

基于单因素试验的水泥粉煤灰稳定铁尾矿砂击实特性与抗压强度研究

徐钦 姬成

黑龙江大学建筑工程学院，黑龙江哈尔滨，150080；

摘要：为促进铁尾矿近地消纳并降低道路基层建设成本，探究“水泥—粉煤灰”复合稳定铁尾矿砂的工程适用性。采用单因素法，设计不同铁尾矿砂掺量（0%~100%）、结合料总掺量（15%~20%）及粉煤灰与水泥质量比（3:1~5:1）的配合比。通过击实与无侧限抗压试验评估各变量对混合料物理与力学性能的影响规律。结果表明：随铁尾矿砂掺量增加，最大干密度与最佳含水率均显著提升，抗压强度呈先升后降趋势，在 50% 掺量时因微集料填充效应优化了内部孔隙结构，强度达峰值（2.30 MPa）；提高结合料总掺量使最大干密度下降、最佳含水率上升，但水化产物强化了骨架，强度攀升至 2.78 MPa；固定结合料总量时，增大粉煤灰与水泥质量比会削弱早期水化活性致 7 d 强度衰减。综合推荐 50%铁尾矿砂替代率、17.5%结合料掺量及 4:1 粉煤灰与水泥质量比为较优配合比，为规模化应用提供依据。

关键词：道路工程；铁尾矿砂；无机结合料；击实特性；无侧限抗压强度；配合比设计

DOI： 10.69979/3029-2727.26.05.077

引言

钢铁工业产生海量铁尾矿，其规模化利用是绿色转型的关键^[1]。铁尾矿常集中堆存，级配与矿物组成受工艺影响显著^[2]。目前其产生量巨大但利用率偏低^[3]，易引发次生灾害，推动其工程化利用是实现源头减量的重要途径^[4]。将其稳定后用作道路基层高度契合“大宗近地消纳”路线^[5-7]。然而，尾矿理化特性具空间变异性^[8]，由于铁尾矿成分波动大且多呈化学惰性，传统单一结合料难以实现良好稳定，高细料铁尾矿砂的击实与强度演变规律特殊，亟需筛选低碳体系进行改性^[9]。相比单一水泥，“水泥—粉煤灰”复合体系具“以废治废”及优化后期宏观力学的优势^[10]。本文采用该体系稳定特定铁尾矿砂，基于单因素试验探究配比参数敏感性，通过击实与无侧限抗压试验评价混合料的 7 d 承载力及演变机理，为工程配比提供技术支撑^[11]。

1 材料与方法

1.1 试验材料

细集料含中国 ISO 标准砂与铁尾矿砂。结合料采用 P·O 42.5 水泥与 F 类 I 级粉煤灰。依 JTG 3430—2020^[12] 测得铁尾矿砂不均匀系数为 8.02、曲率系数为 1.21，属级配良好砂，其颗粒级配曲线如图 1 所示。

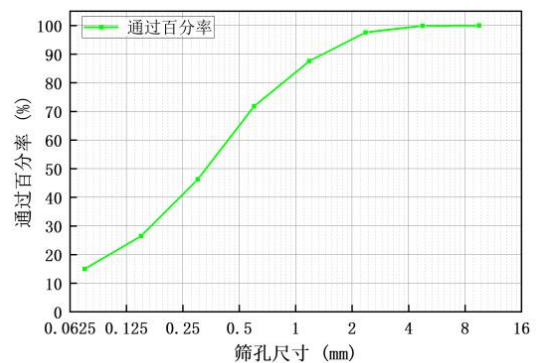


图 1 铁尾矿砂颗粒级配曲线

1.2 试验方法

参考 JTG/T F20—2015^[14]，以铁尾矿砂等质量替代标准砂。设基准配比为：铁尾矿砂掺量占细集料质量 50%、结合料总掺量 17.5%、粉煤灰与水泥质量比 4:1。在此基础上开展三组单因素试验：分别改变尾矿砂掺量（0%、50%、100%）、结合料总掺量（15%、17.5%、20%）及粉煤灰与水泥质量比（3:1、4:1、5:1），详见表 1。

表 1 单因素试验方案

编号	铁尾矿砂掺量/%	无机结合料掺量/%	粉煤灰:水泥
A1	0	17.5	4:1
A2	50	17.5	4:1
A3	100	17.5	4:1

B1	50	15	4:1
B2	50	17.5	4:1
B3	50	20	4:1
C1	50	17.5	3:1
C2	50	17.5	4:1
C3	50	17.5	5:1

1.2.1 击实试验

依 JTG 3441—2024^[13] 采用甲种击实法开展。干拌材料后按 1%~2% 级差加水并密封闷料。为降早期水化干扰, 水泥于闷料后加入快拌。混合料分 5 层入模, 每层击 27 次并层间拉毛。修平称重并测定实际含水率, 绘制干密度-含水率曲线, 取峰值确定最大干密度与最佳含水率。

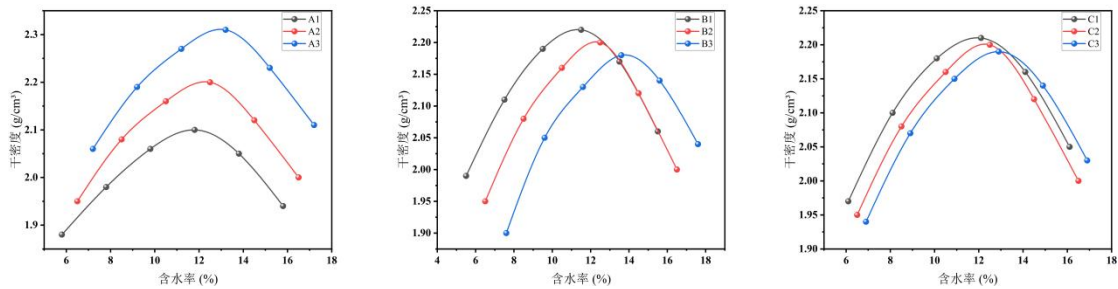


图 2 不同因素对混合料击实特性的影响曲线

图2揭示了各配合比参数对混合料击实特性的影响规律。首先, 随铁尾矿砂掺量由 0% 增至 100%, 混合料最大干密度与最佳含水率均显著提高; 此因大密度的含铁化合物直接提升了宏观干密度, 且细颗粒增多导致比表面积增大, 需更多水分形成水化润滑膜以克服摩擦阻力。其次, 当结合料掺量由 15% 增至 20% 时, 最大干密度下降而最佳含水率上升; 这主要由于低密度微粉取代重骨料并使骨料局部“悬浮”从而削弱了嵌挤锁

1.2.2 无侧限抗压试验

依同规程^[13]制备 $\Phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 圆柱试件。按最佳含水率与最大干密度压实成型, 标准养生 6 d 浸水 24 h 后, 置于压力机以 1 mm/min 速率连续加载至破坏。无侧限抗压强度按 $q_u = 4P_{\max} / (\pi d^2)$ 计算 (P_{\max} 为破坏荷载 (N); d 为试件直径 (mm))。同组平行试件剔除异常值后, 按 $R = \bar{R} (1 - Z_a C_v)$ 计算强度代表值 (\bar{R} 为同组平行试件的平均强度 (MPa); C_v 为变异系数; Z_a 依据公路等级取 1.282 或 1.645)。

2 结果与讨论

2.1 击实试验

结, 同时微粉早期水化需消耗大量自由水。最后, 当粉煤灰与水泥质量比由 3:1 增至 5:1 时, 体系最大干密度轻微降低、最佳含水率稳步上升; 这归因于粉煤灰表观密度低且含有多孔未燃碳颗粒, 吸附游离水能力强, 高掺量微粉改变了孔隙结构, 需吸收更多水分方可达到最紧密排列。

2.2 无侧限抗压强度试验

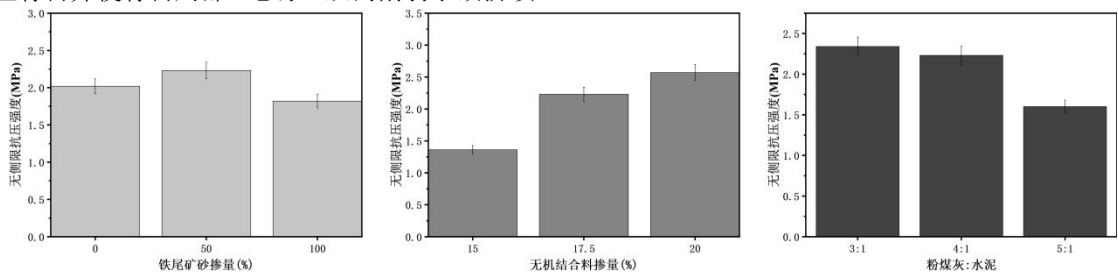


图 3 不同因素对混合料 7 d 无侧限抗压强度的影响

图 3 展示了各配合比参数对混合料 7 d 无侧限抗压强度的影响规律。首先, 随铁尾矿砂掺量增加, 材料抗压强度呈先升后降趋势, 在 50% 掺量时因细粒微集料填充效应优化了孔隙级配, 强度达峰值 (2.30 MPa); 掺量增至 100% 时, 相比于标准砂, 铁尾矿砂虽具备良好级配, 但其化学惰性在全替代时成为主导因素, 且

尾矿表面缺乏早期活性致界面过渡区薄弱, 加之大面积摊薄了有效浆体, 强度回落至 1.96 MPa。其次, 结合料总掺量对强度有显著正向促进作用, 掺量由 15% 增至 20% 时, 抗压强度由 1.44 MPa 攀升至 2.78 MPa; 因为活性胶凝物质浓度提升, 生成丰富的水化硅酸钙等产物, 大幅填充游离孔隙并增强骨料握裹力, 形

成致密空间网状骨架。最后,当粉煤灰与水泥质量比由3:1增至5:1时,抗压强度由2.41 MPa明显降至1.70 MPa;这主要由于粉煤灰火山灰反应滞后,比值增大直接降低了能快速反应固化的水泥比例,胶凝物质生成不足导致7d力学强度发生衰减。

3 结论

(1) 击实特性演变:铁尾矿砂掺量增加会显著提高体系最大干密度与最佳含水率;而结合料总掺量或粉煤灰与水泥质量比增大,则导致最大干密度下降、最佳含水率上升。

(2) 力学强度机制:铁尾矿砂对强度具“阈值效应”,50%掺量时因微集料填充效应达峰值(2.30 MPa);结合料掺量增加显著提升水化胶结力与宏观强度;增大粉煤灰与水泥比则削弱早期水化动力学活性致7d强度衰减。

(3) 工程配比建议:为兼顾7d力学性能与固废资源消纳,本研究推荐以50%铁尾矿砂替代率、17.5%结合料总掺量及4:1粉煤灰与水泥质量比作为较优的基准工程配合比,该配比下的承载力可满足特定等级公路(如二级及以下公路)基层的强度要求。

参考文献

[1]尹琛,白丽梅,李绍英,等.铁尾矿综合利用研究进展[J].矿产保护与利用,2023,43(6):41-53.

[2]Chao X, Han C, Shao C, et al. Recent advances in properties and application progress of cement-based materials with iron tailing[J]. Sustainability, 2024, 16(23): 10631.

[3]陶亚平,赖天文.铁尾矿砂再生混凝土的力学及耐久性能研究[J].功能材料,2023,54(3):3143-3148.

[4]Farenzena H P, Bruschi G J, Medina G S, et al. Iron ore tailings stabilization with alternative alkali-activated cement for dry stacking: mechanical and microstructural insights[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2024, 61(4): 678-691.

[5]赵晓康.路面水稳碎石基层材料细观结构表征及疲

劳劣化机制研究[D].南京:东南大学,2022.

[6]Que Y, Jia S, Wang L, et al. Substitution of tailings sand in cement-stabilized gravel base material for road construction: mechanical properties, durability, and microstructure[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2025, 37(4): 04025000.

[7]王洪国,苏纪壮,张民,等.振动搅拌对掺铁尾矿砂水泥稳定碎石混合料的影响研究[J].硅酸盐通报,2021,40(12):4209-4216.

[8]Ghanizadeh A R, Naseralavi S S. Intelligent prediction of unconfined compressive strength and Young's modulus of lean clay stabilized with iron ore mine tailings[J]. Journal of Soft Computing in Civil Engineering, 2023, 7(4): 1-23.

[9]Gong L, Gong X L, Liang Y, et al. Experimental study and microscopic analysis on frost resistance of iron ore tailings recycled aggregate concrete[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022: 8932229.

[10]Jiang P, Zhou X, Qian J, et al. Experimental study on the influence of dry-wet cycles on the static and dynamic characteristics of fiber-modified lime and fly ash-stabilized iron tailings at early curing age[J]. Crystals, 2022, 12(5): 568.

[11]张鸿.高掺量铁尾矿砂废旧再生料基层路用性能及应用研究[D].重庆:重庆交通大学,2022.

[12]中华人民共和国交通运输部.公路土工试验规程:JTG3430—2020[S].北京:人民交通出版社,2020.

[13]中华人民共和国交通运输部.公路工程无机结合料稳定材料试验规程:JTG3441—2024[S].北京:人民交通出版社,2024.

[14]中华人民共和国交通运输部.公路路面基层施工技术细则:JTG/TF20—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.