

赤泥-粉煤灰复合胶凝材料的力学性能研究

陈兵¹ 王鑫² 韩卫卫^{3*}

1 河南交投沈遂高速公路有限公司 2 河南省公路工程局集团有限公司 3 河南财经政法大学

DOI:10.32629/etd.v6i7.18215

[摘要] 赤泥、粉煤灰属于大宗工业固废,其资源化利用对于环境保护、可持续发展有着十分重要的意义。本研究利用正交试验,对赤泥掺量、粉煤灰掺量、水胶比、养护龄期等对复合胶凝材料力学性能的影响规律进行了系统的分析。结果表明,当赤泥掺量为20%,粉煤灰掺量为30%,水胶比为0.4时,复合胶凝材料的28天抗压强度为37.25MPa,抗折强度为5.56MPa,满足工程应用的要求。本研究给赤泥、粉煤灰的高效资源化利用提供理论依据和技术支持。

[关键词] 赤泥; 粉煤灰; 复合胶凝材料; 力学性能

中图分类号: TQ177.5 文献标识码: A

Research on the Mechanical Properties of Composite Clinker-Powder Ash Cementitious Materials

Bing Chen¹ Xin Wang² Weiwei Han^{3*}

1 Henan Jiaotong Shen Su Expressway Co., Ltd

2 Henan Provincial Highway Engineering Bureau Group Co., Ltd

3 Henan University of Economics and Law

[Abstract] Red mud and fly ash are major industrial solid wastes. Their resource utilization is of great significance for environmental protection and sustainable development. This study utilized orthogonal experiments to systematically analyze the influence laws of red mud content, fly ash content, water-cement ratio, and curing age on the mechanical properties of the composite cementitious materials. The results showed that when the red mud content was 20%, the fly ash content was 30%, and the water-cement ratio was 0.4, the 28-day compressive strength of the composite cementitious materials was 37.25 MPa, and the flexural strength was 5.56 MPa, meeting the requirements for engineering applications. This study provides theoretical basis and technical support for the efficient resource utilization of red mud and fly ash.

[Key words] Red mud; Fly ash; Composite cementitious materials; Mechanical properties

随着工业的迅速发展,我国每年产生的赤泥和粉煤灰分别达到数千万吨和超过6亿吨,大量的堆积占用着土地资源,其产生的碱性、粉尘等问题给生态环境造成严重的影响,同时传统的水泥行业作为碳排放大户也面临着很大的减排压力。因此,开发以工业固废代替部分水泥的新型胶凝材料,已经成为建材行业实现绿色转型的重要途径。赤泥含有硅酸钙等潜在活性成分,粉煤灰含有火山灰活性的玻璃体,两者协同利用可以制备出性能良好的复合胶凝材料。但是目前对于二者协同作用机理以及复合体系优化设计的研究还很少。因此本文通过试验研究,确定赤泥-粉煤灰复合胶凝材料的最佳配比及强度形成机理,为赤泥-粉煤灰复合胶凝材料的规模化工程应用打下基础,推动固废资源化和建材行业的可持续发展。

1 试验原材料与方案

1.1 试验原材料

本试验所用原材料有胶凝组分、骨料、拌和水。核心胶凝材料为P042.5级普通硅酸盐水泥,性能符合GB175-2007国家标准。赤泥取自某氧化铝厂,呈红褐色,含水率为32.5%,烘干后研磨过80 μ m筛后使用,Fe₂O₃含量高(28.41%),具有一定的颜色和弱胶凝性。粉煤灰为II级灰,细度(45 μ m筛余)为12.5%,需水量比为98%,含有较多的SiO₂和Al₂O₃,具有较好的火山灰活性。标准砂为细骨料,自来水为拌和用水。为了确定材料的化学基础,各种原材料的主要化学成分见表1^[1]。

1.2 试验方案

本研究的主要目的就是系统分析赤泥(A)、粉煤灰(B)、水胶比(C)对复合胶凝材料力学性能的影响。采用三因素四水平的正交试验设计(L16(4³))来设计出16组不同的配合比,研究各变

量对材料性能的具体作用。胶凝材料总质量为1000g,水泥为余量。砂率固定为33%,用标准砂作为骨料来控制变量。试件尺寸为40mm×40mm×160mm,按照《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671-1999)制备、成型。成型后的试件在(20±2)℃、湿度≥95%的标准养护箱内进行养护,分别在3d、7d、28d龄期进行抗折和抗压强度试验,每组取3个试件的平均值。另外,选取28d龄期最优组和基准水泥组的试件,用无水乙醇终止水化后,采用X射线衍射(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)对水化产物及微观结构的变化进行分析,以期找到性能变化的内在原因。

表1 试验原材料主要化学成分(质量分数,%)

成分	水泥	赤泥	粉煤灰
SiO ₂	21.56	18.62	52.36
Al ₂ O ₃	6.82	12.35	28.45
Fe ₂ O ₃	3.45	28.41	6.78
CaO	62.31	15.78	5.23
MgO	2.18	3.26	2.15
Na ₂ O	-	4.82	-
K ₂ O	-	1.25	-
SO ₃	2.45	-	0.86
烧失量	1.23	13.56	4.12

表2 正交试验因素水平表

因素	水平1	水平2	水平3	水平4
赤泥掺量 A (%)	10	20	30	40
粉煤灰掺量 B (%)	20	30	40	50
水胶比 C	0.40	0.45	0.50	0.55

2 试验结果与分析

2.1 正交试验结果

根据正交试验设计,对16种不同的赤泥和粉煤灰复合胶凝材料做了力学性能试验,得到3d、7d、28d龄期的抗折强度和抗压强度数据(见表3)。总体上,各个配比试件的强度随着养护龄期的延长而增加,符合典型的水硬性胶凝材料强度发展规律。28天龄期试验中第6组混凝土(赤泥占20%、粉煤灰占30%、水胶比为0.40)力学性能最好,抗折强度为5.56 MPa,抗压强度达37.25 MPa^[2]。结果和胡萍的研究一致,胡萍认为粉煤灰掺量在20%以内时,可以提高混凝土的抗裂性。

另外,碱激发矿渣-粉煤灰复合体系的研究也表明,矿渣与粉煤灰的比例为8:2时,抗折、抗压强度较高。在研究中发现第13组(赤泥40%、粉煤灰20%、水胶比0.55)混凝土强度最低,28天抗压强度为25.89MPa,与粉煤灰在该配比下的掺量有关。试验

结果清楚地表明,赤泥和粉煤灰掺入不是线性地改善或者恶化性能,而是存在一个最佳的协同作用区间,水胶比的影响非常显著,低水胶比普遍对应更高的强度。

表3 正交试验关键组力学性能测试结果

试验组	赤泥掺量 (%)	粉煤灰掺量 (%)	水胶比	28d 抗折强度 (MPa)	28d 抗压强度 (MPa)
1	10	20	0.40	5.28	35.68
6(最优)	20	30	0.40	5.56	37.25
11	30	40	0.40	5.02	32.89
13(最差)	40	20	0.55	4.05	25.89
16	40	50	0.40	4.98	32.18

2.2 各因素对力学性能的影响分析

用固定两个变量、分析第三个变量的方法,系统地研究了各个因素对力学性能的影响。赤泥掺量影响呈先促进后抑制的趋势。当掺量从10%增加到20%时,28d抗压强度由原来的约33MPa提高到37MPa以上;掺量超过20%以后,强度开始下降,40%掺量时强度不足26MPa。由于适量赤泥中活性组分(如硅酸钙)参与水化反应,产生额外的胶凝物;但是过量的赤泥因为活性低、含惰性成分多,稀释水泥,并引入强碱性,造成结构弱化。

粉煤灰掺量表现出同样的规律,最佳掺量为30%,此时粉煤灰的火山灰反应被充分激发,消耗Ca(OH)₂生成更多的C-S-H凝胶,起到增强和密实作用;掺量超过30%时水泥相对不足,激发不充分,粉煤灰颗粒堆积空隙增大,导致强度下降^[3]。水胶比影响最大,水胶比由0.40增大到0.55时,28d抗压强度平均下降约30%。低水胶比意味着自由水少、浆体浓度高、水化充分,形成的结构孔隙率低、密实度高;高水胶比会造成多余水分蒸发后留下毛细孔洞,成为应力集中点,严重劣化力学性能。

2.3 微观分析

为了更好地理解宏观力学性能差异的机理,对28d龄期最优配比试件(第6组)和纯水泥基准试件做了XRD和SEM分析。XRD图谱表明,复合胶凝材料试样氢氧化钙(Ca(OH)₂)特征衍射峰强度比基准组弱很多。说明赤泥中的活性组分、粉煤灰的火山灰反应消耗了大量水泥水化生成的Ca(OH)₂。图谱中水化硅酸钙(C-S-H)凝胶特征峰的加强说明有额外的胶凝产物生成。SEM图像可以很直接地显示出微观结构的不同。基准水泥石结构中存在较多未水化颗粒及毛细孔隙;而复合胶凝材料试样微观结构更加致密,孔隙明显减少,大量纤维状或网状C-S-H凝胶与针状钙矾石(Aft)交织在一起,形成连续的空间网络结构,把赤泥和粉煤灰颗粒紧密包裹和粘结。致密的微观结构就是复合胶凝材料获得优异宏观力学性能的根本原因^[4]。

3 结论

通过正交试验和微观分析,系统研究了赤泥-粉煤灰复合胶凝材料的力学性能,得出如下结论

(1) 赤泥、粉煤灰的掺入都会对复合胶凝材料的力学性能造成影响,而且二者都有最佳掺量范围,当赤泥掺量为20%、粉煤灰掺量为30%时,复合体系能发挥最佳的协同增强效果。水胶比是控制强度的重要参数,较低的0.40水胶比有利于形成更致密的结构,得到更高的力学性能。

(2) 最优配合比的复合胶凝材料力学性能好,28天抗压强度为37.25MPa,抗折强度为5.56MPa,完全满足32.5级胶凝材料的工程使用要求,可以代替一部分水泥。掺加适量粉煤灰的混凝土结构早期抗压强度会下降,但是随着养护龄期增长,粉煤灰与水化产物进一步反应形成黏结强度高、水化硅酸纤维状晶体,从而改善混凝土力学性能。

(3) 研究显示,赤泥、粉煤灰在体系中起物理填充、化学协同作用,使材料性能得到明显改善。赤泥、粉煤灰的微细颗粒改善了孔隙结构,在碱性环境下,其活性组分被激发参与水化反应,消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成更多的C-S-H凝胶等水化产物,共同形成更致密、强度更高的微观结构。综合来看,利用赤泥和粉煤灰制备复合胶凝材料技术可行、性能良好,为两种大宗工业固废的高附加值资源化利用提供了一条有效途径。

[基金项目]

(1) 本文系横向课题《赤泥-粉煤灰-脱硫石膏胶凝材料体系设计及其用作道路基层的性能研究》(项目编号20230022);(2) 河南省2026年度一般人文社科项目《“师-生-机”三元交互教学模式赋能学为中心教学范式改革研究》项目编号2026-ZDJH-462;多学科交叉视角下数智时代地方高校教师数字素养提升多维困境与

协同路径研究》(项目编号25HNCDXJ28)。

[参考文献]

[1] 李钰佳,段思宇,吴浩,等.赤泥-粉煤灰-电石渣复合胶凝材料的力学性能及水化机理[J].硅酸盐通报,2025,44(03):1041-1049.

[2] 窦占双,李晓民,秦宏涛,等.化学激发大掺量粉煤灰复合胶凝材料力学性能与水化机理研究[J].硅酸盐通报,2025,44(1):243-252.

[3] 李博闻,成云海,李伟利,等.碱激发铜渣-粉煤灰复合胶凝材料的力学性能及水化机理研究[J].煤炭与化工,2024,47(10):141-148.

[4] 丁锐,赵献伟,崔超,等.碱/粉煤灰/矿渣复合胶凝材料力学性能研究[J].吉林建筑大学学报,2023,40(02):25-30.

作者简介:

陈兵(1992--),男,汉族,河南省漯河市人,本科,助理工程师,河南交投沈遂高速公路有限公司,研究方向:公路工程施工与管理。

王鑫(1986--),男,汉族,河南驻马店人,本科,高级工程师,河南省公路工程局集团有限公司,研究方向:公路工程施工。

*通讯作者:

韩卫卫(1986--),男,汉族,河南平顶山人,博士研究生,中级讲师,河南财经政法大学,研究方向:新型水泥基材料、土木工程材料。