

DOI:10.11918/202206019

# 基于筛余特征参数的沥青混合料路用性能预测方法

郝晟<sup>1,2</sup>, 纪伦<sup>1</sup>, 邬金麒<sup>1</sup>, 周舰航<sup>3</sup>, 谭忆秋<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 天津市政工程设计研究总院有限公司, 天津 300392; 3. 黑龙江龙建路桥集团第六工程有限公司, 哈尔滨 150090)

**摘要:** 为研究混合料级配变异与路用性能的关系, 预测沥青混合料的路用性能, 构建了典型的沥青混合料级配变异模式, 提出筛余特征参数来表征混合料的级配变异特征, 并使用 SPSS 软件对混合料的结构参数与路用性能进行相关性分析, 建立了沥青混合料路用性能预测方法, 以沥青混合料结构参数为中介, 通过回归分析建立变异级配筛余特征参数与路用性能指标的关系方程, 并确定了各路用性能指标值的合格标准。通过试验进行了沥青混合料路用性能预测方法的验证, 结果表明, 该方法对马歇尔稳定度、冻融劈裂强度比、蠕变速率、残留稳定度的预测与实际结果符合较好。可据此实现对沥青混合料变异级配的部分路用性能结果的预测, 在不影响施工进程的条件下实现快速调整施工配合比, 保证了沥青混合料的路用性能。

**关键词:** 级配变异; 结构参数; 相关性分析; 回归分析; 路用性能预测

**中图分类号:** U415.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2023)11-0007-09

## Road performance prediction method of asphalt mixture based on screen residual characteristic parameters

HAO Sheng<sup>1,2</sup>, JI Lun<sup>1</sup>, WU Jinqi<sup>1</sup>, ZHOU Jianhang<sup>3</sup>, TAN Yiqiu<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;  
2. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300392, China;  
3. Heilongjiang Longjian Road & Bridge Sixth Limited Company, Harbin 150090, China)

**Abstract:** In order to study the relationship between mixture gradation variation and road performance, the road performance of asphalt mixture was predicted. In this paper, a typical asphalt mixture grading variation model was constructed, and the screening residual characteristic parameters were proposed to characterize the mixture grading variation characteristics. SPSS software was used to analyze the correlation between the structural parameters of the mixture and the road performance, and a prediction method for the road performance of asphalt mixture was established, with the asphalt mixture structural parameters as the medium. Through regression analysis, the relationship equation between the variable gradation screen residual characteristic parameters and the road performance index is established, and the qualification criteria of each road performance index value is determined. The results show that the prediction of Marshall stability, freeze-thaw splitting strength ratio, creep rate and residual stability of asphalt mixture are in good agreement with the actual results. It can be used to predict the partial pavement performance of asphalt mixture with variable gradation, adjust the construction mix quickly without affecting the construction process, and ensure the pavement performance of asphalt mixture.

**Keywords:** grading variation; structural parameters; correlation analysis; regression analysis; road performance prediction

在实际的沥青混合料的质量控制过程中, 无论是对原材料规格、品质, 还是对集料筛分结果的质量控制, 其核心都是通过质量控制来保证混合料组成结构的稳定, 而决定混合料组成结构的关键因素就是混合料的级配, 即沥青混合料的各种组成材料之间的比例, 它与沥青混合料的性能密切相关。沥青

混合料生产过程中级配的变异性是导致混合料性能指标波动较大的重要因素之一<sup>[1-3]</sup>, 控制原材料与级配的变异是生产质量控制亟需解决的问题。

结构参数可用于描述沥青混合料的组成结构, 部分学者基于各组成成分之间的体积关系而构建相关结构参数, 为了全面的描述沥青混合料的组成, 需

收稿日期: 2022-06-04; 录用日期: 2022-06-28; 网络首发日期: 2023-10-25

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20231027.1636.008>

基金项目: 国家自然科学基金(U20A20315); 国家重点研发计划(2016YFE0202400)

作者简介: 郝晟(1998—), 男, 硕士研究生; 谭忆秋(1968—), 女, 教授, 博士生导师

通信作者: 纪伦, jilun@hit.edu.cn

要选择重要的结构参数进行研究<sup>[4-5]</sup>。

目前的沥青混合料实际质量控制过程中,针对路用性能试验不合格的混合料,经常会盲目的调整施工配合比,并没有建立混合料的路用性能与结构、级配之间的联系,无法对配合比做到快速、准确地调整。因此,通过研究混合料的级配与结构参数、路用性能指标的相关性规律,建立沥青混合料路用性能预测模型,可实现对变异级配的路用性能进行预测,达到快速调整施工配合比的目的,不需要停产实验,也不影响施工进度。

本文主要研究混合料路用性能与级配、结构参数的相关性,通过回归分析建立变异级配筛余特征参数与混合料路用性能的关系方程,进而实现沥青混合料路用性能的预测。

### 1 沥青混合料级配变异模式的构建

根据工程实际的多组筛分结果进行级配合成得到的相关规律可知,沥青混合料的级配变异性显著,并且基于原材料的级配波动特性存在最大概率分布区间,若不能在施工过程中很好控制,势必造成级配的偏离,混合料性能难以保证。因此,为了系统地研究沥青混合料的级配变异相关的结构特点与性能,需要建立沥青混合料级配变异模式,以下均以 AC-16 沥青混合料为例进行构建。

#### 1.1 沥青混合料级配变异模式的构建过程

以《公路沥青路面施工技术规范》<sup>[6]</sup>中规定的 AC-16 级配中值为目标级配,结合规范中对矿料级配验收范围的相关规定,对各粒径通过率分别确定变异范围,测得最佳沥青用量为 4.8% 保持不变,得到 K1、K2、K4、K5 四种变异级配,与级配中值 K3 曲线共同组成 5 条相互平行的级配曲线变异范围。设目标级配 K3 的各粒径通过率为  $a_{0.075}$ 、 $a_{0.15}$ 、 $\dots$ 、 $a_{16}$ , 分别代表粒径为 0.075、0.15、 $\dots$ 、16 mm 粒径的通过率。根据各平行式级配通过率之间的级配关系,建立 K1 ~ K5 的变异级配模式各粒径通过率见表 1。

由于 K1 ~ K5 各曲线的平行关系并不能涵盖该级配范围内的所有曲线关系,还需要在该范围内构建出具有相交关系的曲线,在 K3 规范规定的级配中值的基础上,以粗细集料的分界 2.36 mm 为中间粒径,以最大粒径和最小粒径的通过率的增减幅度分别向中间粒径递减,得到具有交叉关系的级配曲线 K6 和 K7。K6、K3 与 K7 级配变异模式各粒径通过率见表 2。

表 1 平行式变异级配模式各粒径通过率

Tab. 1 The passing rate of each particle size in the parallel variation gradation model

粒径/mm	通过率/%				
	K1	K2	K3	K4	K5
0.075	$a_{0.075} - 2\%$	$a_{0.075} - 1\%$	$a_{0.075}$	$a_{0.075} + 1\%$	$a_{0.075} + 2\%$
0.15	$a_{0.15} - 5\%$	$a_{0.15} - 3\%$	$a_{0.15}$	$a_{0.15} + 3\%$	$a_{0.15} + 5\%$
0.3	$a_{0.3} - 5\%$	$a_{0.3} - 3\%$	$a_{0.3}$	$a_{0.3} + 3\%$	$a_{0.3} + 5\%$
0.6	$a_{0.6} - 5\%$	$a_{0.6} - 3\%$	$a_{0.6}$	$a_{0.6} + 3\%$	$a_{0.6} + 5\%$
1.18	$a_{1.18} - 5\%$	$a_{1.18} - 3\%$	$a_{1.18}$	$a_{1.18} + 3\%$	$a_{1.18} + 5\%$
2.36	$a_{2.36} - 5\%$	$a_{2.36} - 3\%$	$a_{2.36}$	$a_{2.36} + 3\%$	$a_{2.36} + 5\%$
4.75	$a_{4.75} - 6\%$	$a_{4.75} - 4\%$	$a_{4.75}$	$a_{4.75} + 4\%$	$a_{4.75} + 6\%$
9.5	$a_{9.5} - 6\%$	$a_{9.5} - 4\%$	$a_{9.5}$	$a_{9.5} + 4\%$	$a_{9.5} + 6\%$
13.2	$a_{13.2} - 6\%$	$a_{13.2} - 4\%$	$a_{13.2}$	$a_{13.2} + 4\%$	$a_{13.2} + 6\%$
16	$a_{16} - 6\%$	$a_{16} - 4\%$	$a_{16}$	$a_{16} + 4\%$	$a_{16} + 6\%$

表 2 交叉式级配变异模式各粒径通过率

Tab. 2 The passing rate of each particle size in the crossover gradation variation mode

粒径/mm	通过率/%		
	K6	K3	K7
0.075	$a_{0.075} - 2\%$	$a_{0.075}$	$a_{0.075} + 2\%$
0.15	$a_{0.15} - 5\%$	$a_{0.15}$	$a_{0.15} + 5\%$
0.3	$a_{0.3} - 4\%$	$a_{0.3}$	$a_{0.3} + 4\%$
0.6	$a_{0.6} - 3\%$	$a_{0.6}$	$a_{0.6} + 3\%$
1.18	$a_{1.18} - 2\%$	$a_{1.18}$	$a_{1.18} + 2\%$
2.36	$a_{2.36} - 1\%$	$a_{2.36}$	$a_{2.36} + 1\%$
4.75	$a_{4.75} + 1\%$	$a_{4.75}$	$a_{4.75} - 1\%$
9.5	$a_{9.5} + 3\%$	$a_{9.5}$	$a_{9.5} - 3\%$
13.2	$a_{13.2} + 5\%$	$a_{13.2}$	$a_{13.2} - 5\%$
16	$a_{16} + 6\%$	$a_{16}$	$a_{16} - 6\%$

以上级配变异模式均是根据矿料的通过率进行构建,而筛余百分率可以反映各粒径集料之间的比例关系,更加直观地描述级配变异模式的组成比例,将各变异级配的粒通过率换算为级配筛余百分率,所得筛余曲线如图 1、2 所示。

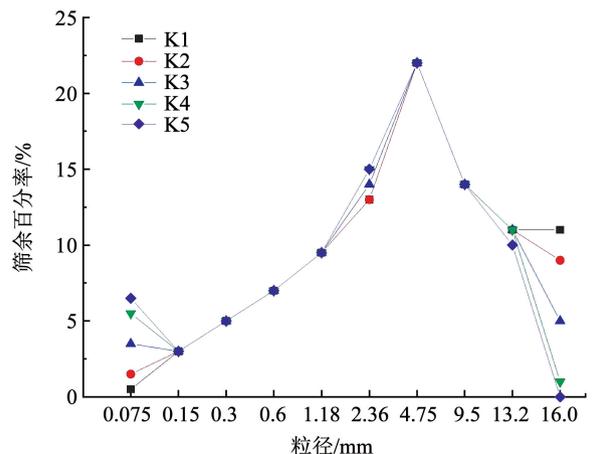


图 1 平行式变异级配筛余曲线

Fig. 1 Parallel variant gradation screen residual curve

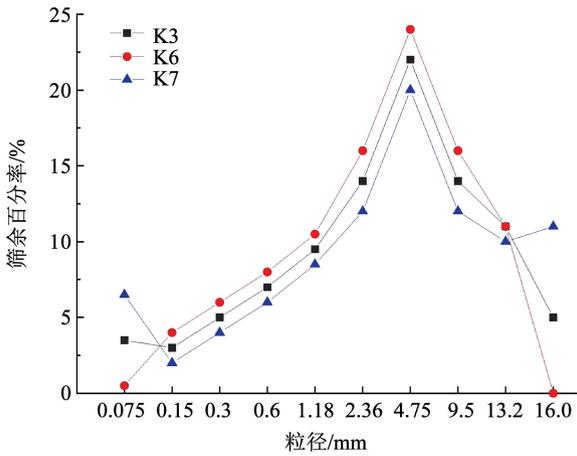


图 2 交叉式变异级配筛余曲线

Fig. 2 Crossover variant gradation screen residual curve

## 1.2 筛余特征参数的构建

### 1.2.1 平行式级配筛余特征参数的构建

根据 AC-16 沥青混合料目标级配变异模式的筛余特征描述, 构建表达 K1 ~ K5 各变异级配特征的筛余特征参数, 由图 1 筛余曲线可以看出, 变异级配主要是粗集料的 16、13.2 mm 粒径, 以及细集料的 0.075、2.36 mm 粒径, 针对以上的变异特征, 建立平行式变异级配筛余特征参数  $L_p$ , 有

$$L_p = \frac{b_{16\text{ mm}} + b_{13.2\text{ mm}}}{b_{0.075\text{ mm}} + b_{2.36\text{ mm}}} \quad (1)$$

式中:  $b_{16\text{ mm}}$  为 16 mm 的筛余百分率,  $b_{0.075\text{ mm}}$  为 0.075 mm 的筛余百分率。该特征参数代表了平行式变异级配的组成特点, 即以发生主要变异的粗集料与细集料粒径的筛余百分率比值来代表平行式级配的变异特征, 该比值越大, 代表粗集料所占比重越大, 细集料所占比重越小。将 K1 ~ K5 的筛余特征参数转化为散点图如图 3 所示。

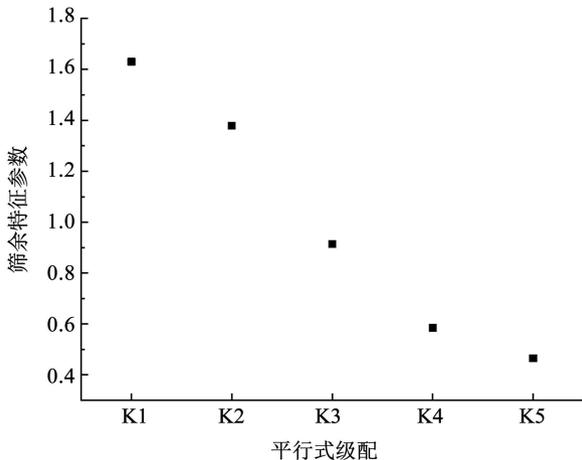


图 3 平行式级配变异模式的筛余特征参数

Fig. 3 Screening characteristic parameters of parallel gradation variation model

由图 3 可知, 筛余特征参数与 K1 ~ K5 变异级

配呈线性关系, 即随着各粒径通过百分率的增加, 各平行式级配的筛余特征参数减小, 粗集料所占比重越小, 细集料所占比重越大。可用筛余特征参数代表平行式变异级配的特征。

### 1.2.2 交叉式级配筛余特征参数的构建

构建表达 K6, K3, K7 交叉级配特征的筛余特征参数, 由图 2 筛余曲线可以看出, 变异级配的 16、0.075 mm 的变化规律一致, 0.15 ~ 13.2 mm 的变化规律一致。可将变化规律一致的粒径归为一类, 以两类粒径筛余百分率的比值代表交叉式级配的特征。由此建立的交叉式变异级配筛余特征参数  $L_c$  为

$$L_c = \frac{b_{0.15\text{ mm}} + \dots + b_{13.2\text{ mm}}}{b_{0.075\text{ mm}} + b_{16\text{ mm}}} \quad (2)$$

该公式的物理意义为: 随着筛余特征参数的增大, 中间粒径的筛余比例增大, 最大和最小粒径的筛余比例减小。将 K6、K3、K7 的筛余特征参数转化为散点图如图 4 所示。

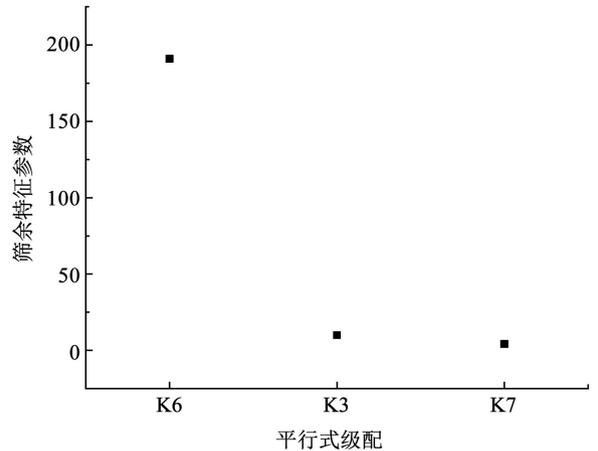


图 4 交叉式级配变异模式的筛余特征参数

Fig. 4 Screening characteristic parameters of the crossover gradation variation model

由图 4 可知, 筛余特征参数与 K6, K3, K7 变异级配呈线性关系, 可用筛余特征参数代表交叉式变异级配的特征。

## 2 沥青混合料结构参数与路用性能指标相关性分析

为了对沥青混合料变异级配模式的路用性能进行分析, 需要选择合适的试验来表征沥青混合料的常规性能、力学性能、高温稳定性、低温抗裂性和抗疲劳性。使用 SPSS 软件对变异级配沥青混合料的结构参数与路用性能指标进行相关性分析, 采用的相关性判定方法为皮尔逊相关性系数。皮尔逊相关性系数的绝对值越大, 相关性越强, 即相关系数越接近于 1 或 -1, 相关度越强; 相关系数越接近于 0, 相关

度越弱。

## 2.1 路用性能试验的选择

沥青混合料的路用性能一般认为包括高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性、抗疲劳性,此外,马歇尔稳定度与力学性能相关指标也是表征混合料性能的重要指标。但目前可以表征相关路用性能的试验很多,这就需要对相关的路用性能试验进行合理的选取<sup>[7-10]</sup>。为了探究路用性能和已研究的结构参数相关的联系,路用性能试验都需要使用马歇尔试件进行试验,以保持变异级配混合料的结构一致,不受试件外形的干扰。

综合考虑,选择劈裂试验表征混合料的力学性能,选择间接拉伸疲劳试验表征混合料的疲劳性能,选择劈裂蠕变实验表征混合料的高温稳定性,选择低温劈裂试验表征沥青混合料的低温抗裂性,选择冻融劈裂试验与浸水马歇尔试验表征沥青混合料的水稳定性。系列试验使用的为同一料源地的矿料与沥青,沥青混合料类型为 AC-16。

## 2.2 沥青混合料结构参数的选取

根据文献[11]定义的沥青混合料结构参数,包括沥青类参数、集料类参数与空隙类参数。本文选取了相关的结构参数,探究沥青混合料的级配变异模式对结构参数的影响规律。集料类参数包括粗集料体积百分率( $V_c$ )、细集料体积百分率( $V_f$ )、粗细集料体积比( $V_{c/f}$ );沥青类参数包括胶浆体积百分率(VM)、粉胶体积比( $F_{AV}$ )、粉浆体积比( $F_{BV}$ )、1型浆集体积比( $F_1$ )、2型浆集体积比( $F_2$ );空隙类参数包括细集料填充率( $V_{f/(1-c)}$ )、骨架系数( $G$ )、胶浆空隙率(VK)、粗集料矿料间隙率(VCM)。

## 2.3 结构参数与路用性能相关性分析

通过相关试验计算得到变异级配模式的各结构参数值,使用 SPSS<sup>[12-14]</sup> 软件对结构参数与路用性能相关性进行分析,采用的相关性判定方法为皮尔逊相关性系数。平行式级配和交叉式级配中,与结构参数强相关的路用性能指标结果见表 3。

根据沥青混合料组成结构理论对变异级配的混合料路用性能的变化成因进行探讨与分析。空隙率与马歇尔稳定度呈显著负相关关系,表明混合料的空隙率越大,其内部空隙越多,由于其混合料为悬浮密实型结构,其强度本身受集料与沥青胶浆之间的嵌挤影响较大,空隙越多的混合料,嵌挤作用就越小,导致混合料的力学强度减小。因此马歇尔稳定度就越小。而空隙率与劈裂抗拉强度、破坏劲度模量这两个力学性能参数也呈负相关关系,也印证了这一理论,此外,空隙率对抗疲劳强度也呈负相关关系。

表 3 与结构参数强相关的路用性能指标

Tab. 3 Road performance indicators strongly related to structural parameters

级配方式	结构参数	与结构参数强相关的性能指标
平行式	沥青膜有效厚度	蠕变速率
		马歇尔稳定度
	空隙率	劈裂抗拉强度
		lg K
交叉式	骨架系数	冻融劈裂强度比
		低温劈裂强度
	矿料间隙率	残留稳定度
	有效沥青饱和度	lg K
	浆集体积比	劈裂抗拉强度
	骨架系数	蠕变速率
	粗细集料体积	冻融劈裂强度比
		马歇尔稳定度
	细集料体积百分率	低温劈裂强度

沥青膜有效厚度是指包裹在矿料表面的有效沥青膜厚度,它是影响沥青混合料高温稳定性的重要指标,其与蠕变速率呈正相关关系,沥青膜受高温影响显著,在高温条件下,沥青膜受热软化,导致了沥青混合料蠕变速率加快,高温稳定性变差。

对影响沥青混合料力学性能的相关结构参数,通过总结与力学性能指标的相关性规律可知,胶浆体积与细集料比例这两种组分与力学性能指标呈正相关关系,胶浆体积包括矿粉和沥青,由于悬浮密实性的混合料结构特点,细分散系与微分散系是决定混合料力学强度的重要因素,细分散系与微分散系所占的比例越大,混合料内部的黏聚力越大,混合料的力学强度就越高;空隙率与粗集料比例是与力学性能负相关的两种组分,空隙率与粗集料比例组分的增大,都会使细分散系与微分散系的比例相应减小,导致混合料内部的黏聚力减小,从而引起混合料力学性能的下降。

探究影响沥青混合料水稳定性的相关体积指标发现,细集料与矿粉的提高提升了沥青混合料的水稳定性,其比例的提升增大了与沥青的交互作用,提高了混合料的黏聚力,进而增大了抵抗水损害的能力。

## 3 基于沥青混合料筛余特征参数的路用性能预测方法

前述建立的筛余特征参数可代表沥青混合料级配变异模式的特征,分析了结构参数与路用性能的相关性,据此可建立筛余特征参数与路用性能的联

系,通过筛余特征参数来预测沥青混合料的路用性能。

### 3.1 路用性能指标下限的确定

沥青混合料的路用性能预测需要确定各路用性能指标的下限值,本文基于三西格玛准则,通过试验得到 K3 目标级配的 5 个平行试件的性能指标实验

数据,对其进行正态分布检验,后计算其平均值与标准差,由平均值与 3 倍标准差得到路用性能指标下限<sup>[15]</sup>。

结合前文相关的路用性能试验,得到目标级配 K3 的 5 个平行试件的路用性能试验数据见表 4。

表 4 目标级配 K3 的平行试件路用性能数据

Tab. 4 Road performance data of parallel test piece with target grading K3

平行试件编号	劈裂抗拉强度/ MPa	马歇尔稳定 度/kN	lg K	蠕变速率/ ( $10^{-4} \text{ s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ )	低温劈裂强度/ MPa	残留稳定度/ %	冻融劈裂强度 比/%
1	2.00	12.88	6.47	8.12	2.05	95.45	89.97
2	2.02	12.44	6.29	7.89	2.23	92.76	88.56
3	2.07	12.74	6.11	6.96	2.11	90.12	90.89
4	2.02	12.83	6.18	7.43	2.22	94.87	90.74
5	1.94	12.54	6.20	7.10	2.16	92.51	90.34

通过 SPSS 软件,使用偏度与峰度系数法对以上路用性能数据进行正态性检验,服从正态性分布的判定标准是偏度系数与峰度系数均小于 1.96。目标级配的路用性能试验数据均服从于正态分布,可进行后续三西格玛准则的运用。

分别计算各性能指标对应平行试验结果的平均值与标准差,根据三西格玛准则计算目标级配 K3 的  $3\sigma$  路用性能下限值见表 5,由此可根据该路用性能下限值进行后续混合料的路用性能的判定。

表 5 目标级配 K3 的路用性能下限值

Tab. 5 Lower road performance limit of target gradation K3

统计参数	劈裂抗拉强 度/MPa	马歇尔稳定 度/kN	lg K	蠕变速率/ ( $10^{-4} \text{ s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ )	低温劈裂强 度/MPa	残留稳定 度/%	冻融劈裂强度 比/%
平均值	2.01	12.69	6.25	7.50	2.45	93.14	90.1
$3\sigma$ 下限	1.88	12.18	5.88	8.84	1.17	87.45	87.6

### 3.2 结构参数与路用性能回归方程的建立

以皮尔逊相关性系数绝对值大于 0.8 作为评判结构参数与路用性能具有显著性相关性的标准,选取各路用性能指标的中相关性系数最大的结构参数,分别建立平行与交叉式变异级配的结构参数与

路用性能的回归方程。下面主要以平行式变异级配进行介绍。

根据选取的相关性标准,图 5 ~ 10 为选取的平行式级配结构参数与路用性能指标的相关性关系曲线。

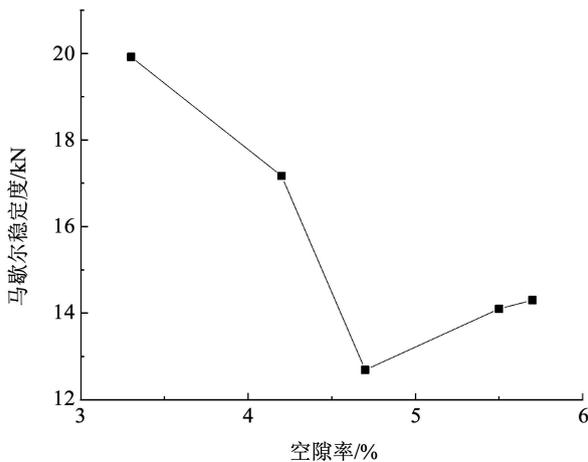


图 5 马歇尔稳定度与空隙率关系曲线

Fig. 5 Marshall stability and voidage curve

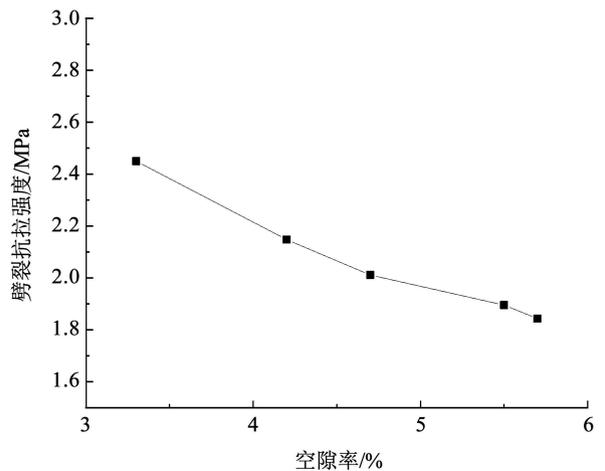


图 6 劈裂抗拉强度与空隙率关系曲线

Fig. 6 Relationship between splitting tensile strength and voidage

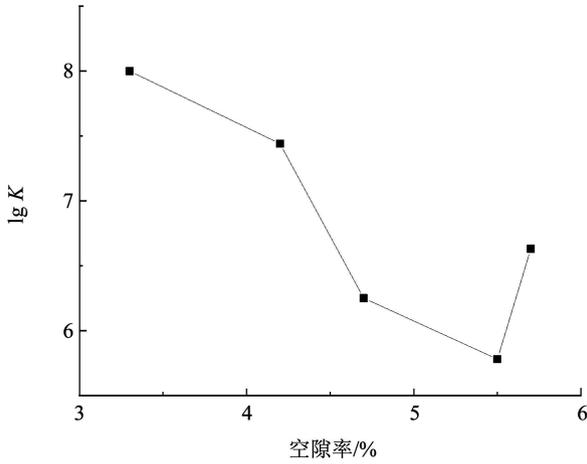


图 7 抗疲劳指标 lg K 与空隙率关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between lg K and voidage

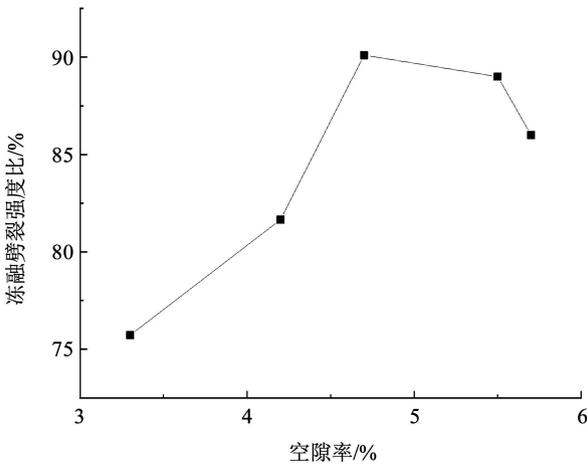


图 8 冻融劈裂强度比与空隙率关系曲线

Fig. 8 Relationship between freeze-thaw splitting strength ratio and voidage ratio

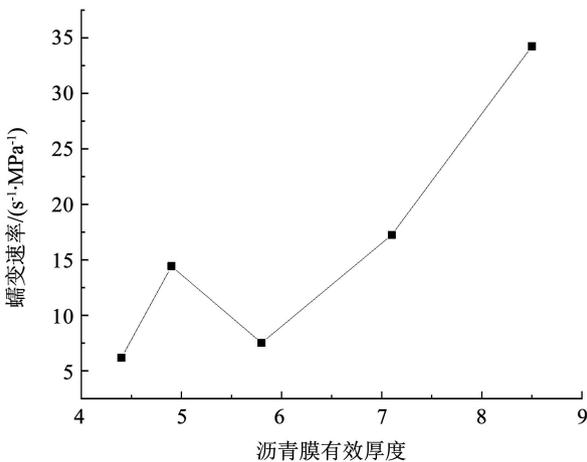


图 9 蠕变速率与沥青膜有效厚度关系曲线

Fig. 9 Curve of relation between creep rate and effective thickness of asphalt film

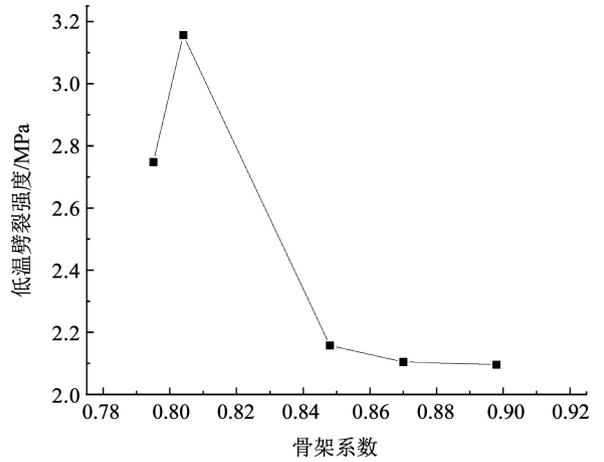


图 10 低温劈裂强度与骨架系数关系曲线

Fig. 10 Relationship between low temperature splitting strength and skeleton coefficient

由此分别建立选取的各结构参数与路用性能指标的线性回归方程见表 6, 选取的交叉式级配结构参数与路用性能指标具有相关性, 建立各结构参数与路用性能指标的线性回归方程见表 7。

表 6 平行式级配结构参数与路用性能回归方程

Tab. 6 Regression equation of parallel gradation structure parameters and pavement performance

路用性能指标	回归方程
马歇尔稳定度 $M$	$M = 26.983 - 2.424 \times VV$
劈裂抗拉强度 $P$	$P = 3.209 - 0.244 \times VV$
抗疲劳性能 $lg K$	$lg K = 10.449 - 0.775 \times VV$
冻融劈裂强度比 DR	$DR = 61.628 + 4.886 \times VV$
低温劈裂强度 DW	$DW = 10.449 - 9.486 \times G$
蠕变速率 $R$	$R = -20.463 + 5.925 \times DA$

表 7 交叉式级配结构参数与路用性能回归方程

Tab. 7 The regression equation between the structure parameters of cross gradation and the road performance

路用性能指标	回归方程
马歇尔稳定度 $M$	$M = -56.831 + 1.636 \times V_f$
低温劈裂强度 DW	$DW = 48.916 - 1.065 \times V_f$
劈裂抗拉强度 $P$	$P = 3.593 - 7.900 \times F_2$
抗疲劳性能 $lg K$	$lg K = -3.625 + 0.359 \times VFA$
蠕变速率 $R$	$R = -60.163 + 104.064 \times G$
残留稳定度 $C$	$C = 107.295 - 1.441 \times VMA$
冻融劈裂强度比 DR	$DR = 53.546 + 32.096 \times V_{eT}$

### 3.3 筛余特征参数与结构参数回归方程的建立

针对前述选取的结构参数, 建立变异级配的筛余特征参数与结构参数的回归方程。建立结构参数

与平行式变异级配筛余特征参数的回归方程, 得到的拟合关系与拟合方程如图 11 ~ 13 所示。

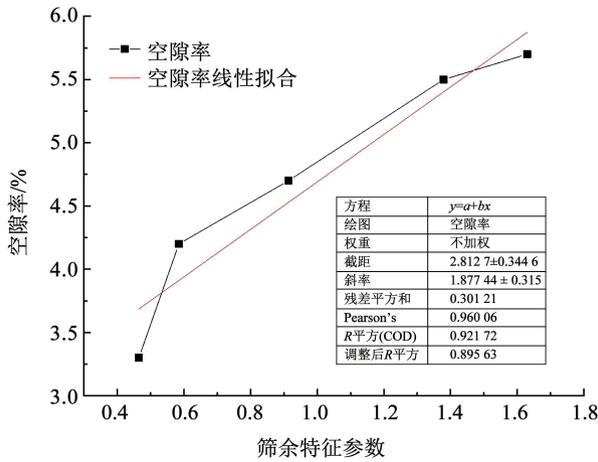


图 11 空隙率与筛余特征参数拟合

Fig. 11 Fitting of voidage and screen residual characteristic parameters

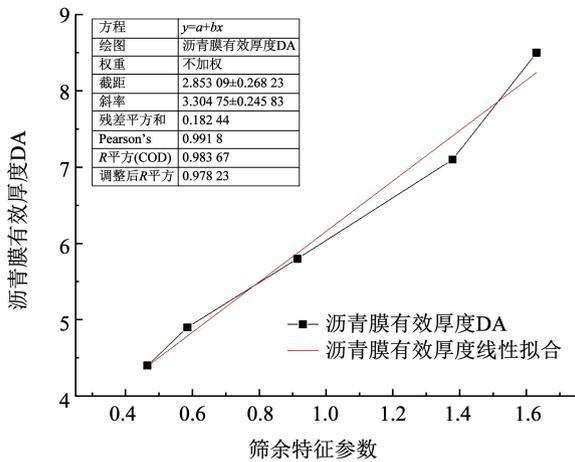


图 12 沥青膜有效厚度与筛余特征参数拟合

Fig. 12 The effective thickness of asphalt film is fitted with the characteristic parameters of screen residue

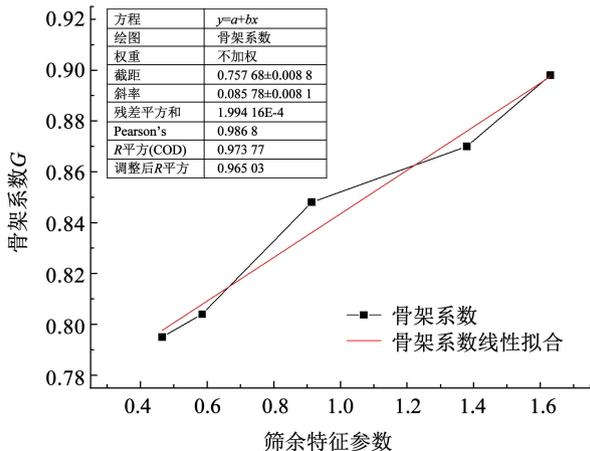


图 13 骨架系数与筛余特征参数拟合

Fig. 13 The skeleton coefficient is fitted with the screen residual characteristic parameters

拟合回归方程为

$$VV = 2.813 + 1.877 \times L_p \quad (3)$$

$$DA = 2.853 + 3.305 \times L_p \quad (4)$$

$$G = 0.758 + 0.086 \times L_p \quad (5)$$

建立结构参数与交叉式变异级配筛余特征参数的回归方程, 拟合方程为

$$V_f = 43.565 - 0.002 \times L_c \quad (6)$$

$$F_2 = 0.178 + 1.682 \times 10^{-4} \times L_c \quad (7)$$

$$VFA = 29.537 - 0.004 \times L_c \quad (8)$$

$$G = 0.846 - 7.453 \times 10^{-5} \times L_c \quad (9)$$

$$VMA = 9.383 + 0.021 \times L_c \quad (10)$$

$$V_{ef} = 1.080 - 3.708 \times 10^{-4} \times L_c \quad (11)$$

### 3.4 筛余特征参数与路用性能关系的建立

前述已建立了结构参数与路用性能、筛余特征参数与结构参数回归方程, 以结构参数为中介, 建立路用性能与筛余特征参数之间的关系。

首先建立平行式级配筛余特征参数与路用性能关系, 得到筛余特征参数与路用性能的关系方程见表 8。再建立交叉式级配筛余特征参数与路用性能关系, 得到筛余特征参数与路用性能的关系方程见表 9。

表 8 平行式级配筛余特征参数与路用性能回归方程

Tab. 8 Regression equation of parallel gradation screen residual characteristic parameters and road performance

路用性能指标	回归方程
马歇尔稳定度 $M$	$M = 20.164 - 4.550 \times L_p$
劈裂抗拉强度 $P$	$P = 2.523 - 0.458 \times L_p$
抗疲劳性能 $\lg K$	$\lg K = 8.269 - 1.455 \times L_p$
冻融劈裂强度比 $DR$	$DR = 75.372 + 9.171 \times L_p$
低温劈裂强度 $DW$	$DW = 3.259 - 0.816 \times L_p$
蠕变速率 $R$	$R = -3.559 + 19.582 \times L_p$

表 9 交叉式级配筛余特征参数与路用性能回归方程

Tab. 9 The regression equation between the characteristic parameters of the crossed gradation screen and the road performance

路用性能指标	回归方程
马歇尔稳定度 $M$	$M = 13.735 + 0.006 \times L_c$
低温劈裂强度 $DW$	$DW = 2.519 + 0.002 \times L_c$
劈裂抗拉强度 $P$	$P = 2.187 - 1.329 \times 10^{-3} \times L_c$
抗疲劳性能 $\lg K$	$\lg K = 6.979 - 1.436 \times 10^{-3} \times L_c$
蠕变速率 $R$	$R = 27.875 - 0.0078 \times L_c$
残留稳定度 $C$	$C = 93.774 - 0.030 \times L_c$
冻融劈裂强度比 $DR$	$DR = 88.210 - 1.190 \times 10^{-2} \times L_c$

### 4 基于筛余特征参数的沥青混合料路用性能预测

#### 4.1 路用性能预测过程

可利用已建立的 AC-16 筛余特征参数与路用性能的关系方程进行混合料路用性能的预测。对符合级配变异模式的沥青混合料,通过计算其筛余特征参数,代入筛余特征参数与路用性能的关系方程,即可预测混合料相关的路用性能指标。

设 AC-16 沥青混合料的某两种变异级配 Ka、Kb 与目标级配 K3 的通过率见表 10。

将该级配通过率转化为筛余百分率,根据筛余特征参数公式分别计算 Ka 与 Kb 的筛余特征参数: $L_{Ka} = 0.625, L_{Kb} = 47.000$ ,将其代入表 9、10 的方程中,即可得到预测的路用性能指标,结果见表 11。

表 10 变异级配 Ka、Kb 通过率

Tab. 10 The passing rate of Ka and Kb was graded with variation

级配粒径/mm	通过率/%		
	Ka	Kb	目标级配 K3
19	100	100	100
16	98.5	100	95
13.2	87.5	89	84
9.5	73.5	74	70
4.75	51.5	52	48
2.36	37	37	34
1.18	27.5	25.5	24.5
0.6	20.5	16.5	17.5
0.3	15.5	10.5	12.5
0.15	12.5	6	9.5
0.075	7	4	6

表 11 变异级配 Ka 与 Kb 路用性能指标预测结果

Tab. 11 Prediction results of Ka and Kb accessibility indexes with variation gradation

预测实测结果与性能下限	马歇尔稳定度/kN	低温劈裂强度度/MPa	lg K	蠕变速率/ $(10^{-4} s^{-1} \cdot MPa^{-1})$	冻融劈裂强度比/%	低温劈裂强度度/MPa	残留稳定度/%
Ka 级配预测结果	17.32	2.24	7.36	8.68	81.1	2.75	—
Ka 级配实测结果	16.97	2.25	5.38	7.96	81.9	3.12	91.45
Kb 级配预测结果	14.02	2.13	6.91	27.51	87.65	2.61	79.67
Kb 级配实测结果	14.68	1.93	6.59	34.87	84.79	2.73	86.15
路用性能下限	12.18	1.88	5.88	8.84	87.6	1.17	87.45

注:蠕变速率越小越好。

由表 11 中预测的结果与路用性能下限可知, Ka 冻融劈裂强度比的预测和实测结果均不符合路用性能下限要求,抗疲劳性能实测结果不符下限要求,预测结果符合,由于与残留稳定度有关的体积参数的相关性系数均小于 0.8,所以无法对平行式级配的残留稳定度进行预测;对于 Kb 级配,预测结果与实测结果一致的指标为蠕变速率和残留稳定度,预测与实测结果不一致的指标为冻融劈裂强度比。

#### 4.2 路用性能预测结果分析

由于 Ka 和 Kb 分别使用了平行与交叉式级配变异模式的筛余特征参数,因此可通过两者的预测和实测结果的变异系数雷达图,对其预测的准确度进行评价。得到 Ka 和 Kb 级配的各路用性能指标的变异系数结果如图 14、15 所示。

变异系数越小,表示其预测的准确程度越高。由图中可知,对于平行式级配变异模式 Ka,其劈裂抗拉强度与冻融劈裂强度比的变异系数在 1% 以下,马歇尔稳定度和蠕变速率的变异系数在 5% 以

下,低温劈裂强度的变异系数均在 10% 以下,只有抗疲劳性能的偏差度较高,达到了 15%;对于交叉式变异级配 Kb,除蠕变速率的变异系数较大,在 10% 以上,其余的路用性能指标变异系数均在 5% 以下。

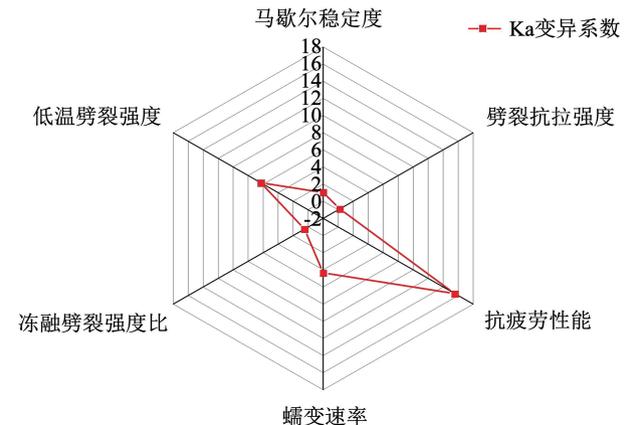


图 14 Ka 的预测和实测结果变异系数

Fig. 14 Coefficient of variation of Ka-grading prediction and measured results

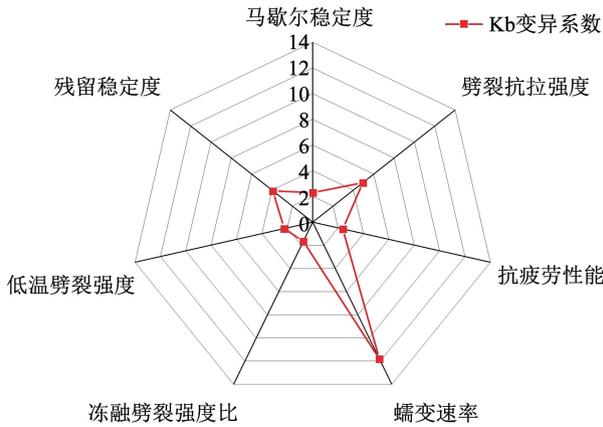


图 15 Kb 的预测和实测结果变异系数

Fig. 15 Coefficient of variation of Kb-gradation prediction and measured results

该结果可对变异级配的路用性能进行预测,实现快速调整施工配合比,即对已发现的变异级配进行性能预测,而不需要停产实验,不影响施工进度。

## 5 结论

通过构建典型的沥青混合料级配变异模式,使用筛余比值参数来表征混合料级配变异特征。选择相关的路用性能试验进行研究,探究混合料路用性能及其受级配变异的变化规律,对混合料体积参数与路用性能进行相关性分析,结合沥青混合料组成结构理论,对相关路用性能受级配变异的变化成因进行阐释,综合上述规律,通过回归分析建立混合料筛余比值参数与路用性能关系方程,据此实现对混合料变异级配的路用性能预测。得出如下结论:

1) 构建了沥青混合料的级配变异模式与筛余比值参数,通过筛余比例描述可知,平行式级配其变异的主要粒径是 0.075、16、2.36 mm,随着级配各粒径通过率的增加,0.075 mm 粒径的集料筛余比例逐渐增加,16 mm 粒径的集料筛余比例逐渐减少;交叉式级配随着各粒径通过率的增加,0.075、16 mm 粒径的筛余比例降低,0.15 ~ 13.2 mm 粒径的筛余比例增加。

2) 探究影响沥青混合料水稳定性的相关体积指标发现,细集料与矿粉的增加提升了沥青混合料的水稳定性,其比例的提升增大了与沥青的交互作用,提高了混合料的黏聚力,进而增大了抵抗水损害的能力。

3) 以沥青混合料结构参数为中介,建立了混合料筛余比值参数与路用性能关系方程,通过三西格玛准则确定各路用性能指标的下限值,可对变异级配的路用性能进行预测,实现快速调整施工配合比。

4) 由各变异级配的预测和实测结果可知,对于

Ka 级配,其劈裂抗拉强度与冻融劈裂强度比的变异系数在 1% 以下,马歇尔稳定性和蠕变速率的变异系数在 5% 以下,低温劈裂强度的变异系数均在 10% 以下,只有抗疲劳性能的偏差度较高,达到了 15%;对于 Kb 级配,除蠕变速率的变异系数较大,在 10% 以上,其余的路用性能指标变异系数均在 5% 以下。

## 参考文献

- [1] 胡佳寅. 沥青混合料级配离析特性的分形评价与控制技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2013  
HU Jiayin. Study on fractal evaluation methods and control technology for asphalt mixture gradation segregation [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. DOI:10.7666/d.D408295
- [2] 丁凡. 沥青路面施工过程级配变异性分析与控制[D]. 南京: 东南大学, 2020  
DING Fan. Analysis and control of gradation variation in construction process of asphalt pavement [D]. Nanjing: Southeast University, 2020
- [3] 交通运输部公路局. 高速公路施工标准化技术指南: 第 3 分册 路面工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012  
The Highway Bureau of the Ministry of Transport. Technical guide for standardization of expressway construction: volume 3 pavement engineering [M]. Beijing: People's Communications Press, 2012
- [4] 纪伦, 刘海权, 张磊, 等. 粗集料针片状含量对沥青混合料结构影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(9): 40  
JI Lun, LIU Haiquan, ZHANG Lei, et al. Effects of flat and elongated particles content in coarse aggregate on asphalt mixture structure [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(9): 40. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201706035
- [5] 江志远, 徐昌文, 谢远新. 沥青混合料体积参数影响因素试验研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2017, 34(8): 71  
JIANG Zhiyuan, XU Changwen, XIE Yuanxin. Experimental study on influencing factors of volume parameters of asphalt mixture [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2017, 34(8): 71. DOI:10.3969/j.issn.1000-033X.2017.08.009
- [6] 交通运输部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004  
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Technical specifications for construction of highway asphalt pavements: JTG F40—2004 [S]. Beijing: China Communication Press, 2004
- [7] 齐伟, 龙晓荣, 赵彩娟. 对我国《公路沥青路面施工技术规范》的评述[J]. 城市道桥与防洪, 2007(8): 187  
QI Wei, LONG Xiaorong, ZHAO Caijuan. Commentary on 《Highway Asphalt Pavement Construction Technical Standard》 of China [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2007(8): 187. DOI:10.3969/j.issn.1009-7716.2007.08.063
- [8] 马荣. 级配离析对 AC-20 沥青混合料性能的影响研究[J]. 建设科技, 2016(17): 109  
MA Rong. Study on the influence of gradation segregation on the performance of AC-20 asphalt mixture [J]. Construction Science and Technology, 2016(17): 109. DOI:10.16116/j.cnki.jskj.2016.17.042
- [9] 韩亚丽. 基于控制材料变异的沥青混凝土施工质量控制研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011