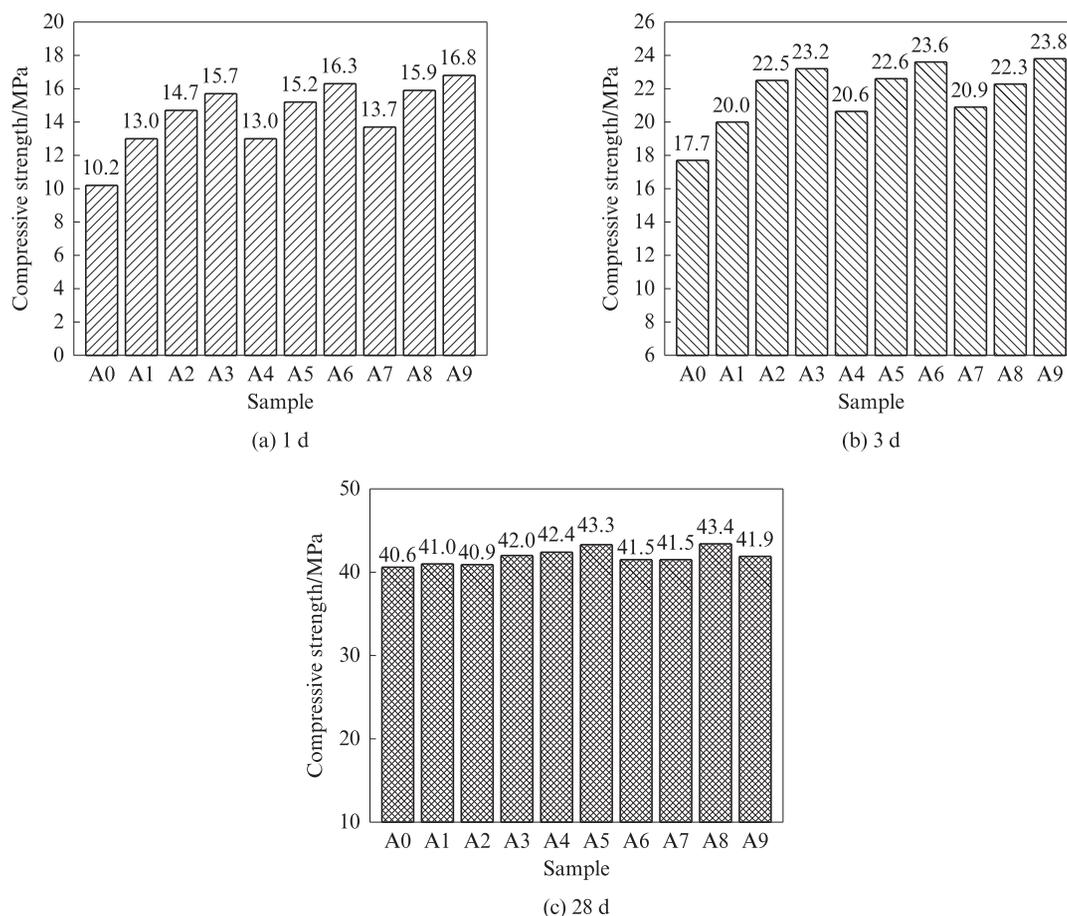


图5 不同DEIPA和C-S-H-PCEs掺量下水泥-粉煤灰砂浆的抗压强度
Fig. 5 Compressive strength of cement-fly ash mortar under different use levels of DEIPA and C-S-H-PCEs

2.4 水化产物物相分析

为探究DEIPA和C-S-H-PCEs复掺对水泥-粉煤灰体系水化产物的影响,采用XRD对掺入DEIPA和C-S-H-PCEs的水泥-粉煤灰净浆进行物相分析,1d龄期净浆的XRD图谱如图6所示.由图6可见:(1)净浆水化1d后主要物相为 $Ca(OH)_2$ (CH)、方解石、硅酸二钙(C_2S)和硅酸三钙(C_3S)等.其中方解石可能是试样制备过程中 $Ca(OH)_2$ 碳化所产生的物相, C_2S 、 C_3S 是未反应完的水泥熟料.(2)复掺DEIPA和C-S-H-PCEs能够显著提高 $Ca(OH)_2$ 衍射峰(34°)的峰强,同时降低 C_2S 和 C_3S 特征峰(33° 和 41°)的峰强,表明DEIPA和C-S-H-PCEs复合早强剂可促进水泥-粉煤灰体系中 C_2S 和 C_3S 的水化,加速 $Ca(OH)_2$ 的形成.(3)对比试样A1与A2后发现,在DEIPA掺量不变的前提下,当C-S-H-PCEs掺量由0.50%增至1.00%时, $Ca(OH)_2$ 及未水化的 C_3S 、 C_2S 的峰强均有所降低.结合抗压强度试验结果可知,以上现象可能

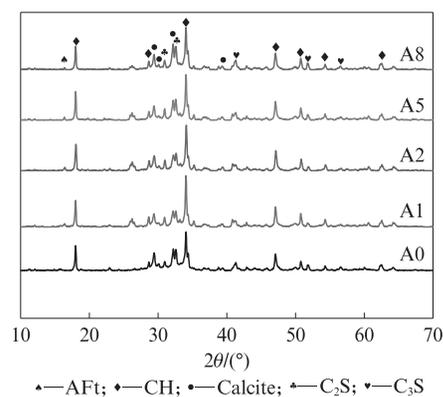


图6 不同DEIPA和C-S-H-PCEs掺量下1d龄期水泥-粉煤灰净浆的XRD图谱

Fig. 6 XRD patterns of cement-fly ash slurry cured for 1 d under different use level of DEIPA and C-S-H-PCEs

是粉煤灰发生了二次水化反应,消耗了 $Ca(OH)_2$,生成了C-S-H凝胶和水化硅铝酸钙(C-A-S-H)凝胶^[21].(4)对比试样A2、A5和A8后发现,在C-S-H-PCEs

掺量不变的前提下,随着DEIPA掺量的增加,C₃S和C₂S的峰强变化并不明显,这可能是DEIPA虽然加速了C₃A的水化,促进了AFt的形成,但生成的AFt覆盖在C₃S和C₂S表面,从而影响了C₃S和C₂S的水化^[22].综上所述,DEIPA和C-S-H-PCEs复合早强剂不仅可以促进水泥熟料的水化,还能促进粉煤灰的二次水化.

2.5 TG-DSC分析

不同DEIPA和C-S-H-PCEs掺量下1d龄期水泥-粉煤灰净浆的TG-DSC曲线如图7所示.由图7可见:(1)水泥-粉煤灰净浆TG-DSC曲线存在3个失重区间,其中50~180℃区间的失重峰是AFt和C-S-H凝胶脱水所致;380~470℃区间的失重峰为Ca(OH)₂热分解产生的质量损失;510~710℃区间的失重峰为碳酸盐热分解损失所致^[21].(2)对比试样A0与A1、A2可知,随着DEIPA和C-S-H-PCEs掺量的增加,380~470℃区间的失重有所增大,说明C-S-H凝胶和Ca(OH)₂生成量增加,可能是DEIPA和C-S-H-PCEs促进了水泥-粉煤灰体系的水化.

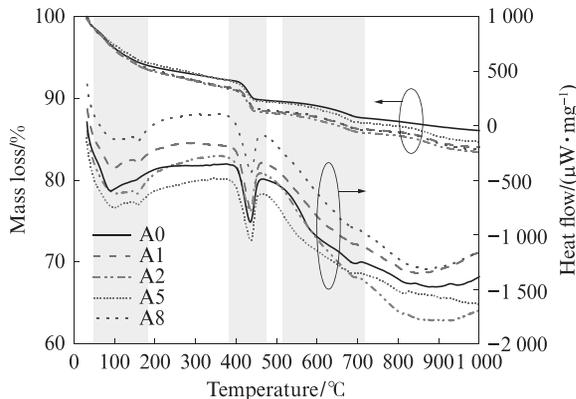


图7 不同DEIPA和C-S-H-PCEs掺量下1d龄期水泥-粉煤灰净浆的TG-DSC曲线

Fig. 7 TG-DSC curves of cement-fly ash slurry cured for 1 d under different use levels of DEIPA and C-S-H-PCEs

水泥浆体中Ca(OH)₂的含量通常反映水泥的水化程度.根据式(1)^[21]及TG-DSC试验结果,计算水泥-粉煤灰净浆中Ca(OH)₂的含量,结果如表3所示.由表3可见,随着DEIPA和C-S-H-PCEs总掺量的增加,水泥-粉煤灰净浆中Ca(OH)₂的含量呈先增后减趋势.这可能是一方面C-S-H-PCEs提供了成核位点,促进了硅酸盐相的水化,产生了更多的Ca(OH)₂,DEIPA能够促进铝酸盐相的水化,使水化产物的生成量增加;另一方面,水化产物中Ca(OH)₂参与了粉煤灰的二次水化,形成了水化产物,导致Ca(OH)₂含量降低^[23].结合抗压强度结果分析可知:DEIPA和

C-S-H-PCEs掺量越大,水泥-粉煤灰体系早期水化程度越高,越有利于早期强度的发展.

$$w(\text{Ca}(\text{OH})_2) = \left[\frac{M(\text{Ca}(\text{OH})_2)}{M(\text{H}_2\text{O})} \times w(\text{H}_2\text{O}) + \frac{M(\text{Ca}(\text{OH})_2)}{M(\text{CO}_2)} \times w(\text{CO}_2) \right] \times 100\% \quad (1)$$

式中: $w(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ 为Ca(OH)₂的含量,%; $w(\text{H}_2\text{O})$ 为Ca(OH)₂损失水的质量分数,%; $w(\text{CO}_2)$ 为CaCO₃的热损失质量分数,%; $M(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ 为Ca(OH)₂的摩尔质量,g/mol; $M(\text{H}_2\text{O})$ 为Ca(OH)₂损失水的摩尔质量,g/mol; $M(\text{CO}_2)$ 为CO₂的摩尔质量,g/mol.

表3 1d水泥-粉煤灰净浆中Ca(OH)₂的含量
Table 3 Content (by mass) of Ca(OH)₂ in cement-fly ash slurry cured for 1 d

Unit: %				
A0	A1	A2	A5	A8
11.5	15.4	15.9	14.7	14.9

2.6 SEM分析

1d龄期水泥-粉煤灰净浆试样A0、A1和A8的SEM照片如图8所示.由图8可见:(1)在空白试样A0中能观察到表面光滑的粉煤灰球体和杂乱分布的针状AFt.(2)掺入DEIPA和C-S-H-PCEs后,粉煤灰球体表面附着C-S-H和C-A-S-H凝胶,空间分布大量棒状AFt,并且片状的Ca(OH)₂数量明显较空白组多,这可能因为DEIPA和C-S-H-PCEs能够促进水泥熟料水化,增加水化产物,促进粉煤灰发生二次水化形成凝胶,所以掺入DEIPA和C-S-H-PCEs后水泥-粉煤灰硬化浆体中水化产物增加.上述研究表明,DEIPA和C-S-H-PCEs复掺可促进水泥-粉煤灰体系在早龄期生成更多的水化产物.

2.7 机理分析

水泥-粉煤灰体系的水化是一个非常复杂的过程,包括水泥熟料的水化与粉煤灰的二次水化.水泥熟料的水化主要为硅酸盐相和铝酸盐相的水化.粉煤灰的二次水化主要是其中活性SiO₂、Al₂O₃与Ca(OH)₂反应生成C-S-H凝胶、C-A-S-H凝胶、AFt和单硫型硫铝酸钙(AFm)等^[24].在水泥-粉煤灰体系中掺入DEIPA和C-S-H-PCEs可促进以上水化过程.图9展示了DEIPA和C-S-H-PCEs促进水泥-粉煤灰体系水化的机理.这种促进作用可能是C-S-H-PCEs中的C-S-H晶核与C-S-H凝胶具有相似结构,使C-S-H-PCEs能够作为C-S-H凝胶的前驱体,并提供成核位点,促进C-S-H凝胶的成核和生长

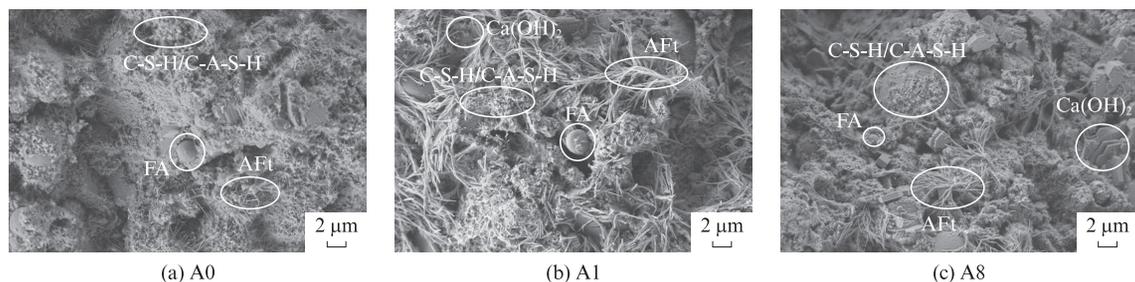


图8 1d龄期水泥-粉煤灰净浆试样A0、A1和A8的SEM照片

Fig. 8 SEM images of cement-fly ash slurry samples A0, A1 and A8 cured for 1d

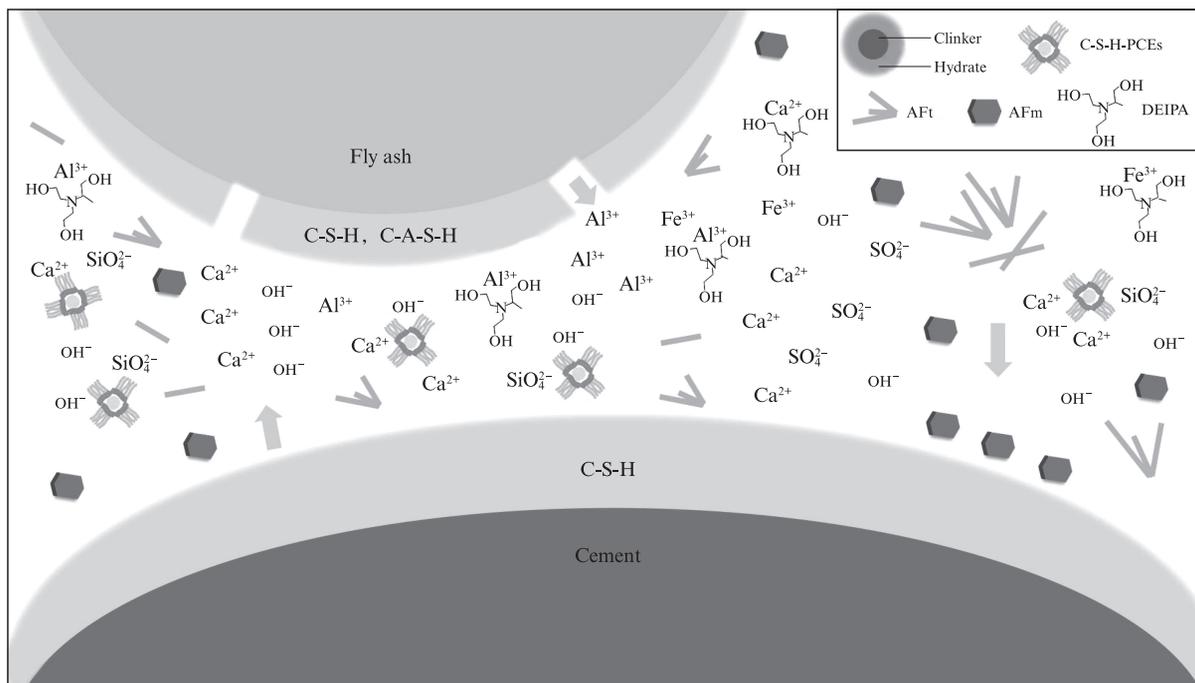


图9 DEIPA和C-S-H-PCEs促进水泥-粉煤灰体系水化过程的机理

Fig. 9 Mechanism of promotion of cement-fly ash hydration process by addition of DEIPA and C-S-H-PCEs

过程^[18];DEIPA则能络合 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 等金属离子,这有助于铝酸盐相的水化,从而生成更多的水化产物^[11].同时,在DEIPA和C-S-H-PCEs对水泥熟料的水化加速作用下, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量增加,从而为粉煤灰的二次水化提供了更多的碱性物质,激发了粉煤灰的潜在活性^[25].因此DEIPA和C-S-H-PCEs这2种早强剂复掺能够促进水泥熟料的水化和粉煤灰的二次水化,加速水化产物的形成,从而改善水泥-粉煤灰体系的早期性能.

3 结论

(1)DEIPA和C-S-H-PCEs复掺可显著改善水泥-粉煤灰净浆的流动度,缩短其凝结时间.复掺0.03% DEIPA和2.00% C-S-H-PCEs后,水泥-粉煤灰净浆流动度达到最大值299.0 mm,较空白组增大217.5 mm;且净浆凝结时间明显缩短,初凝和终凝时间分别为103、183 min,较空白组缩短120、127 min.

(2)复掺DEIPA和C-S-H-PCEs可提高水泥-粉煤灰砂浆的早期强度,复掺0.03% DEIPA和2.00% C-S-H-PCEs后,水泥-粉煤灰砂浆的1、3d抗压强度达到最大值16.8、23.8 MPa,较空白组提高6.6、6.1 MPa.

(3)DEIPA和C-S-H-PCEs复掺能够促进水泥熟料的水化和粉煤灰的二次水化,改善水泥-粉煤灰体系的早期性能,且在本文研究范围内,随着DEIPA和C-S-H-PCEs掺量的增加,水泥-粉煤灰体系的早期性能改善愈加显著.

参考文献:

- [1] 中国建筑材料研究会. 中国建筑材料工业碳排放报告(2020年度)[J]. 石材, 2021(5):3-5, 54.
China Building Materials Research Association. Carbon emission report of China's building materials industry (2020)[J]. Stone, 2021(5):3-5, 54. (in Chinese)
- [2] 金宇, 冯伟鹏, 董志君, 等. 辅助胶凝材料玻璃体结构与胶凝

- 活性的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(3):3016-3020.
- JIN Yu, FENG Weipeng, DONG Zhijun, et al. Research progress on vitreous structure and gelling activity of auxiliary cementitious materials[J]. Materials Reports, 2021, 35(3): 3016-3020. (in Chinese)
- [3] LIU T, GONG C, DUAN L C, et al. Effects of sodium citrate on compressive strength and microstructure of NaOH-activated fly ash/slag cement exposed to high temperature[J]. Construction and Building Materials, 2023, 363:129852.
- [4] FANK B, JOCHEN S. Activation of blast furnace slag by a new method[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(8): 644-650.
- [5] 张小伟, 肖瑞敏, 张雄. 粉煤灰矿粉水泥胶凝体系的高效复合早强剂研制[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(2):249-254.
- ZHANG Xiaowei, XIAO Ruimin, ZHANG Xiong. Development of efficient composite early strength agent for pulverized cement system of fly ash ore[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(2):249-254. (in Chinese)
- [6] ZOU D J, ZHANG M, QIN S S, et al. Calcium leaching from cement hydrates exposed to sodium sulfate solutions [J]. Construction and Building Materials, 2022, 351:128975.
- [7] ZHANG L, MENG F J, SONG W, et al. Enhanced selective removal of phosphate in the presence of high-strength nitrate using straw-based anion imprinted biosorbent [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10:108060.
- [8] XU C, LI H X, YANG X J, et al. Action of the combined presence of C-S-Hs-PCE and triethanolamine on the performances of cement paste/mortar [J]. Construction and Building Materials, 2021, 269:121345.
- [9] LI H X, XIANG Y H, XU C. Effect of C-S-H seed/PCE nanocomposites and triisopropanolamine on Portland cement properties: Hydration kinetic and strength[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 57:104946.
- [10] ZHANG J L, WANG Z M, YAO Y H, et al. The effect and mechanism of C-S-H-PCE nanocomposites on the early strength of mortar under different water-to-cement ratio[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44:103360.
- [11] XU Z Q, LI W F, SUN J F, et al. Research on cement hydration and hardening with different alkanolamines[J]. Construction and Building Materials, 2017, 141:296-306.
- [12] 李响, 阿茹罕, 阎培渝. 水泥-粉煤灰复合胶凝材料水化程度的研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(5):584-588.
- LI Xiang, A Ruhan, YAN Peiyu. Study on hydration degree of cement-fly ash composite cementitious materials[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(5):584-588. (in Chinese)
- [13] 梅军鹏, 徐智东, 李海南, 等. 蒸汽养护条件下纳米TiO₂对粉煤灰-水泥体系早期力学性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4):694-700.
- MEI Junpeng, XU Zhidong, LI Hainan, et al. Effect of nano-TiO₂ on early mechanical properties of fly ash-cement system under steam curing conditions[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4):694-700. (in Chinese)
- [14] IBRAHIM S M, HEIKAI M, METWALLY A M, et al. Positive impact of polymer impregnated on the enhancement of the physico-mechanical characteristics and thermal resistance of high-volume fly-ash blended cement [J]. Construction and Building Materials, 2023, 381:131243.
- [15] PARK B, CHOI Y C. Effects of fineness and chemical activators on the hydration and physical properties of high-volume fly-ash cement pastes[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 51: 104274.
- [16] ZHU H W, QIN Z H, MA Z B, et al. Novel C-F-S-H/PCE nanocomposites with high-efficiency seeding effect on the hydration of Portland cement [J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 140:105077.
- [17] LI W F, MA S H, HU Y Y, et al. The mechanochemical process and properties of Portland cement with the addition of new alkanolamines[J]. Powder Technology, 2015, 286:750-756.
- [18] CHEN X T, YANG X J, LI H X, et al. Understanding the role of C-S-H seed/PCE nanocomposites, triethanolamine, sodium nitrate and PCE on hydration and performance at early age[J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 139:105002.
- [19] KONG D Y, HUANG S L, CORR D, et al. Whether do nano-particles act as nucleation sites for C-S-H gel growth during cement hydration?[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 87:98-109.
- [20] MA S H, LI W F, ZHANG S B, et al. Study on the hydration and microstructure of Portland cement containing diethanol-isopropanolamine[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 67:122-130.
- [21] ZHANG S Z, NIU D T. Hydration and mechanical properties of cement-steel slag system incorporating different activators[J]. Construction and Building Materials, 2023, 363:129981.
- [22] RIDING K, SILVA D, SCRIVENER K. Early age strength enhancement of blended cement systems by CaCl₂ and diethanol-isopropanolamine[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(6):935-946.
- [23] 韩笑, 冯竟竟, 孙传珍, 等. 50℃养护下超细粉煤灰-水泥复合胶凝材料的性能研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3):473-482.
- HAN Xiao, FENG Jingjing, SUN Chuanzhen, et al. Study on the properties of ultrafine fly ash-cement composite cementitious materials cured at 50℃[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3):473-482. (in Chinese)
- [24] 丰曙霞, 王培铭. 粉煤灰在硅酸盐水泥浆体中的化学反应[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(3):321-325.
- FENG Shuxia, WANG Peiming. Chemical reaction of fly ash in Portland cement slurry[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(3):321-325. (in Chinese)
- [25] 陈琳, 潘如意, 沈晓冬, 等. 粉煤灰-矿渣-水泥复合胶凝材料强度和 hydration 性能[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(3):380-384.
- CHEN Lin, PAN Ruyi, SHEN Xiaodong, et al. Strength and hydration properties of fly ash-slag-cement composite cementitious materials[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(3):380-384. (in Chinese)