文章编号:1007-9629(2025)02-0095-08

C-S-H 晶种与硫酸铝作用下 PC-CSA 的凝结硬化性能

卢子臣[1,2,*]，　MOHAMMAD Mahadi Hasan[1,2]，　张立恒[1,2]，
贾亚运[3]，　孙振平[1,2]

(1.同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室,上海 201804; 2.同济大学 材料科学与工程学院,上海 201804; 3.山西佳维新材料股份有限公司,山西 运城 044200)

摘要:利用凝结时间、抗压强度等测试,系统评价了水化硅酸钙(C-S-H)晶种与硫酸铝(AS)对硅酸盐-硫铝酸盐复合胶凝体系(PC-CSA)凝结硬化性能的影响,并通过水化进程、水化产物和微观结构分析探究其内在作用机理.结果表明:C-S-H 晶种与 AS 均能显著缩短 PC-CSA 的凝结时间;复掺 C-S-H 晶种与 AS 显著促进了 PC-CSA 中硅相矿物的水化,提高了微观结构的致密性,提升了 PC-CSA 的抗压强度;当单掺 AS 时,PC-CSA 中水化产物 C-S-H 的成核与长大过程均受抑制,而 C-S-H 晶种的加入通过提供成核位点,减缓了对水化产物 C-S-H 成核过程的抑制效果,促进了硅相矿物的反应,有助于解决喷射混凝土速凝与早强不协调的问题.

关键词:喷射混凝土;C-S-H 晶种;硫酸铝;硫铝酸盐水泥;水化特性;孔结构

中图分类号:TU528.31　　**文献标志码**:A　　**doi**:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.02.001

Setting and Hardening Performance of PC-CSA under C-S-H Seed and Aluminum Sulfate

LU Zichen[1,2,*]，　*MOHAMMAD Mahadi Hasan*[1,2]，　*ZHANG Liheng*[1,2]，　*JIA Yayun*[3]，
SUN Zhenping[1,2]

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Shanxi Jiawei New Material Co., Ltd., Yuncheng 044200, China)

Abstract: Through tests of setting time and compressive strength, the effect of calcium silicate hydrated (C-S-H) seed and aluminum sulfate (AS) on the setting and hardening performance of ordinary Portland cement-calcium sulfoaluminate cement (PC-CSA) was systematically investigated. Moreover, the mechanism was revealed with the combined techniques of hydration process, hydration product and microstructure analysis. The results show that both C-S-H seed and AS significantly shorten the setting time of PC-CSA. The combined addition of C-S-H seed and AS significantly promotes the silicate phase reaction of PC-CSA and densifies the microstructure to enhance the compressive strength of PC-CSA. When AS is doped alone, the nucleation and growth processes of hydration product C-S-H in PC-CSA are inhibited. However, the addition of C-S-H seeds mitigates the inhibition effect on the nucleation process of hydration product C-S-H by providing nucleation sites, thereby promoting the silicate phase reaction.Hence, these results address the imbalance between rapid setting and enhanced early strength of the shotcrete.

Key words: shotcrete; C-S-H seed; aluminum sulfate; calcium sulfoaluminate cement; hydration property; pore structure

---

收稿日期:2024-02-09;修订日期:2024-04-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52208282);运城市揭榜挂帅项目

第一作者(通讯作者):卢子臣(1987—),男,河北涿州人,同济大学副教授,博士生导师,博士.E-mail:luzc@tongji.edu.cn

喷射混凝土在隧道和矿井等地下工程和支护工程中得到了广泛应用[1-3].为实现喷射混凝土的快凝早强,需使用速凝剂促进水泥水化[4].硫酸铝(AS)是目前无碱速凝剂中的主要组分,其通过快速生成钙钒石(AFt)实现混凝土的速凝,同时亦可促进水泥中硅酸三钙(C_3S)的溶解,提升硬化混凝土强度[5].虽然AS具有上述优点,但仅用AS仍难以满足喷射混凝土对凝结时间的要求[6],因此需要从外加剂或胶凝材料等方面对喷射混凝土配合比进行改进.

硫铝酸盐水泥(CSA)是一类具有速凝早强性能的低碳水泥,其在水化初期即可生成大量的AFt[7-8],进而显著促进混凝土凝结.将CSA与硅酸盐水泥(PC)复掺,制备用于喷射混凝土的硅酸盐-硫铝酸盐复合胶凝体系(PC-CSA),已在工程界与学术界得到广泛关注[9].然而,CSA的掺入会导致速凝和早强不协调的问题,即在凝结时间被缩短的同时,早期强度增长被严重抑制.添加水化硅酸钙(C-S-H)晶种是提高水泥基材料早期强度的重要手段[10].已有研究表明,C-S-H晶种能够有效缩短PC-CSA的凝结时间,并提高其早期强度[11].然而,C-S-H晶种与AS对PC-CSA的协同作用及其机制仍需要进一步明晰.

基于此,本文系统研究了不同CSA掺量下,C-S-H晶种与AS对PC-CSA凝结硬化性能的影响,并分析了其内在作用机理,旨在为PC-CSA在喷射混凝土中的高质高效应用提供理论指导.

1 试验

1.1 原材料及配合比

PC为抚顺水泥股份有限公司生产的P·I 42.5基准水泥,CSA为登电集团水泥有限公司生产的R·SAC 42.5级水泥,其化学及矿物组成(质量分数,文中涉及的掺量、比值等除特殊说明外均为质量分数或质量比)分别见表1、2.用英国马尔文Mastersizer 2000粒度仪测得PC和CSA的中值粒径d_{50}分别为18.0、14.9 μm.十八水硫酸铝(分析纯)购自国药集团有限公司.纳米C-S-H晶种由上海三瑞高分子材料股份有限公司提供,固含量为18.73%,用英国马尔文Zetasizer Nano ZS90粒度仪测得其d_{50}为342.0 nm.

表1 PC和CSA的化学组成

Table 1 Chemical compositions(by mass) of PC and CSA

Unit:%

Cement	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	TiO_2	Other
PC	62.38	20.78	4.53	3.22	3.29	0.32	0.87	3.97	0.34	0.30
CSA	34.71	14.35	27.14	3.09	2.37	0.21	0.42	15.88	1.02	0.81

表2 PC和CSA的矿物组成

Table 2 Mineralogical compositions(by mass) of PC and CSA

Unit:%

Cement	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	Gypsum	Anhydrite	Ye′elimite
PC	66.90	12.43	7.42	8.96	3.61	0.68	
CSA		18.12			7.01	22.07	52.80

设置AS的掺量w_{AS}为水泥总质量的0%、2%,C-S-H晶种的掺量$w_{C\text{-}S\text{-}H}$为水泥总质量的0%、1%、2%.PC-CSA的配合比(以100 g胶凝材料计)见表3(x为AS的掺量).先将PC与CSA按配合比在翻转振荡器内以转速40 r/min混合1 d,再依据GB/T 3519—2017《喷射混凝土用速凝剂》制备水泥净浆,将其装入相应的模具,并在(20±2)℃、相对湿度RH>95%的标准养护室中养护8 h后脱模,继续养护至相应龄期t进行测试.

1.2 试验方法

按照GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》测定水泥的凝结时间.使用DYE300型伺服液压测试仪测试水化8 h与1、3、7、28 d的硬化水泥浆体的抗压强度,试件尺寸为40 mm×40 mm×40 mm,加压速率为2.4 kN/s,每组测试3个试件,结果取平均值.采用美国TAM Air八通道等温量热仪测试浆体的水化过程,测试温度为25 ℃.测试过程为:首先,称取10 g PC-CSA并密封在安瓿瓶中,根据配合比配制相应量的AS溶液,在25 ℃的恒温室中储存24 h;然后,将溶液倒入装有胶凝材料的安瓿瓶中,用MX-S型涡旋式搅拌器搅拌1 min后将安瓿瓶置于仪器内,测量0~72 h的放热过程.基于单位胶凝材料(OPC与CSA)质

表3 PC-CSA的配合比

Table 3 Mix proportions of PC-CSA

Specimen	Mix proportion/g			w_{AS}/%	$w_{C\text{-}S\text{-}H}$/%
	PC	CSA	Water		
CSA0-xAS	100	0	40	0, 2	0, 1, 2
CSA10-xAS	90	10	40	0, 2	0, 1, 2
CSA20-xAS	80	20	40	0, 2	0, 1, 2

量，得到PC-CSA的放热速率与累计放热量．采用日本SmartLab高分辨X射线衍射仪（XRD）测试72 h水泥水化产物，扫描速率为2（°）/min，扫描范围为5°～40°．在养护3 d后，将样品破碎成小块置于5 ℃的异丙醇中浸泡1 d以终止水化，然后在40 ℃真空烘箱中干燥48 h，再将样品研磨至粒径不大于75 μm的颗粒用于测试．使用美国AutoPore V 9600型全自动压汞仪，通过逐点增加压力的方法测试样品在终止水化后的孔径分布和总孔隙率（体积分数），测试最大压力为206 MPa，测试过程中每个测点的平衡时间均为20 s，接触角和汞表面张力分别为130°和0.48 N/m．

2　结果与讨论

2.1　凝结时间

图1为C-S-H晶种与AS对PC-CSA凝结时间的影响．由图1可见：整体而言，无论是否掺入CSA，随着C-S-H晶种掺量的增大，水泥浆体的凝结时间均显著降低，与之前的研究结果一致[11]，说明C-S-H晶种掺量的增加能够促进水泥浆体的凝结；CSA的掺入会进一步降低水泥的凝结时间[8]，但当CSA掺量增加至20%时，PC-CSA凝结时间随C-S-H晶种掺量增加而降低的幅度放缓；相比于未掺AS的水泥浆体，AS的掺入会显著缩短PC-CSA的凝结时间．

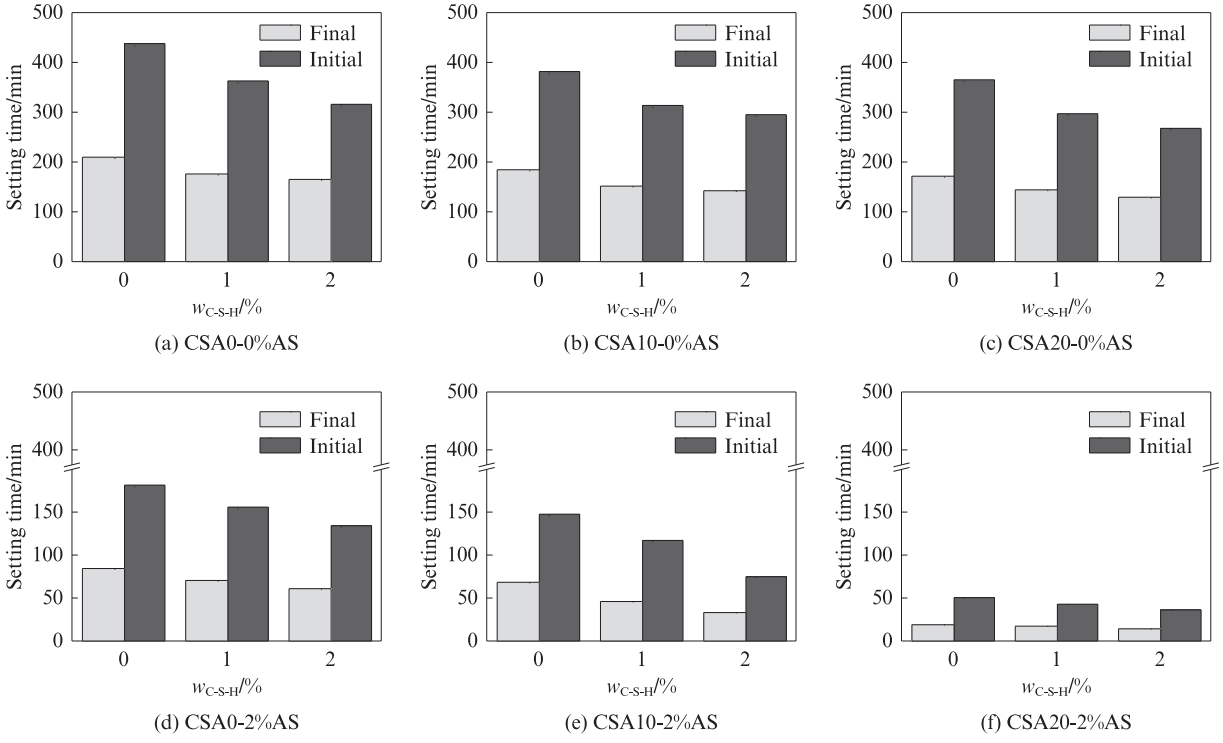

图1　C-S-H晶种与AS对PC-CSA凝结时间的影响

Fig. 1　Effect of C-S-H seed and AS on setting time of PC-CSA

2.2　抗压强度

C-S-H晶种与AS对PC-CSA抗压强度的影响见图2．由图2可见：(1)当w_{AS}=0%时，随着C-S-H晶种掺量的增大，CSA0组试件各龄期抗压强度均有一定的增长，且其8 h抗压强度的增长效果最为显著，其后随着水化时间的延长，其抗压强度增长幅度逐步变缓；C-S-H晶种对试件CSA10-0%AS抗压强度的影响与CSA0组试件类似，但其3 d内的抗压强度比试件CSA0-0%AS高，28 d抗压强度与试件CSA0-0%AS相当；试件CSA20-0%AS的8 h抗压强度进一步增大，但其1 d抗压强度显著低于试件CSA10-0%AS.(2)当w_{AS}=2%时，试件CSA0-2%AS在7 d内的抗压强度比试件CSA0-0%AS稍有降低，28 d抗压强度基本不变；与试件CSA10-0%AS相比，AS的掺入提高了试件CSA10-2%AS的8 h抗压强度，但其后期抗压强度明显降低；与试件CAS0-2%AS相比，CSA的掺入对试件CSA10-2%AS各龄期的抗压强度整体上有促进作用；进一步增加CSA掺量至20%时，AS和CSA的快速反应导致试件CSA20-2%AS全龄期抗压强度降低明显．(3)随着C-S-H晶种掺量的提高，整个测试龄期所有试件的抗压强度均呈增大的趋势，可见C-S-H晶种有增大水泥石强度的作用；当w_{CSH}=0%时，试件CSA20-2%AS的1 d抗压强度较其8 h时基

本没有增长;当w_{CSH}=2%时,试件CSA20-2%AS的8 h和1 d抗压强度分别比w_{CSH}=0%时提高3.6和4.8倍.

结合图1可见,C-S-H晶种在显著缩短复合胶凝体系凝结时间的同时,极大地降低了过高CSA掺量对PC-CSA抗压强度的负面影响,实现了快凝与早强的协调发展.

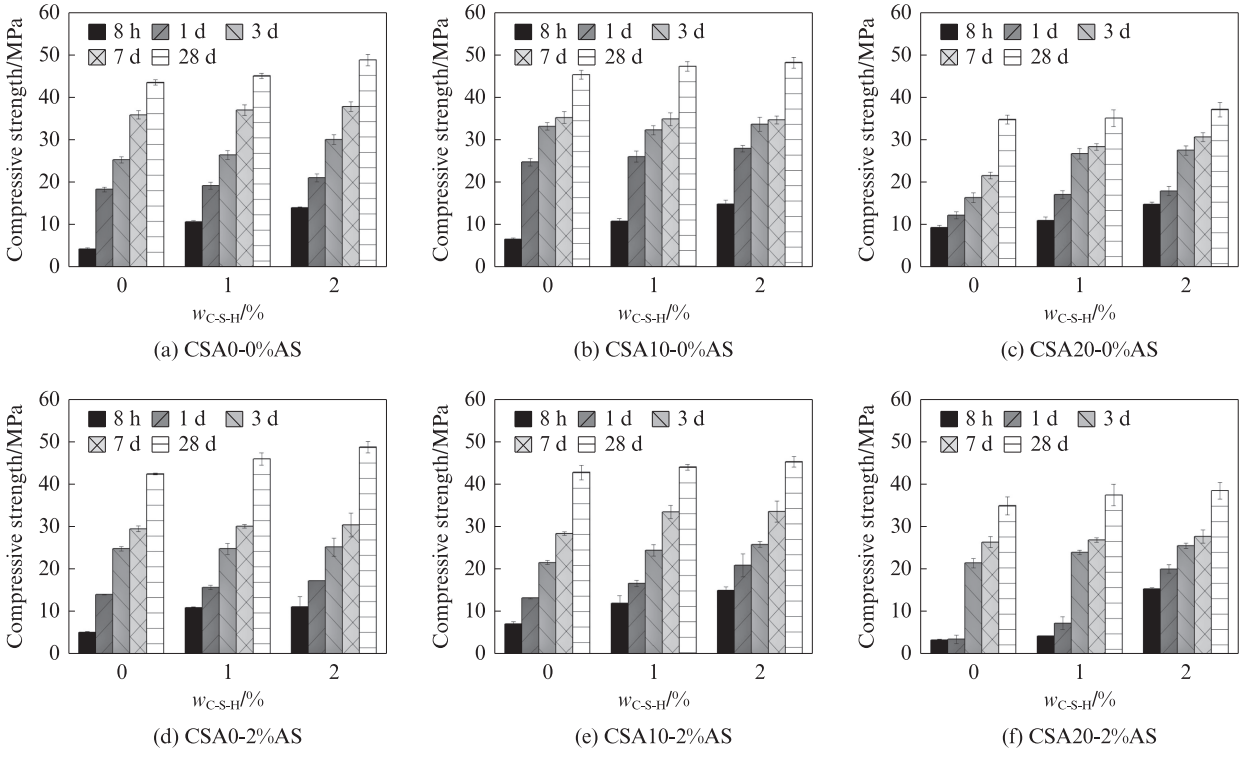

图2 C-S-H晶种与AS对PC-CSA抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of C-S-H seed and AS on compressive strength of PC-CSA

2.3 水化进程

C-S-H晶种与AS对PC-CSA水化进程的影响见图3.由图3可见:(1)对于CSA0组试件,无论是否掺入AS,随着C-S-H晶种掺量的增大,水泥水化诱导期缩短,水化峰值放热速率大幅提高,与凝结时间的缩短和抗压强度的增加相对应.这是因为加入的C-S-H晶种为水化提供了额外的成核位点,从而加速了C_3S的水化[12].(2)与试件CSA0-0%AS相比,试件CSA20-0%AS水泥水化诱导期放热速率明显提高,但加速期放热速率及72 h累计放热量降低;随着C-S-H晶种掺量的增大,与CSA0组试件类似,CSA20组试件水泥水化诱导期显著缩短,同时诱导期与加速期的放热速率增加明显;CSA20组试件在加入C-S-H晶种前后加速期放热速率均低于CSA0组试件.(3)试件CSA20-2%AS水泥水化曲线变化明显,当w_{CSH}=0%时,单掺AS极大延长了PC-CSA水化诱导期,从试件CSA20-0%AS的3.0 h延长至试件CSA20-2%AS的27.6 h,且放热速率降低,这表明水泥中硅相反应在CSA与AS复掺作用下被严重抑制;C-S-H晶种的掺入明显缩短了CSA20组试件的水化诱导期,提高了其诱导期放热速率,这与图2抗压强度的发展规律一致,说明C-S-H晶种的掺入极大缓解了CSA与AS对水泥中硅相矿物水化的抑制.

2.4 水化产物分析

水化72 h时,C-S-H晶种与AS作用下硬化PC-CSA浆体的XRD谱图见图4.由图4可见:对于试件CSA0-0%AS,掺入C-S-H晶种后其AFt和氢氧化钙(CH)的衍射峰强度明显增加,说明C-S-H晶种的掺入促进了水泥水化产物的生成,这与图3结果一致;对于试件CSA0-2%AS,其AFt的衍射峰强度明显增加,说明AS的掺入显著促进了AFt的生成;对于试件CSA20-0%AS,与试件CSA0-0%AS相比,CSA掺入后在2θ=9.8°处出现明显的单硫型水化硫铝酸钙(AFm)衍射峰[13],AFt衍射峰强度增高,同时C_3S、CH及硅酸二钙(C_2S)的衍射峰强度降低,说明CSA的掺入促进了水泥中硅相矿物的溶解,生成更多的AFt和AFm;对于试件CSA20-2%AS,与试件CSA20-0%AS相比,其AFt衍射峰强度进一步提高,CH衍射峰强度继续减弱,同时C_2S与C_3S的衍射峰强度进一步减弱.上述结果均表明CSA与AS复掺作用下促进了水泥中硅相矿物的溶解,但水化产物以AFt和AFm产物为主,影响了水化产物C-S-H

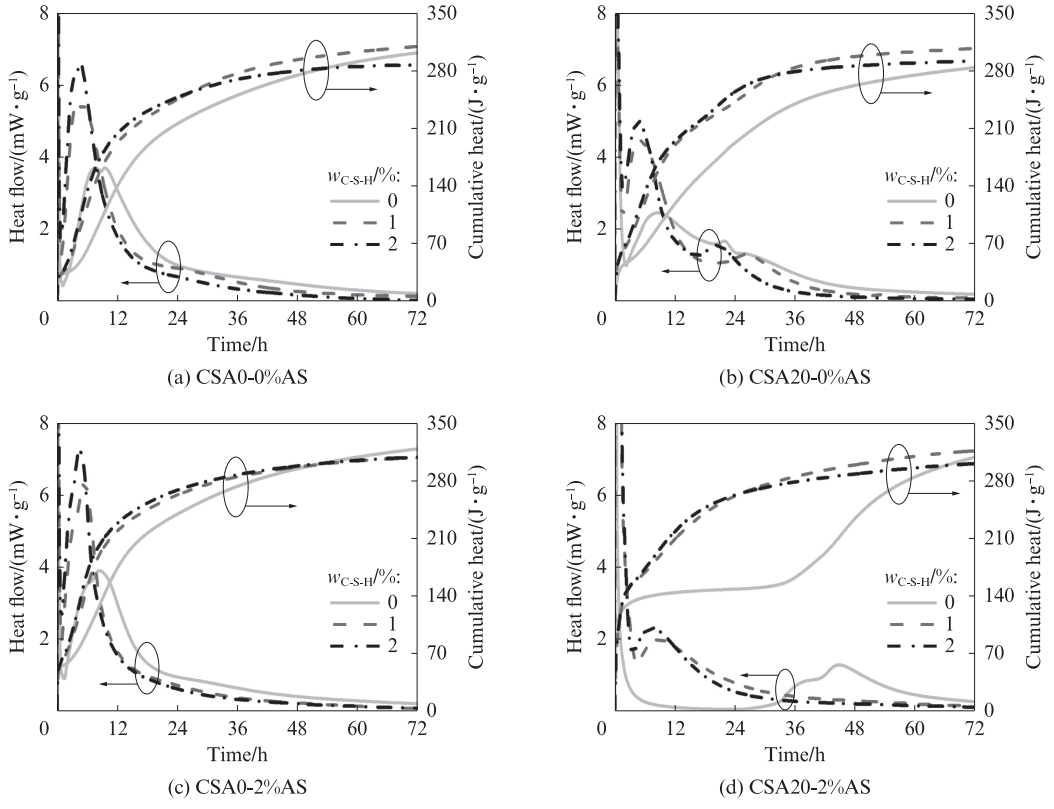

图3　C-S-H晶种与AS对PC-CSA水化过程的影响

Fig. 3　Effect of C-S-H seed and AS on hydration process of PC-CSA

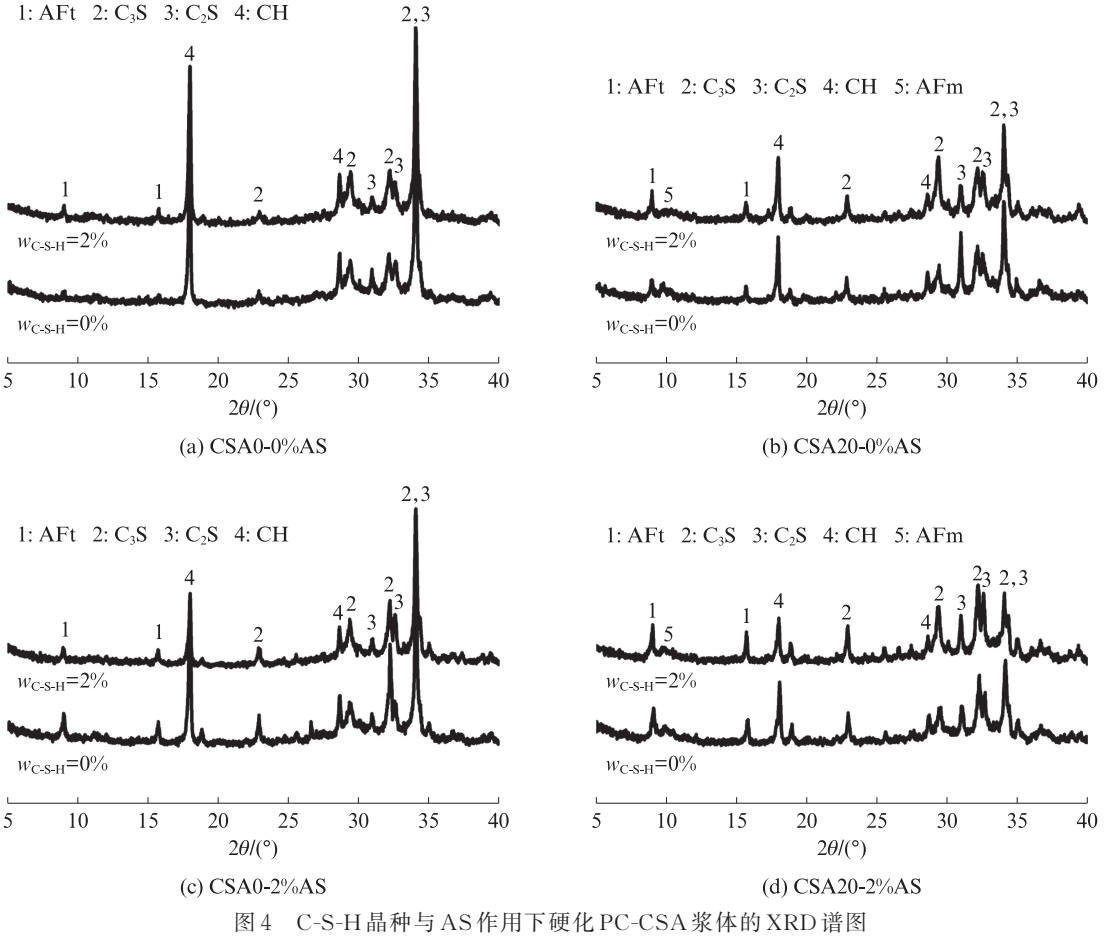

图4　C-S-H晶种与AS作用下硬化PC-CSA浆体的XRD谱图

Fig. 4　XRD patterns of hardened PC-CSA pastes under effect of C-S-H seed and AS(72 h)

的生长.加入C-S-H晶种后,减弱了AFm的衍射峰强度,但CH衍射峰强度变化不显著.

2.5 孔结构分析

PC-CSA的力学性能除受水化速率和水化产物的影响外,还受硬化浆体的微观结构的影响.水化72 h时,C-S-H晶种与AS对硬化PC-CSA浆体孔径分布和累计孔体积的影响见图5.由图5可见,对于试件CSA0-0%AS,C-S-H晶种的加入使其孔径分布曲线向左偏移,但总孔隙率基本不变,说明C-S-H晶种可以细化水泥石孔结构;与试件CSA0-0%AS相比,当不掺C-S-H晶种时,试件CSA0-2%AS中AS的加入显著增加了其100 nm内的孔体积,此外,其总孔隙率也有所增加,从而造成抗压强度降低;C-S-H晶种的掺入细化了试件CSA0-2%AS的孔结构,降低了其50 nm以上的毛细孔含量,进而减小了总孔隙率,增加了抗压强度;相较于试件CSA0-0%AS,试件CSA20-0%AS整体孔结构分布变宽,说明CSA的掺入可粗化孔结构,C-S-H晶种的掺入显著降低了其100 nm以上的孔体积,进而提升了试件的力学性能;与试件CSA0-2%AS相比,CSA与AS复掺作用下试件CSA20-2%AS在50 nm以上的毛细孔含量显著提高,造成孔隙粗化,孔隙率大幅增加,抗压强度整体降低,而C-S-H晶种的掺入极大降低了总孔隙率,细化了孔隙结构,对其力学性能起到了正面促进作用.

2.6 讨论

由上述结果可知:(1)对于纯硅酸盐水泥PC(对应试件CSA0-0%AS),AS的掺入会提高诱导期放热速率,促进早期AFt的形成,且C-S-H晶种的掺入会进一步促进水化反应过程.(2)对于试件CSA20-0%AS,CSA的掺入显著改变了原有PC的水化进程,降低了加速期放热速率,但基本不影响诱导期长度.同时,CSA的掺入明显加速了水泥中铝相矿物的水化,促进二次水化峰肩的出现(见图3(c)),这可能是由于CSA的掺入会加速消耗水泥中溶出的Ca^{2+}和SO_4^{2-},在促进AFt形成的同时,加快了水泥中硫酸盐的消耗[14].掺入C-S-H晶种后,诱导期变化不显著,但可显著提高加速期放热速率,这说明CSA对PC中硅相矿物反应的抑制作用更可能源于其对水泥水化过程中水化产物C-S-H长大过程的阻碍,而不是其对成核过程的抑制.(3)对于试件CSA20-2%AS,AS的掺入进一步改变了水泥水化反应进程.与试件CSA20-0%AS对比,水化反应诱导期持续时间大幅度延长,同时加速期放热速率也进

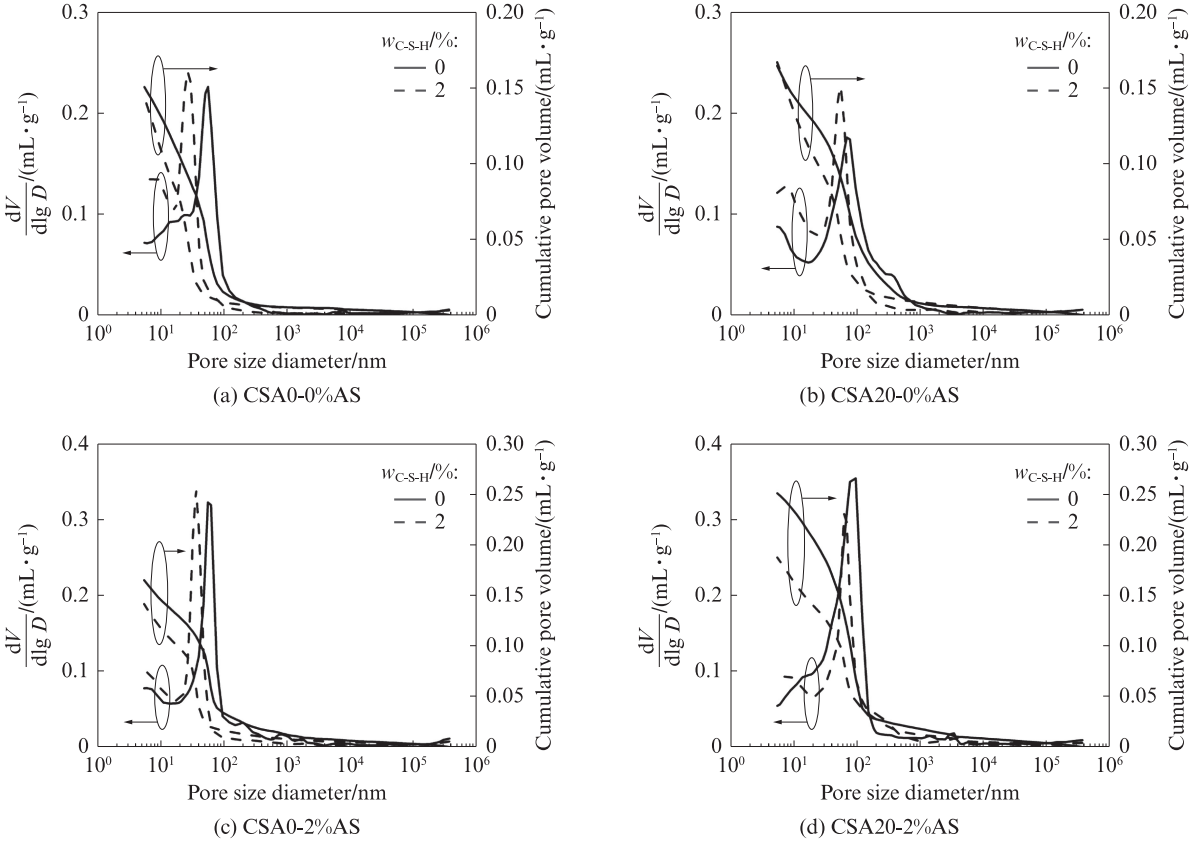

图5 C-S-H晶种与AS对硬化PC-CSA浆体孔径分布和累计孔体积的影响

Fig. 5 Effect of C-S-H seed and AS on pore size distribution and cumulative pore volume of hardened PC-CSA pastes(72 h)

一步降低，这说明AS与CSA复掺不仅抑制水化产物的长大过程，而且对其成核过程也具有明显的抑制效果．加入C-S-H晶种后，水泥水化诱导期显著缩短，但加速期放热速率增加幅度低于试件CSA20-0%AS，说明C-S-H晶种的掺入提供了额外成核位点，显著减缓了AS与CSA对水化产物C-S-H成核过程的抑制效果．

综上，对于PC-CSA，C-S-H晶种的掺入，一方面通过改变水泥水化反应进程，提供额外成核位点，减缓CSA与AS对硅相反应的抑制效果，进而起到促进硬化水泥石早期强度发展的目的；另一方面，C-S-H晶种的掺入还可以细化孔结构，降低总孔隙率，从微观结构改善上进一步提高硬化水泥石强度．

需要指出的是，本研究为保证力学测试中试件的质量，所用AS折固掺量为2%，低于实际工程应用中4%左右的AS掺量（此时水泥凝结非常迅速，且C-S-H晶种的加入会进一步缩短水泥凝结时间，影响模具成型时样品质量）．随着AS掺量的增加，CSA与AS复掺作用下对水泥中硅相矿物的抑制作用将进一步增强，但具体C-S-H晶种作用效果如何，应在喷射成型中进行进一步评价．

3　结论

（1）对于凝结时间，硫铝酸盐水泥（CSA）、硫酸铝（AS）与水化硅酸钙（C-S-H）晶种的掺入均可缩短水泥凝结时间，且其不同组合均具有协同促凝效果．对于抗压强度，C-S-H晶种的掺入可以缓解硅酸盐-硫铝酸盐复合胶凝体系（PC-CSA）在AS作用下早期强度增长缓慢问题．同时，C-S-H晶种的掺入还可以细化孔结构，降低总孔隙率，从微观结构改善方面进一步提高硬化PC-CSA的抗压强度，实现其速凝与早强的协同发展．

（2）水化过程测试显示，高CSA掺量（本文为20%）对PC中硅相矿物反应的抑制效果源于其对水化过程中水化产物C-S-H长大过程的阻碍．而在PC-CSA中，AS与CSA复掺不仅抑制水化产物C-S-H的长大过程，而且对其成核过程具有明显的抑制效果．随着C-S-H晶种的掺入，通过提供额外的成核位点可显著减缓AS与CSA对水化产物C-S-H成核过程的抑制效果．

参考文献：

[1] MALMGREN L, NORDLUND E. Interaction of shotcrete with rock and rock bolts—A numerical study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(4):538-553.

[2] MALMGREN L, NORDLUND E, ROLUND S. Adhesion strength and shrinkage of shotcrete [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(1):33-48.

[3] 高玉军，邓翀，秦明强，等．铁路隧道C30早高强喷射混凝土试验研究与应用[J]．建筑材料学报，2023，26(9)：1011-1022.
GAO Yujun, DENG Chong, QIN Mingqiang, et al. Experimental research and application of C30 early and high-strength shotcrete in railway tunnel[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(9):1011-1022. (in Chinese)

[4] PAGLIA C, WOMBACHER F, BÖHNI H. The influence of alkali-free and alkaline shotcrete accelerators within cement systems Ⅰ. Characterization of the setting behavior[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(6):913-918.

[5] 曾鲁平，乔敏，王伟，等．无碱速凝剂对硅酸盐水泥早期水化的影响[J]．建筑材料学报，2021，24(1)：31-38，44.
ZENG Luping, QIAO Min, WANG Wei, et al. Effect of alkali-free accelerators on early age hydration of Portland cement [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1):31-38, 44. (in Chinese)

[6] DORN T, BLASK O, STEPHAN D. Acceleration of cement hydration—A review of the working mechanisms, effects on setting time, and compressive strength development of accelerating admixtures[J]. Construction and Building Materials, 2022, 323:126554.

[7] PELLETIER L, WINNEFELD F, LOTHENBACH B. The ternary system Portland cement-calcium sulphoaluminate clinker-anhydrite: Hydration mechanism and mortar properties[J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(7):497-507.

[8] ZHANG G, YANG Y Z, YANG H L, et al. Calcium sulphoaluminate cement used as mineral accelerator to improve the property of Portland cement at sub-zero temperature [J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 106:103452.

[9] XU Y D, HE T S, MA X D, et al. The influence of calcium sulphoaluminate cement on the hydration process of cement paste mixed with alkali free liquid accelerator[J]. Materials Today Communications, 2022, 33:104622.

[10] 杨军，张高展，丁庆军，等．铝掺杂水化硅酸钙的分子结构和力学性能[J]．建筑材料学报，2022，25(6)：565-571，584.
YANG Jun, ZHANG Gaozhan, DING Qingjun, et al. Molecular structure and mechanical properties of aluminum substituted C-S-H[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(6):565-571, 584. (in Chinese)

[11] 胡建伟，谢永江，刘子科，等．纳米C-S-H/PCE对硅酸盐-硫铝酸盐复合水泥凝结硬化的影响[J]．土木与环境工程学报，2021，43(2)：138-147.
HU Jianwei, XIE Yongjiang, LIU Zike, et al. Effect of nano-C-S-H/PCE on the setting and hardening process of Portland-sulphoaluminate composite cement[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(2): 138-147. (in Chinese)

[12] SUN J F, SHI H, QIAN B B, et al. Effects of synthetic C-S-H/PCE nanocomposites on early cement hydration[J]. Construction and Building Materials, 2017, 140:282-292.

[13] 徐玲琳，杨晓杰，王培铭，等. 养护温度对硫铝酸盐水泥基三元体系微结构演变的影响[J]. 建筑材料学报，2016，19(6)：983-987，992.
XU Linglin，YANG Xiaojie，WANG Peiming，et al. Influences of curing temperature on the microstructure evolution of calcium sulfoaluminate cement based ternary blends[J]. Journal of Building Materials，2016，19(6)：983-987，992.（in Chinese）

[14] 刘志伟，卢子臣，张立恒，等. 三乙醇胺对掺偏高岭土水泥水化及硫酸盐平衡的影响[J]. 建筑材料学报，2024，27(6)：528-535.
LIU Zhiwei，LU Zichen，ZHANG Liheng，et al. Effect of triethanolamine on hydration and sulfate balance of metakaolin blended cement[J]. Journal of Building Materials，2024，27(6)：528-535.（in Chinese）