

# 基于沥青混合料动态模量主曲线参数的 沥青路面结构分析

刘朝晖<sup>1,2</sup>, 杨鑫<sup>2</sup>, 黄优<sup>1,2\*</sup>, 柳力<sup>2</sup>

(1.长沙理工大学 道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心,湖南长沙 410114;

2.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南长沙 400114)

**摘要:**为研究沥青混合料动态模量主曲线参数变化以及交互作用对沥青路面结构响应的影响,采用有限元方法建立沥青路面结构三维模型,并开展半刚性基层和柔性基层沥青路面结构计算;以动态模量主曲线参数 $\delta$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 为影响因素,以沥青层底最大拉应变、路基顶面竖向压应变为响应目标,采用响应面法(RSM)建立动态模量主曲线参数与沥青路面关键结构响应的响应面模型,分析主曲线参数及其交互作用对沥青路面结构关键响应的影响。结果表明:动态模量主曲线参数对结构关键响应的影响受响应类型和路面结构类型的共同影响,其中参数 $\delta$ 的影响最大, $\alpha$ 次之, $\beta$ 、 $\gamma$ 的影响相对较小。半刚性基层路面结构的沥青面层层底拉应变和路基竖向压应变不受参数间的交互作用影响,参数 $\alpha$ 和 $\beta$ 的交互作用对柔性基层路面结构的路基竖向压应变影响显著。

**关键字:**沥青路面;动态模量;响应面法;主曲线;有限元;力学响应

中图分类号:U416

文献标志码:A

## Analysis of Asphalt Pavement Structure Based on Master Curve Parameters of Dynamic Modulus of Asphalt Mixture

LIU Zhaohui<sup>1,2</sup>, YANG Xin<sup>2</sup>, HUANG You<sup>1,2\*</sup>, LIU Li<sup>2</sup>

(1. Engineering Research Center of Catastrophic Prophylaxis and Treatment of Road & Traffic Safety of Ministry of Education, Changsha

University of Science & Technology, Changsha, Hunan 400114, China; 2. School of Traffic and Transportation Engineering,

Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 400114, China)

**Abstract:** In order to study the effect of the change in the master curve parameters of the dynamic modulus of asphalt mixture and the interaction on the structural response of asphalt pavement, a three-dimensional model of the asphalt pavement structure was established using the finite element method, and the structural calculations of asphalt pavement with semi-rigid base and flexible base were carried out. The master curve parameters of the dynamic modulus  $\delta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ , and  $\gamma$  were taken as the influencing factors, and the maximum tensile strain at the bottom of the asphalt layer and the vertical compressive strain at the top of the subgrade were set as the response targets. The response surface model of the master curve parameters of the dynamic modulus and the critical structural response of the asphalt pavement was established by the response surface method (RSM), and the influence of the master curve parameters and their interaction on the critical response of the asphalt pavement structure was analyzed. The results show that the effect of the master curve parameters of

收稿日期:2023-11-25(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2021YFB2601000);国家自然科学基金资助项目(编号:52008044,52278437);湖南省自然科学基金资助项目(编号:2022JJ40479);湖南省教育厅自然科学基金优秀青年项目(编号:21B0296);长沙理工大学道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心开放基金资助项目(编号:kfj210401)

作者简介:刘朝晖,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:723772885@qq.com

\*通信作者:黄优,男,博士,副教授.E-mail:hyzju@csust.edu.cn

the dynamic modulus on the critical response of the structure is influenced by the type of response and the type of pavement structure, and the parameter  $\delta$  has the greatest effect, followed by  $\alpha$ . The effects of  $\beta$  and  $\gamma$  are relatively small. The tensile strain at the bottom of the asphalt layer and the vertical compressive strain of the subgrade of the pavement structure with a semi-rigid base are not affected by the interaction between parameters, and the interaction of parameters  $\alpha$  and  $\beta$  has a significant effect on the vertical compressive strain of the subgrade of the pavement structure with a flexible base.

**Keywords:** asphalt pavement; dynamic modulus; response surface method; master curve; finite element; mechanical response

## 0 引言

动态模量是描述沥青路面材料在车辆动态荷载作用下应力与应变响应的重要参数之一<sup>[1-2]</sup>,相比静态模量能更准确地反映沥青路面的实际工作状态,是国内外主要沥青路面设计方法的关键指标。

沥青混合料具有典型的黏弹特性,可以近似看作简单流变体材料。相同的力学效应,既可以在较高温度、较短时间内观察到,也可以在较低温度、较长时间内观察到,即时温等效原理。国内外学者基于时温等效原理,将不同测试条件下的动态模量曲线,以某个基准温度进行平移,就能得到一条该参考温度下的光滑曲线,即动态模量主曲线<sup>[3-5]</sup>。

有关沥青路面材料动态模量的研究主要包括两个方面:动态模量试验研究和动态模量主曲线分析。常用的动态模量试验方法包括单轴压缩试验、四点弯曲试验、梯形梁试验等,可以用来研究温度、加载频率、围压等因素对动态模量的影响<sup>[6-12]</sup>。黄优等<sup>[13]</sup>采用梯形梁试验方法测试了不同应变水平下的SAC13型沥青混合料动态模量,发现应变水平越大,混合料动态模量越小,且应变水平对动态模量的影响在低频时更显著。在主曲线拟合方面,大部分学者基于时温等效原理,采用S形函数对动态模量数据进行拟合,建立了混合料的主曲线模型<sup>[14-16]</sup>;也有研究采用不同的动态模量主曲线构建方法,如罗桑等<sup>[17]</sup>则基于基因遗传算法建立了动态模量主曲线;薛善光<sup>[18]</sup>针对参数取值变化对主曲线方程本身的影响及其影响因素进行了研究,发现参数 $\delta$ 为动态模量主曲线的下渐近线, $\delta$ 越大,沥青混合料在高温条件下的模量极小值越大;参数 $\alpha$ 代表动态模量的范围, $\alpha + \delta$ 表示动态模量主曲线的上渐近线,主要影响沥青混合料在低温时的模量极大值;参数 $\beta$ 、 $\gamma$ 分别影响

动态模量主曲线拐点的水平位置和斜率,它们都表征了动态模量对加载频率的敏感性;Witczak等<sup>[19]</sup>基于205种沥青混合料和2750组动态模量试验,发现沥青混合料动态模量主曲线的各参数 $\delta$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 与沥青混合料的材料性能(沥青黏度、级配、沥青有效含量)等紧密相关,并提出了沥青混合料动态模量的预测模型。

综上所述,沥青混合料动态模量主曲线如同一座桥梁,连接着沥青路面的结构性能和沥青路面的材料性能:一方面动态模量主曲线参数表征了沥青混合料在宽频率域(宽温度域)下沥青混合料的动态力学特性,动态模量主曲线参数一旦确定,沥青混合料在不同温度-频率组合下的动态模量就可以确定,相应的路面结构响应也可以预测;另一方面,动态模量主曲线的参数与沥青混合料的原材料性能及微观结构之间密切相关,测得了沥青混合料的材料属性,就能预测其动态模量主曲线,反之,也可以根据沥青混合料动态模量主曲线参数的取值范围对沥青混合料的材料性能进行比选和设计。《公路沥青路面设计规范》(JTGD50—2017)仅仅使用沥青面层在20℃、10 Hz下的动态模量进行路面结构计算,而沥青混合料作为一种黏弹材料,其动态模量随着温度和频率的变化而变化,因此,采用单一条件下的模量进行路面结构计算显然是不合理的。现有的研究主要对沥青混合料的动态模量影响因素、动态模量主曲线的构建方法等进行研究,并未结合路面结构力学行为对沥青混合料动态模量主曲线参数进行分析。因此,有必要开展沥青混合料动态模量主曲线参数变化及其交互作用对路面结构响应影响的研究,从而改善沥青路面结构设计方法,也可以为沥青混合料动态模量的精准设计提供基础。

沥青混合料动态模量主曲线参数变化及其交互

作用对路面结构响应影响涉及多个主曲线参数、多个路面结构响应以及多种路面结构。响应面法(RSM)是基于统计学的试验设计方法,用于反映输入变量和响应之间的相关性,它不仅可以检测单一因素对目标响应的影响,还可以检测不同因素之间的交互作用对目标响应的影响。与常用的正交试验相比,RSM具有试验次数少、成本低、精度高的优势,已经逐渐被应用于工程领域的研究。马士宾等<sup>[20]</sup>通过RSM的Box-Behnken Design (BBD)对石质路基沥青路面结构进行优化设计,得到了各结构层厚度对沥青混合料疲劳寿命、沥青面层永久变形和路基竖向顶面压应变的影响规律。因此,应用RSM探讨沥青混合料材料特性与路面结构响应之间的关系是一种行之有效的方法。

为真实地模拟路面结构实际情况,更准确地分析结构的性能和行为,本文借助有限元软件建立沥青路面结构三维有限元模型,开展半刚性基层和柔性基层沥青路面结构计算,获得不同动态模量主曲线参数( $\delta$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ )组合下的沥青路面结构响应;采用响应面法(RSM),以动态模量主曲线参数( $\delta$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ )作为输入变量,以结构关键响应(沥青层底最大拉应变、路基顶面竖向压应变)作为响应目标建立响应面模型,分析主曲线参数及其交互作用对结构关键响应的影响。该研究成果可为沥青混合料动态模量精准设计和路面材料比选提供参考。

## 1 沥青路面结构分析

### 1.1 有限元模型

采用Abaqus建立不同基层刚度的沥青路面有限元模型。模型分别采用半刚性基层和柔性基层沥青路面结构,具体结构形式如表1所示。按对称性原理,以圆形均布荷载直径为对称轴,借助有限元软件建立2个1/2沥青路面结构三维模型,模型尺寸为9.0 m×4.5 m,网格单元采用C3D20(二十节点六面体完全积分单元)。模型上表面为荷载作用面,采用DLOAD子程序定义荷载大小、作用区域及作用方式。模型侧面采用对称边界条件、约束法向位移和对称面转角,模型底面(土基底面)采用固定边界条件,层间接触定义为绑定。结构模型的网格划分示意如图1所示(隐藏了部分土基结构)。

表1 两种沥青路面结构形式

Table 1 Two types of asphalt pavement structure

结构	半刚性基层	柔性基层
沥青面层	18 cm	18 cm
基层	15 cm + 15 cm 水泥稳定碎石	20 cm + 20 cm 级配碎石
级配碎石底基层	20 cm	20 cm
土基	—	—

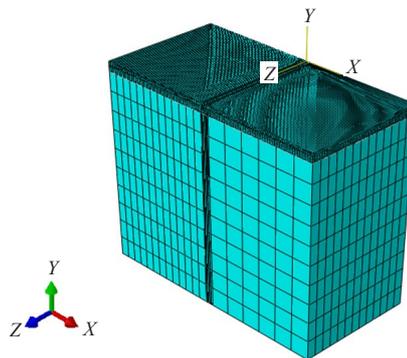


图1 沥青路面结构网格划分示意图

Figure 1 Structural grid division of asphalt pavement

### 1.2 路面结构材料参数

沥青动态模量主曲线方程可以采用Sigmoidal模型拟合,表达式如式(1):

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

式中: $|E^*|$ 为动态模量(MPa); $\delta$ 为动态模量最小对数值(MPa); $\alpha + \delta$ 为动态模量最大对数值(MPa); $\beta$ 、 $\gamma$ 为曲线形状系数; $f$ 为参考温度下的加载频率(Hz)。本文选取20℃、10 Hz作为参考温度和加载频率。

沥青面层的模量值由沥青混合料动态模量主曲线确定,泊松比为0.35。其他材料参数见表2。

表2 基层和土基弹性参数

Table 2 Elastic parameters of base and soil matrix

材料	模量/MPa	泊松比
水泥稳定碎石(半刚性基层)	10 000	0.25
级配碎石(基层)	500	0.25
级配碎石(底基层)	300	0.25
土基	60	0.40

### 1.3 有限元模型验证

为了验证有限元模型,将有限元计算结果与基于层状弹性体系理论的路面结构分析软件(Bisar)计算结果进行对比分析。对同一路面结构施加相同

的竖向荷载(单轴双圆,荷载水平 0.7 MPa,当量圆直径 213 mm),分别采用 Bisar 3.0 程序和有限元模型进行路面结构计算,选取荷载当量圆的圆心连线中点作为计算参考点。以结构层变形量作为对比指标,结果如图 2 所示。有限元解与理论解基本一致,误差在 10% 以内,说明本研究采用的路面结构有限元模型有效可行。

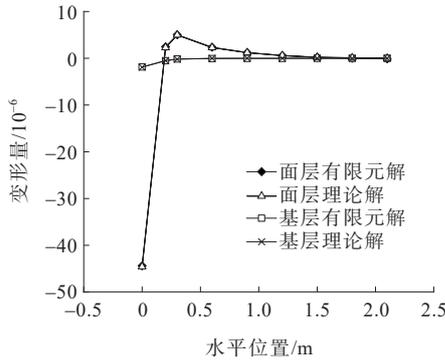


图 2 理论解与有限元解的对比

Figure 2 Comparison of theoretical solution and finite element solution

## 2 响应曲面法试验方案

### 2.1 响应面法

采用响应曲面法(RSM)研究主曲线参数对沥青路面结构响应的影响。响应曲面法通常包括 BBD (Box Behnken Design) 和 CCD (Central Composite Design),其中 CCD 设计较 BBD 设计增加了一组轴点,增强了对曲面弯曲的估计,能更好地拟合响应曲面、增加响应值拟合度和预测精准度,因此本文选择 CCD 来设计方案,其模型如图 3 所示。

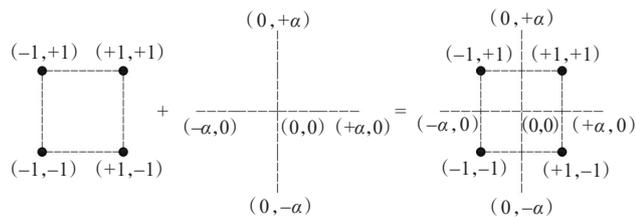


图 3 CCD 模型

Figure 3 CCD model

从图 3 可知:CCD 设计属于  $2^k$  析因设计,其数据点由析因设计点(规范为通常的  $\pm 1$  记号)添加上  $2k$  个坐标轴点  $(\pm \alpha, 0, \dots, 0), (0, \pm \alpha, \dots, 0), \dots, (0, 0, \dots, \pm \alpha)$  和  $n_c$  个中心点  $(0, 0, \dots, 0)$  组成。适当选择坐标轴点的位置可以使 CCD 旋转,满足可旋转性

的  $\alpha$  值由式(2)得到:

$$\alpha = 2^{k/4} \tag{2}$$

式中: $k$ 为因素数。

### 2.2 响应变量

沥青混合料动态模量主曲线参数受沥青材料、级配等诸多因素的影响,通过搜集国内外文献<sup>[8-9,11,13,21-24]</sup>,确定了常用沥青混合料的动态模量主曲线 4 个参数的取值范围如表 3 所示。基于上述分析,本次试验的响应变量个数  $k=4$ ,轴点坐标值  $\alpha=2$ ,具体的数据点赋值情况见表 4。

表 3 动态模量主曲线参数取值范围

Table 3 Master curve parameter range of dynamic modulus

参数	最小值	最大值
$\delta$	1.405	2.830 0
$\alpha$	1.495	2.713 0
$\beta$	-1.246	-0.004 4
$\gamma$	-0.747	-0.365 0

表 4 CCD 响应变量等级

Table 4 Response factor level in CCD

因素	代码	等级				
		$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
$\delta$	A	0.692 5	1.405	2.117 5	2.830 0	3.542 5
$\alpha$	B	0.886 0	1.495	2.104 0	2.713 0	3.322 0
$\beta$	C	-1.866 8	-1.246	-0.625 2	-0.004 4	0.616 4
$\gamma$	D	-0.938 0	-0.747	-0.556 0	-0.365 0	-0.174 0

### 2.3 响应目标选择

响应目标的选择与沥青路面结构层的主要设计指标相对应,参考《公路沥青路面设计规范》(JTGD50—2017),选定沥青面层层底拉应变( $\epsilon_1$ )和路基顶面竖向压应变( $\epsilon_2$ )作为设计响应值。

### 2.4 统计试验设计

采用 Design-Expert 软件 DX12 进行统计试验设计。根据响应面法的 CCD 模型,输入参数范围,生成 30 组试验方案,如表 5 所示。

## 3 响应曲面分析

### 3.1 路面结构响应

根据动态模量主曲线方程和参数方案,计算出不同参数组合下的沥青面层模量值,并输入到有限元模型中进行计算。具体计算结果见表 6、7。

表5 动态模量主曲线参数试验方案

Table 5 Experimental scheme of master curve parameters of dynamic modulus

序号	实际值				序号	实际值			
	$\delta$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$		$\delta$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
1	2.830 0	2.713	-1.246 0	-0.365	16	2.117 5	2.104	-0.625 2	-0.556
2	2.117 5	2.104	-1.866 8	-0.556	17	2.117 5	2.104	-0.625 2	-0.556
3	1.405 0	1.495	-1.246 0	-0.747	18	1.405 0	1.495	-1.246 0	-0.365
4	2.830 0	2.713	-1.246 0	-0.747	19	2.830 0	2.713	-0.004 4	-0.747
5	2.117 5	2.104	-0.625 2	-0.174	20	1.405 0	2.713	-1.246 0	-0.365
6	2.117 5	0.886	-0.625 2	-0.556	21	2.117 5	2.104	-0.625 2	-0.556
7	2.117 5	2.104	-0.625 2	-0.556	22	2.830 0	1.495	-1.246 0	-0.365
8	2.117 5	2.104	-0.625 2	-0.938	23	2.830 0	1.495	-0.004 4	-0.365
9	2.117 5	2.104	0.616 4	-0.556	24	2.117 5	3.322	-0.625 2	-0.556
10	3.542 5	2.104	-0.625 2	-0.556	25	2.117 5	2.104	-0.625 2	-0.556
11	2.830 0	1.495	-1.246 0	-0.747	26	0.692 5	2.104	-0.625 2	-0.556
12	1.405 0	1.495	-0.004 4	-0.365	27	1.405 0	2.713	-0.004 4	-0.365
13	1.405 0	1.495	-0.004 4	-0.747	28	2.117 5	2.104	-0.625 2	-0.556
14	2.830 0	2.713	-0.004 4	-0.365	29	1.405 0	2.713	-0.004 4	-0.747
15	2.830 0	1.495	-0.004 4	-0.747	30	1.405 0	2.713	-1.246 0	-0.747

表6 沥青面层层底拉应变

Table 6 Tensile strain at the bottom of asphalt layer

10<sup>-6</sup>

运行序号	半刚性基层	柔性基层	运行序号	半刚性基层	柔性基层
1	5.907 47	11.894 80	16	0.922 18	92.834 9
2	5.695 95	62.821 30	17	0.922 18	92.834 9
3	-18.415 10	147.127 00	18	-19.290 80	144.631 0
4	5.184 68	9.428 05	19	7.850 97	24.587 5
5	-3.196 17	108.739 00	20	-1.123 27	98.951 3
6	-17.536 10	148.662 00	21	0.922 18	92.834 9
7	0.922 18	92.834 90	22	5.963 94	60.669 0
8	3.140 04	80.146 20	23	0.674 66	94.173 2
9	-12.326 20	143.760 00	24	7.888 52	25.165 1
10	5.558 84	10.639 00	25	0.922 18	92.834 9
11	6.587 69	55.156 60	26	-21.681 60	120.711 0
12	-21.748 90	119.569 00	27	-14.609 60	148.453 0
13	-21.112 30	130.376 00	28	0.922 18	92.834 9
14	8.037 89	36.065 50	29	-10.136 60	137.056 0
15	2.961 45	81.223 90	30	2.080 53	86.381 9

由表6、7可知:在不同参数组合情况下,沥青路面响应不同,且不同基层的路面结构之间有着显著差异。半刚性基层上沥青面层的层底一部分处于受压,还有

一部分处于受拉,而柔性基层都处于受拉状态。与此同时,对于路基顶部的竖向变形,半刚性基层路面结构的路基顶部竖向压应变小于柔性基层路面结构的。

表7 路基顶面竖向压应变

运行序号	半刚性基层	柔性基层	运行序号	半刚性基层	柔性基层
1	-34.9423	-58.6597	16	-75.2540	-161.8650
2	-61.5215	-139.4010	17	-75.2540	-161.8650
3	-116.1930	-228.5090	18	-117.7410	-233.6280
4	-32.1984	-50.4251	19	-43.8501	-90.0512
5	-82.8760	-172.0420	20	-78.1476	-165.8290
6	-114.3210	-223.0380	21	-75.2540	-161.8650
7	-75.2540	-161.8650	22	-60.5593	-137.4690
8	-69.3655	-153.1610	23	-75.8837	-162.7410
9	-102.8010	-199.2720	24	-44.1617	-91.1798
10	-33.6243	-54.5910	25	-75.2540	-161.8650
11	-58.1028	-132.2220	26	-123.1520	-258.1750
12	-123.2960	-259.0330	27	-107.6960	-207.8910
13	-121.6990	-250.2360	28	-75.2540	-161.8650
14	-49.5242	-109.4130	29	-98.0916	-192.1200
15	-69.8604	-153.9340	30	-72.2418	-157.5400

这是因为不同的路面结构组合在相同荷载作用下的受力状态不一样。柔性基层路面结构中,在沥青面层的模量大部分情况下均高于基层,因此沥青面层是承受荷载的主要结构层,大多处于受拉状态,而且由于基层的刚度较小,荷载的传递范围较小,因此路基顶部的应力水平仍然较高,竖向变形也最大。而半刚性基层路面结构中,随着主曲线模量参数的变化,沥青面层模量有可能大于或者小于基层模量。因此,沥青面层有可能处于受拉或者受压状态,半刚性基层的模量大于柔性基层的,荷载的传递范围更大;相比柔性基层结构的路基顶部的应力水平更低,竖向变形更小。

### 3.2 响应面分析

为了表征响应变量对结构响应值的影响,采用DX12软件对上述数据进行拟合,然后对拟合结果进行方差分析,探讨不同响应变量及其交互作用对路面结构响应值的影响程度。

#### 3.2.1 沥青面层层底拉应变

采用线性模型对两种路面结构响应数据进行拟合,具体的表达式见式(3)、(4),同时对拟合模型进行方差分析,主要分析结果见表8。

$$\epsilon_{1S} = -50.87 + 11.81A + 8.10B - 4.77C - 5.21D \quad (3)$$

$$\epsilon_{1F} = 295.97 - 50.26A - 36.06B + 21.42C + 21.87D \quad (4)$$

式中: $\epsilon_{1S}$ 、 $\epsilon_{1F}$ 分别为半刚性基层、柔性基层沥青面层层底拉应变。

表8 沥青面层层底拉应变回归模型方差分析

Table 8 Analysis of variance for regression model of tensile strain at the bottom of asphalt layer

项目	半刚性基层		柔性基层		
	F-value	p-value	F-value	p-value	
模型	29.64	<0.0001	35.36	<0.0001	Significant
A- $\delta$	80.05	<0.0001	92.59	<0.0001	
B- $\alpha$	27.51	<0.0001	34.82	<0.0001	
C- $\beta$	9.89	0.0042	12.77	0.0015	
D- $\gamma$	1.12	0.3007	1.26	0.2724	
$R^2$	0.8259		0.8498		
$C_V$	1.5692		0.2069		

$p$ 值常用于验证模型的显著性,通常当 $p$ 值<0.0500时,可以确定模型是显著的,反之不显著。从表8可知:回归模型 $p$ 值<0.0001,说明回归模型达到了非常显著的水平。从统计参数来看,相关系数 $R^2$ 分别为0.8259和0.8498,说明回归模型的拟合度高,可用于预测分析。

从表8的单变量方差分析结果来看,不同路面结

构的结果存在差异,半刚性基层和柔性基层A、B非常显著,C显著,D不显著。比较A、B、C的F值, $A > B > C$ ,由此可以得出,对于不同的路面结构,4个参数对沥青层底最大拉应变的影响程度大小都为 $\delta > \alpha > \beta > \gamma$ 。

为了直观地分析不同单变量对沥青面层层底拉应变的影响规律,绘制了扰动曲线,结果如图4所示。

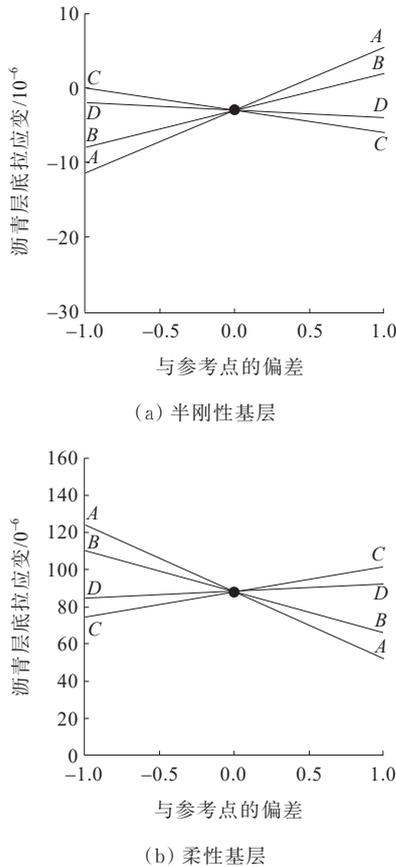


图4 沥青面层层底拉应变扰动曲线

Figure 4 Perturbation curves of tensile strain at the bottom of asphalt layer

从图4(a)可知:对于半刚性基层路面结构,当参数 $\delta$ 和 $\alpha$ 较小时,沥青面层底部均处于受压状态,且随着参数 $\delta$ 和 $\alpha$ 的不断增大,压应变不断减小;当参数 $\delta$ 和 $\alpha$ 继续增大时,沥青面层底部由受压变为受拉,且拉应变不断增大;而图4(b)柔性基层路面结构中,拉应变值随着参数 $\delta$ 和 $\alpha$ 的增大而减小,随着参数 $\beta$ 和 $\gamma$ 的增大而增大。此外,根据扰动曲线的斜率,可以看出参数 $\delta$ 对拉应变值的影响最大,而参数 $\gamma$ 影响最小,这与方差分析结果一致。

沥青面层层底拉应变受面层模量、基层刚度等因素的影响。对于半刚性路面结构,随着参数 $\delta$ 的变

化,沥青面层模量有可能大于或者小于基层模量,沥青面层有可能处于受拉或者受压状态;随着参数 $\delta$ 的增大,面层底部应变由受压逐渐变为受拉,并且缓慢增大。对于柔性基层路面,沥青面层是主要的承荷层,处于受拉状态,参数 $\delta$ 增大,面层模量增大,沥青面层层底拉应变减小。参数 $\alpha$ 对沥青面层层底应变的影响与参数 $\delta$ 相似,参数 $\alpha$ 增大,抵抗收缩变形的能力增强,面层模量增大,半刚性基层结构面层底部应变由受压变受拉,且缓慢增大,柔性基层结构面层底部拉应变逐渐减小。参数 $\beta$ 、 $\gamma$ 对沥青面层层底应变的影响与参数 $\delta$ 相反,参数 $\beta$ 、 $\gamma$ 减小,面层模量增大,面层抗变形能力增强。

### 3.2.2 路基顶面竖向压应变

路基顶面竖向压应变也是路面结构一个很重要的设计指标,通过控制路基顶面的竖向压应变可以限制路基土的永久变形,进而限制路面结构的永久变形。采用非线性多元回归模型对结构响应数据进行拟合,两种结构的拟合结果如式(5)、(6)所示,同时对拟合模型进行方差分析,结果见表9。

$$\epsilon_{2S} = -219.98 + 34.46A + 25.11B - 13.58C - 13.65D \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{2F} = & -385.23 + 48.68A + 17.75B - 10.04C - \\ & 11.92D + 4.29AB - 1.92AC - 1.69AD - \\ & 12.05BC - 12.73BD - 13.62CD + \\ & 2.54A^2 + 2.98B^2 - 5.06C^2 - 7.33D^2 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\epsilon_{2S}$ 、 $\epsilon_{2F}$ 分别为半刚性基层、柔性基层路基顶面竖向压应变。

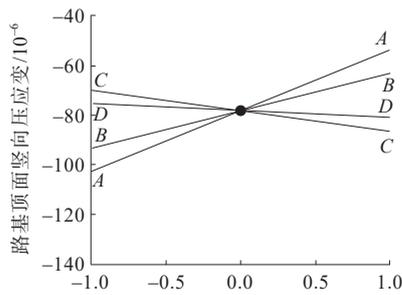
由表9可得:模型的 $p$ 值都小于0.0001,相关系数分别为0.9746、0.9996,说明模型达到了非常显著的水平,拟合度高,可以用于预测分析。

从单因素方差分析结果来看,半刚性基层路面结构A、B、C非常显著,D显著;而柔性基层路面结构4个参数的 $p$ 值都小于0.0001。根据F值大小可以确定4个参数对路基顶面竖向压应变的影响程度大小为 $\delta > \alpha > \beta > \gamma$ 。对于参数间的交互作用,半刚性基层路面结构不受参数交互作用影响,柔性基层路面结构BC的 $p$ 值小于0.0001,AB、CD、BD的 $p$ 值小于0.0500,说明柔性基层路面的路基顶面竖向压应变受到多种参数组合的交互作用影响,参数 $\alpha$ 和 $\beta$ 的交互作用影响最显著。绘制单因素扰动曲线如图5所示。

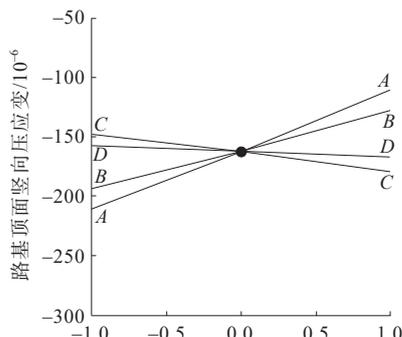
表 9 路基顶面竖向压应变回归模型方差分析

Table 9 Analysis of variance for regression model of vertical compressive strain on the top of subgrade

项目	半刚性基层		柔性基层		
	F-value	p-value	F-value	p-value	
模型	239.36	< 0.000 1	926.80	< 0.000 1	Significant
A- $\delta$	631.12	< 0.000 1	2 414.83	< 0.000 1	
B- $\alpha$	244.77	< 0.000 1	1 026.56	< 0.000 1	
C- $\beta$	74.42	< 0.000 1	242.76	< 0.000 1	
D- $\gamma$	7.12	0.013 2	23.05	< 0.000 1	
AB			21.68	0.000 3	
AC			4.51	0.050 7	
AD			0.329 8	0.574 3	
BC			129.85	< 0.000 1	
BD			13.71	0.002 1	
CD			16.32	0.001 1	
A <sup>2</sup>			17.77	0.000 7	
B <sup>2</sup>			13.11	0.002 5	
C <sup>2</sup>			40.81	< 0.000 1	
D <sup>2</sup>			0.765 8	0.395 3	
R <sup>2</sup>	0.974 6		0.999 6		
C <sub>v</sub>	0.061 3		0.009 9		



(a) 半刚性基层



(b) 柔性基层

图 5 路基顶面竖向压应变扰动曲线

Figure 5 Perturbation curves of vertical compressive strain on the top of subgrade

由图 5 可知:4 个参数对不同路面结构的路基顶面竖向压应变影响规律一致:压应变随着参数  $\delta$  和  $\alpha$  的增大而减小,而随着参数  $\beta$  和  $\gamma$  的增大而增大。根据扰动曲线的斜率大小,可以得出参数  $\delta$  对压应变的影响最大,参数  $\gamma$  最小,与方差分析结果一致。

参数  $\delta$ 、 $\alpha$  增大,面层抗变形能力增强,荷载作用下面层传递到下层结构的力减小,路基顶部的应力水平减小,路基顶部竖向压应变也因此减小。而参数  $\beta$ 、 $\gamma$  的增大,面层模量减小,传递荷载的能力减弱,造成路基顶部的荷载水平增大,路基顶部竖向压应变也增大。

同时,绘制了  $p$  值小于 0.050 0 的交互变量  $BC$ 、 $AB$ 、 $CD$ 、 $BD$  的三维响应面曲线图,如图 6 所示。

由图 6(a)、(b) 可知:当参数  $\alpha$  取 2.713,  $\beta$  取 -1.246 时,压应变达到最小值,路基顶面竖向压应变沿等高线  $-24^\circ$  方向递减,即压应变沿着参数  $\alpha$  增大和  $\beta$  减小方向递减。参数  $\delta$  和  $\alpha$  的交互作用影响如图 6(c)、(d) 所示,压应变沿着参数  $\delta$  和  $\alpha$  增大方向递减。图 6(e)、(f) 为参数  $\beta$  和  $\gamma$  交互作用分析结果,压应变沿着等高线  $19^\circ$  方向递增,参数  $\beta$  和  $\gamma$  都增大会使压应变变大。由图 6(g)、(h) 可知:参数  $\alpha$  和  $\gamma$  的交互作用影响与参数  $\alpha$  和  $\beta$  的相似,压应变沿着参数  $\alpha$  增大和  $\gamma$  减小方向递减,并且参数  $\alpha$  对压应变的影响远高于参数  $\gamma$ 。

柔性基层路面结构的路基顶面竖向压应变受到参数  $\alpha$  与  $\beta$ 、 $\delta$  与  $\alpha$ 、 $\alpha$  与  $\gamma$  以及  $\beta$  与  $\gamma$  的交互作用影响,其中参数  $\alpha$  与  $\beta$  的交互作用影响最大。参数  $\alpha$  与  $\beta$  的交互作用主要影响沥青混合料模量对频率的敏感性, $\alpha$  增大、 $\beta$  减小,使得沥青混合料在常规荷载作用下有更大的模量,传递到下层结构的力减小,路基顶部的应力水平减小,路基顶部竖向压应变也因此减小。

综上所述,为了改善沥青路面结构受力状况,根据主曲线参数对路面响应的影响,可以选取合适的动态模量主曲线参数组合,为沥青混合料的设计提供指导。总体来讲,对于半刚性基层路面结构,沥青面层受力状态不同,主曲线参数组合也不同:当面层处于受压状态时,参数  $\delta$ 、 $\alpha$  取较大值、参数  $\beta$ 、 $\gamma$  取较小值;而当面层处于受拉状态时,参数  $\delta$ 、 $\alpha$  取较小值、参数  $\beta$ 、 $\gamma$  取较大值,可使沥青层底拉应变减小;对于路基顶部压应变,参数  $\delta$ 、 $\alpha$  取较大值、参数  $\beta$ 、 $\gamma$  取较小值;而对于柔性基层路面结构,参数  $\delta$ 、 $\alpha$  值取较大值、参数  $\beta$ 、 $\gamma$  取较小值,均可改善两种路面结构响应。

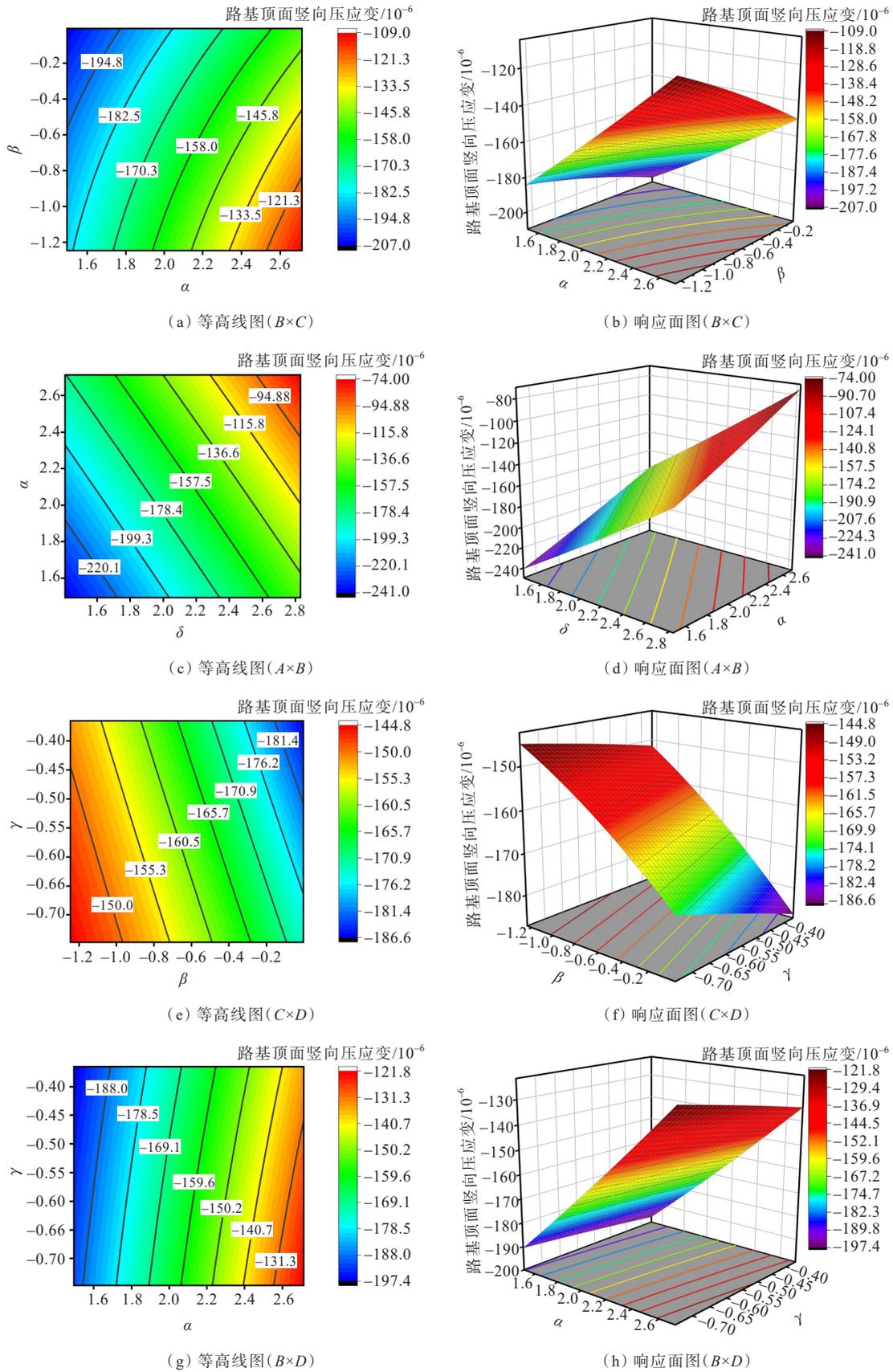


图6 柔性基层结构三维响应面图

Figure 6 3D response surface plots for asphalt pavement with flexible base

## 4 结论

本研究借助有限元软件建立沥青路面结构三维模型,获得了不同基层刚度条件下的关键结构响应值,在此基础上采用响应面方法(RSM)研究了不同沥青混合料动态模量主曲线参数及其交互作用对结构关键响应的影响。主要结论如下:

(1) 建立了路面结构三维有限元模型并进行验证,开展了半刚性基层和柔性基层路面结构计算,建立了基于CCD的RSM试验矩阵,得到了沥青路面关键结构响应的回归模型,且拟合效果较好。

(2) 基于单因素方差分析,不同路面结构组合的主曲线参数对路面结构响应的影响有一定差异,柔性基层沥青路面的结构响应随参数 $\delta$ 和 $\alpha$ 的增大而减小,而随着参数 $\beta$ 和 $\gamma$ 的增大而增大;半刚性基层上,沥青层底受力情况随参数组合的变化出现“由受压转变为受拉”;总体而言,参数 $\delta$ 对各结构响应的影响最大, $\alpha$ 次之, $\beta$ 、 $\gamma$ 的影响较小。

(3) 主曲线参数之间的交互作用也会影响路面结构的关键响应,半刚性基层路面结构的沥青面层层底拉应变和路基顶面竖向压应变不受交互作用影响,参数 $\alpha$ 和 $\beta$ 的交互作用对柔性基层路面结构的路基顶面竖向压应变影响显著。

### 参考文献:

### References:

- [1] 周志刚,周扬,刘智仁.透水沥青混合料动态模量影响因素分析[J].材料导报,2022,36(13):121-127.  
ZHOU Zhigang, ZHOU Yang, LIU Zhiren. Analysis of influencing factors on dynamic modulus of porous asphalt [J].Materials Reports,2022,36(13):121-127.
- [2] 宋云连,蒋宇,刘恒.温拌剂及沥青类型对混合料动态模量的影响研究[J].中外公路,2022,42(6):215-219.  
SONG Yunlian, JIANG Yu, LIU Heng. Influence of warm mixture and asphalt type on dynamic modulus of mixture [J].Journal of China & Foreign Highway,2022,42(6):215-219.
- [3] LIU H Q, LUO R. Development of master curve models complying with linear viscoelastic theory for complex moduli of asphalt mixtures with improved accuracy[J]. Construction and Building Materials,2017,152:259-268.
- [4] 赵延庆,吴剑,文健.沥青混合料动态模量及其主曲线的确定与分析[J].公路,2006,51(8):163-167.  
ZHAO Yanqing, WU Jian, WEN Jian. Determination and analysis of dynamic modulus of asphalt mixture and its master curve[J].Highway,2006,51(8):163-167.
- [5] 徐希忠,韦金城,闫翔鹏,等.长寿命沥青路面研究现状及展望[J].中外公路,2023,43(1):36-43.  
XU Xizhong, WEI Jincheng, YAN Xiangpeng, et al. Review and outlook for long-life asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(1):36-43.
- [6] 刘伟胜,李思童,黄玉颖,等.冷拌冷铺沥青混合料动态模量及其主曲线研究[J].新型建筑材料,2018,45(10):150-153.  
LIU Weisheng, LI Sitong, HUANG Yuying, et al. Dynamic modulus and master curve of cold-mix-cold-laid asphalt mixture[J].New Building Materials,2018,45(10):150-153.
- [7] 王昊鹏,杨军,施晓强,等.高模量沥青混合料动态模量及其主曲线研究[J].公路交通科技,2015,32(8):12-17.  
WANG Haopeng, YANG Jun, SHI Xiaoqiang, et al. Research on dynamic modulus and master curve of high modulus asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2015,32(8):12-17.
- [8] 唐亨山.高掺量橡胶改性沥青混合料的动态模量研究[J].交通世界,2017(25):130-131.  
TANG Hengshan. Study on dynamic modulus of high content asphalt rubber mixture[J].TranspoWorld,2017(25):130-131.
- [9] 张军.SBS改性沥青混合料动态模量粘弹性行为研究[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(8):40-44.  
ZHANG Jun. Study on viscoelastic behavior of dynamic modulus of SBS modified asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017,13(8):40-44.
- [10] 周梓豪,刘朝晖,王旭东,等.橡胶沥青混合料的动态弯拉模量研究[J].公路交通科技,2019,36(1):16-21,54.  
ZHOU Zihao, LIU Zhaohui, WANG Xudong, et al. Study on dynamic flexural modulus of rubber asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2019,36(1):16-21,54.
- [11] ZHAO Y Q, TANG J M, LIU H. Construction of triaxial dynamic modulus master curve for asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials,2012,37:21-26.
- [12] 谭伟.基于物性指标的路基细粒土动态回弹模量预估模型研究[J].中外公路,2023,43(2):36-42.  
TAN Wei. Study on dynamic resilience modulus prediction

- model of subgrade fine-grained soil based on physical property parameters[J]. *Journal of China & Foreign Highway*,2023,43(2):36-42.
- [13] 黄优,王旭东,刘朝晖,等.SAC13沥青混合料动态模量梯形梁试验研究[J].*公路交通科技*,2017,34(6):7-14.  
HUANG You, WANG Xudong, LIU Zhaohui, et al. Experimental study on dynamic modulus of SAC13 asphalt mixture with trapezoid beam test[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2017,34(6):7-14.
- [14] ZHANG F, WANG L, LI C, et al. Predict the phase angle master curve and study the viscoelastic properties of warm mix crumb rubber-modified asphalt mixture[J]. *Materials*, 2020,13(21):5051.
- [15] 栗培龙,马松松,李建阁,等.炭黑改性沥青混合料的动态响应主曲线分析[J].*郑州大学学报(工学版)*,2018,39(4):12-17.  
LI Peilong, MA Songsong, LI Jiange, et al. Analysis of dynamic response master curve of carbon black modified asphalt mixture[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*,2018,39(4):12-17.
- [16] 石中州,栾华锋,董宏运.沥青混合料动态力学性能的围压应力依赖性研究[J].*中外公路*,2023,43(5):248-253.  
SHI Zhongzhou, LUAN Huafeng, DONG Hongyun. Study on dependence of dynamic mechanical properties of asphalt mixture on surrounding compressive [J]. *Journal of China & Foreign Highway*,2023,43(5):248-253.
- [17] 罗桑,钱振东, HARVEY J. 环氧沥青混合料动态模量及其主曲线研究[J].*中国公路学报*,2010,23(6):16-20.  
LUO Sang, QIAN Zhendong, HARVEY J. Research on dynamic modulus for epoxy asphalt mixtures and its master curve[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010,23(6):16-20.
- [18] 薛善光. 沥青混合料动态模量主曲线特征参数分析[J].*筑路机械与施工机械化*,2018,35(7):83-87.  
XUE Shanguang. Analysis on characteristic parameters of master curve of dynamic modulus of asphalt mixture[J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*,2018,35(7):83-87.
- [19] WITCZAK M W, FONSECA O A. Revised predictive model for dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*,1996,1540(1):15-23.
- [20] 马士宾,高建强,魏建慧,等.基于响应面法的石质路基沥青路面结构优化研究[J].*重庆交通大学学报(自然科学版)*,2019,38(3):44-50.  
MA Shibin, GAO Jianqiang, WEI Jianhui, et al. Structure optimization of stone roadbed asphalt pavement based on response surface method[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*,2019,38(3):44-50.
- [21] 谯永昌,张金喜,张阳光.不同沥青混合料的动态模量及其与路用性能关系的研究[J].*中外公路*,2021,41(6):260-266.  
ZHUO Yongchang, ZHANG Jinxi, ZHANG Yangguang. Study on dynamic modulus of different asphalt mixtures and its relation with pavement performance[J]. *Journal of China & Foreign Highway*,2021,41(6):260-266.
- [22] 黄筑江.特立尼达湖沥青(TLA)改性沥青混合料的动态模量试验研究[J].*中外公路*,2017,37(3):247-252.  
HUANG Zhujiang. Experimental study on dynamic modulus of Trinidad Lake Asphalt (TLA) modified asphalt mixture[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2017,37(3):247-252.
- [23] 罗鸣,陈超,王涛.3种AC-20沥青混合料的动态模量及其主曲线拟合与分析[J].*长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2018,15(1):30-35,78.  
LUO Ming, CHEN Chao, WANG Tao. The dynamic modulus of three kinds of AC-20 asphalt mixture and its main curve fitting and analyses[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2018,15(1):30-35,78.
- [24] LUO R, LIU H Q. Improving the accuracy of dynamic modulus master curves of asphalt mixtures constructed using uniaxial compressive creep tests[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*,2017,29(7):04017032.