

基于动态模量的不同碎石沥青混合料性能分析研究

马祥辉¹, 胡家波^{2,3}, 杨震宇¹, 符东绪^{2,3}

¹山东高速股份有限公司, 山东 济南

²山东省交通科学研究院, 山东 济南

³高速公路养护技术交通行业重点实验室(济南), 山东 济南

Email: 36019638@qq.com

收稿日期: 2021年4月6日; 录用日期: 2021年4月23日; 发布日期: 2021年4月30日

摘要

为了对不同碎石设计的沥青混合料动态特性进行研究, 采用简单性能试验机(SPT)在不同温度和荷载频率下分别对铁矿围岩碎石和石灰岩碎石设计的密级配沥青混合料AC20的动态模量和相位角进行测试。其中铁矿围岩碎石设计了两个级配, 石灰岩按照传统级配走势进行的设计。对实验得到的结果, 分析了荷载频率、实验温度对两种碎石混合料动态特性的影响。依据时-温等效原理, 采用西格摩德(Sigmoidal)函数进行拟合经过回归得到了三种级配沥青混合料20°C时的主曲线及位移因子。根据主曲线, 对三种混合料在动荷载作用下, 表现出的性能进行了对比分析, 根据分析在低频荷载作用即长时间荷载作用时, 铁矿碎石混合料的高温性能要好于石灰岩碎石, 但铁矿碎石两个级配之间的差异很小, 说明铁矿碎石混合料在车辆低速行驶即长时间荷载作用时具有很好的性能。

关键词

级配设计, 动态特性, 动态模量, 相位角, 主曲线

Research on Performance Analysis of Different Stone Asphalt Mixtures Based on Dynamic Modulus

Xianghui Ma¹, Jiabo Hu^{2,3}, Zhenyu Yang¹, Dongxu Fu^{2,3}

¹Shandong Expressway Company Limited, Jinan Shandong

²Shandong Transportation Research Institute, Jinan Shandong

³Key Laboratory for Expressway Maintenance Technology of Ministry of Communications, Jinan Shandong

Email: 36019638@qq.com

Abstract

In order to study the dynamic characteristics of the different stone asphalt mixtures, a simple machine performance test (SPT) was used to test dynamic modulus and phase angles of dense-graded AC20 designed by iron surrounding rock gravel and limestone gravel at different temperatures and frequencies. Two gradations were designed by iron surrounding rock gravel, and limestone gravel was designed according to the traditional grading trend. Based on the experimental results, the influence of load frequency and experimental temperature on the dynamic characteristics of the two types of gravel mixtures was analyzed. According to the principle of time-temperature equivalence, the Sigmoidal function was used to fit, and the master curve and displacement factor of three grading asphalt mixtures at 20°C were obtained through regression. According to the master curve, the performance of the three mixtures under dynamic load was compared and analyzed. According to the analysis, the high temperature performance of the iron surrounding rock gravel mixture is better than the limestone gravel under the low-frequency load acts, that is, the long-term load acts. However, the difference between the two gradations of iron surrounding rock gravel is very small. It showed that the iron surrounding rock gravel mixture has good performance when the vehicle runs at low speed, that is, under long-term load.

Keywords

Grading Design, Dynamic Characteristics, Dynamic Modulus, Phase Angle, Master Curves

Copyright © 2021 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. 概述

随着“十四五”各地构建综合立体交通规划的陆续出台，在未来五年内基础设施建设依然有大量交通基础设施需要进行建设。而工程项目的建设，需要大量的砂石料。筑路材料是公路建设的基础、是公路建设的基本条件。高速公路建设质量的好坏，同筑路材料的选用关系极大，是施工控制的重中之重。在整个十三五期间砂石材料的供应市场长期处于卖方市场，导致低品质骨料滥用充斥市场、企业加工水平停滞不前，工程质量损失严重。而铁矿石开采过程中产生的大量围岩矿石由于含有磁铁等多种金属元素，材质比较致密，抗压强度相对普通岩石要高，从工程建设角度出发，对于改善道路工程的承载力和耐久性具有十分重要的意义。

将低品位铁矿石加工后应用于道路工程在国外已有大量研究[1] [2] [3]，涉及较为系统的理论研究和工程应用，仅美国就有近 20 个州将尾矿应用于实际道路工程，包括加利福尼亚州、路易斯安那州、明尼苏达州、密西西比州、新泽西州、新墨西哥州等。20 世纪 50 年代至 60 年代，铁尾矿开始在明尼苏达州锡尔弗贝城应用。此外，2003 年，铁尾矿碎石还被用于布雷纳德国际汽车拉力赛(Brainerd International Raceway)赛道的修建。由于较高的密度和良好的耐久性，赛道出发台采用沥青铁尾矿碎石混合料铺筑，该赛季即有两项世界纪录被打破。

我国矿产资源综合利用产业正处于蓬勃发展阶段[4]，但由于综合利用产业的技术水平较低、缺乏系

统标准、用户接受度不高等多种原因，使得我国铁矿山固体废料综合利用率平均不到 10%，首钢矿业公司建成了铁路道砟生产线，生产四种规格的铁路道砟和公路细砟，河南安钢舞阳矿业公司建立了可用于工业厂房混凝土建材的骨料以及公路和铁路的道砟等的生产线，北京密云铁矿将产生的围岩全部加工成建筑骨料，用于建筑砖和砌块等产品的生产。

以上提到的都是矿产资源开发企业采取的诸多措施，但对于低品位铁矿石加工成碎石后在道路工程水泥稳定碎石半刚性基层以及沥青混合料面层中的应用没有进行系统性的研究。本文采用铁矿围岩加工成的碎石和石灰岩碎石分别进行了混合料设计，其中铁矿围岩碎石设计了常规级配和间断级配两种级配曲线，石灰岩碎石按照常规进行了级配设计。并采用 SPT 简单性能试验机得到了三种级配设计的混合料的模量和相位角，分析了混合料动态模量和相位角随着温度变化和加载频率变化的规律，最终根据时温等效原理采用西格摩德(Sigmoidal)函数进行拟合得到了 20℃下三种混合料的主曲线，并对三种级配混合料的低频率时即长时间荷载作用时的高温稳定性进行了对比分析。

2. 混合料设计及结果分析

混合料配合比按照密级配 AC20 进行设计，考虑到铁矿围岩碎石致密性及强度好的特点，在进行级配设计时铁矿围岩碎石按照两种级配走势进行设计，其中级配 1 按照常规连续级配进行设计，级配 2 在 4.75~9.5 mm 筛孔之间进行了间断的级配设计。石灰岩级配仅按照常规连续级配进行了设计。据统计级配合成及级配曲线图如表 1 和图 1。

Table 1. The calculation table of three different gradations

表 1. 三种级配合成计算表

筛孔(mm)	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过百分率(%)												
铁矿围岩碎石 1	100.0	95.2	88.5	78.5	61.9	40.2	26.5	20.6	14.6	9.9	8.0	5.3
铁矿围岩碎石 2	100.0	95.1	87.5	75.6	56.0	45.5	33.2	25.7	18.0	12.1	9.6	6.3
石灰岩碎石	100	98.1	90.7	80.8	62.0	38.6	26.5	19.2	12.4	8.3	6.8	4.8
级配上限	100.0	90.0	83.0	73.0	56.0	35.0	22.0	15.0	10.0	6.0	5.0	4.0
级配下限	100.0	100.0	95.0	86.0	70.0	48.0	33.0	23.0	16.0	11.0	9.0	6.0
级配中值	100.0	95.0	89.0	79.5	63.0	41.5	27.5	19.0	13.0	8.5	7.0	5.0

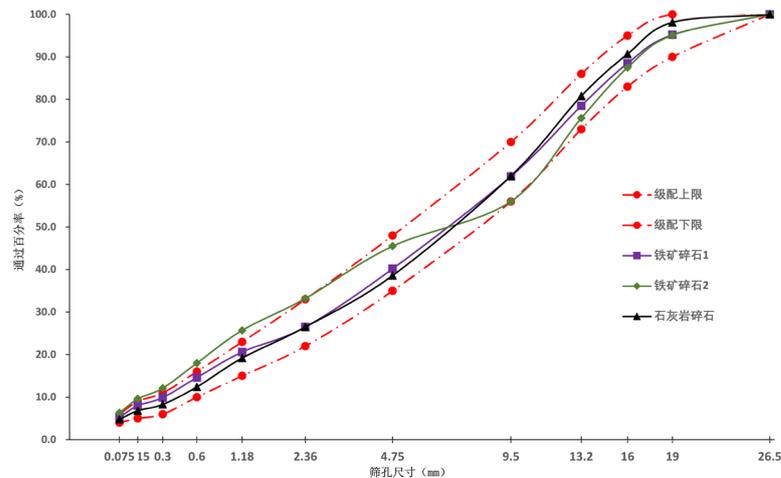


Figure 1. The grading curve of three different gradations

图 1. 三种级配合成曲线图

2.1. 配合比设计

室内采用马歇尔击实进行配合比设计，设计的三种级配混合料最终确定的最佳沥青用量及混合料体积指标见表 2。

Table 2. The volume index of three different gradations
表 2. 三种级配混合料体积指标汇总

体积指标	最佳沥青含量 OAC (%)	空隙率 VV (%)	矿料间隙率 VMA (%)	沥青饱和度 VFA (%)
铁矿围岩碎石 1	4.3	4.5	13.1	65.6
铁矿围岩碎石 2	4.1	4.4	13.0	66.1
石灰岩碎石	4.4	4.5	14.0	68.1
设计指标	-	4.0~6.0	≦13.0	65~75

2.2. 级配设计分析

根据三个级配设计最终结果，铁矿围岩碎石级配 2 最佳沥青用量最低，对其级配组成进行分析，该级配在 4.75~9.5 mm 之间采用了间断，且该级配在 9.5 mm 筛孔以上部分通过率均小于其他两种级配，但 4.75 mm 筛孔以下部分通过率是高于其他两种级配。从级配组成明显可以看出该级配在第一级主骨架分界 9.5 mm 以上粗骨料占比相对较多，第二级次主骨架 4.75 mm 和第一主骨架分界 9.5 mm 之间部分骨料偏少，从骨架嵌挤逐级填充角度必然需要较多的细集料即 4.75 mm 以下部分进行骨架的填充。这一级配组成上的不同造成了最佳沥青用量上的差别。为了对不同碎石、不同级配走势下设计的级配进行进一步对比，采用动态模量试验对混合料的性能进行对比分析。

3. 动态模量试验结果及分析

动态模量试验介绍见文献[5]，本文对三种级配混合料不同温度下的动态模量及相位角随加载频率的变化进行分析，如图 2~4 所示。

从图 2~4 可以得出，三种级配混合料动态模量在不同温度下随着加载频率增大均是逐渐增大，且在加载频率低于 5 Hz 之前增长幅度较明显，在高于 5 Hz 之后增长幅度趋于平缓。温度越高动态模量随加载频率增大的增长趋势越平缓，这与沥青混合料本身的特性有关，温度低时表现为弹性体，动态模量高，随着温度升高，弹性不再占据主导地位，更多的表现为黏性体，动态模量要小。

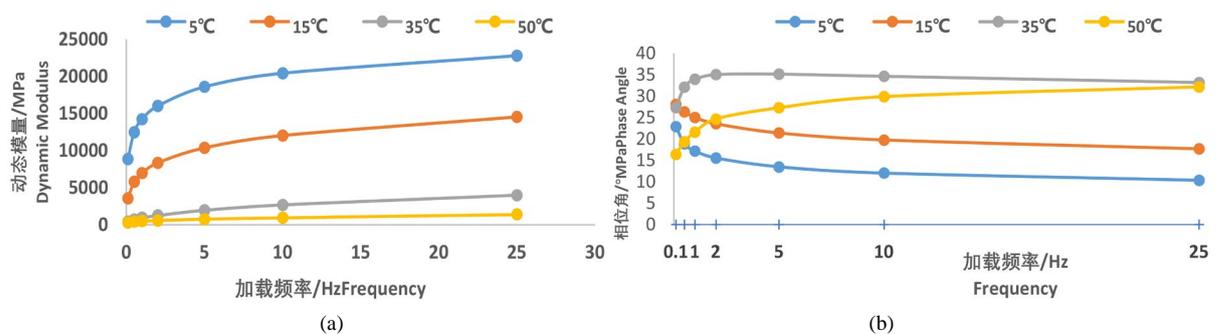


Figure 2. The trend of dynamic modulus and phase angle with loading frequency of gradation 1 of iron surrounding rock gravel. (a) Dynamic modulus; (b) Phase angle

图 2. 铁矿围岩碎石级配 1 动态模量及相位角随加载频率变化趋势。(a) 动态模量；(b) 相位角

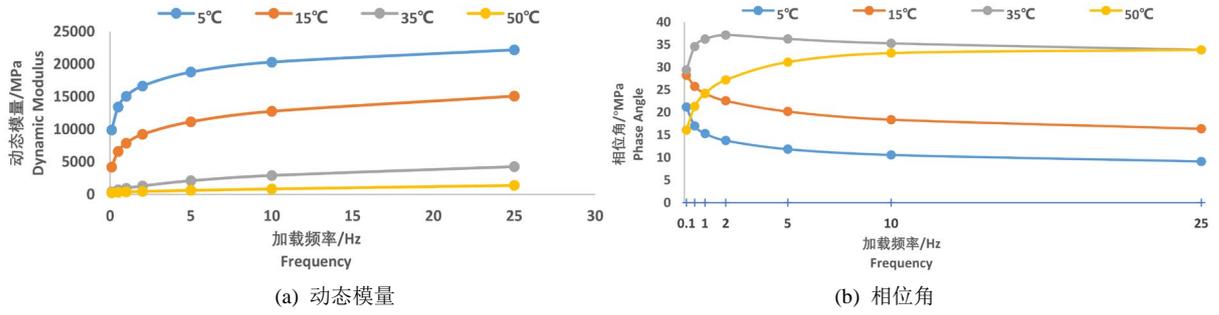


Figure 3. The trend of dynamic modulus and phase angle with loading frequency of gradation 2 of iron surrounding rock gravel
图 3. 铁矿围岩碎石级配 2 动态模量及相位角随加载频率变化趋势

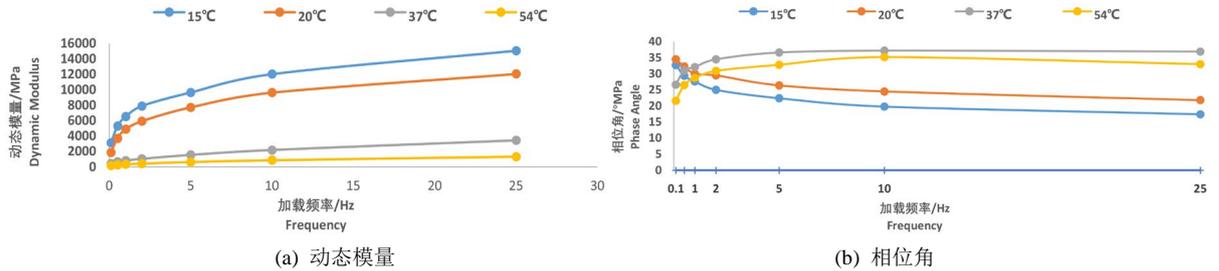


Figure 4. The trend of dynamic modulus and phase angle with loading frequency of limestone gravel asphalt mixture
图 4. 石灰岩碎石混合料动态模量及相位角随加载频率变化趋势

不同温度下相位角随着加载频率的变化要复杂一些，在温度较低时相位角表现为随着加载频率的增加而逐渐减小，这与前面动态模量分析得低温时混合料是以弹性体占据主导，随着加载频率不断增加即荷载作用时间的减少模量逐渐增大，则弹性越明显，沥青胶结料的黏滞性不明显即相位角减小；在温度较高时相位角随荷载频率变化更加复杂，铁矿围岩两个级配在 35°C 均表现为先增加后减小，只是两个级配出现拐点的加载频率是不同的，而在 50°C 时则随着加载频率得增加一直增加，石灰岩碎石混合料在 37°C 和 54°C 时均是先增加后减小，但出现拐点的加载频率不同温度下是不同的。

4. 动态模量主曲线

黏弹性材料具有一个共同特点，即在不同温度和作用时间下表现出来的性质存在显著的差异，借助时温等效原理其力学性质可以进行互相转换。主曲线就是根据这一原理，通过平移形成的在参考温度下的一条光滑曲线[6]。对于主曲线的描述在文献[5]中已做过详细的介绍，此次不再详细介绍。利用以上得到的三种沥青混合料动态模量数据，绘制得到动态模量主曲线如图 5 所示，拟合参数见表 3。

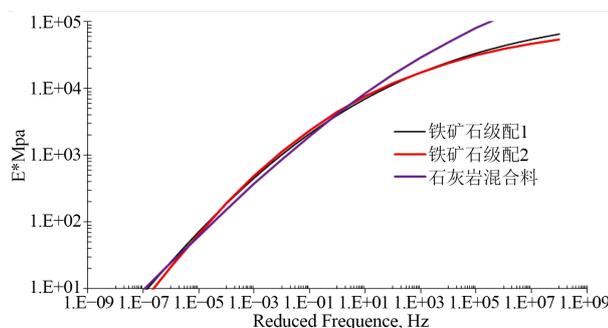


Figure 5. The master curve of three kinds of mixtures at 20°C
图 5. 三种混合料 20°C 主曲线

$$\lg(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\lg f^t)}} \quad \text{公式 1}$$

式中符号 $|E^*|$ 代表动态模量； f^t 代表荷载频率； δ 、 α 、 β 、 γ 为拟合回归系数。

Table 3. The regression parameters of the master curve of dynamic modulus at 20°C
表 3. 20°C参考温度下动态模量主曲线拟合回归参数

参数	铁矿围岩级配 1	铁矿围岩级配 2	石灰岩碎石
δ	-5.3	-5.3	-3.8
α	10.5	10.3	10.2
β	-1.7	-1.9	-1.0
γ	-0.2	-0.2	-0.2

根据拟合回归得到模量主曲线，铁矿围岩碎石两个级配混合料在 20°C 试验条件时接近重合，石灰岩碎石混合料的一定频率范围内与前两者无明显差别，而且均呈现出随着加载频率增加模量增大。可以根据 Vanderpoel 的公式确定车轮荷载的加载时间[7]。

$$t = 1/(2\pi f) \quad \text{公式 2}$$

式中 f 为荷载加载频率。

2017 年实施的沥青路面设计规范[8]对沥青路面结构设计参数进行了一个重大调整，其中模量参数采用能反映沥青混合料作为非线性弹塑性材料的应力依赖性、黏弹性的温度和应力作用时间依赖性的动态模量。而且根据美国 ASSHTO 设计方法对等效温度和加载频率进行了规定，等效温度采用 20°C，加载频率为 10 Hz。根据公式 2 计算，此时加载时间大约在 0.016 s，相当于车辆行车速度在 60~65 km/h，此时测试得到的沥青混合料的动态模量均大于 4000 MPa，具体为石灰岩碎石 > 铁矿围岩级配 2 > 铁矿围岩级配 1；相关文献[9] [10]曾对沥青混合料的高温稳定性做出过如下描述，沥青混合料属于黏弹性材料，其性能受温度和荷载作用时间的影响是可以互换的，因此在考量混合料的高温稳定性时，高温时的稳定性只是其中一方面，同时要考虑低速行驶即长时间荷载作用时的稳定性也是高温稳定性的一种表现形式。沥青路面在长时间荷载作用下高温稳定性也承受严酷的考验，因此也需要对低频率下混合料的性能进行考察以考证其在长时间荷载作用时的高温稳定性能，在 10^{-2} Hz~ 10^{-1} Hz 频率范围内，铁矿围岩碎石两个级配混合料均大于石灰岩碎石混合料的模量，即在车辆低速行驶长时间荷载下，铁矿围岩碎石混合料均好于石灰岩碎石混合料，具体为铁矿围岩级配 2 > 铁矿围岩级配 1 > 石灰岩碎石，而对铁矿围岩碎石两个级配来说，级配 2 采用的是间断级配具有更好的骨架嵌挤结构，而且沥青用量低，所以其具有表现出更优的性能。

5. 结论

为了对比铁矿围岩碎石和石灰岩碎石混合料性能，借助简单性能试验机(SPT)分别对设计的铁矿围岩碎石两个级配和石灰岩碎石混合料在不同温度和不同加载频率试验条件下的动态模量进行了测试并对结果进行了分析，分析表明：

1) 根据混合料设计结果，在采用间断级配设计时最佳沥青用量要比连续级配低，从级配组成来看，间断级配在第一级主骨架分界 9.5 mm 以上粗骨料占比相对较多，第二级次主骨架 4.75 mm 和第一主骨架分界 9.5 mm 之间部分骨料偏少，从骨架嵌挤逐级填充角度必然需要较多的细集料即 4.75 mm 以下部分进行骨架的填充，这一级配组成上的不同造成了最佳沥青用量上的差别。

2) 通过对三个级配动态模量和相位角的变化分析可知, 三种级配混合料动态模量在不同温度下随着加载频率增大均是逐渐增大, 且在加载频率低于 5 Hz 之前增长幅度较明显, 在高于 5 Hz 之后增长幅度趋于平缓, 这与混合料本身特性有关, 沥青属于黏弹性材料, 其劲度模量对时间具有依赖性, 实际加载作用时间越短, 沥青混合料表现出的模量越大, 具有高频高弹的特点。

3) 借助时温等效原理, 采用西格摩德((Sigmoidal)函数得到了三种混合料在 20℃ 参考温度下的动态模量主曲线, 在 10 Hz 频率时, 石灰岩碎石混合料的模量要比铁矿围岩碎石稍高, 但三种混合料此时模量都大于 4000 MPa, 满足路面结构设计参数要求, 但在更低行车速度即更低频率时, 铁矿围岩碎石混合料的模量值均大于石灰岩碎石混合料, 而且间断级配混合料最大, 这与采用间断级配具有更优的骨架嵌挤结构有关, 而且沥青用量又低, 所以该级配在长时间荷载时表现出更优的性能。

基金项目

山东交通创新计划项目(2018B44)、2018 年度交通运输行业重点科技项目清单入库项目。

参考文献

- [1] Aruna, M. (2012) Utilization of Iron Ore Tailings in Manufacturing of Paving Blocks for Eco-Friendly Mining. *Ahmad Dahlan University*, **23-24**, 239-250.
- [2] Zanko, L.M., Niles, H.B. and Oreskovich, J.A. (2008) Mineralogical and Microscopic Evaluation of Coarse Taconite Tailings from Minnesota Taconite Operations. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, **52**, S51-S65. <https://doi.org/10.1016/j.vrtph.2007.09.016>
- [3] Ahmari, S., Chen, R. and Zhang, L.Y. (2012) Utilization of Mine Tailings as Road Base Material. *Geocongress*, **2012**, 3654-3661. <https://doi.org/10.1061/9780784412121.374>
- [4] 郭建文, 王建华, 杨国华. 我国铁尾矿资源现状及综合利用[J]. 现代矿业, 2009(10): 23-25.
- [5] 胡家波, 樊亮, 等. 再生沥青混合料动态模量试验研究[J]. 公路工程, 2014, 39(5): 122-125.
- [6] 马林, 张肖宁. 间接拉伸与单轴压缩模式沥青混合料动态模量比较分析[J]. 公路交通科技, 2009, 26(10): 11-17.
- [7] 商淑杰. 湖沥青改性沥青混合料疲劳性能及研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2012.
- [8] 中交路桥技术有限公司. JTG D50-2017 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [9] 张登良. 沥青路面工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [10] 朱洪洲, 黄晓明. 沥青混合料高温稳定性影响因素分析[J]. 公路交通科技, 2004, 21(4): 1-4.