

磷渣粉对硅酸盐水泥凝结时间和早期强度的影响及调控

何建军¹, 解悦², 张 Jian 权¹

(1. 中水电成都天府新区建材有限公司, 四川 成都 610221; 2. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213)

摘要: 采用浸泡的处理方式, 研究了磷渣粉颗粒表面的可溶性氟、磷对硅酸盐水泥凝结时间和强度的影响。基于工艺可行性和经济性, 采用钙基沉淀剂共置堆存的方法对磷渣粉进行了处理, 测试了其凝结时间和活性指数, 结合 SEM 分析了磷渣颗粒表面微观形貌的变化。研究表明: 浸泡可以消除磷渣粉的缓凝效果并能提升其 1 d 和 3 d 活性, 但对其 7 d 活性的影响程度有限; 共置堆存后, 掺磷渣粉水泥的凝结时间与纯水泥相同, 1 d 活性提升至 50%、3 d 活性提升至 60%、7 d 活性提升至 73%。

关键词: 磷渣粉; 硅酸盐水泥; 可溶性氟; 磷化合物; 浸泡; 钙基沉淀剂; 共置堆存

中图分类号: TU528.041; TV42.4; U214.1+8; U215.1 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-2184(2024)06-0044-07

Effect and Regulation of Grind Granulated Phosphorus Slag on Setting Time and Early Strength of Portland Cement

HE Jianjun¹, XIE Yue², ZHANG Jianquan¹

1. Sinohydro Chengdu Tianfu New District Building Materials Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610221;

(2. Sinohydro Bureau 7 Co., LTD., Chengdu Sichuan 610213)

Abstract: The effect of soluble fluorine and phosphorus on the surface of the grind granulated phosphorus slag (GGPS) particles on the setting time and strength of Portland cement was studied by immersing. Based on the feasibility and economy of the process, after co-storage of GGPS with calcium-based precipitant, the setting time and activity index were tested, and the micromorphology of the surface of phosphorus slag particles was analyzed by SEM. The results show that immersion can eliminate the retarding effect of GGPS and improve its 1d and 3d activity, but the effect on the 7d activity is little. After co-stacking, the setting time of cement mixed with GGPS was the same as that of pure cement, and the activity increased to 50% in 1d, 60% in 3d and 73% in 7d.

Key words: Grind granulated phosphorus slag; Portland cement; Soluble fluorine; Phosphorus compounds; Immersion; Calcium-based precipitant; Co-storage

1 概述

磷渣粉是一种在黄磷生产过程中经熔融、水淬、烘干和粉磨等工序获得的固体废弃物。由于在其生产过程中经过高温熔融和水淬急冷两道环节, 使得磷渣粉中含有较多具有火山灰活性的玻璃体, 其可作为辅助胶凝材料广泛应用于砂浆、混凝土等水泥基材料中^[1]。

大朝山水电站、索风营水电站以及观音岩水电站等大中型水电工程采用磷渣粉作为掺合料已有超过 20 a 的历史, 其掺量一般为 20%~60%^[2-5]。

与水利水电工程建设一般为 8~10 a 的周期相比, 房建与市政项目的建设周期为 2~3 a, 从而对混凝土的早期凝结硬化性能提出了较高的要求。受磷渣粉自身缓凝和低早期强度的影响, 高掺量混凝土的凝结时间一般能延长 5~10 h, 其 3 d 强度降低了 20%~30%。因此, 在上述水电工程中的磷渣粉用量(占胶凝材料总量)通常不超过 15%^[6-7]。

目前, 针对磷渣粉影响水泥基材料凝结时间和早期强度的机理研究较多, 但尚未提出经济可行的解决方法。对于凝结时间, 磷渣粉中所含的

收稿日期: 2023-12-30

氟、磷化合物(特别是可溶性的化合物)通过物理吸附、氢键或离子键的方式抑制了 C_3S 和 C_3A 的早期水化^[8-9]。对于早期活性,磷渣粉中高钙硅、低镁铝的化学组成特性使得其总键能与矿渣粉、沸石粉等具备高早期活性的掺合料相比较,玻璃体的早期解离速率慢^[10-11]。但是,对于影响混凝土拆模、承受载荷的 1~3 d 初期强度中磷渣粉的影响效果和作用机理还鲜有研究。基于以上认识,笔者采用浸泡的方式对磷渣粉的凝结时间和初期(<3 d)活性进行了研究;同时提出了简单、高效的钙基沉淀剂共置堆存的改性方法以抑制磷渣粉缓凝效果并提升了其初期活性。

表 1 水泥与磷渣粉化学成分表 /%

项目	烧失量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	F ⁻	碱含量	SO ₃
西南水泥	3.88	19.59	5.08	4.45	60.03	2.40	/	/	0.62	2.94
磷渣粉	0.30	38.61	4.93	1.00	46.64	3.94	1.60	0.80	0.95	0.99

表 2 磷渣粉物理性能表

项目	密度 /(g·cm ⁻³)	比表面积 /(m ² ·kg ⁻¹)	细度,45 μm 负压筛筛余 /%	流动度比 /%	活性指数 /%	
					7 d	28 d
磷渣粉	2.94	472	0.3	99	67	86

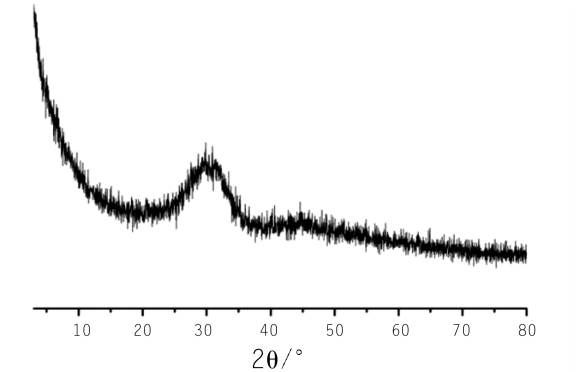


图 1 磷渣粉 XRD 图谱

磷原渣:产自四川省石棉县,粒径范围为 5~10 mm,含水率为 5%。

钙基沉淀剂:生石灰产自四川省都江堰市,CaO 含量>95%。

砂:ISO 标准砂。

水:浸泡采用蒸馏水,其他试验采用自来水。

2.2 实验方法

(1)浸泡。现有研究表明:硅酸盐水泥的凝结时间易受磷渣粉中的氟、磷化合物影响,因此,《用于水泥和混凝土中的粒化电炉磷渣粉》GB/T 26751—2011、《矿物掺合料应用技术规程》

2 实验步骤

2.1 原材料

水泥:采用西南 P·O 42.5R 普通硅酸盐水泥,其产自四川省彭山市,比表面积为 348 m²/kg,3 d 和 7 d 抗压强度分别为 32.3 MPa 和 48.3 MPa。水泥与磷渣粉的化学成分见表 1。

磷渣粉:产自四川省石棉县,其化学成分见表 1,物理性能见表 2。产品满足《用于水泥和混凝土中的粒化电炉磷渣粉》GB/T 26751—2011 中的 L85 级要求。其 XRD 图谱见图 1,除 2θ=30° 处存在玻璃体漫反射峰外,无其它晶体矿相的特征峰。

GB/T 51003—2014 和《混凝土用粒化电炉磷渣粉》JG/T 317—2011 等相关国家、行业标准限制了磷渣粉的总 P₂O₅ 含量小于或等于 3.5%。事实上,在水泥开始水化至终凝的数小时内,磷渣粉的反应率一般小于 10%,即由玻璃体结构破坏产生的固溶相氟、磷化合物非常少。因此,笔者根据磷渣粉产生缓凝的根本原因为颗粒表面可溶性氟、磷化合物的假设设计了浸泡实验:将 500 g 磷渣粉和 500 g 蒸馏水加入烧杯中,搅拌 5 min 混合均匀,将混合后的磷渣粉浆液密封,在不同温度下静置 5 h 后过滤,在 105 ℃ 温度下烘干至含水率小于 1%,所得到的磷渣粉编号为 JP-2、JP-4。此外,为模拟真实水泥水化液相环境中的 pH 值和离子浓度,除蒸馏水外,同步采用饱和的 CH 溶液(pH=12.6)进行浸泡并重复以上实验过程,所得到的磷渣粉编号为 JP-3、JP-5。具体的浸泡实验参数见表 3。

(2)钙基沉淀剂共置堆存。鉴于在磷渣粉实际生产过程中的浸泡环节产生的废水处理、额外的场地占用和过滤烘干设备的投入将导致其生产成本大幅度增加,因此,考虑到处理方案的技术可行性和经济性,在水淬磷渣的堆存阶段,采用钙基

表 3 浸泡实验参数表

编号	磷渣粉 /g	水 /g	处理条件(温度、水溶液类型与处理时间)
JP-1	500	/	市售磷渣粉,未浸泡
JP-2	500	500	20 ℃,蒸馏水,5 h
JP-3	500	500	20 ℃,饱和 CH 溶液,5 h
JP-4	500	500	80 ℃、蒸馏水,5 h
JP-5	500	500	80 ℃、饱和 CH 溶液,5 h

沉淀剂与含水率为 10%~15% 的磷渣共混方式,将磷渣颗粒表面的强缓凝效果的可溶性氟、磷化合物转化为无缓凝效果的氟、磷化合物沉淀。具体的实验过程为:为提高沉淀的反应程

度,研究采用了盘式破碎机预先将典型含水率为 15%、粒径为 0~10 mm 的磷原渣破碎至粒径为 0~2 mm。磷渣破碎前后的表观形貌见图 2。将掺加了 1%~3% 的生石灰与破碎磷渣共混堆存。破碎磷渣堆存状态见图 3。在温度 20 ℃、相对湿度 99% 的标养箱中静置 5 d。将静置后的磷渣在 105 ℃ 下烘干,采用 SM-500 型小型室内球磨机粉磨至比表面积为 450 m²/kg 左右,得到编号为 DC-5~DC-7 的磷渣粉。此外,为证明颗粒粒径(即有效反应面积对堆存效果的影响),额外采用未破碎的磷原渣进行了以上实验,编号为 DC-2~DC-4。共置堆存实验参数见表 4。



图 2 磷渣破碎前后的表观形貌图



图 3 破碎磷渣堆存状态示意图

(3)测试方法。遵照《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》GB/T 1346-2011,采用 30% 的磷渣粉掺量和 0.3 水胶比,测试 JP 和 DC 样品的凝结时间,同步测试未掺磷渣粉的纯水泥凝结时间。遵照《用于水泥和混凝土中的粒化电炉磷渣粉》GB/T 26751-2011,测试浸泡后的磷渣粉样品(JP1~JP5)和钙基沉淀剂共置

堆存后的磷渣粉样品(编号 DC-1~DC-7)在 1 d、3 d 和 7 d 的活性指数。采用扫描电子显微镜对共置堆存前后磷渣颗粒的微观形貌进行了分析。

此外,参考现有的半绝热温升试验方法^[12],采用自主组装的保温箱(规格:40 cm×40 cm×40 cm),分别对纯水泥和掺加了 30% DC-1、DC-4、DC-5、DC-6 和 DC-7 磷渣粉的胶砂(配合比遵照活性指数测试胶砂配合比)早期温升特性进行了测试。同时,采用 Origin 软件对温升曲线进行了曲线平滑和一次微分处理,得到了升温速率曲线。保温箱体的材质为膨胀聚苯乙烯塑料,其导热系数为 0.037 W/(m·K)。箱体中间的胶砂容器为聚乙烯塑料杯(规格: $\varphi_D=10\text{ cm}$, $\varphi_d=7\text{ cm}$, $L=17\text{ cm}$)。温度采集设备为 EX-VXE 3016 型多通道温度测试仪(含热敏电阻线和数据采集器)。半绝热温升实验装置和实际装置见图 4。胶砂拌合完成后,迅速称取 1 800 g 拌合物加入容器内,将热敏电阻线插入容器中心后

表 4 共置堆存实验参数表

编号	破碎磷渣 /g	钙基沉淀剂 /g	处理条件	粉磨后的磷渣比 表面积 /(m ² ·kg ⁻¹)
DC-1	600	0	烘干至含水率<1%后,粉磨	458
DC-2	600	6	粒径为 0~10 mm 的磷原渣直接与 1% 的沉淀剂共混后静置 5 d, 烘干至含水率<1%,粉磨	460
DC-3	600	12	粒径为 0~10 mm 的磷原渣直接与 2% 的沉淀剂共混后静置 5 d, 烘干至含水率<1%,粉磨	465
DC-4	600	18	粒径为 0~10 mm 的磷原渣直接与 3% 的沉淀剂共混后静置 5 d, 烘干至含水率<1%,粉磨	456
DC-5	600	6	磷原渣预破碎至粒径为 0~2 mm,与 1% 的沉淀剂共混后静置 5 d,烘干至含水率<1%,粉磨	462
DC-6	600	12	磷原渣预破碎至粒径为 0~2 mm,与 2% 的沉淀剂共混后静置 5 d,烘干至含水率<1%,粉磨	450
DC-7	600	18	预破碎至粒径 0~2 mm,与 3% 的沉淀剂共混后静置 5 d,烘干至含水率<1%,粉磨	465

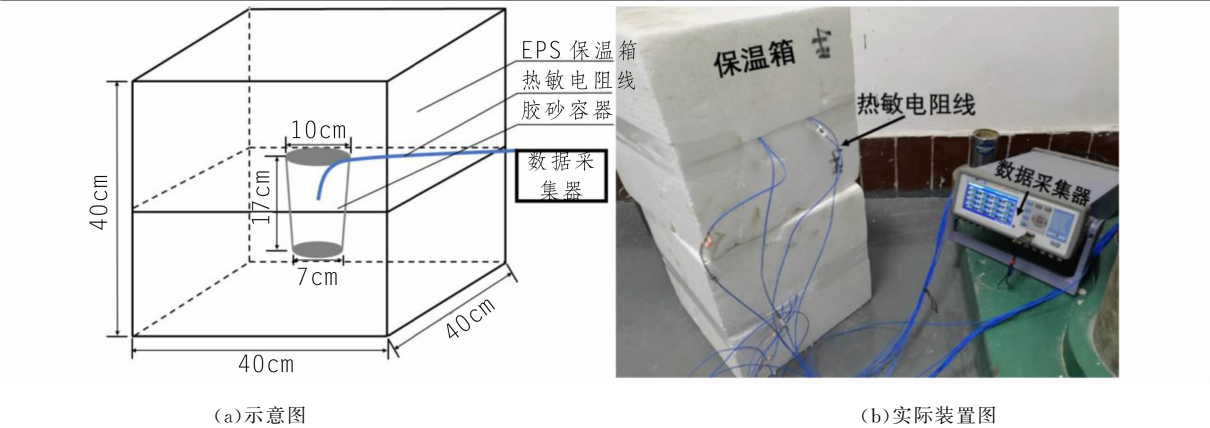


图 4 半绝热升温实验装置示意图和实际装置图

将其接线端与数据采集器连接。合拢箱体,采用聚氨酯发泡剂密封上下箱体间的缝隙并用透明胶带缠绕固定。在胶砂内部温度的采集过程中,每隔 10 s 记录 1 次数据,持续至 90 h,其环境温度为 20 ℃。

3 结果与讨论

3.1 浸泡对磷渣粉凝结时间和活性指数的影响

不同浸泡工艺下的磷渣粉凝结时间见图 5。未经浸泡处理的市售磷渣粉的初、终凝时间分别为 580 min 和 650 min。与纯水泥基准组凝结时间(初凝为 275 min、终凝为 365 min)相比,其初、终凝时间的延长幅度约为 1 倍。浸泡后,磷渣粉的凝结时间整体缩短至与纯水泥相同的水平,且随着浸泡温度的增加和 pH 值的增加,初、终凝时间有小幅减小。其中,在 80 ℃饱和 CH 溶液中浸泡 5 h 的样品 JP-5 的初凝和终凝时间最短,分别为 255 min 和 340 min,说明在浸泡过程中所引入的少量 CH 在水泥水化过程中可以表现出一

定的促凝效果。以上实验结果表明:在室温环境下的短时间浸泡即可基本消除磷渣粉的缓凝效果;而增加温度或 pH 值虽然可以进一步脱除颗粒表面的氟、磷化合物并缩短凝结时间,但其影响程度有限。

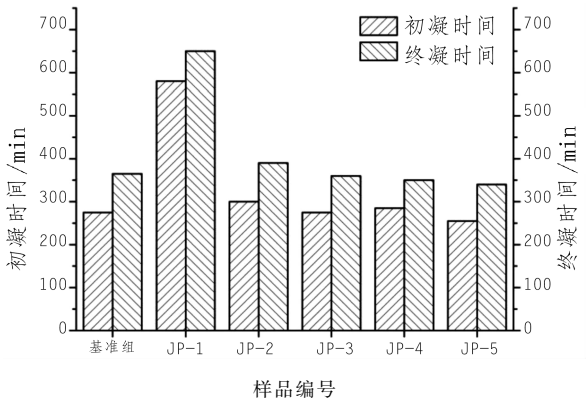


图 5 不同浸泡工艺下的磷渣粉凝结时间框图

进一步对浸泡后的磷渣粉的早期活性指数进行了测试。不同浸泡工艺下的磷渣粉早期活性指

数见图 6。与浸泡前的 JP-1 相比,浸泡后的磷渣粉(JP1~JP4)的 1 d 活性指数由 20% 提升至 50%~55%,提升值>30%。随着龄期的增加,浸泡对活性指数的提升效果逐渐下降;至 3 d 时,其活性指数由 54% 提升至 60%~65%,提升值降低至 10%;至 7 d 时,所有样品的活性指数均为 65%~70%且无明显的变化规律。以上实验结果表明:通过浸泡对磷渣粉表面的缓凝组分进行去除后可以抑制其缓凝效果,并由此提高掺磷渣粉水泥的加速期水化程度,从而表现出 1 d 活性指数大幅度提升的效果。随着龄期的延长,掺不同磷渣粉样品的水泥反应程度整体趋于一致,此时的活性差异更多地是由磷渣粉中的火山灰活性而非水泥水化反应程度体现。由于浸泡不改变磷渣粉的主要化学组成和矿物成分,在后期的活性指数不会出现明显差异。

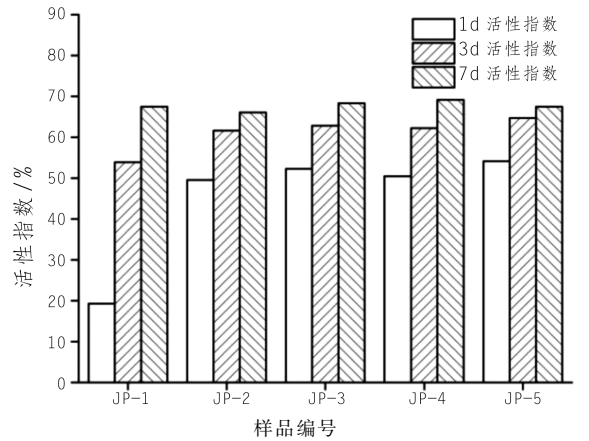


图 6 不同浸泡工艺下的磷渣粉早期活性指数框图

3.2 沉淀剂共置堆存对磷渣粉凝结时间和活性指数的影响

(1)笔者对不同共置堆存工艺下的磷渣粉凝结时间进行了测试。不同共置堆存工艺下的磷渣粉凝结时间见图 7。随着颗粒粒径的减小及钙基沉淀剂用量的增加,磷渣粉初、终凝时间整体呈减小的规律,且在 0~10 mm 和 0~2 mm 两种粒径下的磷渣堆存效果表现出较大差异。未破碎前,随着沉淀剂用量由 0% 增加至 3%,磷渣粉的初、终凝时间分别由 805 min、875 min 减少至 535 min、630 min,但与纯水泥基准组相比仍存在较大的差距。破碎后,与沉淀剂的共置堆存进一步表现出其抑制缓凝的效果,且其抑制幅度随沉淀剂用量的增加而增加。其中 3% 沉淀剂用量的

LCD-7 磷渣粉的初、终凝时间分别为 270 min、325 min,与基准组基本相同。

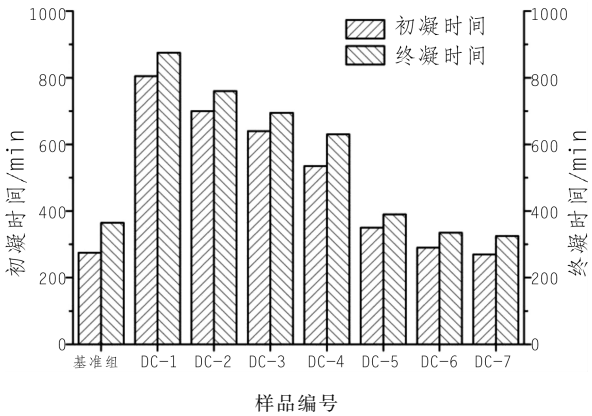


图 7 不同共置堆存工艺下的磷渣粉凝结时间示意图

(2)笔者对处理后的磷渣粉不同龄期的活性指数进行了测试。不同共置堆存工艺下的磷渣粉活性指数框图见图 8。磷渣粉不同龄期的活性指数随着其颗粒粒径的减小和沉淀剂用量的增加而增加。与浸泡工艺一致,堆存对磷渣粉 1 d 和 3 d 活性指数的提升效果非常显著。与未经破碎、堆存处理的 DC-1 相比,DC-7 的 1 d 活性指数由 10% 提升至 50%;至 3 d 时,其活性指数由 45% 提升至 60%。同时,该工艺还表现出对 7 d 活性指数的提升效果;至 7 d 时,其活性指数仍可由 67% 提升至 73%。

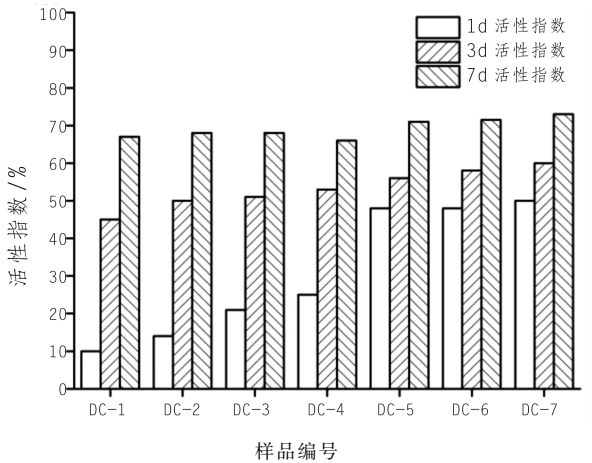
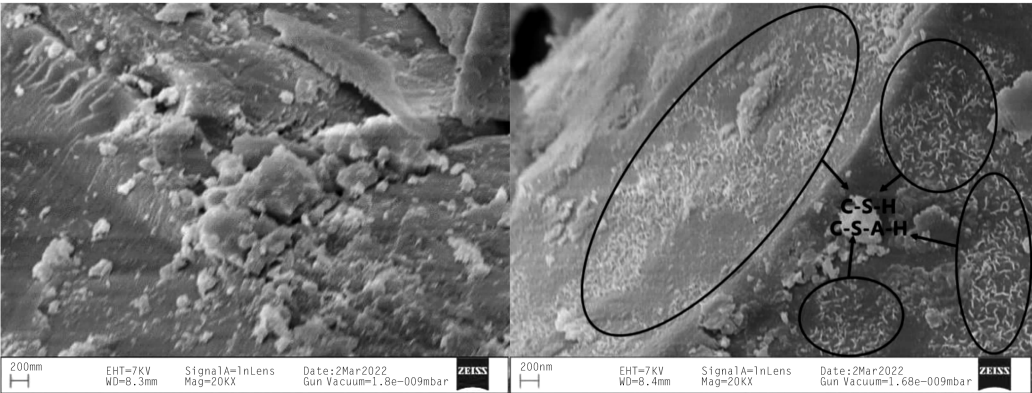


图 8 不同共置堆存工艺下的磷渣粉活性指数框图

(3)利用生石灰作为钙基沉淀剂对破碎后的磷渣进行了共置堆存处理,在将磷渣颗粒表面的 NaF、KF、Na₃PO₄ 和 K₃PO₄ 等强缓凝效果的可溶盐转化为 CaF₂ 和 Ca₃(PO₄)₂ 等沉淀的同时,可进一步发生火山灰反应以促进玻璃体的解离及

二次水化反应产物的生成。图 9 显示了堆存前后的磷渣颗粒表面微观形貌。共置堆存前后的磷渣颗粒微观形貌照片见图 9。在其堆存的 5 d 时间内,玻璃体表面的活性 SiO_2 和 Al_2O_3 组分与沉淀剂生成的 OH^- 和 Ca^{2+} 离子持续反应,在其表

面产生了大量 $<100\text{ nm}$ 的水化硅酸盐(C-S-H)和水化铝硅酸钙(C-S-A-H)晶须(图 9b),产生较强的晶核效应以促进水泥矿物的早期水化。因此,与 DC-1 相比,经破碎、堆存处理后的磷渣粉在 7 d 时间内仍能表现出 5%左右的活性增长。



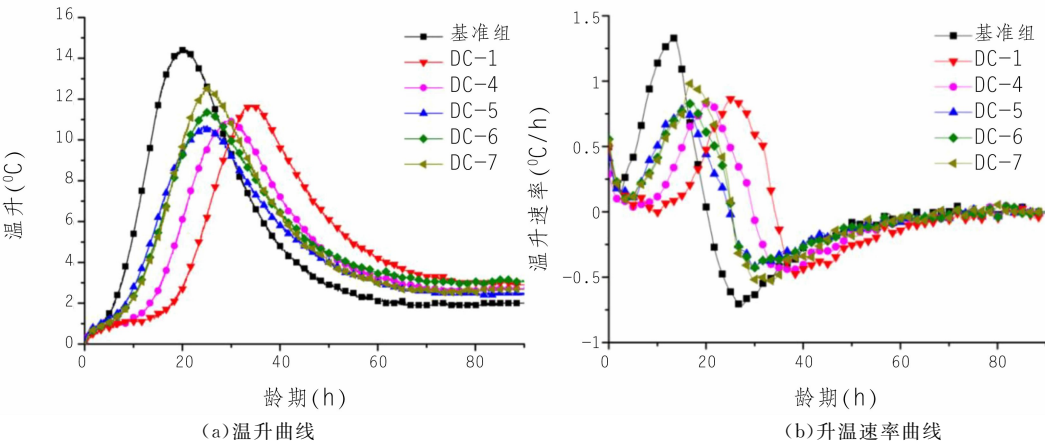
(a)DC-1 (b)DC-7

图 9 共置堆存前后的磷渣颗粒微观形貌照片

3.3 沉淀剂共置堆存对掺磷渣粉胶砂早期放热特性的影响

笔者采用半绝热温升实验对胶砂入模后 90 h 内的温升和升温速率变化情况进行了分析。不同样品的半绝热温升及升温速率曲线见图 10。由温升曲线(图 10 a)可知:基准组胶砂温升峰值为 $14.4\text{ }^{\circ}\text{C}$;掺入 30%磷渣粉后,其胶砂的最大温升下降至 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对温升曲线进行一次微分后得到升温速率曲线(图 10 b)。相关研究表明:水泥早期升温速率(或放热速率)曲线与其凝结硬化特性具有较好的相

关性,即到达峰值前会出现稠化和初凝(开始凝结),并在峰值处达到终凝(完全凝结并开始硬化)^[13]。由图 10 b 可知:基准组升温速率在 13.4 h 时达到峰值,而未经堆存的 DC-1 磷渣粉的最大升温速率时间则延长至 25.2 h。单纯采用 3%沉淀剂共置堆存处理后,DC-4 磷渣粉的最大升温速率时间可缩短至 20.7 h。采用预破碎和 1%~3%沉淀剂共置堆存的综合方式处理后,DC-5~7 磷渣粉的最大升温速率时间可进一步缩短至 15~16 h,与基准组相比仅延长 1~2 h。



(a)温升曲线 (b)升温速率曲线

图 10 不同样品的半绝热温升及升温速率曲线图

磷渣粉的替代性掺入导致水泥用量减少及早期水化产物生成数量降低,这是导致磷渣粉早期

活性指数整体较低的根本原因。经预破碎及共置堆存综合处理后,磷渣颗粒表面的氟、磷缓凝组分

可以被有效转化,但随着水化反应的进行,固溶在颗粒表面的微量氟、磷随玻璃体表层解离逐渐溶出,并在硬化的水泥浆中随液相扩散并作用于未水化的水泥矿物中,因此其表现出最大升温速率出现时间略微延迟的现象。

4 结 语

笔者综合了不同浸泡及沉淀剂共置堆存工艺对磷渣粉凝结时间、活性指数和微观颗粒形貌的影响结果并对其进行比较和分析,得到了以下结论:

(1)浸泡可以有效消除磷渣粉颗粒表面具有强缓凝效果的可溶性氟、磷化合物,能够抑制其缓凝效果并提升其 1 d 和 3 d 的活性指数,但对其 7 d 的活性指数影响有限。

(2)采用钙基沉淀剂与磷渣粉共置堆存,可以将磷渣颗粒表面的缓凝组分沉淀并转化为无缓凝效果的填料,在缩短掺磷渣粉水泥凝结时间的同时,能够提升其 1 d、3 d 和 7 d 的活性指数。

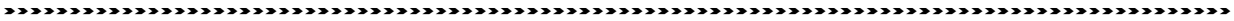
(3)共置堆存工艺对 7 d 活性指数的提升效果来源于磷渣粉玻璃体的早期火山灰反应,其所生成的粒径<100 nm 的水化硅酸盐(C—S—H)和水化铝硅酸钙(C—S—A—H)的晶核效果可加速水泥水化产物的生成。

参考文献:

[1] 冷发光,冯乃谦. 磷渣综合利用的研究与应用现状[J]. 中国建材科技, 1999,21(3):43-46.

[2] 郭世明. PT 双掺料在大朝山碾压混凝土重力坝的应用与研究[J]. 云南水力发电, 2000,16(3):19-23.

[3] 龙起煌,郑治,王树兰. 索风营水电站大坝设计[C]. 2004



(上接第 39 页)

参考文献:

[1] 靳云辉,吴学昌,董业伟. 深圳地区水库原水常用净化处理工艺[J]. 西南给排水, 2008,30(4):21-23.

[2] 罗丁. 组合式进水池在郭公庄水厂中的应用[J]. 给水排水, 2014,40(9):21-23.

[3] 唐明启,孙智莉,蔡晓武. 藤桥水厂改扩建工程一体化净水池设计[J]. 中国给水排水, 2015,31(14):87-89.

[4] 杨永利,刘大伟,张长润. 高效混凝沉淀净水技术在原水处理中的应用[J]. 燃料与化工, 2013,44(1):53-55.

年全国碾压混凝土坝筑坝技术交流会论文集,2004.

[4] 陈智荣,叶建雄,陈明. 磷渣在四川地区混凝土行业应用的可行性研究[J]. 粉煤灰, 2009,21(3):14-16.

[5] 林育强,郭定明,郭少臣,等. 磷渣粉在沙沱水电站大坝碾压混凝土中的研究及应用[J]. 贵州水力发电, 2012, 26(1):67-70, 79.

[6] 解悦,雷英强,唐毅,等. 磷渣粉在成都地区商品混凝土中的应用研究[J]. 四川水力发电, 2022, 41(2):85-89.

[7] 李三霞. 磷渣粉替代矿渣粉作为掺合料制备商品混凝土的研究[D]. 西南科技大学, 2010.

[8] 郝晋高. 磷渣中磷和氟对硅酸盐水泥的水化影响机理[D]. 武汉理工大学, 2010.

[9] Shi C, Qian J. High performance cementing materials from industrial slags-a review [J]. Resources Conservation & Recycling, 2000, 29(3):195-207.

[10] 盛广宏. 磷渣活性的激发及对硅酸盐水泥的缓凝机理 [D]. 南京工业大学, 2004.

[11] 徐迅,卢忠远,严云. 磷渣粉对硅酸盐水泥水化特性的影响[J]. 材料导报, 2008, 22(增刊 3):316-318.

[12] 杨锦,江晨晖,李新宇,等. 砂浆的准绝热温升特性与抗压强度的相关性研究[J]. 新型建筑材料, 2014, 41(10): 25-27.

[13] Mehta P K. Concrete: microstructure, properties, and materials[M]. 北京:中国电力出版社,2008.

作者简介:

何建军(1984-),男,四川射洪人,总工程师,工程师,从事混凝土材料及外加剂合成与应用技术研究等工作;

解悦(1994-),男,四川德阳人,工程师,硕士,从事建筑材料试验与研究;

张建权(1989-),男,吉林德惠人,工程师,学士,从事建筑材料生产与应用工作.

(编辑:李燕辉)

[5] 童祯恭,方永忠,胡锋平. 微涡流混凝技术在十堰水厂的应用[J]. 中国给水排水, 2008,24(4):66-68.

作者简介:

青志鹏(1981-),男,四川南充人,副高级工程师,硕士,研究方向:市政水厂及管网水质保障;

张建文(1947-),男,四川乐山人,副高级工程师,学士,从事市政水厂及管网水质保障工作;

彭一(1995-),女,重庆石柱人,助理工程师,学士,从事市政水厂及管网水质保障工作.

(编辑:李燕辉)