

# 物理改性赤泥替代矿粉的沥青混合料路用性能研究

张宁<sup>1</sup>, 王静<sup>2</sup>, 吕鑫<sup>2</sup>, 郭晨晨<sup>2</sup>, 李沛钊<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>山东高速集团有限公司, 山东 济南

<sup>2</sup>山东大学, 山东 济南

Email: \*844746446@qq.com

收稿日期: 2020年11月25日; 录用日期: 2020年12月18日; 发布日期: 2020年12月28日

## 摘要

为了解决赤泥的利用率低造成的堆放占地、污染环境等问题, 同时减少不可再生矿产资源的消耗, 本研究中将赤泥粉体作为填料代替沥青混合料中的石灰岩矿粉, 仅能实现赤泥的有效利用, 还能减少不可再生矿产资源的消耗。在先前的研究中已经制备了使用物理改性赤泥替代矿粉的沥青胶浆并评价了其流变性能和水稳定性。但是, 赤泥对沥青混合料的路用性能的影响尚不清楚。本研究通过将物理改性赤泥替代矿粉填料制备沥青混合料并研究赤泥对沥青胶浆路用性能的影响规律。本研究通过使用浸水马歇尔试验、汉堡车辙试验、SPT试验分别用于评价赤泥沥青混合料的水稳定性、抗车辙性能和动态力学响应。试验结果表明, 石灰石矿粉、消石灰、水泥具有相似的氧化物组成, 说明水泥和消石灰有可能改善赤泥与沥青的粘结性能; 在赤泥中掺入消石灰、水泥会提高赤泥沥青混合料的水稳定性, 赤泥替代矿粉可以提高沥青混合料的高温抗车辙性能, 而在赤泥中掺入消石灰可以进一步提高其高温性能。在赤泥中掺入少量消石灰或水泥, 可以使得动态模量达到普通沥青混合料的水平。试验结果表明, 使用本研究制得的物理改性赤泥, 可以提高沥青混合料的路用性能。

## 关键词

物理改性赤泥, 沥青混合料、石灰岩矿粉、路用性能

# Research on Pavement Performance of Asphalt Mixture with Physical Modified Red Mud Instead of Mineral Powder

Ning Zhang<sup>1</sup>, Jing Wang<sup>2</sup>, Xin Lv<sup>2</sup>, Chenchen Guo<sup>2</sup>, Peizhao Li<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Shandong Hi-Speed Group Co. Ltd., Jinan Shandong

\*通讯作者。

<sup>2</sup>Shandong University, Jinan Shandong  
Email: \*844746446@qq.com

Received: Nov. 25<sup>th</sup>, 2020; accepted: Dec. 18<sup>th</sup>, 2020; published: Dec. 28<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

In order to solve the problems of stacking land occupation and environmental pollution caused by low utilization rate of red mud, and reduce the consumption of non renewable mineral resources, red mud powder is used as filler instead of limestone powder in asphalt mixture in this study, which can only realize the effective utilization of red mud, but also reduce the consumption of non renewable mineral resources. In the previous study, asphalt mortar using physical modified red mud instead of mineral powder has been prepared and its rheological properties and water stability have been evaluated. However, the influence of red mud on the road performance of asphalt mixture is not clear. In this study, physical modified red mud was used to replace mineral powder filler to prepare asphalt mixture, and the influence of red mud on the road performance of asphalt mortar was studied. In this study, immersion Marshall test, Hamburg rutting test and SPT test are used to evaluate the water stability, anti rutting performance and dynamic mechanical response of red mud asphalt mixture. The test results show that limestone powder, hydrated lime and cement have similar oxide composition, which indicates that cement and hydrated lime may improve the bonding performance between red mud and asphalt; adding hydrated lime and cement into red mud can improve the water stability of red mud asphalt mixture; replacing mineral powder with red mud can improve the high temperature anti rutting performance of asphalt mixture, while adding hydrated lime into red mud it can further improve its high temperature performance. Adding a small amount of hydrated lime or cement into red mud can make the dynamic modulus reach the level of ordinary asphalt mixture. The test results show that the physical modified red mud can improve the road performance of asphalt mixture.

## Keywords

Physical Modified Red Mud, Asphalt Mixture, Limestone Powder, Road Performance

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. 前言

赤泥(Red mud or Bauxite residue)是碱法处理铝土矿提取氧化铝后排放的不溶性固体工业废弃物, 2016年我国赤泥总排放量约为8000万吨, 而消耗量仅为320万吨, 综合利用率不足4%, 这导致了大量的赤泥堆积, 不仅占用大量土地, 耗费大量的堆场建设和耕地费用, 同时也对周围土体和地下水环境带来安全隐患, 同时, 因为赤泥的强碱性, 植物难以生存, 赤泥堆场无植被覆盖, 直接暴露在雨水的冲刷侵蚀下, 极易引发滑坡、溃坝等灾害。随着社会对安全生产和环境保护的日益重视, 赤泥的排放与堆存已成为制约氧化铝行业发展的重要瓶颈和区域社会发展与环境保护的沉重负担[1]。

与此同时, 随着我国城市建设和公路、铁路等基础设施建设的发展, 工程建设消耗了大量的不可再生资源。其中, 经过几十年的破坏性开采, 我国多数地区的石灰岩、玄武岩石料已成为稀缺资源。作为我国公路建设主要面层铺装材料的沥青混合料, 其中的填料部分即为石灰岩经破碎、磨细后制得的石灰

岩矿粉。填料的掺量约占沥青混合料总质量的 5%，主要起填充集料骨架空隙、提高沥青劲度和提高集料-胶浆黏附性等作用，是沥青混合料中不可或缺的重要组成部分。因此，研发成本可控、性能稳定的石灰岩矿粉替代材料，并开发相应的沥青混合料制备工艺，是公路建设领域亟待解决的关键问题。

在先前的研究中已经制备了使用物理改性赤泥替代矿粉的沥青胶浆并评价了其流变性能和水稳定性。但是，赤泥对沥青混合料的路用性能的影响尚不清楚。本研究通过将物理改性赤泥替代矿粉填料制备沥青混合料并研究赤泥对沥青胶浆路用性能的影响规律[2]。

## 2. 试验材料

### 2.1. 集料及矿粉

本研究中所制备沥青混合料级配选择 AC20，所用集料与矿粉为石灰岩，产自山东泰安路桥集团。各项指标见表 1、表 2。

**Table 1.** Basic performance index of aggregate

**表 1.** 集料基本性能指标

测试项目	细集料 0~3 mm	粗集料 3~5 mm	粗集料 5~10 mm	粗集料 10~20 mm
表观相对密度	2.697	2.714	2.732	2.718
表干相对密度	-	2.630	2.675	2.689
毛体积相对密度	-	2.581	2.642	2.672
吸水率%	0.82	1.895	1.248	0.637

**Table 2.** Basic performance index of mineral powder

**表 2.** 矿粉的基本性能指标

测试项目	技术要求	试验结果
表观密度(g/cm <sup>3</sup> )	≥2.5	2.775
<0.6 mm	100	100
粒度范围%	90~100	96.7
<0.075 mm	75~100	79.3
外观	无团粒结块	无团粒结块

### 2.2. 沥青

本文研究中所用的 AH-70 沥青(Virgin)由华瑞道路材料公司提供，沥青的基本性能指标测试结果如表 3 所示。

**Table 3.** Basic performance index of base asphalt

**表 3.** 基质沥青基本性能指标

测试项目	测试结果	单位
针入度(25℃)	68.3	0.1mm
延度(10℃)	40.1	cm
延度(15℃)	>150	cm
软化点	48.2	℃
135℃粘度	0.450	Pa·s
密度(15℃)	1.035	g/cm <sup>3</sup>
溶解度	99.6	%

### 2.3. 赤泥

本文研究中选取烧结法赤泥进行研究, 烧结法赤泥来自于山东铝业股份有限公司, 烧结法赤泥为棕色, PH 值比拜耳法赤泥低, 并且钙含量较高, 具有一定的潜在活性。表 4 列出了矿粉和烧结法赤泥的基本指标试验结果。

**Table 4.** Basic index of filler

**表 4.** 填料的基本指标

指标	矿粉	烧结法赤泥
相对密度	2.775	2.553
PH 值	8.2	9.9
比表面积(m <sup>2</sup> /g)	9.988	35.419
孔隙体积(cc/g)	0.017	0.097

### 2.4. 物理改性材料

为了提高赤泥沥青胶浆的路用性能, 本研究考虑使用消石灰、硅酸盐水泥粉状材料对赤泥进行物理改性。

#### 2.4.1. 消石灰

本研究所使用的消石灰由中国济南志博化工有限公司提供, 消石灰是一种常用的沥青混合料抗剥落添加剂, 前人的研究表明, 掺加消石灰能改善沥青与酸性矿料的粘附性, 消石灰适当代替部分矿粉后能够提高沥青及沥青混合料的性能, 掺加消石灰后沥青混合料的水稳定性和高温性都有明显的改善[3]。

#### 2.4.2. 硅酸盐水泥

本研究中使用的水泥, 主要由 CaO 和 SiO<sub>2</sub> 组成, 含有 MgO、SO<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等杂质, 化学成分与矿粉相近, 这说明它有可能改善赤泥与沥青的粘结性能。

### 2.5. 填料化学组成成分

表 5 列出了赤泥、矿粉与两种物理改性材料的化学组成成分。石灰石矿粉和消石灰具有相似的氧化物组成, 其中 CaO 占主导相(石灰石矿物填料占 88.65%, 消石灰占 90.67%)。此外, 这两种材料还含 SiO<sub>2</sub> 和 MgO 两种成分, 含量在 2%~4.5%之间。但氧化钙以不同的形式存在, 在石灰石矿物填料中以 CaCO<sub>3</sub> 的形式存在, 在消石灰中以 Ca(OH)<sub>2</sub> 的形式存在。在赤泥中, CaO 含量最高, 其次是 SiO<sub>2</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 这三种成分占总质量的 80%以上。值得注意的是, 赤泥中的 Na<sub>2</sub>O 含量明显高于其他三种材料, 说明其碱度较高。填料的化学成分会影响沥青与填料的粘结, 进而影响相关沥青混合料的路用性能[4]。

**Table 5.** Oxide composition (wt%) of four fillers

**表 5.** 四种填料的氧化物组成(wt%)

氧化物	组成含量(wt%)			
	矿粉	烧结法赤泥	硅酸盐水泥	消石灰
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.84	8.03	5.20	2.20
CaO	88.65	44.64	63.00	90.67
CeO <sub>2</sub>	-	0.08	0.06	-
Cl	0.04	0.09	0.03	0.01

Continued

Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.07	0.02	-
CuO	0.02	0.01	0.01	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.13	17.54	4.20	1.49
K <sub>2</sub> O	0.51	0.40	0.86	0.01
MgO	3.15	1.34	1.50	2.17
MnO	0.04	0.05	0.11	0.02
Na <sub>2</sub> O	0.08	3.21	0.55	0.01
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.01	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.26	0.39	0.03
PbO	-	0.03	0.01	-
SO <sub>3</sub>	0.06	0.90	2.20	0.02
SiO <sub>2</sub>	4.11	18.19	22.00	3.28
SrO	0.09	0.11	0.14	-
ThO <sub>2</sub>	-	0.02	-	-
TiO <sub>2</sub>	0.19	4.81	0.01	0.07
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.01	0.01	-
ZnO	0.01	0.01	0.03	0.01
ZrO <sub>2</sub>	-	0.18	0.07	-

### 3. 试验方案

#### 3.1. 物理改性赤泥的制备

将赤泥以及其他改性材料进行破碎,干燥,然后磨细至《公路沥青路面施工技术规范》JTGF40-2004 中对填料所要求的粒径,得磨细粉体材料;将改性材料倒入水中,混合均匀,得改性材料水溶液;将磨细后的赤泥按照一定比例倒入改性材料水溶液中,混合均匀,得改性赤泥浆液;将改性赤泥浆液进脱水、烘干,破碎、磨细至《公路沥青路面施工技术规范》JTGF40-2004 中对填料所要求的粒径,即得物理改性赤泥。

在本研究中,烧结法赤泥与改性材料的比例为体积比 9:1。在制备沥青混合料时,赤泥与改性赤泥按照等体积比例替代石灰岩矿粉。

#### 3.2. AC20 沥青混合料配合比设计

本部分按照《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40-2004)中的 AC-20 型级配范围,设计要采用的再生沥青混合料级配曲线如图 1 [5]。

通过马歇尔试验配合比设计方法确定最优级配和最佳沥青用量。沥青混合料最优级配为图 1 的级配 2、最佳沥青用量为 4.1%。

#### 3.3. 残留稳定度

本文按照《公路工程沥青及沥青混合料实验规程》(T 0709-2011)中规定的方法进行浸水马歇尔试验。试件按照规程 T 0702-2011 制作标准马歇尔试件,试件尺寸直径 101.6 mm、高 63.5 mm,加载速率选择 50 mm/min,试验温度选择 60℃。试验结果如图 2 所示,赤泥作为填料时,沥青混合料残留稳定度比低

于矿粉沥青混合料；在赤泥中掺入消石灰、水泥可以使残留稳定度提高；所以赤泥会使得沥青混合料水稳定性降低，而消石灰、水泥会提高沥青混合料的水稳定性[6]。

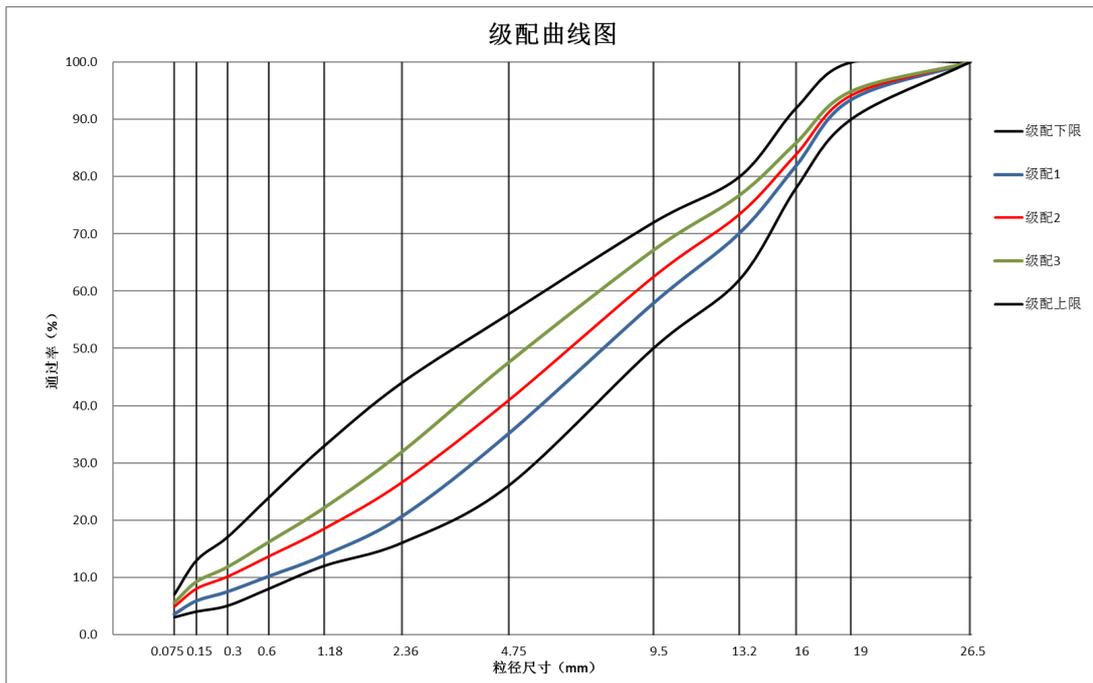


Figure 1. Gradation curve of AC-20 asphalt mixture

图 1. AC-20 沥青混合料级配曲线

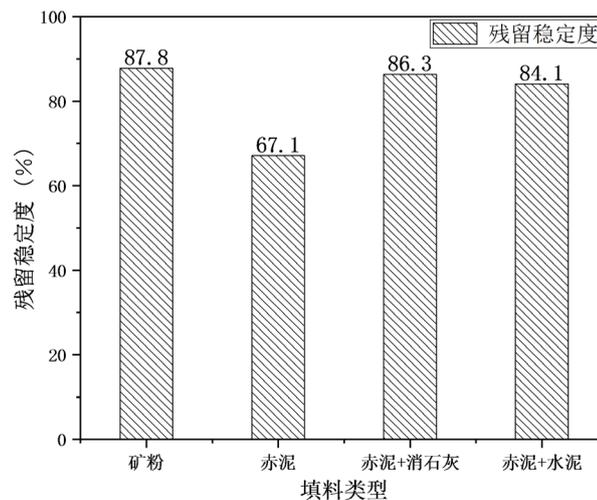


Figure 2. Residual stability of asphalt mixture

图 2. 沥青混合料残留稳定度

### 3.4. 汉堡车辙试验

汉堡车辙试验仪是 1970 年由德国汉堡市的工程师发明，该仪器实际上是参考英国运输与公路研究实验室(Transportation and Road Research Laboratory, 简称 TRRL)的类似设备，并将 TRRL 采用的橡胶轮胎改成钢轮，以此钢轮在浸没在热水中的沥青混合料样品上来回滚动，在一定的滚动次数后量测轮迹的深

度, 以判断该沥青混凝土在水侵害环境下的抗车辙能力, 现已成为道路工程研究方面必备设备, 并已列入 AASHTO-T324-04 规范标准。汉堡车辙试验仪用于模拟现场车辆轮碾下沥青混合料材料受载情况, 可以进行不同温度的干燥、浸水条件下的试验以评定混合料抗车辙性能, 试验所用的混合料试件可以为圆柱试件或板体试件[7]。

汉堡车辙试验与普通车辙试验类似, 以车轮碾压次数为横坐标, 以沥青混合料的永久变形量为纵坐标可以得出车辙深度随着车轮作用次数的变化情况, 如图 3 所示。车辙变化曲线可分为后压实、蠕变和剥落 3 个阶段。其中剥落折点是蠕变斜率与剥落斜率的交叉点, 是评价沥青混合料水稳定性的重要指标。剥落折点出现之后, 水对混合料的影响开始加重, 车辙深度急剧增加。剥落折点越高, 说明这条道路越不容易产生车辙。剥落折点出现越早, 说明混合料的抗水损害能力越差[8]。

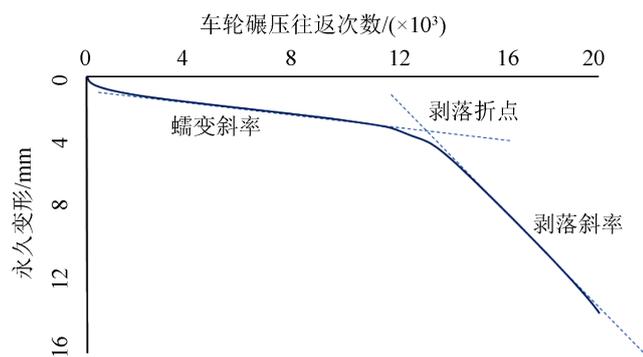
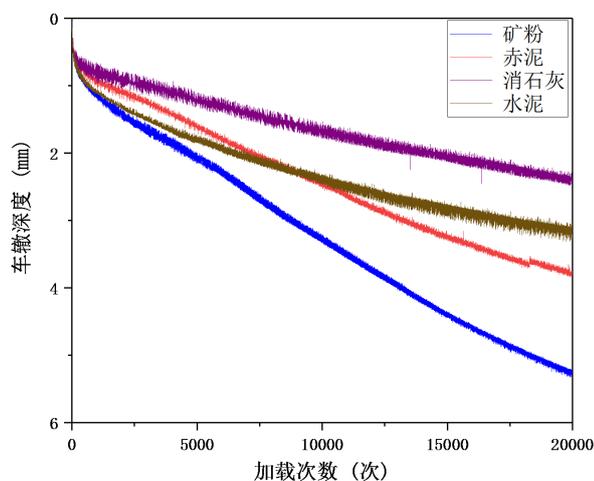


Figure 3. Relationship between rutting depth and wheel action times

图 3. 车辙深度 - 车轮作用次数关系

本部分研究使用汉堡车辙仪, 对四种沥青混合料在浸水条件下的抗车辙性进行了评价, 试件成型方式采用旋转压实成型, 试件尺寸: 直径为 150 mm, 厚度 60 mm; 试验条件为 50℃水浴和干燥, 试验轮 47 mm 宽, 荷载重 705 N。实验结果如图 4 所示, 从图中可以看出, 在 50℃水浴条件下, 赤泥沥青混合料呈线性破坏, 这表示在浸水条件下赤泥沥青混合料抗车辙性很差, 而在赤泥中掺入消石灰或水泥会增强沥青混合料的水稳定性, 从而增强沥青混合料在浸水状态下的抗车辙性; 在 50℃干燥状态下, 使用赤泥替代矿粉则可以延缓剥落折点出现时间, 减小蠕变斜率, 说明可以提高沥青混合料的高温抗车辙性能, 而在赤泥中掺入消石灰可以进一步提高其高温性能。



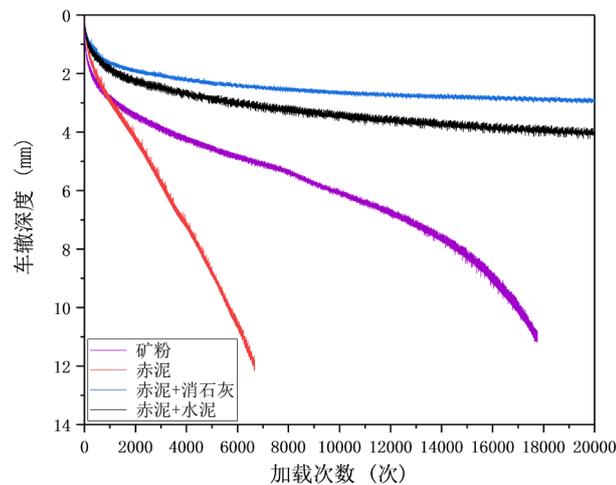


Figure 4. Asphalt mixture Hamburg rutting test data: 50°C drying (1); 50°C water bath (2)

图 4. 沥青混合料汉堡车辙试验数据: 50°C干燥(上); 50°C水浴(下)

### 3.5. SPT 试验

美国联邦公路局(FHWA)为资助国家联合公路研究项目(NCHRP)研究开发了 SPT (Simple Performance Test)试验方法, SPT 试验可对沥青混合料进行动态模量试验、流变次数和流变时间的测试,用于沥青混合料抗高温性能路用性能评估,试验得到的动态模量主曲线能用于路面结构设计。SPT 试验仪是一套新型的一体化液压试验设备,如图 5 所示。该试验系统集成了高性能液压作动器,空气冷却液压源,控制和数据采集系统,自带温度控制单元的组式三轴室。简单性能试验仪液压系统采用底部加载作动器系统,装备电液伺服阀,具有 PID 反馈回路控制和实时适应控制,能够在试验过程中调整控制信号。试验仪设计中使用了大量的传感器以及安全互锁,确保操作者的安全,如三轴室的自动打开/关闭。试件表面安装有三个 LVDT 轴向位移传感器,传感器以 120°均匀分布在试件周围,对三个传感器的测量结果取平均值,使应变测量更加准确。SPT 试验仪可以完成包括动态模量、静载蠕变、重复荷载试验以及重复剪切试验等沥青混合料试验[9]。

本文采用重复剪切试验测试沥青混合料的动态模量,相位角。与 DSR 试验原理类似,实验舱内的加载装置对试件轴向施加不同频率的正弦荷载,并测定相应的轴向应力与应变,利用应力应变数据可以对动态模量与相位角进行计算。动态模量、相位角的计算公式如公式 1、2 所示。本文试验温度选为 20°C,应变水平为 100  $\mu\epsilon$ ,对试件施加的频率为 25 Hz、20 Hz、10 Hz、5 Hz、2 Hz、1 Hz、0.5 Hz、0.2 Hz、0.1 Hz。分析不同温度下各类型沥青混合料的动态模量、相位角的变化情况。

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\theta = \frac{T_i}{T_p} \times (360^\circ) \quad (2)$$

式中:  $|E^*|$ ——动态模量;  $\sigma_0$ ——应用正弦荷载的振幅;  $\epsilon_0$ ——产生正弦应变的振幅;  $\theta$ ——相位角;  $T_i$ ——滞后的时间,  $T_p$ ——正弦荷载周期时间。

通过 SPT 试验对四种沥青混合料进行试验分析,各沥青混合料的动态模量、相位角如图 6 所示。

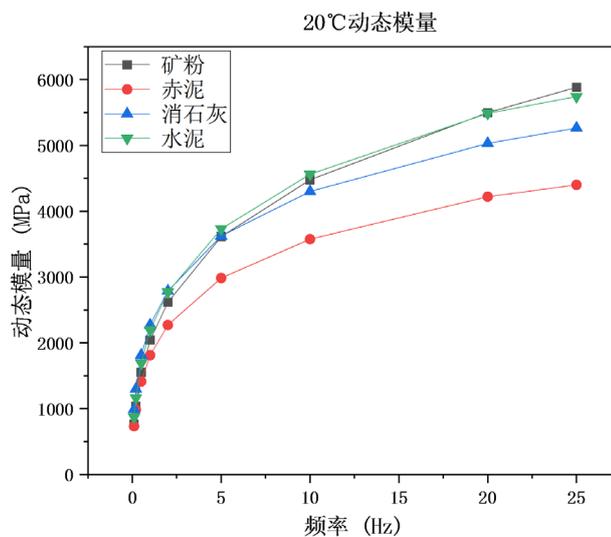
由图 6 可知，使用赤泥替代矿粉制得沥青混合料动态模量会大幅下降，但是在赤泥中掺入少量消石灰或水泥，可以使得动态模量恢复到普通沥青混合料的水平。



Figure 5. SPT tester

图 5. SPT 试验仪

DSR 试验中，相位角是表征沥青材料黏弹特性的指标。同样，沥青混合料试验中相位角是用来评价沥青混合料黏弹特性的指标。相位角越大，则沥青混合料的粘性越大，受到外力作用时便会产生更大的不可恢复的变形。由图 6 可知，使用赤泥替代矿粉，可以减小沥青混合料的相位角，减少受到外力作用时产生的不可恢复的变形，在赤泥中掺入少量消石灰可以进一步增强该效果。



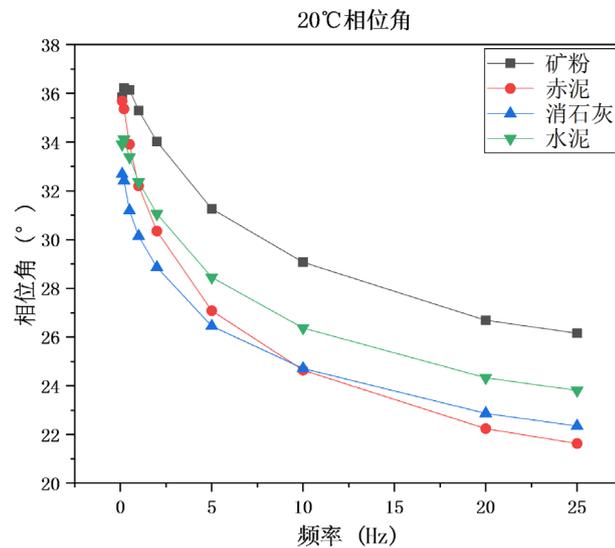


Figure 6. SPT test data of asphalt mixture: dynamic modulus (Part 1); phase angle (2)

图 6. 沥青混合料 SPT 实验数据: 动态模量(上); 相位角(下)

#### 4. 结论

1) 石灰石矿粉和消石灰具有相似的氧化物组成, 硅酸盐水泥主要由  $\text{CaO}$  和  $\text{SiO}_2$  组成, 含有  $\text{MgO}$ 、 $\text{SO}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等杂质, 化学成分与矿粉相近, 这说明水泥和消石灰有可能改善赤泥与沥青的粘结性能。在赤泥中,  $\text{CaO}$  含量最高, 其次是  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 这三种成分占总质量的 80% 以上。值得注意的是, 赤泥中的  $\text{Na}_2\text{O}$  含量明显高于其他三种材料, 说明其碱度较高。填料的化学成分会影响沥青与填料的粘结, 进而影响相关沥青混合料的路用性能。

2) 赤泥作为填料时, 沥青混合料残留稳定度比低于矿粉沥青混合料; 在赤泥中掺入消石灰、水泥可以使残留稳定度提高; 所以赤泥会使得沥青混合料水稳定性降低, 而消石灰、水泥会提高沥青混合料的水稳定性。

3) 在  $50^\circ\text{C}$  水浴条件下, 赤泥沥青混合料呈线性破坏, 这表示在浸水条件下赤泥沥青混合料抗车辙性很差, 而在赤泥中掺入消石灰或水泥会增强沥青混合料的水稳定性, 从而增强沥青混合料在浸水状态下的抗车辙性; 在  $50^\circ\text{C}$  干燥状态下, 使用赤泥替代矿粉则可以延缓剥落折点出现时间, 减小蠕变斜率, 说明可以提高沥青混合料的高温抗车辙性能, 而在赤泥中掺入消石灰可以进一步提高其高温性能。

4) 使用赤泥替代矿粉制得沥青混合料动态模量会大幅下降, 但是在赤泥中掺入少量消石灰或水泥, 可以使得动态模量恢复到普通沥青混合料的水平。使用赤泥替代矿粉, 可以减小沥青混合料的相位角, 减少受到外力作用时产生的不可恢复的变形, 在赤泥中掺入少量消石灰可以进一步增强该效果。

#### 参考文献

- [1] 孙兆云. 拜耳法赤泥填筑路基的工程技术与环境的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2017.
- [2] 赵薇. 集料含水量对沥青混合料路用性能影响的试验分析[J]. 公路交通技术, 2012(1): 26-28.
- [3] 曾坚坚. 掺消石灰改善沥青与酸性矿料的粘附性[J]. 广东公路交通, 2003(z1): 35-37.
- [4] 罗赞. 填料对沥青混合料路用性能影响研究[J]. 工程技术研究, 2018(5): 130-131.
- [5] 交通部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

- 
- [6] 交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: *Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering: JTG E20-2011* [M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
  - [7] 王新刚. 基于圆柱形试件的沥青路面抗车辙性能评价及施工质量控制方法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2010.
  - [8] 陈凯. 我国车辙试验与汉堡车辙试验对比研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2008.
  - [9] 郭宇雷. 地毯式沥青混合料配合比设计及其性能评价研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.