

化学改良对拜耳法赤泥击实特性的影响研究

李彬¹ 孙兆云² 杨伟刚¹ 韩兆友¹ 闫翔鹏²

(1. 山东高速股份有限公司, 山东济南 250014; 2. 山东省交通科学研究院, 山东济南 250102)

【摘要】 拜耳法赤泥具有特殊的物理、水理特性, 经过改良处理可用于路基填筑。选择石灰、水泥、磷石膏、复合改性材料对赤泥进行化学改良处理, 并分析不同改良材料对赤泥击实特性的影响。试验结果表明: 不同材料改良赤泥击实特性差异较大, 并随着掺加剂量的变化, 每种材料改良赤泥的最佳含水率和最大干密度均呈现不同的增减变化趋势, 为拜耳法赤泥改良方法的选择和工程应用提供参考。

【关键词】 拜耳法赤泥; 路基工程; 化学改良; 击实特性; 变化趋势

【中图分类号】 U 416

【文献标识码】 A

doi: 10. 3969/j. issn. 1007-2993. 2020. 03. 011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influence of the Chemical Improvement on the Compaction Characteristics of the Bayer-process Red Mud

Li Bin¹ Sun Zhaoyun² Yang Weigang¹ Han Zhaoyou¹ Yan Xiangpeng²

(1. Shandong Hi-speed Company Limited, Jinan 250014, Shandong, China;

2. Shandong Transportation Research Institute, Jinan 250102, Shandong, China)

【Abstract】 Bayer-process red mud has special physical and hydraulic properties, can be used for subgrade filling through improved treatment. Lime, cement, phosphogypsum and composite modified materials are selected for chemical improvement of red mud, and the effect of different modified materials on the compaction characteristics of red mud is analyzed. The results shows that different materials have different characteristics in improving red mud compaction, and the optimum moisture content and maximum dry density of red mud improved by each material show different increasing and decreasing trends with the change of dosage. It provides a reference for the selection of improvement methods and engineering application of Bayer red mud.

【Key words】 Bayer red mud; subgrade engineering; chemical improvement; compaction characteristics; change tendency

0 引言

拜耳法生产氧化铝是利用强碱将铝土矿中的氧化铝溶出形成铝酸钠溶液, 而矿石中不溶性杂质和化合物经过分离、洗涤、压滤, 所产生的固体残渣就是拜耳法赤泥^[1]。拜耳法工艺具有流程简单、能耗低、产品质量高等特点, 成为最广泛采用的生产工艺^[2]。拜耳法赤泥中的固体成分主要为铝土矿中的铁、钛等杂质和绝大部分硅的不溶性化合物, 同时携带大量碱性附液, 含水量达 40% 左右。拜耳法生产工艺决定了赤泥具有碱性高、天然含水率高、亲水性强、颗粒细等特点, 与自然土的工程特性有明显差异^[3]。

大量研究表明, 拜耳法赤泥的液限、塑限较高、塑性指数低、水稳定性差, 其路用性能不能满足路基填筑材料的技术要求, 必须经过改良处理对其物理、力学性能进行改善后才可用于路基填筑。本文采用化学改良的处理方法, 选择石灰、水泥、磷石膏及复合改性材料作为典型材料, 按照重型击实试验方法测定不同改良材料、不同掺配比例条件下改性赤泥的最大干密度和最佳含水率, 分析不同典型改良材料对拜耳法赤泥击实特性的影响, 为拜耳法赤泥的改良方法选择和工程应用提供参考。

1 拜耳法赤泥的基本性质

铝土矿是生产氧化铝所必需的矿石原料, 自然界

基金项目: 山东省交通科技创新计划(2016B43)

作者简介: 李彬, 男, 1980年生, 汉族, 高级工程师, 主要从事道路与桥梁技术研究。E-mail: 18446605@qq.com

中的铝土矿组成复杂,化学成分变化很大。根据矿石中铝矿物的成分与含量,一般可将铝土矿分为三水铝石型、一水软铝石型、一水硬铝石型和混合型等。

拜耳法赤泥的矿物组成、化学成分与铝土矿原矿石的矿物成分和氧化铝生产工艺密切相关^[4]。通过对拜耳法赤泥的物相分析,表明其矿物组成主

要为钙霞石、钙钛矿、一水硬铝石、伊利石、赤铁矿等。拜耳法赤泥的化学成分主要以 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 CaO 为主,但由于铝土矿产地的不同,各成分的含量存在一定的差异性。对山东铝厂拜耳法赤泥样品连续取样后进行化学成分测试,结果见表 1。

表 1 拜耳法赤泥的化学成分

化学成分	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	TiO_2	Na_2O	K_2O	烧失量
含量/%	34.3	21.4	20.1	3.2	0.3	2.0	8.1	0.2	9.7

拜耳法工艺需要对铝土矿进行破碎和磨矿,然后加入 NaOH 溶液或 Na_2CO_3 溶液使 Al_2O_3 溶出,这就导致赤泥颗粒的粒度极细,并在颗粒表面吸附大量

Na^+ 和 OH^- 。从宏观上赤泥则表现出碱度高、亲水性强、含水量高、密度小等特性。对山东铝厂拜耳法赤泥进行基本物理、水理指标测试,结果见表 2。

表 2 拜耳法赤泥的基本物理、水理测试指标

项目	比重	天然含水率 /%	边界粒径 $D_{10}/\mu\text{m}$	边界粒径 $D_{50}/\mu\text{m}$	边界粒径 $D_{90}/\mu\text{m}$	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数
测试结果	2.92	39.7	0.95	2.1	7.85	51.4	38.1	13.3

2 拜耳法赤泥的击实特性

击实试验是确定不同土质击实特性的常用方法,也是判断压实效果的对照标准。通过一定击实功能下土样干密度随含水率变化的关系曲线,可以得到最大干密度和最佳含水率指标。按照《公路土工试验规程》中的重型击实方法对拜耳法赤泥进行击实试验^[5]。试验前,将拜耳法赤泥在 $105\sim 110\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下烘干 8 h,碾碎结块通过 2 mm 筛,然后四分法准备 5 个试样,加水量按 2%~3% 递增,充分拌和均匀后闷料一夜备用。击实筒内径为 10 cm、高度为 12.7 cm,试样体积为 997 cm^3 。击实时采取五层法装料,每层击数为 27 次。

经测试,拜耳法赤泥样品的最大干密度为 1.603 g/cm^3 、最佳含水率为 27.7%,击实曲线如图 1 所示。

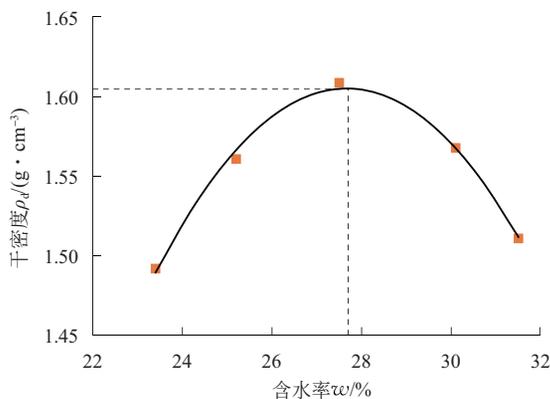


图 1 拜耳法赤泥的击实试验曲线

由击实试验结果可以看出,拜耳法赤泥的最大干密度较一般自然土明显偏低,最佳含水率较高但远低于其塑限,具有特有的击实特性。分析原因如下:(1)拜耳法赤泥虽含大量钙、硅、铁等元素,具有较大的颗粒比重,但赤泥微粒以凝聚体、集粒体和团聚体构成孔架状结构,具有较大空隙,使赤泥微观结构疏松、密度较小^[6];(2)强碱溶出工艺使赤泥颗粒表面附带大量带电离子,存在较大的剩余价力、分子力以及氢键等力。在最佳含水率状态下,除了润滑作用的颗粒表面水膜之外,还存在大量的表面结合水膜,过量的结合水使最佳含水率数值偏高。

3 改良材料的选择

化学改良是通过向土中掺加一定比例的石灰、水泥、粉煤灰等材料,经过物理化学反应来改变土的颗粒组成与结构,从而使改良土的强度、刚度和水稳定性得到明显改善。拜耳法赤泥存在级配不良、天然含水率高、液限塑限高、遇水软化等不良工程特性,通过加入改良材料并经过物理化学反应过程,才能使赤泥颗粒的组成形态与结构发生变化,从宏观上提高其物理、力学性能。

本研究选择了石灰、水泥、磷石膏及复合改性材料对赤泥进行化学改良。石灰和水泥作为两种性能优良且相对廉价的改良材料,被广泛用于道路填筑材料的稳定固化^[7-8]。针对拜耳法赤泥颗粒细、亲水性强、附液碱性高等特点,试验又选择了磷石膏和复合改性材料作为改良材料。复合改性材料主要由矿

渣微粉、水泥、石灰粉、高分子稳定剂等材料按一定比例配制而成。试验所选四种改良材料的主要作用机理如下：(1)石灰。通过离子交换、火山灰反应及碳化作用，生成水化硅酸钙等不溶性胶体，与赤泥颗粒反应形成絮凝团聚结构。(2)水泥。通过水解、水化反应，分解出 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和水化反应物，在赤泥微粒间形成水化水泥石骨架，对赤泥颗粒产生胶结约束达到固化效果。(3)磷石膏。携带酸液与赤泥附液发生中和，磷石膏中大量 Ca^{2+} 与赤泥中 Na^+ 交换作用后使吸附水膜减薄，使赤泥微粒单体相互接近逐渐结成晶体聚成团粒。(4)复合改性材料。碱-激发效应下水泥水化、矿渣微粉二次水化、高分子材料吸附聚合的相互作用，使赤泥微粒得到稳定固化。

不同改良材料的稳定固化反应机理的差异性和复杂性，势必对拜耳法赤泥的击实特性产生不同影响。四种改良材料分别按赤泥干质量的 4%、6%、8%、10% 和 12% 五种不同剂量进行击实试验，以对比与分析四种典型改良材料对拜耳法赤泥击实特性的影响程度与变化趋势。

4 数据分析

化学改良赤泥采取与拜耳法赤泥相同的方法和参数标准进行击实试验。击实前，将拜耳法赤泥加入不同含水量闷料备用，再分别将石灰、水泥、磷石膏、复合改性材料按干赤泥质量的 4%、6%、8%、10%、12% 与闷好的赤泥充分拌和均匀，各改良材料不同掺量下的单组击实试验要求在 1 h 内完成。四种典型材料在不同掺量试验条件下改良赤泥的最大干密度与最佳含水率分布曲线如图 2—图 5 所示。

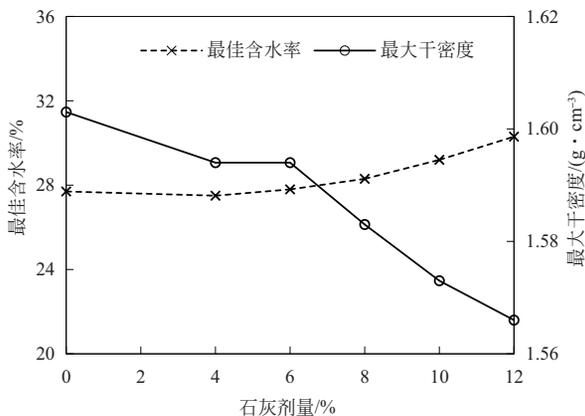


图 2 不同剂量石灰改良赤泥的击实试验结果

由图 2 可以看出，随着石灰剂量的增加，石灰改良赤泥的最佳含水率不断升高，而最大干密度逐渐减小，尤其当剂量超过 8% 时，最大干密度值降幅明显。

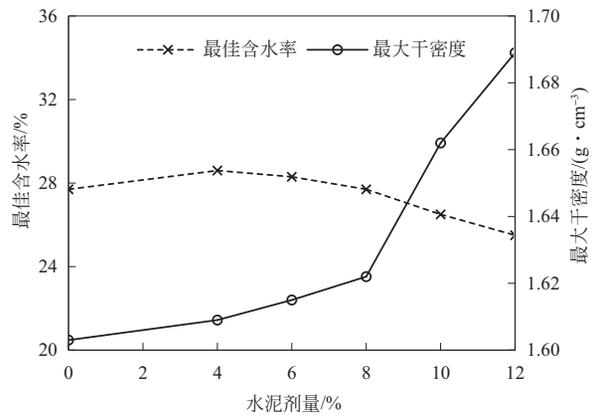


图 3 不同剂量水泥改良赤泥的击实试验结果

由图 3 可以看出，随着水泥剂量的增加，水泥改良赤泥的最佳含水率不断降低，最大干密度则逐渐增大，水泥剂量达 10% 以上时，最大干密度得到显著提升。

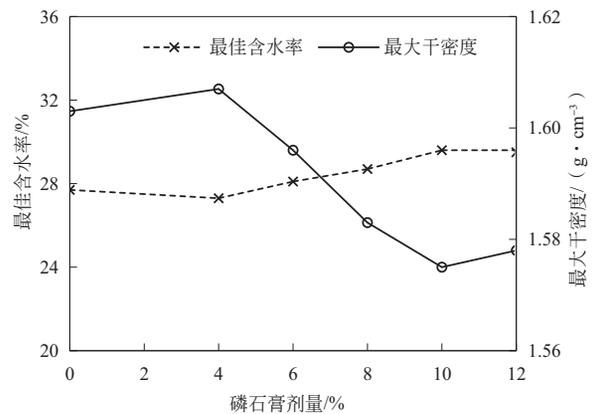


图 4 不同剂量磷石膏改良赤泥的击实试验结果

由图 4 可以看出，随着磷石膏剂量的增加，磷石膏改良赤泥的最佳含水率先升高后降低，最大干密度则先减小后增大，变化趋势的拐点发生在 10% 剂量左右。

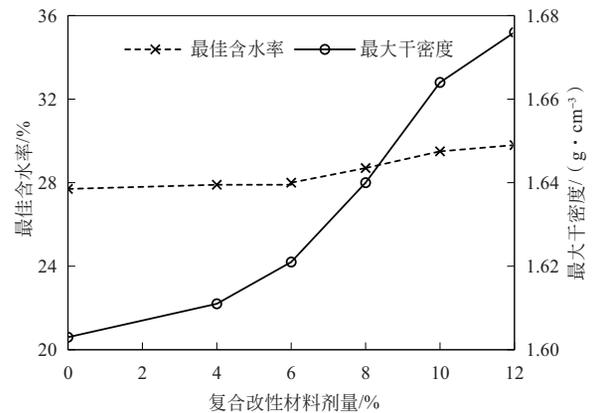


图 5 不同剂量复合改性材料改良赤泥的击实试验结果

由图 5 可以看出，随着复合改性材料剂量的增加，改良赤泥的最佳含水率略有升高，而最大干密度也逐渐增大且增幅较为明显。

改良材料与赤泥拌和后即开始发生复杂的化学反应,由于不同材料与赤泥之间化学反应速率、时间和类型的差异性,以及不同改良材料本身物理化学性质的不同,最终使改良赤泥击实试验结果呈现上述不同的变化趋势。从图 2—图 5 可以看出,当改良材料剂量在 4%~10% 范围内时,改良赤泥的击实特性表现出较强的规律性。当改良材料超过 10% 后,最佳含水率和最大干密度的变化幅值明显增大,说明高掺量条件下改良材料本身的物理性质对试验结果影响较大。

综上所述,根据改良赤泥最大干密度和最佳含水率的测试结果和变化趋势,可以为拜耳法赤泥在工程实践中改良材料、剂量的选择以及改良赤泥强度、模量等力学指标的进一步评价提供参考依据。

5 结论

通过对比不同改良材料、不同剂量条件下拜耳法赤泥最大干密度和最佳含水率的增减幅度和变化规律,可以得到以下结论和建议。

(1)拜耳法赤泥的击实特性具有明显的特殊性,与自然土具有较大区别。

(2)由于改良机理、化学反应速率和类型的差异性和复杂性,石灰、水泥、磷石膏和复合改性材料对拜耳法赤泥击实特性的影响具有明显的差异性。

(3)改良材料的剂量对改良赤泥最大干密度和最佳含水率影响程度不同,根据试验结果可以选取 4%~10% 作为工程应用合理掺配比例的参考范围。

参 考 文 献

- [1] 高天明,杨沁东,代 涛. 氧化铝不同生产工艺资源环境效率比较[J]. 中国矿业,2018,27(1):83-88.
- [2] 顾松青. 我国的铝土矿资源和高效低耗的氧化铝生产技术[J]. 中国有色金属学报,2004,14(S1):91-97.
- [3] 孙兆云. 拜耳法赤泥填筑路基的工程技术与环境影响研究[D]. 济南:山东大学,2017.
- [4] 朱晓波,李 望,管学茂. 赤泥综合利用研究现状及分析[J]. 矿产综合利用,2016(1):7-10.
- [5] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2007.
- [6] 孙兆云,吴 昊,侯佳林. 改性拜耳法赤泥路基填料施工与质量评价研究[J]. 路基工程,2018(3):69-72.
- [7] 汪海洋,李粮纲,余 雷. 水泥和石灰改良路基填料对比试验研究[J]. 水利水运工程学报,2010(2):114-118.
- [8] 王 栋. 改良土的工程性质及其在秦沈客运专线路基工程中的应用[D]. 成都:西南交通大学,2002.

收稿日期:2019-07-22

(上接第 166 页)

5 结论

在山区填方体上修建建筑物是一个综合性问题,尤其是在填土未完成自重固结的情况下,要以边坡的整体稳定为前提条件,结合适当的地基基础方案,以此来保证建筑物使用期间的安全稳定。

针对本文中的建筑物,从勘察的角度建议采用下部扶壁式挡墙+上部钢筋混凝土格构干砌石护坡,或下部悬臂式挡墙、注浆回填后上部采用浆砌石护坡等方式对边坡进行防护,建筑物基础采用大直径嵌岩桩基础。

参 考 文 献

- [1] 何成兵. 甘孜机场块碎石填筑高边坡变形与稳定性研究[D]. 贵阳:贵州大学,2018.
- [2] 江 平. 高填方边坡变形及破坏机理研究[J]. 云南电力技术,2012,40(4):78-79.
- [3] 陈金明,李 哲,韩 映,等. 斜坡地基上高填方边坡的变形及稳定性研究[J]. 路基工程,2017(4):52-56.
- [4] 王志强,马晓亮. 持续降雨环境下高速公路边坡稳定

性影响的数值模拟分析[J]. 公路工程,2018,43(5):310-315.

- [5] 赵建军,余建乐,解明礼,等. 降雨诱发填方路堤边坡变形机制物理模拟研究[J]. 岩土力学,2018,39(8):2933-2940.
- [6] 邓凯伦,刘 宏,刘星星,等. 降雨作用下碎石土高填方边坡渗流及稳定性分析[J]. 土工基础,2018,32(6):650-654.
- [7] 薛 桦. 高填方路堤边坡在地震作用下的动力响应分析[J]. 人民黄河,2012,34(10):134-135,138.
- [8] 杨志民. 基于公路填方路基抗震性能研究[J]. 低碳世界,2018(7):301-302.
- [9] 黎佳初,廖 波. 复杂高填方边坡设计关键问题的探讨[J]. 世界有色金属,2017(8):132,134.
- [10] 何 潘. 某场地填方高边坡的综合治理[J]. 有色金属设计,2017,44(3):34-39.
- [11] 谢佳能. 山区高填方边坡稳定性分析及加固治理措施研究[J]. 云南水力发电,2018,34(6):77-79.

收稿日期:2019-11-05