

固体废弃物混合料在堤坝工程中的强度特性研究

曹英健¹, 张少雄^{1,2}, 张波³, 张力霆^{1,2}, 耿鑫鑫³

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;

3. 河北省水利工程局集团有限公司, 河北 石家庄 050000)

摘要:针对尾矿砂与粉煤灰资源化利用问题,以两者为主要原料,开展固体废弃物混合料的力学性能研究。在分析材料基本物理性质的基础上,设计9种不同配比方案,采用0、3、7、28 d无侧限抗压强度试验,系统研究水泥、石灰及粉煤灰掺量对强度演化规律的影响。通过分析研究,提出了以尾矿砂与粉煤灰为主要原料的新型混合材料,用于道路基层与底基层结构层。结果表明:2[#]、4[#]、5[#]、6[#]、7[#]配比7 d强度分别为4.4、3.2、2.12、1.52、1.14 MPa,混合料强度随龄期延长显著提高,水泥掺量对强度增长起主导作用,粉煤灰通过二次水化反应可优化结构并提升后期强度,而石灰对强度贡献相对有限;不同配比材料均表现出由塑性向脆性转变的力学特征。基于试验结果,提出了适用于道路基层与底基层的尾矿砂-粉煤灰复合材料体系。

关键词:尾矿砂;粉煤灰;无侧限抗压强度;道路工程

中图分类号: TU448 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2026)02-0059-08

0 引言

自2000年以来,中国的钢铁产量开始急速增长,铁尾矿排放量也日益上升,2004年为1.89亿t,2009年达5.5亿t,2011年达8.06亿t,2013年达8.39亿t。自2014年铁尾矿排放量逐渐下降,但到2018年仍达到约4.76亿t,且其中只有20%被再利用^[1-2]。尽管目前对尾矿库进行了安全整顿并分三级监管,但纳入环境监管的尾矿库仍有7820座^[3],每年仍产生大量尾矿,其储存占地、耗成本,还对生态环境有潜在影响^[4-5]。火电厂生产的副产品粉煤灰也存在同样问题,其绝大部分以露天堆存、填埋等方式处置,不仅占用土地资源,还会对环境造成影响^[6]。虽然粉煤灰的综合利用率高达70%,但中国粉煤灰产出量巨大,并且逐年增加,目前堆存量已达14亿t左右^[7-8],中国已成为世界上最大的燃煤废弃物产出国^[9]。因此,固体废弃物综合利用仍然是当前亟待解决的问题。

目前国家政策鼓励加大固体废料的综合利用,一方面强化固体废料的安全环保监管,另一方面回收有价值组分。其利用方式有:①再选回收有价值元素;②制建材;③矿山充填;④生态化利用;⑤用于道路工程^[10]。

Ou et al^[11]以铝土尾矿浆与粉煤灰、矿渣粉、水泥为对象,发现粉煤灰可降低成品成本,尾矿粉可显著提高成品的抗压强度、改善水稳定与抗碳化性能。邵伟华等^[12]以石英提纯尾矿、长石尾矿、碳酸钠、SiC为对象,研究原料比例等对成品发泡性能的影响,实现了石英尾矿资源化,适用于建材领域。王琦等^[13]以安徽某铁尾矿0~5 mm石粉矿为对象,研究磁选干选及工业应用,尾矿磁性铁降至1.27%,回收率90.62%,尾矿可作建材助力绿色矿山。杜芳芳^[14]主要以某铅锌锡矿尾矿为对象展开试验研究,试验表明适宜条件下可获Sn产品和粗粒级尾砂供井下充填利用,显著提升了尾矿的综合利用率。白月娇等^[15]以电解锰渣-赤泥-粉煤灰无害化渣(及水洗渣)等为对象,研究水洗与掺入量对透水砖性能的影响,6%无害化渣PCB、14%水洗WPCB强度达标,浸出合格,实现三固废协同资源化。孙勇等^[16]以40%水泥、30%粉煤灰、30%碳化钢渣三元体系及尾砂为对象,研究尾砂充填性能与成本碳排放,碳排放减少63.6%,实现

收稿日期:2026-03-17 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxxbzrb.20260045

作者简介:曹英健(1997—),男,硕士研究生,研究方向为固废综合利用。E-mail:15131187118@163.com

曹英健,张少雄,张波,等.固体废弃物混合料在堤坝工程中的强度特性研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2026,39(2):59-65,72.

固废资源化与低碳充填。宋林琳等^[17]利用铁尾矿砂 UHDC 修复在役钢筋混凝土桥梁,修复后延性提高,实现了尾矿资源再利用。李铁铮^[18]以矿粉、粉煤灰和偏高岭土为前驱体,优化地聚物性能,系统研究了水胶比等影响,为矿粉-粉煤灰-偏高岭土地聚物的配比优化及工程应用提供了理论依据和技术支持。马春锋等^[19]针对 2 种工业固废固化剂稳定土耐候性和耐久性进行工程适用性评价,结果表明在施工耐候性和耐久性方面均优于或等同于水泥稳定土。

中国在尾矿、粉煤灰的综合回收与利用领域已开展大量研究并积累了丰富成果;然而,在尾矿粉煤灰水泥/石灰方面配比种类上、此类固体废物在公路路基基层工程中的应用研究尚显薄弱。本文聚焦于多种配比固体废弃物作为公路基层材料的应用技术,旨在突破其工程化应用的关键瓶颈。

1 原材料及配合比设计

1.1 试验材料

尾矿砂取自河北省涞源县某尾矿库,其物理性质指标见表 1。粉煤灰取自于河北省某火电厂,其物理性质指标见表 2。

表 1 尾矿砂的物理性质指标

类别	比重	小于某粒径占比 X/%			
		2 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.075 mm
尾矿砂	2.82	76.1	51.3	39.3	7.0

表 2 粉煤灰的物理性质指标

类别	比重	液限/%	塑限/%	塑性指数
粉煤灰	2.37	38.1	28.8	9.3

试验用水泥为矿渣硅酸盐水泥(P. S. A)32.5,并增加了保水率指标,水泥 28 d 抗压强度为32.5 MPa。试验用石灰为河北省某企业生产的生石灰,CaO 含量为 85%。

1.2 级配特性

尾矿砂和粉煤灰的级配曲线如图 1 所示。由铁尾矿粒径级配曲线可知,该尾矿砂的工程分类为粗粒土,根据有关规范,铁尾矿砂的定名为中砂。由粉煤灰粒径级配曲线可知,该粉煤灰的工程分类为细粒土,根据规范,粉煤灰的 $I_p \leq 10$,称为粉土。

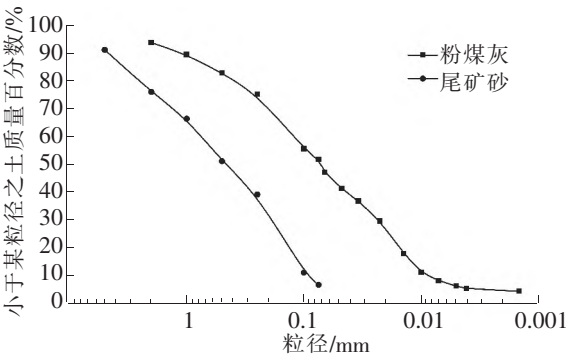


图 1 尾矿砂和粉煤灰级配曲线

1.3 试样配合比设计

试验共选取了 9 种不同的水泥、石灰配合比,各种材料的配比如表 3 所示,其中水泥掺入量采用质量比,石灰掺入量采用体积比。分别做龄期 0、3、7、28 d 的无侧限抗压强度,以 7 d 无侧限抗压强度确定最优配合比。

表 3 材料的配比表

编号	尾矿砂	粉煤灰	石灰/水泥
1#	40	45	15(石灰)
2#	40	45	15(水泥)
3#	40	30	30(石灰)
4#	87		13(水泥)
5#	89		11(水泥)
6#	91		9(水泥)
7#	93		7(水泥)
8#	95		5(水泥)
9#	97		3(水泥)

1.4 击实试验

试验按 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》(以下简称《标准》)中轻型击实试验方法进行,对粉煤灰进行了击实试验,以确定最优含水率和最大干密度。由图 2 可知,最优含水率为 23.05%,最大干密度为 1.32 g/cm³。

1.5 试样制备

试验采用平行试验,每种龄期的每个配比试样制样 3 个,按照表 3 中每种试验材料的指定比例准确称量按配比表混合。首先,将尾矿、粉煤灰和水泥或石灰混合并搅拌,再将称量好的水加入并再次充分搅拌。参考《标准》中三轴压缩实验,根据最优含水率决定混合样含水率调配为 17%,充分搅拌混合均匀后,选用直径 39.1 mm 的击实器,筛去大于 3.91 mm 的颗粒,击样筒壁内侧涂上一薄层凡士林,按试样高度分为 5 层击实,击实数参考《标准》中击实试验每层选择使用 20 击,将其放入保湿缸中养护,达到特定龄期时进行无侧限抗压强度试验,即 0、3、7、28 d 龄期。

击实器选用直径 39.1 mm、高 80 mm 的模具,则试样体积为 96.1 cm³,计算出试样湿密度,湿密度取均值,混合土样充分搅拌完成后测量实际含水率,含水率设置平行试验,最终取均值,湿密度和实际含水率如表 4 所示。

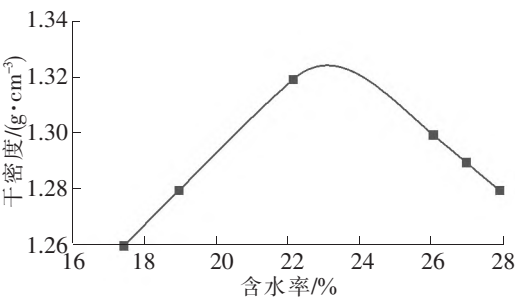


图 2 干密度-含水率关系曲线

表 4 湿密度和实际含水率(龄期)

土样编号	湿密度/(g·cm ⁻³)				实际含水率/%			
	0 d	3 d	7 d	28 d	0 d	3 d	7 d	28 d
1 [#]	1.68	1.63	1.68	1.69	14.52	14.96	14.52	14.42
2 [#]	1.80	1.76	1.78	1.79	14.32	14.42	14.68	14.67
3 [#]	1.73	1.75	1.69	1.74	14.33	14.89	14.96	14.72
4 [#]	2.17	2.19	2.19	2.21	14.42	14.59	14.05	14.06
5 [#]	2.15	2.24	2.26	2.17	14.41	15.29	14.38	14.08
6 [#]	2.19	2.26	2.22	2.19	14.98	14.75	14.75	14.28
7 [#]	2.15	2.27	2.22	2.21	14.15	14.38	14.98	14.22
8 [#]	2.21	2.26	2.23	2.24	14.64	15.11	15.14	14.14
9 [#]	2.11	2.28	2.22	2.24	14.29	14.78	15.57	14.36

1.6 试验方法

制备了基于击实试验确定的最优含水率和最大干密度特性的试样,根据《标准》中无侧限抗压强度试验规定的试验方法进行,使用应变式无侧限压力仪进行试验,采用电动匀速加载,加载速率为 2.4 mm/min。

2 无侧限抗压强度试验

2.1 应力-应变曲线

不同龄期各配比应力-应变曲线如图 3 所示。由图 3 可以看出,曲线整体呈“先升后降”的正态分布,可分为 4 个阶段:阶段 1,压密阶段(应变小,应力增长慢);阶段 2,弹性阶段(应变中等,应力线性增长);阶段 3,屈服(塑性)阶段(应变增大,应力增长放缓至峰值);阶段 4,破坏阶段(应变骤增,强度快速下降)。由图 3 可见,28 d 龄期的 2[#] 配比在临近破坏时应变值有一点缩小,土体在剪切过程中先收缩后体积增大导致的应变有些回弹,可能受到土体剪胀性的影响。

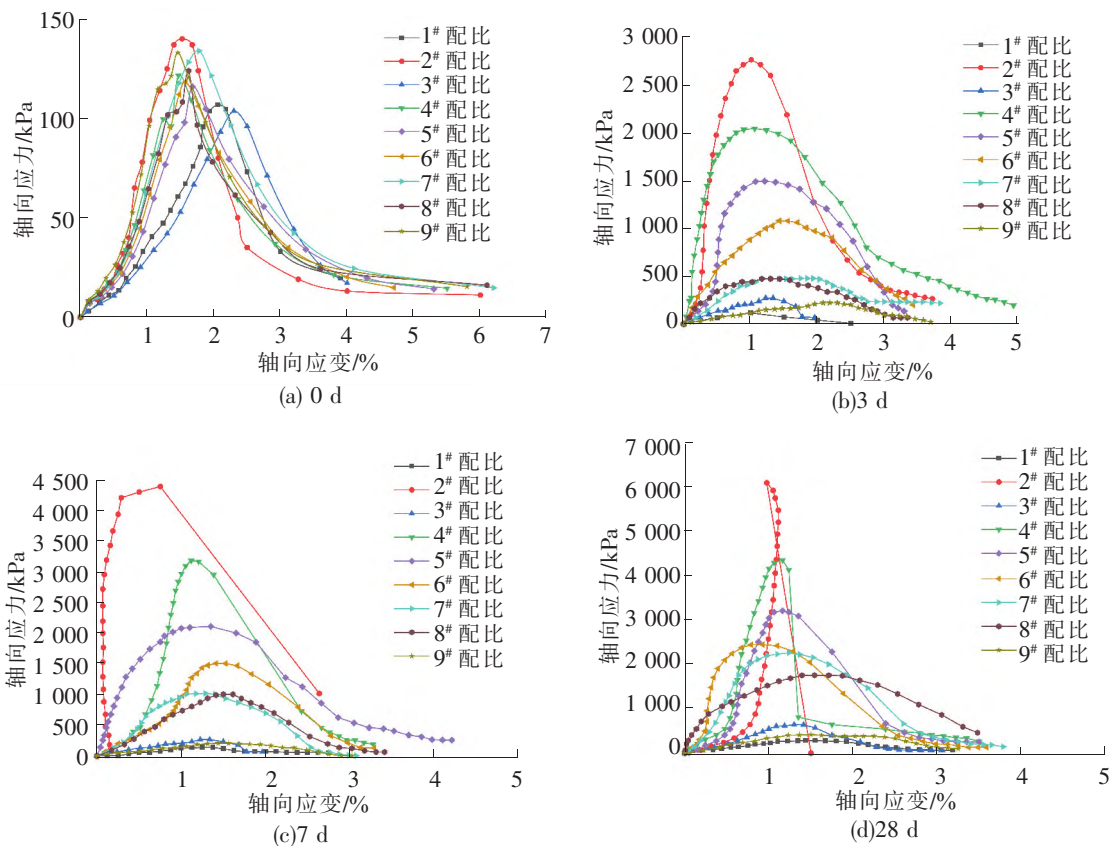
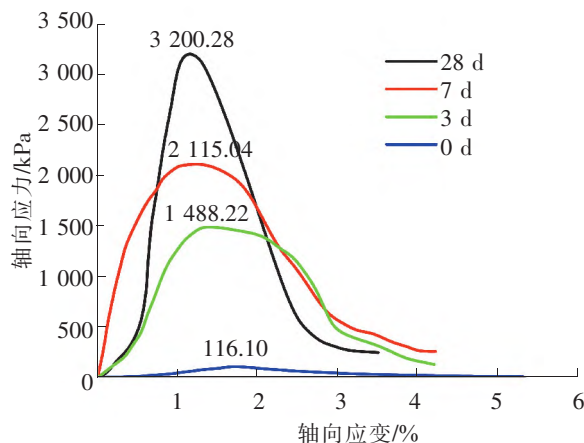


图 3 不同龄期各配比应力-应变曲线

经 0 d 龄期试验得出各种配比 0 d 应力-应变曲线、单轴压缩强度几乎一致,但不同体系略有不同,所以后续以尾矿砂:粉煤灰:水泥 = 40:45:15 代表水泥体系强度;以尾矿砂:粉煤灰:石灰 = 40:45:15 代表石灰体系强度。

图 4 为 5[#] 配比应力-应变曲线。0 d 应力-应变曲线峰值强度很低,峰值为 116.10 kPa;3 d 应力-应变曲线峰值强度较低,峰值为 1 488.22 kPa,增长了 11.82 倍;7 d 应力-应变曲线峰值较高,为 2 115.04 kPa,增长了 17.22 倍;28 d 应力-应变曲线峰值更高,为 3 200.28 kPa,增长了 26.56 倍。0 d 应力-应变曲线峰值应变较大,峰值应变大于 1%;3 d 应力-应变曲线峰值应变较大,峰值应变大于 1%;7 d 应力-应变曲线峰值应变较小,峰值应变为 1%左右;28 d 应力-应变曲线峰值应变较小,峰值应变为 1%左右;所以,在正常的强度范围内,它的应力-应变曲线峰值出现的位置刚好是应变值的 1%。

图 4 5[#] 配比应力-应变曲线(各龄期)

2.2 破坏形态

各龄期试样破坏形态如图 5 所示。由图 5 可知,试样在无侧限压力下的破坏形态呈现复合破坏型式。0 d 为典型的塑性剪切破坏,土体特征明显,试样持续变形,在压缩的作用下试样破坏沿与轴向方向成 $(45^\circ + \varphi/2)$ 角度破裂面,表明材料抗压性能薄弱,试验过程中试样随加载呈持续变形;而 3、7、28 d 则随龄期渐呈脆性剪切破坏,试样中部出现多条明显倾斜剪切裂缝,试验过程中试样突然破坏,破坏时几乎无明显塑性变形,且龄期越长,脆性破坏现象越明显。

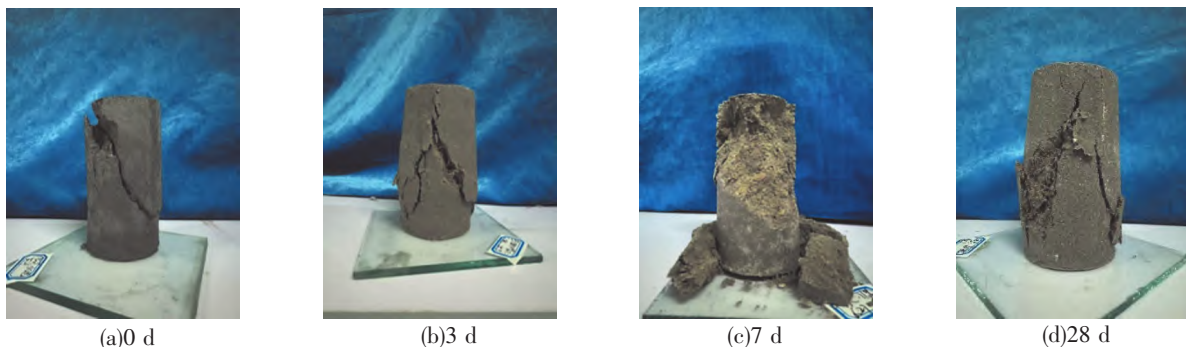


图 5 试样破坏形态图

随着水泥含量的增加,试样的脆性破坏特征愈加明显,表现为破坏更加干脆,试样裂缝更小并且裂缝周围更“干净”。在破坏模式上,可以观察到同一龄期从破裂破坏裂缝向剪切裂缝、剥落状态减少的转变。这种变化与水泥水化产物增多,空隙减少,骨架增强有关。

而在配比中加入粉煤灰对破坏形态造成影响, 同样也加速了破坏形态向脆性破坏形态转变, 尤其 28 d 龄期的 2[#] 配比, 试样直接“爆开”。如图 6 所示。

2.3 应力龄期曲线

掺合料可分为 3 类:石灰-粉煤灰组;水泥-粉煤灰组;纯水泥组。无论是哪种掺合料配比,折线图都会呈现以下宏观规律:①横看强度随龄期增长而增长,所有组别 28 d 强度 $> 7\text{ d}$ 强度 $> 3\text{ d}$ 强度 $> 0\text{ d}$ 强度(各类掺合料确定 0 d 强度大致相同),水化反应随时间推进, 3 d 仅完成部分水化, 7 d 则完成更多反应,胶结产物数量增加,强度必然提升;②纵看整体纯水泥组和水泥-粉煤灰组 $>$ 石灰-粉煤灰组,同龄期下随水泥含量的增大强度也增大。随着龄期的增长,破坏形式逐渐由“塑性变形”(看应变值)破坏演变成“脆性”破坏(看应变值),标志着材料性质的变化。随着粉煤灰的加入,也加快了试样破坏形态向脆性破坏转变。不同龄期的应力如图 7 所示。



图 6 2[#] 配比试样破坏形态图(28 d)

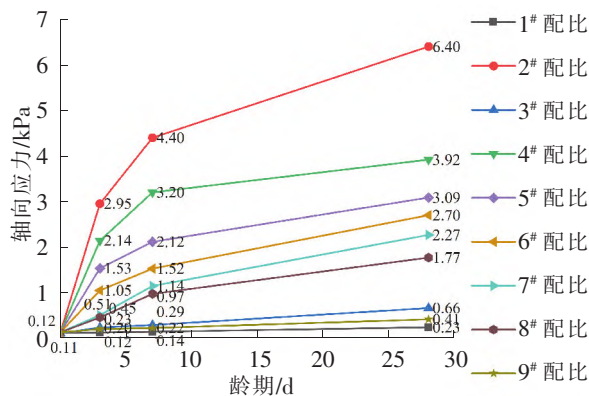


图 7 应力-龄期曲线

3 强度的影响因素

3.1 水泥含量的影响

水泥主要由石灰石和黏土矿物经过煅烧而得到,主要成分为 CaO 、 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 、 C_4AF ^[20],水泥和水混合时会发生水化反应,水泥中的 C_3S 和 C_2S 水化生成一种无定形的物质,是硅酸盐水泥的主要水化产物。这些反应生成 C-S-H 和 Ca(OH)_2 , C-S-H 是水泥硬化后最主要的成分,为材料提供了强度^[21]。

图 7 显示了水泥含量对尾矿和粉煤灰的 3、7、28 d 无侧限抗压强度的影响。可以看出,水泥含量与强度增长直接相关。与此相关的主要原因是水泥与水发生水化反应,且随着水泥含量的增加而增加。因此,当水泥含量相对较小时,仅形成少量水化产物,且未能有效相互连接。水化产物仅与颗粒反应,导致胶结、固化和离子交换过程。随着水泥含量的增加,水化产物也增加,此时这些产物不仅与颗粒胶结,而且它们之间也倾向于相互反应并可能重叠,从而将颗粒更紧密地连接起来,因此强度得到提高。

3.2 石灰含量的影响

研究表明石灰水化会产生 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 产生胶凝体系^[22]。根据图 7 所示, 石灰的含量对混合土的强度影响很小, 本质是通过改变胶凝反应的原料供给量、反应充分性, 以及最终胶结产物的数量与结构稳定性实现的, 并且掺和石灰的混合土整体都没有掺和水泥的强度大。石灰土强度低于水泥土的核心原因, 源于胶凝材料(石灰、水泥)的化学成分差异、硬化机理不同, 以及最终形成的胶结产物的数量与强度特性差异。

3.3 粉煤灰的影响

粉煤灰属于工业副产火山灰质材料, 可发生火山灰反应^[23]。粉煤灰的火山灰反应生成 C-S-H 凝胶; 同时, 反应生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 Al_2O_3 生成 CaAl_2O_4 , 增强 UCS^[24]。对比 2[#]、4[#] 配比可以看出, 添加粉煤灰后强度增加速率增快, 原因可能是粉煤灰通过“二次水化反应”优化胶结结构, 与水泥水化产物的协同作用, 粉煤灰主要成分为活性 SiO_2 、 Al_2O_3 及少量 CaO , 与水泥水化产物发生反应间接提升结构性能, 水泥水化会生成大量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (副产物, 强度低且易导致界面脆弱), 而粉煤灰中的活性 SiO_2 、 Al_2O_3 会与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生“火山灰反应”(二次水化)^[25], 生成与水泥自身水化产物相同的水化 C-S-H 和水化铝 CAH^[26]。这 2 种产物是高强度的核心来源: ①消耗了低强度的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 减少界面过渡区的“薄弱层”; ②新增的 C-S-H/CAH 能填充水泥土内部的微小空隙(如水泥水化未填满的孔隙、土颗粒间的间隙), 使结构更致密^[27], 从而提升后期强度。粉煤灰形态上也可对强度有所表现, 改善施工性与压实度, 粉煤灰颗粒多为“球状玻璃体”, 掺入后可减少水泥混合物颗粒间的摩擦阻力, 提升混合料的“和易性”(流动性、可塑性), 施工时更易碾压密实, 降低空隙率。

4 结论

本文综述了铁尾矿等固体废弃物在道路基层中的应用现状与发展趋势, 结合工程实际, 重点分析水泥与石灰掺量对铁尾矿胶结性能及强度形成的影响。研究表明, 该方法既可有效减少尾矿堆存带来的环境与经济负担, 提高固废资源化利用率, 又能优化道路基层的经济性与可持续性, 为大宗固废消纳提供了可行路径。主要结论如下:

(1) 不同龄期(3、7、28 d)试样的应力-应变曲线均呈典型单峰型特征, 可划分为压密、弹性、屈服及破坏 4 个阶段, 反映了固化土由结构调整至宏观破坏的全过程。部分试样在破坏前出现体积应力增大现象, 表明剪切过程中存在由收缩向剪胀转变的特征。随着龄期延长, 峰值应变整体减小, 由约 2% 降至约 1%, 且峰值应力通常对应约 1% 的应变水平。

(2) 早期龄期(0、3 d)的试样破坏表现出较强的塑性特征, 而 7、28 d 龄期的破坏则呈现出典型的脆性破坏行为, 材料刚度提高、脆性增强; 破坏形态从塑性转变为脆性破坏, 且部分试样展现出剪胀性特性, 加入粉煤灰后加速了试样破坏形态由塑性转变为脆性。

(3) 各配比试样的无侧限抗压强度均随养护龄期的增加而显著提高, 表明胶凝材料水化反应持续进行, 对土体结构的增强作用随时间不断累积。

根据《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015) 强度要求, 2[#] 配比(水泥-粉煤灰稳定材料)可满足二级及以下公路重交通、以及高速和一级公路轻交通基层要求, 且底基层均满足要求; 其余配比属工业废渣稳定材料, 其中 4[#]~7[#] 可满足高速及一级公路极重、特重交通要求, 8[#] 满足重交通要求。综合经济性与应用性, 优先选用纯水泥或水泥-粉煤灰体系, 前者适用于早强及快速施工需求, 后者兼顾后期强度与成本优势。石灰-粉煤灰体系因早期强度低, 不宜用于基层与底基层。工程设计应以满足强度要求为前提, 合理确定水泥掺量, 而非盲目追求高掺量。

综上所述, 本文为使用尾矿替代粒料或细粒土等材料提供了参考, 它为大量有效消耗上述 2 种大宗工业废物提供了一种解决方案, 并且提出了一种可用于路面基层的新材料, 减少了道路建设过程中开山采石等资源的消耗, 节约能源并保护环境。

参 考 文 献

- [1]刘文博,姚华彦,王静峰,等.铁尾矿资源化综合利用现状[J].材料导报,2020,34(增刊1):268-270.
- [2]Lu Chang, Yang Huamin, Wang Jie, et al. Utilization of iron tailings to prepare high-surface area mesoporous silica materials[J]. Science of the Total Environment, 2020, 736: 139483.
- [3]中华人民共和国生态环境部. 2024 年中国生态环境状况公报[EB/OL]. [2025-12-11]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202506/P020250604527010717462.pdf>.
- [4]Benarchid Y, Taha Y, Argane R, et al. Concrete containing low-sulphide waste rocks as fine and coarse aggregates: preliminary assessment of materials[J]. Journal of Cleaner Production, 2019,221:419-429.
- [5]Simonsen T M A, Solismaa S, Hansen K H, et al. Evaluation of mine tailings' potential as supplementary cementitious materials based on chemical, mineralogical and physical characteristics[J]. Waste Management, 2020, 102:710-721.
- [6]杨玉飞,卢永琦,刘婷婷,等.基于 CiteSpace 可视化分析粉煤灰堆存对水环境影响研究进展[J].科学技术与工程,2025, 25(13):5285-5296.
- [7]Liu Peng, Gu Xiaobin, Zhang Zhikai, et al. Capric acid hybridizing fly ash and carbon nanotubes as a novel shape-stabilized phase change material for thermal energy storage[J]. ACS Omega, 2019, 4(12): 14962-14969.
- [8]Gao Jianming, Yan Zhenwei, Ma Shujia, et al. Novel process for high value utilization of high-alumina fly ash: valuable metals recovery and mesoporous silica in situ preparation[J]. RSC Advances, 2024,14:1782.
- [9]吴锦文,邓小伟,焦飞硕,等.煤基灰/渣的大宗固废资源化利用现状及发展趋势[J].煤炭科学技术,2024,52(6): 238-252.
- [10]王笑天,华绍广,裴德健,等.铁尾矿管控与综合利用的现状与前景[J].金属矿山, 2025(7): 243-253.
- [11]Ou Xiaoduo, Chen Fugui, Lyu Zhengfan, et al. Synthesis of backfill foam lightweight soil from bauxite tailings slurry and industrial byproducts[J]. Journal of Central South University, 2025, 32(8): 3057-3069.
- [12]邵伟华,刘广学,刘磊,等.云南省某石英砂岩矿提纯及尾矿综合利用研究[J].中国矿业,2025,34(7):106-114.
- [13]王琦,杨梁宇,任明昊,等.安徽某铁尾矿中粉矿回收试验及工业应用研究[J].现代矿业,2025,41(9):125-129.
- [14]杜芳芳.某铅锌锡矿尾矿综合回收利用试验研究[J].湖南有色金属,2025,41(4):5-7.
- [15]白月娇,林晔,孟棒棒,等.电解锰渣-赤泥-粉煤灰路面砖的力学性能及浸出毒性研究[J].环境科学研究,2024,37(2): 388-396.
- [16]孙勇,蒋平,马征宇,等.低碳经济视角下水泥-粉煤灰-碳化钢渣胶凝体系在尾砂充填中的性能研究[J/OL].矿业研究与开发, 2025-10-23. <https://doi.org/10.13827/j.cnki.kyyk.20251017.001>.
- [17]宋林琳,李常泵,张学明,等.铁尾矿砂 UHDC 修复钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2025,38(2):16-22.
- [18]李铁铮.矿粉-粉煤灰-偏高岭土聚物的性能研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2025,38(1):84-90.
- [19]马春锋,李玉耀,褚付克,等.工业固废固化剂稳定土施工耐候性及耐久性[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2023,36(3):85-91.
- [20]孟涛,钱匡亮,钱晓倩,等.纳米碳酸钙中间浆体对粉煤灰混凝土长期性能的影响研究[C]//超高层混凝土泵送与超高性能混凝土技术的研究与应用国际研讨会论文集(中文版),2008:240-244.
- [21]李慧娜,郑淑珍,周红,等.有机-无机复合材料在水泥基材料力学性能提升中的应用与研究进展[J].高分子材料科学与工程,2025,41(9):169-178.
- [22]王莹,顾晓薇,王青,等.石灰基矿渣-钢渣复合胶凝材料性能及水化机理[J].东北大学学报(自然科学版),2024,45 (10):1459-1468.
- [23]孙振平,闫珠华,张挺,等.火山灰质材料的火山灰活性检测方法综述[J].材料导报,2024,38(1):117-122.
- [24]张海虎,钱劲松.固废基可控低强度材料性能的研究进展[J/OL].吉林大学学报(工学版), 2026-01-21. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241305>.
- [25]李平江,史美伦,陈志源.粉煤灰细度与其火山灰活性的关系[J].建筑材料学报,2004(2):207-209.
- [26]巴恒静,冯奇,杨英姿.粉煤灰、硅灰及纳米硅与 C_3S 水化反应产物的显微结构研究[J].硅酸盐学报,2002(6): 780-784.
- [27]林灼杰,尹健,李益进.水泥-粉煤灰复合胶凝材料水化特性研究[J].铁道科学与工程学报,2005(6):76-82.

(下转第 72 页)

Study on the Durability Performance of Ultra-Thin Overlay Based on Accelerated Loading Test

LU Bin¹, DUAN Danjun², ZHANG Shuai¹, PEI Qiang¹

(1. Shanxi Highway Safety Transportation Technology Co. Ltd., Taiyuan 030032, China;

2. Shanxi Transportation Technology Research & Development Co. Ltd., Taiyuan 030032, China)

Abstract: To study the decay pattern of the durability performance of Ultra-Thin Overlay (UTO), a method combining traditional skid resistance indicators with laser scanning and digital image processing was employed to test Ultra-Thin Overlay specimens prepared with different high-viscosity asphalt using accelerated loading pavement test equipment. The results indicate that during one million loading cycles, all three types of Ultra-Thin Overlay specimens exhibit a trend in both BPN and MTD characterized by an initial rapid decline followed by gradual stabilization. At the same gradation, the higher the dynamic viscosity of high-viscosity modified asphalt at 60 °C, the better the durability of Ultra-Thin Overlay prepared from it. Compared to UTO-B and UTO-C, UTO-A exhibits a smaller wear area ratio and stronger wear resistance. The polynomial fitting correlation coefficients between wear area ratio and BPN as well as MTD are all greater than 0.85, demonstrating good correlation. These findings can provide support and reference for the improvement and development of skid resistance and wear performance evaluation indicators for Ultra-Thin Overlay.

Key words: road engineering; Ultra-Thin Overlay; accelerated loading test; durability performance

~~~~~  
(上接第 65 页)

## Study on Strength Characteristics of Solid Waste Mixture in Dam Engineering

CAO Yingjian<sup>1</sup>, ZHANG Shaoxiong<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo<sup>3</sup>, ZHANG Liting<sup>1,2</sup>, GENG Xinxin<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Road and Railway Engineering Safety Assurance, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. Hebei Water Conservancy Engineering Bureau Group Co. Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of resource utilization of tailings sand and fly ash, this paper took the two as the main raw materials to study the mechanical properties of solid waste mixture. Based on the analysis of the basic physical properties of the material, nine different ratio schemes were designed, and the unconfined compressive strength tests of 0, 3, 7 and 28 d were used to systematically study the influence of cement, lime and fly ash content on the strength evolution law. Through analysis and research, a new mixed material with tailings sand and fly ash as the main raw material was proposed for the use in road base and subbase structure layer. The results show that the 7 d strength of 2<sup>#</sup>, 4<sup>#</sup>, 5<sup>#</sup>, 6<sup>#</sup>, 7<sup>#</sup> ratio is 4.4, 3.2, 2.12, 1.52, 1.14 MPa, respectively. The strength of the mixture significantly increases with the extension of the age, and the cement content plays a leading role in the strength growth. The fly ash can optimize the structure and improve the later strength through the secondary hydration reaction, while the contribution of lime to the strength is relatively limited. The materials with different proportions show the mechanical characteristics of the transition from plasticity to brittleness. Based on the test results, a tailings sand-fly ash composite material system suitable for road base and subbase is proposed.

**Key words:** tailings sand; fly ash; unconfined compressive strength; road engineering