

燃煤炉渣基泡沫轻质土路用材料性能研究

蒋善国¹, 韩佳琦², 陈忠平³, 余匡迪³

(1. 湖南高速建设工程有限公司, 湖南 长沙 410000; 2. 中交二公局萌兴工程有限公司, 陕西 西安 710065;

3. 广东同创科鑫环保有限公司, 广东 广州 511455)

摘要:采用山东枣庄燃煤电厂炉底渣,粉磨后与硅酸盐水泥和石灰石粉混合制备复合粉,使用碳酸盐作为激发剂,并通过物理发泡手段制备炉渣基泡沫轻质土路用材料。重点研究炉渣轻质土的湿密度对力学性能、工作性能、消泡率和空隙率的影响。试验结果表明:燃煤炉渣基轻质土无侧限抗压强度随湿密度降低大幅衰减,流动扩展度随泡沫率的增大呈线性降低,轻质土消泡率在密度为 $650\sim 750\text{ kg/m}^3$ 范围内变化不大。考虑各项性能指标,当采用炉渣占比50%,水泥掺量40%,石灰石粉10%,外掺4%激发剂制备湿密度 650 kg/m^3 轻质土时,可较好满足现浇轻质土的工作性能,同时消泡率较低。试样3 d强度达0.79 MPa,28 d强度可达1.63 MPa。

关键词:燃煤炉渣;泡沫轻质土;碳酸盐激发;湿密度;路用材料

中图分类号: U414

文献标志码: A

目前中国能源结构依然是以煤炭为主导,火力发电厂、工业锅炉、地暖系统等设备消耗大量煤炭,同时伴随产生大量的烟气和炉底渣^[1]。据统计,2020年中国煤炭燃烧总量达49.8亿t,按照1 t煤燃烧后,平均产生0.35 t炉渣换算可得,全年炉渣排放量高达17.4亿t^[2]。随着经济社会的发展,人们对环保的需求和重视程度越来越高,炉渣的无害化处置和资源化利用在业内愈加重要。根据工信部颁布的《国家工业固体废物资源综合利用产品目录》,燃煤炉渣被归类于一般固体废弃物^[3],引导企业做好固体废弃物的资源化利用,并鼓励进行税费减免。

炉渣资源化利用目前主要在以下方面进行尝试:

① 炉渣经过筛分后,作为轻骨料制备砂浆或混凝土^[4],但存在筛分利用率低,玻璃体溶解—结晶导致的二次水化胀裂等问题,目前炉渣作为骨料应用十分有限;② 炉渣用于污水处理,得益于炉渣疏松多孔的特点,遇水后溶出的铝离子在水中形成絮凝体对污水中的重金属离子和有机物起到一定的吸附作用^[5],但炉渣内部可溶性盐对环境的影响还需进一步论证,目前未得到实际应用;③ 炉渣应用于土壤改良^[6],能够显著增大土壤的透气性,改善土壤结构,但本质上炉渣作为固废应用于生态修复上存在较大的挑战,距离规模化、工业化应用则更加遥远。

燃煤炉渣化学成分主要以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 MgO 为主,同时含有少量 K_2O 、 Na_2O 、 SO_3 、

CrO_2 等^[7]。炉渣的矿物相组成为非晶相和结晶相,非晶相主要是以硅、铝为网络形成体,钙为网络改变体,桥接搭建的空间网络玻璃相^[8]。炉渣粉磨后与粉煤灰、矿渣粉类似,具备存在潜在活性的物质基础。因此,炉渣具有一定的火山灰活性,在化学激发、热激发等条件下表现出水硬性胶凝材料性质。

泡沫轻质土作为改善软土路基沉降、减少自重载荷的高性能路用材料,泡沫轻质土材料于2002年,由陈忠平博士引进中国^[9],经过20年的研究和推广,目前已广泛应用于高速公路软土路堤、道路加宽段、软基桥台、塌方抢修等填筑工程^[10]。未来,中国高速公路建设将保持高速、高质量发展,虽然传统水泥基轻质土性能足以满足施工需求,但大量使用水泥带来的高能耗和温室气体排放仍存在较大的优化空间^[11]。将燃煤炉渣微粉大掺量替代水泥,开发以燃煤炉渣为基体的轻质土路用材料,可有效解决炉渣固废带来的环境问题,并通过规模化路用带来极高的附加价值,契合当下的“碳达峰、碳中和”理念,具备较高的社会效益。

综上,燃煤炉渣磨细制粉作为活性掺合料,具备一定的物相基础和理论体系;另一方面,受益于中国高速公路建设规划的巨大市场规模,燃煤炉渣基轻质土具备重大的发展前景。该文采用改性激发的方式,开发燃煤炉渣基轻质土,并着重分析湿密度对材料力学性能和工作性能的影响,同时采用甲醇替代法测量其空隙率,建立空隙率—抗压强度的拟合关系。

1 试验

1.1 原材料分析

(1) 燃煤炉渣选自山东枣庄某火力发电厂,粒径为5~42 mm,试验前使用烘箱 105 ℃ 烘干 8 h,以保证整体含水率低于 1%,烘干后使用 XMB-68 棒磨机进行粉磨,按照每次称取 5 kg 炉渣,棒磨 30 min,直至比表面积达到 400 m²/kg。

将 135 g 燃煤炉渣、315 g 水泥、225 g 试验用水、1 350 g 标准砂,按照 GBT 12957—2005《用于水泥混合材的工业废渣活性试验方法》对燃煤炉渣灰的活性

系数 K 进行测试。 $K=R_1/R_2\times 100\%$, R_1 为掺入工业废渣后试样 28 d 抗压强度; R_2 为对照试样 28 d 抗压强度。得到 28 d 活性系数 K 为 80.95%。

(2) 水泥选自英德海螺 P. O42.5R 水泥,标准稠度用水量 124 g,初凝 180 min,终凝 280 min,依据 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》,测得试验所用水泥 3 d 抗压强度代表值为 24.6 MPa,28 d 抗压强度为 46.9 MPa。

(3) 石灰石粉(重钙型)选自山东青岛某粉磨站,密度为 2.69 g/cm³, $d_{50}=7.5\text{ }\mu\text{m}$ 。

(4) 碳酸盐激发剂选用国药集团分析纯(AR)。炉渣、水泥的氧化物组成如表 1 所示。

表 1 水泥、矿粉及细尾砂氧化物组成									%
原材料	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	CrO ₂	LOI
炉渣	0.14	1.56	32.47	45.80	0.32	8.48	3.22	—	5.77
水泥	0.27	2.64	4.57	19.34	3.65	61.21	3.74	—	3.03

1.2 试验配合比

试验设计 9 组配合比,如表 2 所示。试验配置的胶材组分为燃煤炉渣、水泥、石灰石粉,共计 100%。激发剂为碳酸钠(外掺),掺量均为总量的 4%。固体组分混料均匀后,按水固比 0.6 进行制备胶凝材料,随后进行物理发泡制备湿密度(料浆质量/料浆体积)为 500~750 kg/m³ 的炉渣基轻质土试样。

表 2 试样成型配合比

试样编号	燃煤炉渣掺比/%	水泥掺比/%	石灰石粉掺比/%	水固比	湿密度/(kg·m ⁻³)
LZ541-500	50	40			500
LZ541-550	50	40			550
LZ541-600	50	40			600
LZ541-650	50	40			650
LZ541-700	50	40			700
LZ541-750	50	40	10	0.6	750
LZ631-650	60	30			650
LZ721-650	70	20			650
LZ811-650	80	10			650
LZ901-650	90	0			650

1.3 试样制备

(1) 按照表 2 配合比称量磨细炉渣微粉、水泥和石灰石粉,使用混料机充分混合,制备炉渣基活性料。

(2) 参考 GB 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法》进行制备,按照设计水固比制备胶凝材料净浆,依据 CECS 249—2008《现浇泡沫轻质土技术规程》,净浆搅拌时间不应低于 2 min,转速应控制为 50 r/min。

(3) 依据 CECS 249—2008《现浇泡沫轻质土技术规程》、JC/T 2199—2013《泡沫混凝土用泡沫剂》,采取物理发泡混合的方式制备所需湿密度的轻质土材料。

(4) 依照 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》,成型试样放于标准养护室进行养护,养护条件为温度(20±2) ℃,相对湿度 95%以上。考虑到轻质土硬化过程中的脱水,表面应覆盖塑料薄膜进行保水。

1.4 测试手段

(1) 流动度测试:基于现浇轻质土的性质,流动度测试参照 GB/T 50488—2008《水泥基灌浆材料应用技术规范》,使用内径 80 mm,净高 80 mm 圆筒模具按照流值板法进行测定,垂直方向测 2 次取均值,精确至 1 mm。

(2) 力学性能测试:依照 CECS 249—2008《现浇泡沫轻质土技术规程》,制备 100 mm×100 mm×100 mm 的轻质土试样,在数显全自动压力机上进行测试,读取其极限破坏荷载与破坏面积的比值,每组试样进行 3 次测试,计算平均值和标准差。

(3) 空隙率测试:轻质土空隙率测试采用溶剂(甲

醇)替代法进行,将材料烘干记录绝干质量 m_1 ,将试样浸泡溶液中待甲醇溶液完全浸入记录质量 m_2 ,将表面液体擦净记录饱和面干质量 m_3 ,样品最终总空隙率按照 $n=(m_2-m_1)/(m_3-m_2)\times 100\%$ 求得。

(4) 消泡率测试:使用容量筒测试新拌轻质土初始湿密度(ρ_0),在水平方向和垂直方向交替搅拌,持续时间为 1 min,记录搅拌后湿密度(ρ_x)。重复搅拌步骤,共进行 6 次搅拌,记录此时湿密度(ρ_6),按下式计算湿密度增加率。湿密度= $(\rho_6-\rho_0)/\rho_0\times 100\%$ 。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

力学性能是路用轻质土材料最重要的性能指标之一,图 1 为初始湿密度为 500~750 kg/m³ 时,炉渣基轻质土 3、7、28 d 无侧限抗压强度测试结果。

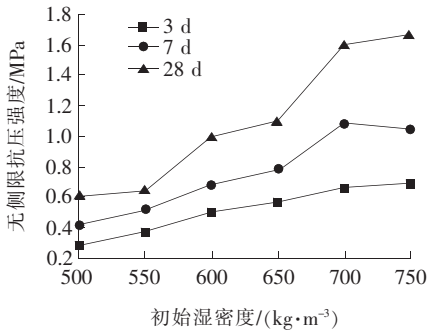


图 1 初始湿密度对轻质土抗压强度性能影响

由图 1 可知:轻质土试验各龄期抗压强度随湿密度增加整体呈上升趋势,3 d 抗压强度由 0.28 MPa 提升至 0.69 MPa;7 d 抗压强度由 0.42 MPa 提升至 1.04 MPa;28 d 抗压强度由 0.61 MPa 提升至 1.67 MPa。图 2 为不同炉渣掺比下,轻质土各龄期抗压强度测试结果。

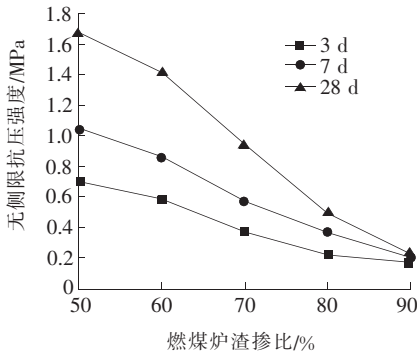


图 2 燃煤炉渣掺比对轻质土抗压强度性能影响

由图 2 可知:随着炉渣掺比的增加,轻质土各龄期

抗压强度大幅降低,3 d 抗压强度由 0.69 MPa(50%炉渣)降低至 0.17 MPa(90%炉渣);7 d 抗压强度由 1.04 MPa 降低至 0.19 MPa;28 d 抗压强度由 1.67 MPa 降低至 0.23 MPa,炉渣掺量高于 80%时,轻质土强度发展大幅受限。

结合上述分析可知:炉渣基泡沫轻质土养护 7 d 后,强度仍有较大的发展空间,所有配合比中均未出现强度倒缩的情况。在炉渣掺量超过 60%,轻质土抗压强度迅速降低,这主要是由于炉渣本身形成强度较难,需要同水泥和激发剂中的活性矿物相以及可溶离子相互作用,产生水化产物以提供强度,因此炉渣掺入比不宜大于 60%。湿密度大于 650 kg/m³,轻质土 28 d 强度大于 1 MPa,强度发展稳定,适合作为后续推荐配合比使用,初始湿密度过低对轻质土强度损害性大。

2.2 流动扩展度

流动度是现浇轻质土重要的工作性能指标,流动度过低会导致无法实现自流平、自密实,甚至引发堵管等工程问题,流动度过高则容易导致料浆不稳定,同样影响材料的使用性能,现浇泡沫轻质土宜控制料浆流值为 160~190 mm。图 3 为新拌轻质土料浆的湿密度对流动度的影响规律,由图 3 可知,随着湿密度的提升,轻质土料浆的流动度逐步提升,由 160 mm(500 kg/m³)提升至 200 mm(750 kg/m³),其中湿密度为 500~650 kg/m³ 可作为现浇泡沫轻质土的推荐流值,可较好应用于工程实际。图 4 为炉渣掺比对流动度的影响,由图 4 可知:随着炉渣掺量的提升,流动度整体呈下降趋势,但变化幅度不大,影响程度较小。

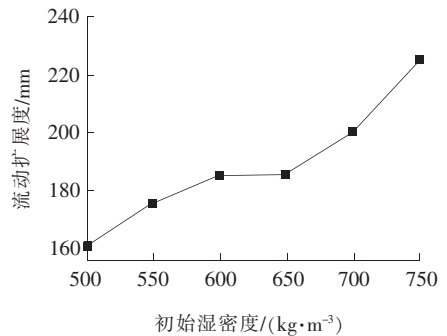


图 3 流动扩展度随湿密度的变化规律

2.3 消泡率

消泡率是反映轻质土泡沫稳定性的重要参数,一般情况下消泡率越低,代表轻质土成型过程中密度变化越低,具备更好的体积稳定性。图 5 为 500、600、750 kg/m³ 初始湿密度的新拌轻质土料浆密度随搅拌次数的变化情况及消泡率随初始湿密度变化情况。

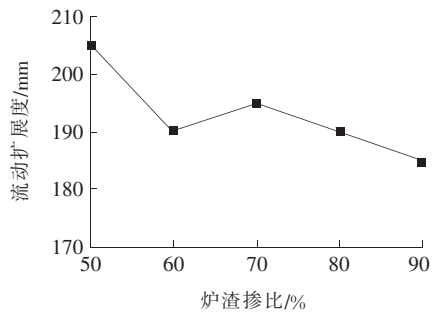


图4 流动扩展度随炉渣掺比的变化规律

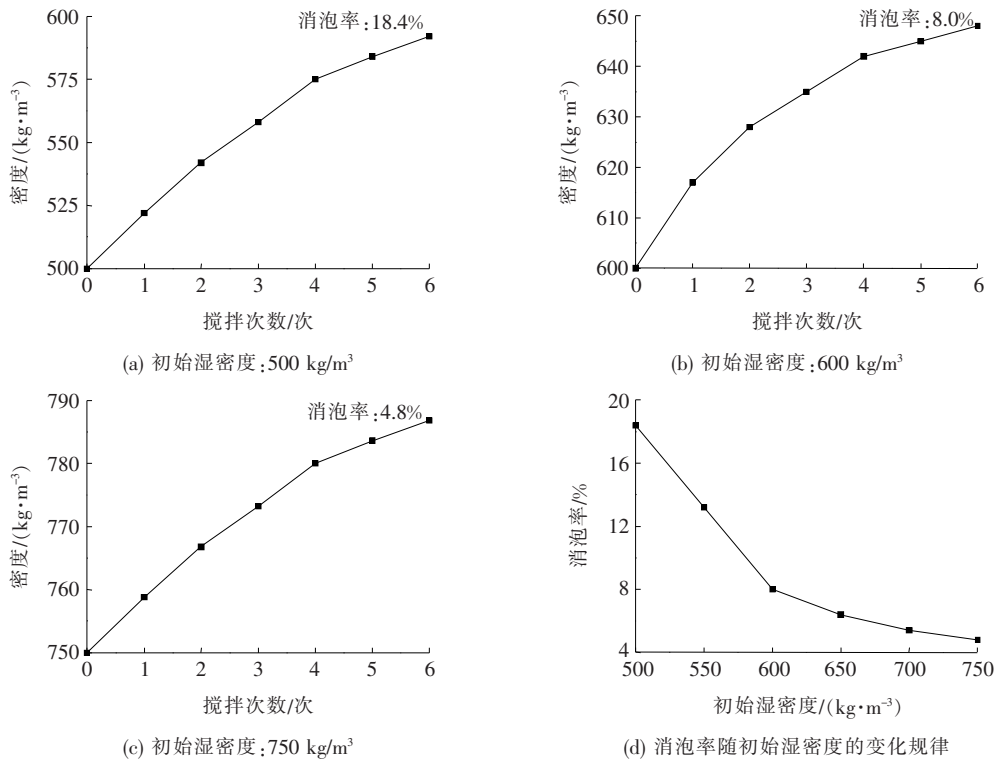


图5 炉渣基轻质土消泡率与初始湿密度的关系

由图 5(d)可知:500、600 kg/m³ 初始湿密度下,消泡率分别为 18.4%和 13.2%,整体消泡较为严重。当初始湿密度大于 650 kg/m³,消泡率出现明显改善,均在 6%以下。

初始湿密度对消泡率的影响显著,体系中泡沫占比越大,受扰动的幅度就越大,泡沫轻质土在外界环境下就越容易消泡,当湿密度大于 650 kg/m³ 时,新拌轻质土料浆消泡率大幅下降,因此抵御外部扰动的能力大,泡沫趋于稳定,在相同质量的情况下,更低的密度变化程度对应更优的体积稳定性,能够更好地保证现浇轻质土施工的稳定性的。

2.4 空隙率—强度对应关系

基于阿基米德原理,采用甲醇替代法测试轻质土

由图 5(a)~(c)可知:按照轻质土测试消泡率的操作规范,料浆湿密度随搅拌次数逐渐增大,前期搅拌对湿密度的影响程度较大,后几次搅拌料浆湿密度增长减缓,密度趋于稳定。初始湿密度为 500 kg/m³ 时,经过 6 次消泡后,密度上升至 592 kg/m³,消泡率为 18.4%;初始湿密度为 600 kg/m³ 时,经过 6 次消泡后,密度上升至 648 kg/m³,消泡率为 8.0%;初始湿密度为 750 kg/m³ 时,经过 6 次消泡后,密度上升至 786 kg/m³,消泡率为 4.8%。

空隙率,并结合 2.1 节中 500~750 kg/m³ 密度轻质土试样的 28 d 抗压强度数据,分析空隙率和抗压强度的关系,结果如表 3、图 6 所示。

表3 甲醇替代法测空隙率测试数据

试样编号	龄期/ d	绝干质 量/g	饱和质 量/g	浸泡质 量/g	空隙 率/%
LZ541-500	28	142.5	411.7	63.9	77.4
LZ541-550		143.4	387.9	68.7	76.5
LZ541-600		143.9	361.6	65.0	73.4
LZ541-650		144.7	344.6	53.2	68.6
LZ541-700		145.6	324.5	41.0	63.1
LZ541-750		145.9	312.5	41.6	61.5

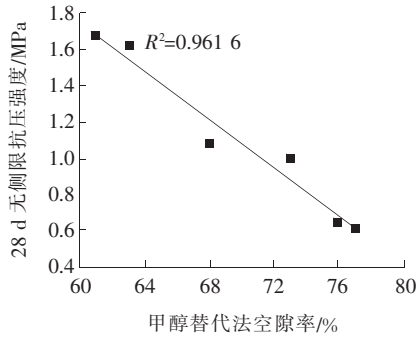


图 6 炉渣基轻质土空隙率与抗压强度关系拟合

由表 3 可知:随着密度的增大,试样的绝干质量逐渐增加,表明更多的自由水参与了水化反应,进而生成了更多未被烘干的水化产物。空隙率由 77.4%(500 kg/m³)降低至 61.5%(750 kg/m³)。由图 6 可知:炉渣基轻质土 28 d 抗压强度随空隙率增加呈线性降低,相关度较高($R^2=0.9616$)。

3 结论

分析了炉渣掺比和湿密度对炉渣基轻质土的力学性能、流动性能、消泡率、空隙率的影响规律,得到结论如下:

- (1) 随着湿密度的增加,轻质土的抗压强度稳步增加,炉渣掺量提高,轻质土强度则迅速降低,当炉渣掺比达 90%时,材料基本失去力学性能。
- (2) 新拌轻质土的流动扩展度随发泡率的提升迅速下降,炉渣的掺入量对轻质土料浆流动度影响不明显。
- (3) 轻质土初始湿密度高于 650 kg/m³ 时,消泡率明显大幅降低,具备较好的体积稳定性。

- (4) 随着初始湿密度上升,28 d 轻质土固结体的空隙率逐步降低,空隙率与强度呈线性拟合关系,在初始湿密度为配比变量下,相关程度较高。
- (5) 考虑各项性能指标,推荐采用炉渣掺比 50%,水泥掺量 40%,石灰石粉 10%,外掺 4%激发剂,制备 650 kg/m³ 密度的炉渣基轻质土,这样制备的炉渣基轻质土具备较好的工作性能。

参考文献:

[1] 倪斌. 煤炭在我国能源结构优化中基础性作用的思考[J]. 中国能源, 2004(7):16-20.

[2] 高雪峰,张海英,杨向阳,等. 燃煤炉渣作为新型掺合料在预拌混凝土中的应用[J]. 四川水泥, 2016(3):311-313.

[3] 王晨.《工业固体废物资源综合利用评价管理暂行办法》和《国家工业固体废物资源综合利用产品目录》发布[J]. 精细与专用化学品, 2018(6):1.

[4] 刘红宇,尹维新,洪彩霞. 粉煤灰和煤粉炉渣用于建筑砂浆的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2008(2):51-54.

[5] 冉帆. 炉渣性质及其污水处理效果的应用研究[D]. 天津: 天津城建大学, 2014.

[6] 王开峰,彭娜,刘德良. 面向矿山废弃地复垦的炉渣污泥人工土壤的理化特性[J]. 环境工程学报, 2012, 6(8): 2 875-2 881.

[7] 张雷,赵玉静,俞瑾. 炉底渣磨细灰的物性参数研究[J]. 混凝土世界, 2019(6):68-71.

[8] 曹新荣. 激发剂对掺燃煤炉渣普通砂浆性能的影响[J]. 科技资讯, 2011(23):31-31.

[9] 陈忠平,王树林. 气泡混合轻质土及其应用综述[J]. 中外公路, 2003, 23(5):117-120.

[10] 闫利峰. 现浇泡沫轻质土材料性能与施工技术研究[D]. 天津:河北工业大学, 2013.

[11] 王新春,胡如进,史伟,等. 促进水泥工业温室气体减排的政策建议[J]. 中国水泥, 2013(6):39-41.