

工业固废在高性能混凝土管桩生产中的研发应用

邵心睿¹ 苟德胜²

1 澳门科技大学澳门环境研究院 2 中国镇江建华建材集团

DOI:10.32629/eep.v2i1.99

[摘要] “低碳、绿色、环保、高性能和创新”已成为混凝土产业可持续发展的主旋律,工业固废的资源化应用是解决当前混凝土管桩行业矿物掺合料单一性能低、附加值不高和污染环境等问题的有效途径,也是当前管桩行业实现绿色发展的迫切需求。综合利用工业固废的粉煤灰、脱硫石膏等副产品并按适当的配方比例形成一种复合掺合料,代替混凝土中的部分水泥,克服了单一掺合料性能缺陷,起到组合性能的“超叠加效应”,使加入掺合料的混凝土性能更优越。本文通过综合采用工业固废粉煤灰、脱硫石膏等工业副产品和磨细石英砂等正交试验,不断优化复合掺合料的配比,研究表明:当研制的复合掺合料等量代替水泥比例达 47%时,生产的高性能混凝土管桩的各项力学性能均达到较好水平,实现了低品质矿物掺合料的高附加值应用。

[关键词] 工业固废; 资源化; 复合掺合料; 正交试验; 高附加值; 绿色生产

前言

目前在高性能混凝土管桩(PHC)生产过程中,按 GB13476 其胶凝材料大多采用强度等级高于 42.5 及以上的硅酸盐水泥。但是在水泥生产过程中,要消耗大量矿物资源,还带来了严重的能源消耗和环境污染问题,资料显示,每生产一吨水泥熟料,原材料分解释放 CO₂ 约 0.53 吨,燃料燃烧释放 CO₂ 约 0.37 吨,每吨熟料 CO₂ 的排放量约为 0.9 吨,同时还排放大量的 SO_x、NO_x 和粉尘。所以,当前管桩行业如何在保证混凝土性能的基础上,能寻找一种替代胶凝材料来减少其水泥的用量,这是实现绿色可持续发展的重要途径。

1 复合掺合料来源及其性能

当前对混凝土胶凝材料领域研究及其成果应用很多,其中工业固废可用作混凝土的掺合料有:粉煤灰、矿渣、硅灰、硅粉、钢渣粉、煤矸石粉、石灰石粉、脱硫石膏粉、磨细废玻璃粉、沸石粉、磷渣粉、锂渣粉等等,但其资源化应用潜力还没完全被挖掘,一些高性能化、高附加值化综合利用的技术路线和创新创意,还没得到全面的研发、应用和推广。基于此,笔者本次对原料来源广、成本低、取得方便和配制简单的粉煤灰、脱硫石膏、矿渣和磨细石英砂 4 个因素掺合进行试验研究。

粉煤灰是燃煤电厂排出的主要固废。据中国电力联合会数据显示,2017 年全国规模以上电厂火电发电量 22215 亿千瓦时,每消耗 4 吨煤,就会产生 1 吨粉煤灰,2017 年中国粉煤灰产生量约为 6.0 亿吨。从环境角度看,大量的粉煤灰不仅浪费土地,而且会对土壤、大气等造成严重污染,给人类身体健康带来危害,但从循环利用角度来看,粉煤灰是名副其实的“城市矿产”,具有潜在的水化活性,其活性主要来自活性 SiO₂(玻璃体 SiO₂)和活性 Al₂O₃(玻璃体 Al₂O₃)在一定碱性条件下的水化作用。因此,粉煤灰中活性 SiO₂、活性 Al₂O₃ 和 f-CaO(游离氧化钙)都是活性的有利成分。本项目将其作为复合掺合料的一种原料进行资源化利用,对保护环境,降

低成本将起到积极作用。

除粉煤灰外,脱硫石膏也是燃煤电厂排出的主要固废。其主要成分和天然石膏一样,为二水硫酸钙 CaSO₄·2H₂O,含量 ≥93%,其有效应用促进了国家环保循环经济的进一步发展,大大降低了矿石膏的开采量,保护了资源。工业发达国家如日本、德国、美国、英国等对脱硫石膏的利用率比较好并在建筑领域得到广泛应用。脱硫石膏主要用于水泥缓凝剂,脱硫石膏中的 CaSO₄ 和铝酸二钙反应生成高硫型水化硫铝酸(3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·31H₂O)和低硫型水化硫铝酸钙(3CaO·Al₂O₃·CaSO₄·12H₂O),生成的水化硫铝酸钙是难溶于水的稳定针状晶体,从而延缓了水泥凝结,提高了水泥的早期强度以及平衡各龄期强度。因脱硫石膏来源广、成本低,本项目选用其作为一种复合掺合料的组分。

矿渣的全称是“粒化高炉矿渣”它是钢铁厂冶炼生铁时产生的废渣,根据 2017 年中国工业固废综合利用发展报告,中国钢铁渣综合利用量为 3.14 亿吨,综合利用率 69.64%,其中,高炉渣利用率最高,现已广泛应用于建材行业,综合利用率可达 95%以上,矿渣含有 95%以上的玻璃体和硅酸二钙,钙、黄长石、硅灰石等矿物,具有较高水化活性,能使各个原材料在性能上产生互补,是传统的混凝土掺合料,也是配合复合掺合料必不可少的组分之一。

磨细石英砂是管桩生产中常用的一种掺合料。使用 SiO₂ 含量高于 90%的优质砂,通过烘干粉磨至表面积大于 400m²/kg,代替部分水泥后,经高压蒸汽养护技术,生成强度更高的托勃莫来石,工程实践案例中掺有磨细砂的管桩,其抗裂、抗弯性能均有较大的提高,抗冲击性能优良,有助于高性能混凝土快速达到 C80 以上。

2 研发试验及生产

本项目所采用的技术路线是,在蒸汽养护条件下,将多种粉体材料通过不同掺量进行正交试验,经过对配方的优选分析确定各组分最佳掺量。然后按确定的比例进行复配,

用复配后的掺合料等量代替部分水泥与传统生产配合比进行管桩混凝土力学性能的对比研究,最终在管桩生产线进行管桩生产并进行抗压、抗弯等力学性能的对比试验。试验结果表明,配制的复合掺合料与传统的生产方式相比具有显著的技术意义和经济意义。

2.1 原材料

(1) 水泥质量指标见表1。

表1 水泥质量指标

品种	比表面积 (m ² /kg)	净浆流动度 (mm)	3d 抗折 (MPa)	3d 抗压 (MPa)	初凝 (min)	终凝 (min)
PII52.5	368	205	6.0	31.3	135	184

(2) 粉煤灰质量指标见表2。

表2 粉煤灰质量指标

品种	比表面积 (m ² /kg)	密度 (g/cm ³)	45 μm (%)	烧失量 (%)	需水量比 (%)
II 级粉煤灰	121	2.5	18	6.0	102

(3) 脱硫石膏: S03 含量 42.6%, 水分小于 1.0%。

(4) 矿渣微粉为 S95 级, 3d 活性指数为 76%, 28d 活性指数为 98%。

(5) 磨细石英砂, 比表面积 420m²/kg。

(6) 减水剂: 萘系, 含固量 38%。

(7) 碎石: 5~25 连续级配, 压碎值 7%, 含泥量 0.5%, 级配合格。

(8) 砂: 中粗砂, 细度模数 2.7, 含泥量小于 1%。

2.2 正交试验

根据前期在实验室做的几次试验, 采用粉煤灰和磨细砂微粉作为掺合料, 掺合料总的添加量为胶凝材料总量的 35%, 从试验结果来看可以得出以下几点结论:

(1) 随着粉煤灰替代率(替代磨细砂微粉比率)增加, 会使水胶比加大, 相应要增加减水剂用量。

(2) 就强度测试结果而言, 粉煤灰和磨细砂微粉在一定范围内可以等量互相替代。

进行 4 因素 3 水平正交试验, 正交试验因素水平设计见表 3。本正交试验考虑粉煤灰、磨细砂、矿粉、脱硫石膏 4 个因素, 而各水平是考虑各种掺合料的掺加量, 本试验固定胶凝材料中水泥的掺加量为 65%, 4 种掺合料的总掺加量为 35%。正交试验的指标采用混凝土试块蒸压强度, 在正交试验的直观分析中采用这个指标的因素水平的趋势图和极差 R 值进行分析。

表3 正交试验因素和水平设计

因素 水平	A	B	C	D
	粉煤灰掺加量 (%)	磨细砂掺加量 (%)	矿粉掺加量 (%)	石膏粉掺加量 (%)
1	5	15	5	2
2	10	25	10	4
3	15	35	15	8

根据上述 4 因素 3 水平设计, 共需 9 组试验, 具体试验表安排见表 4(为保证每组试验 4 因素的水平数之和为 35, 需根据每个因素的水平数所占的比例重新计算):

表4 L9 (43) 正交试验

试验编号	A	B	C	D	高压强度 (MPa)
	粉煤灰掺加量 (%)	磨细砂掺加量 (%)	矿粉掺加量 (%)	石膏粉掺加量 (%)	
1	6.48	19.44	6.48	2.59	84.80
2	3.98	19.89	7.95	3.18	87.50
3	2.78	19.44	8.33	4.44	90.20
4	8.14	12.21	8.14	6.51	85.40
5	6.73	16.83	10.10	1.35	86.70
6	6.48	22.69	3.24	2.59	91.30
7	10.71	10.71	10.71	2.86	82.10
8	9.91	16.51	3.30	5.28	86.20
9	8.47	19.76	5.65	1.13	92.30
均值 1	87.50	84.10	87.43	87.93	
均值 2	87.80	86.80	88.40	86.97	
均值 3	86.87	91.27	86.33	87.27	
极差 (R)	0.93	7.17	2.07	0.97	

从试验结果来看, 第 9 组试验的强度最高, 所以直观的首选方案为 A3B3C2D1。

从每个因素各水平所导致的结果的均值可以看出, 粉煤灰掺加量所取 4 水平中, 15%掺加量所产生的结果的均值最大。磨细砂掺加量所取 4 水平中, 35%掺加量所导致的结果的均值最大。矿粉掺加量所取 4 水平中, 10%掺加量所产生的结果的均值最大。脱硫石膏掺加量所取 4 水平中, 2%掺加量所导致的结果的均值最大。所以可能最优方案为 A3B3C2D1。再从极差分析中发现磨细砂掺加量的极差最大, R=7.17, 它是影响试块高压强度的关键因素, 其次是矿粉掺加量 (R=2.07), 再次是脱硫石膏掺加量和粉煤灰掺加量为次要因素。这也验证了管桩企业大量使用磨细石英砂的可行性。

基于以上试验, 初步确定复合掺合料配比是: 粉煤灰: 磨细砂: 矿粉: 脱硫石膏=15: 35: 10: 2, 折算成百分比, 则为: 粉煤灰: 磨细砂: 矿粉: 脱硫石膏=24.2: 56.5: 16.1: 3.2

2.3 配方调整与优选

按照正交试验所得出的复合掺合料配合比配制样品后, 分别按照等量代替 35%、40%、45%、50%水泥进行试配, 并与管桩传统生产时以 35%磨细石英砂进行对比试验。

试配时, 为确保试验的准确可靠, 胶凝材料总量统一为 420kg/m³, 水胶比控制为 0.30, 减水剂掺量为 0.65%, 砂率为 35%, 容重为 2450kg/m³。

养护方式统一为常压蒸汽养护和高压蒸汽养护。常压蒸汽养护为升温 2h, 80℃±2℃恒温 4h; 高压养护为升温升压 2h, 在 1MPa 压力和 180℃饱和蒸汽中恒温恒压下养护 5h。待试件冷却后进行强度试验, 其试验结果见表 5。

表 5 强度试验结果

胶材总量 Kg/m ³	胶材配比 (%)			混凝土强度(MPa)		备注
	水泥	磨细砂	复合掺合料	脱模	高压	
420	65	35		45.0	86.9	和易性良
420	65		35	56.2	97.8	和易性良
420	60		40	52.7	92.6	和易性良
420	55		45	48.3	88.1	略泌水
420	50		50	43.2	82.3	略泌水

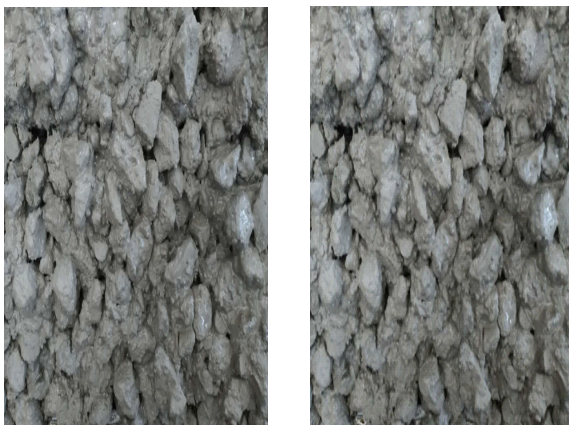
由表 5 可见, 以 35%的复合掺合料代替原磨细砂后, 混凝土脱模及高压强度均有较大提高。当复合掺合料增加至 40%、45%时, 脱模强度及高压强度仍高于原来的配方。当复合掺合料掺量达到 50%时, 混凝土强度下降明显, 已低于传统的配合比强度。试验结果表明, 复合掺合料具有良好的技术经济价值。

根据上列试验结果, 项目组进行了反复的验证试验, 且在复合掺合料掺料在 47%时, 脱模强度、高压强度及混凝土和易性最好。因此, 在后续的车间生产管桩时, 均以 47%的复合掺合料进行生产。

2.4 车间试生产

在复合掺合料多次进行验证试验的基础上, 在车间进行了试生产。试生产结果表明, 混凝土和易性良好, 混凝土强度达到预期目标。

(1) 混凝土状态



空白样

复合掺合料样

由上图可见, 使用复合掺合料的混凝土和易性良好, 具有较多的浆体和良好的包裹性。

(2) 管桩外观及内壁



外观质量



外观质量



空白样内壁



复合掺合料桩内壁

(3) 混凝土强度

胶材总量 Kg/m ³	胶材配比 (%)			混凝土强度(MPa)		备注
	水泥	磨细砂	复合掺合料	脱模	高压	
420	65	35		46.6	87.9	和易性良
420	53		47	51.2	91.3	和易性良
420	53		47	49.7	88.6	和易性良

采用复合掺合料后, 混凝土强度达到预期目标。

(4) 抗弯性能

类别	开裂弯矩		极限弯矩		极限挠度		裂缝数量	裂缝宽度 (mm)
	M _{cr} (KN.m)	比例 (%)	M _u (KN.m)	比例 (%)	(mm)	(mm)		
江苏省标 PHC	61	100	123	100	—	—	—	—
普通 PHC	66	108	131.5	107	30.72	8	8	>2
掺合料 PHC	67	110	135.9	110	34.10	7	7	>1.5

力学性能检测结果表明, 使用复和掺合料生产的管桩, 与传统生产方式同规格管桩相比, 抗弯性能相当。

2.5 工程应用案例

应用高强混凝土管桩带来的经济、环境和社会效应。采用上述矿物掺合料新技术, 进行科学配比设计, 可确保混凝土强度等级≥C80; 其施工周期短, 效率高, 回报快, 施工现场简单, 便于管理, 可节约施工费用, 单位承载力造价低, 综合

经济效益好;文明施工,现场整洁,不污染环境,符合环保要求,施工机械化程度高,检测方便,监理强度低。目前已于工业与民用建筑的承台桩基础,铁路、公路与桥梁、港口、码头、水利、市政、构筑物及大型设备等工程,在桩基础工程中更具明显的优势。(见下图):

福建莆田涵江区陆岛交通码头-水工领域现场施工应用案例



3 结论

3.1 没有技术创新,工业固废永远是废物,实现高性能化和高附加值化应用更无从谈起,本项目采用工业固废进行混凝土复合掺合料的配制并用于高强混凝土管桩生产,是一条实现“变废为宝”和生态发展的有效途径。

3.2 目前工业固废产量大,品种多,复合掺合料的配制,应尽量采用原料来源广,价格低的工业废弃物以达到降低成本的目的。在本项目中,粉煤灰、脱硫石膏等原料在各地随处可得,价格低廉,可实现降本增效。

3.3 在条件允许的企业,可将粉煤灰、矿粉、脱硫石膏等多种组分复合配制后使用,在试验基础上选取最佳生产工艺参数和控制指标,以确保复合掺合料质量的稳定性。

3.4 鉴于目前混凝土复合掺合料应用技术规范多数是对单一矿物掺合料做出了规定,缺乏对复合掺合料的应用技术

标准的顶层设计,为适应和指导复合掺合料的工程应用,建议加大对工业固废应用到复合掺合料领域技术规范的研究,规范相关标准。

4 结束语

根据工信部文件,当前我国工业固废年产生量约 33 亿吨,占地超过 200 万公顷,不仅浪费资源、占用土地,而且已经严重危害到生态环境和人民健康安全,如何科学地推进工业固废的资源化应用受到了业内外的广泛关注。为此,我们要以资源利用的高技术含量、高品质和高性能为准则,有针对性地研发具有高附加值应用技术和标准体系,这也是实现当前产业转型升级和环保效应的重要举措。

【参考文献】

[1]张红.专家纵论固废资源化—“固废在混凝土中的应用与混凝土的可持续发展高峰论坛”侧记[J].混凝土世界,2015,(7):14-18.

[2]杨久俊,卢育英,宁彩珍,等.粉煤灰资源特性及其高附加值综合利用研究分析[J].天津城建大学学报,2006,12(2):139-143.

[3]苟德胜,王卫民,李斌斌,等.高性能混凝土复合掺合料的研发应用[J].混凝土世界,2018,(3):85-89.

[4]冷发光,丁威,纪宪坤,等.《绿色高性能混凝土技术》[M].北京:中国建材工业出版社,2011,(12):35.

[5]孔祥文,王丹,隋智通.《矿渣胶凝材料的活化机理及高效激发剂》[J].中国资源综合利用,2004,(6):22-26.

[6]苟德胜,李斌斌,一种用于混凝土及水泥制品的活性增效剂:201210109971.0[P].2012.09.12.

[7]先张法预应力混凝土管桩标准:GB 13476-2009[S].中国国家标准化管理委员会,2010:12-18.

[8]徐永模.固废资源化利用:需要突破的观念[J].混凝土世界,2018,(07):63.

[9]刘雅琦,阮炯正,仲崇山,等.混凝土矿物复合掺合料应用技术规范的探讨[J].吉林建筑大学学报,2013,30(2):4-8.