

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.068



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



螯合飞灰用作路基填料的工程特性

李超华, 陈爱军, 蔡建军, 丁传洋

(桂林电子科技大学建筑与交通工程学院, 广西桂林 541004)

摘要: 螯合飞灰在道路工程中的资源化利用可减少土地资源占用, 但对其用作路基填料的可行性仍未形成共识。通过室内试验和微观测试, 研究螯合飞灰的基本物化特性和含水率、干密度对其工程特性的影响, 探讨螯合飞灰用作路基填料的可行性, 并提出施工控制指标和环境污染防治措施。结果表明: 螯合飞灰是一种微观结构复杂、比重较小的高液限粉土, 相较于普通填料, 最佳含水率偏大, 最大干密度偏小; 螯合飞灰的主要化学元素为 Ca、Na、Si、Cl, 主要矿物成分为钙化合物、二氧化硅及氯盐, 钙化合物可通过化学沉淀作用固化飞灰; 强度、有效黏聚力和有效内摩擦角分别随含水率和干密度的增加而近似线性下降和上升, 渗透系数随干密度的增加呈下降趋势; 螯合飞灰适用于公路路基填料, 用作路堤及路床填料时含水率范围以 22.0%~29.5% 和 24.5%~29.5% 为宜。同时, 为确保路基稳定和降低环境污染风险, 建议采用低液限黏土包边和防渗土工布包芯联合处置。

关键词: 道路工程; 路基填料; 垃圾焚烧飞灰; 工程特性; 资源化利用

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)04-0116-09

Engineering characteristics of chelated fly ash as subgrade filler

LI Chaohua, CHEN Aijun, CAI Jianjun, DING Chuanyang

(School of Architecture and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, P. R. China)

Abstract: The resourceful utilization of chelated fly ash in road engineering can reduce the occupation of land resources, but there is no consensus on its feasibility as subgrade filler. Through lab experiments and microscopic analysis, the physicochemical properties of chelated fly ash, as well as the influence of moisture content and dry density on its engineering characteristics, were investigated in this study. The feasibility of employing chelated fly ash as subgrade filler in highway construction was explored, accompanied by proposed construction control indicators and measures to prevent environmental pollution. The results show that chelated fly ash is classified as a type of high liquid limit silt featuring a complex microstructure and low specific gravity, with a higher optimum moisture content and lower maximum dry density compared to common fillers. The

收稿日期: 2024-04-15

基金项目: 广西自然科学基金(2022GXNSFAA035485); 桂林电子科技大学研究生教育创新计划(2023YCXS189, 2023YCXS193)

作者简介: 李超华(1998-), 男, 主要从事环境岩土工程研究, E-mail: 357476672@qq.com。

陈爱军(通信作者), 男, 博士, 教授级高级工程师, E-mail: caj3026@163.com。

Received: 2024-04-15

Foundation items: Guangxi Natural Science Foundation (No.2022GXNSFAA035485); Innovation Project of GUET Graduate Education (Nos.2023YCXS189, 2023YCXS193)

Author brief: LI Chaohua (1998-), main research interest: environmental geotechnics, E-mail: 357476672@qq.com.

CHEN Aijun (corresponding author), PhD, professor senior engineer, E-mail: caj3026@163.com.

primary chemical elements in chelated fly ash are Ca, Na, Si, and Cl, with major mineral components including calcium compounds, silicon dioxide, and chlorides. Calcium compounds can solidify fly ash by chemical precipitation. Strength, effective cohesion, and effective internal friction angle decrease approximately linearly with increasing moisture content, and increase with increasing dry density, while permeability coefficient decreases with increasing dry density. Chelated fly ash is suitable for highway subgrade filler, with recommended moisture content ranging from 22.0% to 29.5% for embankments and 24.5% to 29.5% for roadbed materials. To ensure subgrade stability and reduce environmental pollution risks, it is recommended to employ low liquid limit clay cover and waterproof geotextiles core-wrapping for combined treatment.

Keywords: road engineering; subgrade filler; waste incineration fly ash; engineering characteristics; resource utilization

随着人口增长和城镇化的推进,中国城市生活垃圾产生量剧增,2022年已高达2.44亿t^[1]。巨量的垃圾已无法单纯依靠自然界循环完全降解,导致城市普遍面临垃圾围城的窘境,如何环保、经济、有效地处置生活垃圾已迫在眉睫。作为城市生活垃圾无害化处理的主流方式,焚烧法可显著减容减重^[2],并能利用焚烧热能供热和发电^[3],符合垃圾处理减量化和资源化原则。然而,垃圾焚烧后仍会产生有害的固体细颗粒残余物(飞灰),其粒径细小,易吸附重金属离子、二噁英和呋喃等有毒有害物质^[4],需经稳定化处理后才能进行资源化利用或填埋处置。

现有无害化处理飞灰技术主要包括水泥固化和螯合剂稳定化,通过吸附、沉淀和螯合作用使污染物形成稳定物质,从而有效抑制污染组分浸出^[5]。水泥固化为通过混合水泥与飞灰形成固化体,但氯盐含量较高时,可能削弱水泥的水化作用和固化重金属的能力,尤其在酸性条件下效果较差^[6]。螯合稳定是将飞灰、水泥、螯合剂和水按一定比例在混炼装置内搅拌,混合形成飞灰螯合物,其重金属稳定能力、抗酸碱能力和长期稳定性均优于纯水泥固化,且无须高温高压等反应条件。

已有学者验证了飞灰在水泥混凝土路面、沥青混凝土路面和工业建筑材料等方面资源化利用的可行性。将飞灰应用于水泥混凝土路面可取代部分砂石、水泥等材料,且不会因水泥用量减少而损失过大的力学性能^[7]。在沥青混凝土路面中,飞灰可替代沥青混合料中的矿粉和细骨料,具有经济性和环保性^[8]。飞灰还可用来生产多种工业建筑材料,如含氧化钙飞灰可用作水泥生料,飞灰与地聚合物基质混合生成飞灰地聚合物,飞灰在高温状态下引入辅助原料可制备出玻璃、烧结砖、瓷砖、陶粒等材料^[9]。

针对飞灰在路面和工业建筑材料方面的资源化利用已有初步研究进展,鉴于飞灰数量巨大,今后仍有必要探讨其大体积资源化利用。由于整合

飞灰能固化重金属且具有一定的强度和稳定性,因而将其用作路基填料以解决飞灰的大面积使用具有一定可能性。笔者通过开展整合飞灰用作路基填料的系列室内试验,分析其基本物化指标,研究含水率及干密度对其承载比(CBR)、强度特性和渗透特性的影响,探讨整合飞灰在道路工程中用作路基填料的可行性,提出相应的施工控制指标和防治环境污染措施。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验材料为螯合稳定化后的城市生活垃圾焚烧飞灰(如图1),宏观形态为灰白色粉末,部分胶结成直径0.5~2.5 cm的球状粗颗粒。焚烧的生活垃圾组分主要包括厨余垃圾64.2%、塑料橡胶12.1%、废纸6.7%、尘土5.3%和织物2.8%。采用机械炉排炉焚烧工艺和“SNCR(非催化还原技术)脱硝+活性炭吸附+石灰半干法+布袋除尘”烟气净化工艺。添加剂为42.5号普通硅酸盐水泥(飞灰重量的8%~10%)和二甲基二硫代氨基甲酸钠有机螯合剂(飞灰重量的2%~5%)。将飞灰中的污染物整合成低溶解性、低迁移性物质。



图1 整合飞灰

Fig. 1 Chelated fly ash

根据《固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》(HJ/T 299—2007)^[10]制备固体废物浸出液,7种重金属元素的质量浓度检测结果汇总于表1,其浓度由高到低依次为:Zn、Cu、Cr、Ba、Ni、Pb、Cd。螯

合飞灰的重金属浸出毒性均低于《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)^[11]和《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)^[12]规定的限值。

表1 重金属浸出毒性对比

Table 1 Comparison of heavy metal leaching toxicity

单位: mg/L

| 检测项目 | Cu | Zn | Cd | Pb | Cr | Ba | Ni |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|
| 螯合飞灰 | 3.36 | 7.56 | 0.02 | 0.05 | 0.32 | 0.14 | 0.07 |
| 填埋场控制标准 | 40 | 100 | 0.15 | 0.25 | 4.5 | 25 | 0.5 |
| 危险废物鉴别标准 | 100 | 100 | 1 | 5 | 15 | 100 | 5 |

1.2 试验方法

利用KYKY-EM6200型扫描电镜观察螯合飞灰的微观结构,颗粒比重通过比重瓶法测定,颗粒级配通过筛分法和密度计法联合测定,采用LP-100D型塑性指数测试仪测定液塑限,采用重型击实I-1类方法获得击实曲线。化学特性试验分别采用X射线荧光光谱分析仪(XRF)和X射线衍射仪(XRD),检测其化学组成元素和矿物成分构成。工程特性试验遵循《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[13],使用CBR-1型承载比试验仪以1 mm/min的贯入速度开展CBR试验,试样浸水4 d;无侧限抗压强度试验采用YYW-2型应变控制式无侧限压力仪,试样直径和高度分别为50、100 mm,轴向应变上升速率为1 mm/min;三轴固结不排水剪切试验采用TSZ-2型全自动三轴仪,剪切速率为0.08 mm/min,试样采用真空抽气饱和和装置饱和48 h;采用TST-55型土壤渗透仪进行变水头渗透试验。

2 物理特性分析

2.1 微观结构

图2为不同放大倍数下的螯合飞灰微观形态图。由图2(a)、(b)可知,螯合飞灰结构复杂、表面凹凸不平,由大小形态各异的聚合体构成,粒径集中在20~80 μm ,存在黏结和咬合现象。部分飞灰细颗粒经稳定化后形成光滑块状聚合体(图2(c)),其光滑表面可能是由碱金属氯化物凝结形成;部分颗粒胶结成直径小于50 μm 的多孔珊瑚状聚合体(图2(d)),其表面粗糙、不均匀是细颗粒烧结硬化的表现^[14]。聚合体是在高温过程中由熔融物、生料与飞灰细颗粒一起构成的固化物,相关研究表明,固化物中存在水化反应产生的硅铝酸钙、硅酸钙及硫酸钙^[15],如图2(c)中的细棒状结晶体。相比未经处理的松散飞灰,螯合飞灰能更好地将吸附的重金属包裹在团聚体内,抑制重金属浸出效果更佳、颗粒结构整体性更好。

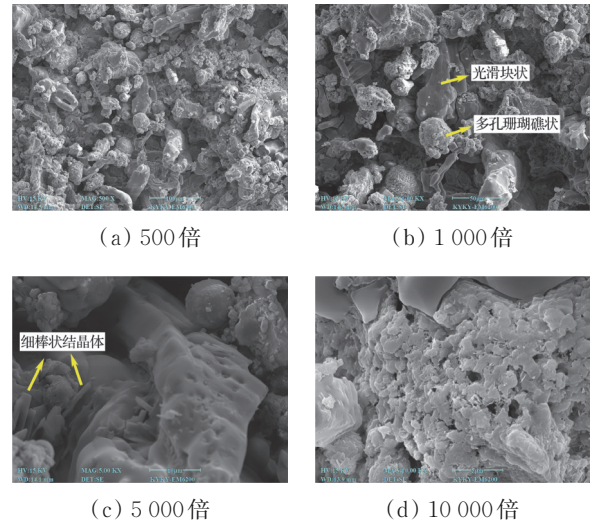


图2 不同放大倍数下螯合飞灰的微观形态图

Fig. 2 Micromorphology of chelated fly ash at different magnifications

2.2 颗粒比重

图3对比了不同填料的颗粒比重。螯合飞灰的颗粒比重为2.57,小于砂类土(2.65~2.69)和垃圾焚烧底渣(2.71)^[16],明显大于粉煤灰(2.34)^[17],但处于其余垃圾焚烧飞灰的颗粒比重范围内(2.23~2.68)^[18-21],与Xu等^[19]测定的江南填埋场稳定化飞灰的颗粒比重(2.46~2.56)最为接近。不同填料的颗粒比重大小取决于其矿物组成及重金属成分^[22]。

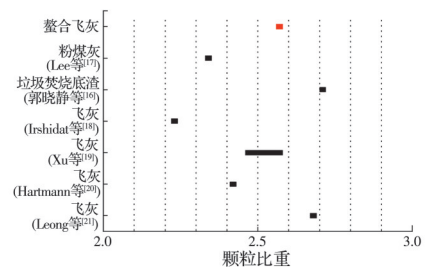


图3 不同填料的颗粒比重对比

Fig. 3 Comparison of specific gravity of different fillers

2.3 颗粒级配

不同种类飞灰和底渣的颗粒级配曲线如图4所示。螯合飞灰的颗粒粒径均小于2 mm,砂粒($2\text{ mm} > d \geq 0.075\text{ mm}$)含量为2.20%,粉粒($0.075\text{ mm} > d \geq 0.005\text{ mm}$)含量为74.05%,黏粒($d < 0.005\text{ mm}$)含量为23.75%,不均匀系数和曲率系数分别为12.67和1.62。由土的工程分类标准可知,螯合飞灰属于细粒土,细粒土是公路路基填筑的主要材料。

对比不同填料的颗粒级配曲线可知,垃圾焚烧底渣^[16]的粒径均大于所引文献中的飞灰,螯合飞灰粒径大于0.01 mm部分与Kizinievich等^[23]得出的飞灰级配曲线相似,小于0.01 mm部分的颗粒含量占

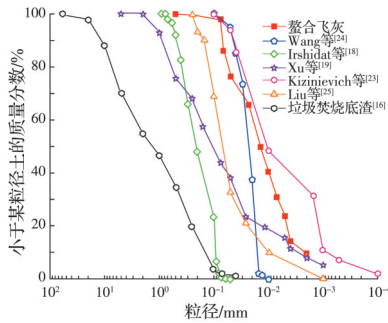


图 4 不同填料的颗粒级配曲线

Fig. 4 Grain distribution curves of different fillers

比约为 40%。Irshidat 等^[18]和 Wang 等^[24]得出的飞灰级配曲线较陡,级配均匀,难以压实;而 Xu 等^[19]和 Liu 等^[25]得出的飞灰级配曲线以及本文得出的螯合飞灰级配曲线均较缓,级配不均匀,易压实。总体而言,垃圾的组成和焚烧工艺会影响飞灰的颗粒大小^[26],但螯合飞灰仍处于其他飞灰的粒径范围内。

2.4 液塑限

表 2 对比了不同地区飞灰的液塑限指标。螯合飞灰的液限、塑限和塑性指数分别为 65.6%、33.4% 和 32.2,与中国江苏^[27]、重庆^[28]及巴西里约热内卢州^[29]的飞灰相似,液限均大于 50%,但美国密歇根州的飞灰^[30]除外。螯合飞灰的塑性指数大于 10,说明其结合水含量高,比表面积大,可为痕量重金属吸附提供有利条件。

表 2 不同地区飞灰液、塑限指标

Table 2 Liquid and plastic limits of fly ash from different regions

| 飞灰种类 | 液限/% | 塑限/% | 塑性指数 |
|----------------------------|-------|-------|-------|
| 螯合飞灰 | 65.6 | 33.4 | 32.2 |
| 中国江苏飞灰 ^[27] | 85.36 | 54.42 | 30.94 |
| 中国重庆飞灰 ^[28] | 50.43 | 30.67 | 19.76 |
| 巴西里约热内卢州飞灰 ^[29] | 60 | 36 | 24 |
| 美国密歇根州飞灰 ^[30] | 37 | 23 | 14 |

根据螯合飞灰的颗粒组成及塑性指标,可判断其属于高液限粉土,不宜直接用作路基浸水部分的填筑材料。《公路路基施工技术规范》(JTG/T 3610—2019)^[31]规定,高液限土(液限>50%)不可直接用于公路路床填筑,但螯合飞灰仍适用于公路路堤填筑。若将螯合飞灰用作路床填料,需进行改良处理。例如,掺入适量的砂砾、碎石等粒料或具有固化作用的胶结料,以提高其承载力和水稳定性。

此外,建议使用低液限黏土对螯合飞灰路基进行包边处理,螯合飞灰层下方设 0.4 m 厚砂砾垫层和 0.6 m 厚低液限黏土封层,上方设 1.5 m 厚粗粒土封层,坡面设 1~3 m 厚低液限黏土包边,并结合防渗土工布对螯合飞灰进行包芯处置,形成封闭式

包裹效果,有效隔绝外界水的渗入,提高路基稳定性,并避免螯合飞灰与周围环境直接接触。为确保高液限填料的压实度达标,施工时含水率应控制在最佳含水率附近,每层填料松铺厚度 30 cm,采用振动碾压 3~6 遍。

2.5 击实特性

不同飞灰和底渣的击实曲线如图 5 所示。与普通填料(如砂土、黏土)相比,螯合飞灰的最佳含水率偏大,为 29.0%,最大干密度偏小,为 1.325 g/cm³。因为螯合飞灰属于高液限土,吸附的结合水含量远高于普通填料,结合水的性质近似固体,因此导致试样难以压实。

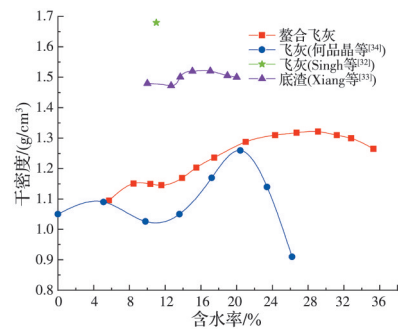


图 5 不同填料的击实曲线对比

Fig. 5 Comparison of compaction curves for different fillers

与图 5 中的其他填料相比,螯合飞灰的最佳含水率最高,但最大干密度小于 Singh 等^[32]、Xiang 等^[33]研究的飞灰和底渣。螯合飞灰的击实曲线与何晶晶等^[34]、于思源等^[35]研究的城市垃圾焚烧飞灰及市政污泥焚烧飞灰相似,均呈双峰特性,但含水率对螯合飞灰的影响更小,其击实曲线相对平缓。不同填料击实参数的差异主要归结于填料颗粒级配的影响^[36]。

3 化学特性分析

3.1 化学元素

表 3 为螯合飞灰的化学元素定量分析结果,各化学组分占比与安徽地区炉排炉灰的测试结果类似^[37]。螯合飞灰的主要化学元素包括 Ca、Na、Si、K、S、Mg、Al 和 Cl,金属元素占比约 70%,非金属元素中 Cl 占比最多,为 16.08%。Ca、Si 和 Al 元素是制

表 3 螯合飞灰的化学组成

Table 3 Chemical composition of chelated fly ash

| 化学组分 | 质量分数/% | 化学组分 | 质量分数/% |
|-------------------|--------|--------------------------------|--------|
| CaO | 48.34 | MgO | 1.35 |
| Na ₂ O | 14.06 | Al ₂ O ₃ | 0.95 |
| SiO ₂ | 10.64 | P ₂ O ₅ | 0.57 |
| K ₂ O | 3.75 | Fe ₂ O ₃ | 0.51 |
| SO ₃ | 2.39 | Cl | 16.08 |

备地质聚合物的优良碱激发前驱体,Cl元素主要以金属氯化物的形式存在,来源于大量的厨余垃圾及塑料。

此外,Ca元素可通过化学反应生成含钙化合物,在提供碱性条件的同时,通过沉淀作用抑制重金属迁移,因此,螯合飞灰具备一定的凝硬化和固化能力。然而,氯盐对环境的危害不容忽视,应避免螯合飞灰路基填料与雨水直接接触,或通过预水洗工艺降低氯盐含量,提高飞灰的综合利用效率。

3.2 矿物晶相

图6为螯合飞灰的XRD衍射图谱。螯合飞灰由矿物相和非矿物相组成,主要矿物成分为 SiO_2 和 CaCO_3 、 CaSO_4 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 类含钙矿物,可溶性氯盐为KCl和NaCl,未检测到明显的重金属和硅铝酸盐,可能是含量较低的原因。钙化合物源于烟气净化过程中石灰浆与气体发生化学反应生成的产物。水合硫酸钙晶体可能是高温脱硫过程中 SO_2 气体与石灰浆反应生成的 CaCO_3 氧化转化生成。 CaCO_3 、 CaSO_4 的化学稳定性较好,有助于吸附和抑制重金属浸出,并使螯合飞灰颗粒表面致密化。

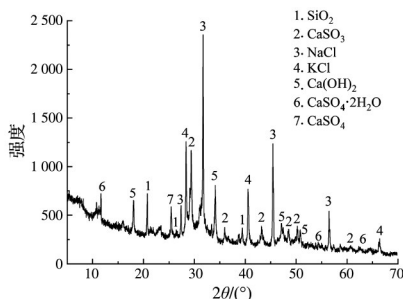


图6 螯合飞灰的XRD衍射图谱

Fig. 6 XRD diffraction pattern of chelated fly ash

相关文献表明^[38],矿物组成与重金属的浸出总量、形态及规律等污染特性相关,在酸性条件下重金属更易浸出。但螯合飞灰中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 呈弱碱性,在碱性环境下其化学性质更稳定,可抑制重金属等污染物的释放和迁移,避免引起生态环境问题。

4 工程特性分析

4.1 承载比

当螯合飞灰的含水率为19.5%~32%、击实次数为30~98时,其CBR和回弹模量随含水率的变化如图7所示。根据《公路路基设计规范》(JTGD30—2015)^[39],可通过经验公式 $M_R=17.6 \times Q^{0.64}$ ($2 < Q < 12$)和 $M_R=22.1 \times Q^{0.55}$ ($12 < Q < 80$)确定螯合飞灰回弹模量 M_R 的近似值, Q 代表CBR值。

相同击实次数下螯合飞灰的CBR随含水率的

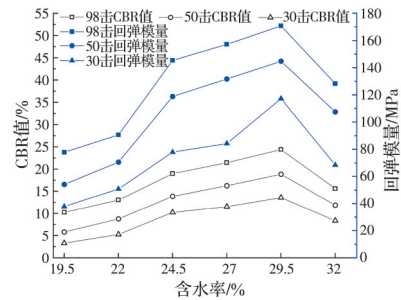


图7 CBR和回弹模量随含水率的变化

Fig. 7 CBR and rebound modulus changing with moisture content

增加呈先升后降趋势,并在最佳含水率29.0%附近出现峰值,CBR范围为3.3%~24.4%,对应的回弹模量为37.79~170.73 MPa。Poran等^[40]研究城市固体废物焚烧飞灰的工程性质发现,其CBR值在最佳含水率22.7%时达到最大值44%,最大干密度与本文相似,为 1.31 g/cm^3 。

在实际工程中,施工含水率宜控制在最佳含水率的-6%~+2%,以确保填料的压实度和强度,因此螯合飞灰的施工含水率范围宜在22.0%~29.5%。含水率为22.0%~29.5%、击实次数为98次时,螯合飞灰的CBR在5%以上,满足高速公路上路堤和下路堤填料的要求。高速公路上路床填料的最小CBR应大于8%,《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTGD40—2011)^[41]规定,极重交通荷载等级时,路床顶面回弹模量不小于70 MPa。含水率为24.5%~29.5%、击实次数为98次时,螯合飞灰的CBR和回弹模量均满足要求。从路基填料的CBR和回弹模量指标分析可知,螯合飞灰可用作高速公路路基各层位填料,但需要根据实际工程情况调整含水率和压实度。

4.2 无侧限抗压强度

含水率为21%~33%、干密度为 $1.153 \sim 1.272 \text{ g/cm}^3$ 时,螯合飞灰的无侧限抗压强度随含水率和干密度的变化如图8所示,其范围为44.25~363.35 kPa。相同干密度下,无侧限抗压强度随含水率的增加呈近似线性下降,而在最佳含水率29%附近并未出现强度峰值,这与砂土和黏土的行为相一致^[42]。相同含水率下,无侧限抗压强度随干密度的增加而显著提高,呈近似线性上升。通过回归分析,建立无侧限抗压强度 q_u 与含水率 w 、干密度 ρ_d 的拟合关系式,如式(1)所示,其 $R^2=0.97$ 。

$$q_u = (-114.21\rho_d + 124.52)w + 425.95\rho_d - 4629.23 \quad (1)$$

相同含水率下,螯合飞灰的抗压强度显著高于市政污泥焚烧飞灰^[35](小于60 kPa)。矿物晶相分析表明,螯合飞灰中 CaCO_3 和 CaSO_4 类含钙化合物具

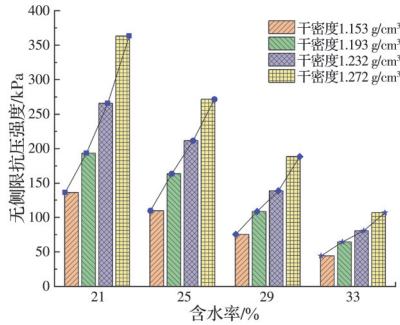


图 8 无侧限抗压强度随含水率和干密度的变化

Fig. 8 Variations of unconfined compressive strength with moisture content and dry density

有固化和团聚作用,增强了颗粒间的联结,改善了其力学性能。此外,相比新鲜飞灰,经长期填埋陈化后,水合作用下飞灰颗粒间的黏性更强,用作路基填料时强度也更高^[43]。

4.3 有效抗剪强度指标

根据莫尔-库仑失效准则确定的有效抗剪强度指标如图 9、图 10 所示。相同干密度下,有效黏聚力和有效内摩擦角随含水率的增加呈近似线性下降关系;而相同含水率下,两者随干密度的增加呈近似线性上升关系。为消除不同量纲对有效抗剪强度敏感性分析的影响,对有效抗剪强度指标进行 min-max 归一化无量纲处理^[44],并建立其与有效抗剪强度之间的关系。归一化处理后,有效抗剪强度

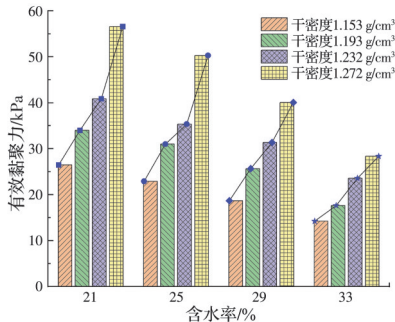


图 9 有效黏聚力随含水率和干密度的变化

Fig. 9 Variations of effective cohesion with moisture content and dry density

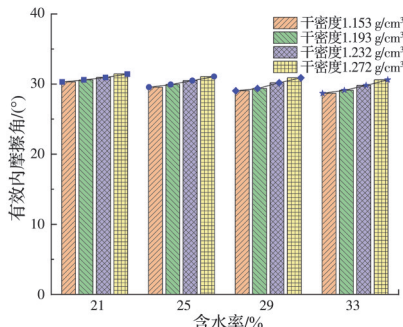


图 10 有效内摩擦角随含水率和干密度的变化

Fig. 10 Variations of effective frictional angle with moisture content and dry density

随有效黏聚力和有效内摩擦角的变化率分别为 0.998 和 0.880,说明黏聚力减小是抗剪强度降低的主要因素。由于颗粒大小和结构形态对内摩擦角起主导作用^[45],含水率和干密度对整合飞灰颗粒间黏结作用的影响比滑动摩擦更显著。

整合飞灰的有效黏聚力范围为 14.22~56.58 kPa,有效内摩擦角范围为 28.69°~31.44°。在较低含水率和较大干密度条件下,有利于获得更优的有效抗剪强度指标。Xu 等^[19]得出垃圾填埋场新鲜飞灰(含水率为 17.6%~19.9%)的黏聚力为 19.5 kPa,内摩擦角为 34.1°,与含水率为 21%、干密度为 1.153 g/cm³时整合飞灰的有效抗剪强度指标较相似(有效黏聚力 26.46 kPa,有效内摩擦角 30.31°),因为两种飞灰的含水率及干密度接近。尽管整合飞灰属于粉土,但其有效抗剪强度指标高于粉土(黏聚力 5~10 kPa,内摩擦角 18°~25°),这可能是由于其内部的含钙矿物增强了颗粒间的咬合作用和颗粒表面物理化学作用产生的吸引力^[46]。

4.4 渗透性

整合飞灰的渗透系数随含水率及干密度的变化如图 11 所示,其范围为 1.03×10⁻⁶~9.94×10⁻⁶ cm/s,与粉质黏土(10⁻⁶~10⁻⁷ cm/s)相似,均属于弱透水性。垃圾填埋场飞灰的渗透系数通常为 10⁻³~10⁻⁶ cm/s,属于中等透水性,但经稳定化后,飞灰的渗透系数会下降至 10⁻⁶~10⁻⁸ cm/s。渗透系数与飞灰的粒径大小、颗粒级配及结构组成有关,整合飞灰稳定过程加入的水泥和石灰生成了新的水化产物,显著降低了渗透性。

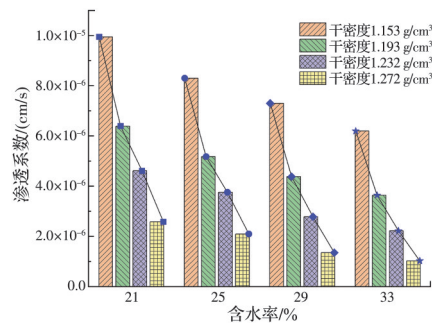


图 11 渗透系数随含水率和干密度的变化

Fig. 11 Variations of permeability coefficient with moisture content and dry density

在飞灰填埋场中,渗透系数大有利于渗滤液排出,避免导排层淤堵,而整合飞灰路基填料的低渗透性抑制了痕量污染物的运移。将整合飞灰用于路基填筑工程时,应充分压实,尽可能降低渗透系数。建议铺设防渗土工布,以隔离外部水分进入路基内部,防止含水率过高时填料强度大幅下降,有效保证路基稳定性,阻滞重金属污染扩散及浸出。

5 结论

通过室内试验和微观测试,系统研究螯合飞灰的基本物化特性及其在不同含水率和干密度下的工程特性,探讨螯合飞灰用作路基填料的可行性,主要结论如下:

1) 螯合飞灰微观结构由光滑块状和多孔珊瑚礁状聚合体构成,能有效包裹并稳定重金属。颗粒比重为 2.57,属于高液限粉土,具有高最佳含水率和低最大干密度的特点。将其用作路基填料时,可部分减轻地基上覆荷载和降低地基沉降量,但应采取隔水措施,避免路基浸水。

2) 螯合飞灰主要元素 Ca、Na、Si 和 Cl 的占比约 89%,金属元素占 70%,非金属元素 Cl 达 16.08%。主要矿物成分包括 CaCO_3 、 CaSO_4 和 SiO_2 ,含钙化合物能在碱性条件下抑制重金属浸出。可溶性氯盐为 KCl 和 NaCl,用作路基填料时需注意其环境影响。

3) 螯合飞灰在含水率为 19.5%~32% 时的 CBR 范围为 3.3%~24.4%,且随击实次数的增加而增大,并在最佳含水率附近达到峰值。无侧限抗压强度、有效黏聚力和有效内摩擦角的最大值分别为 363.35 kPa、56.58 kPa 和 31.44° ,渗透系数约 10^{-6} cm/s,属于弱透水性。随着含水率和干密度的增加,强度、有效抗剪强度指标均分别呈近似线性下降和上升,渗透系数持续下降,内摩擦角无明显变化。

4) 根据公路相关设计规范对路基填料 CBR 和回弹模量的要求,建议螯合飞灰用作路堤及路床填料的施工含水率分别为 22.0%~29.5% 和 24.5%~29.5%,宜选用低含水率,并采取低液限黏土包边和防渗土工布包芯。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023. (in Chinese)

[2] 张木喜, 孙晓杰, 王亚搏, 等. 广东省生活垃圾处理方式变化趋势及其原因[J]. 环境工程学报, 2021, 15(11): 3651-3659.
Zhang M X, Sun X J, Wang Y B, et al. Changing trend and its causes of domestic waste treatment methods in Guangdong Province[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(11): 3651-3659. (in Chinese)

[3] Tozlu A, Özahi E, Abusoglu A. Waste to energy technologies for municipal solid waste management in

Gaziantep[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 54: 809-815.

[4] 马懿, 郑仁栋, 周志昊, 等. 生活垃圾焚烧飞灰处置技术与应用瓶颈[J]. 环境工程, 2022, 40(5): 237-243.
Ma Y, Zheng R D, Zhou Z H, et al. Bottleneck of application of disposal technologies for fly ash from municipal solid waste incineration[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(5): 237-243. (in Chinese)

[5] 马斌斌, 杨晓, 王宇峰. 城市生活垃圾焚烧飞灰资源化处置技术及产品概述[J]. 环境化学, 2023, 42(8): 2669-2687.
Ma B B, Yang H, Wang Y F. Overview of resources reuse technologies and corresponding products for municipal solid waste incineration fly ash[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42(8): 2669-2687. (in Chinese)

[6] 胡莉强, 李嘉祺, 蓝天帅, 等. 广西垃圾焚烧飞灰水泥土工程环境特性与改良研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2023, 48(3): 538-549.
Hu L Q, Li J Q, Lan T S, et al. Study on engineering and environment characteristics and improvement of fly ash cement-stabilized soil from domestic waste incineration in Guangxi[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2023, 48(3): 538-549. (in Chinese)

[7] Cai Z, Bager D H, Christensen T H. Leaching from solid waste incineration ashes used in cement-treated base layers for pavements[J]. Waste Management, 2004, 24(6): 603-612.

[8] 谭巍, 李菁若, 季炜, 等. 城市生活垃圾焚烧飞灰在沥青混合料中的应用[J]. 中国公路学报, 2016, 29(4): 14-21.
Tan W, Li J R, Ji W, et al. Application of municipal solid waste incinerator fly ash in asphalt mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(4): 14-21. (in Chinese)

[9] 李新明, 王士革, 乐金朝, 等. 城市垃圾焚烧飞灰资源化利用研究进展[J]. 热力发电, 2010, 39(5): 1-5.
Li X M, Wang S G, Le J C, et al. Advancement of study on utilizing fly ash resource from MSW incineration[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(5): 1-5. (in Chinese)

[10] HJ/T 299—2007 固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法[S].
HJ/T 299—2007 Solid waste-extraction procedure for leaching toxicity-sulphuric acid & nitric acid method[S]. (in Chinese)

[11] GB 5085.3—2007 危险废弃物鉴别标准 浸出毒性鉴别[S].
GB 5085.3—2007 Identification standards for hazardous wastes- Identification for extraction toxicity[S]. (in Chinese)

[12] GB 16889—2008 生活垃圾填埋场污染控制标准[S].

- GB 16889—2008 Standard for pollution control on the landfill site of municipal solid waste[S]. (in Chinese)
- [13] JTG 3430—2020 公路土工试验规程[S].
JTG 3430—2020 Test methods of soils for highway engineering[S]. (in Chinese)
- [14] Ni M J, Du Y Z, Lu S Y, et al. Study of ashes from a medical waste incinerator in China: physical and chemical characteristics on fly ash, ash deposits and bottom ash [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2013, 32(3): 496-504.
- [15] Yu J, Sun L S, Xiang J, et al. Physical and chemical characterization of ashes from a municipal solid waste incinerator in China[J]. *Waste Management & Research*, 2013, 31(7): 663-673.
- [16] 郭晓静, 李磊, 何肖, 等. 城市生活垃圾焚烧渣工程特性试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(4): 120-128.
Guo X J, Li L, He X, et al. Experimental study on engineering characteristics of incineration bottom ash of municipal solid waste[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(4): 120-128. (in Chinese)
- [17] Lee S E, Park S J, Kim H S, et al. A study on the model test for mine filling using coal ash[J]. *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, 2012, 22(6): 449-461.
- [18] Irshidat M R, Al-Nuaimi N, Rabie M. Sustainable alkali-activated binders with municipal solid waste incineration ashes as sand or fly ash replacement[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2022, 24(3): 992-1008.
- [19] Xu H, Miao J D, Chen P, et al. Chemical and geotechnical properties of solidified/stabilized MSWI fly ash disposed at a landfill in China[J]. *Engineering Geology*, 2019, 255: 59-68.
- [20] Hartmann S, Koval L, Škrobánková H, et al. Possibilities of municipal solid waste incinerator fly ash utilisation[J]. *Waste Management & Research*, 2015, 33(8): 740-747.
- [21] Leong E C, Eriktius D T. Improvement of peaty soils with municipal solid waste fly ash[J]. *Environmental Geotechnics*, 2014, 1(4): 200-209.
- [22] 季节, 王晓光, 肖俊孝, 等. 月球冻土模拟与剪切强度试验分析[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2023, 10(2): 199-210.
Ji J, Wang X G, Xiao J X, et al. Simulation of icy lunar regolith and experiment on its shear strength[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2023, 10(2): 199-210. (in Chinese)
- [23] Kizinievich O, Voishniene V, Kizinievich V, et al. Effect of municipal solid waste incineration fly ash on the properties, durability, and environmental toxicity of fired aluminosilicates[J]. *Glass and Ceramics*, 2019, 76(7): 307-310.
- [24] Wang S F, Yu L, Qiao Z, et al. The toxic leaching behavior of MSWI fly ash made green and non-sintered lightweight aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 373: 130809.
- [25] Liu Y Y, Wang J J, Lin X, et al. Microstructures and thermal properties of municipal solid waste incineration fly ash[J]. *Journal of Central South University*, 2012, 19(3): 855-862.
- [26] 张建铭, 胡敏云, 许四法. 两种典型垃圾焚烧灰渣特性的试验研究[J]. *环境污染与防治*, 2008, 30(12): 50-54, 59.
Zhang J M, Hu M Y, Xu S F. Characterization of two typical incineration residues of municipal solid wastes[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2008, 30(12): 50-54, 59. (in Chinese)
- [27] 唐强, 陈辉, 高玉峰, 等. 差异含水率条件下飞灰及其螯合物的应力-应变及环境特性[J]. *土木建筑与环境工程*, 2018, 40(2): 19-25.
Tang Q, Chen H, Gao Y F, et al. Stress-strain and leaching behaviors of fly ash and chelated fly ash under various moisture content[J]. *Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2018, 40(2): 19-25. (in Chinese)
- [28] 罗任宏. 垃圾焚烧飞灰在水泥稳定碎石路面基层中的应用技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
Luo R H. Study on application technology of waste incineration fly ash in cement stabilized macadam pavement base[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [29] Vizcarra G O C, Casagrande M D T, Motta L M G D. Applicability of municipal solid waste incineration ash on base layers of pavements[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(6): 1-7.
- [30] Zekkos D, Kabalan M, Syal S M, et al. Geotechnical characterization of a municipal solid waste incineration ash from a Michigan monofill[J]. *Waste Management*, 2013, 33(6): 1442-1450.
- [31] JTG/T 3610—2019 公路路基施工技术规范[S].
JTG/T 3610—2019 Technical specification for construction of highway subgrades[S]. (in Chinese)
- [32] Singh D, Kumar A. Geo-environmental application of municipal solid waste incinerator ash stabilized with cement[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, 9(2): 370-375.
- [33] Xiang G S, Song D Q. Experimental study on the strength behaviors of municipal solid waste incineration bottom ash using ultrasonic wave velocity tests[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2020, 11(1): 1581-1598.

- [34] 何晶晶, 刘星, 冯军会, 等. 城市生活垃圾焚烧飞灰的工程性质表征[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(11): 1502-1506.
He P J, Liu X, Feng J H, et al. Engineering characteristics of air pollution control residues from municipal solid waste incineration plant[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(11): 1502-1506. (in Chinese)
- [35] 于思源, 章骅, 何晶晶, 等. 市政污泥焚烧飞灰的工程性质[J]. 中国环境科学, 2021, 41(1): 239-246.
Yu S Y, Zhang H, He P J, et al. Geotechnical properties of sewage sludge incineration ash[J]. China Environmental Science, 2021, 41(1): 239-246. (in Chinese)
- [36] 王朝辉, 问鹏辉, 宋亮, 等. 基于颗粒破碎特性的盐岩集料基层级配组成设计研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(2): 340-352.
Wang C H, Wen P H, Song L, et al. Gradation composition design of salt rock aggregate base based on particle breakage characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(2): 340-352. (in Chinese)
- [37] 赵峰娃, 马晓东, 达永琪, 等. 不同生活垃圾焚烧炉飞灰特性及重金属浸出毒性[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(增刊2): 524-529.
Zhao F W, Ma X D, Da Y Q, et al. Physicochemical characteristics and heavy metal leaching toxicity of incineration fly ash from different waste incinerators of domestic waste[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(S2): 524-529. (in Chinese)
- [38] 李建陶, 曾鸣, 杜兵, 等. 垃圾焚烧飞灰药剂稳定化矿物学特性[J]. 中国环境科学, 2017, 37(11): 4188-4194.
Li J T, Zeng M, Du B, et al. Mineralogical characteristics of MSWI fly ash stabilized by chemical reagents[J]. China Environmental Science, 2017, 37(11): 4188-4194. (in Chinese)
- [39] JTG D30—2015 公路路基设计规范[S].
JTG D30—2015 Specifications for design of highway subgrades[S]. (in Chinese)
- [40] Poran C J, Ahtchi-Ali F. Properties of solid waste incinerator fly ash[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(8): 1118-1133.
- [41] JTG D40—2011 公路水泥混凝土路面设计规范[S].
JTG D40—2011 Specifications for design of highway cement concrete pavement[S]. (in Chinese)
- [42] Bui Q B, Morel J C, Hans S, et al. Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth[J]. Construction and Building Materials, 2014, 54: 163-169.
- [43] Zhang Y B, Soleimanbeigi A, Likos W J, et al. Geotechnical and leaching properties of municipal solid waste incineration fly ash for use as embankment fill material[J]. Transportation Research Record, 2016, 2579(1): 70-78.
- [44] 王之君, 张科, 郑健, 等. 黄河上游十大孔兑苏达尔沟坡沟稳定性因素的敏感性分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(9): 146-149.
Wang Z J, Zhang K, Zheng J, et al. Sensitivity analysis on stability factors of slope-gully in "ten tributaries" sudalaer in the upper Yellow River[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(9): 146-149. (in Chinese)
- [45] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 土石混合体直剪试验的破坏特征及抗剪强度取值方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊2): 4065-4072.
Deng H F, Yuan X F, Li J L, et al. Research on failure characteristics and determination method for shear strength of earth-rock aggregate in direct shear tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 4065-4072. (in Chinese)
- [46] 孙娇, 岳波, 董路, 等. 典型危险废物的工程力学特性[J]. 环境工程学报, 2013, 7(1): 345-350.
Sun J, Yue B, Dong L, et al. Engineering mechanical properties of typical hazardous wastes[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(1): 345-350. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)