

文章编号:1007-9629(2022)09-0893-08

磷建筑石膏对硫铝酸盐水泥熟料收缩特性的影响

黄浩然^{1,2}, 廖宜顺^{1,3,*}, 江国喜¹, 廖国胜^{1,3}, 梅军鹏^{1,3}

(1. 武汉科技大学 城市建设学院, 湖北 武汉 430065; 2. 中国一冶集团有限公司, 湖北 武汉 430080;
3. 武汉科技大学 高性能工程结构研究院, 湖北 武汉 430065)

摘要:研究了不同掺量磷建筑石膏对硫铝酸盐水泥熟料凝结时间、化学收缩、自收缩、浆体内部相对湿度和干燥收缩的影响。结果表明:随着磷建筑石膏掺量的增加,熟料浆体的凝结时间显著缩短,化学收缩变化速率加快,浆体内部相对湿度逐渐降低,浆体自收缩与内部相对湿度具有较好的相关性;当磷建筑石膏掺量不超过 25% 时,硫铝酸盐水泥浆体化学收缩到达稳定阶段的时间缩短;当磷建筑石膏掺量为 25%~30% 时,硫铝酸盐水泥浆体在自收缩测试条件下产生膨胀,且干燥收缩小于空白组。

关键词:磷建筑石膏;化学收缩;自收缩;内部相对湿度;干燥收缩

中图分类号:TQ172

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.09.002

Effect of Phosphorous Calcined Gypsum on Shrinkage Characteristics of Calcium Sulfoaluminate Cement Clinker

HUANG Haoran^{1,2}, LIAO Yishun^{1,3,*}, JIANG Guoxi¹, LIAO Guosheng^{1,3}, MEI Junpeng^{1,3}

(1. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 2. China First Metallurgical Group Company Limited, Wuhan 430080, China; 3. Institute of High Performance Engineering Structure, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

Abstract: The setting time, chemical shrinkage, autogenous shrinkage, internal relative humidity and drying shrinkage of calcium sulfoaluminate (CSA) cement clinker blended with different amounts of phosphorous calcined gypsum (PCG) were investigated. The results show that the setting time of paste is shortened significantly with the increase of PCG content, and the rate of chemical shrinkage and the internal relative humidity of the paste is decreased gradually. The autogenous shrinkage has a good relationship with the internal relative humidity of the paste. The stable stage of chemical shrinkage is accelerated when the content of PCG is not more than 25%. When the content of PCG is 25% to 30%, the CSA cement paste expanded during the autogenous shrinkage test and the drying shrinkage of CSA cement clinker pastes are less than the control sample.

Key words: phosphorous calcined gypsum(PCG); chemical shrinkage; autogenous shrinkage; internal relative humidity; drying shrinkage

硫铝酸盐(CSA)水泥是在水泥熟料中掺加适量石膏和石灰石,三者共同磨细制备而成的水硬性胶凝材料^[1]。其中水泥熟料的主要矿物成分为硫铝酸钙(C₄A₃S)和硅酸二钙(C₂S)。当 CSA 水泥中石膏掺量

较少时,其早期水化明显加快;当石膏掺量较多时,硬化浆体后期强度会发生倒缩^[2]。当 CSA 水泥掺入硬石膏时,因硬石膏溶解缓慢,SO₄²⁻供应不足,导致钙矾石(Aft)生成受阻^[3]。当 CSA 水泥同时掺入石膏

收稿日期:2021-07-27; 修订日期:2021-10-07

基金项目:长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2019756/KY);国家自然科学基金资助项目(51608402)

第一作者:黄浩然(1996—),女,河南罗山人,武汉科技大学硕士生。E-mail: 2819476170@qq.com

通讯作者:廖宜顺(1984—),男,湖北江陵人,武汉科技大学副教授,硕士生导师,博士。E-mail: liaoyishun@wust.edu.cn

和硬石膏时,石膏的存在会加速硬石膏的溶解,进而改变CSA水泥的水化动力,从而其抗压强度得以提高^[4].由此可见,石膏的种类及掺量对CSA水泥的水化反应有显著影响.

磷石膏是以磷矿石为原料,湿法生产磷酸时产生的工业废弃物^[5].研究表明,磷石膏中的磷酸盐杂质对硅酸盐水泥的水化具有缓凝作用,并且对硅酸盐水泥和CSA水泥的凝结时间和强度有较大影响^[6-8].掺入磷石膏的CSA水泥熟料水化时,可溶性磷酸盐与 $C_4A_3\bar{S}$ 解离释放的 Ca^{2+} 相结合,生成难溶的 $Ca_3(PO_4)_2$,并包裹在水泥颗粒表面,延缓了水泥的水化,降低了水泥体系中的 Ca^{2+} 浓度,延缓了AFt的形成^[7].但磷酸盐与氟盐等磷石膏中的杂质对CSA水泥性能的影响机理研究还很缺乏.目前仍有85%左右的磷石膏长期堆存,既占用大量土地资源,又对周边环境造成严重污染^[9],因此磷石膏的资源化综合利用问题亟待解决.将磷石膏煅烧生成的磷建筑石膏(PCG)用作生产建筑材料的原材料,是目前磷石膏利用最普遍和最成熟的技术方法之一^[8].由于CSA水泥对杂质具有不敏感性,可在一定程度上抵

消杂质对其水化性能的影响^[10],因此将PCG应用于CSA水泥中,不仅具有良好的经济效益,而且对推进磷石膏资源化利用具有重要意义.

收缩是混凝土的一个主要特性,由收缩引起的混凝土开裂导致其使用寿命大大降低^[11].不同品种CSA水泥的主要区别之一是石膏系数有所不同^[12],从而导致CSA水泥的体积稳定性显著不同,石膏系数越大则水泥越易产生膨胀.目前,CSA水泥生产中通常采用的是石膏或硬石膏,而PCG属于半水石膏,它对CSA水泥体积稳定性的影响规律尚不明确.因此,本文研究了不同掺量PCG对CSA水泥熟料浆体化学收缩、自收缩和干燥收缩的影响规律,旨在分析PCG影响CSA水泥体积稳定性的作用机理.

1 试验

1.1 原材料与配合比

CSA水泥熟料由唐山北极熊建材有限公司生产;磷建筑石膏(PCG)来自湖北宜化集团,pH值为5.6.原材料的化学组成(质量分数,文中涉及的组成、水灰比等均为质量分数或质量比)如表1所示.

表1 原材料的化学组成
Table 1 Chemical compositions of raw materials

Material	CaO	Al ₂ O ₃	SO ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SrO	F	IL
Clinker	45.820	33.820	5.970	9.440	0.900	1.810	0.540	1.160	0.005	0	0	0	0.410
PCG	43.030	0.990	36.350	9.510	0.400	0.660	0.290	0.082	0.170	1.910	0.890	0.860	4.800

采用X射线衍射仪(XRD)对未水化的CSA水泥熟料和PCG矿物组成进行分析,结果见图1.由图1可见:CSA水泥熟料的主要矿物成分为 $C_4A_3\bar{S}$ 和 C_2S ;PCG的主要矿物成分为半水石膏

($CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$)和石英(SiO_2).

将质量分数为0%、5%、10%、15%、20%、25%和30%的PCG分别等质量替代水泥熟料制备试件,编号依次记作Control、PCG5、PCG10、PCG15、

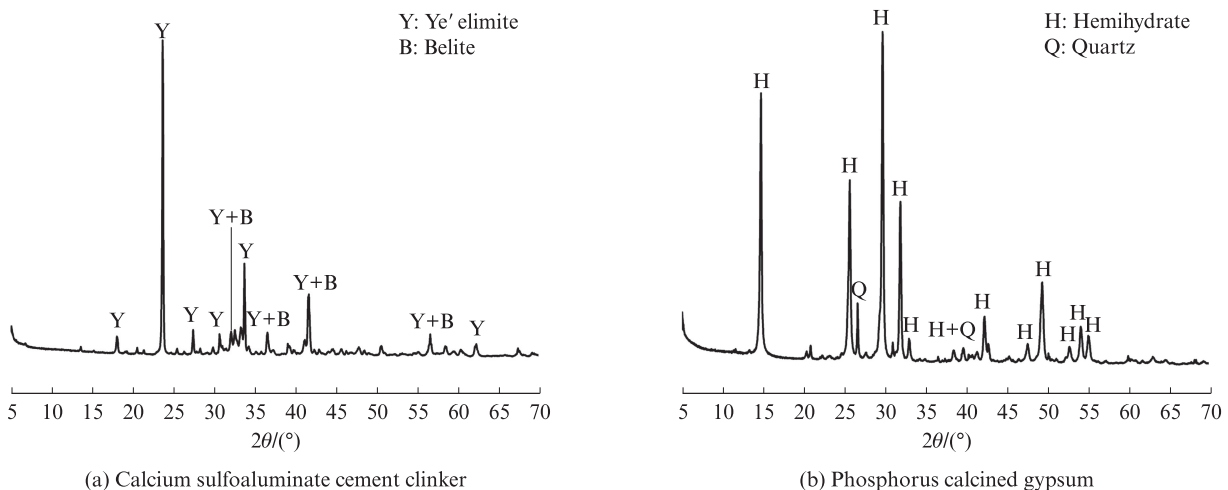


图1 原材料的XRD图谱
Fig. 1 XRD patterns of raw materials

PCG20、PCG25和PCG30.需要说明的是,除化学收缩试验采用去离子水外,其余试验用水均为武汉市自来水.

1.2 试验方法

水泥浆体的凝结时间按照 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.由于标准稠度水泥浆体的水灰比较小,不便成型,本研究考虑到 CSA 水泥完全水化时的理论需水量较大,掺入减水剂会对水泥水化和体积稳定性产生影响,所选用的水灰比为 0.6,此时水泥浆体的匀质性不如标准稠度水泥浆体,因此在在进行终凝时间测定时不翻转试模.

水泥浆体的化学收缩根据 ASTM C1608—17《Standard test method for chemical shrinkage of hydraulic cement paste》中的膨胀测定法进行测试.加水后 3 h 内,每隔 15 min 记录 1 次化学收缩数据;3~12 h 内,每隔 30 min 记录 1 次数据;12~24 h 内,每隔 1 h 记录 1 次数据;24~72 h 内,每隔 2 h 记录 1 次数据,夜间除外.

采用 TH10S-B 型湿度传感器(相对湿度适用范围为 0%~100%)测定水泥浆体内部相对湿度变化情况.

水泥浆体的自收缩与干燥收缩采用北京仪创时代科技有限公司产 YC-JS 全自动混凝土收缩膨胀仪进行测试.干燥收缩根据 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》测定,将终凝后的水泥浆体试件置于(20±1)℃、相对湿度(60±5)%的条件下进行测试,测试时间为 168 h.

2 结果与讨论

2.1 凝结时间

PCG 掺量对 CSA 水泥浆体凝结时间的影响如图 2 所示.由图 2 可见:PCG 的掺入显著缩短了 CSA 水泥浆体的凝结时间,且 CSA 水泥浆体的凝结时间随 PCG 掺量的增加逐渐缩短,但变化幅度较小;未掺入 PCG 时,水泥熟料的早期水化较慢,凝结时间较长.这与文献[12]的报道一致.当掺入 PCG 后,一方面,PCG 可快速溶解产生 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} ,促进 $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$ 水化,AFt 和铝胶快速生成,并逐渐交叉搭接,使水泥浆体快速凝结;另一方面,PCG 也可水化生成二水石膏,该过程的凝结速率也较快.因此,与未掺 PCG 的 CSA 水泥相比,掺入 PCG 后 CSA 水泥浆体的凝结时间显著缩短.

当 PCG 掺量由 5% 逐渐增至 30% 时,PCG 溶出更多的 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} ,水化产物的生成速率加快,水泥

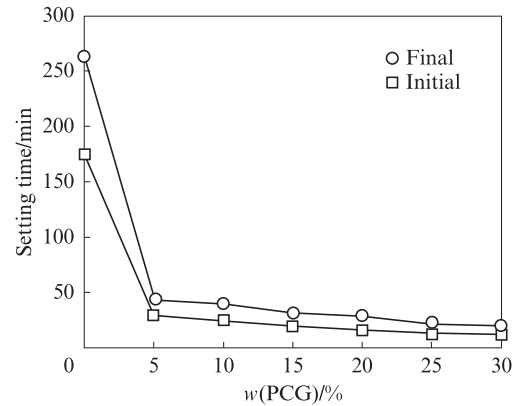


图 2 PCG 掺量对 CSA 水泥浆体凝结时间的影响
Fig. 2 Influence of PCG content on setting time of CSA cement paste

浆体的凝结时间持续缩短,以 AFt 和铝胶为主的水化产物附着在水泥颗粒表面并形成包裹层,阻碍了水泥颗粒的进一步反应^[13],因此水泥浆体凝结时间的变化幅度不大.随着水化产物的积累,渗透压力使水化产物的包裹层破裂,水泥水化速率增加,AFt 和铝胶等水化产物再次快速生成,并产生交叉搭接,水泥浆体凝结至完全失去塑性^[14-15].

2.2 化学收缩

PCG 掺量对 CSA 水泥浆体化学收缩及其变化速率的影响如图 3 所示.

由图 3(a)可见:(1)72 h 内,CSA 水泥浆体的化学收缩随 PCG 掺量增加而降低.(2)空白组(Control)试件的化学收缩在 6 h 内增长缓慢,6~24 h 内化学收缩速率迅速增大,16 h 时超过其他试件,达到稳定阶段需 36 h 左右;当 PCG 掺量不超过 25% 时,试件的化学收缩到达稳定阶段所需时间随着 PCG 掺量的增加而缩短;当 PCG 掺量为 30% 时,CSA 水泥浆体的化学收缩达到稳定阶段的时间约为 48 h. PCG 掺入 CSA 水泥熟料中,促进了 $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$ 水化,且 PCG 溶于水后所释放的 SO_4^{2-} 维持了部分水化产物的稳定^[16-18],快速生成的 AFt 在熟料颗粒表面形成包裹层,限制了水分输送和离子迁移^[19].随着水泥体系中 SO_4^{2-} 浓度的增加,AFt 生成量增加,包裹层变厚,在此过程中,离子积累产生渗透压,使得包裹层破裂所需时间延长.因此,PCG30 试件的化学收缩达到稳定阶段的时间比空白组试件更长.

由图 3(b)可见:(1)各试件的化学收缩变化速率曲线出现 2 个峰值;PCG 溶解产生 Ca^{2+} 及 SO_4^{2-} ,促进了 $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$ 的水化,水化产物生成速率加快,相较于空白组试件,其他试件的前期化学收缩变化速率峰值出现时间提前.(2)当 PCG 掺量由 0% 增至 15% 时,

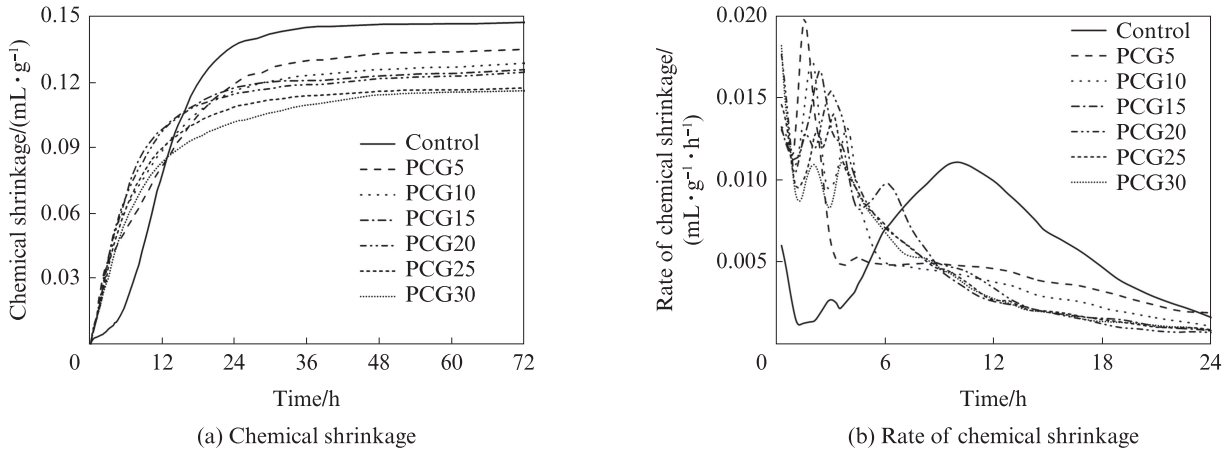


图3 PCG 掺量对 CSA 水泥浆体化学收缩及其变化速率的影响
Fig. 3 Influence of PCG content on chemical shrinkage and change rate of CSA cement paste

第1个峰出现的时间延后且峰值降低,第2个峰的峰值降低,但峰宽增加.这是由于PCG掺量较少时, $C_4A_3\bar{S}$ 与 SO_4^{2-} 反应迅速,形成第1个峰,AFt覆盖于熟料颗粒表面,阻碍熟料颗粒与 SO_4^{2-} 、水继续反应^[13];随着熟料和PCG的继续溶解,水泥体系中积累的过饱和离子形成渗透压,破坏了AFt包裹层,反应继续进行,从而形成第2个峰^[14],因 SO_4^{2-} 在水化早期已被大量消耗,故第2个峰值较低.(3)当PCG掺量较大时,与水拌和后所释放的大量 SO_4^{2-} 与 $C_4A_3\bar{S}$ 发生反应,显著加快水泥水化进程,表现为PCG20、PCG25和PCG30试件的2个峰峰值相近且时间间隔缩短.这是因为随着水化反应的进行,水化产物增多,使得复合体系中的固相越来越多,离子迁移困难,水化反应速率减慢,化学收缩速率减慢.

2.3 浆体内部相对湿度和自收缩

PCG掺量对 CSA 水泥浆体内部相对湿度的影响如图4所示.由图4可见:(1)随着养护龄期的延

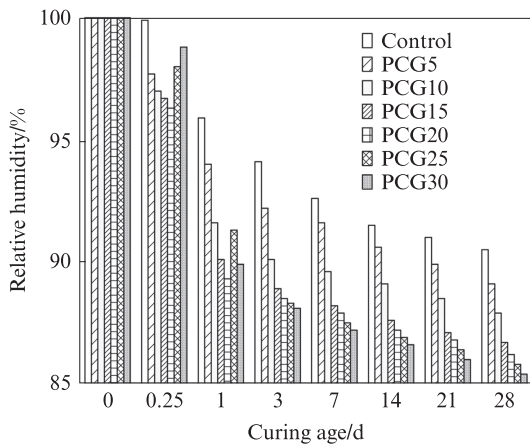


图4 PCG 掺量对 CSA 水泥浆体内部相对湿度的影响
Fig. 4 Influence of PCG content on internal relative humidity of CSA cement paste

长,各试件的内部相对湿度均显著降低.(2)在1d龄期时,PCG25和PCG30试件的内部相对湿度分别为91.3%和89.9%.这是因为当PCG掺量较多时,一方面,部分PCG溶解产生的 SO_4^{2-} 与 $C_4A_3\bar{S}$ 反应生成AFt,消耗浆体内部自由水;另一方面,部分PCG与水反应生成二水石膏^[1,18].在上述2种因素的共同作用下,浆体内部自由水被大量消耗.(3)在28d龄期,当PCG掺量由0%增至30%时,各试件的内部相对湿度逐渐降低.这是因为PCG掺量增加的同时CSA水泥熟料减少,此时,浆体内部相对湿度减小,另外PCG的掺入导致水泥所消耗的水增加,从而使得相同质量的PCG和CSA水泥完全水化时,PCG的需水量远小于CSA水泥的需水量.有研究表明,石膏可促进CSA水泥的水化,当石膏掺量不超过30%时,CSA水泥水化的化学需水量与AFt的生成量随着石膏掺量的增加而增加^[19].

PCG掺量对 CSA 水泥浆体的自收缩及其变化速率的影响如图5所示.

由图5(a)可见:(1)在168h内,当PCG掺量为5%~15%时,随着PCG掺量的增加,试件自收缩曲线逐渐上升;当PCG掺量为20%~30%时,随着PCG掺量的增加,试件自收缩曲线逐渐下降.(2)掺入PCG后,各试件首先进入一段微小的收缩阶段,收缩量较小,然后进入膨胀阶段,接着迅速进入收缩期,收缩量快速增加;4h后进入平稳阶段,水化缓慢,收缩量较小,且收缩速率减慢.随着水化的进行,水化产物的生成消耗了大量毛细水,浆体内部相对湿度降低引起自干燥作用,毛细孔收缩应力增加,硬化浆体产生自收缩^[20].由于PCG的掺入,CSA水泥在水化前期AFt大量生成,颗粒间的自由水被大量消耗,自干燥作用快速增强^[21],此时硬化浆体的强度不足

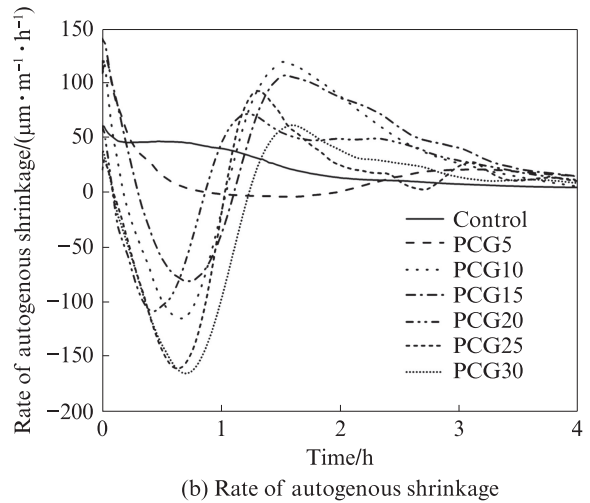
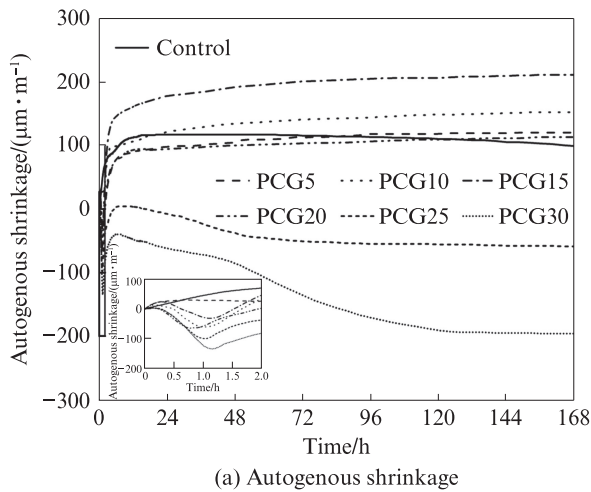


图5 PCG掺量对CSA水泥浆体自收缩曲线及其变化速率的影响
Fig. 5 Influence of PCG content on autogenous shrinkage and change rate of CSA cement paste

以抵抗自干燥产生的应力,同时水分被大量消耗,AFt生成速率减慢,从而导致收缩快速增大.由于空白组试件内部保持着较高的相对湿度,自干燥作用相对较弱,所以当PCG掺量为5%~15%时,各试件的自收缩大于空白组;当PCG掺量超过15%时,水泥体系中存在较多的SO₄²⁻,可维持AFt的稳定^[16],且富余的建筑石膏凝结硬化后具有微膨胀性^[11],所以PCG25和PCG30水化后期表现为膨胀.

由图5(b)可见,试件收缩阶段持续时间随着PCG掺量的增加而缩短.这是由于PCG的掺入加速了水泥水化,进入膨胀阶段后,随着PCG掺量的增加,AFt生成速率加快,膨胀量也逐渐增加,补偿了收缩阶段的收缩量.

张君等^[22]研究发现,硅酸盐水泥浆体的收缩变形与其内部相对湿度之间具有较好的因果关联性.在此基础上,本文建立了CSA水泥浆体7 d内的自收缩(S)与内部相对湿度(RH)之间的关系,如图6所示.由图6可见:当PCG的掺量为5%~20%时,随着浆体内部相对湿度的减小,CSA水泥浆体自收缩逐渐增大,自收缩与相对湿度间具有较好的线性关系,线性拟合方程的相关系数(R²)均大于0.95;当PCG的掺量为25%和30%时,CSA水泥浆体自收缩随着浆体内部相对湿度的减小而减小,自收缩与相对湿度之间不符合线性关系;当PCG的掺量为0%时,CSA水泥浆体自收缩与浆体内部相对湿度之间的关系较复杂,总体上水泥浆体自收缩随浆体内部相对湿度的减小而增加,在168 h时自收缩略有减小(见图5),表明空白组试件产生了一定膨胀,该浆体内部相对湿度的动态变化规律及其对自收缩的影响机理有待深入研究.

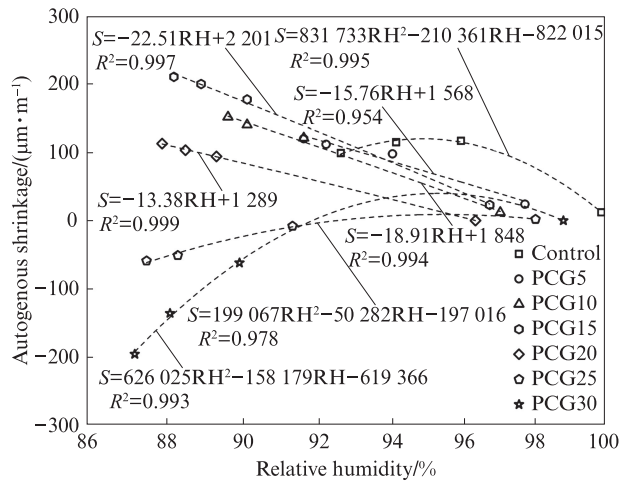


图6 CSA水泥浆体自收缩与浆体内部相对湿度的关系
Fig. 6 Relationship between autogenous shrinkage and internal relative humidity of CSA cement paste

2.4 线性化学收缩与自收缩的关系

根据材料各向同性原理,线性变形是体积变形的1/3,将水泥浆体单位体积的化学收缩除以3即得到线性化学收缩^[23-24].图7为PCG15试件线性化学收缩与自收缩的对比曲线.由图7可见:32 min(PCG15试件终凝时间)~13 h内,PCG15试件的化学收缩快速增大,大量水分被迅速消耗,出现自干燥现象,进而产生较大的自收缩,自收缩数值远小于化学收缩数值,与文献[25]中硅酸盐水泥浆体自收缩与化学收缩的关系基本一致;13 h后,PCG15试件的线性化学收缩和自收缩曲线变化趋势相同.

针对PCG15试件13 h后的线性化学收缩与自收缩关系进行定量分析.根据式(1)分别计算出PCG试件24、48、72 h的自收缩变化量(Δε_{as})与线性化学收缩变化量(Δε_{cs})的比值γ^[11],其计算表达

式为:

$$\gamma = \frac{\Delta\epsilon_{as}}{\Delta\epsilon_{cs}} = \frac{\epsilon_{as}(t)}{\epsilon_{cs}(t) - \epsilon_{cs}(t_{13h})} \quad (1)$$

式中: $\epsilon_{as}(t)$ 为 CSA 水泥浆体 t 时刻的自收缩, $\mu\text{m}/\text{m}$; $\epsilon_{cs}(t)$ 为 CSA 水泥浆体 t 时刻的化学收缩, $\mu\text{m}/\text{m}$; $\epsilon_{cs}(t_{13h})$ 为 CSA 水泥浆体在 13 h 时的化学收缩, $\mu\text{m}/\text{m}$.

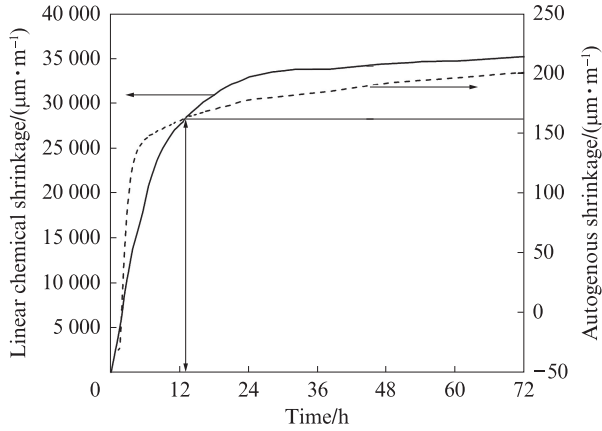


图7 PCG15试件线性化学收缩与自收缩之间的关系
Fig. 7 Relationship between linear chemical shrinkage and autogenous shrinkage of specimen PCG15

PCG 试件 24、48、72 h 线性化学收缩与自收缩的比例关系如图 8 所示. 由图 8 可见: 各试件的 γ 值均小于 2.5%, 且 γ 值总体上随着时间的延长呈现降低趋势, 即 PCG 试件自收缩占线性化学收缩的比例随着时间的延长而降低; PCG25 试件和 PCG30 试件水化后期产生膨胀, 自收缩值为负值. 原因是绝大部分化学收缩以孔体积缩小的形式存在, 随着水化反应的进行, 水泥浆体结构逐渐致密, 试件表现体积变形受到约束, γ 值逐渐减小^[23].

2.5 干燥收缩

PCG 掺量对 CSA 水泥浆体的干燥收缩及其变

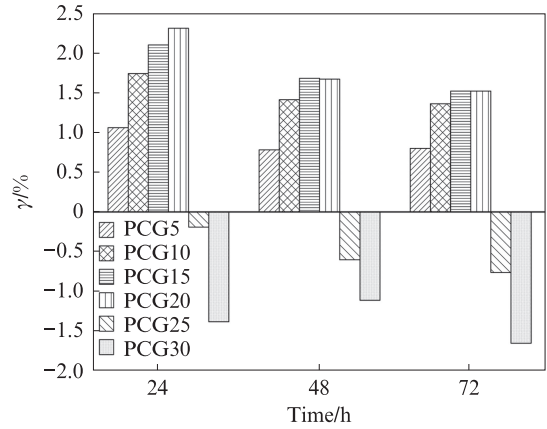
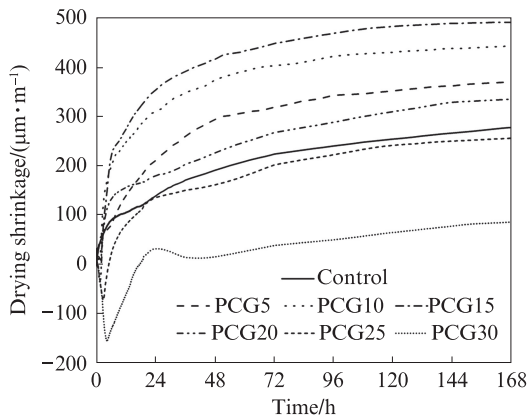


图8 PCG 试件 24、48、72 h 自收缩与线性化学收缩的比例关系

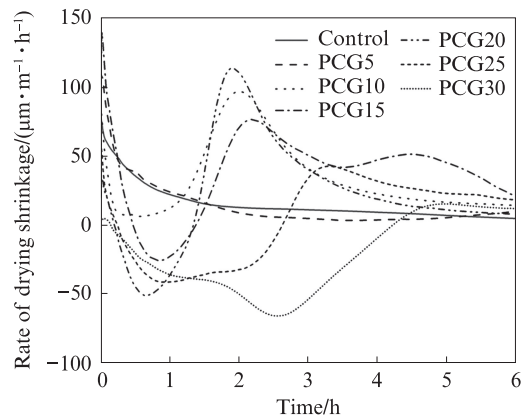
Fig. 8 Ratio of linear chemical shrinkage to autogenous shrinkage of PCG specimens at 24, 48, 72 h

化速率的影响如图 9 所示.

由图 9(a) 可见, (1) 在 168 h 内, 当 PCG 掺量由 0% 增至 15% 时, 试件干燥收缩曲线逐渐上升; 当 PCG 掺量为 20%~30% 时, 随着 PCG 掺量的增加, 试件干燥收缩曲线逐渐下降, 且 PCG 掺量为 25%~30% 时, 试件干燥收缩值小于空白组. (2) 相比 CSA 水泥浆体自收缩曲线, 干燥收缩曲线呈现不同的变化——各试件水化初期首先进入一段微小的收缩阶段, 收缩量较小; 随着水泥水化的进行, 空白组试件继续收缩, 掺入 PCG 的试件则呈现膨胀趋势, 且随着 PCG 掺量的增加, 其早期膨胀量有所增加. 原因是随着水泥水化的进行, 在水分变化的条件下, 毛细管作用力是引起干燥收缩的主要原因^[26]. 硬化石膏中的孔较大, 收缩较小. 然而, $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$ 水化形成的水化产物改变了孔隙结构, 从而导致试件内部毛细孔增多, 干燥收缩增大^[27]. 当 PCG 掺量超过 20% 时, 水化产物 AFt 的生成以及富余的 PCG 凝结硬化均导致试件产生膨胀.



(a) Drying shrinkage



(b) Rate of drying shrinkage

图9 PCG 掺量对 CSA 水泥浆体的干燥收缩及其变化速率的影响

Fig. 9 Influence of PCG content on drying shrinkage and its change rate of CSA cement paste

由图9(b)可见,试件的膨胀阶段随着PCG掺量的增加而显著延长。这是因为相较于自收缩变化,由于AFt大量生成,同时试件与外界进行水分交换,在一定程度上减小了浆体内部自干燥作用,从而降低了浆体的自应力所致。当试件进入快速收缩阶段后,由于前期AFt大量生成,颗粒间的自由水和 $C_4A_3\bar{S}$ 被大量消耗,水泥的水化反应减慢,同时试件与环境中进行着大量的水分交换^[28],加之水泥水化留下较多毛细孔,形成了较多的连通孔,从而导致各试件产生大幅度收缩。PCG25试件和PCG30试件的收缩仍较其他试件小,是因为前一阶段产生的膨胀量抵消了部分收缩量。

3 结论

(1)PCG的掺入使得CSA水泥浆体的凝结时间显著缩短。当PCG掺量不超过25%时,CSA水泥浆体的化学收缩到达稳定阶段的时间缩短。在72 h时,随着PCG掺量的增加,CSA水泥浆体的化学收缩逐渐减小。

(2)3~28 d时,随着PCG掺量的增加,CSA水泥浆体的内部相对湿度逐渐降低。浆体内部相对湿度与其自收缩具有较好的相关性,可由浆体内部相对湿度的变化来预测自收缩变化规律。CSA水泥浆体的自收缩占化学收缩的比例随着时间的延长而降低。

(3)当PCG掺量为25%~30%时,CSA水泥浆体在自收缩测试后期表现为膨胀,且CSA水泥浆体的干燥收缩小于空白组。

参考文献:

- [1] 林宗寿. 胶凝材料科学[M]. 第2版. 武汉:武汉理工大学出版社, 2018:129-131.
LIN Zongshou. Cementitious material science [M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2018:129-131. (in Chinese)
- [2] 徐玲琳,周向艺,李楠,等. 石膏对硫铝酸盐水泥水化特性的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(6):885-890.
XU Linglin, ZHOU Xiangyi, LI Nan, et al. Impact of calcium sulfate on hydration features of calcium sulfoaluminate cement[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(6): 885-890. (in Chinese)
- [3] BULLERJAHN F, SKOCEK J, HAHN M B, et al. Chemical shrinkage of ye'elimite with and without gypsum addition[J]. Construction and Building Materials, 2019, 200:770-780.
- [4] WINNEFELD F, MARTIN L H J, MULLER C J, et al. Using gypsum to control hydration kinetics of CSA cements [J]. Construction and Building Materials, 2017, 155:154-163.
- [5] 杨志强,陈晴,郭清春,等. 磷石膏在水泥生产中的应用现状与展望[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(9):2860-2865.
YANG Zhiqiang, CHEN Qing, GUO Qingchun, et al. Current status and prospects on utilization of phosphogypsum in cement production[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(9):2860-2865. (in Chinese)
- [6] ISLAM G, CHOWDHURY F H, RAIHAN M T, et al. Effect of phosphogypsum on the properties of portland cement [J]. Procedia Engineering, 2017, 171:744-751.
- [7] HUANG Y B, QIAN J S, LIU C Z, et al. Influence of phosphorus impurities on the performances of calcium sulfoaluminate cement[J]. Construction and Building Materials, 2017, 149:37-44.
- [8] 马保国,胡鹏辉,苏英,等. 磷建筑石膏的凝结时间与强度调控研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(10):3047-3053.
MA Baoguo, HU Penghui, SU Ying, et al. Study on setting time and strength control of phosphorus building gypsum[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(10):3047-3053. (in Chinese)
- [9] MIN C D, SHI Y, LIU Z X. Properties of cemented phosphogypsum (PG) backfill in case of partially substitution of composite Portland cement by ground granulated blast furnace slag [J]. Construction and Building Materials, 2021, 305:124786.
- [10] SHEN Y, QIAN J S, CHAI J Q, et al. Calcium sulfoaluminate cements made with phosphogypsum: Production issues and material properties[J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 48:67-74.
- [11] 郭大卫. 钢渣粉对硫铝酸盐水泥水化及收缩特性的影响研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2020.
GUO Dawei. Effect of steel slag on the hydration and shrinkage characteristics of calcium sulfoaluminate cement [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [12] 王燕谋,苏慕珍,张量. 硫铝酸盐水泥[M]. 北京:北京工业大学出版社, 1999:122-123.
WANG Yanmou, SU Muzhen, ZHANG Liang. Sulphoaluminate cement [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1999:122-123. (in Chinese)
- [13] 韩建国,阎培渝. 锂化合物对硫铝酸盐水泥水化历程的影响[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(4):608-614.
HAN Jianguo, YAN Peiyu. Influence of lithium compound on sulfoaluminate cement hydration process [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(4):608-614. (in Chinese)
- [14] 魏小胜. 用电阻率表征水泥混凝土结构形成动力学及性能[M]. 武汉:武汉理工大学出版社, 2016:28-30.
WEI Xiaosheng. Kinetics of structure formation and properties of concrete by electrical resistivity measurement[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2016:28-30. (in Chinese)
- [15] 梁旭辉,刘芳,许耀文,等. 硅酸盐水泥改性磷建筑石膏及水化机理研究[J]. 非金属矿, 2018, 41(2):45-47.
LIANG Xuhui, LIU Fang, XU Yaowen, et al. Study on modification of hemihydrate phosphogypsum with ordinary Portland cement and its hydration mechanism[J]. Non-Metallic Mines, 2018, 41(2):45-47. (in Chinese)

- [16] 钱觉时,余金城,孙化强,等.钙矾石的形成与作用[J].硅酸盐学报,2017,45(11):1569-1581.
QIAN Jueshi, YU Jincheng, SUN Huaqiang, et al. Formation and function of ettringite in cement hydrates[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45 (11) : 1569-1581. (in Chinese)
- [17] CHRISTENSEN A N, JENSEN T R, HANSON J C. Formation of ettringite, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$, AFt, and monosulfate, $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{SO}_4)\cdot 14\text{H}_2\text{O}$, AFm-14, in hydrothermal hydration of Portland cement and of calcium aluminum oxide-calcium sulfate dihydrate mixtures studied by in situ synchrotron X-ray powder diffraction[J]. Journal of Solid State Chemistry, 2004, 177:1944-1951.
- [18] HARGIS C W, TELESCA A, MONTERIRO P J M. Calcium sulfoaluminate (Ye'elinite) hydration in the presence of gypsum [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 65:15-20.
- [19] GLASSER F P, ZHANG L. High-performance cement matrices based on calcium sulfoaluminate-belite compositions[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(12):1881-1886.
- [20] 刘加平,田倩.现代混凝土早期变形与收缩裂缝控制[M].北京:科学出版社,2020:79.
LIU Jiaping, TIAN Qian, Early age deformation and shrinkage crack control of modern concrete [M]. Beijing: Science Press, 2020:79. (in Chinese)
- [21] SIRTOLIA D, WYRZYKOWSKI M, RIVA P, et al. Shrinkage and creep of high-performance concrete based on calcium sulfoaluminate cement[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 98:61-73.
- [22] 张君,陈浩宇,侯东伟.水泥净浆、砂浆及混凝土早期收缩与内部湿度发展分析[J].建筑材料学报,2011,14(3):287-292.
ZHANG Jun, CHEN Haoyu, HOU Dongwei. Development of shrinkage and internal moisture in cement paste, mortar and concrete at early age[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14 (3):287-292. (in Chinese)
- [23] 左义兵,魏小胜.粉煤灰水泥浆体的电阻率与化学收缩及自收缩的相互关系[J].重庆大学学报,2015,38(4):45-54.
ZUO Yibing, WEI Xiaosheng. Relations among electrical resistivity, chemical shrinkage and autogenous shrinkage of fly ash cement pastes[J]. Journal of Chongqing University, 2015, 38(4): 45-54. (in Chinese)
- [24] LOUKILI A, CHOPIN D, KHELIDJ A, et al. A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(6):915-922.
- [25] SANT G, LURA P, WEISS J. Measurement of volume change in cementitious materials at early ages: Review of testing protocols and interpretation of results [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2006, 1979:21-29.
- [26] SHEN W G, LI X L, GAN G J, et al. Experimental investigation on shrinkage and water desorption of the paste in high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 114: 618-624.
- [27] JIN Z H, MA B G, SU Y, et al. Effect of calcium sulphoaluminate cement on mechanical strength and waterproof properties of beta-hemihydrate phosphogypsum[J]. Construction and Building Materials, 2020, 242:118198.
- [28] ZHANG L F, QIAN X Q, YU C D, et al. Influence of evaporation rate on pore size distribution, water loss, and early-age drying shrinkage of cement paste after the initial setting [J]. Construction and Building Materials, 2019, 226:299-306.