

摘 要

赤泥是氧化铝生产过程中排放量很大的废渣，赤泥在堆放过程中除占用大量土地外，还对自然环境造成严重污染，对赤泥的综合利用则成为了炼铝工业一项急待解决的难题。

本文提出了赤泥在公路中的两项应用措施技术：水泥石灰赤泥稳定土底基层和水泥赤泥稳定级配碎石基层。通过查阅大量文献，掌握有关该问题的国内外研究动态，进行大量的试验，研究了材料组成及配合比对水泥石灰赤泥稳定土底基层、水泥赤泥稳定级配碎石基层路用性能的影响，分析了强度形成机理，提出了原材料技术性能要求、推荐配合比组成、施工工艺等，并对赤泥应用于公路不同结构层的经济性进行了对比分析。

研究认为，对于水泥石灰赤泥稳定土混合料，赤泥的掺入提高了混合料早期抗压强度，并能有效减少混合料的干缩变形；赤泥最佳掺量为 10~20%，水泥、石灰宜采用等比例，且总掺量不应少于 10%。对水泥赤泥稳定级配碎石，赤泥的掺入后混合料早期抗压强度发展较快，后期抗压强度增幅逐步减缓；赤泥最佳掺量为水泥掺量的 1~2 倍。

在材料性能满足规范要求的情况下，与传统的材料相比，水泥石灰赤泥稳定土底基层和水泥赤泥稳定级配碎石基层具有明显的经济效益和社会效益。赤泥做为道路材料的开发与应用，对工业废渣利用，保护环境具有重要的意义，对推动我国公路建设的发展起着积极的作用。

关键词：赤泥；水泥石灰赤泥稳定土底基层；水泥赤泥稳定级配碎石基层；路用性能；强度形成机理；经济性

ABSTRACT

Red mud is the largest waste of aluminum production, it takes the massive lands in the stack process, but also has caused the serious pollution to the natural environment. The comprehensive utilization of red mud is an urgently difficult problem to the aluminum metallurgy industry.

This project proposed two application measure technologies about the utilization of red mud on highway, there are named cement lime and red mud stabilized clay sub base, cement and red mud stabilized crushed stone base course. Through a large number of reference, this paper has grasped the domestic and oversea researching situation. By massive experiments and analysis of theory, the material composition and the mixture ratio to the road performance has studied when red mud utilized in the sub base, in the base course. The strength mechanisms are analyzed at the same time. Based on the above analysis, the raw material technical performance request, the recommendation mixture ratio composition and the construction technique are proposed, and the economic analysis are acquired when the red mud apply in different pavement structure level.

The following results are gained though this project. (1) Regarding the cement lime and red mud stabilized clay sub base, the compressive strength development is quicker at the early stage, later period the compressive strength increased range gradually slows down. The best dosage of red mud is 10%~20%, and the cement, the lime should better intermingle at the same proportion. (2) To the cement red mud stable crushed stone base course, after the red mud mixes into the blend compressive strength development to be quicker at early time, later period the compressive strength increased range gradually slows down. The best dosage of red mud is 1~2 times of cement.

Satisfies the standard request in the material performance in the situation, compares with the traditional material, the cement lime and red mud stabilized clay sub base and the cement red mud stable crushed stone base course cement red mud concrete have the obvious economic efficiency and the social efficiency. In addition, it's very important to study red mud as road materials for reusing the industry waste residue and environmental protection. This research will be helpful in forwarding the development of highway in our country.

KEY WORDS: red mud; cement lime and red mud stabilized clay sub base; cement and red mud stabilized crushed stone base course; road performance; formation mechanism of intensity; economical efficiency

重庆交通大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：梁旭

日期：2009年4月12日

重庆交通大学学位论文授权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权重庆交通大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本人学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并进行信息服务（包括但不限于汇编、复制、发行、信息网络传播等），同时本人保留在其他媒体发表论文的权利。

学位论文作者签名：梁旭

日期：2009年4月12日

指导教师签名：

日期：2009年4月12日

本人同意将本学位论文提交至中国学术期刊（光盘版）电子杂志社 CNKI 系列数据库中全文发布，并按《中国优秀博硕士学位论文全文数据库出版章程》规定享受相关权益。

学位论文作者签名：梁旭

日期：2009年4月12日

指导教师签名：

日期：2009年4月12日

第一章 概述

1.1 研究背景

1.1.1 赤泥

赤泥是氧化铝生产过程中排放量很大的废渣，由于赤泥结合的化学碱难以脱除且含量大，又含有氟、铝及其他多种杂质等原因，对于赤泥的无害化利用一直难以进行。多年来世界各国专家对赤泥的综合利用进行了大量的科学研究，但此类研究进展不大。因此，赤泥废渣的处理和综合利用成为一个世界性的大难题。而目前对赤泥主要采取海底或陆地堆放处置的方法，但随着铝工业的发展，生产氧化铝排出的赤泥量也日益增加，堆存处置所带来的一系列问题随之而出，造成了严重的环境问题。

全世界每年排放赤泥约 6000 万吨，我国每年排出的赤泥量就达 600 万吨，累积赤泥堆存量高达 5000 万吨，而其利用率仅为 15% 左右。赤泥堆存不但需要一定的基建费用，而且占用大量土地，污染环境，并使赤泥中的许多可利用成分得不到合理利用，造成资源的二次浪费，严重的阻碍了铝工业的可持续发展。目前国内氧化铝厂大都将赤泥输到堆场，筑坝湿法堆存，靠自然沉降分离使部分碱液回收利用。另一种方法是将赤泥干燥脱水后堆存，我国的平果铝业公司主要采用干法堆存，虽然减少了堆存量及可增加堆存的高度，但处理成本增加，并仍需占用土地，同时南方雨水充足，也容易造成土地碱化及水系的污染。

赤泥在堆放过程中除了占用大量土地外，还由于赤泥中的化学成分入渗土地易造成土地碱化、地下水污染，人们长期摄取这些物质，必然会影响身体健康。赤泥的主要污染物为碱、氟化物、钠及铝等，其含量较高，超过了国家规定的排放标准。

由于赤泥中含有大量的强碱性化学物质，稀释 10 倍后其 pH 值仍为 11.25~11.50（原赤泥为 12 以上），极高的 pH 值决定了赤泥对生物和金属、硅质材料的强烈腐蚀性。高碱度的污水渗入地下或进入地表水，使水体 pH 值升高，以致超出国家规定的相应标准，同时由于 pH 值的高低常常影响水中化合物的毒性，因此还会造成更为严重的水污染。如此高碱度的赤泥附液进入水体，其污染不言而喻，赤泥对生态环境的不良影响必须给予高度的重视和认真的研究。

1.1.2 赤泥综合利用的概况

堆存量不断增大的赤泥所造成的越来越严重的环境污染，已使赤泥综合利用

成为了炼铝工业一项急需解决的难题。科技工作者们对此进行了长期的研究和探索,并一直延续至今,先后取得了一系列成果。对赤泥的综合利用,主要包括两个方面的工作:一是提取赤泥中的有用组分,回收有价金属。二是将赤泥作为一般矿物原料,整体加以利用。随着我国对环保问题的日益重视,近年来关于赤泥综合利用的研究再次成为热点。在前人试验探索的基础上,有关铝厂进一步完善以工业应用为主的生产工艺,各高等院校也纷纷开展这方面的基础技术与理论探讨,在赤泥应用上取得了可喜的进展。用脱碱赤泥生产水泥,赤泥生产粉煤灰砖、赤泥釉面砖、赤泥作矿井填充料,以及赤泥在塑料行业的应用都有了较大的进展。但是,由于赤泥用量较小而且由于成本及工艺的问题一直没有大规模的用于生产实践。

将大量堆弃无用的工业废渣制备成高价值的道路材料,关键是研究和采用相适应的固化技术与筑路工艺,使之满足道路设计所要求的国家标准。该项技术具有广阔的市场前景,是环保与基础建设的完美结合,将使赤泥综合利用达到一个新的阶段。河南省交通科研所^[1]较早开展了赤泥筑路的技术性能和综合效益的研究,主要进行了赤泥混合料基层和赤泥粉煤灰混凝土的室内配合比实验和室外300m实验路段实验;北京矿冶研究总院^[2, 3]利用平果铝拜耳法赤泥完成了300m长的赤泥基层实验路段;此外,颜祖兴^[4]和梁乃兴^[5]等人还开展了用赤泥替代部分水泥作为水泥赤泥混凝土的开发研究,对混凝土路面材料的开发具有一定参考价值;华中科技大学的杨家宽^[6, 7]等人开展赤泥用于道路基层的试验和工程应用的研究。然而赤泥用作道路基层方面的研究目前仍处于起步阶段,还没有十分完善的技术工艺。

1.2 研究目的

郑州绕城公路附近的上街铝厂每年排放有大量的废渣—赤泥,大部分都是设置堆场堆放,利用率很低,这样既浪费良田又污染环境。本课题研究目的主要是围绕如何将废渣赤泥用于郑州绕城公路结构层中,既有利于废渣利用,又能降低公路工程造价。将大量堆弃无用的工业废渣制备成高价值的道路材料,关键是研究和采用相适应的固化技术与筑路工艺,使之满足道路设计所要求的国家标准。

已有资料报道,赤泥与粉煤灰石灰混合形成的混合料,可作为道路基层材料使用,也有报道将赤泥用于水泥混凝土,这些报道均限于探索铝工业废渣赤泥的利用问题。但如何能较好地将工业废渣赤泥应用于道路基层中,以获得性能较好的筑路材料,降低公路修建费用,还没有完善的技术。

为此,本课题通过水泥石灰赤泥稳定土混合料底基层和水泥赤泥稳定级配碎

石混合料基层材料配合比组成、强度形成机理及路用性能展开研究,通过对赤泥在公路中的应用,既达到固化铝厂废渣处理赤泥的目的,又获取优质、低价的筑路材料。

由于赤泥用作道路基层方面的研究目前仍处于起步阶段,还没有成型的技术工艺。因此,本课题进行工业废渣赤泥用于公路中的应用技术研究,有重要的应用价值及明显的经济效益和社会效益,同时对保护环境 also 具有重要的意义。该项技术具有广阔的市场前景,是环保与基础建设的完美结合,将使赤泥综合利用达到一个新的阶段。

1.3 研究的主要内容和技术方案

本课题采用室内试验、理论分析,并依托郑州绕城公路铺筑试验路相结合的研究方法,通过对水泥石灰赤泥土混合料底基层、水泥赤泥级配碎石混合料基层材料组成、承载力特性、施工控制方法,对水泥赤泥级配碎石混合料基层材料配合比组成、路用性能分析及经济性分析等方面的综合分析研究,提出适合于郑州绕城公路的合理的水泥石灰赤泥稳定土底基层、水泥赤泥稳定级配碎石混合料基层材料要求、配合比组成、施工质量控制等路面设计施工技术指标,以解决郑州绕城附近上街铝厂大量工业废渣的利用问题,使工业废渣赤泥能很好的用于郑州绕城公路中,既有利于废渣利用,又能降低公路工程造价。

① 技术方案

1) 调研

a. 科技文献检索

查阅文献,对相关进展进行检索,通过分析整理,了解国内外在赤泥应用于道路工程方面的最新研究成果及动态,以指导研究工作。

b. 收集国内开展此类研究工作的有关的研究报告及研究资料,完善研究内容。

2) 室内试验研究

a. 水泥—石灰—赤泥—土混合料和水泥—赤泥—级配碎石混合料配合比研究。

b. 水泥—石灰—赤泥—土混合料和水泥—赤泥—级配碎石混合料的力学性能研究。

c. 水泥—石灰—赤泥—土混合料和水泥—赤泥—级配碎石混合料的各项路用性能研究。

3) 作用机理分析

根据室内试验结果,分析水泥—石灰—赤泥—土混合料、水泥—赤泥—级配碎石混合料的作用机理,从而指导赤泥在公路工程中的应用。

4) 编写研究报告

② 主要研究内容

1) 赤泥在公路水泥石灰稳定土中的应用技术研究

- a. 水泥—石灰—赤泥—土混合料配合比研究。
- b. 水泥—石灰—赤泥—土混合料路用工程性能研究。
- c. 水泥—石灰—赤泥—土作用机理分析。

2) 赤泥在公路水泥稳定级配碎石中的应用技术研究

- a. 水泥—赤泥—级配碎石混合料配合比研究。
- b. 水泥—赤泥—级配碎石混合料路用工程性能研究。
- c. 水泥—赤泥—级配碎石混合料施工控制研究。
- d. 水泥—赤泥—级配碎石混合料作用机理分析。

3) 赤泥用于公路中的经济性分析

第二章 国内外研究现状

赤泥是冶炼氧化铝的工业废渣,数量很大,每冶炼一吨氧化铝将排放出 1.5~1.7 吨赤泥。据调查全世界年排放赤泥估计在 6000 千万吨以上。如长期堆放而不加以利用,不仅占用大量土地和农田,耗费较多的堆场建设和维护费用,而且存在于赤泥中的剩余碱能向地下渗透,造成地下水污染。此外,晒干的赤泥形成的粉尘到处飞扬,破坏生态环境,造成严重污染。国外有研究学者指出:“铝生产工程最重要的问题是赤泥的处理;赤泥处理问题解决得如何,将关系到铝工业的存亡,这种说法一点也不为过”。赤泥的综合利用问题在国内外都已成为急待解决的重要问题。

上世纪五十年代以来,国内外相继开展了对赤泥的综合利用。目前已经在以下方面得以应用,取得了良好的经济效益。用赤泥生产赤泥硅酸盐水泥^[8,9]、油井水泥^[10,11]、赤泥硫酸盐水泥^[11,12]。据文献^[4]报道,原西德铝业公司从 60 年代末用赤泥作沥青填料;日本和美国用赤泥制造人工轻骨料混凝土,比天然河卵石混凝土强度还高;德国用赤泥生产轻型结构体;英国应用赤泥于陶瓷工业;美国用赤泥生产砖;英国应用赤泥制造氯化钠、盐水苛性钠和工业砖。日本^[13]掺赤泥于沥青混合料路面,改善了沥青路面的使用性能。苏联^[2]用赤泥铺筑了道路基层。赤泥筑路是赤泥综合利用的重要一环,用量大,经济效益和社会效益明显。

国内外对赤泥的研究进展可从以下几个方面进行论述。

2.1 赤泥的物理化学性质研究

南京工业大学的潘志华等人^[14,15]采用山东铝业公司烧结法氧化铝冶炼过程中排出的固体废渣—赤泥为原材料,对赤泥的物理化学性质及其在加热处理中的变化进行了研究。

试验主要采用露天堆场长期放置后的赤泥(称之为陈赤泥)为主要的研究对象,陈赤泥外观均为板结块状,呈棕黄色,赤泥经 110℃烘干 4 小时(充分干燥)之后,再磨细至 0.080mm 方孔筛干法筛余为 3.0%,分别封装备用。

试验通过以下几种方法分析:

①TMS-GC 分析

TMS-GC 分析即为三甲基硅烷化、气相色谱联合测定方法,主要用于测定硅酸盐物质中硅酸盐阴离子的结构,在该试验中用来测定赤泥中硅酸盐阴离子的聚合程度。

②X-射线衍射分析(XRD)

X-射线衍射分析采用日本理学公司出产的 D/max-rB 型 X-射线衍射仪。试验方法为粉末样衍射法, 仪器工作条件为 Cu 靶 Ka 射线, 管电压 40kV, 管电流 100mA。

③综合热分析 (TG-DTA)

综合热分析, 即差热-失重分析, 采用德国 Netzsch 公司制造的 STA449C/6/F 差热-热重分析仪。最高温度 1650℃, 重量灵敏度 0.1 μg, 氮气气氛。

④红外光谱分析 (IR)

红外光谱分析采用美国 Nicolet 公司出产的 Nexus670 富氏变换红外、拉曼光谱仪, 分辨率优于 0.09cm⁻¹, 光谱范围: 12500~50cm⁻¹。

⑤电子显微分析 (TEM/ES, STEM/EDS, SEM/EDS)

电子显微镜观察和分析采用日本日立 (HITACHI) 公司制造的 H-800 分析型扫描透射电子显微镜, 配备美国 KEVEX 公司制造的 Analyst-8000 能谱分析仪。在透射和扫描模式下观察细小赤泥粒子的形貌特征, 并与选区电子衍射分析 (SAED) 与扫描透射环境下的能谱成分分析 (STEM/EDS) 相结合, 确定选定区域物质的相组成及结晶学特征。

通过以上几种方法的分析得出结论如下:

1) 长久露天堆放的陈赤泥中的结晶态物质主要为碳酸钙 (方解石为主, 少量霏石) 和钙钛矿, 还含有相当数量的无定形铝硅酸盐物质。

2) 赤泥属于团聚性物质, 其中的一次粒子尺寸极其细小 (大约为 0.1 μm 数量级)、外形极不规则、化学组成变化不定的颗粒。

3) 赤泥在加热处理过程中, 大约于 600℃之前基本上脱除其中的吸附水和结晶水, 620℃~760℃之间发生碳酸钙分解, 700℃开始 β-C₂S 的形成。

4) 900℃下加热处理后的赤泥中的硅酸盐物质约有 38.59%为单体, 6.68%为二聚体, 3.27%为环三聚体, 其余为高聚体^[14,15]。

华中科技大学杨家宽等人^[6,7]根据 X 射线衍射分析, 认为赤泥的主要矿物组成为 β-C₂S、CaTiO₃、CaCO₃和少量的 α-Fe₂O₃, 同时杨等还研究了堆放时间对赤泥物理化学成分的影响。研究了存放时间为一月、一年、三年和十年以上的赤泥物理化学成分的变化。

研究结果认为, 赤泥随着堆放时间的延长各种成分的变化不大, 新、陈赤泥的主要区别在于前者比后者含有较多的 β-C₂S 和较少的 CaCO₃。

赤泥的活性表现在通常条件下弱的 CaO 水溶性、碱性介质激发下的水化、水解和大气 CO₂作用下的分解作用。经 100℃烘干的赤泥, 在水中随着时间的延长, CaO 溶出量不断增加, 这表明赤泥自身具有微弱的水化活性。自然条件下堆存的赤泥, 随着风化时间的延长, 活性矿物 β-2CaO·SiO₂的量越来越少, 以至没有, 而被大量的 CaCO₃和 Fe₂O₃所取代。灼失量显著增加, 有用成分下降。以高浓度的 CO₂

作用于赤泥,反应初期有少量的 C-S-H 凝胶生成,而 C-S-H 迅速又被炭化,最终生成物为文石和硅胶。 β -2CaO $\cdot$ SiO₂的炭化活化能为 16.9 千卡/克分子,反应过程为放热过程,表明赤泥中的 β -2CaO $\cdot$ SiO₂易于进行炭化发应。赤泥以上特性的表明:赤泥中存在大量的水化速度十分缓慢的而又易被炭化分解的硅酸二钙,在利用其活性制备免烧砖时,应尽量选择高活性组成的工业废弃新鲜赤泥^[6,7]。

2.2 赤泥用于建筑材料方面的研究

①在建筑材料制品中的利用研究

杨爱萍、苏长江等^[16]利用赤泥和粉煤灰,并借助于激发剂的作用制备出性能相当于符合 GB101-93 规定的 100 号-150 号粘土砖的免烧赤泥粉煤灰砖。文献^[17]报导利用赤泥、粉煤灰、煤矸石配料并在 1050-1100℃下煅烧后制得性能相当于 100-150 号粘土砖的烧结赤泥-粉煤灰-煤矸石砖。焦占忠、邢国等^[18]利用赤泥和粉煤灰为原料,采用加压成型方法制得性能相当于 JC239-91 规定的 7.5 级粘土砖。有资料^[19]报导采用赤泥、碱矿渣水泥和膨胀珍珠岩制备轻质墙体材料,在适宜的配合比下抗折和抗压强度分别达到 5.5MPa 和 29MPa。岳云龙^[20]等利用赤泥-碱矿渣水泥-粉煤灰研制免烧砖,原料配比为碱矿渣水泥:赤泥:粉煤灰=60:30:10,实验测得这种免烧砖 7 天后的强度等级达 15 级以上,与普通粘土砖性能相当。文献^[21]介绍,利用赤泥具有颜色的特点,磨细通过 200 目筛后作为筑路填料。还可以将赤泥在 800-1200℃下煅烧破碎后掺入沥青混合料中,用着色混合料作为铺路材料^[22]。文献^[23]用磷石膏和 0.5~5%的赤泥混合,然后在还原气氛下煅烧制得添加剂,这种添加剂能够在正常硬化条件下提高水泥质量。

②利用赤泥生产多种水泥

国内外实践表明,用赤泥可生产出多种型号的水泥^[24~25]。如以烧结法赤泥为原料生产普通硅酸盐水泥,生产该水泥工艺流程和技术条件与一般普通水泥厂基本相同,只是用赤泥代替了粘土,从生产氧化铝工艺中排出的赤泥,经过滤、脱水后,与砂岩、石灰石和铁粉等共同磨制得到生料浆,使之达到技术指标后,用流入法在蒸发机中除去大部分水分,而后在回转窑中煅烧成熟料,加入适量的石膏和矿渣等活性物质,磨至一定细度,即制成水泥产品。根据长期实践,每生产一吨水泥可利用赤泥 400kg,采用湿法工艺生产普通硅酸盐水泥的质量达到普通硅酸盐水泥的国家标准,并具有早强、抗硫酸盐等优越性能^[26]。经工业建筑、机器基础、机场跑道、桥梁等处的使用证明,水泥质量良好。

据文献^[25]介绍,由赤泥、消解石灰、致密化硅灰和石灰石配合磨细可制得建筑水泥,这种水泥不用波特兰水泥作为胶结剂。它的材料配比为,赤泥:石灰石:

消石灰: 硅灰=39.5: 39.5: 14: 7, 28 天强度达到 16.7MPa, 122 天强度达到 18~22MPa, 此后强度还继续增长, 据称这种水泥的抗压强度和耐久性可以和任何一种文献所报道的由混合料所得水泥相媲美。

据文献^[27]报道, 前苏联利用第聂伯铝厂的拜耳法赤泥生产水泥, 生料中赤泥配比可达 14%。日本三井氧化铝公司与水泥厂合作, 以赤泥为铁质原料配入水泥生料, 水泥熟料可利用赤泥 5~20kg/t, 拜耳法赤泥的利用水平比较低; 前苏联以霞石为原料生产氧化铝的沃尔霍夫、阿钦、及卡列夫氧化铝厂已成功利用赤泥生产水泥, 并进行石灰石、赤泥两组分配料试验, 水泥可利用赤泥 629~795kg/t, 为烧结法赤泥的综合利用开辟了有效途径。烧结法生产氧化铝排出的赤泥, 由于碱含量较拜耳法低, 且含有大量的硅酸二钙, 可用来生产高标号水泥和其它建筑材料, 这在山东铝业公司和中国长城铝业公司已见成效。其工艺方法是将洗涤沉降后的赤泥过滤, 将滤饼和石灰石、砂岩等原料混合, 磨成水泥生料, 经回转窑烧成后, 加入活性物质, 可制成 500 号普通硅酸盐水泥^[17]。

山东铝业公司^[28]借鉴苏联经验, 结合自己的研究, 在 60 年代初用赤泥配料生产普通硅酸盐水泥, 至 1997 年共生产水泥 2280 余万吨, 利用赤泥 610 万吨。水泥生料中赤泥配比, 年平均为 20%~38.5%, 水泥的赤泥利用量 200~420kg/t, 排出赤泥的综合利用率 30%~55%。山东铝业公司水泥采用湿法工艺, 洗涤沉降的赤泥经过滤后, 由泥浆泵送入水泥厂, 按预定的配料方案, 与石灰石、砂岩等原料一起加入原料磨磨制成水泥生料。以赤泥配料的熟料和水泥与一般操作方法生产的熟料和水泥相比, 除抗压强度偏低外, 其它性能皆等于或优于一般水泥, 特别是抗折强度、早期抗压强度和抗硫酸盐侵蚀系数方面尤为明显。

张培新^[26]利用赤泥制备硫铝酸盐快硬水泥, 17.48%的赤泥和铝土矿等原料可烧制出 425 号标号的高铁型硫铝酸盐水泥, 具有高强、快硬、微膨胀、耐硫酸盐腐蚀等特点。

据资料^[29]介绍, 利用高铁型赤泥为原料, 再配合适量石灰石, 经 1200~1300℃煅烧, 可研制铁铝酸盐水泥。低、高铁型赤泥, 都可以做为生产硅酸盐水泥的原料。对低铁型赤泥, 配入石灰石和粘土, 以使水泥生料中 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的含量符合指标。如果所用铝土矿的铝硅比为 8 左右, 则每生产一吨氧化铝产生的赤泥可生产 6 吨水泥, 使氧化铝厂成为一个“零排放”工厂, 即工厂不排放赤泥。高铁型赤泥, 如果所用铝土矿的铝硅比为 9, 那么每生产 1 吨氧化铝所产生的赤泥将能生产 7 吨水泥, 从而避免排放赤泥。高铁型的赤泥, 可作为 Fe_2O_3 的资源, 调节水泥生料配料中的 Fe_2O_3 成分配比。

2.3 赤泥用于道路基层

前苏联巴普洛达尔州^[30]的道路建设者为了弥补筑路材料的短缺,对铝土矿残渣——铝厂排出物利用的可能性进行了试验研究。其研究认为,铝土矿渣的矿物主要成分如下:硅酸二钙,磁铁矿、铝酸盐,硅酸铝和其它化合物。铝土矿渣中大量硅酸二钙的存在决定着其粘结性能。在自然状态下,铝土矿渣没有粘结力,也不会凝固。在加压时会出现某些液压特性。细粉状态压实后,短时间内很快达到一定的强度。

巴普洛达尔州工程技术人员在应用铝土矿渣时利用以上特性铺筑了路面基层。1981年建成了2公里长的第一段实验路。设计结构为:石子-砂料基层整平层,厚10cm;贯入法施工的碎石基层,厚15cm;细粒式(3cm)和中粒式(5cm)沥青混凝土路面。试验路段用15cm的铝土矿渣基层代替碎石基层,其它结构层不变。工程在10月份完工,气温为5~10℃,施工工艺简单,用自卸汽车将湿渣运到施工地点,摊平后用18吨轮式压路机碾压10~12遍,密实度达到标准密实度的0.98,再用12吨压路机压平,压实完成后马上摊铺热沥青混凝土路面。试验路建成后6个月内进行了调查。路段目测没有发现任何路面缺陷,从基层取样(10×10cm试件)试验证明,抗压强度为1~1.5MPa。在较低气温条件下,铝土矿渣的硬化十分缓慢,因为矿渣试件在压实后强度随即达到0.5~0.8MPa。

但是,只是用赤泥铺筑基层,运输费用很高,使赤泥的开发利用受到了限制。为此,全苏道路研究所哈萨克分所进行了应用赤泥粘结料的研究。赤泥粘结料是以赤泥为主,掺加其它活性成分经加工而成。活性成分尽量采用不缺乏的廉价材料,主要是工业废渣。经过试验研究,选择了磷石膏作为活性成分,掺加量为10~15%。研究结果证明,添加磷石膏的赤泥粘结料三个月硬化后抗压强度为25.2~33.5MPa,而且随所用磷石膏种类不同凝固或硬化期限也不同。同时,将铝土矿渣磨成粉能大大提高其液压活性(强度达到10~20MPa),从而更有效地利用铝土矿渣。

在国内,华中科技大学杨家宽^[6]等人对二灰稳定赤泥基层的配合比设计,赤泥基层的各项力学性能进行了研究,并铺筑了位于淄博市淄川区,全长4km,宽约15m的试验路验证了室内实验的结果。试验通过重型击实试验、无侧限抗压试验(考虑到赤泥粒径对混合料抗压强度的影响)、冰融稳定性试验、室内间接抗拉强度和抗压回弹模量试验,以及大量的计算得出最佳配合比推荐为:赤泥:粉煤灰:石灰=80:10:10。最后得出结论:二灰稳定赤泥基层之所以能具有较高的强度,是因为二灰结构经化学反应后形成胶结物,具有较高的强度稳定性,是一种气硬性及水硬性材料,需要较多的水分才能碾压成型。二灰赤泥早期强度的形成是硅酸

化作用形成结晶缩合结构,其强度的形成是化学反应、物理-化学反应及物理-力学过程的相互影响和交叉。二灰混合料主要依赖于良好的结晶-缩合结构而获得较高的强度和稳定性。

2.4 水泥赤泥混凝土

颜祖兴、梁乃兴^[31]等研究的水泥赤泥混凝土是以赤泥代替 1/4 水泥用量的赤泥水泥混凝土,强度与对应水泥混凝土强度基本相当,特别是龄期较长时,结果更为接近。28 天当赤泥代替水泥量较多时(代替 1/3 水泥用量),形成的水泥赤泥混凝土与相应水泥混凝土相比较,强度均有相当程度的降低。这种水泥赤泥混凝土的刚度,即弹性模量略低于普通水泥混凝土。温度胀缩系数与普通混凝土相差不大。水泥赤泥混凝土的耐磨性与普通水泥混凝土耐磨性基本相同,但抗渗透性和抗冻性略差。在渗透性及抗冻性要求严格时,可以掺加减水剂改善水泥赤泥混凝土的渗透性与抗冻性。

在钟声^[32]所做的赤泥作为混凝土掺合料的研究中,也是以赤泥取代少量混凝土中的水泥,但同时还掺入部分磨细生石膏。采用细度为 2%的成品赤泥取代混凝土中 15%的水泥,掺入部分磨细生石膏粉,其掺入量分别为赤泥取代水泥量的 0.2, 0.3 和 0.4 倍。结果表明, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的确激发了赤泥的潜在活性。首先在赤泥混凝土中掺入不同量的 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 以后,28 天龄期时,拜耳法赤泥及烧结法赤泥的抗压强度分别达到了基准混凝土的 96.3%和 93%,到 90 天龄期时,有的水泥赤泥混凝土的抗压强度均超过了基准混凝土,并且直至 2 年龄期时,水泥赤泥混凝土强度也都在基准混凝土之上,并未下降。

文献^[32]研究了赤泥超量取代混凝土中水泥对抗压强度的影响。采用赤泥超量取代混凝土中水泥的办法来提高赤泥混凝土的抗压强度,掺量系数分别为 $K=1.2, 1.4, 1.6$, 采用磨细的拜耳法赤泥及烧结法赤泥,细度为 18% (80 目方孔筛筛余量)。结果表明:用赤泥超量取代混凝土中的水泥比等量取代有一定效果,拜耳法赤泥混凝土的早期强度有所提高,但烧结法赤泥混凝土的 7d 龄期强度则几乎没有什么变化,到了后期也增加不大。得到结论是:在使用赤泥取代混凝土中的水泥时,应采用添加剂激发剂或其它外加剂复合使用,若为了改善混凝土拌合物的性能,可采用超量取代法。如掺加激发剂,则赤泥的掺量可提高到 15%。据资料^[33]介绍,热激发可使赤泥的活性大大提高。该原料条件下,赤泥的适宜煅烧温度为 600℃。将 600℃煅烧赤泥(50%)配以矿渣、煤矸石、钢渣以及自配的调节剂生产胶凝材料,可以达到 42.5#水泥强度标准的要求。

张登良、梁乃兴^[34]等人用磨细赤泥代替部分水泥,形成水泥赤泥混凝土具有

较好的物理力学性能和路用性能。通过试验得出如下结论:

①磨细赤泥代替部分水泥,形成水泥细赤泥混凝土,当细赤泥代替水泥用量较合适时,可获得满意的强度;而用粗赤泥(未磨的原状赤泥)代替部分砂形成的水泥粗赤泥混凝土,其抗折强度及抗压强度与水泥混凝土对比试样相比均有较为明显的降低。

②用赤泥代替 1/3 水泥形成的水泥赤泥砂浆的磨耗量与水泥砂浆的磨耗量相当,甚至略低于水泥砂浆的磨耗量。说明水泥赤泥砂浆的耐磨性与标准水泥砂浆的耐磨性相同,甚至略有提高。因而,水泥赤泥混凝土的耐磨性与水泥混凝土的相比也不会因为用赤泥代替部分水泥而降低。

③水泥赤泥混凝土(赤泥代替水泥 1/3)的渗透性要略大于水泥混凝土的渗透性。说明水泥赤泥混凝土中的空隙率要略大于水泥混凝土的空隙率。

④用赤泥代替 1/3 水泥形成的水泥赤泥混凝土,其抗冻性比水泥混凝土的抗冻性仅略有降低,说明赤泥代替部分水泥对水泥混凝土的抗冻性影响不大。

在美国和日本^[30]用赤泥制成球粒状加热至 1200~1316℃生成了人造密实骨料,并且发现用此骨料生产的混凝土,其抗压强度比以河卵石为骨料的混凝土要高得多。日本对其强度值进行了测定,测定结果如表 2-9 所示。

加纳(Chana)建筑与道路研究^[30]所对用铝土人工生产的火山灰水泥的使用性能进行了测定,发现这种水泥在高强混凝土中的应用很有发展前途,而且随着火山灰在水泥中的比例的增大,水泥的标准稠度有所提高,大大缩短了其凝结时间。为了使铝土(磨细)火山灰水泥得到广泛应用,应掺加缓凝剂,或采用石膏含量较高的水泥熟料。

2.5 赤泥应用于道路材料存在的问题

将赤泥固结到道路路面所需要的强度存在以下技术困难:

①赤泥为细粒材料,固化表面积大,若用胶结料进行固结,胶凝料所需量大,必然增加固化材料成本。

②赤泥集中在堆场长期堆放固结成大块状颗粒,如何解决赤泥破碎问题关系到赤泥大规模利用。

③赤泥颗粒为多孔状结构,吸水性强含水量不容易控制,需要找到一个便于赤泥利用的含水量范围。

④赤泥中虽然含有较多的 β -硅酸二钙,但是处于惰性状态,如何激发赤泥的活性是关键问题。

⑤根据赤泥的特性,需要根据我国的实际情况采用适合的施工工艺。此外,

因为赤泥集中在堆场堆放，在堆场附近修路会增加运输成本，这也是制约赤泥用作道路基层材料的一个主要因素。赤泥有很强的富水性能，含水量一般较高，颗粒度细小不均，颗粒内部毛细网状结构十分发达，具有较高的比表面积。干燥赤泥极易吸湿，并溶于水，且可被二氧化碳、低浓度聚合物酸分解。这些对于赤泥在道路基层中的应用是极其不利的。

第三章 赤泥

赤泥是从铝土矿中提炼氧化铝后排出的工业废渣，一般含有较多的氧化铁，其外观与赤泥泥土相似，因而得名。但有的因氧化铁较少而呈棕色，甚至灰白色。为掌握赤泥的材料特性，更好的将其应用于工程中，需对赤泥的化学组成、矿物组成和物理性质等特性进行分析。

3.1 赤泥的化学组成

以提炼氧化铝的方法来划分，赤泥分为拜耳法赤泥、烧结法赤泥、联合法赤泥等，它们的化学成分对比见表 3.1。

表 3.1 各类型赤泥化学成分对比

Table 3.1 Kinds of chemical composition about red mud contrast

赤泥 种类	成分名称								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	烧失量
拜耳法	3~20	10~20	30~60	2~8		2~10		微量~10	10~15
烧结法	20~23	5~7	7~10	46~49	1.2~1.6	2.0~2.5	0.2~0.4	2.5~3.0	6~10
联合法	20~20.5	5.4~7.5	6.1~7.5	43.7~46.8		2.8~3.0	0.5~0.7	6.1~7.7	

南京工业大学的潘志华等人^[8,10]对山东铝厂露天堆场长期放置的赤泥（称之为陈赤泥）进行了研究，通过常规化学分析，得赤泥的化学成分如表 3.2 所示。

表 3.2 山东铝厂赤泥化学成分（%）^[8,10]

Table 3.2 Chemical composition about red mud in Shandong aluminum factory

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Ti ₂ O	Na ₂ O	K ₂ O	Ig.loss	Σ
35.46	17.1	7.1	6.17	1.52	1.93	3.21	0.5	25	97.99

华中科技大学杨家宽等人^[6,7]研究了堆放时间对赤泥化学成分的影响。分别测

定了堆放时间为一月、一年、三年和十年以上的赤泥物理化学成分的变化，如表 3.3 所示。研究结果表明，陈化赤泥的化学组成，随着堆放时间的增加，赤泥灼失量显著增加，有用成分下降。

表 3.3 赤泥物理化学成分随存放时间的变化^[6,7]

Table 3.3 Physical and chemical composition about red mud's chang by deposit time

成分	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	灼减
新鲜赤泥	20.12	36.40	10.88	9.00	2.14	3.55	0.43	3.60	7.23
一年赤泥	17.39	33.00	10.10	12.50	2.00	3.24	0.47	3.00	11.75
三年赤泥	15.76	12.61	12.61	7.40	0.29	3.61	0.33	2.44	15.82
十年赤泥	16.11	33.20	7.38	8.30	0.43	2.00	0.84	2.93	26.50

张登良^[31]等人研究水泥赤泥混凝土时，用磨细赤泥代替部分水泥，对赤泥的化学组成进行了研究，如表 3.4 所示。

表3.4 赤泥化学组成^[31]

Table 3.4 Chemical composition about red mud

化学组成（%）					
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	烧失量
23.20	18.93	15.86	28.36	7.13	6.52

河南省郑州市上街铝厂的赤泥，其原始状态为颗粒状态。经磨细后，其化学组成如表3.5所示。

表3.5 郑州上街铝厂赤泥化学组成

Table 3.5 Chemical composition about red mud in Zhengzhou Shangjie aluminum factory

化学组成（%）								
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	烧失量
22.54	7.54	6.33	44.25	2.94	2.16	0.64	6.35	4.69

3.2 赤泥的矿物组成

华中科技大学杨家宽等人^[6,7]根据 X 射线衍射分析，认为赤泥的主要矿物组成

为 β - C_2S 、 CaTiO_3 、 CaCO_3 和少量的 α - Fe_2O_3 ，新、陈赤泥的 X-ray 射线测定结果如图 3.1 所示。

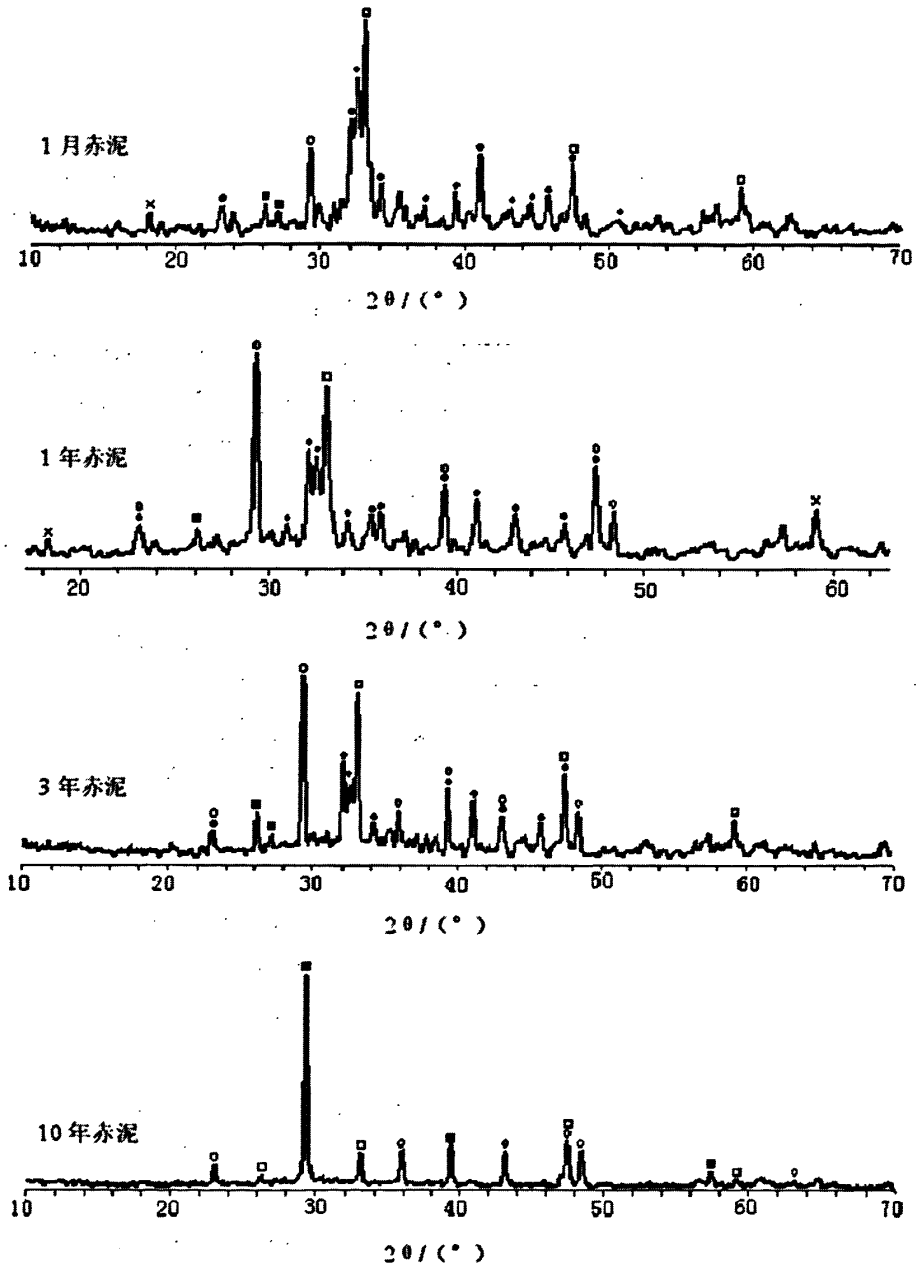


图 3.1 新、陈赤泥的 X-ray 图^[7]

Fig 3.1 X-ray graph of new and old red mud

注：图 3-1 中符号的代替意义为：●— β - $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ；○— CaCO_3 （方解石）；■— CaCO_3 （霞石）；□— $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ；×— α - $\text{Al}(\text{OH})_3$ 。

从 X 衍射图看到，不同堆存时间的赤泥在矿物成分有一定的区别：随着堆存时间的延长， $\beta-2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 的特征谱线越来越少，越来越不明显，霞石的谱线有增加的趋势，其他矿物的谱线没有显著变化。

山东铝厂的赤泥的矿物组成如表 3.6 所示。

表 3.6 赤泥的矿物组成^[8,10]

Table 3.6 Mineral composition about red mud

矿物组成	百分含量 (%)
$\beta-2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	50~56
$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	4~10
CaCO_3	2~12
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0.6\text{SiO}_2 \cdot 4.9\text{H}_2\text{O}$	5~9
$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.7\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	5~9
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	3~5
$\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$	2~5

河南省上街铝厂赤泥的矿物组成如表 3.7 所示。

表 3.7 郑州赤泥的矿物组成

Table 3.7 Mineral composition about red mud in Zhengzhou

矿物组成	百分含量 (%)
α' -硅酸二钙	53
方钠石	11
水化石榴石	10
赤铁矿	7.5
钙钛矿	11
镁蔷薇辉石	5
三水铝石	0.5

由于赤泥含有较高的活性成分 SiO_2 ， Al_2O_3 和 CaO 等，并含有水泥部分矿物 α' -硅酸二钙，使得它具有一系列优良的性能：稳定的化学成分、含有大量的一个半氧化物以及极细的分散性，是制作水泥及筑路的良好廉价材料。

3.3 赤泥的物理性质

张登良^[31]等人研究水泥赤泥混凝土时，用磨细赤泥代替部分水泥，对赤泥的化学组成及基本物理性能进行了研究，如表 3.8 所示。

表3.8 赤泥的基本物理性质^[31]

Table 3.8 Basic physical character about red mud

PH 值	密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比表面积 ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)
11.58	3.21	4000

山东铝厂的赤泥的物理性质分别如表 3.9 所示。

表 3.9 山东铝厂赤泥的物理性质^[7]

Table 3.9 Physical character about red mud in Shandong aluminum factory

干容重 g/cm^3	密度 g/cm^3	比表面积 cm^2/g	塑性 指数	熔点 ($^{\circ}\text{C}$)	粒度 (%)		
					+60 目	+200 目	+250 目
0.6~0.90	2.7~2.98	4500~7000	16.8	1220~1270	5~10	25~30	40~50

河南省上街铝厂的赤泥，原始状态为颗粒状态。经磨细后，其基本物理性质如下表3.10、3.11所示。

表 3.10 郑州上街铝厂赤泥基本物理性质

Table 3.10 Basic physical character about red mud in HeNan Shangjie aluminum factory

PH 值	密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比表面积 ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)
11.58	3.21	3610

表3.11 郑州上街铝厂赤泥的粒度分布

Table 3.11 Granularity distribution of red mud in HeNan Shangjie aluminum factory

孔径 (μm)	<20	20~50	50~100	100~150	150~200	>200
含量 (%)	8.81	7.39	6.80	9.70	19.4	47.90

第四章 水泥石灰赤泥稳定土底基层性能研究

水泥石灰赤泥稳定土的技术性能取决于原材料的性质，但各种原材料之间的配合比例也是决定混合料技术性能的关键。所以，本着经济可行、性能可靠的原则，通过物理力学性能试验选出最佳配合比。

4.1 原材料组成及性质

①水泥

水泥采用重庆小南海水泥厂标号为32.5的普通硅酸盐水泥，其物理力学性能如表4.1所示。

表4.1 水泥主要成分及物理力学性能

Table4.1 Basis,physical and chemical performance of cement

细度	SO ₃	MgO	烧失量	矿渣	3d抗折强度	3d抗压强度
3.8%	2.56%	2.08%	2.35%	12.42%	4.7MPa	21.0MPa

②石灰

石灰用作激发剂，对水泥石灰赤泥混合料强度有明显影响，故要求使用3级以上石灰。石灰购进后要充分消解，但又不能过湿成团，堆置时间亦不宜过久。表4.2给出了工程中石灰的有关指标。

表4.2 石灰的技术指标^[37]

Table4.2 Technical index of lime

指标		钙质生石灰			镁质生石灰			钙质消石灰			镁质消石灰		
		等级											
		I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
有效钙加氧化镁含量(%)不小于未消化残渣含量		85	80	70	80	75	65	65	60	55	60	55	50
5 mm圆孔筛的筛余(%)不大于		7	11	17	10	14	20						
含水量(%)不大于								4	4	4	4	4	4
钙镁石灰的分界限,氧化镁含量(%)		≤5			>5			≤4			>4		
含水量(%)不大于								4	4	4	4	4	4
细度	0.71 mm方孔筛的筛余(%)不大于							0	1	1	0	1	1
	0.123 mm方孔筛的累计筛余(%)不大于							13	20	-	13	20	-

注：硅、铝、镁氧化物含量之和大于5%的生石灰，有效钙加氧化镁含量指标，I等≥75%，II等≥70%，III等≥60%；未消化残渣含量指标与镁质生石灰指标相同。

试验用生石灰技术性质如表4.3所示。

表4.3 生石灰化学成分及物理性能

Table 4.3 Chemical composition and physical performance

活性成分含量(%)			5 mm 圆孔筛筛余量(%)
CaO	MgO	CaO+MgO	0
83.16	3.96	87.12	

参考表4.2中有关石灰质量标准的规定，由于本试验用的生石灰粉的有效钙加氧化镁的含量达87.12%，且其氧化镁含量小于4%，所以确定本试验中的生石灰粉为I级钙质生石灰。本试验中所采用的石灰经生石灰粉充分消解、烘干，0.071 mm的方孔筛筛余量为0。

对于实际工程应用，石灰在制备过程应采取以下措施：1)石灰应在用于工程之前7天充分消解成能通过10mm筛孔的粉状，并尽快使用；2)石灰应设棚存放，并

能防风避雨。

③赤泥

赤泥为河南省上街铝厂的工业废渣,其原始状态为颗粒状态。赤泥主要矿物组成: α' -硅酸二钙占53%,方钠石占11%,水化石榴石占10%,赤铁矿占7.5%,钙钛矿占11%,镁蔷薇辉石占5%,三水铝石占5%。经磨细后,其化学组成及基本物理性质如表3.5、3.10所示,赤泥的粒度分布如表3.11所示。

④土

采用粘性土,其液限为41.3%,塑限为24.5%,采用粒径小于2.36 mm以下的细粒土。本试验采用TYS-2土壤液塑限联合测定仪测定土的液塑限,测定仪的技术指标如下:

- 1)最小分度: 0.01 mm;
- 2)最大量程: 25 mm; 误差: 0.04 mm;
- 3)采用容栅式数字位移传感器针入深度;
- 4)锥与连杆重: 100 ± 0.1 g及 76 ± 0.1 g两种; 锥角: $30^\circ \pm 0.2^\circ$;
- 4)试样杯: 金属制; 平底筒状; 内径尺寸为: $\Phi 50 \times 40$ mm。

水泥、石灰、赤泥和土的混合料测定过程如下:

1)取有代表性的天然含水量或风干土样进行试验。如土中含有大于0.5mm的颗粒或夹杂物较多时,可采用风干土样,用带橡皮头的研杵研碎或用木棒在橡皮板上压碎土块。试样必须反复研碎,过筛,直至将可研碎的土块全部通过0.5 mm的筛为止。取筛下土样用三皿法进行制样。

2)三皿法: 取筛下土样200 g左右,分开放入三个盛土皿中,用吸管加入不同数量的蒸馏水或自来水,土样的含水量分别控制在液限、塑限以上和它们的中间状态附近。用土刀调匀,盖上湿布,放置18 h以上。

3)将制备好的土样充分搅拌均匀,分层装入土样试杯,用力压密,使空气逸出。对于较干的土样,应先充分搓揉,用土刀反复压实。试杯装满后,刮成与杯边齐平。

4)接通电源,调平机身,打开开关,装上锥体。

5)将装好的土样的试杯放在升降座上,手推升降座上的拨杆,使试杯徐徐上升,土样表面和锥尖刚好接触,蜂鸣器报警,停止转动拨杆,按检测键,传感器清零,同时锥体立刻自行下沉,5s时液晶显示器上显示锥入深度,数据显示停留时间至少为5s。试验完毕,手拿锥体向上,锥体复位(锥体上端有螺纹,可与测杆上螺纹相配)。

6)改变锥尖与土体接触位置(锥尖两次锥入位置距离不小于1cm),重复第4条步骤,得锥入深度值,允许误差为0.5mm,否则应重做。

7) 去掉锥尖入土处的凡士林，取10g以上的土样两个，分别放入称量盒内，称重（准确至0.01g），测定其含水量， ω_1 ， ω_2 计算到0.1%。计算含水量平均值 ω 。

8) 重复第2条至第4条步骤，对其它两个含水量土样进行试验，测其锥入深度和含水量。

试验测得的土的不同含水量锥入深度如表4. 4和图4. 1所示，土的液限与塑限入土深度关系如图4. 2所示。

表4. 4 土液限塑限联合测定结果

Table4.4 Determination result of liquid and plastic limits about soil

试验次数	1	2	3
锥入试样深度 1 (mm)	6. 43	12. 75	20. 15
锥入试样深度 2 (mm)	6. 68	12. 45	20. 07
锥入试样深度平均值	6. 6	12. 6	20. 1
含水量 (%)	34. 1	46. 9	54. 7

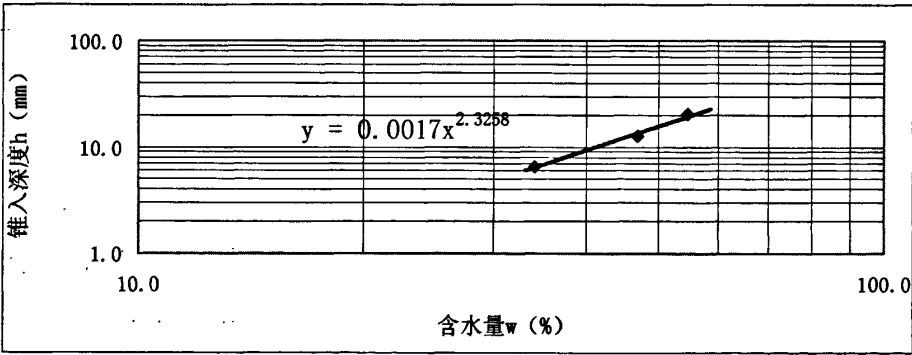


图4. 1 土的含水量与锥入深度关系图

Fig4.1 Relation graph between soil water content and awl penetration

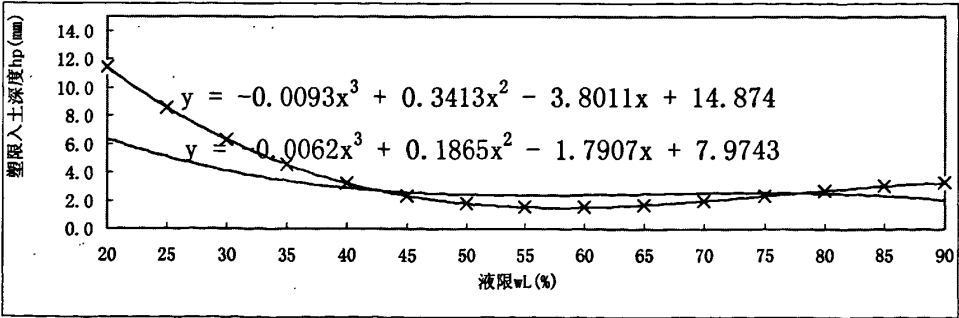


图4. 2 土的液限与塑限入土深度关系图

Fig4.2 Relation graph between soil liquid and plastic limits and awl penetration

4.2 试验配合比设计

水泥赤泥石灰稳定土的试验配合比设计如表4.5所示。

表4.5 水泥赤泥石灰稳定土的初定配合比方案

Table4.5 Mixture rate assured the first time of cement lime and red mud stabilized clay

各组分所占比例（%）							
水泥	石灰	土	赤泥	水泥	石灰	土	赤泥
5	6	89	0	3	3	89	0
			5				5
			10				10
			20				20

4.3 最佳含水量与最大干密度

水泥石灰赤泥稳定土混合料在拌和与压实时需要加入一定的水，以保证较好的拌和效果与压实度，水的主要作用有以下几个方面：①促进集料结团的分解；②在拌和过程中有利于扩散；③在集料基体间充当润滑剂。然而，过多的水将会影响压实效果及混合料的强度，因此在拌和和压实过程中必须确定一个最佳用水量。最佳含水量通过重型击实试验确定。

重型击实试验是在规定的试筒内对水泥石灰赤泥土混合料进行击实试验，绘制稳定土的含水量—干密度关系曲线，从而确定其最佳含水量和最大干密度。

依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》（JTJ057-94）中无机结合料稳定土的击实试验方法，选用了内径10cm，高12.7cm，体积为997cm³的小型试筒，试验步骤按照无机结合料稳定土的击实试验方法中的甲法进行试验。由重型击实试验所得到的最佳含水量及最大干容重结果如表4.6所示。

表4.6 水泥石灰赤泥稳定土混合料击实试验结果

Table4.6 Compaction test result of cement lime and red mud stabilized clay

配合比	击实指标	
	最佳含水量 (%)	最大干密度 (g/cm ³)
水泥: 石灰: 土: 赤泥		
5: 6: 89: 0	15. 2	1. 700
5: 6: 89: 5	20. 4	1. 628
5: 6: 89: 10	17. 0	1. 626
5: 6: 89: 20	18. 8	1. 597
3: 3: 89: 0	18. 6	1. 654
3: 3: 89: 5	17. 6	1. 620
3: 3: 89: 10	18. 6	1. 643
3: 3: 89: 20	19. 4	1. 616

由重型击实试验测试结果可知，对于水泥石灰赤泥稳定土混合料，其最大干密度随着赤泥掺量的增加略有降低，最佳含水量则随着赤泥掺量的增加略有增加。水泥石灰掺量对混合料最大干密度有一定影响，但在同时掺有赤泥的情况下，规律性不是很明显。

4.4 无侧限抗压强度

基层是路面结构的主要承重层，因而必须能满足承受车轮荷载的反复作用，即在预定的设计标准轴次反复作用下，基层不会产生过多的残余形变，更不会产生剪切破坏或疲劳弯拉破坏。基层要满足上述这些技术要求，除了必须的厚度外，主要取决于材料本身的强度。而材料的强度包括：集料颗粒本身的强度和硬度以及混合料的强度。在我国的基层研究中，采用无侧限抗压强度及刚度（模量）来进行评定。

无侧限抗压强度是按照预定压实用静力压实法制备试件，本试验采用高×直径=50mm×50mm的圆柱体试模，成型后的试件如图4-3所示，试件从试模内脱出并称重量高后，立即用塑料袋包裹，扎紧不漏气，然后放入恒温恒湿的养生室内养护，整个养生期间养生室的温度保持在20℃±2℃，湿度高于95%，因为本试验采用的土含量较多，无法饱水，所以在养生室养护7d和28d后，直接进行无侧限抗压强度试验。无侧限抗压强度试验如图4.4所示。

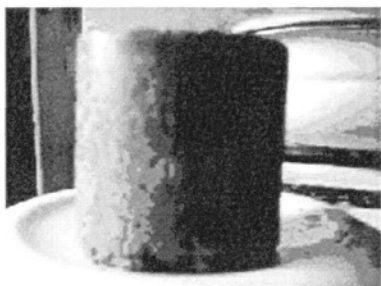


图4.3 水泥赤泥石灰稳定土成型试件

Fig4.3 Fixed speciraent of cement lime and red mud stabilized clay

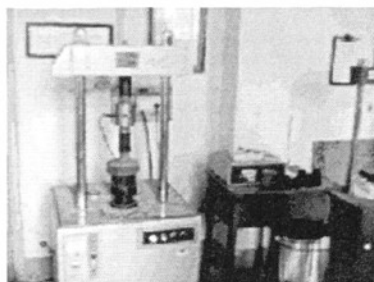


图4.4 试件无侧限抗压试验

Fig4.4 Unconfined compressive strength test

试件的无侧限抗压强度 R_c 用下列公式计算:

$$R_c = \frac{P}{A} \quad \text{式 (4.1)}$$

式中:

R_c ——试件无侧限抗压强度 (MPa);

P ——试件破坏时的最大压力 (N);

A ——试件的截面积 (mm^2).

各配合比稳定土试件7d和28d无侧限抗压强度结果如表4-7所示, 强度与养护龄期之间的关系图分别如图4.5、4.6所示。

表4.7 水泥石灰赤泥稳定土7d和28d无侧限抗压强度测定结果

Table4.7 7days and 28days unconfined compressive strength test result of cement lime and red mud stabilized clay

配合比	7d	28d	配合比	7d	28d
5:6:89:0	0.67	0.94	3:3:89:0	0.67	0.73
5:6:89:5	0.49	0.80	3:3:89:5	0.60	0.65
5:6:89:10	0.82	0.76	3:3:89:10	0.72	0.65
5:6:89:20	0.69	0.85	3:3:89:20	0.70	0.71

注: (1) 配合比指——水泥:石灰:粘土:赤泥

由图4.5和图4.6可得知水泥石灰赤泥稳定土混合料的配合比对其不同龄期试件无侧限抗压强度影响显著。

对于7d龄期的混合料, 当水泥石灰掺量一定时, 混合料的无侧限抗压强度值随着赤泥掺量的增加呈现先降后增再降的趋势, 其中赤泥掺量为10%时试件的抗压强度值最大, 赤泥掺量5%时试件的抗压强度值最小; 水泥石灰掺量减少后, 随赤

泥掺量的变化，试件的抗压强度表现出与水泥石灰掺量减少前相同的变化趋势，即赤泥掺量为10%时抗压强度值最大，赤泥掺量5%时抗压强度值最小。这表明试件的无侧限抗压强度受赤泥含量的影响显著。

对于28d龄期试件的无侧限抗压强度，水泥石灰掺量为11%时，试件的抗压强度值比水泥石灰掺量为6%的试件抗压强度值要大，这表明增加水泥石灰掺量可以有效提高试件的抗压强度；水泥石灰掺量减少前和减少后，未加赤泥的混合料抗压强度最大，赤泥含量为20%的试件次之。

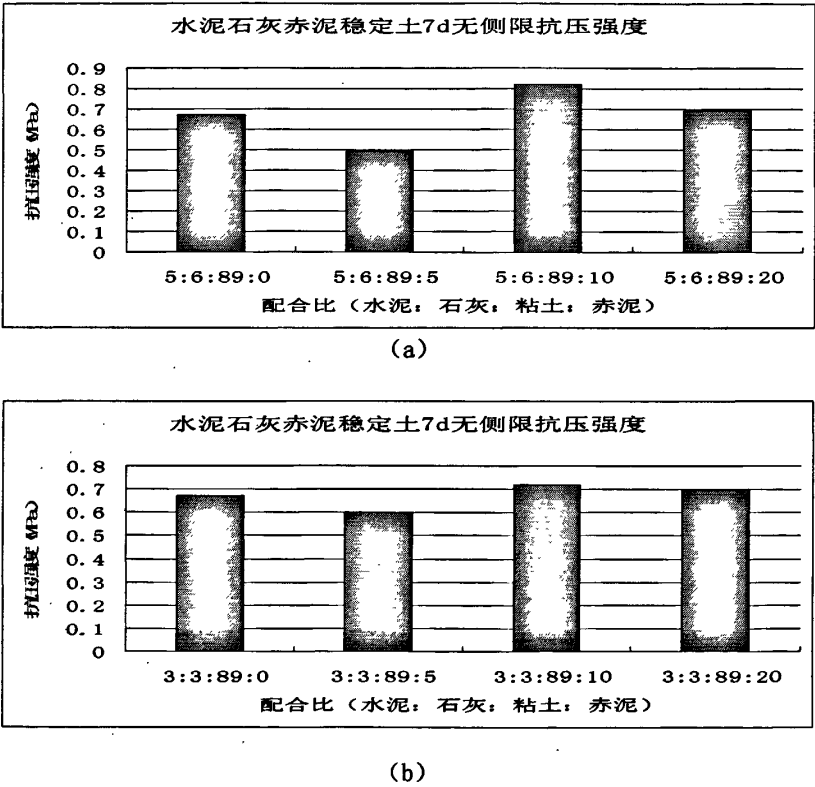


图4.5 水泥石灰赤泥稳定土混合料各配比7d无侧限抗压强度

Fig4.5 Each mixture rate 7days unconfined compressive strength test result of cement lime and red mud stabilized clay

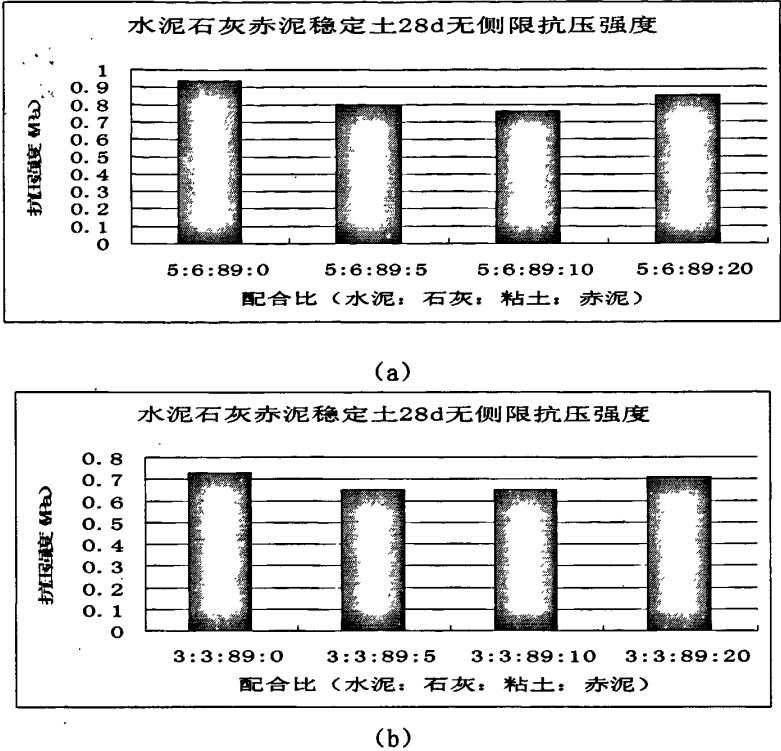


图4.6 水泥石灰赤泥稳定土混合料各配比28d无侧限抗压强度
Fig4.6 Each mixture rate 28days unconfined compressive strength
test result of cement lime and red mud stabilized clay

掺加赤泥后的水泥石灰赤泥稳定土，其早期抗压强度较不掺赤泥的水泥石灰稳定土强度大，表明，赤泥的掺入有利于水泥石灰稳定土早期强度的发展。但掺有赤泥的混合料，其后期强度较不掺赤泥的混合料略有降低。

对于作为粘结料的水泥石灰，在其总掺量较小的情况下（水泥掺量3%、石灰掺量为3%）再掺加赤泥，混合料的28d无侧限抗压强度反而比7d的略有减小，说明当粘结料的总掺量（水泥掺量与石灰掺量之和）较小时，混合料后期的强度不能得以充分发展。这也说明，对于掺有赤泥的水泥石灰稳定土，为了保证混合料的后期强度，应保证水泥石灰的掺量不低于一定值。

4.5 收缩特性

收缩试验采用机械法测定干燥收缩变形。小梁试件的规格为：长×宽×高=5cm×5cm×24cm，采用压力机静压成型，每种材料制作三根试件。小梁试件静压成型拆模后放入恒温恒湿的养生室内养护 7d，整个养生期间养生室的温度保持在

20℃±2℃，湿度高于95%。养护7d后，取出放在常温室内采用机械法测定干燥收缩系数，采用的主要设备包括钢制或铁制的基座、测定变形量的千分表以及千分表架。测试时，将室内成型的梁式试件放置在基座上，在试件和基座中间放置可以任意滚动的玻璃棒，然后两端安置千分表，示意图如图4.7所示。

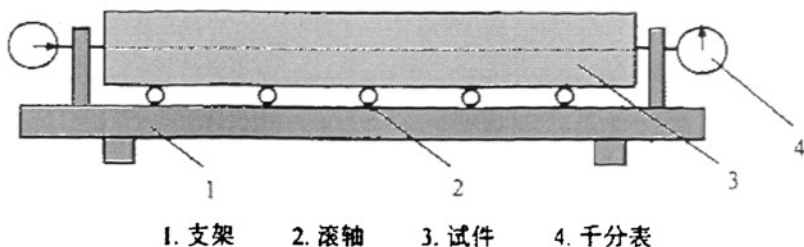


图4.7 机械法测定小梁试件收缩示意图

Fig4.7 Sketch graph of measuring beam's shrinkage by mechanical method

当环境温度发生变化或试件失水后，试件整体收缩或伸长会引起千分表触头移动并使得千分表产生读数，通过千分表数值的变化得知试件的变形值，为避免千分表触头进入试件，在试件的两边都用环氧树脂粘贴小玻璃片，千分表的触头与小玻璃片表面接触。试件收缩试验测试装置如图4.8所示。



图 4.8 水泥石灰赤泥稳定土混合料收缩试验测试装置

Fig4.8 Testing device of cement lime and red mud stabilized clay's shrinkage test

试件上架以后每天在同一时间通过平卧式装置上的千分表读取不同时间试件的收缩量，并根据以下公式计算其收缩应变：

$$\varepsilon_d = \Delta L / L \times 100 \quad \text{式 (4.2)}$$

式中：

ε_d —收缩率（%）；

L — 试件的整体长度 (mm);

ΔL — 收缩量, 即小梁试件的整体收缩量 (mm)。

试验测试所得的不同稳定土类型收缩率如表 4.8 示, 收缩率与养护龄期的关系如图 4.9 所示。

表4.8 不同类型稳定土收缩试验测试结果

Table4.8 Shrinkage test's result of different mixture rates

混合料配合比 水泥: 石灰: 土: 赤泥	收缩率 (%)					
	1d	3d	7d	14d	28d	34d
5 : 6 : 89 : 0 (1#)	0.024	0.063	0.114	0.143	0.171	0.172
5 : 6 : 89 : 10 (2#)	0.028	0.073	0.118	0.144	0.174	0.177
5 : 6 : 89 : 20 (3#)	0.026	0.060	0.098	0.122	0.145	0.149
3 : 3 : 89 : 0 (4#)	0.035	0.106	0.159	0.189	0.205	0.206
3 : 3 : 89 : 10 (5#)	0.040	0.095	0.151	0.177	0.200	0.201

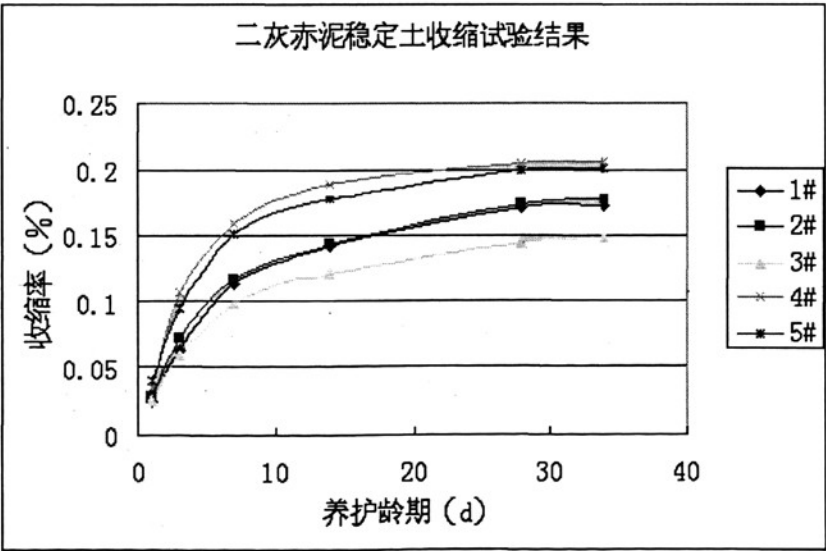


图4.9 不同稳定土收缩率与养护龄期关系图

Fig4.9 Relation graph between different mixture rates' shrinkage ratio and curing period

由表 4.8 和图 4.9 可以看出 4#级配的试件整体收缩率最大, 1#和 2#试件的收缩变形趋势相似, 3#试件的收缩变形最小, 4#和 5#试件的收缩率变化趋势相近, 且其收缩率较其它试件的都大。这表明, 掺加赤泥可以有效减少水泥石灰赤泥稳

定土的收缩,降低由于掺加水泥和石灰带来稳定土收缩变形的增加。由上图还可以看出水泥石灰赤泥稳定土混合料的收缩特性可以分为三个阶段:

①快速收缩阶段

主要发生在试件成型最初几天。这段时间内,水泥水化的速度小于试件表面水分的蒸发速度,水泥水化产生的水化物尚不够填充混合料中水分蒸发所留下的空隙,混合料以收缩为主,且收缩的速度较快。从收缩变形与养护龄期的关系图看,对于水泥石灰赤泥稳定土,其快速收缩阶段主要在 7d 龄期之前。

②缓慢收缩阶段

当混合料表层水分基本蒸发完后,混合料内部的水分向表面移动蒸发,但其速度远小于表面水分的直接蒸发速度。这一阶段的持续时间与环境湿度有关。若环境湿度较大,混合料内得以保存足够的水分供水泥水化,则水泥水化所形成的水泥石增多,使混合料又有一定的膨胀;若环境的湿度较小,混合料中的水分被蒸发出来,水泥得不到足够的水分水化,混合料的变形就以收缩为主。如此的共同作用,直到水泥的水化基本完成,混合料内部的湿度与环境建立平衡。这一阶段发生在养护的 7d~28d 之间。

③收缩稳定阶段

当水泥的水化基本完成,且混合料内部的湿度与环境湿度相平衡后,混合料的收缩进入稳定阶段。在试样养护至 28d 后,其收缩变形基本稳定。

4.6 抗压回弹模量

土基回弹模量是公路路基路面设计的主要参数,是影响路面结构厚度的敏感参数之一;在路面结构设计中能否取用合适的土基回弹模量值,关系到路面结构的安全性和经济性。

本试验也是采用静压成型的试件成型方法,制成直径 $\times$ 高=100mm $\times$ 100mm 的试件,如图 4.10。试件养护采标准养护方式,即试件脱模后用塑料袋装好放在恒温恒湿的养护室里养护,进行无侧限抗压强度试验试验前一天泡水。进行龄期为 7d、28d、120d 的回弹模量试验。

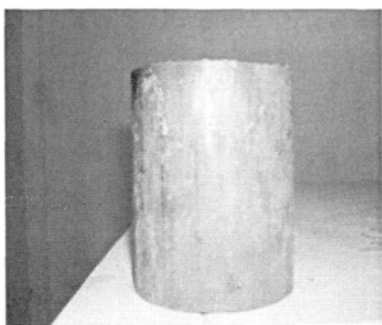


图 4.10 水泥赤泥石灰稳定土

回弹模量试验成型试件

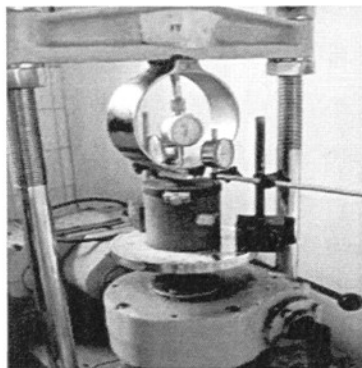
Fig4.10 Compression rebound modulus fixed
speciraent of cement lime and red mud stabilized clay

图 4.11 水泥赤泥石灰稳定土回弹模量试验

Fig4.11 Compression rebound modulus experiment

of cement lime and red mud stabilized clay

回弹模量试验方法采用顶面法, 试验仪器为路面材料强度试验仪, 试验中逐级加荷卸载, 如图 4.11。

① 选定加载板上的计算单位压力: 根据无侧限抗压强度选定加压荷载为 0.5MPa, 由此反算出加荷所需的压力值, 将该压力值的一半作为施加的最大荷载。

② 将试件放在路面材料强度试验仪的加载底板上, 在试件顶面稀撒少量 0.25~0.5mm 的细砂, 并手压加载板在试件顶面边加压边旋转, 使细砂填补表面微观的不平整, 并使多余的砂流出, 以增加顶板与试件的接触面积。

③ 安置千分表, 使千分表的脚支在加载顶板直径线的两侧并离试件中心距离大致相等, 调整升降台的高度, 使压头与试件顶面上的加载板的中心相接触。

④ 预压: 先用拟施加的最大荷载的一半进行两次加荷卸荷预压试验, 使加载顶板与试件表面紧密接触。每 2 次卸载后等待 1min。

⑤ 回弹形变测量: 将预定的单位压力分成 5 等分, 作为每次施加的压力值。施加第 1 级荷载 (如为预定最大荷载的 1/5), 待达到第 1 级荷载值时记录千分表的读数, 同时卸去荷载, 让试件的弹性形变恢复。到 0.5min 时再记录千分表的读数, 施加第 2 级荷载 (为预定最大荷载的 2/5), 同前待达到第 2 级荷载值时记录千分表的读数, 卸去荷载。卸荷后达 0.5min 时, 再记录千分表的读数, 并施加第 3 级荷载。如此逐级进行, 直到记录下最后一级荷载下的回弹形变。

测量结束之后根据下式计算试件的回弹模量 E:

$$E=PH / L \quad \text{式(4.3)}$$

式中: P——单位压力 (MPa)

H——试件高度 (mm)

L——试件回弹形变 (mm)

稳定土室内回弹模量试验结果如表 4.9 所示。

表4.9 不同类型稳定土抗压回弹模量试验测试结果

Table4.9 Compression rebound modulus' result of different mixture rates

级配	龄期		
	7d	28d	120d
5:6:89:0	288	284.6	297
5:6:89:12	273	315	324.1
5:6:89:24	168	206	210.4
3:3:89:0	280	287.2	290.8
3:3:89:12	217.7	262	267

由试验结果可以看出：混合料试件的回弹模量是随龄期的增长而增长的；赤泥的含量对混合料的回弹模量影响显著，随着赤泥含量的增加相同龄期试件的回弹模量呈现先增后减的趋势，这表明赤泥存在一最佳含量可以使其回弹模量最大；水泥含量对混合料的回弹模量也有较明显的影响。

4.7 分析结论

综合以上研究可以得出以下结论：

①在水泥石灰粘结料总掺量一定的情况下，随着赤泥掺量的增加，混合料的最大干密度呈下降趋势；而最佳含水量则有所增大。

②混合料配合比对水泥石灰赤泥稳定土混合料的无侧限抗压强度影响显著。水泥石灰掺量一定时，随着赤泥含量的增加，混合料的强度呈现先增后减的趋势；表明赤泥在一合适的含量范围内，可以使混合料达到较高的抗压强度。

③水泥石灰掺量高的混合料其抗压强度较水泥石灰掺量小的混合料抗压强度大。表明，对于掺有赤泥的水泥、石灰稳定土，为了保证混合料的后期强度，应保证水泥石灰的掺量不低于一定值。

④掺加赤泥可以有效的减少混合料水泥石灰赤泥稳定土混合料的干缩，可以有效防止混合料的干缩裂缝的产生，对于减少混合料早期损害具有重要意义。

⑤综合不同龄期混合料的无侧限抗压强度以及收缩特性，对于水泥石灰赤泥稳定土混合料，建议赤泥最佳掺量为10~20%，水泥、石灰宜采用等比例，且总掺量不应少于10%。

⑥混合料试件的回弹模量是随龄期的增长而增长的，赤泥存在一最佳含量可以使其回弹模量最大。

第五章 水泥赤泥稳定级配碎石基层性能研究

5.1 原材料组成及性质

水泥赤泥稳定级配碎石混合料是由矿质集料、水泥、赤泥和水等所组成的混合料，每种材料都在一定程度上影响着水泥赤泥稳定级配碎石混合料的路用性能。由于原材料性质的多样性和使用性能的广泛性，因此必须在水泥赤泥稳定级配碎石混合料的统一要求下对各种原材料的性质进行综合分析，以保证整体上最佳的路用性能和施工的可操作性。

①赤泥

赤泥为河南省上街铝厂的工业废渣，其原始状态为颗粒状态。其化学组成及基本物理性质分别见表 3.5、3.10、3.11 所示。

②水泥

水泥在混合料中吸水水化形成的水泥石，对混合料的强度、刚度具有重大的影响，而且其对混合料的收缩性能有很大的影响，是水泥赤泥稳定级配碎石混合料的关键组分之一。

普通水泥具有早期强度高、力学性能好的特点，可以满足基层施工和使用性能的要求，因此本试验选用普通硅酸盐水泥。通常普通水泥的标号越高，其综合技术性能越好，价格也就越高。从经济性及推广应用角度考虑，应选用道路上广泛使用的 32.5 级（原 425#）普通硅酸盐水泥为宜。本课题研究过程中所选用水泥为重庆小南海水泥厂生产的 32.5 级普通硅酸盐水泥。其物理性质同表 4.1 所示。

③碎石

碎石的特性对水泥赤泥稳定级配碎石混合料性能至关重要。本课题结合国内外最新研究成果，对水泥赤泥稳定级配碎石混合料中碎石的选择提出如下要求：

- 1) 保证集料的足够强度，减少有害的粘土块和易破碎颗粒含量；
- 2) 尽量减少砾石用量，提高粗、细集料的棱角性，以求混合料获得较大的内摩阻力，保证集料形成较强的骨架，并保留一定的空隙以增强混合料抵抗永久变形的能力和获得较好的耐久性；
- 3) 限制集料的吸水率和粘土含量；

表5.1 石灰石性能指标检测结果
Table5.1 Test result of limestone's index

指标	颗粒粒径分布					要求
	石屑	碎石				
	0~5	5~10	10~15	15~20	20~30	
表观密度 (kg/m³)	2722	2740	2738	2775	2799	≥2500
毛体积密度 (kg/m³)	—	2668	2680	2700	2708	实测值
表干密度 (kg/m³)	—	2694	2701	2727	2731	—
捣实密度 (kg/m³)	—	1550	1545	1540	1533	—
骨架间隙率 (%)	—	41.9	42.4	43	44.6	—
针片状颗粒含量 (%)	—	12.4	9.8	9.1	7.2	≥15
压碎指标 (%)	—	—	19.2	19.2	—	≥26
磨耗指标 (%)	—	—	21.7	21.7	—	≥28
堆积密度 (kg/m³)	1546	—	—	—	—	—
空隙率 (%)	43.2	—	—	—	—	—
含泥量 (%)	2.1	—	—	—	—	≥3
细度模数 (%)	3.97	—	—	—	—	—

4) 限制扁平细长颗粒的含量，扁平细长颗粒含量过大难以形成稳定的嵌挤骨架结构，且扁长颗粒在施工过程中和交通荷载作用下易破碎。

本研究中碎石选用石灰石，其具体性能要求和检测结果如表5.1所示。

5.2 配合比设计

水泥赤泥稳定级配碎石混合料的力学特性及其它功能的实现主要依赖于水泥特性、赤泥特性与碎石混合料的级配组成。因此，对于水泥赤泥稳定级配碎石混合料，应在不断改善水泥性能的同时，充分发挥骨料对于混合料性能的积极作用，设计出良好的矿料级配。

①矿料级配

本课题在充分考虑已有研究成果的基础上，选择符合《公路沥青路面设计规范(JTG D50-2006)》的骨架密实型水泥稳定碎石级配要求进行试验。规范要求及设计级配组成如表5.2所示，级配曲线如图5.1所示。

表5.2 骨架密实型水泥赤泥稳定级配碎石基层碎石级配

Table5.2 Macadam gradation of skeleton dense cement and red mud stabilized macadam base								
筛孔尺寸 mm		31.5	19.0	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
规范要求	上限	100	86	58	32	28	16	3
	下限	100	68	38	22	16	8	0
	中值	100	77	48	27	22	12	1.5
设计级配		100	82	48	27	22	12	2

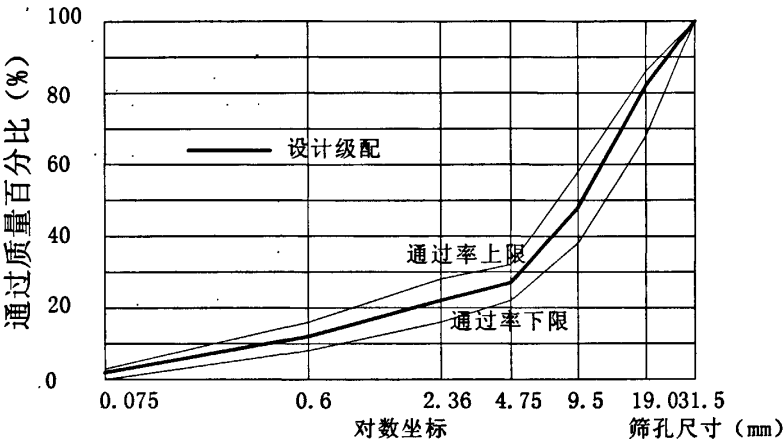


图5.1 水泥赤泥稳定级配碎石基层所用碎石级配曲线

Fig5.1 Macadam gradation curve of cement and red mud stabilized macadam base

②初定配合比

结合河南地区施工实际情况，确定初始水泥含量为6%，碎石含量为94%，采用外掺法，改变赤泥的掺量，研究不同赤泥掺量对混合料的力学性能的影响。同时还考虑在减少水泥用量的情况下对混合料力学性能的影响，以期对其经济性能进行分析。具体配合比情况见表5.3。

表5.3 水泥赤泥稳定级配碎石混合料初定配合比方案

Table5.3 Mixture rate assured the first time of cement and red mud stabilized macadam		
类别	配合比	
	水泥：赤泥：碎石	水泥：赤泥：碎石
水泥赤泥稳定级配碎石混合料	6：0：94	3：0：94
	6：6：94	3：6：94
	6：12：94	3：12：94
	6：24：94	3：24：94

5.3 击实试验

重型击实试验是在规定的试筒内对水泥赤泥稳定级配碎石混合料进行击实试验，绘制混合料的含水量—干密度关系曲线，从而确定其最佳含水量和最大干密度。

依据规范^[36]关于无机结合料稳定土的击实试验方法，选用了内径15.2cm，高12.0cm，体积为2177cm³的小型试筒，试验步骤按照无机结合料稳定土的击实试验方法进行试验。由于本课题试料中粒径大于25mm的颗粒含量过多，故按规范要求采用丙法进行试验。由试验得到的最佳含水量及最大干密度如表5.4所示。

表5.4 水泥赤泥稳定级配碎石混合料击实试验结果

Table5.4 Compaction test result of cement and red mud stabilized macadam

配合比	击实指标	
水泥：赤泥：碎石	最佳含水量(%)	最大干密度(g/cm ³)
6：0：94	4.6	2.380
6：6：94	6.7	2.318
6：12：94	8.5	2.219
6：24：94	10.1	2.105
3：0：94	4.9	2.372
3：6：94	6.8	2.298
3：12：94	8.5	2.193
3：24：94	11.3	2.037

5.4 无侧限抗压强度

混合料的无侧限抗压强度测定用试样按照最大干密度采用静力压实法成型试件，试模尺寸为高×直径=150mm×150mm的圆柱体。成型的试件如图5-2所示。试件从试模内脱出并称重高后，立即用塑料袋包裹，扎紧不漏气，然后放入恒温恒湿的养生室内养护，整个养生期间养生室的温度保持在20℃±2℃，湿度高于95%，养生的最后一天试件浸水24h，待试件充分饱水后进行试验。将已浸水一昼夜的试件从水中取出，用软的旧布吸去试件表面的可见自由水，并称重高。然后将试件放到压力机上进行抗压试验。试验过程中，应使试件的形变等速增加，并保持速率约为1 mm/min，记录试件破坏时的最大压力P（N）。水泥赤泥稳定级配碎石试件无侧限抗压强度测试如图5.3所示。

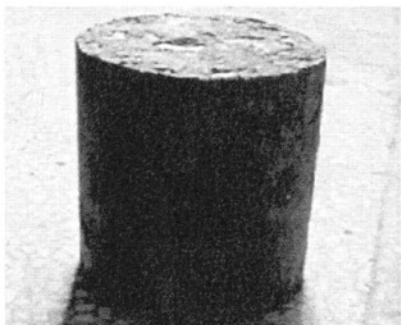


图5.2 水泥赤泥稳定级配碎石成型试件

Fig5.2 Fixed speciraent of cement and
red mud stabilized macadam

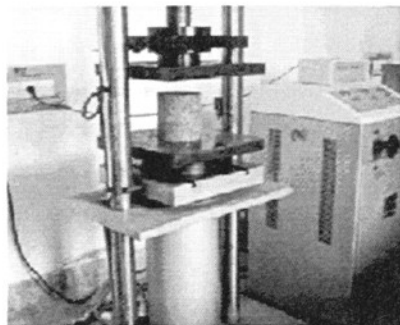


图5.3 无侧限抗压强度测定

Fig5.3 Unconfined compressive strength test

试件无侧限抗压强度计算公式如下:

$$f_{cc} = \frac{4P}{\pi d^2} \quad \text{式 (5.1)}$$

式中:

f_{cc} - 试件无侧限抗压强度 (MPa);

P - 试件破坏时的最大压力 (N);

d - 试件直径 (mm)。

各配比试件7d和28d无侧限抗压强度结果见表5.5所示, 其柱状对比图分别如图5.4和图5.5所示。

表5.5 水泥赤泥稳定级配碎石混合料7d和28d无侧限抗压强度试验结果

Table5.5 7 and 28 days unconfined compressive strength test result of cement and red mud
stabilized macadam

配合比	抗压强度 (MPa)		配合比	抗压强度 (MPa)	
水泥: 赤泥: 碎石	7d	28d	水泥: 赤泥: 碎石	7d	28d
6: 0: 94	5.0	10.3	3: 0: 94	3.7	4.7
6: 6: 94	9.7	11.8	3: 6: 94	5.0	6.2
6: 12: 94	10.0	10.4	3: 12: 94	6.4	6.5
6: 24: 94	7.8	7.8	3: 24: 94	4.3	4.1

由图5.4和图5.5可知: 水泥含量减少前的无侧限抗压强度明显要好于水泥掺量减少后的试件无侧限抗压强度, 这表明水泥掺量对试件的无侧限抗压强度影响显著。水泥掺量高, 其抗压强度也高; 水泥掺量一定时, 试件的抗压强度随赤泥掺量的变化而变化, 掺加赤泥试件的抗压强度均高于未掺加赤泥的试件, 且赤泥

掺量为6%和12%的试件的7d抗压强度值较高，效果最好，这表明赤泥掺量对试件的抗压强度影响显著，对于提高混合料的强度具有明显效果。

由图5.4和图5.5还可知：水泥掺量一定时，赤泥掺量为0，6%，12%时，试件7d及28d龄期的抗压强度值较高，效果较好。对于7d龄期的试样，赤泥掺量为12%时，试件的无侧限抗压强度值最大，效果最好，这表明，掺加12%的赤泥，可有效提高试件7d龄期的抗压强度。

由水泥赤泥稳定级配碎石混合料各配比7d、28d无侧限抗压强度对比图可知：各配合比试件28d龄期的抗压强度值比7d龄期抗压强度值要高，且未掺加赤泥的试件后期强度增长幅度要远大于掺加赤泥的试件，随着赤泥掺加比例的增加，试件后期强度的增幅逐步减缓，这表明赤泥掺量较高对于混合料的早期强度形成具有重要作用，而对于后期强度的增长作用不太显著。

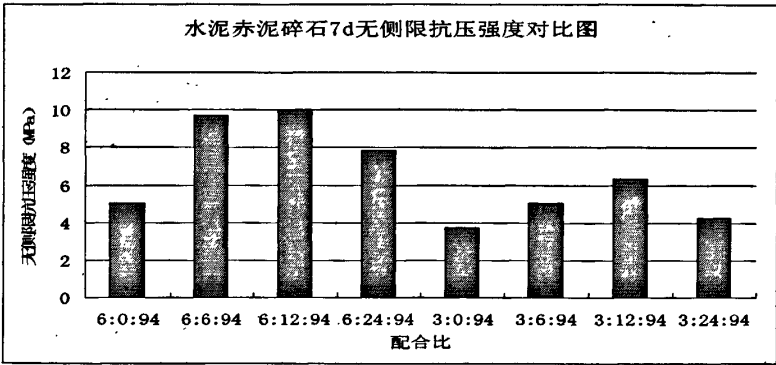


图5.4 水泥赤泥稳定级配碎石各配比7d无侧限抗压强度对比图
Fig5.4 Each mixture rate 7days unconfined compressive strength test result of cement and red mud stabilized macadam

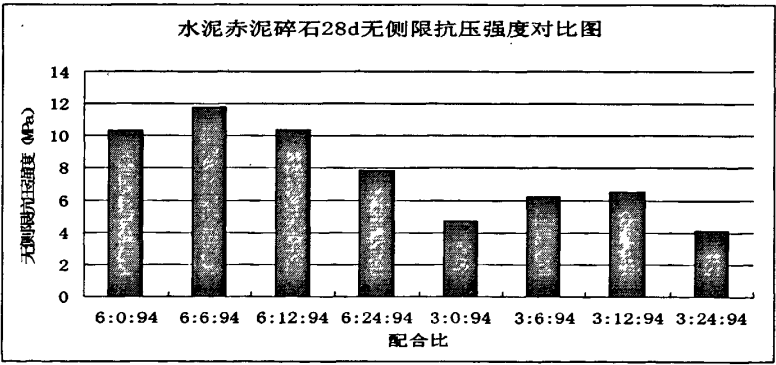


图5.5 水泥赤泥稳定级配碎石各配比28d无侧限抗压强度对比图
Fig5.5 Each mixture rate 28days unconfined compressive strength test result of cement and red mud stabilized macadam

5.5 动弹性模量

用常规的力学方法(测定应力—应变)测定弹性模量,需要大型仪器,测定程序比较繁琐,数据处理也比较困难,而用超声波法测定动弹性模量,测试方法简单,测定快捷,试件在测定过程中无破损。超声波是一种机械振动波,这种波在材料中的传播速度与材料的性质有关,特别是与材料的密度、刚度有关。

本试验采用NM-4B非金属超声检测仪,在无侧限抗压强度试验前测定试样的动弹性模量。首先,在超声检测仪的两个探头上涂抹一些凡士林,利用标准声示棒来调试好仪器,然后用旧布吸去试件表面的可见自由水,将两个探头分别放在试件的两端中心位置,可测出超声波在试样中的传播速度,从而可确定出试件的动弹性模量,试验的仪器和试验过程分别如图5.6和图5.7所示。



图5.6 NM-4B非金属超声检测仪

Fig5.6 NM-4B non-metal ultrasonic tester

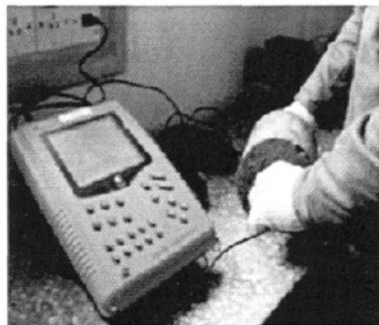


图5.7 超声波法测弹性模量试验过程图

Fig5.7 Ultrasonic tester was used to measure modulus of elasticity

用超声波测定材料的动弹性模量时,只要确定超声波的传播速度 V (试验中可测定超声波在长度为 l 的试样中传播时间 t ,根据 $V = \frac{l}{t}$,便可计算出超声波的传播速度)和试样的密度,即可按下式计算试样的动弹性模量。

$$E_d = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \cdot \rho \cdot V^2$$

$$V = \frac{l}{t}$$

式(5.2)

式中:

E_d —试样的动弹性模量(MPa);

ρ —试样的密度(g/cm^3);

V —超声波通过试样的速度 (m/s);

t —超声波通过试样的时间 (μs);

l —试件的长度 (m);

μ —泊松比, 取0.3。

各配比试样的动弹性模量计算结果如表5.6所示。

表5.6 各配比不同龄期水泥赤泥稳定级配碎石动弹模量

Table5.6 Each mixture rate and different ages' dynamic elastic modulus
of cement and red mud stabilized macadam

配合比	动弹模量 (GPa)		配合比	动弹模量 (GPa)	
水泥: 赤泥: 碎石	7d	28d	水泥: 赤泥: 碎石	7d	28d
6: 0: 94	7.51	8.47	3: 0: 94	6.51	6.21
6: 6: 94	8.11	8.57	3: 6: 94	8.25	6.83
6: 12: 94	7.64	8.19	3: 12: 94	7.60	6.38
6: 24: 94	6.74	5.35	3: 24: 94	4.79	4.75

由弹性模量的测试结果分析, 可得出如下结论:

①比较试样无侧限抗压强度和弹性模量与龄期及各组分掺量的相关性, 可看出弹性模量与抗压强度具有很好的一致性。表明, 采用超声波测定试样的动弹性模量是可行的。

②当起胶凝作用的水泥掺量为6%时, 随着龄期的发展, 其弹性模量也随之增加, 而当水泥掺量为3%时, 试样的弹性模量随龄期的增加略有减少。表明, 对于水泥赤泥碎石混合料, 水泥应保持一定的掺量。

③随着赤泥掺量的增加, 弹性模量先是增加, 当赤泥掺量为水泥掺量的1~2倍时, 混合料的弹性模量最大, 之后随着赤泥掺量的增加, 弹性模量有所降低, 说明对于水泥赤泥碎石混合料, 赤泥的掺入有一最佳量。

5.6 劈裂强度

劈裂试验也称为间接拉伸试验, 试验原理见图5.8, 其通过在圆柱体试件直径方向上施加两个相对的条形荷载, 使其直径平面上产生一个较均匀的拉应力, 并使试件沿这一直径方向产生拉伸破坏。

混合料的劈裂试验的试件同无侧限抗压强度试验的试件, 采用静力压实法成型, 试模尺寸为高×直径=150mm×150mm的圆柱体。试件从试模内脱出并称重量

高后，立即用塑料袋包裹，扎紧不漏气，然后放入恒温恒湿的养生室内养护，整个养生期间养生室的温度保持在 $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，湿度高于95%，养护最后一天试验试件需浸水24h，待试件充分饱水后进行试验。试验前用旧布吸去试件表面的可见自由水，然后将试件置于带压条的模型放在路面材料强度试验仪上，并使试件在试验过程中，保持其变形等速率变化，速率保持在1 mm/min，劈裂试验如图5.9所示。

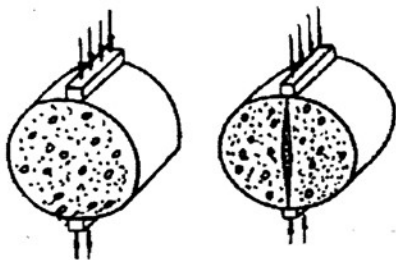


图 5.8 劈裂试验原理图

Fig5.8 Theory graph of splitting test

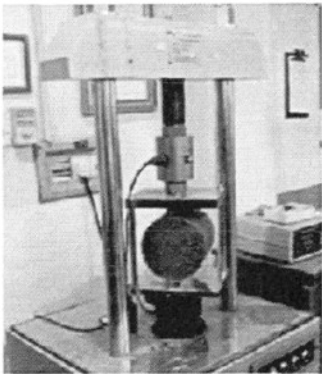


图 5.9 劈裂试验示意图

Fig5.9 Sketch map of splitting test

对于有压载条的圆柱体劈裂抗拉强度 f_{ct} 按下式计算：

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi d_m \times l_m} \tag{式 (5.3)}$$

式中：

f_{ct} — 圆柱体劈裂抗拉强度(MPa)；

P — 极限荷载(N)；

d_m — 圆柱体截面的平均直径(mm)；

l_m — 圆柱体平均长度(mm)。

各配比试件7d和28d劈裂试验结果见表5.7所示。

表5.7 水泥赤泥稳定级配碎石各配比不同龄期劈裂强度

Table5.7 Each mixture rate and different ages'splitting strength
of cement and red mud stabilized macadam

强度	配合比组成（水泥：赤泥：碎石）					
	6：0：94	6：6：94	6：12：94	3：0：94	3：6：94	3：12：94
7d 劈裂强度（MPa）	0.29	0.53	0.79	0.12	0.26	0.17
28d 劈裂强度（MPa）	0.33	0.87	0.89	0.21	0.61	0.53

从表5.7可看出,试件的劈裂强度随着龄期的增长逐渐增强,28d龄期的试件相对7d龄期的劈裂强度有较大的提高;6:6:94与6:12:94两种级配的试件相比可看出,当水泥的含量较低时7d强度明显低于高赤泥含量的试件。但其后期强度,即28d劈裂强度,可与高赤泥含量的试件的劈裂强度相当,这表明,赤泥对于试件的早期强度具有明显的提高效果,但对试件的长期强度的影响不是很明显。

水泥减半后,不论是试件的短期强度还是长期劈裂强度,均有较大的降低。甚至出现了随着赤泥含量的增加,试件早期强度降低的现象,这表明,赤泥含量存在一个最佳值,可以保证试件的早期强度得到提高。

5.7 收缩试验

水泥赤泥稳定级配碎石混合料中含有水泥,水泥的水化是一个体积缩小的过程,而且混合料中的水分蒸发,也有可能发生干燥收缩,这种现象在高温季节施工或养生工作欠缺的时候更为明显。与此同时,环境温度通常也存在一定的昼夜温差,所以,水泥赤泥稳定级配碎石混合料在修建的初期阶段同时受到干燥收缩和温度胀缩的综合作用,相对而言,这个阶段以干燥收缩为主,温度胀缩为辅。经过一定龄期的养生后,水泥完全水化,基层被面层所覆盖,混合料的含水量趋于稳定,基本不再发生变化。在以后的阶段,基层的收缩主要以温度收缩为主。因此,我们在研究水泥赤泥稳定级配碎石混和料作为基层的过程中,有必要对其收缩性能进行研究。

水泥赤泥稳定级配碎石混合料作为基层的时候,其集料的内部广泛分布有孔隙,包括大孔隙和毛细孔。自由水存在于大孔隙中;毛细水存在于毛细孔中;表面水存在于一切固体表面;层间水存在于胶结物间;结构水和结晶水存在于矿物晶体结构的内部。混合料中的水分主要通过两种方式来减少,第一种情况是部分水分散失在空气中,第二种情况是由于混合料中的水泥水化需要一定数量的水来完成。这两种水分减少的方式都会引起混合料的收缩现象。

在第一种水分损失的过程中,混合料表面失水的速率超过内部水分向表面迁移的速率,则会造成毛细管中产生负压,胶结料产生收缩而不能引起塑性开裂。当大部游离水已经失掉后,继续干燥会引起混合料较大的收缩,这种收缩主要由于吸附水和毛细管的水分失去所产生,由各种表面张力所引起。通常液体内部分子在各个方向受到邻近分子的吸引而得到平衡,其所受到的合力等于零。但在液体的表面以及在液体和空气的界面,则形成一种指向液体的力,并力图使其表面缩小,对液体产生压缩作用。这种现象不仅局限于液体,在固体表面也会发生。

混合料的第二种失水为水化收缩或化学收缩。混合料中的水泥水化以后,固

相体积增加,但是水泥和水的绝对体积则是减小的,因为水化反应前后的平均密度不同,水泥胶结材料水化以后存在这种减缩的作用。大部分的硅酸盐水泥浆体完全水化以后,体积减缩的总量为7~9%。在硬化之前,所增加的固相体积填充了原来被水分所占据的空间,使得水泥石更加密实,但在这个过程中宏观体积呈减少的趋势。混合料中水泥掺量的增加也会使混合料干缩变形增大。

此外,集料本身的性质也会影响基层材料的整体干燥收缩性能。通常,孔隙率大、吸水率高、模量值低的集料具有较大的干燥收缩性。养生龄期的增加,胶结物不断的滋生,孔隙率进一步的下降,强度与刚度增大,也可能导致干燥收缩系数的减小。

本课题主要研究了混合料的干缩性能。采用100mm×100mm×400mm棱柱体试件进行试验。成型试件后带模养护1d~2d(视混合料实际强度而定)。试件应在3d龄期(从搅拌加水时算起)从养护室取出,并立即移入干缩室内上架进行测试。上架前应测定试件的初始强度,测三次取平均值。从移入干缩室算起,在1、3、7、14、28d测定试件的长度。测试采用机械测试方法。所用仪器与水泥石灰赤泥稳定土的装置类似,采用百分表读数。装置示意图如图5.10所示。

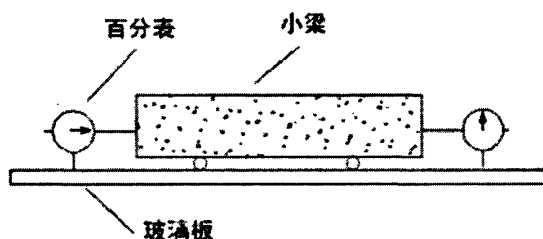


图5.10 收缩试验示意图

Fig5.10 Sketch map of shrinkage test

当环境温度发生变化或试件失水后,试件整体收缩或伸长会引起百分表触头移动并使得百分表产生读数,通过百分表数值的变化得知试件的变形值,为避免百分表触头进入试件,在试件的两边都用环氧树脂粘上小的玻璃片。试样收缩试验测试示意图如图5.11所示。

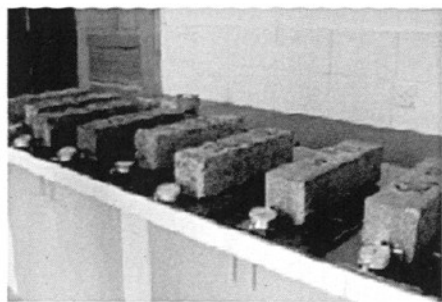


图5.11 水泥赤泥稳定级配碎石收缩试验测试示意图

Fig5.11 Cement and red mud stabilized macadam’s sketch map of shrinkage test

某一龄期的混合料的干缩率按下式计算：

$$S_d = \frac{(X_{0l} - X_{tl})}{L_0} \times 100$$

式 (5.4)

其中： S_d — 龄期d天的混合料干缩率（%）；

L_0 — 试件的长度（mm）；

X_{0l} — 试件的初始长度（mm）；

X_{tl} — 龄期t天的干缩长度测值（mm）。

取3个试件干缩率的算术平均值作为试验结果，干缩率精确至0.0001%。水泥赤泥稳定级配碎石混合料干缩试验测试结果如表5.8所示。

表5.8 水泥赤泥稳定级配碎石混合料干缩试验结果

Table5.8 Dry shrinkage result of cement and red mud stabilized macadam

混合料配合比 (水泥：赤泥：碎石)	收缩率（%）				
	1d	3d	7d	14d	28d
6：6：94	0.0000	0.0002	0.0004	0.0009	0.0019
6：12：94	-0.0014	-0.0002	0.0000	0.0004	0.0019
3：6：94	-0.0009	-0.0002	-0.0003	-0.0002	0.0019
3：12：94	0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0003	0.0019

研究中发现采用机械测法进行干燥收缩系数的测定，其测试结果难以令人满意。主要原因是：

①测试过程中周围环境的细微振动会对测试结果产生较大的影响，稍有不慎，试验就会前功尽弃。例如周围的振动，以至于测试者在读取数据时走动也会使千分表指针发生移动。再者试件两端与基座和百分表接触点在测试过程中的滑动和

剥落也会影响试验结果。

②这种试验方法进行的干缩试验其失水方式只能让试件在自然状态下风干,不能采用环境箱利用升高环境温度的方法加速失水,其原因与机械测法不能测定温缩系数的道理相同,而试件在自然状况下的风干会使试验时间持续很长且不易控制,加大了试验出现误差的机会。

③对于本项目中采用的收缩变形测定试验方法,当所测试样重量大,采用材料的颗粒粒径大时,该方法并不是很合适。原因是,试样重量较大时,垫在试样底下的玻璃棒承受较大的压力,使得玻璃棒不能自由滚动,对试样的收缩变形起到了约束作用;另一方面,由于材料的颗粒粒径较大,百分表的读数受试样表面凹凸影响大,不能准确反应试样的真实收缩变形。

5.8 抗压回弹模量

本试验也是采用静压成型的试件成型方法,制成直径 $\times$ 高=150mm $\times$ 150mm 的试件,如图 5.12。试件养护采用两种养护方式:标准养护方式,即试件脱模后用塑料袋装好放在恒温恒湿的养护室里养护,进行无侧限抗压强度试验试验前一天泡水。进行龄期为 7d、28d、120d 的回弹模量试验。

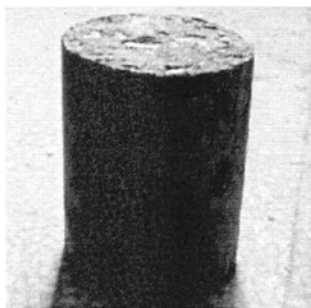


图 5.12 水泥赤泥石灰稳定级配碎石
回弹模量试验成型试件

Fig5.12 Compression rebound modulus fixed
speciraent of cement and red mud
stabilized macadam

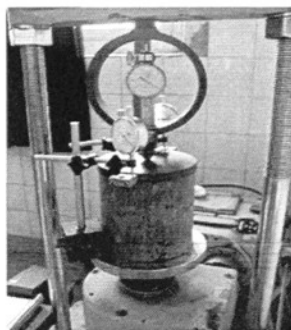


图 5.13 水泥赤泥石灰稳定级配碎石
回弹模量试验

Fig5.13 Compression rebound modulus
experiment of cement and red mud
stabilized macadam

回弹模量试验方法采用顶面法,试验仪器为路面材料强度试验仪,试验中逐级加荷卸载,如图 5.13。

测量结束之后根据下式计算试件的回弹模量 E :

$$E = PH / L \quad \text{式 (5.5)}$$

式中: P ——单位压力 (MPa)

H——试件高度 (mm)

L——试件回弹形变 (mm)

稳定土室内回弹模量试验结果如图 5. 14 所示。

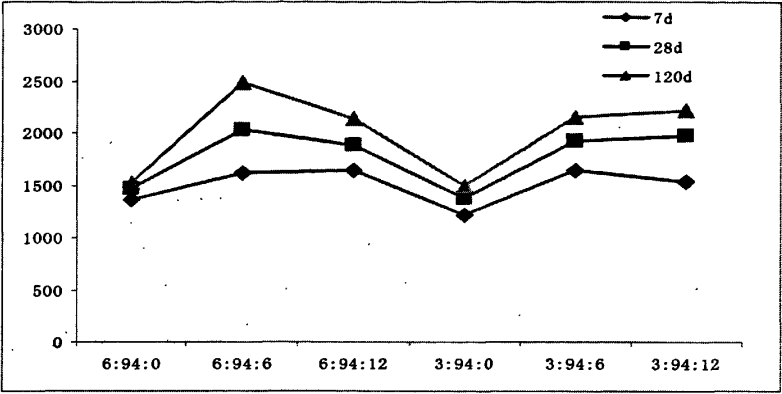


图 5. 14 水泥赤泥稳定级配碎石回弹模量结果

Fig5.14 Compression rebound modulus result of cement and red mud stabilized macadam

由上图可知，混合料试件的回弹模量是随龄期的增长而增长的；赤泥的含量对混合料的回弹模量影响显著，随着赤泥含量的增加相同龄期试件的回弹模量呈现先增后减的趋势，这表明赤泥存在一最佳含量可以使其回弹模量最大；水泥含量对混合料的回弹模量也有较明显的影响。

5. 9 抗冻性

为检测混合料的抗冻性能进行本试验。试验中试件按照预定干密度经静力压实法成型，试模尺寸为高×直径=150mm×150mm 的圆柱体。试样龄期为 120d。饱水后在冰箱(如图 5. 15)中-25℃冻 8h，然后取出放入 20℃中 16h，称其为一个冻融循环^[34]。



图 5.15 抗冻性试验仪器

Fig5.15 Apparatus of frost resistance test

试验结果如图 5.16、5.17 所示：

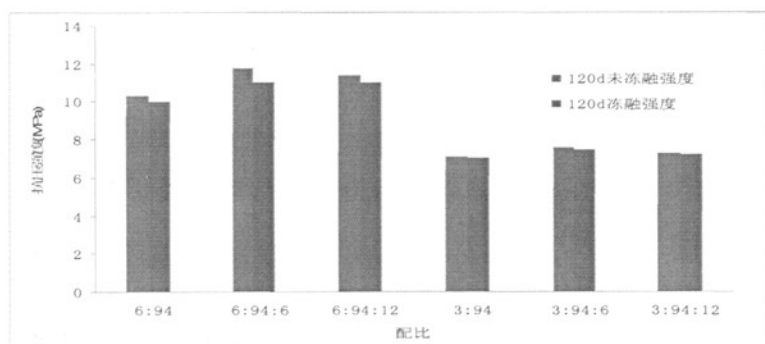


图 5.16 一个冻融循环的试验结果

Fig5.16 One frozen and melt circulation result

由图 5.16 可看出，未冻融的试件抗压强度明显要高于经过冻融循环的的试件强度。不同赤泥掺量的试件经冻融循环后的其抗压强度较为接近，表明赤泥的掺量对于冻融循环抗压强度的影响不明显，但未冻融情况下，不同赤泥掺量对试件的抗压强度有较为明显的影响，其中以级配 6: 94: 6 效果最佳。水泥减半后，对冻融前后的抗压强度都有较大的影响。不论是冻融前的抗压强度还是冻融后的强度较水泥减半前均有一定的降低。

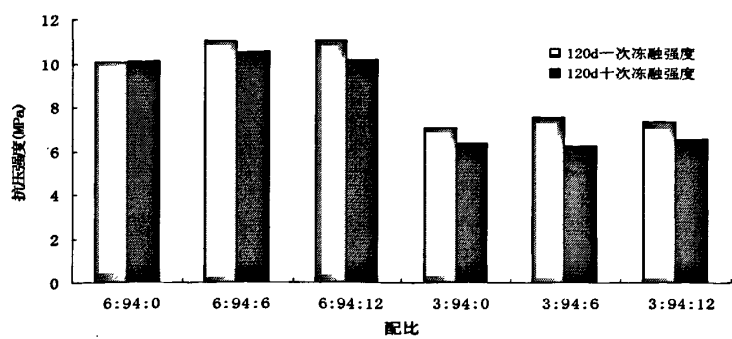


图 5.17 不同冻融循环对抗压强度的影响图

Fig5. 17 Different frozen and melt circulations compression strength

由图 5.17 可以看出：随着冻融次数的增加混合料的冻融强度有所降低；对于不同冻融次数下试件的抗压强度在水泥减半前变化不大，水泥减半后，随着冻融循环次数的不同，抗压强度出现了较大的波动，这表明，水泥过低时，试件的冻融抗压强度不易控制。

5.10 分析结论

通过一系列室内试验对水泥赤泥碎稳定级配碎石混合料的性能进行了系统的研究，得出以下结论：

- ①掺加赤泥对于提高水泥赤泥稳定级配碎石混合料的前期（7d龄期）无侧限抗压强度具有明显作用。水泥掺量一定时，掺加赤泥的试件，其7d龄期的抗压强度均高于未掺加赤泥的试件。
- ②掺加赤泥对于提高水泥赤泥稳定级配碎石混合料的后期（28d龄期）无侧限抗压强度也具有一定的效果。水泥掺量一定时，掺加6%赤泥的混合料，其无侧限抗压强度值要高于未掺加赤泥的混合料。表明，赤泥有利于改善混合料长期力学性能。
- ③赤泥的掺入对于提高混合料早期强度的效果远优于其对混合料长期强度的影响效果。通过对7d和28d龄期相同配合比的混合料强度测试结果比较发现：未掺加赤泥的试件后期强度增长幅度要远大于掺加赤泥的试件，随着赤泥掺加比例的增加，试件后期强度的增幅逐步减缓。
- ④赤泥掺量对于混合料的早期劈裂强度影响显著，而对混合料的长期劈裂强度性能影响不大。在保持水泥掺量一定的情况下，对于7d龄期的试件，水泥掺量为6%时，随着赤泥掺量的增加试件的劈裂强度明显增加；而当水泥掺量为3%时，随

着赤泥掺量的增加试件的劈裂强度有所减小。

⑤水泥赤泥稳定级配碎石试件的动弹模量随着赤泥的增加先是增加，当赤泥掺量为水泥掺量的1~2倍时，动弹模量最大，之后随着赤泥掺量的增加，动弹模量呈减小趋势。

⑥从无侧限抗压强度、劈裂强度以及动弹模量的测试结果可得出，对于水泥赤泥稳定级配碎石，赤泥的最佳掺量为水泥掺量的1~2倍。

⑦不同赤泥掺量的试件经冻融循环后的其抗压强度较为接近，表明赤泥的掺量对于冻融循环抗压强度的影响不明显。

第六章 赤泥用于路面结构层中的固化作用机理

6.1 赤泥用于水泥石灰稳定土底基层时的固化作用机理

6.1.1 石灰与土、石灰与赤泥的作用机理

水泥石灰赤泥稳定土混合料在压实成型后,系由固相(水泥、石灰、赤泥、土)、液相(水溶液)和气相(空气)三相组成。三相之间相互作用的结果,使得水泥石灰赤泥稳定土混合料具有一定的强度和刚度,从而满足了路面底基层的性能要求。

水泥石灰赤泥稳定土的强度形成过程中,主要依靠粘合料所发生的一系列反应,使得赤泥与结合料紧密连接到一起。水泥石灰赤泥稳定土的强度形成机理很大程度上与水泥凝结硬化形成强度相类似:其混合料充分拌和后,在一定 PH 条件下(碱性环境中),通过各种途径的一系列化学反应和离子交换作用,使混合料中的矿物成分在微颗粒周围形成晶体结构的多种水化物。这种以微颗粒和水化物组成的胶体粒子在分子力作用下,凝聚成网状结构,在吸收化学反应过程中放出的热量、外界压力(碾压)、温度(气温)的作用下而硬化,形成以化学键相结合的结晶体网状结构骨架而形成强度,生成密实而坚硬的半刚性板体^[7]。

其次,石灰与土相互作用,亦可以改善土的性质。石灰作为一种土壤固化剂,与土发生盐基交换产生胶结,粘土颗粒与石灰相互作用,通过钙离子减少土的体积变化、从而使土壤的液限减小、塑限增大,自由膨胀率和塑性指数降低。在初期主要表现在土的结团、塑性降低、最佳含水量增加、最佳密实度减小;在后期,由于结晶结构的形成,提高土板体性、强度和水稳定性。土为三相结构,加入石灰共同产生物理吸附作用,并发生离子交换反应、氢转化钙的碳化反应、火山灰反应及氢氧化钙的结晶反应,使得土的凝聚作用得以加强,强度逐渐提高。由于土基含有一定量的硫酸盐和腐殖质成份(分解胡敏酸),使得土本身的亲水性、膨胀性、塑性增大、这对以后水泥的水解和结构形成是不利的;掺入石灰后,石灰与土的微粒部分和腐殖质发生吸附交换,可以一定程度上阻止这种不利影响。由于土中含有大量的粗粒砂,在一般温度下,石灰与微石英砂或其它硅土材料的化学作用是很强烈的,在集料拌和后的长时间内土体液相石灰浓度很高,利于含水硅酸钙稳定存在,反过来促进结构的产生和加强。

将消石灰加到土中并加水拌和后,土的性质和结构很快开始变化。开始是絮凝和絮聚,随后粘土颗粒就形成粗杯状的较大颗粒。这种变化将依次地改变土的液限、塑限、塑性指数和压实性能。

根据化学分析和微观结构分析。通常认为:石灰加入土后,发生一系列的化

学反应和物理化学反应，主要有离子交换反应、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的结晶反应和碳酸化反应以及火山灰反应。这些反应的结果使粘土颗粒絮凝，生成氢氧化钙、碳酸钙晶体和硅铝酸钙等凝胶胶结物。这些胶结物逐渐由凝胶状态向凝聚状态转化，致使石灰土的刚度不断增大，强度和水稳性不断提高。

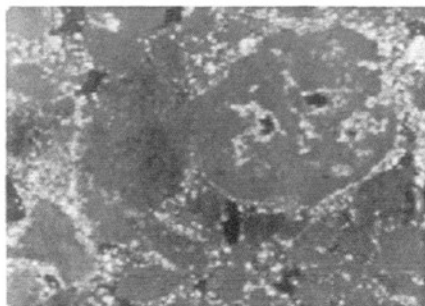


图6.1 石灰赤泥混合料试样微观结构（正交偏光） $\times 250$

Fig6.1 Microstructure of lime and red mud mixture

在偏光显微镜下观察经水化保养30d的石灰赤泥混合料试样薄片，可看到赤泥中的透明物（如钙钛矿和硅酸钙等）呈均匀的细小微粒团块状，如图6.1所示。

因被铁浸染，其透明度很差，多呈棕色或暗红色。团块大小在 $0.07\sim 0.7\text{mm}$ 之间。加入的石灰以及分散的隐晶质或星点状的凝聚体白色颗粒分布于赤泥颗粒边缘或孔隙中起胶凝作用。赤泥团块主要起骨料作用。从整体来看，赤泥团块较大，表面粗糙，各团块间孔隙较大，加入的石灰量不足以充满全部孔隙，所以试件显得不够致密。在高倍扫描电镜下观察发现，赤泥团块表面呈蜂窝状，如图6.2所示，大小空洞的壁较紧地连接在一起。

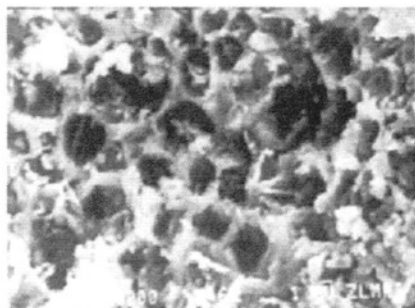


图 6.2 赤泥颗粒表面的蜂窝状构造（扫描电镜） $\times 4000$

Fig6.2 Alveolate structure of red mud granule

根据能谱分析,组成蜂窝的矿物是硅酸二钙。赤泥颗粒的这种外观和成分的形成是因为它是由铝土矿、石灰、碱和粉煤灰按比例配制的生料经高温煅烧后再用水浸出所造成的。在浸出中,高温下生成的可溶性铝酸钠被溶解,残留下来的则是硅酸二钙等不溶或难溶的化合物。

在扫描电镜下观察到,洞壁结构比较致密;在很多洞壁上粘满了胶体隐晶质的氢氧化钙,在高倍扫描电镜下也难分辨出其晶体颗粒,如图6.3所示。另外,看到大多数蜂窝内是空的,石灰的水化物主要胶结蜂窝外壁,较少填充蜂窝,这样减少了胶结面积,对混合料的强度形成不利。



图 6.3 赤泥颗粒表面粘结的隐晶体氢氧化钙(扫描电镜)×4000

Fig6.3 Red mud granule felt secluded crystal $\text{Ca}(\text{OH})_2$

在试样的局部可观察到分布在矿物颗粒上和孔隙处的短针状晶体,如图6.4所示,测定的能谱成分上看,应该是硅铝酸钙晶体,但含有少量的硫(在赤泥中应是硫化钙的形式)。



图 6.4 赤泥石灰混合料试样中的短针状晶体(扫描电镜)×6000

Fig6.4 Hour hand crystal in lime and red mud stabilized clay

在赤泥石灰混合料中,主要的胶凝材料是石灰,以上所观察到的现象主要与

石灰的水化过程有关。关于石灰的硬化过程, B. B. 澳新所提出的理论中, 把该过程划分为六个时期, 即溶解期、胶化期、凝聚期、晶体期、干燥期和碳酸化期。

在前期, 石灰的变化是石灰水解, 生成氢氧化钙。氢氧化钙溶于水, 生成过饱和溶液, 析出后呈乳胶状, 并靠石灰颗粒的吸水作用使胶体粒子靠近和粘结, 形成凝聚结构和凝聚强度。此时的强度, 是由范德华分子吸力的作用产生的, 其强度很小。在后期氢氧化钙晶体长大, 形成结晶结构。在该结构中, 各晶体通过结晶接触点以化学键相互作用, 因而具有较高的强度。在干燥过程中, 由于水的表面张力, 产生凹形弯月面的毛细管压力, 使粒子更加紧密而得到附加的强度。该强度很小, 但水蒸发将使溶液过饱和, 从而促使结晶和硬化。最后是碳酸化, 即氢氧化钙从空气中吸收二氧化碳生成碳酸钙。此时, 固相体积增大, 使试件进一步致密, 获得最终的碳酸化强度。

除石灰以外, 还有以下一些因素也有助于试件硬化和力学强度的提高。

①赤泥自身的胶凝性。其来源除赤泥中含有少量极分散的水化石榴石和方钠石等颗粒具有类似粘土粒子间吸附作用外, 其主要矿物硅酸二钙具有胶凝性, 进行了类似于水泥水硬性胶凝反应。尽管该矿物的水化速度很慢, 但确实有少量已经水化, 并产生某些反应, 生成了在研究中所看到的少数针状、棒状晶体, 强化试样。这也可从赤泥掺量与试样强度的测试结果得知。

②赤泥表面粗糙, 且蜂窝壁致密, 具有一定的强度, 对强化试件有利。因在试件受力时, 这种颗粒表面不利于颗粒与胶结物之间产生滑移和分离。然而, 在胶凝物质掺量比较低时, 其水化物不足以填充蜂窝, 这时只胶凝外壁, 窝内保持空洞, 从而减少胶凝面积, 对试件的强度不利。这与总胶凝量为 6% (3%水泥+3%石灰) 时的水泥石灰赤泥稳定土 7d、28d 无侧限抗压强度低于总胶凝量为 11% (5%水泥+6%石灰) 时的 7d、28d 无侧限抗压强度一致。

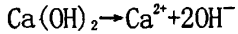
总结石灰对混合料强度的形成机理如下:

1) 石灰在混合料中的作用

作为基层主要掺合料的赤泥虽然具有很多的活性成分, 如 CaO 占 44.25%, 胶凝矿物 α' -硅酸二钙占 53%, 但它本身很少具有自凝性和粘结性, 必须掺用熟石灰来激发它的活性, 生成一系列的水化物, 产生胶凝能力, 凝固其本身和凝固其它材料, 如粘土。在土中掺入适量的石灰, 并在最佳含水量下拌匀, 通过机械压实使其各种材料的微小分子相接触, 在适当的水分和温度下, 各种材料的活性和具有胶凝性能的矿物发生水化反应, 生成具有胶凝性能的晶体或胶凝水化物, 随着龄期的延长, 水化反应越充分, 产生的水化物越多, 在赤泥混合料分子结构内部形成晶体骨架网络, 这种水化、凝结和硬化的过程就是赤泥混合料强度的形成的机理, 是一个复杂的物理、化学反应, 从而使土的性质发生根本变化。

2) 石灰在水溶液中的解离作用

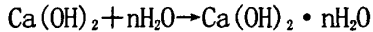
熟石灰在水溶液中可溶解解离成 Ca^{2+} 和 OH^- ，并散发微量的热：



这一过程提供了大量的 Ca^{2+} 和 OH^- 离子，使混合料液相的 PH 值升高。这是其它后续反应的基础。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 虽是强碱，但在水溶液中由于离子间的相互吸引，使它表现出一定的电离度，且电离度随 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液浓度的减小或温度的升高而增大。

3) 石灰的结晶作用

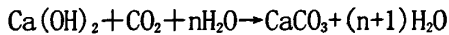
液相水溶液中的氢氧化钙可以在溶液水分蒸发所造成的过饱和状态下发生溶解的逆反应—结晶作用，形成氢氧化钙晶体，其化学反应式如下：



石灰吸收水分形成含水晶格并由胶体逐渐成为晶体，这种晶体相互连接，并与赤泥结合形成共晶体，把固体颗粒胶结成整体，从而产生一定的结构强度。与不定形的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 相比，晶体 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的溶解度几乎减小一半，因而由晶体 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 形成的结晶结构的水稳定性比由 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 胶体形成的凝聚结构的水稳定性好，使得混合料的稳定性得以提高。

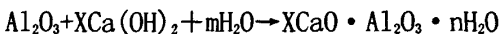
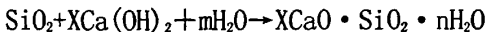
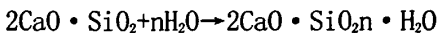
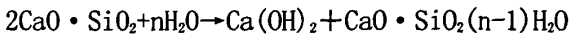
4) 石灰的碳化作用

液相中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 也可以与气相或溶解于水中的 CO_2 反应，产生碳化作用：



CaCO_3 晶体具有较高的强度和水稳定性，它对粉煤灰的胶结作用使粉煤灰得到了加固。当 CaCO_3 晶体沉积在混合料颗粒间隙中时，产生一定的胶结强度。由于 CO_2 可能由混合料的空隙进入，混合料的表层碳化后形成的硬壳阻碍 CO_2 进一步渗入，因而 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的碳化作用相当缓慢，是形成混合料后期强度的原因之一。

另外，赤泥中的主要胶凝成分 SiO_2 、 CaO 和 Al_2O_3 等也与熟石灰发生一系列化学反应，主要的水化反应有：



由于熟石灰与赤泥、土中的活性物质发生了一系列的相互作用，从而使土的性质发生了根本改变。初期主要表现为土的结团、塑性降低、最佳含水量增加和最大密度减少等，后期主要表现为结晶结构的形成，从而提高其板体性、强度和稳定性^[7]。

6.1.2 水泥与土、水泥与赤泥的作用机理

在偏光显微镜下观察经水化保养30d的水泥赤泥混合料试样薄片,可观察到水泥中各矿物多呈细小分散颗粒,在正交光下透明,呈隐晶体,均匀地分散于赤泥颗粒边缘或孔隙中,形成亮边(如图6.5所示),起胶凝作用。有少量呈集合状颗粒(白色)存在。试件结构不致密,各颗粒间存在大量孔隙(黑色)。

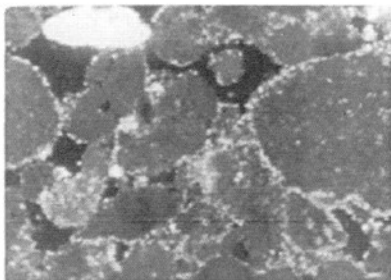


图6.5 水泥赤泥混合料试样微观结构(正交偏光)×250

Fig6.5 Microstructure of cement and red mud mixture

在高倍扫描电镜观察下可看到,水泥水化生成针状晶体如图6.6所示,赤泥颗粒表面的水泥水化产物如图6.7所示,赤泥颗粒周围的“亮边”是由胶质物质和细针状及毛发状晶体组成的。

这些晶体都生长在赤泥颗粒表面粘结的由水泥矿物水化生成的凝胶状物质上,个别未水化的较大矿物颗粒也分散在其中。在试件中,赤泥主要起骨料作用。在水泥的整个水化过程中,水泥矿物不外乎有石膏水化溶解和再结晶、几种铝酸盐和硅酸盐的水化、分解和结晶及氢氧化钙的碳酸化作用等,形成胶体、针状或各种形状的晶体,共同起凝结和硬化作用。

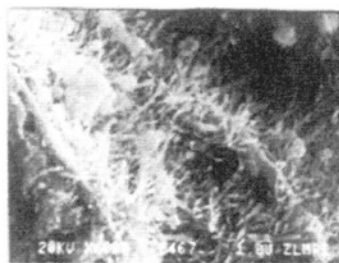


图6.6 水泥水化生成针状晶体(扫描电镜)×6000

Fig6.6 Cement hydration created acerate crystal



图 6.7 赤泥颗粒表面的水泥水化产物（扫描电镜）×2000

Fig6.7 Red mud granule surface cement hydration product

水泥分布在土中构成坚固的核心, 在所有的空隙中形成水化水泥的骨架, 联结土粒。在水泥稳定土中, 由于水泥用量很小, 水泥的水化完全是在土的围绕下进行的, 其凝结速度比在水泥混凝土中进行的缓慢。水泥与土拌和后。水泥矿物与土中的水分发生强烈的水解和水化反应 同时从溶液中分散 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 并形成其它水化物。

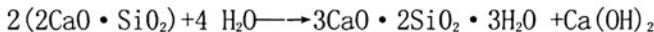
水泥在稳定土中的作用主要是: 改变土的塑性, 增加土的强度和稳定性。水泥加入塑性土中后能大大降低土的塑性。随着的龄期增长, 其塑性指数愈小, 同时, 将大大增加稳定土的强度和稳定性; 而且水泥剂量愈大, 稳定土的强度愈高, 稳定性愈好。水泥在混合料中强度的形成主要有以下几个反应:

①水泥石骨架的形成

硅酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$): 硅酸三钙在水泥中掺量最高(占40%~45%), 是决定强度的主要因素。



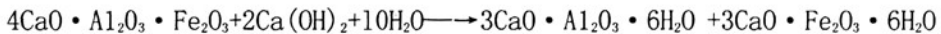
硅酸二钙($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$): 它在水泥中掺量也很高(占30%~35%)。主要产生后期强度。



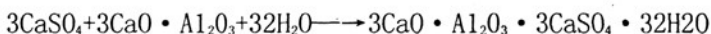
铝酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$): 约占水泥重量的6%, 其水化速度最快, 能促进早凝。



铁铝酸四钙($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$): 约占水泥重量的10%, 能促进早期强度。



硫酸钙(CaSO_4): 约占水泥重的4%。



当水泥的各种水化物生成后, 有的继续硬化, 形成水泥石骨架; 有的与土相互作用, 发生吸附活性形成稳定联接, 生成结晶矿物, 使土固结, 提高混合料的强度。

②氢氧化钙的物理化学作用

离子交换及团粒化作用：在水泥水化后的胶体中 Ca^{2+} 与 $2(\text{OH})^-$ 共存，而构成土的矿物表面会带有 Na^+ 、 K^+ 离子， Ca^{2+} 会与土中的 Na^+ 、 K^+ 离子进行当量吸附交换，从而使土粒形成土团，而水化物具有强烈的吸附性使混合料进一步结合起来形成稳定联结。

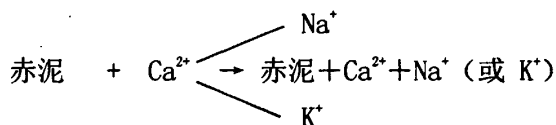
硬凝反应：随着水化反应的深入， Ca^{2+} 离子析出量大于离子交换需要量后，在碱性环境中则与土中的矿物 SiO_2 和 Al_2O_3 发生反应，生成不溶于水的稳定结晶矿物。

碳酸化作用：水化物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 不断地吸收水中的 HCO_3^- 和空气中 CO_2 作用生成碳酸钙。 $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ 这样的反应也能使土固结，提高土的强度，但是比硬凝反应的作用要差一些。氢氧化钙的物理化学作用使土粒形成稳定的团粒结构，水泥石将形成的稳定团粒结构包裹并连接形成坚强的整体。因此，水泥稳定土是水泥石的骨架作用与氢氧化钙的物理化学作用共同作用的结果。

尤其当用水泥稳定粘性土时，粘性土中的单个颗粒较水泥颗粒小得多，因此，水泥不可能包土颗粒。实际上，粘性土被粉碎后成一个一个小土块，小土块被水泥浆包围，然后在压实作用下被压缩成一体。用水泥稳定非粘性土时，由于非粘性土的单个土颗粒的尺大于水泥颗粒，水泥由可能全部地或部分地包单个土颗粒。如单个土颗粒被水泥包，并通过压实使颗粒紧密接触，当水泥硬化时，它们将胶结在一起。胶结时非粘性土具有明显的粘性，并使它能够抵抗交通荷载或温度应力所引起的形变。混合料中胶结面积增加，能够改善材料的强度。

③各种离子交换作用

所谓离子交换作用是指稳定剂中高价阳离子在一定的条件下替换基层材料中某些低价金属离子（ K^+ ， Na^+ ）等的作用。通过离子交换，使基层材料颗粒凝聚而增强了粘聚力，并使其水稳定性提高。混合料加水拌和后，所形成的 Ca^{2+} 能与赤泥表面的 K^+ 和 Na^+ 等离子进行当量吸附交换：



④赤泥中的 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 矿物质进行的类似于水泥水硬性胶凝反应

上述四种反应不全都是立刻完成的，有的是随着时间的推移逐渐发展，经一段时期后才会结束。在此期间胶体、晶体不断增多、长大，彼此逐渐接触、交叉，除将未参加化学反应的赤泥中的其他矿物粘结在一起外，并形成一个胶体加晶体的空间网络结构。这个坚固的空间网络是混合料强度形成的结构原因。不言而喻，形成混合料强度的另一个必要条件是压实。当混合料加水拌和后，应及时碾压，让上述的化学反应在压实的混合料中进行，如果不压实，化学反应照常进行，

但形不成网络结构, 充其量, 反应后的混合料变为一堆具有一定水稳定性的松散集合体, 没有强度, 不能形成板体结构^[7]。

6.1.3 水泥赤泥石灰稳定土混合料的扫描电镜和能谱分析

基于以往对石灰与土, 石灰与赤泥, 水泥与土, 水泥与赤泥的强度性成机理的研究, 本课题对水泥石灰赤泥稳定土进行扫描电镜和能谱分析的微观分析。

研究采用重庆第三军医大学 Hitachi(日立) S-3400N 扫描电子显微镜对水泥赤泥石灰稳定土和水泥赤泥稳定级配碎石材料 28d 龄期试件进行分析。从静压成型的圆柱体试件中部取得较规整的小块烘干脱水终止水化后作为微观分析的试件。所用仪器见下图所示。

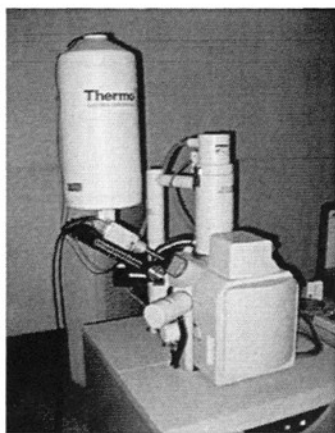


图 6.8 Hitachi(日立) S-3400N 扫描电子显微镜

Fig6.8 Hitachi S-3400N scanning electron microscopy

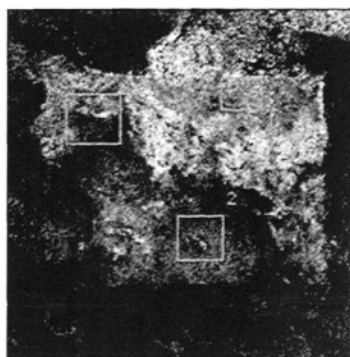


图 6.9 水泥石灰赤泥稳定土的低倍扫描电镜

Fig6.9 Low power scanning electron microscopy
of cement lime and red mud stabilized clay

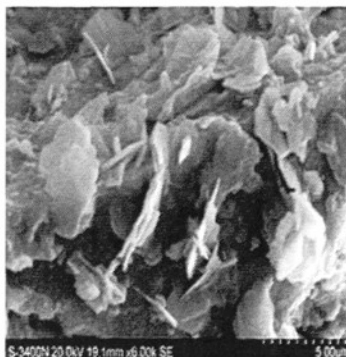


图 6.10 区域局部放大图

Fig6.10 Part enlargement of distiction

由低倍扫描电镜图，可以看到大片的由石灰和水泥胶结料水化产生的水化产物（图中白色部分）包裹在赤泥和土颗粒的表面，由图还可以看到，试件表面致密连续，未见大量的空隙。表明混合料结构致密，受力良好。

由试件局部高倍扫描电镜图可以明显看出，混合料表面结构致密，图中针形短棒状物质应为水泥水化生成的产物，块状物应为赤泥颗粒和土颗粒的混合物，白色物质应为未搅拌开的石灰颗粒。图中水泥水化的针状产物将相邻的赤泥或土颗粒联结起来形成受力空间结构，赤泥颗粒在混合料中起到了骨料的作用，有利于提高水泥赤泥石灰稳定土混合物的力学性能。

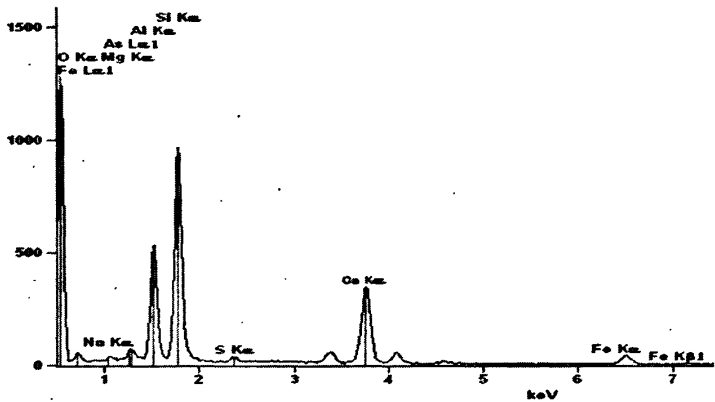


图 6.11 试件表面局部扫描分析结果

Fig6.11 Part scanning and analyzing result of specimen surface

表 6.1 扫描分析的元素百分含量

Table6.1 Elementary percent of part scanning and analyzing result

元素	重量百分比 (%)	重量百分比相对 误差 (%)	原子浓度 (%)	原子浓度相 对误差 (%)
O	31.58	+/- 0.39	61.06	+/- 0.75
Na	0.28	+/- 0.12	0.37	+/- 0.16
Al	8.58	+/- 0.28	9.83	+/- 0.32
Si	15.36	+/- 0.30	16.91	+/- 0.33
S	0.23	+/- 0.06	0.22	+/- 0.06
Fe	2.63	+/- 0.48	1.46	+/- 0.26
As	0.7	+/- 1.48	0.29	+/- 0.61
Ca	40.64	+/- 0.97	9.85	+/- 0.23

由上表和图可以看出混合料中主要元素为 Ca、O、Si、Al 和 Fe。其中 Ca 和 O 元素含量最高，Si 元素次之，Al 和 Fe 的含量也较高，表明在混合料中的主要成分是含钙的硅酸盐、铝酸盐和铁铝酸类化合物，这都是水泥水化生成的产物，它们对混合料的强度形成具有重要的影响。

6.2 赤泥用于水泥稳定级配碎石基层时的固化机理

水泥赤泥稳定级配碎石混合料强度的形成始于水泥的水化。水泥遇水后，水泥遇水后，硅酸三钙 (C_3S)、硅酸二钙 (C_2S)、铝酸三钙 (C_3A) 和铁铝酸四钙 (C_4AF) 与水反应，生成六角形的 $Ca(OH)_2$ 、纤维状 $C-S-H$ 、方板状水化铝酸钙以及六角板状水化铝酸钙 (C_4AH_13)。因此，水泥赤泥稳定级配碎石的强度形成过程，从微观上是一个水化产物由无定形凝胶向低结晶度、最终到高结晶度的发展过程。

在水泥赤泥稳定级配碎石混合料体系中，除了水泥水化作用产生各种具有凝聚作用的凝胶体，对混合料的强度有贡献作用外，水泥水化的产物与赤泥可发生作用，如前节所述，水泥水化产物可与赤泥作用，也产生具有凝聚作用的胶结物，对水泥赤泥碎石混合料的强度也有贡献作用。同时赤泥掺入到水泥稳定碎石中后，增加了水泥水化凝胶物（水化产物）的数量，从而增强了硬化浆体中颗粒之间的联结强度；赤泥掺入后，不但不妨碍水泥的水化作用过程，而且对水泥的水化有促进作用，即加速了水泥的水化。

因此，水泥赤泥稳定级配碎石混合料形成强度的机理是水泥的水化作用、水泥水化产物与赤泥的作用、赤泥对水泥水化的促进作用等共同作用的结果。

6.2.1 水泥赤泥稳定级配碎石混合料的扫描电镜和能谱分析



图 6.12 水泥赤泥稳定级配碎石的低倍扫描电镜图

Fig6.12 Low power scanning electron microscopy of cement and red mud stabilized macadam

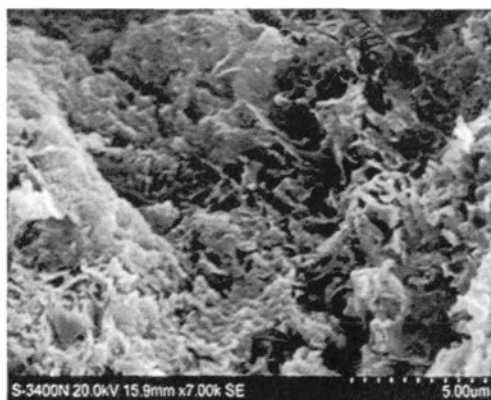


图 6.13 局部高倍扫描电镜图

Fig6.13 High power scanning electron microscopy of part

低倍扫描电镜图反映出水泥石泥稳定级配碎石混合料表面虽凹凸不平但未见明显的孔洞，整体密实。由局部高倍扫描电镜图可以清晰的看到赤泥颗粒在水泥水化产物胶结作用下形成的空间网状结构，赤泥颗粒和矿粉在胶结料的作用下紧密的联结在一起裹附在碎石表面，既作为骨料之间的填隙料又可作为联结骨料的胶结体，使得混合料骨料联结牢靠，提高了混合料的强度。

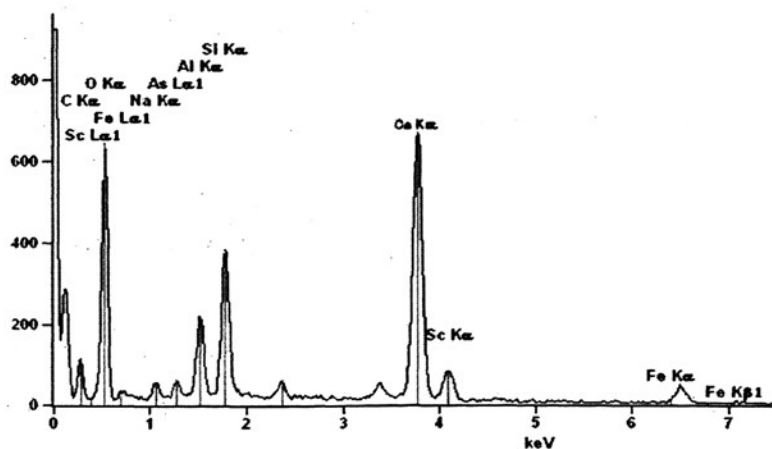


图 6.14 试件表面局部面扫描分析结果

Fig6.14 Part scanning and analyzing result of specimen surface

表 6.2 扫描分析的元素百分含量

Table6.2 Elementary percent of part scanning and analyzing result

元素	重量百分比 (%)	重量百分比相对 误差 (%)	原子浓度 (%)	原子浓度相 对误差 (%)
O	14.08	+/- 0.28	46.84	+/- 0.94
Na	1.13	+/- 0.22	2.62	+/- 0.52
Al	3.96	+/- 0.22	7.81	+/- 0.44
Si	6.01	+/- 0.21	11.38	+/- 0.40
Fe	2.47	+/- 0.45	2.35	+/- 0.43
Ca	65.02	+/- 1.14	27.11	+/- 0.48

由上图和上表可以看出，混合料中的主要元素与水泥赤泥石灰稳定土一至，均为 Ca、O、Si、Al 和 Fe。

通过对水泥赤泥石灰稳定土和水泥赤泥稳定级配碎石材料的扫描电镜和能谱分析以及前两节的试验分析结论可知，水泥和石灰对混合料的强度形成其主要作用，赤泥在混合料的强度形成过程中起到一定的推动作用。一方面赤泥可以作为混合料中的细集料，降低混合料的空隙率，使得混合料密实，改善混合料的力学性能；另一方面，赤泥也起到了一定的胶结料的作用，他可以同水泥等胶结料发生反应，生成具有胶结作用的物质，可以增强硬化浆体中颗粒之间的联结强度，从而提高混合料的整体强度。

第七章 赤泥在道路工程中的实际应用与施工技术要求

7.1 赤泥在道路基层中的实际应用

7.1.1 石灰粉煤灰稳定赤泥基层

论文研究项目与河南省交通科学研究所和郑州公路总段荥阳县公路段于合作铺筑了试验段。该试验段位于 310 国道主干线荥阳线老城至上街区间，具体位置为桩号 618+927~619+977，路基宽度 22 米，快车道 15 米，慢车道 3 米，试验路面铺筑在快车道上，铺筑长度 50 米。

路面结构为石灰粉煤灰稳定赤泥基层，长 50 米，宽 15 米，厚 24 厘米，配合比为石灰：粉煤灰：赤泥=6：24：70。

面层采用沥青贯入 6 厘米，磨耗层采用沥青表面处治 3 厘米。

路面基层采用人工路拌，人工摊铺整型，机械碾压，在中间快车道上施工，两边慢车道上通行，未中断交通。

试验路铺设过程中，对结构层表面弯沉、平整度、路拱坡度等进行了测定，测定结果分别见表 7.1、表 7.2、表 7.3。

表 7.1 结构层表面弯沉(0.01mm)测定结果

Table7.1 Testing result of structure layer surface deflection (0.01mm)

桩号	基层路面种类	土基	基层	面层		
				第一次	第二次	第三次
618+927~618+977	石灰粉煤灰稳定赤泥(8: 92)	245	85	41	32	39

表 7.2 结构层表面平整度测定结果

Table7.2 Testing result of structure layer surface roughness

桩号	检测段数	基层	面层
618+927~618+977	10	8(7~8mm), 2(11~16mm)	10(5~10mm)

表 7.3 路拱坡度测定结果

Table7.3 Testing result of road arch's grade

桩号	检测断面数	面层
618+927~618+977	10	9(1.6~2.3%),1(2.7%)

石灰粉煤灰稳定赤泥基层结构的压实度可达 93%。

施工实践及使用过程表明,石灰粉煤灰稳定赤泥(6:24:70)基层结构使用效果好,且造价低廉。经过雨季,冻融不利气候条件的考验,桩号 618+927~618+977 石灰粉煤灰稳定赤泥(6:24:70)段路面平整坚实裂缝少,并未发生其它病害,说明该种赤泥混合料基层具有强度高,板体性好,水稳定性好和抗冻性好的优点。

7.1.2 石灰赤泥稳定土基层

论文研究项目与河南省交通科学研究所和郑州公路总段荥阳县公路段合作铺筑了两段石灰赤泥稳定土基层试验路段。

①第一段试验路面

第一段试验路面位于 310 国道主干线荥阳线老城至上街区段,系二级公路降坡改建工程,路基宽度 22 米,快车道 15 米,慢车道 3 米,试验路面铺筑在快车道上。为更好的研究赤泥混合料基层,还铺设了石灰稳定土对比基层,其结构分别为:

1)桩号 618+777~618+827 铺设石灰稳定土对比基层,长 50 米,宽 15 米,厚 26 厘米,配合比为石灰:土=12:88。

2)桩号 618+877~618+927 铺设石灰赤泥稳定土基层,长 50 米,宽 15 米,厚 24 厘米,配合比为石灰:赤泥:土=6::36:58。

3)桩号 618+977~619+027 铺设石灰赤泥稳定土上基层,长 50 米,宽 15 米,厚 12 厘米,配合比为石灰:赤泥:土=6:36:58

水泥稳定赤泥下基层,长 50 米,宽 15 米,厚 12 厘米,配合比为水泥:赤泥=6:94

4)桩号 619+027~619+077 铺设石灰赤泥稳定土上基层,长 50 米,宽 15 米,厚 12 厘米,配合比为石灰:赤泥:土=6:36:58。

纯赤泥 100%下基层,长 50 米,宽 15 米,厚 12 厘米

面层均采用沥青贯入 6 厘米,磨耗层采用沥青表面处治 3 厘米。

路面基层采用人工路拌,人工摊铺整型,机械碾压,在中间快车道上施工,两边慢车道上通行,未中断交通。

试验路铺设过程中,对结构层表面弯沉、平整度、路拱坡度等进行了测定,测定结果分别见表 7.4、表 7.5、表 7.6。

表 7.4 结构层表面弯沉（0.01mm）测定结果

Table7.4 Testing result of structure layer surface deflection (0.01mm)

桩号	基层路面种类	基层	面层		
			第一次	第二次	第三次
618+777~618+827	石灰土（12：88）	90	28	53	56
618+877~618+927	石灰赤泥稳定土 （6：36：58）	92	37	62	65
618+977~619+027	石灰赤泥稳定土 （6：36：58） 水泥稳定赤泥 （6：94）	125	44	31	58
619+027~619+077	石灰赤泥稳定土 （6：36：58） 纯赤泥（100%）	114	46	26	37

表 7.5 结构层表面平整度测定结果

Table7.5 Testing result of structure layer surface roughness

桩号	检测段数	基 层	面层
618+777~618+827	10	6(2~10mm),4(12~14mm)	8(5~9mm),2(11~12mm)
618+877~618+927	10	8(5~8mm),2(11~13mm)	9(3~9mm),1(11m)
618+977~619+027	10	9(5~10mm),1(12mm)	8(4~10mm),2(11~12mm)
619+027~619+077	10	8(4~10mm),2(12mm)	9(6~10mm),1(12mm)

表 7.6 路拱坡度测定结果

Table7.6 Testing result of road arch's grade

桩号	检测断面数	面层
618+777~618+827	10	8(1.5~2.4%),2(1~1.2%)
618+877~618+927	10	7(1.5~2.3%),3(0.9~2.8%)
618+977~619+027	10	9(1.5~2.5%),1(1.2%)
619+027~619+077	10	5(1.5~2.5%),5(0.7~0.9%)

压实度：四种基层结构的压实度均可达到 90~93%。

以上赤泥混合料基层施工实践及使用过程中，石灰赤泥稳定土（6：36：58）基层结构使用效果好，且造价低廉。纯赤泥基层和水泥稳定赤泥基层由于原材料缺少塑性，不易碾压坚实；另外水泥造价较高，凝固较快，人工拌和困难，因此不宜采用。因此在桩号 618+977~619+027 和桩号 619+027~619+077 两路段，当施工采用纯赤泥基层和水泥稳定赤泥下基层后，即改换基层结构上层为石灰赤泥稳定土（6：36：58）。

经过雨季，冻融不利气候条件的考验，桩号 618+877~618+927 石灰赤泥稳定土（6：36：58）段路面平整坚实裂缝少，未发生其它病害，说明该种赤泥混合料基层具有强度高，板体性好，水稳定性好和抗冻性好的优点；而在桩号 618+977~619+027（水泥稳定赤泥底基层）和桩号 619+027~619+077（纯赤泥基层）两路段，则出现了大面积的油面松散破坏和唧浆现象。

②第二段试验路面

第二段试验路段位于 310 国道主干线上，具体位置在上街区至巩县交界之间，桩号 626+392~628~392，系二级公路改建工程，路基宽度 16 米，路面宽 9 米，路肩硬化每边 2.5 米，试验路面采用石灰赤泥稳定土基层（6：36：58）代替原设计石灰土基层厚 20 厘米，铺筑宽度（半幅路面）7 米长（包括路肩硬化）2000 米，计 14000 平方米。施工方法同第一段试验路面。

该段通车使用效果良好，未出现任何病害。由于靠近赤泥产地，石灰赤泥混合料基层造价比石灰土基层低约计 30%。

7.1.3 石灰稳定赤泥基层

论文研究项目与河南省交通科学研究所和郑州公路总段荥阳县公路段合作铺筑了石灰稳定赤泥基层试验段。该试验段位于 310 国道主干线荥阳线老城至上街区间，具体位置为桩号 618+827~619+877，路基宽度 22 米，快车道 15 米，慢车道 3 米，试验路面铺筑在快车道上，铺筑长度 50 米。

路面结构为石灰稳定赤泥基层，长 50 米，宽 15 米，厚 24 厘米，配合比为石灰：赤泥=8：92。

面层采用沥青贯入 6 厘米，磨耗层采用沥青表面处治 3 厘米。

路面基层采用人工路拌，人工摊铺整型，机械碾压，在中间快车道上施工，两边慢车道上通行，未中断交通。

试验路铺设过程中，对结构层表面弯沉、平整度、路拱坡度等进行了测定，测定结果分别见表 7.7、表 7.8、表 7.9。

表 7.7 结构层表面弯沉（0.01mm）测定结果

Table7.7 Testing result of structure layer surface deflection (0.01mm)

桩号	基层路面种类	基层	面层		
			第一次	第二次	第三次
618+827~618+877	石灰稳定赤泥 (8: 92)	84	38	59	59

表 7.8 结构层表面平整度测定结果

Table7.8 Testing result of structure layer surface roughness

桩号	检测段数	基层	面层
618+827~618+877	10	10(4~9mm)	10(6~10mm)

表 7.9 路拱坡度测定结果

Table7.9 Testing result of road arch's grade

桩号	检测断面数	面层
618+827~618+877	10	9(1.6~2.3%),1(1.3%)

石灰稳定赤泥基层结构的压实度可达到 90~93%。

施工实践及使用过程表明，石灰稳定赤泥（8：92）基层结构使用效果好，且造价低廉。经过行车及雨季，冻融不利气候条件的考验，桩号 618+827~618+877（石灰稳定赤泥基层（8：92））段路面平整坚实裂缝少，未发生其它病害，说明该种赤泥混合料基层具有强度高，板体性好，水稳定性好和抗冻性好的优点。

7.2 赤泥用作道路材料施工技术要求

7.2.1 水泥石灰赤泥稳定土底基层施工技术

水泥石灰赤泥稳定土底基层施工的要求是：要得到一个水泥、石灰剂量符合规定，水泥、石灰和水分分布均匀、密实度大的混合料，经过养生后，水泥石灰赤泥稳定土底基层成为一种结硬的整体性材料，而且表面平整，具有规定的路拱坡度。

水泥石灰赤泥稳定土的拌和方法可采用就地拌和法（或称为路拌法）和中心站拌和法（或称为集中厂拌法）两种方法。通常，对于低等级公路底基层采用路

拌法，而对于二级及以上公路采用厂拌法。采用路拌法施工时，必须严格避免在稳定土层下部留下“素土”夹层。一旦在半刚性基层下部留下“素土”夹层，特别是细粒土和有塑性的细粒土的砾料土夹层，半刚性基层和其上的面层在开放交通后就很容易破坏。可靠的方法是用多铧犁跟在拌和机后面从底部将素土翻起一遍，再用专用拌和机拌合一遍。

水泥石灰赤泥稳定土路拌法施工工艺流程见图 7.1。

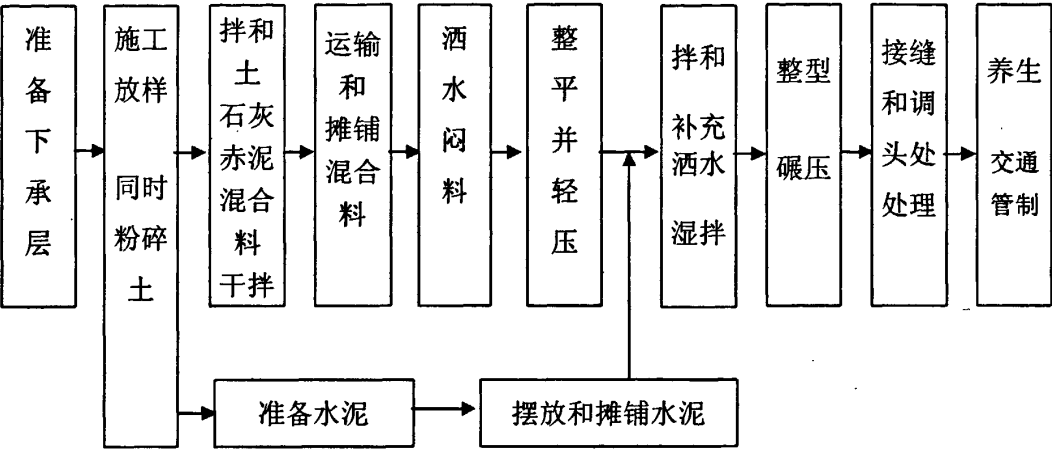


图 7.1 水泥石灰赤泥稳定土底基层施工工艺流程

Fig7.1 Construction technology and procedure of cement lime and red mud stabilized clay

按照施工流程，水泥石灰赤泥稳定土底基层施工工艺详述如下：

(1)准备下承层

水泥赤泥稳定土底基层的下承层表面应平整、坚实，具有规定的路拱，没有任何松散的材料和软弱点。下承层的平整度和压实度应符合有关技术规范的要求。下承层的平整度和压实度应符合表 7.10 和表 7.11 中规范^[36]的规定。

表 7.10 竣工工程外形的检查项目、频度和质量标准^[36]

Table 7.10 Check program、frequency and qulity criterion of completed project figuration					
工程类别	项目		频度	质量标准	
				高速公路和一级公路	二级和二级以下公路
水泥 石灰 赤泥 稳定 土底 基层	高程 (mm)		每 200m 4 点	+5, +10	+5, -15
	厚度 (mm)	均值	每 200m 每车道 1 点	-8	-10
		单个值		-15	-20
	宽度 (mm)		每 200m 4 个断面	+0 以上	+0 以上
	横坡度 (%)		每 200m 4 个断面	±0.3	±0.5
	平整度 (mm)		每 200m 2 处, 每处连续 10 尺 (3m 直尺)	8	12
			连续式平整仪的标准差 (mm)	3.0	

下承层的准备要点如下：

1)准备土基

对于土基不论是路堤还是路堑，必须用 12~25t 二轮压路机或等效的碾压机械进行碾比检验（压 3~4 遍）。在碾压过程中，如发现土过干、表层松散，应适当洒水；如土过湿，发生“弹簧”现象，应该采用挖开晾晒、换土、掺石灰或水泥等措施进行处理。

进行压实度及弯沉值测定。一般情况下每 50 延米为一断面，每个断面至少测两个点(内外双轮间隙各一个点)。凡不符合设计要求的路段，必须根据具体情况，分别采用补充碾压、换填好的材料，挖开晾晒等措施，使之达到有关规范的规定标准。

新完成的土基，必须按相关规范的规定进行验收，逐个断面检查下承层标高是否符合设计要求。下承层标高误差应符合相关技术规值的规定，凡验收不合格，必须采取措施，使其达到标准后，方可铺筑水泥稳定碎石基层。

2)在槽式断面的路段，两侧路肩上每隔一定距离(如 5~10m)应交错开挖泄水沟（或做盲沟）。

表 7.11 水泥石灰赤泥稳定土的质量合格标准值^[36]

Table 7.11 Quality eligible normal value of cement lime and red mud stabilized clay

工程类别	检查项目	检查数量	标准值	极限低值
路基	压实度	200m 4 处 (灌砂法)	重型压实标准 二级和二级以下公路 93% 以上, 高速公路和一级公 路不小于 95%	二级和二级以下公 路 88%, 高速公路和 一级公路 90%
	碾压检查	全面, 随时	无“弹簧现象”	
	弯沉值	每一评定段(不超过 1km)每车道		
水泥石灰赤 泥稳定土	压实度	6~10 处	底基层 96%	92%

(2) 施工放样

在底基层或老路面或土基上恢复中线。直线段每 15~20m 设一桩, 平曲线段每 10~15m 设一桩, 并在两侧路肩外缘设指示桩。

(3) 备料

在一般情况, 水泥石灰赤泥稳定土底基层所用的土应是经过选择, 技术经济都比较合理的土料。选取土的料场时, 将沿线所有料场的土料, 用肉眼鉴别, 初步选定一些备用料场, 从每个用料场取有代表性的土料, 送试验室进行原土料及水泥石灰赤泥土混合料的物理力学性质试验。根据试验结果, 选定准备开采使用的料场。

对于水泥、石灰料, 应选择公路两侧宽敞, 临近水源且地势较高的场地集中堆放。当堆放时间较长时, 也应覆盖封存。如采用生石灰块, 应在使用前 7~10 d 充分消解。消解后的石灰应保持一定的湿度, 不得产生扬尘, 也不可过湿成团。消解后的石灰宜过孔径 10mm 的筛, 并尽快使用。

根据各路段水泥石灰稳定赤泥底基层宽度、厚度及预定的干密度, 计算各路段需要的干混合料质量; 根据混合料的配合比、材料的含水量以及所用运料车辆的吨位, 计算各种材料每车料的堆放距离。

(4) 选料的运输和摊铺

选料装车时(通常用装载机或挖掘机), 应该注意每辆车的装载数量基本相等, 并根据各路段需要的选料数量按计算距离卸料。在该料场供应的路段范围内, 由远到近将土料堆放在路的一侧。应该严格掌握卸料的距离, 避免选料不够或过多。

用于路段的选料，最好当天摊铺均匀，第二天就用水泥处治。应该避免将料长时间堆放，造成水分大量蒸发，或遭雨而使含水量过大，甚至造成弹簧现象。堆放在路幅上的料堆，在下雨时会阻止雨水排出路外，并成为一个滞水堆，使雨水能更多地渗入下承层。由于料堆的保护作用，渗入下承层中的水很难蒸发。在随后的施工过程中，局部含水量过大的下承层经常发生弹簧现象。已经摊铺的选料如遭雨淋，特别在雨量较大的情况下，不但选料本身可能变得过分潮湿，而且为雨水侵入下承层创造十分有利的条件，因而下承层也可能变成过分潮湿、在随后的施工中，这些过湿状态的土都可能造成弹簧现象。如果选料中有较大的土块，或小于 5mm 的土团（石料除外）少于 80%，则也应该进行粉碎，然后用平地机整平。如选料中超尺寸的石料颗粒过多，则应该在料场进行剔除。必须注意，在选料摊铺前应该使下承层表面湿润。

(5) 洒水预湿

实际上在翻松和粉碎土的过程中，就需要洒水预湿土。洒水预湿土，可以使水在土体中分布较为均匀，可以节省摊铺水泥后的加工操作时间。由于在撒铺水泥的时候，大部分需要的水量已经加到土里面了，在撒铺水泥后的拌和过程中就可以减少很多洒水工作量。预湿土可以使拌和过程中水泥粘结在土颗粒上，而不致漏落在处治层的底部。经过预湿的土更容易碾压密实。预湿过程中，应使土的含水量约为最佳含水量的 70%。预湿时，应该将水均匀地喷洒在土上，水浸入土颗粒后，蒸发损耗就减少。如果隔天预湿土，有可能遭受夜雨而变得过分潮湿，则可以在当天的清晨进行预湿工作。

(6) 整平和轻压

土经过预湿之后，应该整型成要求的路拱和坡度，并用 6~8t 的两轮光面压路机碾压 1~2 遍，使土层具有平整表面，同时具有一定的密实度，以便摊铺水泥。

(7) 摆放和摊铺水泥

水泥应在当日用汽车（运水泥的车应有防雨设备）直接送到摊铺路段，直接卸在做标记的地点，并检查有无遗漏和多余。然后打开水泥袋将水泥倒在土层上，并用刮拌板将水泥均匀摊开。应注意每袋水泥的摊铺面积相等。水泥摊铺完毕后，表面应没有空白位置，也没有水泥过分集中的地点。

水泥的撒铺可采用人工方法和撒布车两种方法。采用撒布车撒铺水泥比用人工撒铺水泥要均匀得多。使用效率高的撒布车时，即使水泥剂量只有 1% 也能撒均匀。用人工摊铺水泥时，实际可能操作的最小水泥剂量约为 2%。

如果预湿的土被水泥撒布机械压实了，水泥撒铺完后，应立即耙松被压实的土，并开始拌和。通常可用平地机的齿耙松土。

(8) 拌和

这个阶段的目的是使水泥完全均匀地分布到土中。用旋转式松土机或专门的稳定土拌和机进行拌和,在用机械拌和的头一二遍,通常是进行“干拌”。然后边洒水边拌和,即进行“湿拌”。干拌的目的是使水泥分布到全部土中,不要求达到完全拌和,而是预防加水过程水泥结团。所谓干拌,实际上是拌和预湿的土及水泥,并不是真要求土是干的。

(9)补充洒水和湿拌

1)在上述拌和过程结束时,特别在用农业机械进行拌和的情况,如果混合料的含水量不足,应用喷管式洒水车补充洒水。洒水距离应长些,水车起洒处和另一端“调头”处都应超出拌和段 2m 以上。洒水车不应在正进行拌和的以及当天计划拌和的路段上“调头”和停留,以防局部水量过大。

2)常用的洒水车仅两侧各有一个喷嘴,喷出的水量不均匀,不适宜用作路面施工。应在后面改接一根直径 50mm,长约 2m 的横向水平钢管,管壁钻三排直径为 4mm 的孔眼。洒水车不应使洒水中断。

3)洒水及拌和过程中,应及时检查混合料的含水量,含水量宜略大于最佳值,不应小于最佳值。可用含水量快速测定仪测定混合料的含水量。混合料的最佳含水量也可以在现场人工控制。最佳含水量时的混合料,在手中能紧捏成团,落在地上能散开,并应参考室内试验最佳含水量时混合料的状态。

4)混合料拌和均匀后应色泽一致,没有灰条、灰团和花面,没有粗细颗粒“窝”,且水分合适和均匀。

5)在洒水拌和过程中,应配合人工拣出成团颗粒,消除粗细颗粒成“窝”以及局部过分潮湿或过分干燥。

(10)整型

混合拌和均匀后,立即用平地机进行初平,在直线段,平地机由两侧向路中心进行刮平,在曲线段,平地机由内侧向外侧进行刮平;需要时,再返回刮一二遍。用轮胎压路机、轮胎拖拉机或平地机立即在刚初平的路段上快速碾压一遍,以暴露潜在的不平整。再用平地机如前那样整平(在用轮胎压路机碾压时,因轮胎表面没有花纹、碾压后表面比较光滑,再用平地机整平前,应该先用齿耙把低洼处的表层 5cm 以上耙松,避免在较光滑的表面上产生薄层找补的情况)。必要时,用新拌成的水泥土混合料进行找补。然后再用平地机整平一次。每次整平都要按照要求的坡度和路拱进行。特别要注意接缝处的整平,务必使接缝顺适平整。整平工作还应包括路肩在内。

当用人工整型时,应用锹和耙将混合料摊平,用路拱板进行初步整型。用拖拉机初压 1~2 遍后,根据实测的压实系数,确定纵横断面的标高,并设置标志和挂线,利用锹和耙按线整型,并再用路拱板校正成型。

在低洼处，严禁用薄层混合料找补。因为薄层找补极易在使用过程中脱皮压碎，导致面层破坏。因此，水泥石灰赤泥稳定土底基层摊铺和整平时，要严格掌握纵向坡度和路供。摊铺时，一般要按“宁高勿低”的原则，最后整平(终平)时，一般要按“宁刮勿补”的原则处理。在整型过程中，严禁任何车辆通行。

(1)碾压

1)根据路宽、压路机的轮宽和轮距的不同，制订碾压方案，以求各部分碾压到的次数尽量相同。

2)水泥石灰赤泥稳定土底基层整平到需要的断面和坡度后，混合料的含水量等于或略大于最佳含水量时，立即用 12t 以上三轮压路机、重型轮胎压路机或振动压路机在路基全宽内进行碾压，压路机的碾压顺序如图 7-2(a)所示。直线段，由两侧路肩向路中心碾压，平曲线段，由内侧路肩向外侧路肩进行碾压。碾压时，应重叠 1/2 轮宽，后轮必须超过两段的接缝处，后轮压完路面全宽时，即为一遍。一般需要碾 6~8 遍。压路机的碾压速度头两遍以采用 1.5~1.7km/h 为宜，以后宜采用 2.0~2.5km/h。采用人工摊铺整形的稳定土层，宜先用拖拉机或 6~8t 两轮压路机或轮胎压路机碾压 1~2 遍，碾压顺序如图 7.2(b)所示然后，再利用重型压路机碾压。

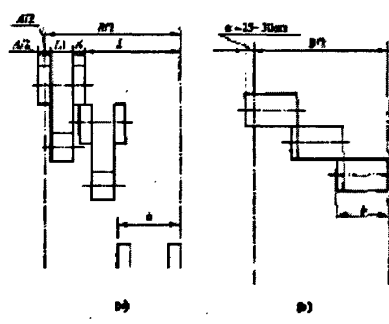


图 7.2 二轮、三轮压路机碾压程序图

Fig7.2 Process graph of compactor roller compaction with two or three wheels

(a) 二轮压路机碾压成型 (a) Compactor roller compaction with two wheels

(b). 三轮二轴压路机碾压程序 (b) Compactor roller compaction with two axes and three wheels

B-路面宽度；b-压路机滚轮宽度

B-Road width ; b- Compactor idler wheel width

3) 严禁压路机在已完成的或正在碾压的路段上调头或急刹车，应保证稳定土层表面不受破坏。

4) 碾压过程中，稳定土的表面应始终保持湿润，如水分蒸发过快，应及时补

洒少量的水，但严禁洒大量的水碾压。

5) 碾压过程中，如发生“弹簧”松散起皮等现象，应及时翻开换以新的稳定土混合料或添加适量的水泥重新拌和，或用其他方法处理，使其达到质量要求。

6) 经过拌和整形的水泥石灰赤泥稳定土，宜在胶结料初凝前并在试验确定的延迟时间内完成碾压，并达到要求的密实度，同时没有明显的轮迹。

7) 在碾压结束之前，用平地机再终平一次，使其顺适，路拱和超高符合设计要求。终平应仔细进行，必须将局部高出部分刮除并扫出路外，对于局部低洼之处，不再进行找补。

(12) 接缝和“调头”的处理

1) 当天工作段的衔接处应搭接拌和。第一段拌和后，留 5~8m 不进行碾压；第二段施工时，前段留下未压部分，要再加部分水泥石灰重新拌和，并与第二段一起碾压。当天其余各段的接缝都可以这样处理。

2) 应十分注意每天最后一段末端缝（工作缝）的处理。工作缝和“调头”处的处理如图 7.3 所示。在已碾压完成的水泥稳定土层末端沿稳定土底基层挖一条宽约 30cm 的槽，直挖到下承层顶面。此槽与路的中心线垂直，靠稳定土的一面应切成直线，而且应垂直向下。将两根方木（长度为水泥石灰赤泥稳定土底基层宽度的一半，厚度与其压实厚度相同）放入槽内，并紧靠着已完成的稳定土，以保护其边缘，不致遭第二天工作时的机械破坏。

3) 工作缝也可按下述方法处理：在水泥石灰赤泥稳定土混合料拌和结束后，在预定长度的末端，按前述方法挖一条横贯全路宽的槽，槽内放两根与压实厚度等厚的方木，方木的另一侧用素土回填至 3~5cm 长，然后进行整形和碾压。第二天，邻接的作业段拌和结束后，除去顶木，用混合料回填，靠近顶木未能拌和的一小段，应人工进行补充拌和。

4) 纵缝的处理。水泥石灰赤泥稳定土底基层的施工应该避免纵向接缝；如必须分两幅施工时，纵缝必须垂直相接，不应斜接。

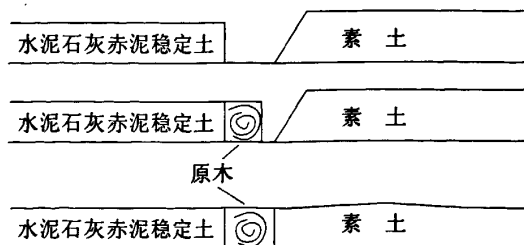


图 7.3 横向接缝处理示意图

Fig7.3 Sketch map of transverse joints disposal

⑬养生及交通管制

水泥石灰赤泥稳定土底基层经拌和、压实后，必须有一段养生时间，使稳定土表面经常湿润，防止稳定土中水分蒸发，以保证水泥充分发挥作用。可以用潮湿的帆布、粗麻袋、稻草或其它合适的潮湿材料覆盖，但不能用潮湿的有粘性的土覆盖，因为这种土会粘结在稳定土层的表面，难以清除干净。

7.2.2 水泥赤泥稳定级配碎石基层施工技术

水泥赤泥稳定级配碎石基层的施工分为路拌法和厂拌法。路拌法在我国二级及二级以下公路较为常用，厂拌法很少采用。随着筑路机械化水平的提高，要修筑质量较高的级配集料基层和底基层，应尽可能采用厂拌法。根据我国的公路施工现况，路拌法仅适用于底基层和三、四级公路的基层施工。一、二级和高速公路基层的水泥赤泥稳定级配碎石必须采用厂拌法和摊铺机摊铺施工^[37]。

①厂拌法施工流程

施工流程如图 7.4。准备下承层和施工放样同 7.2.1。水泥赤泥稳定级配碎石下承层的压实度和平整度应符合表 7.12 和表 7.13 中规范的规定。

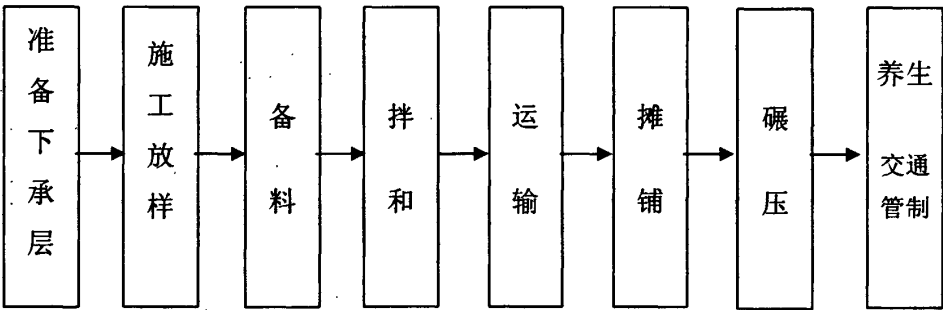


图 7.4 水泥赤泥稳定级配碎石厂拌法工艺流程

Fig7.4 Plant mixing method technics flow chart of cement and red mud stabilized macadam

表 7.12 水泥赤泥稳定级配碎石基层质量合格标准值^[36]

Table7.12 Quality eligible normal value of cement and red mud stabilized macadam

工程类别	检查项目	检查数量	标准值	极限低值
水泥赤泥稳定级配碎石基层	压实度	6~10 处	96%	92%
	弯沉值	每一评定段， 每车道 40~50 测点		

表 7.13 竣工工程外形检查项目、频度和质量标准^[36]

Table7.13 Check program、frequency and qulity criterion of completed project figuration					
工程类别	项目		频度	质量标准	
				高速公路和一级公路	二级和二级以下公路
水泥赤泥 稳定碎石基层	高程 (mm)		每 200m 4 点	+5, -15	+5, -20
	厚度 (mm)	均值	每 200m 每车道 1 点	-10	-12
		单个值		-25	-30
	宽度 (mm)		每 200m 4 个断面	+0 以上	+0 以上
	横坡度 (%)		每 200m 4 个断面	±0.3	±0.5
	平整度 (mm)		每 200m 2 处, 每处连续 10 尺 (3 m 直尺)	12	15

②备料

在集料拌和厂，首先应进行料场场地硬化，并根据设计要求对不同颗粒粒级进行分隔，然后开始进料。进入料场不同粒级的碎石和石屑，应按指定位置进行卸料堆放，不得混卸。

每批进场的碎石和石屑都必须抽检其质量，质量不合要求不得进场。

为了让级配碎石的级配符合规定，一般至少选择大粒径、小粒径和石屑三种规格进行备料，如果条件许可或工程质量要求较高时，最好采用大、中、小粒径和石屑四种规格进行备料。

③拌和

1)拌和机械 水泥赤泥稳定级配碎石混合料可以在中心站用多种机械，如用强制式拌和机、卧式双转轴桨叶式拌和机等进行集中拌和，但都必须有自动计量系统，且粒料的数量应按设计要求和备料的规格数相匹配。

2)在正式拌制水泥赤泥稳定级配碎石混合料之前，必须先调试所用的厂拌设备，使混合料的颗粒组成和含水量都达到规定的要求。

3)在采用未筛分碎石和石屑时，如未筛分碎石或石屑的颗粒组成发生明显变化时，应及时重新调试设备。

④运输

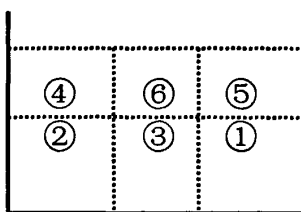


图 7.5 装料次序示意图

Fig7.5 Sketch map of load order

由于水泥赤泥稳定级配碎石材料的特殊性，容易在装料、运输和卸料过程中产生粗细料离析。因此，在装料时，拌和机的出料口距离车厢的高度应尽可能的小，且装料次序应按图 7.5 进行（如车辆载重量较小可按一层装料，载重量较大时按二层装料），以避免装料和运输途中发生粗细集料的离析。

⑤摊铺

碎石混合料摊铺可用沥青混凝土摊铺机、水泥混凝土摊铺机或专用的稳定土摊铺机摊铺，摊铺机最好装有双夯锤。

碎石混合料运至摊铺机前时，应有专人指挥卸料，在摊铺机料仓中余半仓料时运输车应及时缓慢接上仓，料慢速将料卸入料仓，卸完后立即开走，以便下一车及时卸料。摊铺机后应设专人消除粗细分离所造成的集料离析现象。

若在一般公路上，没有摊铺机时，也可以用带有自动找平装置的平地机摊铺混合料。采用平地机摊铺时，首先，据摊铺层的厚度和要求达到的压实度，计算每车混合料的摊铺面积；将混合料均匀地卸在路幅中央、路幅宽时，也可将混合料卸成两行；然后用平地机将混合料按松铺厚度摊铺均匀。在平地机后设一个三人小组，及时消除粗细集料离析现象。对于粗集料窝和粗集料带，应添加细集料，并拌和均匀；对于细集料窝，应添加粗集料，并拌和均匀。

⑥碾压

根据路宽、压路机的轮宽和轮距的不同，制定碾压方案，应使各部分碾压到的次数尽量相同，路面的两侧应多压 2~3 遍。

摊铺后，当混合料的含水量为最佳含水量（ $\pm 1\% \sim \pm 2\%$ ）时，应立即用轻型压路机并配合 12t 以上压路机在结构层全宽内进行碾压。直线段由两侧路肩向路中心碾压；碾压时应重叠 $1/2$ 轮宽，后轮必须超过两段的接缝处，后轮压完路面全宽时，即为一遍。一般需碾压 6~8 遍。压路机的碾压速度，头两遍以采用 1.5~1.7km/h 为宜，以后宜采用 2.0~2.5km/h。碾压过程中，混合料的表面应始终保

持湿润，如水分蒸发过快，应及时补洒少量的水，但严禁洒大量水碾压。

严禁压路机在已完成的或正在碾压的路段上调头或急刹车，应保证水泥赤泥稳定级配碎石基层的表面不受破坏。

在碾压结束之前，用平地机再终平一次，使其纵向顺适，路拱和超高符合设计要求。终平应仔细进行，必须将局部高出部分刮除并扫出路外；对于局部低洼之处，不再进行找补，可留待铺筑路面时处理。

⑦接缝的处理

1) 横向接缝的处理

用摊铺机摊铺混合料时，靠近摊铺机当天未压实的混合料，可与第二天摊铺的混合料一起碾压，但应注意此部分混合料的含水量。必要时，应人工补洒水，使其含水量达到规定的要求。

2) 纵向接缝的处理

应避免纵向接缝。如摊铺机的摊铺宽度不够，必须分两幅摊铺时，宜采用两台摊铺机前后相隔约 5~8m 同步向前摊铺混合料。在仅有一台摊铺机的情况下，可先在一条摊铺带摊铺一定长度后，再开到另一条摊铺带上摊铺，然后一起进行碾压。

对于不能中断交通的路段，只能采用半幅施工的方法，接缝处理应对接，必须保持平整接合。在前半幅摊铺时，在靠后半幅的一侧用方木或钢模板板做支撑，方木或钢模板的高度与水泥赤泥稳定级配碎石基层压实厚度相同；在摊铺后半幅之前，将方木或钢模板除去；如在摊铺前半幅时未用方木或钢模板支撑，靠近边缘的 30cm 左右难于压实，而且形成一个斜坡，在摊铺后半幅时，应先将未完全压实的部分和不符合路拱要求的部分挖松并补充洒水，待后半幅水泥赤泥稳定级配碎石摊铺后一起整平和碾压。

第八章 赤泥道路材料的技术经济性分析

利用工业废渣赤泥为主要原材料，配以石灰、粘土和碎石，配制成本低廉、性能优良的新型赤泥道路材料：水泥石灰赤泥稳定土底基层、水泥赤泥稳定级配碎石基层，具有节省资源，保护环境等优点，同时带来了明显的经济效益和不可估量的社会效益及环境效益。

8.1 经济效益分析

赤泥道路材料的研究开发不但形成了特点鲜明的新型路面，而且降低了筑路成本。以下是对水泥石灰赤泥稳定土底基层、水泥赤泥稳定级配碎石基层两种新型赤泥道路材料与传统材料在公路实际应用中成本的比较分析。

①水泥石灰赤泥稳定土底基层与水泥石灰稳定土底基层经济性比较

以一条长 1km，宽 14m，底基层厚度为 30cm 的道路为例，比较分析了水泥赤泥稳定土底基层和传统水泥石灰稳定土底基层的造价。分析结果如表 8.1 所示。

表 8.1 每公里水泥石灰赤泥稳定土底基层与水泥石灰稳定土底基层造价比较表

Table8.1 Cost comparison between cement lime & red mud stabilized clay and cement &lime stabilized clay every kilometer

材料种类	单价	水泥石灰稳定土底基层 水泥:石灰:土=5:6:89		水泥石灰赤泥稳定土底基层 水泥:石灰:土:赤泥 =5:6:89:20	
		数量	总价格	数量	总价格
水泥	370（元/吨）	357	132 090	276	102 120
石灰	45（元/吨）	428	19 278	332	14 940
赤泥	20（元/吨）	—	—	1 105	2 210
粘土	10（元/吨）	6 355	63 550	4 919	49 190
水	5（元/吨）	1 085	5 425	1 247	6 235
合计（元）		220 343		174 695	

从材料费的角度，水泥石灰赤泥稳定土底基层较传统的水泥石灰稳定土底基层每公里造价节省 220 343-174 695=45 648 元。对于赤泥，据测算，堆存 1 吨湿赤泥的成本达 30~40 元。如果再加上此部分的费用，则每公里水泥石灰赤泥稳

定土底基层节省的费用为 $45\ 648+35\text{ 元/吨}\times 1105\text{ 吨/公里}=84\ 323\text{ 元}$ 。

②水泥赤泥稳定级配碎石基层与水泥稳定碎石基层经济性比较

以一条长 1km, 宽 14m, 基层厚度为 30cm 的道路为例, 比较分析了水泥赤泥稳定级配碎石基层与水泥稳定碎石基层的造价。比较分析结果见表 8.2 所示。

表 8.2 每公里水泥赤泥稳定级配碎石与水泥稳定碎石造价比较表

Table 8.2 Cost comparison between cement & red mud stabilized macadam and cement stabilized macadam every kilometer

材料种类	单价	水泥稳定级配碎石 水泥:碎石=6:94		水泥赤泥稳定级配碎石基层 水泥:赤泥:碎石=6:12:94	
	单价	数量	总价格	数量	总价格
水泥	370 (元/吨)	600	222 000	474	175 380
赤泥	20 (元/吨)	—		947	18 940
碎石	55 (元/m ³)	6 760	371 800	5338	293 590
水	5 (元/吨)	460	2 300	892	4 460
合计 (元)			596 100		492 370

从材料费的角度, 水泥赤泥稳定级配碎石基层较传统的水泥稳定碎石层每公里造价节省 $596\ 100-492\ 370=103\ 730\text{ 元}$ 。对于赤泥, 据测算, 堆存 1 吨湿赤泥的成本达 30~40 元。如果再加上此部分的费用, 则每公里水泥赤泥稳定级配碎石基层节省的费用为 $103\ 730+35\text{ 元/吨}\times 947\text{ 吨/公里}=136\ 875\text{ 元}$ 。

8.2 社会效益和环境效益

随着铝工业的发展, 生产氧化铝排出的赤泥量日益增加, 目前全世界每年产生约 6000 万吨赤泥。2004 年, 我国赤泥排放量已超过 550 万吨 (每生产 1 吨氧化铝约排放 1.0~1.5 吨赤泥), 历年来的堆存量已达数亿吨。目前国内外氧化铝厂大多采取赤泥库 (坝) 湿法存放, 也有少量采用脱水干化处理。赤泥的湿存法不仅占用大量土地和农田、耗费较多的堆场建设和维护费用, 同时, 由于赤泥中的剩余碱除了一小部分依靠自然沉降分离对溶液返回再用, 更大量的废碱液渗透到附近农田, 造成土壤碱化、沼泽化, 污染地表地下水源, 危害居民的身体健康。对于采用脱水干化处理的赤泥, 晒干的赤泥形成的粉尘到处飞扬, 破坏生态环境, 造成严重污染。在土地资源日趋紧张、环境保护日趋重要的当今社会, 赤泥的综合

治理已成为人们所关注的焦点之一，赤泥能否合理、有效地进行综合利用，将决定铝工业的发展前途和命运，因此对其进行综合利用和无害化处理十分必要。

将赤泥作为路基材料应用于公路建设，工艺简单，操作方便，无二次污染，投资少，见效快，经济效益高，是原材料消耗量大、赤泥配比高、比较理想的赤泥综合利用技术之一。利用赤泥修路可减少土地的占用和环境污染，节约大量用于铺筑路基的水泥和碎石。

第九章 结论与展望

9.1 主要结论

本研究利用河南省上街铝厂生产氧化铝产出的工业废渣赤泥为主要原材料,配以当地丰富的石灰、粘土和碎石,成功配制了成本低廉、性能优良的两种新型赤泥道路材料:(1)水泥石灰赤泥稳定土底基层;(2)水泥赤泥稳定级配碎石基层。此项技术的推广与应用,将大量堆弃无用的赤泥制备成高价值的道路材料,具有广阔的市场前景,是环保与基础设施建设的完美结合。

本研究得到了以下主要研究成果:

①水泥石灰赤泥稳定土混合料

1) 为了保证掺有赤泥的水泥石灰稳定土混合料的后期强度,应保证水泥石灰的掺量不低于一定值。

2) 掺加赤泥可有效提高水泥赤泥稳定级配碎石混合料的前期(7d龄期)无侧限抗压强度,但其后期强度较不掺赤泥的混合料略有降低。

3) 掺加赤泥可以有效的减少混合料水泥石灰赤泥稳定土混合料的干缩,有效防止混合料的干缩裂缝的产生,对于减少混合料早期损害具有重要意义。

4) 对水泥石灰赤泥稳定土,建议最佳赤泥掺量为10~20%,水泥、石灰宜采用等比例,且总掺量不应少于10%。

②水泥赤泥稳定级配碎石混合料

1) 赤泥的掺入对于提高水泥赤泥稳定级配碎石混合料早期抗压强度的效果远优于其对混合料长期抗压强度的影响效果。在赤泥掺量不超过水泥掺量2倍的情况下,赤泥的掺入对混合料早期、后期抗压强度均能起到有效的改善作用。

2) 从无侧限抗压强度、劈裂强度以及动弹模量的测试结果可得出,赤泥的最佳掺量为水泥掺量的1~2倍。

3) 赤泥的含量对混合料的回弹模量影响显著,且混合料试件的回弹模量随龄期的增长而增长。

4) 对于冻融循环抗压强度,赤泥掺量的影响效果不明显。

9.2 建议与设想

对于成功配制的两种新型赤泥道路材料:水泥石灰赤泥稳定土底基层、水泥赤泥稳定级配碎石基层,虽然在试验研究过程中取得了良好效果,但在实际工程中使用很少。实际应用中,除了在配合比设计方面对材料的组成进行优化以外,

同时还应对施工质量进行控制, 确保其具有良好的路用性能。鉴于研究时间的局限性, 加之试验条件所限, 尚有如下工作有待进一步深入:

①对试验路实体工程进行检测, 以验证水泥石灰赤泥稳定土、水泥赤泥稳定级配碎石的实际使用性能, 深入了解其长期性能变化规律。

②研究温度、静载、动载作用下路面结构层的应力应变状态。

③赤泥应用于公路结构层中的强度形成机理需进行进一步的研究分析。

致谢

本文是在尊敬的导师梁乃兴教授及师母曹源文教授的悉心指导下完成的。在研究生近三年的学习生活中，导师渊博的学识、缜密的思维、严谨的治学态度、实事求是的科研作风、高尚的人格魅力将使学生终身受益。三年来梁老师和曹老师不仅是授业解惑的恩师，更是宽厚平和的长者，在学习、生活、就业各方面给予学生最大的关怀和帮助，在此谨向梁老师和曹老师致以最诚挚的敬意和衷心的感谢！

论文期间，梅迎军副教授和李志勇副教授不仅提出了许多指导性和建设性的建议，并且在生活上也给予了极大的支持和关心，在此表示诚挚的感谢！向两年来给予作者帮助的课题组的师弟师妹们和同学们表示真诚的谢意！

同时感谢道路实验室、建材试验室及结构试验室的各位老师们在论文写作过程中给予的建议和指导。

感谢郑州西绕城公路建设发展有限公司的各级领导给予的支持和帮助。

多年来，父母在精神上和物质上给予了全力的支持和帮助，感谢于伟在学习研究期间给予的帮助与支持，使作者得以顺利完成学业，在此，向他们表示衷心的感谢。

衷心感谢评阅论文的各位专家、教授！

参考文献

- [1] 王静. 赤泥筑路的技术性能综合效益[J]. 中南公路工程, 1991(1): 40-44, 59.
- [2] 付毅. 固化赤泥制备高等级道路材料技术试验研究[J]. 有色金属, 2001, 53(2): 10-13.
- [3] 谢源, 付毅, 冷杰彬等. 赤泥道路基层材料配制与成型工艺研究[J]. 矿冶, 2002, 11(1): 4-7.
- [4] 颜祖兴. 水泥赤泥混凝土开发应用研究[J]. 混凝土, 2000, (10): 18-20.
- [5] 梁乃兴, 张登良. 水泥赤泥混凝土力学性能研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1995, 15(3): 1-4.
- [6] 齐建召, 杨家宽, 王梅. 赤泥做道路基层材料的试验研究[J]. 公路通科技, 2005, 22(6): 30-33.
- [7] 齐建召. 赤泥道路材料的试验研究[D]. 武汉. 华中科技大学硕士学位论文. 2005.
- [8] 潘志华. 固体激发剂—矿渣—赤泥水泥的研究[D]. 南京: 南京工业大学, 1999.
- [9] 唐明述. 关于水泥混凝土发展方向的几点认识[J]. 中国工程科学, 2002, 4(1): 41-46.
- [10] 潘志华, 程麟. 碱—矿渣—赤泥水泥硬化浆体的组成和结构[C]. 中国硅酸盐学会, 第八届水泥化学学术会议论文集. 重庆, 2001, (10): 324-329.
- [11] Maneesh S, S.N.Upadhayay. Preparation of iron rich cements using red mud [J]. Cement and Concrete Research, 1997, (7): 1037-1046.
- [12] 建筑工程部水泥研究院编著. 赤泥硫酸盐水泥[M]. 北京: 冶金工业出版社. 1960.
- [13] Shigeru Mimura, Akio Kainuma, Mamoru Takahashi. Coloring fillers for asphalt paving mixture [P]. Japan: 53016028, 1978-02-14.
- [14] 潘志华, 方永浩, 潘拯生等. 固态碱—矿渣—赤泥胶凝材料的研究[J]. 南京化工大学学报, 1998, 20(2): 34-38.
- [15] 潘志华, 方永浩, 赵成朋. 碱—矿渣—赤泥水泥的研究[J]. 硅酸盐通报, 1998, 18(3): 34-39, 50.
- [16] 杨爱萍, 苏长江, 何静华等. 赤泥粉煤灰砖的研制[J]. 轻金属, 1996, (8): 12, 17-18.
- [17] 王晓峰, 林海燕, 阳勇. 利用拜耳法赤泥制备烧结砖[J]. 新型建筑材料, 2007, 24-26.
- [18] 焦占忠, 邢国, 王化民. 利用工业废渣赤泥和粉煤灰研制免蒸免烧砖[J]. 1996, (6): 16-19.
- [19] 芦令超, 宋廷寿, 张德成等. 利用碱矿渣水泥、赤泥和膨胀珍珠岩制造轻质建筑材料的研究[J]. 山东建材, 1998, (1): 24-26.
- [20] 岳云龙. 赤泥—碱矿渣水泥及其制品的研究[J]. 硅酸盐通报, 2001, (1): 46-49.
- [21] Murayama, Kenji; Suzuki, Yoshiaki. Study on an asphalt mixture [J]. Cement and Concrete Products, 1975(16): 9-55.
- [22] Mimura, Shigeru; Kainuma, Akio; Takahashi, Coloring fillers for asphalt paving mixture

- [P]. Japan:53016028, 1978-02-14.
- [23] Brodtko, O.A.; Brodtko, A.S. et al. Additive for Portland cement [P]. Russian:80-3219124, 1980-11-03.
- [24] 王幼云. 大力发展一种新型通用水泥—关于复合硅酸盐水泥的论述[C]. 第四届水泥学术会议论文集. 北京:中国建筑工程出版社, 1992, 4.
- [25] Junior N. et al. A Preliminary Investigation of Strength Development in Jamaican Red Mud Composites[J]. Cement & Concrete Composites, 1996(18):371-379.
- [26] 张培新. 利用赤泥制备硫铝酸盐快硬水泥的研究[J]. 环境污染与防治, 2000, 22(6):16-18.
- [27] 王立堂. 赤泥利用的有效途径[J]. 世界有色金属, 1998(8):42, 46-48.
- [28] 杨绍文, 曹耀华, 李清. 氧化铝生产赤泥的综合利用现状及进展[J]. 矿产保护与利用, 1999(6):46-49.
- [29] 王鑫书, 黄德修. 赤泥利用的研究[J]. 轻金属, 1999(5):13-15.
- [30] 氧化铝废渣(赤泥)路用性能研究(赤泥筑路信息)[R]. 河南省交通厅科学研究所, 1989.
- [31] 梁乃兴, 张登良, 颜祖兴. 水泥赤泥混凝土强度形成机理. [J]. 西安建筑科技大学学报, 1999, 28(2):147-151.
- [32] 钟声. 用赤泥作混凝土掺合料的试验研究[J]. 建工技术, 1994:17-22.
- [33] 冯向鹏, 刘晓明, 孙恒虎. 赤泥大掺量用于胶凝材料的研究[J]. 矿产综合利用, 2007(4):35-38.
- [34] 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, 9(2):6-11.
- [35] 中华人民共和国行业标准. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程(JTJ057-94)[S]. 北京:人民交通出版社, 1994.
- [36] 中华人民共和国交通部. 公路工程质量检验评定标准(JTJ071-94)[S]. 北京:人民交通出版社, 1994.
- [37] 中华人民共和国行业标准. 公路路面基层施工技术规范(JTJ034-93)[S]. 北京:人民交通出版社, 1993.

在学期间发表的论著及取得的科研成果

发表的论著

- [1]梁旭, 梁乃兴, 曾建民等. 水泥赤泥稳定级配碎石基层的性能研究. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(6):1086-1089.
- [2]于伟, 兰超, 梁旭. 水泥-乳化沥青稳定碎石基层路用性能研究. 山东理工大学学报(自然科学版), 2009(3).
- [3]秦旻, 梁乃兴, 路兆峰, 梁旭. 赤泥用于水泥稳定碎石基层中的性能研究. 湖南大学学报(自然科学版), 2008, 35(11):11-14.

参与的科研项目及取得的科研成果

- [1]参与河南省交通厅科技资助项目“工业废渣赤泥在公路中的应用技术研究”
- [2]河南省科学技术成果三等奖, 2008 年
- [3]郑州市科技进步二等奖, 2008 年