

硫铝酸盐基复合胶凝体系水化性能的温度敏感性

徐玲琳, 范胜华, 张国防, 王培铭

(先进土木工程材料教育部重点实验室, 同济大学, 上海 201804)

摘要: 研究了5、20℃和40℃硫铝酸盐水泥熟料-硅酸盐水泥-无水石膏三元体系(简称三元体系)的初凝时间、抗压强度及水化产物组成。结果表明:源自水化产物的显著差异,所涉硫铝酸盐水泥熟料为主的复合胶凝体系的性能对养护温度的敏感程度直接取决于初始配合比。与纯硫铝酸盐水泥熟料相比,单掺硅酸盐水泥时水化产物由钙矾石变为水化钙铝黄长石,导致硬化浆体力学强度显著降低。而单掺无水石膏或复掺无水石膏和硅酸盐水泥时,石膏的掺入促进了钙矾石的生成,有效抑制了向单硫型水化硫铝酸钙的转变(尤其在高温下),使得高温下的抗压强度略有提升。此外,欲使三元体系在不同养护温度下的初凝时间变化不大,硅酸盐水泥的掺量需控制在30%以上;要使抗压强度变化不大,石膏掺量宜在25%以上。

关键词: 混合水泥; 硫铝酸盐水泥; 无水石膏; 温度; 性能

中图分类号: TQ172.75 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2017)11-1613-08

网络出版时间: 2017-10-09 13:56:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2310.TQ.20171009.1356.018.html>

Temperature Sensitivity of Hydration Properties of Calcium Sulfoaluminate Cement Based Blends

XU Linglin, FAN Shenghua, ZHANG Guofang, WANG Peiming

(Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The initial setting time, compressive strength development and phase composition of calcium sulfoaluminate (CSA) clinker-Portland cement-anhydrite ternary system (abbreviation: ternary system) at different temperatures (*i.e.*, 5, 20 and 40 °C) were investigated. The results indicate that the temperature sensitivity of the hydration properties of calcium sulfoaluminate cement based blends depends on the mix proportions, which results from the prominent difference in hydration products. Compared to neat CSA clinker, the addition of Portland cement enables the main hydrates switching from ettringite to strätlingite, resulting in a decrease of 3-d compressive strength. The addition of anhydrite or together with Portland cement promotes the formation of ettringite, and thus prohibits the conversion to monosulfate (especially at an elevate temperature), leading to a higher compressive strength at an elevate temperature. In addition, the dosage of Portland cement in ternary system should exceed 30% to obtain stable initial setting time at nevertheless low (5 °C) or elevate temperature (40 °C). The amount of anhydrite should be greater than 25% to achieve the comparatively similar 3-d and 28-d compressive strength.

Keywords: blended cement; calcium sulfoaluminate cement; anhydrite; temperature; properties

20世纪70年代中国建材院自主研发的硫铝酸盐水泥,比传统的硅酸盐水泥烧成温度低、熟料易磨,且具有快硬早强、耐化学腐蚀、抗冻融等诸多优良特性^[1]。作为低碳水泥的主力军之一,硫铝酸盐水泥近年来备受国内外学者及企业的关注。然而,受生产成本高和原材料来源不足等因素的限制,现

阶段硫铝酸盐水泥仍不可完全替代硅酸盐水泥,常将两者混合以实现优势互补、性能叠加。

硫铝酸盐水泥-硅酸盐水泥-石膏三元体系(简称三元体系),是硫铝酸盐水泥应用的一大典型,因其出色的快凝、早强及收缩补偿等性能,被广泛用于配制快速修复砂浆、自流平砂浆、防水砂浆及灌浆

收稿日期: 2017-04-28。 修订日期: 2017-08-31。

基金项目: 国家自然科学基金(51402216); 国家重点研发计划项目(2016YFC0700905); 中德科学中心项目(GZ1290)。

第一作者: 徐玲琳(1986—),女,博士,讲师。

通信作者: 王培铭(1952—),男,博士,教授,博士研究生导师。

Received date: 2017-04-28. Revised date: 2017-08-31.

First author: XU Linglin (1986—), female, Ph. D., Lecturer.

E-mail: xulinglin@126.com

Correspondent author: WANG Peiming (1952—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: tjwpm@126.com

等特种胶凝材料^[2–3]。研究表明, 虽然 20 °C 三元体系的水化产物均以钙矾石(AFt)为主, 但若初始配合比不同, 所得硬化浆体的物理力学性能差异显著^[3–9]。例如, 当硅酸盐水泥、铝酸盐水泥和石膏三者的比例从 8:3:0.5 微调至 8:3:1 时, 三元体系硬化浆体的 1 d 抗压强度从 3 MPa 大幅升至 18 MPa 左右^[7, 10]。

温度作为影响水泥水化的重要参数, 直接决定了水泥浆体的微结构演变及宏观性能发展。当所处环境超过特定温度(50~87 °C)时, 硅酸盐水泥浆体中 AFt 将不断转变为单硫型水化硫铝酸钙(AFM), 使得硬化浆体的孔隙率增大、力学性能下降、体积稳定性劣化^[11]。以 AFt 为主要水化产物的硫铝酸盐水泥, 其水化速率、水化产物的物相组成及宏观性能等方面更是高度依赖养护温度^[12–13], 但已有三元体系相关研究仅限于 20 °C。基于此, 选取 21 个以硫铝酸盐水泥熟料为主的复合胶凝体系, 研究养护温度(5、20、40 °C)对浆体凝结时间、抗压强度及干燥收缩率等主要物理力学性能的影响。

1 实验

1.1 原材料

主要材料包括硫铝酸盐水泥熟料(CSA, 唐山北极熊特种水泥有限责任公司生产)、P·I 42.5 硅酸盐水泥(PC, 曲阜中联生产的混凝土外加剂检测用基准水泥)、天然无水石膏(CS, 安徽恒泰新型建筑材料有限责任公司生产), 自来水及标准砂。水泥及石膏的化学组成如表 1 所示, 硫铝酸盐水泥熟料的矿物组成如表 2 所示。

表 1 原材料化学组成

Table 1 Chemical composition of raw materials

Material	Mass fraction w/%								
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
CSA	6.08	41.70	32.60	1.87	1.93	9.71	0.18	—	1.38
PC	21.50	65.20	4.14	2.40	2.57	2.89	0.84	0.67	0.32
CS	1.72	39.44	0.35	0.16	1.80	51.96	—	0.02	4.41

CSA—Calcium sulfoaluminate clinker; PC—Portland cement; CS—Anhydrite.

表 2 硫铝酸盐水泥熟料的矿物组成

Table 2 Mineral composition of CSA cement clinker w/%

C ₄ A ₃ CS	C ₂ S	C ₄ AF	C ₁₂ A ₇	CT
60.28	23.67	5.93	3.65	2.30

CT—CaTiO₃.

1.2 配合比

在以硫铝酸盐水泥熟料为主的三元体系中均匀选取 21 个测试点(如图 1 所示), 采用无水石膏和硅

酸盐水泥部分替代(0~50%)硫铝酸盐水泥熟料, 掺量增幅为 10%。所涉配合比涵盖了硫铝酸盐水泥熟料-无水石膏二元体系(G0、G1、G2、G3、G4、G5)、硫铝酸盐水泥熟料-硅酸盐水泥二元体系(S1、S2、S3、S4、S5)及硫铝酸盐水泥熟料-硅酸盐水泥-无水石膏三元体系(G1S4、G2S3、G3S2、G4S1、G1S3、G2S2、G3S1、G1S2、G2S1、G1S1)。其中: G 代表石膏, S 代表硅酸盐水泥; 数字代表掺量, 如: 1 代表 10% 掺量, 2 代表 20% 掺量, 依此类推。水胶比固定在 0.5, 胶砂比为 1:3。

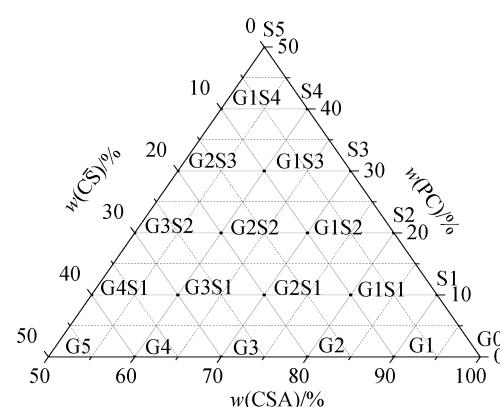


图 1 三元体系的配合比

Fig. 1 Mix proportions of ternary systems

1.3 方法

所有原材料(含自来水)均至少提前 48 h 预置于 5、20 和 40 °C。

水泥凝结时间的测定参照 GB/T 1346—2001《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》, 但固定水胶比为 0.5。水泥砂浆抗压强度的测定参照 GB/T 17671—1999(ISO679: 1989)《水泥胶砂强度检验方法》。(20±1) °C 快速成型后, 分别在相对湿度(60±10)%, 温度(5±1) °C、(20±1) °C、(40±1) °C 养护至 1 d 后拆模; 再继续在相应温湿度下养护至 3 d 和 28 d 后, 用水泥强度试验机测试其抗压强度, 加压速率为(2 400±200) N/s。

因所涉及的配合比数量较多, 为直观体现养护温度及配合比对三元体系水化性能的影响, 采用 Origin 8.5 软件依据测得 21 个配比的某性能数据绘制出相对“连贯”的三元云图。通过这些三元云图, 虽不能直接得到某性能的具体数值, 但可看出其所处范围。通过云图上不同颜色的分布, 更可直接判断各性能随组成变化的趋势。云图上越趋向于蓝色, 说明该性能的数据值越小; 反之, 越趋向于红色, 说明该性能的数据值越大。

2 结果与讨论

2.1 凝结时间的温度敏感性

图2显示了20℃三元体系的初凝时间随硅酸盐水泥和石膏掺量变化的规律。由图2可见,与纯硫铝酸盐水泥熟料相比,石膏和硅酸盐水泥的掺入均会在不同程度上缩短三元体系的初凝时间。单掺石膏时,二元体系的凝结时间随石膏掺量的增加先大幅缩短后略微增加。当石膏掺量在20%~30%时,促凝效果尤为显著,初凝时间由不掺时的230 min缩至70 min左右。类似地,单掺硅酸盐水泥时,二元体系的凝结时间随硅酸盐水泥掺量的增加先缩短后增加,掺量在30%附近时凝结时间最短;但三元体系的凝结时间与硅酸盐水泥的掺量无明显关联。

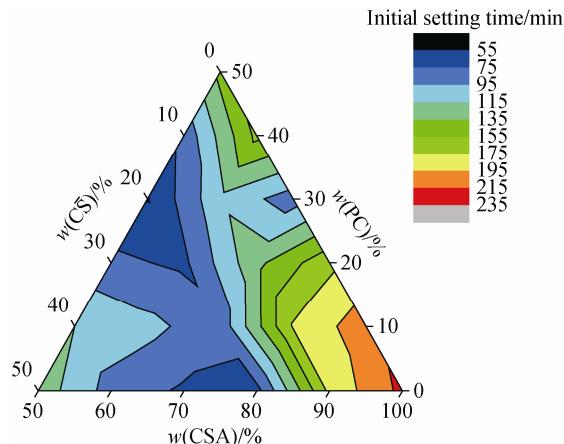


图2 20℃三元体系的初凝时间

Fig. 2 Initial setting time of ternary systems at 20 °C

图3和图4分别是5℃和40℃养护下三元体系的初凝时间。由图3可见,5℃低温养护下,三元体系的初凝时间大多较20℃时有所延长。这与经典的热力学规律相符,即温度越低,水化速度越慢,水化产物的生成速度越慢。但硫铝酸盐水泥熟料用量在80%以上时(云图右下角),低温下的凝结时间反而较20℃时有所缩短,这解释了为何硫铝酸盐水泥可直接用于低温修复等特殊工程^[1, 14]。从组成来说,石膏的掺量越高,低温对浆体初凝时间的延长程度越明显。这是因为低温下无水石膏的溶解过慢^[15],难与无水硫铝酸钙反应生成针棒状AFt晶体。特别是当石膏掺量近50%时(云图左下角),初凝时间甚至较20℃延长了5 h左右。而低温下硅酸盐水泥对凝结时间仍有一定的促凝作用,但掺量较高时的凝结时间与20℃相比变化不大。

由图4可见,40℃高温养护下三元体系的初凝时间大多有不同程度的缩短,仅在石膏掺量5%以内的少数情况下,三元体系初凝时间较20℃时有所

延长。石膏掺量近50%时,三元体系的初凝时间甚至较20℃缩短了1 h左右,这与5℃低温养护所得规律完全不同。由图4还可看出,石膏掺量在20%以上时,三元体系的凝结时间的变化不大,基本保持在30~60 min间。

结合图3和图4可知,当硅酸盐水泥的掺量在30%以上时,所得三元体系在不同养护温度下的初凝时间变化不大。

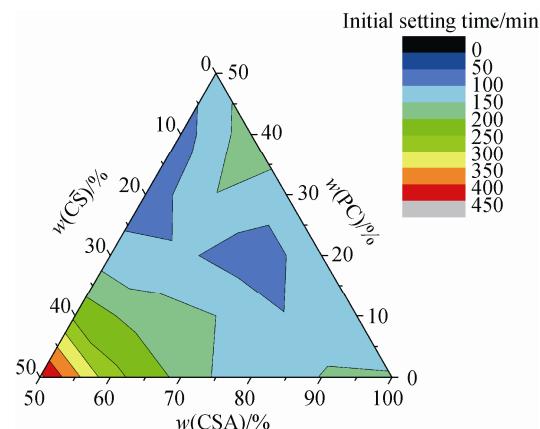


图3 5℃三元体系的初凝时间
Fig. 3 Initial setting time of ternary systems at 5 °C

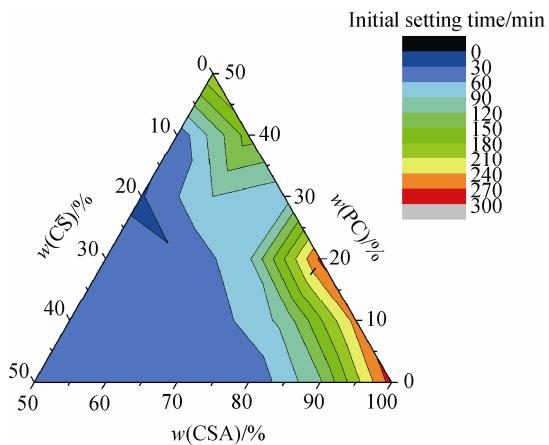


图4 40℃三元体系的初凝时间
Fig. 4 Initial setting time of ternary systems at 40 °C

2.2 抗压强度的温度敏感性

图5为20℃时三元体系砂浆3d抗压强度随配合比变化的规律。由图5可知,硫铝酸盐熟料用量较大时(云图右下角),抗压强度最高。硅酸盐水泥和石膏的掺入,均会不同程度上降低三元体系3d抗压强度,这与文献研究结果相似——石膏的掺入虽能加速无水硫铝酸钙的水化进程,但却不利于早期强度的发展^[8]。当硅酸盐水泥和石膏掺量总和在15%以内时,三元体系的3d抗压强度较纯硫铝酸盐水泥熟料下降较少;但随着两者掺量增大,三元体系的3d抗压强度逐步降低。当硅酸盐水泥掺量

较大时(云图顶端), 3 d 抗压强度达到最低, 仅为纯硫铝酸盐水泥熟料强度的 1/5 左右。但石膏掺量在 30%~50% 间变化时, 3 d 抗压强度随组分的变化较小, 始终保持在 35~40 MPa 之间。

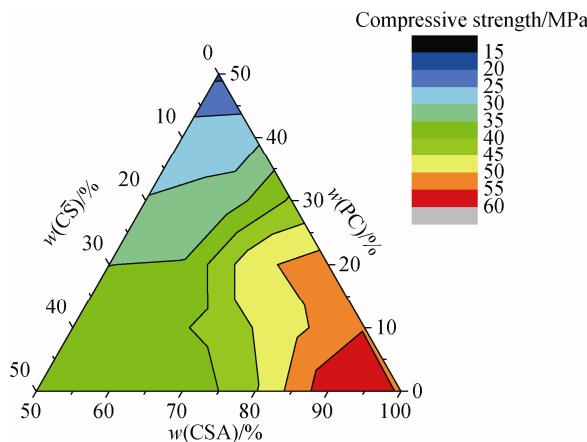


图 5 20 °C 三元体系的 3 d 抗压强度

Fig. 5 3 d-compressive strength of ternary systems at 20 °C

图 6 和图 7 分别为 5 °C 和 40 °C 养护下三元体系砂浆 3 d 抗压强度。由图 6 可见, 5 °C 低温养护下, 纯硫铝酸盐水泥熟料的 3 d 抗压强度较 20 °C 变化不大。这与前期研究结果^[16]一致, 也解释了为何硫铝酸盐水泥宜用于低温场合。进一步与图 5 对比可知, 当硫铝酸盐水泥熟料掺量在 70%~90% 时, 三元体系的 3 d 强度较 20 °C 时显著降低; 其余情况下, 略有降低。譬如, 当石膏掺量由 20% 增至 50% 时, 5 °C 三元体系的抗压强度较 20 °C 时减幅较小。

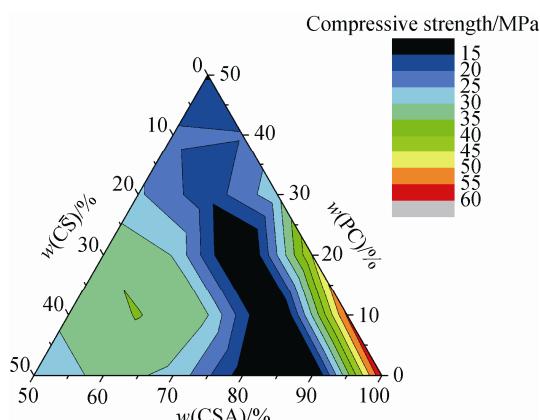


图 6 5 °C 三元体系的 3 d 抗压强度

Fig. 6 3 d-compressive strength of ternary systems at 5 °C

由图 7 可见, 40 °C 养护下纯硫铝酸盐水泥熟料的 3 d 强度较 20 °C 时明显下降, 所有配比的强度均低于 50 MPa, 这可能与高温下大量 AFm 的生成相关^[12, 16]。高温下, 适量石膏的掺入有利于强度的发展——石膏掺量在 20% 以上时, 三元体系硬化浆体 3 d 抗压强度较 20 °C 时略有增加。

综合图 6 和图 7 可知, 欲使三元体系无论在高

温还是低温养护下 3 d 强度与 20 °C 时接近, 石膏的掺量宜控制在 25% 以上。

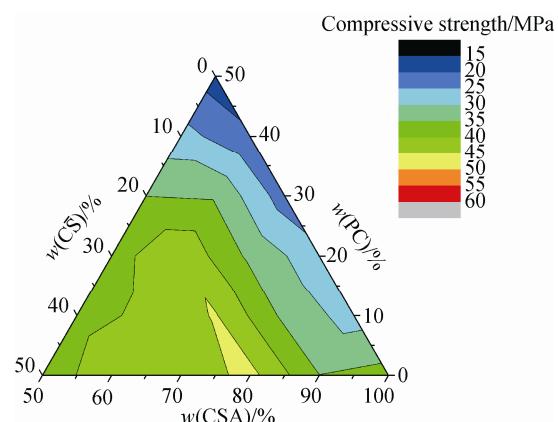


图 7 40 °C 三元体系的 3 d 抗压强度

Fig. 7 3 d-compressive strength of ternary systems at 40 °C

图 8 为 20 °C 时三元体系砂浆 28 d 抗压强度随配合比变化的规律。由图 8 可知, 三元体系砂浆在 3~28 d 龄期间, 抗压强度的增长甚微。当硫铝酸盐熟料用量较大时(云图右下角), 抗压强度最高, 这与 3 d 时的强度规律一致。硅酸盐水泥和石膏的掺入, 仍会不同程度上降低三元体系 28 d 抗压强度。随着石膏掺量的增加, 三元体系的 28 d 抗压强度先减后增。随着硅酸盐水泥掺量增大, 三元体系的 28 d 抗压强度逐步降低。当硅酸盐水泥掺量达到 50% 时, 28 d 抗压强度达到最低, 仅为 20 MPa 左右, 较 3 d 强度基本没有显著增长。

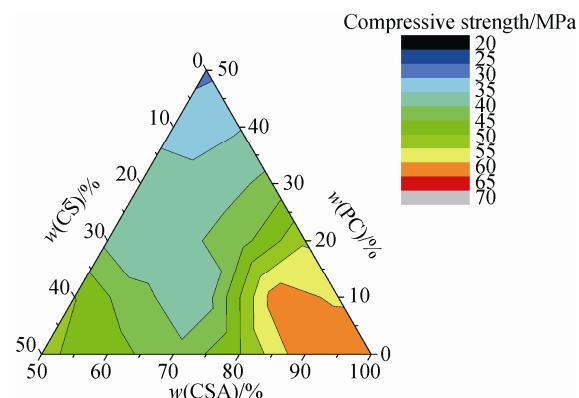


图 8 20 °C 三元体系的 28 d 抗压强度

Fig. 8 28 d-compressive strength of ternary systems at 20 °C

图 9 和图 10 分别为 5 °C 和 40 °C 养护下三元体系砂浆 28 d 抗压强度。5 °C 低温养护下, 纯硫铝酸盐水泥熟料的 28 d 抗压强度较 20 °C(图 8)变化不大。当石膏掺量在 30%~50% 之间时, 三元体系的 28 d 抗压强度亦较 20 °C 变化不大, 保持在 40~50 MPa 之间。但其余情况下, 28 d 强度受温度影响显著, 尤其是当石膏掺量在 10%~20% 时, 5 °C 养护下所得 28 d 抗压强度远低于 20 °C(图 8 蓝色部分)。由图 10 可见, 40 °C

养护下纯硫铝酸盐水泥熟料的28 d强度较20 °C时明显下降, 这与3 d抗压强度的规律一致。高温养护下, 三元体系砂浆的28 d抗压强度更依赖于石膏的掺量, 石膏掺量越高, 抗压强度越高。

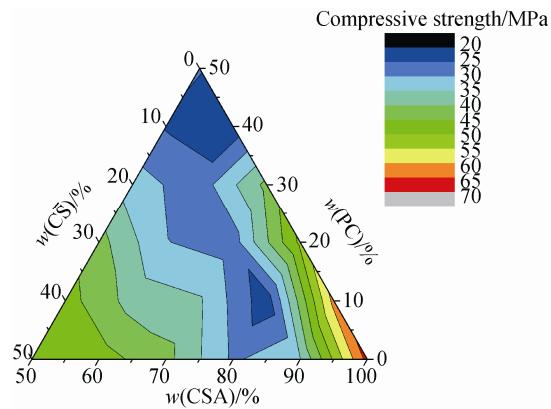


图9 5 °C下三元体系的28 d抗压强度

Fig. 9 28 d-compressive strength of ternary systems at 5 °C

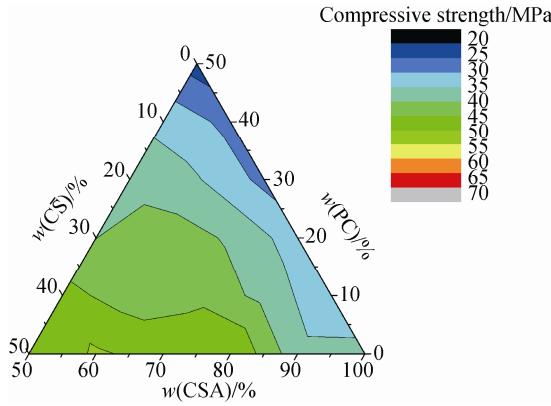


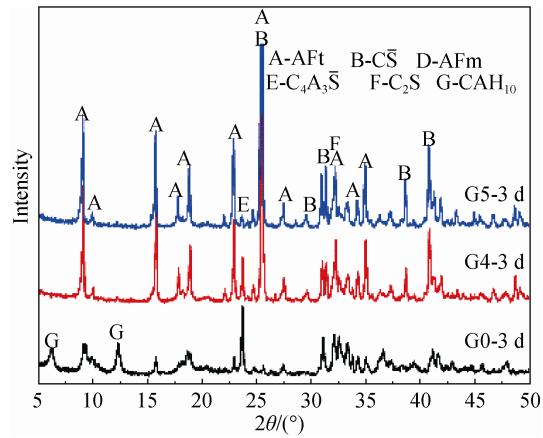
图10 40 °C下三元体系的28 d抗压强度

Fig. 10 28 d-compressive strength of ternary systems at 40 °C

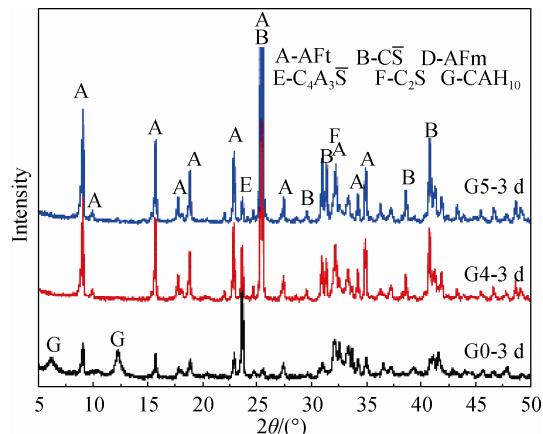
2.3 水化产物组成

2.3.1 硫铝酸盐水泥熟料-无水石膏 硫铝酸盐水泥浆体的硬化主要通过先形成AFt骨架, 随后填充AH₃、AFm和C-S-H凝胶等混合物^[1]。图11为硫铝酸盐水泥熟料(空白样, G0)、掺有40%无水石膏(G4)及掺50%无水石膏(G5)的硫铝酸盐水泥在不同温度下养护3 d后所得浆体的XRD谱。由图11a可见, 20 °C水化3 d后, 空白样品的主要水化产物为AFt和水化铝酸钙, 这与文献^[2,8,10]所述[反应(1)]无水硫铝酸钙的水化不同, 而与反应(2)相符^[17]。对比不同样品的XRD谱可知, 无水石膏的掺入明显促进了水泥浆体中AFt(特征衍射峰2θ=9.1°)的生成, 这说明无水石膏会加速无水硫铝酸钙的水化^[18]。此外, G4、G5浆体的XRD谱中可见明显的无水石膏衍射峰, 说明此时浆体中仍剩余大量无水石膏。且G5浆体的AFt衍射峰强度高于G4, 说明AFt生成量随着石膏掺量的增大而

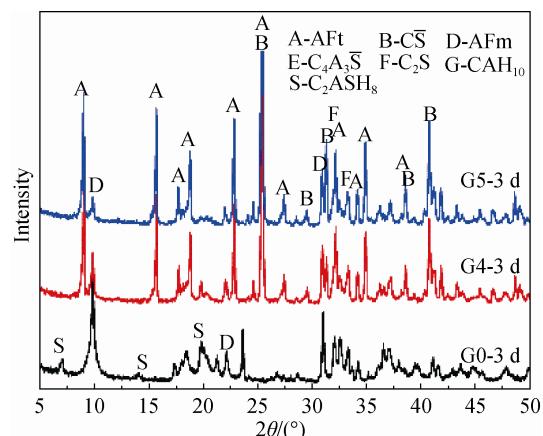
增大。结合20 °C抗压强度的发展规律(图8)可知, 虽然G4和G5浆体中AFt的生成量较空白样有所提升, 但砂浆的抗压强度反而较空白样降低, 这是因为样品中活性较高的无水硫铝酸钙的含量大幅降低, 而过多的无水石膏剩余在浆体中, 常温下并不能发挥胶凝性。



(a) 20 °C

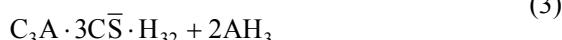
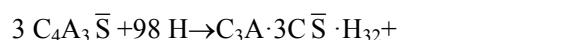


(b) 5 °C



(c) 40 °C

图11 不同温度下硫铝酸盐水泥浆体水化3 d的XRD谱
Fig. 11 XRD patterns of CSA cement cured at different temperatures for 3 d



5 °C(图 11b)时, 各浆体中水化产物种类与20 °C相似, 主要水化产物仍为 AFt。而在40 °C高温下水化3 d后(图 11c), 空白样中的主要水化产物发生显著变化, 从 AFt 和水化铝酸钙(CAH₁₀)转变为 AFm 和水化钙铝黄长石(C₂ASH₈)。而掺有无水石膏的G4和G5样品中, AFt 的特征衍射峰高度较5 °C和20 °C有大幅提升, 这表明石膏掺量充足时, 高温养护促进了AFt的生成。40 °C G5浆体的AFm衍射峰强度较G4有所降低, 说明无水石膏掺量的提高, 为孔溶液提供了更多的硫酸根, 从而抑制了AFm的生成。因水化产物AFt向AFm的转变伴随着硬化浆体的孔隙增大、抗压强度降低, 所以40 °C高温养护下, 石膏的掺入有利于抗压强度的发展。

2.3.2 硫铝酸盐水泥熟料-硅酸盐水泥

图12为硫铝酸盐水泥熟料(空白样, G0)、掺有40%硅酸盐水泥(S4)及掺50%硅酸盐水泥(S5)的二元体系在不同温度下水化3 d后所得浆体的XRD谱。由图12可见, 硅酸盐水泥的掺入, 显著影响了硫铝酸盐水泥的水化。主要水化产物从不掺时的AFt和水化铝酸钙变为AFm和C₂ASH₈。进一步对比可知, 硅酸盐水泥掺量越高, C₂ASH₈的生成量越高, 这是因为高掺量的硅酸盐水泥直接为孔溶液提供了大量硅酸根, 从而与无水硫铝酸钙反应生成C₂ASH₈。此外, 养护温度越高, 越易生成AFm, 这与前人的研究结论一致。因C₂ASH₈和单硫型水化硫铝酸钙均属于AFm族, 呈片状结构, 与针棒状AFt相比结合能更低^[19], 因此硅酸盐水泥的掺入导致硫铝酸盐水泥熟料砂浆的3 d抗压强度降低(图5~图7)。

2.3.3 硫铝酸盐水泥熟料-硅酸盐水泥-无水石膏

图13为不同温度下硫铝酸盐水泥熟料-硅酸盐水泥-石膏浆体水化3 d的XRD谱。由图13可见, 若硫铝酸盐水泥熟料中同时掺入一定量(30%)的硅酸盐水泥和无水石膏, 不同养护温度下的水化产物种类较硫铝酸盐水泥熟料变化不大, 仍以AFt为主。此外, 养护温度越高, 越易生成AFm。这与Pelletier等^[20]所研究的硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥-无水石膏

三元体系的水化机制相同——三元体系水化产物的种类不受配合比的影响, 仅AFm和AFm的生成量受影响。

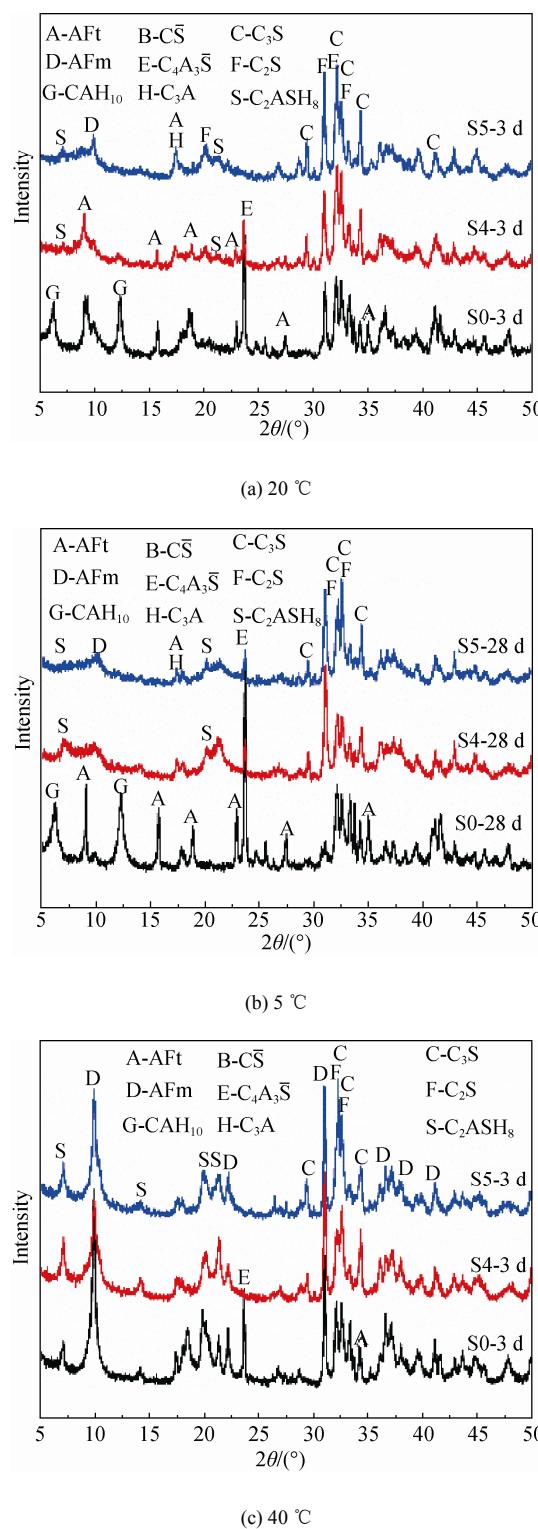


图12 不同温度下硫铝酸盐水泥熟料-硅酸盐水泥浆体水化3 d的XRD谱

Fig. 12 XRD patterns of CSA clinker-Portland cement blends cured at different temperature for 3 d

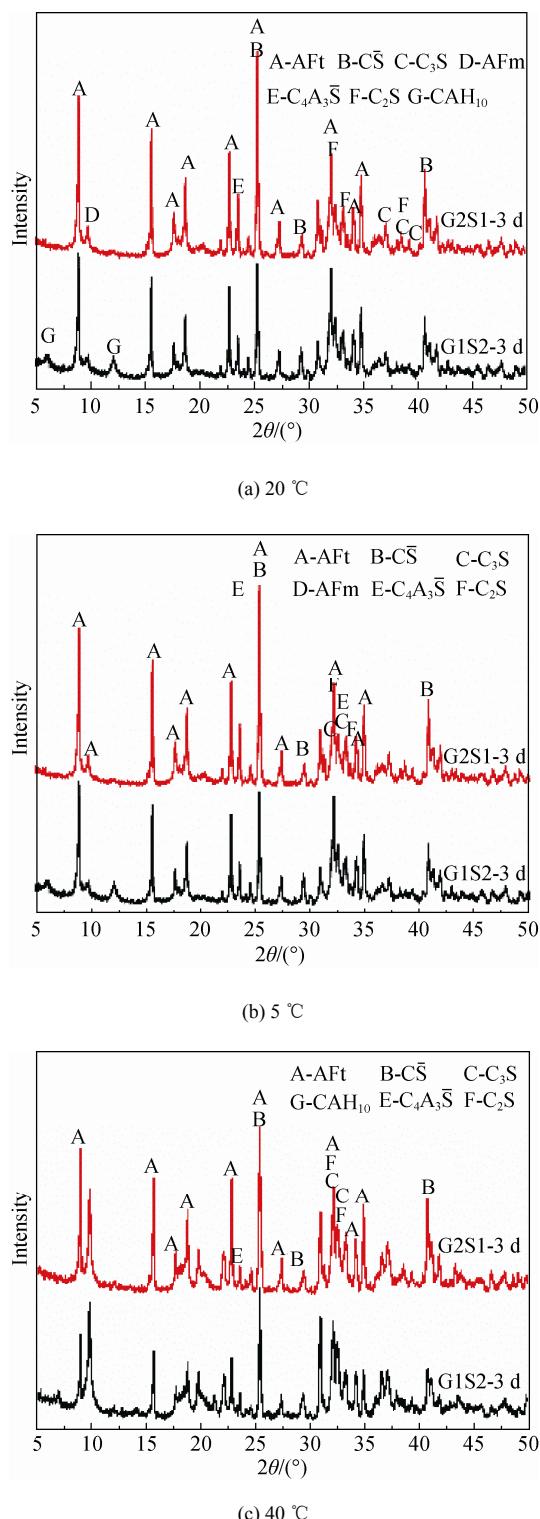


图 13 不同温度下硫铝酸盐水泥熟料-硅酸盐水泥-石膏浆体水化 3 d 的 XRD 谱

Fig. 13 XRD patterns of CSA clinker-Portland cement-anhydrite blends cured at different temperature for 3 d

3 结论

1) 当硅酸盐水泥的掺量在 30%以上时, 所得三

元体系在不同养护温度下的初凝时间变化不大。

2) 欲使不同养护温度下三元体系 3 d 及 28 d 强度变化不大, 石膏掺量宜控制在 25%以上。

3) 与纯硫铝酸盐水泥熟料相比, 单掺硅酸盐水泥时水化产物由 AFt 变为 C_2ASH_8 , 导致硬化浆体力学强度显著降低。而单掺无水石膏或复掺无水石膏和硅酸盐水泥时, 石膏的掺入促进了 AFt 的生成, 有效抑制了向 AFm 的转变(尤其在高温下), 使得高温下的抗压强度略有提升。

参考文献:

- [1] 苏慕珍, 王燕谋, 张量. 硫铝酸盐水泥[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1999.
- [2] PELLETIER-CHAIGNAT L, WINNEFELD F, LOTHENBACH B, et al. Influence of the calcium sulphate source on the hydration mechanism of Portland cement-calcium sulfoaluminate clinker-calcium sulphate binders[J]. Cem Concr Comp, 2011, 33(5): 551–561.
- [3] CHAUNASALI P, MONDAL P. Influence of calcium sulfoaluminate (CSA) cement content on expansion and hydration behavior of various ordinary Portland cement - CSA Blends[J]. J Am Ceram Soc, 2015, 98(8): 2617–2624.
- [4] JANOTKA I, KRAJCI L. An experimental study on the upgrade of sulfoaluminate-belite cement systems by blending with Portland cement[J]. Adv Cem Res, 1999, 11(1): 35–41.
- [5] JANOTKA I, KRAJCI L, MOJUMDAR S C. Influence of Portland cement addition to sulfoaluminate-belite cement on hydration and mechanical properties of hardened mortars[J]. Cer Silik, 2002, 46(3): 110–116.
- [6] JANOTKA I, KRAJCI L, RAY A, et al. The hydration phase and pore structure formation in the blends of sulfoaluminate-belite cement with Portland cement[J]. Cem Concr Res, 2003, 33(4): 489–497.
- [7] LE SAOUT G, LOTHENBACH B, HORI A, et al. Hydration of Portland cement with additions of calcium sulfoaluminates[J]. Cem Concr Res, 2013, 43: 81–94.
- [8] TRAUCHESSEC R, MECHLING J M, LECOMTE A, et al. Impact of anhydrite proportion in a calcium sulfoaluminate cement and Portland cement blend[J]. Adv Cem Res, 2014, 26(6): 325–333.
- [9] TRAUCHESSEC R, MECHLING J M, LECOMTE A, et al. Hydration of ordinary Portland cement and calcium sulfoaluminate cement blends[J]. Cem Concr Comp, 2015, 56: 106–114.
- [10] PELLETIER L, WINNEFELD F, LOTHENBACH B. The ternary system Portland cement-calcium sulfoaluminate clinker-anhydrite: Hydration mechanism and mortar properties[J]. Cem Concr Comp, 2010, 32(7): 497–507.
- [11] TAYLOR H F W. Cement Chemistry[M]. 2nd Ed. Thomas Telford: London, 1997.
- [12] ZHANG Liang. Microstructure and performance of calcium

- sulfoaluminate cements[D]. University of Aberdeen, Aberdeen, 2000.
- [13] ZHANG Liang, GLASSER F P. Hydration products and microstructure of calcium sulfoaluminate cement pastes in different curing regimes[C]. Beijing: 19th international conference on cement chemistry, China, 2015.
- [14] AMBROISE J, PERA J. Use of calcium sulfoaluminate cement to improve strength of mortars at low temperature[J]. Concr Repair, Rehabilitation and Retrofitting II, 2009: 325–326, 457.
- [15] 沈梅非, 邓中言, 刘克忠. 双快型砂水泥中不同石膏形态的研究[J]. 硅酸盐学报, 1982, 10(3): 298–308.
SHEN Meifei, DENG Zhongyan, LIU Kezhong. J Chin Silic Soc, 1982, 10(3): 298–308.
- [16] 王培铭, 李楠, 徐玲琳, 等. 低温养护下硫铝酸盐水泥的水化进程及强度发展[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(2): 242–248.
WANG Peiming, LI Nan, XU Linglin, et al. J Chin Ceram Soc, 2017, 45(2): 242–248.
- [17] WINNEFELD F, LOTHENBACH B. Phase equilibria in the system $\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{O}_{12}\text{SO}_4-\text{Ca}_2\text{SiO}_4-\text{CaSO}_4-\text{H}_2\text{O}$ referring to the hydration of calcium sulfoaluminate cements[J]. RILEM, 2016(1): 10–16.
- [18] WINNEFELD F, BARLAG S. Calorimetric and thermogravimetric study on the influence of calcium sulfate on the hydration of ye'elimitite[J]. J Therm Anal Calorim, 2010, 101(3): 949–957.
- [19] SANTACRUZ I; CUESTA A, DE IA TORRE A G, et al. Structure of stratingite and effect of hydration methodology on microstructure[J]. Adv Cem Res, 2016, 28(1): 13–22.
- [20] PELLETIER L, WINNEFELD F, LOTHENBACH B. The ternary system Portland cement - calcium sulfoaluminate clinker-anhydrite: hydration mechanism and mortar properties[J]. Cem Concr Comp, 2010(32): 497–507.