

# Experimental Study on Road Performance of Sintered Red Mud by Compound Modification

Xu Wang<sup>1</sup>, Youhu Gao<sup>2</sup>, Hongguang Jiang<sup>1\*</sup>, Yuanpei Chen<sup>2</sup>, Ming Liang<sup>1</sup>, Zhanyong Yao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

<sup>2</sup>Qilu Transportation Development Group Co. Ltd., Jinan Shandong

Email: <sup>1</sup>hongguang\_jiang@sdu.edu.cn

Received: Feb. 19<sup>th</sup>, 2020; accepted: Mar. 5<sup>th</sup>, 2020; published: Mar. 12<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

This paper introduced the dealkalization agent, cement and quicklime to modify sintered red mud. The compaction characteristics, alkalinity and unconfined compressive strength of the sintered red mud at different mix proportions were studied, and the road performance and environmental impact were evaluated. Results showed that, compared with the sintered red mud modified by dealkalization agent only, the optimum moisture contents of the compound modified red mud reduced by 4%~6%, and the maximum dry density increased by 0.01~0.015 g/cm<sup>3</sup>. Cement had more significant effects on compaction performance, PH value and unconfined compressive strength than quicklime. According to the specification of class IV groundwater, *i.e.*, PH value  $\leq 9.0$ , the optimal mix proportion of the compound modified red mud was proposed as 4% dealkalization agent, 4% cement and 2% quicklime. The unconfined compressive strength of the compound modified red mud increased to more than 1.2 MPa, which met the strength requirement of the roadbed filling in highway.

## Keywords

Sintered Red Mud, Compound Modification, Dealkalization, Unconfined Compressive Strength, PH Value, Subgrade Filling

# 烧结法赤泥复合改性路用性能研究

王旭<sup>1</sup>, 高有湖<sup>2</sup>, 蒋红光<sup>1\*</sup>, 陈元培<sup>2</sup>, 梁明<sup>1</sup>, 姚占勇<sup>1</sup>

<sup>1</sup>山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

<sup>2</sup>齐鲁交通发展集团有限公司, 山东 济南

Email: <sup>1</sup>hongguang\_jiang@sdu.edu.cn

收稿日期: 2020年2月19日; 录用日期: 2020年3月5日; 发布日期: 2020年3月12日

\*通讯作者。

## 摘要

本文采用脱碱剂、水泥与生石灰对烧结法赤泥进行了复合改性。对不同配合比下的烧结法赤泥击实特性、脱碱性和无侧限抗压强度进行了室内试验研究,评价了复合改性烧结法赤泥的路用性能与环境影响。试验结果表明,与单掺脱碱剂改性的烧结法赤泥相比,复合改性烧结法赤泥的最佳含水率降低4%~6%,最大干密度提高0.01~0.015 g/cm<sup>3</sup>。相较于生石灰,水泥对烧结法赤泥的击实性能、PH值、无侧限抗压强度的影响更为显著。根据IV类地下水PH值低于9.0的限值,优化复合改性剂配比为:4%脱碱剂+4%水泥+2%石灰。复合改性后烧结法赤泥的无侧限抗压强度在1.2 MPa以上,满足高速公路路床区填料的强度要求。

## 关键词

烧结法赤泥, 复合改性, 脱碱, 无侧限抗压强度, PH值, 路基填筑

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

赤泥是铝工业在生产氧化铝时产生的固体废弃物,每生产1吨氧化铝便伴随有0.6~2.5吨的赤泥排放[1]。根据生产工艺的不同,赤泥可分为烧结法赤泥、拜耳法赤泥和联合法赤泥。我国是世界上第四大的氧化铝生产国,据统计,截至2017年我国赤泥堆存量已达3.5亿吨[2],其中拜耳法赤泥占65%,烧结法赤泥与联合法赤泥占35%。大面积堆存的赤泥不仅占用了大量土地资源,同时对周围环境产生了严重污染。目前,对赤泥的综合利用主要有有价金属回收、赤泥烧制砖、制备水泥熟料和吸附材料等[3][4][5][6][7],但利用率很低,不足5%。如何实现赤泥的大规模利用,是当前亟需解决的问题。

孙兆云[8]采用石灰、水泥、磷石膏与高分子改性剂对拜耳法进行复合改性,评价了复合改性赤泥的力学特性、重金属离子浸出特性。李卓智[9]采用正交试验研究了石灰-粉煤灰比例、二灰掺量与拜耳法赤泥种类对二灰稳定赤泥的击实特性、无侧限抗压强度、低温性能的影响,并揭示了二灰稳定拜耳法赤泥的强度形成机理。Panda等[10]采用微生物降解拜耳法赤泥,结果表明拜耳法赤泥经微生物降解后其PH值可降低至7.5,同时其CBR值明显提高。Kushwaha[11]提出经6%生石灰和2%石膏改性的拜耳法赤泥,CBR值可提高300%~940%,无侧限抗压强度可提高193%~668%。Reddy和Kishan[12]研究了盐酸与氯化钠改性拜耳法赤泥的击实与压缩特性,结果表明盐酸与氯化钠改性可提高拜耳法赤泥的最大干密度,同时降低其最佳含水率。Rout等[13]研究了粉煤灰改性拜耳法赤泥的颗粒级配、压实特性、三轴剪切特性与分散性能的改性效果,同时采用有限元分析了拜耳法赤泥路基的稳定性与动态荷载下的力学特性。冯燕博[14]研究了烧结法赤泥与拜耳法赤泥1:1混合材料的力学特性及其随脱水龄期的变化规律,研究发现混合赤泥中烧结法赤泥具有较高的活性,可发生水化反应生成水硬性的胶结矿物。但是,由于拜耳法赤泥的重金属含量较高,限制了其进一步的大规模利用。

烧结法赤泥含有大量活性矿物及其水化、碳化产物,具有一定的水硬活性,许多学者针对烧结法赤泥路用技术开展了相关研究。梁乃兴等[15]采用粉煤灰和石灰稳定烧结法赤泥进行了试验路填筑,改性后

的烧结法赤泥可达到高等级公路基层强度标准。齐建召等[16]进行了二灰稳定烧结法赤泥用作道路基层的研究, 7 d 和 28 d 无侧限抗压强度分别可达到 2.0 MPa 和 3.0 MPa。陈凡[17]发现随着烧结法赤泥堆存时间的延长, 制备的烧结法赤泥基层材料的路用性能更好。梁旭等[18]研究了水泥烧结法赤泥稳定级配碎石混合料的无侧限抗压强度、早期劈裂抗压强度、回弹模量、抗冻性及其固化机理, 试验结果表明水泥烧结法赤泥稳定级配碎石均优于传统水泥稳定级配碎石混合料, 混合料中烧结法赤泥最佳掺量为 10%~16%。可见, 目前关于赤泥在道路工程上的应用研究主要集中于赤泥基本物理化学特性、改性赤泥基层材料以及改性赤泥路用性能等方面, 但对制约烧结法赤泥大规模路用的脱碱控制研究较少。为解决烧结法赤泥高碱性和路基填筑问题, 本文采用脱碱剂、水泥与石灰对烧结法赤泥进行复合改性, 试验研究了复合改性烧结法的击实特性、PH 值与无侧限抗压强度, 评价复合改性烧结法赤泥的路用性能与脱碱特性, 为烧结法赤泥在道路路基填筑中的大规模应用提供技术支持。

## 2. 试验材料与配合比

### 2.1. 试验原材料

试验用烧结法赤泥取自山东省淄博市中国铝业山东分公司烧结法赤泥堆场, 其基本物理特性与如表 1 所示。由表 1 可知烧结法赤泥具有较强的吸水性, 液限高达 75%, 最佳含水率为 42.03%, 但烧结法赤泥最大干密度明显低于路基常规填土, 仅为 1.252 g/cm<sup>3</sup>, 大约是粉质黏土的 65%; 同时烧结法赤泥具有很高的承载力, CBR 值高达 70%。这是因为烧结法赤泥在堆存过程中, 活性硅酸二钙发生水化与碳化作用, 形成了强度较高的骨架结构与颗粒内部发达的网状微孔, 导致烧结法赤泥比表面积较大、孔隙率很高、颗粒硬度大, 宏观表现为烧结法赤泥吸水性强、干密度低、承载力高。

Table 1. Basic physical properties of RM

表 1. 烧结法赤泥基本物理特性

天然含水率%	液限 $\omega_L$ /%	塑限 $\omega_p$ /%	塑性指数 $I_p$
30.14	75.24	53.18	22.06
最大干密度 g/cm <sup>3</sup>	最佳含水率%	PH 值	CBR/%
1.252	42.03	13	70.14

烧结法赤泥 PH 值高达 13, 高于《危险固废鉴别标准通则(GB 5085.7-2019)》与《地下水质量标准(GB/T 14848-2017)》中规定的 PH 限值, 为避免烧结法赤泥在路基填筑后对周围环境产生较大的碱性污染, 应对烧结法赤泥进行脱碱处理。脱碱剂为粉状高价阳离子活性剂, 可通过离子交换作用改变烧结法赤泥的离子环境, 从而有效降低烧结法赤泥的 PH 值, 改善烧结法赤泥的击实性能。脱碱剂对烧结法赤泥的改性效果见图 1 与图 2。由图 1 可见脱碱剂对烧结法赤泥的脱碱效果存在一定的局限性, 当脱碱剂掺量低于 4%, 随着脱碱剂掺量的提高, 烧结法赤泥的 PH 值明显降低; 当脱碱剂掺量为 4% 时, 烧结法赤泥的 PH 值降低至 10.5, 但仍高于《地下水质量标准》中不高于 9.0 的限值; 当脱碱剂的掺量高于 4% 时, 随着脱碱剂掺量的提高, 烧结法赤泥的 PH 值无明显变化。脱碱剂对烧结法赤泥击实特性的影响如图 2 所示, 与原状烧结法赤泥相比, 4% 脱碱剂掺量的烧结法赤泥最佳含水率可降低 2.5%, 而最大干密度无明显变化。

### 2.2. 试验配合比

由于单掺脱碱剂的改性效果有限, 故采用水泥与生石灰进行复合改性。水泥与生石灰作为常用的水硬性胶凝材料, 可通过水化作用产生大量的胶凝产物, 烧结法赤泥经水泥石灰改性后, 赤泥微观颗粒表

面的微孔可被水泥石灰水化产生的胶凝产物堵塞, 从而降低烧结法赤泥中可溶性碱的溶出面积, 同时水泥石灰的凝结硬化作用可显著改善烧结法赤泥的击实性能与力学强度。试验用水泥为 P42.5 硅酸盐水泥, 生石灰为一级生石灰, 有效活性氧化钙与氧化镁含量为 97.56%。配合比设计时先依据单掺脱碱剂改性试验结果, 确定脱碱剂掺量为 4%, 然后设计水泥掺量分别为 2%、3%、4%、5%, 生石灰掺量分别为 1%、2%、3%, 共计 13 组配合比, 以上各材料掺量均为烧结法赤泥的干质量比例。

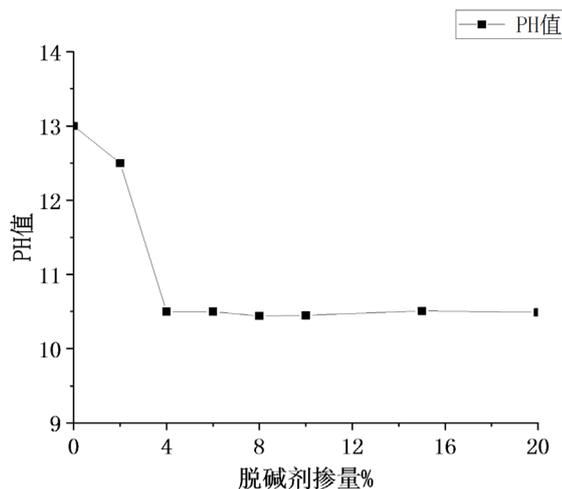


Figure 1. PH value of RM with different dealkalization agent contents

图 1. 不同脱碱剂掺量下烧结法赤泥的 PH 值

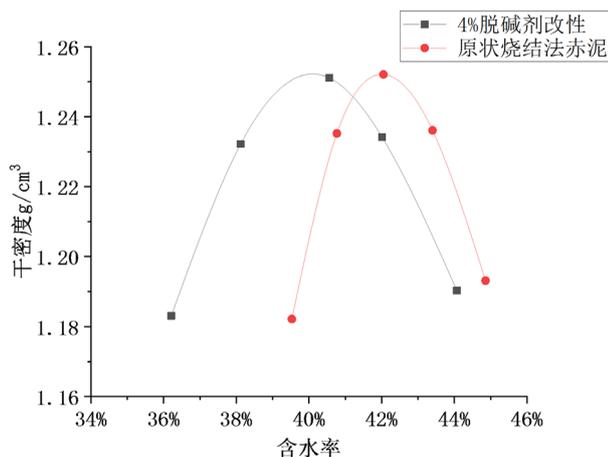


Figure 2. Compaction curve of RM with 4% dealkalization agent content

图 2. 4%脱碱剂掺量时烧结法赤泥击实曲线

烧结法赤泥复合改性配合比设计见表 2。试验过程中首先依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程(JTG E51-2019)》进行击实试验, 确定每组配比的最佳含水率与最大干密度。然后按照 96%的压实度采用静压方法制作 50 mm × 50 mm 圆柱体试件, 每组配比制作 22 个, 其中 14 个试件用于浸水无侧限抗压强度试验, 8 个用于 PH 值测试。试件制作完成后置于恒温恒湿养护箱内养护, 分别在养护 7 d 与 28 d 时取出试件进行浸水无侧限抗压强度试验与 PH 值测试。在 PH 值测试时, 考虑到烧结法赤泥经压实与改性固化后, 在路基中服役时应为固化的块体状态, 烧结法赤泥路基在受毛细水与降水作用而发生碱性物质溶出时应考虑其整体性, 为此在 PH 值试验中, 分别测试了完整试件与破碎试件的 PH 值。试样制备时

取完整试件与破碎试件置于塑料试样瓶内,按照 5:1 液固比称取适量蒸馏水加入瓶中,震荡 3 min 后,分别测试试样在静置 0.5 h 与 2 d 时的 PH 值。

**Table 2.** Mix proportions of compound modified RM  
**表 2.** 复合改性烧结法赤泥配合比

编号	样品配比	水泥	生石灰
1	赤泥 + 4%脱碱剂	0%	0%
2	赤泥 + 4%脱碱剂 + 2%水泥 + 1%石灰		1%
3	赤泥 + 4%脱碱剂 + 2%水泥 + 2%石灰	2%	2%
4	赤泥 + 4%脱碱剂 + 2%水泥 + 3%石灰		3%
5	赤泥 + 4%脱碱剂 + 3%水泥 + 1%石灰		1%
6	赤泥 + 4%脱碱剂 + 3%水泥 + 2%石灰	3%	2%
7	赤泥 + 4%脱碱剂 + 3%水泥 + 3%石灰		3%
8	赤泥 + 4%脱碱剂 + 4%水泥 + 1%石灰		1%
9	赤泥 + 4%脱碱剂 + 4%水泥 + 2%石灰	4%	2%
10	赤泥 + 4%脱碱剂 + 4%水泥 + 3%石灰		3%
11	赤泥 + 4%脱碱剂 + 5%水泥 + 1%石灰		1%
12	赤泥 + 4%脱碱剂 + 5%水泥 + 2%石灰	5%	2%
13	赤泥 + 4%脱碱剂 + 5%水泥 + 3%石灰		3%

### 3. 试验结果与分析

#### 3.1. 击实试验

为分析生石灰与水泥掺量对烧结法赤泥击实性能的影响规律,图 3 与图 4 中分别绘制了生石灰与水泥掺量变化时复合改性烧结法赤泥的击实曲线。由图 3 可知,生石灰对烧结法赤泥的最佳含水率具有较好的降低作用,与单掺 4%脱碱剂的烧结法赤泥相比,掺加生石灰的复合改性烧结法赤泥的最佳含水率可降低 1%~4%;随着生石灰掺量的提高,烧结法赤泥的最佳含水率逐渐降低;同时生石灰对烧结法赤泥的最大干密度无明显影响,不同生石灰掺量复合改性烧结法赤泥的最大干密度基本接近。这主要是由于烧结法赤泥中含有大量的游离 Na、K 离子,这些游离离子具有较强的吸水性,而生石灰水化产生的大量  $\text{Ca}^{2+}$  可通过置换作用降低烧结法赤泥中游离离子的浓度,从而降低烧结法赤泥的最佳含水率,改善其击实性能。

由图 4 可知,水泥掺量对复合改性烧结法赤泥的击实性能影响较大,随着水泥掺量的提高,复合改性烧结法赤泥的最佳含水率逐渐降低,最大干密度逐渐提高,当水泥掺量由 2%提高至 5%时,复合改性烧结法赤泥的最佳含水率降低了 1.9%~3.5%,最大干密度提高了 0.007~0.01  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。与生石灰作用相似,水泥在水化过程中可结合置换烧结法赤泥中的游离离子,同时水泥具有较高的细度,可有效填充烧结法赤泥颗粒间的孔隙,从而起到提高最大干密度的作用。总体上,与单掺脱碱剂改性的烧结法赤泥相比,复合改性烧结法赤泥的击实性能明显改善,最佳含水率可降低 1%~4%,最大干密度可提高 0.01~0.015  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,同时水泥与石灰的掺加提高了烧结法赤泥在非最佳含水率(最佳含水率 $\pm 2\%$ )条件下的干密度。

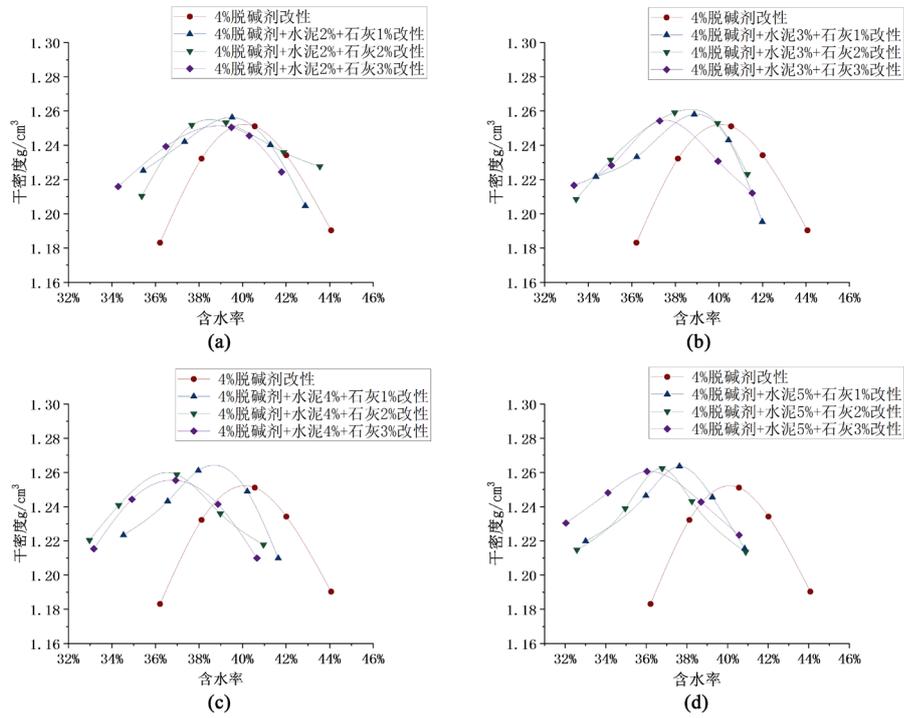


Figure 3. Effect of cement content on compaction performance of compound modified RM. (a) 2% cement content; (b) 3% cement content; (c) 4% cement content; (d) 5% cement content

图 3. 水泥掺量对复合改性烧结法赤泥击实性能的影响。(a) 2%水泥掺量; (b) 3%水泥掺量; (c) 4%水泥掺量; (d) 5%水泥掺量

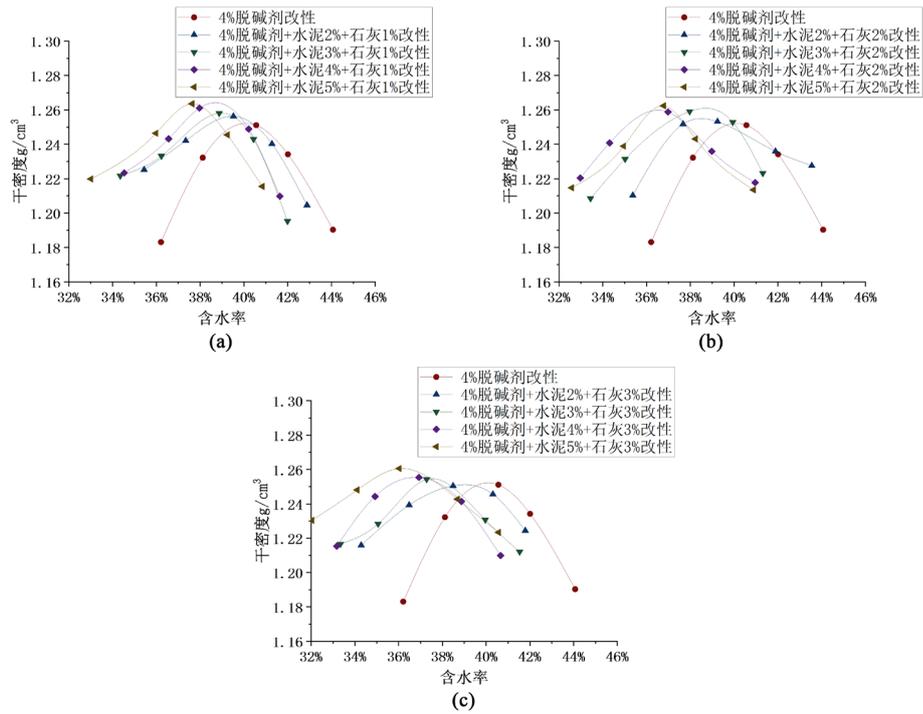


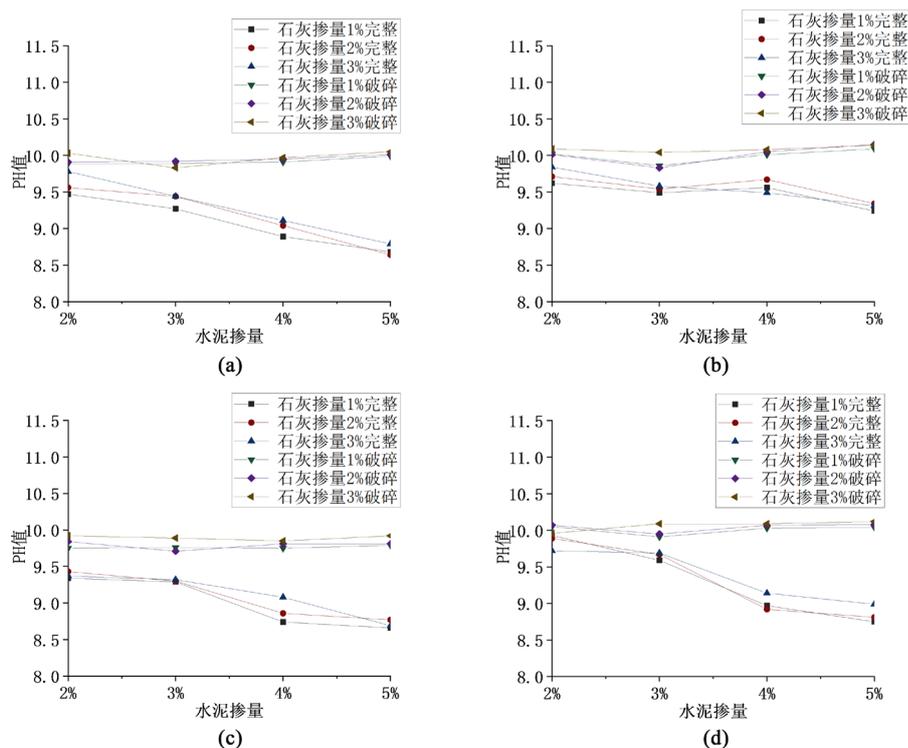
Figure 4. Effect of lime content on compaction performance of compound modified RM. (a) 1% lime content; (b) 2% lime content; (c) 3% lime content

图 4. 石灰掺量对复合改性烧结法赤泥击实性能的影响。(a) 1%石灰掺量; (b) 2%石灰掺量; (c) 3%石灰掺量

### 3.2. PH 值测试

复合改性烧结法赤泥 PH 值测试结果如图 5 所示。可见, 破碎试件的 PH 值明显高于完整试件。在完整试件的 PH 值测试结果中, 随着水泥掺量的增加, 试件的 PH 值逐渐降低, 在试件浸泡时间为 0.5 h 时, 4% 水泥掺量下养护龄期为 7 d 与 28 d 的试样 PH 值均可降低至 9.0 以下; 而试样在浸泡 2 天后, 养护龄期为 7 d 的试件 PH 值明显升高, 28 d 的试样 PH 值无明显变化; 与水泥的作用相比, 石灰对复合改性烧结法赤泥 PH 值的影响较小。在养护龄期为 7 d 时, 复合改性烧结法赤泥试件中水泥未完全反应, 水泥水化产生的氢氧化钙在试件破碎后大量溶出, 从而导致试样的 PH 值升高, 但升高幅度不大。而随着养护时间的延长, 由于烧结法赤泥中的碱性物质与脱碱剂对水泥水化具有促进作用, 养护龄期为 28 d 时, 复合改性烧结法赤泥中的水泥已充分反应, 因此试样破碎时 PH 值变化不明显。而与水泥不同, 生石灰主要水化产物为氢氧化钙, 会参与水泥水化与脱碱剂反应, 对于烧结法赤泥颗粒微孔作用较小, 因此石灰对烧结法赤泥的 PH 值影响较小, 甚至会略微提高烧结法赤泥的 PH 值。

在破碎试件的 PH 值测试结果中, 随着水泥掺量的增加, 试样的 PH 值略有升高。同样, 石灰对破碎试样的 PH 值有也提高作用, 但作用较小; 浸泡 2 d 试样的 PH 值与浸泡 0.5 h 的试样相近。这主要是因为试件的破碎增大了烧结法赤泥的比表面积, 其中的碱性物质的溶出面积增大, 水泥与生石灰水化作用产生的氢氧化钙等碱性物质未完全参与反应, 在浸泡过程中复合改性烧结法赤泥中的碱快速溶出, 在破碎试件浸泡 0.5 h 后, 试件中的可溶性碱性物质已基本完全溶出, 因此随着浸泡时间的延长, 试样的 PH 值不再继续升高。依据《地下水质量标准(GB/T 14848-2017)》中规定, 可用于工农业与生活饮用水的 IV 类地下水 PH 值应小于 9.0, 因此优化复合改性剂配比为: 4% 脱碱剂 + 4% 水泥 + 2% 石灰。



**Figure 5.** PH value testing results. (a) Specimens preserved for 7 d and soaked for 0.5 h; (b) Specimens preserved for 7 d and soaked for 2 d; (c) Specimens preserved for 28 d and soaked for 0.5 h; (d) Specimens preserved for 7 d and soaked for 2 d

**图 5.** PH 值试验结果。(a) 养护 7 d 试件浸泡 0.5 h; (b) 养护 7 d 试件浸泡 2 d; (c) 养护 28 d 试件浸泡 0.5 h; (d) 养护 28 d 试件浸泡 2 d

### 3.3. 复合改性烧结法赤泥无侧限抗压强度试验

复合改性烧结法赤泥无侧限抗压强度试验结果如图 6 所示。可见，复合改性烧结法赤泥具有较高的无侧限抗压强度，高达 0.9~1.9 Mpa。复合改性烧结法赤泥的力学强度主要来源于两个方面，一方面烧结法赤泥本身具有较为稳定的多孔微观颗粒结构，具有较高的力学强度；另一方面复合改性剂可通过水化与凝结硬化作用对烧结法赤泥颗粒进行胶结固化，同时烧结法赤泥颗粒具有较高的粗糙度，可与复合改性剂水化产生的硅酸盐凝胶牢固结合，这也一定程度上提高了复合改性剂对烧结法赤泥的固化作用。

水泥对复合改性烧结法赤泥的无侧限抗压强度具有明显的提高作用，随着水泥掺量的提高，复合烧结法赤泥的无侧限抗压强度近似呈线性增长，当水泥掺量由 2% 提高至 5% 时，复合改性烧结法赤泥的无侧限抗压强度可提高 0.6~0.9 MPa；而与水的作用相比，生石灰对复合改性烧结法的无侧限抗压强度的影响呈现较大的离散性。养护龄期对无侧限抗压强度的增长作用表现出对水泥掺量较大的依赖性，在水泥掺量较低时，随养护龄期的延长复合改性烧结法赤泥的无侧限抗压强度无明显增长，随着水泥掺量的增加，养护龄期对强度的增长作用愈加明显。这可能是因为在复合改性烧结法赤泥体系中，硅酸盐凝胶的主要来源是水泥，而烧结法赤泥由于自身颗粒特性与硅酸盐凝胶结合情况较好，水泥水化产生的硅酸盐凝胶可有效堵塞烧结法赤泥颗粒中的微孔，同时在烧结法赤泥颗粒间起到胶结固化作用，因此水泥可明显提高烧结法赤泥的力学强度；而生石灰主要作用于烧结法赤泥的可溶性碱与游离离子，无法改变烧结法赤泥颗粒的微孔结构，对烧结法赤泥的强度提高效果低于水泥。在保证改性烧结法赤泥 PH 值满足 IV 类地下水的要求下，复合改性后烧结法赤泥的无侧限抗压强度在 1.2 MPa 以上，可满足高速公路路床区填料的强度要求。

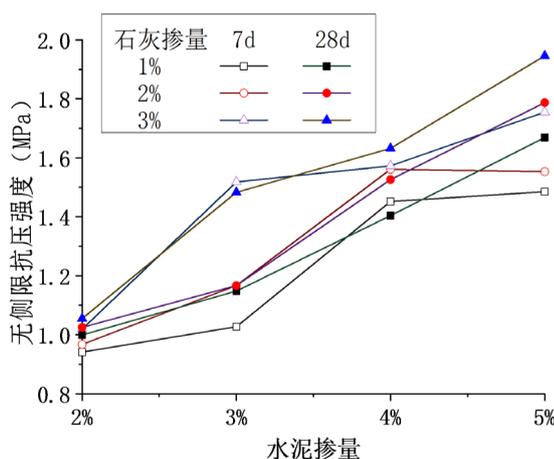


Figure 6. Unconfined compressive strength testing results

图 6. 无侧限抗压强度试验结果

## 4. 结论

- 1) 烧结法赤泥具有液塑限高、干密度低、承载力高的物理力学特性；同时，烧结法赤泥具有强碱性，PH 值高达 13，需脱碱处理后方可用于路基填筑。
- 2) 水泥与生石灰可有效改善复合改性烧结法赤泥的击实性能。随着水泥掺量的增加，复合改性烧结法赤泥的最佳含水率逐渐降低，最大干密度增大；生石灰可降低复合改性烧结法赤泥的最佳含水率，但对最大干密度影响较小。
- 3) 影响复合改性烧结法赤泥 PH 值的主要因素有压实作用、水泥与生石灰掺量、浸出时间与养护龄

期, 其中水泥的固碱作用最为显著。根据 IV 类地下水 PH 值低于 9.0 的限值, 优化复合改性剂配比为: 4%脱碱剂 + 4%水泥 + 2%石灰。

4) 复合改性烧结法赤泥的无侧限抗压强度高达 0.9~1.9 MPa。当水泥掺量不低于 4%时, 复合改性烧结法赤泥的无侧限抗压强度均在 1.2 MPa 以上, 满足高速公路路床区填料强度要求。

## 基金项目

教育部博士后科学基金(2016M590636), 山东省交通厅科技发展计划(2016B20、2019B47\_1), 山东大学青年学者未来计划资助。

## 参考文献

- [1] Liu, W.C., Yang, J.K. and Xiao, B. (2009) Review on Treatment and Utilization of Bauxite Residues in China. *International Journal of Mineral Processing*, **93**, 220-231. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.08.005>
- [2] 何艺, 温雪峰, 罗庆明, 岳战林, 胡华龙. 我国赤泥环境管理现状分析[J]. 环境与可持续发展, 2013, 38(6): 43-46.
- [3] 王璐, 郝彦忠, 郝增发. 赤泥中有价金属提取与综合利用进展[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(8): 1697-1710.
- [4] 巨少华, 卢帅丹, 彭金辉, 张利波, C. Srinivaskannan, 郭胜惠, 李玮. 采用水泥制粒的赤泥脱除水溶液中的镉离子[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2012, 22(12): 3140-3146.
- [5] 王维, 刘伟, 张鹏飞, 逯峙, 朱光. 原料粒径与成分对赤泥/钢渣陶瓷材料结构与性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2015, 20(5): 789-794.
- [6] 王晓, 张磊, 罗忠涛, 杨久俊. 赤泥对道路硅酸盐水泥性能和矿物组成的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(5): 774-779.
- [7] 肖慧霞, 徐美玲, 李风海, 刘全润. 赤泥综合利用的研究进展[J]. 应用化工, 2015(10): 1930-1933.
- [8] 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]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2017.
- [9] 李卓智. 道路工程应用拜耳法赤泥的路用性能与强度机理研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2018.
- [10] Panda, I., Jain, S., Das, S.K. and Jayabalan, R. (2017) Characterization of Red Mud as a Structural Fill and Embankment Material Using Bioremediation. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **119**, 368-376. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.11.026>
- [11] Kushwaha, S.S. and Kishan, D. (2016) Stabilization of Red Mud by Lime and Gypsum and Investigating Its Possible Use in Geo-Environmental Engineering. *Geo-Chicago*, **2016**, 978-988. <https://doi.org/10.1061/9780784480144.097>
- [12] Reddy, N.G. and Hanumantha, R.B. (2018) Compaction and Consolidation Behaviour of Untreated and Treated Waste of Indian Red Mud. *Geotechnical Research*, **5**, 106-121. <https://doi.org/10.1680/jgere.18.00005>
- [13] Rout, S., Sahoo, T. and Das, S.K. (2012) Utility of Red Mud as an Embankment Material. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, **6**, 1645-1651.
- [14] 冯燕博, 刘东燕, 刘芳语, 刘伟, 韩滕滕. 混合赤泥胶结特性产生机制及对其力学特性的影响试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 49-56.
- [15] 梁乃兴, 张登良, 颜祖兴. 水泥赤泥混凝土路用性能研究[J]. 中国公路学报, 1996(2): 6-11.
- [16] 齐建召, 杨家宽, 王梅, 肖波, 侯健. 赤泥做道路基层材料的试验研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(6): 30-33.
- [17] 陈凡. 不同年份赤泥路面基层材料性能比较及强度机理[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [18] 梁旭, 梁乃兴, 曾建民, 梅迎军, 于伟. 水泥赤泥稳定级配碎石基层的性能研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(6): 1086-1089.