粉煤灰-矿渣粉-脱硫石膏固废基胶凝材料配比优化

赵全胜¹ 周 坤¹ 李光宇² 贾 剑¹

1. 河北科技大学建筑工程学院 河北 石家庄 050018

2. 河北高速公路集团有限公司石安分公司 河北 石家庄 050000

摘要:为促进大宗工业固废的资源化利用,本文采用粉煤灰、矿渣粉和脱硫石膏制备固废基胶凝材料。通过设计不同组分配比的胶砂试件,系统分析了其力学性能的变化规律,并利用数学模型对力学强度进行回归拟合,以寻找最优配比。结果表明:粉煤灰和脱硫石膏掺量的变化对胶凝材料的力学强度有显著影响;随着粉煤灰掺量的增加,抗压强度在7d龄期下逐渐下降,28d龄期下则呈现先增后减的趋势,而抗折强度均表现为先增大后减小;随着脱硫石膏的增加,不同龄期下抗压和抗折强度均逐渐降低。通过数学模型优化,得出固废基胶凝材料的最优配比为粉煤灰45%、矿渣粉47%、脱硫石膏8%,该配比下28d抗压强度和抗折强度模型预测值分别为32.21 MPa和6.41 MPa。研究结果可为固废基胶凝材料的配比设计提供参考,为大宗工业固废的资源化利用提供技术支持。

关键词:胶凝材料;固废;力学性能;配比优化

近年来,粉煤灰、矿渣粉、脱硫石膏和钢渣等大宗工业固体废弃物的产生量逐渐增加,给环境保护和资源利用带来了巨大压力^[1]。这些固体废弃物不仅占用大量土地资源,还可能对土壤和水体造成污染,影响生态环境的可持续发展^{[2][3]}。将固体废弃物制备成胶凝材料并应用于道路建筑工程中,不仅能够有效消纳大量工业固废,还能减少水泥的消耗,从而降低碳排放^{[4][5]}。因此,本文将采用粉煤灰、矿渣粉和脱硫石膏制备固废基胶凝材料,并探究其力学性能。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用粉煤灰、矿渣粉、脱硫石膏均由河北辛集某公司提供。粉煤灰密度为2.157 g/cm³,比表面积为537 m²/kg,化学成分主要有SiO₂和Al₂O₃,主要矿物相为莫来石和石英;矿渣粉密度为2.915 g/cm³,比表面积为490 m²/kg,化学成分主要有CaO和SiO₂,主要以未结晶的玻璃相存在,无明显结晶相;脱硫石膏密度为2.483 g/cm³,比表面积为418 m²/kg,化学成分主要有SO₃和CaO,主要矿物相为半水石膏。

1.2 试验方案

将粉煤灰、矿渣粉和脱硫石膏作为原材料制作胶砂试件,开展力学性能试验。利用软件设计数学模型对力学性能试验结果进行回归分析,确定固废基胶凝材料最优配比。固定粉煤灰掺量为30%、40%、50%和60%,脱硫石膏掺量为4%、8%、12%和16%,其余为矿渣粉掺量,具体配合比试验方案见表1。

表1 试验设计配合比

序号	粉煤灰/%	脱硫石膏/%	矿渣粉/%
A1	30	8	62
A2	30	12	58
A3	30	16	54
A4	30	20	50
A5	40	8	52
A6	40	12	48
A7	40	16	44
A8	40	20	40
A9	50	8	42
A10	50	12	38
A11	50	16	34
A12	50	20	30
A13	60	8	32
A14	60	12	28
A15	60	16	24
A16	60	20	20

1.3 试验方法

根据《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671-2021)中相关试验要求制作胶砂试件,进行力学强度试验。

2 试验结果分析

2.1 抗压强度试验

根据表1中的配比方案,采用胶砂力学性能试验方法测试了7d和28d抗压强度,试验结果如下表2所示。结果显示,粉煤灰和脱硫石膏的掺量均对强度产生显著影响。首先,随着粉煤灰掺量的增加在7d龄期内导致抗压

强度逐渐下降,而在28d龄期则表现出先增加后减小的趋势。这是因为粉煤灰的活性较低,其火山灰效应在早期阶段对强度贡献有限。而在28d龄期,适量的粉煤灰掺量(30%至50%)能够增强试件的结构致密性和抗压强度,但当粉煤灰掺量过高,强度又会显著下降。另一方面,随着脱硫石膏掺量的增加在不同龄期下均导致抗压强度逐渐减小。

表2 抗压强度试验结果

序号	7d抗压强度/MPa	28d抗压强度/MPa
A1	22.28	28.13
A2	20.79	25.88
A3	19.21	24.73
A4	18.69	23.67
A5	22.21	30.25
A6	20.59	28.34
A7	18.68	26.62
A8	16.85	25.59
A9	21.76	32.18
A10	16.36	29.51
A11	15.67	27.69
A12	14.95	25.91
A13	17.75	28.83
A14	12.41	25.62
A15	9.53	20.66
A16	8.28	18.85

2.2 抗折强度试验

抗折强度试验结果如下表3所示。结果显示,随着粉煤灰掺量的增加在不同龄期内抗折强度均呈现出先增大后减小的趋势。在7d龄期时,当粉煤灰掺量从30%增加到40%时,各脱硫石膏掺量组的抗折强度达到最大值,尤其在8%脱硫石膏掺量组中,抗折强度从4.95 MPa增加到5.56 MPa,增长幅度为12.32%。然而,当粉煤灰掺量进一步增加至60%时,抗折强度开始下降,特别是在20%脱硫石膏掺量组中,下降幅度达到39.80%。在28d龄期时,抗折强度的变化趋势与7d相似,但最大值出现在不同的粉煤灰掺量组中。另一方面,随着脱硫石膏掺量的增加在不同龄期下均导致抗折强度的逐渐减小。在7d龄期时,随着脱硫石膏掺量从8%增加到20%,各粉煤灰掺量组的抗折强度均显著下降,其中60%粉煤灰掺量组的下降幅度最大,达到38.87%。在28d龄期时,抗折强度的下降趋势与7天相似,且下降幅度在不同粉煤灰掺量组中也表现出一致性。

表3 抗折强度试验结果

序号	7d抗折强度/MPa	28d抗折强度/MPa
A1	4.95	5.98

续表:

序号	7d抗折强度/MPa	28d抗折强度/MPa
A2	4.54	5.65
A3	4.33	5.34
A4	3.64	4.85
A5	5.56	6.13
A6	4.61	5.87
A7	4.39	5.61
A8	3.97	4.96
A9	4.93	6.38
A10	4.54	5.63
A11	3.95	5.02
A12	3.19	4.88
A13	3.91	5.74
A14	3.72	4.42
A15	2.73	4.04
A16	2.39	3.83

2.3 配比优化

利用Minitab软件设计数学模型对固废基胶凝材料28d抗压强度和抗折强度进行回归分析,回归分析将粉煤灰、矿渣粉和脱硫石膏的掺量作为自变量(x_1 、 x_2 、 x_3)与抗压和抗折强度(作为因变量)之间的关系进行建模。确定强度数学模型如下:

$$y_{\text{抗压}} = -5.21x_1 + 12.29x_2 + 296.05x_3 + 113.3x_1x_2 - 408.83x_1x_3 - 372.27x_2x_3$$

$$y_{\text{抗折}} = -7.12x_1 - 6.44x_2 + 136.88x_3 + 185.75x_1x_2 - 149.66x_1x_3 - 170.31x_2x_3$$

为优化固废基胶凝材料的配比,使用Minitab软件的数据优化功能,设定28d抗折强度的权重为0.5,28d抗压强度的权重为1,得出固废基胶凝材料最优配比为:粉煤灰掺量45%、矿渣粉掺量47%、脱硫石膏掺量8%。该配比下,28d抗压和抗折强度模型预测值分别为32.21 MPa和6.41 MPa。将求解得到的最优配比进行胶砂力学性能试验,试验结果见表4所示。试验结果与预测结果强度接近,进一步验证了模型的可靠性,可以认为该模型具有一定的指导意义。

表4 固废基胶凝材料优化配比性能试验结果

性能指标		最优配比
7d抗压强度/MPa		
抗压强度/MPa	7d	22.82
	28d	32.39
抗折强度/MPa	7d	5.04
	28d	6.31

3 结论

本文对固废基胶凝材料力学性能及其配比优化进行研究,通过改变固废基胶凝材料各固废组分掺量进行胶砂力学性能试验,分析各掺量变化对胶凝材料体系力学强度的影响规律,并且通过多元非线性回归对抗压、抗折强度进行拟合,对胶凝材料配合比进行优化。得到以下主要结论:

(1) 随着粉煤灰掺量的增加,在7d龄期时,抗压强度逐渐降低,而在28d龄期,抗压强度呈现出先增加后减少的趋势,最佳掺量为50%。抗折强度在不同龄期均表现为先增大后减小,粉煤灰掺量60%时强度最小。

(2) 随着脱硫石膏掺量的增加导致不同龄期下试件的抗压强度和抗折强度均呈现出逐渐降低的趋势,且高粉煤灰掺量组的下降幅度更为明显。

(3) 建立28d抗压和抗折强度数学模型,通过数学模型求解优化,得到固废基胶凝材料最优配比为粉煤灰掺量45%,矿渣粉掺量47%,脱硫石膏掺量8%,该配比下

28d抗压强度和抗折强度模型预测值分别为32.21 MPa和6.41 MPa。

参考文献

[1]王强,张兴军,杜晓伟,等.多元固废基胶凝材料的组成优化及强度形成机理[J].科学技术与工程,2024,24(23):10063-10071.

[2]聂松,周健,徐名凤,等.低碳胶凝材料的研究进展[J].材料导报,2024,38(02):60-68.

[3]朱增超,刘贤平,水中和,等.固废基复合胶凝材料配比优化设计及协同效应研究[J].硅酸盐通报,2023,42(12):4368-4377+4388.

[4]南雪丽,杨旭,张宇,等.钢渣-矿渣基胶凝材料的协同水化机理[J].建筑材料学报,2024,27(04):366-374.

[5]张广田,张艳佳,贺光炜.固废基胶凝材料水化特性及其掺量对C30混凝土力学性能影响研究[J].建筑结构,2024,54(23):133-137+26.