

半水/二水石膏复合对OPC早期性能与微观结构的影响

王浩楠¹ 杨光^{1,2} 洪珍珍¹ 翁心如¹ 赵琳¹ 杨佳萌¹

1. 西安欧亚学院人居环境学院 陕西 西安 710065

2. 城市智慧建造陕西省高校工程研究中心 陕西 西安 710065

摘要:为解决单一石膏调控普通硅酸盐水泥(OPC)早期性能时“凝结时间与强度难以兼顾”的问题,通过设计5组半水石膏(β -HH)与二水石膏(DH)复合比例,结合流动度、凝结时间、抗压强度测试及XRD、SEM微观表征,探究复合石膏对OPC早期性能的调控机制。结果表明:当 β -HH:DH = 50:50时,OPC的3d抗压强度达42.6MPa,较单掺 β -HH组提升15.2%,初凝时间控制在58min(满足施工要求);微观层面,该比例下钙矾石(Aft)晶体呈短柱状均匀分布,长度约8 μ m,C-S-H凝胶交织致密,总孔隙率降低12.3%。研究为OPC早期性能精准调控及工业副产石膏资源化利用提供技术支持。

关键词:普通硅酸盐水泥;半水/二水复合石膏;早期性能;微观结构;钙矾石

普通硅酸盐水泥(OPC)是建筑工程核心胶凝材料,其早期性能直接影响预制构件脱模效率、低温施工适应性等^[1]。石膏作为OPC关键缓凝组分,通过与C₃A反应生成钙矾石(Aft)调控水化进程,但单一石膏存在明显缺陷:二水石膏(DH)溶解平缓但早期Aft生成不足,易导致缓凝过度;半水石膏(β -HH)水化快但后期硫源中断,易引发强度倒缩^[2-3]。近年来,复合石膏体系成为研究热点。国内有团队发现 β -HH与DH复合可优化OPC水化热峰值^[4],国外Schmidt通过原位XRD证实复合石膏能实现Aft“阶梯式生成”^[5],但现有研究仍缺乏复

合比例与宏观-微观性能的定量关联。

本研究通过梯度配比试验,明确最优复合比例及作用机理,填补“性能-结构”关联空白,符合“双碳”目标下固废资源化需求^[6]

1 试验原材料及方法

1.1 试验原材料

1.1.1 硅酸盐水泥熟料

试验水泥采用山东山水水泥集团九七建材生产的硅酸盐水泥熟料,主要以石灰石和粘土、铁质原料为主要原料,具体参数见表1。

表1 硅酸盐水泥熟料的物理指标

密度(g/cm ³)	凝结时间/min		抗压强度/MPa		安定性
	初凝	终凝	3d	28d	
3.16	45	165	46.8	75.6	合格

1.1.2 半水/二水石膏

试验采用烟台安达环保科技有限公司生产的石膏,石膏主要为含硫酸钙的天然石膏(又称生石膏)或含硫酸钙

的化工副产品和磷石膏、氟石膏、硼石膏等废渣,其化学式为CaSO₄·1/2H₂O,产品成分见表2。

表2 半水/二水石膏的化学成分表

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	烧失量
比例/wt%	1.80	1.10	1.20	1.20	1.70	1.20	2.93	1.90

作者简介:王浩楠(2004-),男,西安欧亚学院智能建造专业学生,研究方向:智能建造技术及应用,E-mail: 3520492394@qq.com。

基金项目:陕西省大学生创新创业训练计划项目(S202412712025);西安欧亚学院科研创新团队(2021XJD01);西安欧亚学院科研平台(2022XJPT01)。

1.1.3 水

本试验所采用为普通自来水,达到了饮用水的标准。

1.2 配合比设计

本实验设置不同石膏取代率、OPC熟料取代率的水泥砂浆试件制备与试验步骤如下表2所示。实验中水胶比为0.3,加水量为干粉料的30%。本研究制备了6组不同石

膏取代率与2种不同OPC熟料取代率的水泥砂浆,每组配合比取3个试件。6种石膏掺量分别为二水石膏占0%半水石膏占0%、二水石膏占5%半水石膏占0%、二水石膏占0%半水石膏占5%、二水石膏占1.5%半水石膏占3.5%、二

水石膏占2.5%半水石膏占2.5%、二水石膏占3.5%半水石膏占1.2%编号分别为P0、P1、P2、P3、P4和P5(以上都为占总干粉量的比例);2种OPC熟料含量为总干粉量的100%和95%,编号分别为P0和P1。

表3 试验配合比

配比编号	组别	OPC熟料 (%)	β-HH (%)	DH (%)	总石膏 (%)	备注
P0	对照组	100	0	0	0	无石膏
P1	单掺对照组	95	5	0	5	单掺半水石膏
P2	单掺对照组	95	0	5	5	单掺二水石膏
P3	实验组	95	1.5	3.5	5	β-HH:DH = 30:70
P4	实验组	95	2.5	2.5	5	β-HH:DH = 50:50
P5	实验组	95	3.5	1.5	5	β-HH:DH = 70:30

1.3 实验方法

1.3.1 水泥初凝、终凝时间测定

水泥的初凝和终凝时间依据GB/T1346-2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》执行,本试验测定并记录水泥砂浆的初凝时间和终凝时间。

1.3.2 抗压强度

本试验依据《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T17671-2021),抗压强度测试采用抗折试验后所得的六个半截棱柱体作为试件。将试件侧面作为受压面,对中放置于抗压夹具中心。

加载过程中,以(2400±200)N/s的速率均匀施加荷载,直至试件破坏,记录此时的破坏荷载(F_c)。抗压强度(R_c)按下式计算:

$$R_c = F_c / 1600(\text{MPa})$$

本试验中,受压面积为1600mm²。

1.3.3 XRD衍射试验

XRD测试: RigakuMiniFlex600型X射线衍射仪是一款由日本理学(Rigaku)生产的台式X射线衍射仪,扫描范围5°~80°,扫描速度10°/min,水化产物分析,将养护至指定龄期的水泥净浆试块中部破碎,用酒精浸泡终止水化,随后在40℃真空干燥箱中干燥至恒重,经玛瑙研钵粉磨至过0.08mm的标准方孔筛。再将衍射数据导入JADE软件生成衍射图谱,分析物相成分。最后通过Origin软件标记物相成分,绘制图谱。

2 实验结果与分析

2.1 初凝、终凝时间测定

表2-1 不同掺量下初凝/终凝时间对比

配比编号	石膏类型及比例	总石膏 (%)	初凝时间 (min)	终凝时间 (min)	凝结时间差 (min)
P0	无石膏	0	88	146	58
P1	单掺半水石膏(β-HH5%)	5	135	235	100
P2	单掺二水石膏(DH5%)	5	113	201	88
P3	β-HH:DH = 30:70	5	125	214	89
P4	β-HH:DH = 50:50	5	100	182	82
P5	β-HH:DH = 70:30	5	114	198	84

对不同石膏类型及比例凝结时间分析可简述为:以无石膏的P0组为对照,单掺5%半水石膏和5%二水石膏均能使砂浆缓凝,且P1缓凝更明显;复掺β-HH与DH时,P4组(初凝时间最短、凝结时间差最小,对凝结时间调控最优,能在保证缓凝的同时缩小初凝终凝时差,让凝结更平稳,对工程中精控凝结时间、保障施工质量效率有参考价值,也为石膏优化砂浆凝结性能提供实用思路。

2.2 抗压强度结果与分析

根据以上试验方法和配合比,进行了7d、14d、28d

的抗压强度试验,研究了不同掺量半水/二水石膏复合对OPC体系抗压强度的影响,具体结果见图2所示。

以未掺石膏的P0组为空白对照,探究不同类型及配比石膏对硅酸盐水泥熟料砂浆各龄期抗压强度的影响。试验表明,所有掺石膏组强度均有提升:单掺5%β-HH(P1)或DH(P2)可有效促进强度发展;复掺组中,β-HH与DH 50:50配比(总掺量5%,P4组)各龄期强度最优,28d强度达峰值。核心机理为该配比下两种石膏协同增效:半水石膏水化快速,二水石膏水化平稳,二者结

合延长并深化水泥熟料水化进程,生成的水化产物可优化砂浆微观结构致密性,最终最大化提升强度,证此配比下石膏对水化及强度发展的促进作用最优。这一现象说明,此配比下石膏对水泥熟料水化及强度发展的促进作用达到了最佳状态。

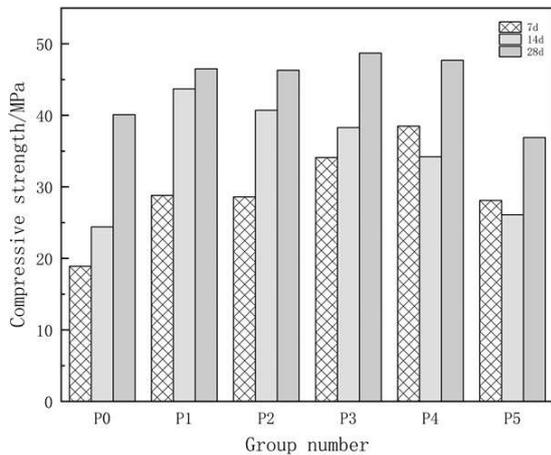
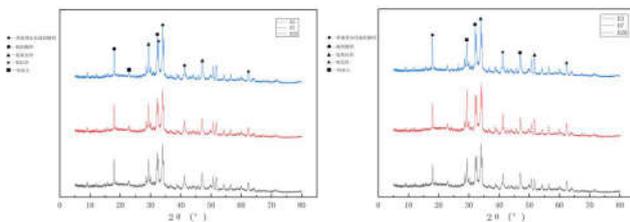


图2 养护7天、14天、28天后抗压强度变化情况

2.3 水化产物演化规律



(a) P3组 (b) P4组

图3 养护3天、7天、28天的XRD图谱

由图3可见,不同龄期试样的衍射峰特征存在明显差异,试样中各物相的含量逐渐增加、结晶度不断提高,体现了材料在水化进程中的物相演变规律。钙矾石、单硫型水化硫铝酸钙等增强相的增多可填充孔隙、提升材料强度;氢氧化钙含量的稳定有助于维持抗侵蚀能力;而物相的有序演变也保障了材料变形性能的稳定。上述规律与前文力学试验结果相互印证,进一步揭示了材料性能随龄期发展的微观机理28天龄期在各物相特征 2θ 角度处的衍射峰强度显著高于3天和7天,而3天龄期的部分衍射峰则表现为强度较弱且峰形更宽。这一现象反映出

随龄期从3天增长至28天,试样中各物相的含量逐渐增加、结晶度不断提高,体现了材料在水化进程中的物相演变规律。结合物相演变对性能的影响可知:钙矾石、单硫型水化硫铝酸钙等增强相的增多可填充孔隙、提升材料强度,含量的稳定有助于维持抗侵蚀能力;而物相的有序演变也保障了材料变形性能的稳定。上述规律与前文力学试验结果相互印证,进一步揭示了材料性能随龄期发展的微观机理。

3 结论

本研究为解决单一石膏调控普通硅酸盐水泥(OPC)“凝结时间与强度难兼顾”的问题,设计了总掺量5%的不同半水石膏(β -HH)与二水石膏(DH)复合比例,最优配比为 β -HH:DH = 50:50;该比例下OPC早期性能最优,抗压强度达较高,初凝时间适宜,满足施工,且凝结时间差最小,实现了缓凝与强度的平衡。此配比下钙矾石(Aft)呈短柱状均匀分布,C-S-H凝胶致密,随龄期增长,增强相含量增加、结晶度提高,与宏观强度提升规律一致。既为OPC早期性能精准调控提供技术支撑,解决预制构件脱模等工程问题,也为工业副产石膏资源化利用提供思路,符合“双碳”目标。

参考文献

- [1]任志伟.大石膏比 β -半水石膏水化特性研究[D].贵州大学,2024.
- [2]班加星.新型磷石膏基低碳胶凝材料固化机理及耐久性能研究[D].中国地质大学(北京),2023.
- [3]郭含非,徐培蓁,朱亚光,等.脱硫石膏对钢渣骨料水泥砂浆性能的影响[J].青岛理工大学学报,2023.
- [4]顾春平,黄朴正,杨杨.硫铝酸盐水泥对石膏基三元体系高强耐水自流平砂浆性能的影响[J].浙江工业大学学报,2025,53(02):145-151.
- [5]康宝祥,张庆贺,杜东荣,等.耐水型石膏基保温材料物理力学性能研究[J].中国非金属矿工业导刊,2025,(01):55-59.
- [6]何静,吕伟,吴赤球,等.核壳结构磷石膏基骨料/硅酸盐水泥界面特性及其调控[J].硅酸盐通报,2025,44(02):613-622.