

文章编号: 1674-599X(2022)02-0001-06

基于贝雷法参数与CEI的沥青混合料级配优化

关宏信¹, 李铭哲¹, 曾勇², 李兵³

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.广西交通设计集团有限公司, 广西 南宁 530012;
3.佛山市路桥建设有限公司, 广东 佛山 528042)

摘要: 为研究矿料级配变化对沥青混合料压实特性的影响, 对8种沥青混合料级配进行旋转压实试验。采用最小二乘法分析贝雷法参数对密实能指数CEI和CEI96的影响, 优化LC-16的级配。研究表明: 贝雷法参数CA值对密实能指数影响最大, LC-16E的密实能指数CEI与CEI96的推荐值分别为22.86和220.42, 经过26次旋转压实后的平均空隙率为3.888%, 由斜率法可得出LC-16E的平均斜率为0.372, 该级配优化的路用性能满足规范要求。

关键词: 道路工程; 沥青混合料; 压实特性; 级配优化; 贝雷法; 密实能指数

中图分类号: U416 文献标志码: A

Gradation optimization of asphalt mixtures based on the Bailey method parameter and the construction energy index

GUAN Hongxin¹, LI Mingzhe¹, ZENG Yong², LI Bing³

(1.School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Guangxi Communications Design Group Co., Ltd., Nanning 530012, China; 3. Foshan highway & bridge construction Co., Ltd., Foshan 528042, China)

Abstract: In order to explore the effect of aggregate gradation on compaction characteristic of asphalt mixture, gyratory compaction tests were conducted out on eight asphalt mixtures gradation. The partial least squares method was adopted to analyze the influence of the Bailey method parameter on the construction energy index(CEI) and the CEI96. The LC-16 grade was then optimized. The results show that the parameter CA of Bailey method has the maximum influence on the construction energy index. The recommended values of CEI and CEI96 for the LC-16E are 22.86 and 220.42 respectively. The average void ratio is 3.888% by 26 times of gyratory compaction test. The average gradient is 0.372 resulting from gradient method. The pavement performance can meet the specification requirement.

Key words: road engineering; asphalt mixture; compaction property; graded optimization; Bailey method; construction energy index

沥青混合料的压实性能影响路面质量^[1-2]、路用性能和使用寿命。压实效果差会使路面强度降低, 路面稳定性变差, 运营期间极易产生渗水、车辙等病害。为适应日益繁重的交通压力, 提高沥青路面的使用寿命, 应选取适当的级配^[3]。已有

研究表明级配对沥青混合料的压实性能有很大的影响^[4-5], 通过调整各集料用量, 可以优化混合料内部的嵌挤骨架, 得到良好的骨架嵌挤结构, 让其更容易被压实。马翔等人^[6]对粗、中、细型共18种沥青混合料的压实特性进行分析, 发现级配沥

收稿日期: 2021-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078062); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ4604); 湖南省交通运输地方标准制修订项目(B201806)

作者简介: 关宏信(1974—), 男, 长沙理工大学教授, 博士。

青混合料越粗,密实度能量指数越高,沥青混合料越难以被压实。张黎红等人^[7]对AC-13、AC-20和AC-25三种级配类型的温拌橡胶沥青混合料的压实特性研究发现,当最大公称粒径相同时,级配越细越容易被压实,而级配越粗高温稳定性能越好。马峰等人^[8]研究发现,对于新型橡胶粉和抗车辙剂复合改性沥青混合料,当粗集料含量达到65%时,沥青混合料密度最大。DAN等人^[9]提出沥青混合料内部颗粒的应力状态可反映材料致密性的结论,得到沥青混合料的压实效果,发现开级配沥青混合料比密级配沥青混合料和间断级配沥青混合料更容易达到目标压实度。AI-AMMARI等人^[10]研究了石灰岩和花岗岩为集料的不同级配沥青混合料的压实性能。

在沥青混合料的压实特性研究中,通常采用贝雷法和旋转压实曲线。在级配设计中,贝雷法是常用的方法之一,采用贝雷法参数 CA 、 FA_c 和 FA_p 评价矿料性质。张宇等人^[11]研究了贝雷法参数 CA 值与密实能量指数、交通密实指数、SGC集料嵌锁点和密实度斜率的关系,认为在最佳压实特性情况下 CA 值的取值范围为0.4~0.8。李涛等人^[12]研究了贝雷法在半刚性基层中配合比的应用,得到了 CA 值、 FA_c 值和 FA_p 值对无侧限抗压强度和劈裂强度的影响。邢明亮等人^[13]采用贝雷法、粗集料断级配设计方法和灰色理论法,分析了各档细集料筛孔与粗骨料骨架空隙率 VCA_{mix} 的关系,得到SMA-5混合料的级配组成和筛孔的控制关键点。LYU等人^[14]通过HWT试验评估了26种沥青混合料的抗车辙性能,探讨了 FA_c 值与沥青混合料抗车辙性能的关系。张争奇等人^[15]对美国战略公路研究计划中推荐的粗、细型沥青混合料的密实曲线进行了研究分析,发现旋转压实密实曲线的曲线斜率和密实能指数可以反映沥青混合料的压实特性。王玉宝^[16]通过密实曲线得到密实能指数(compaction energy index,简称为CEI)、密实度斜率 k 和交通密实能力指数(traffic density index,简称为TDI)3个参数,并以此评价沥青混合料在施工阶段和使用阶段的压实和密实趋势。

级配可以影响沥青混合料压实效果。贝雷法是常用的级配设计方法之一,但通过贝雷法分析

沥青混合料压实特性的研究较少。因此,本研究拟针对沥青层压实的工程需求,基于密实能指数,比较多种级配沥青混合料的压实特性。运用贝雷法,结合偏最小二乘法分析,优选出一种易压实的沥青混合料级配。

1 压实特性试验方案及结果

密实曲线能反映压实过程中沥青混合料的密实度比(密实度/密实比)随压实次数的变化情况^[15,17]。这条曲线能较好地反映沥青混合料在施工阶段和交通开放后(在交通荷载作用下)密实度的变化情况。

根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)的规定,沥青混合料在施工过程中需压实到92%后才能开放交通。密实能指数CEI为沥青混合料在铺筑过程中,将密实曲线的密实比达到92%时所围成的面积,当作压路机需要做的功。密实能指数CEI值越小,压实过程中所需要的能量越少,施工和易性越好。室内试验用从松散状态压实至密实比为96%时所需做的功(CEI96)表示沥青混合料的压实程度。因此,本研究采用密实能指数CEI和CEI96两个指标评价沥青混合料的压实特性。

本研究对压实特性的评价方法为:通过旋转压实仪使试件成型,再测出各个试件的空隙率、密度等指标,计算得到密实曲线和密实能量指数,最后评定沥青混合料压实特性。

本试验采用8种不同级配类型沥青混合料,具体级配与最佳油石比见表1。其中,LC-16A、LC-16B、LC-16C和LC-16D分别为对AC-16部分筛孔进行调整而形成的新级配。所用材料的基本性质均满足《公路沥青路面施工技术规范》规定(JTG F40—2004),沥青均为SBS改性沥青。

本研究对表1中各沥青混合料在不同旋转次数下,使用旋转压实仪(superpave gyratory compactor,简称为SGC),得到成型直径为10 cm的圆柱体试件。通过表干法测定各试件的空隙率,得到密实比。再通过各沥青混合料密实曲线,计算各沥青混合料CEI和CEI96值,结果见表2。

表1 试验所用沥青混合料材料组成

Table 1 Material composition of asphalt mixture used in the test

矿料	不同筛孔尺寸通过率/%												最佳 油石比
	0.075	0.150	0.300	0.600	1.18	2.36	4.75	9.5	13.2	16	19	26.5	
LC-16A	10.1	10.9	12.4	15.5	21.5	31.6	42.0	64.1	84.3	100.0	100.0	100.0	5.3
LC-16B	8.2	8.9	10.4	13.4	19.3	29.0	38.4	59.1	79.3	95.0	100.0	100.0	5.2
LC-16C	6.2	6.9	8.4	11.3	17.0	26.3	34.7	54.1	74.3	90.0	100.0	100.0	5.4
LC-16D	8.2	8.9	9.7	13.4	19.3	29.0	38.4	54.1	79.3	95.0	100.0	100.0	5.9
SMA-16-1	12.0	14.0	15.0	18.0	22.0	24.0	32.0	65.0	85.0	100.0	100.0	100.0	5.8
SMA-16-2	10.0	11.5	12.5	15.0	18.0	19.5	26.0	55.0	75.0	95.0	100.0	100.0	6.1
SMA-16-3	8.0	9.0	10.0	12.0	14.0	15.0	20.0	45.0	65.0	90.0	100.0	100.0	5.0
AC-16	6.0	9.5	12.5	17.5	24.5	34.0	48.0	70.0	84.0	95.0	100.0	100.0	5.0
LC-16AS	10.1	10.9	12.4	15.5	21.5	31.6	42.0	64.1	84.3	100.0	100.0	100.0	4.8
LC-16BS	8.2	8.9	10.4	13.4	19.3	29.0	38.4	59.1	79.3	95.0	100.0	100.0	4.7
LC-16CS	6.2	6.9	8.4	11.3	17.0	26.3	34.7	54.1	74.3	90.0	100.0	100.0	5.0

注: 后缀S表示所用矿料为石灰岩, 没有后缀的表示所用矿料为玄武岩。

由表2可知: ①SMA-16与AC-16和LC-16混合料相比, 较难被压实。②沥青混合料压实至交通开放时, LC-16B较AC-16节省14.4%的压实功。当沥青混合料压实到设计空隙率时, LC-16B较AC-16节省6.7%的压实功, LC-16D沥青混合料与LC-16B的压实特性相当。③级配类型对沥青混合料压实特性有很大影响, SMA为间断级配, 粗集料含量高, 相比AC-16等密级配混合料较难被压实。④对于LC-16B、SMA-16-2、LC-16BS, 粗细集料含量合理, 粗集料悬浮于细颗粒之间, 无法形成有效的嵌挤结构, 细集料与沥青形成胶结料, 填充于骨架间的孔隙中起润滑作用, 使沥青混合料更容易被碾压密实。对于LC-16A、SMA-16-1和LC-16AS, 其细集料含量多, 比表面积大, 压实克服摩擦力需做的功也增大。对于LC-16C、SMA-16-3和LC-16CS, 粗集料含量相对较高, 压实时需较多的能量用于克服粗集料棱角之间的摩擦。

表2 密实能指数CEI及CEI96试验结果表

Table 2 Results of the CEI and CEI96

级配类别	CEI	CEI96	级配类别	CEI	CEI96
LC-16A	28.15	256.87	SMA-16-3	37.66	332.00
LC-16B	24.20	240.48	AC-16	28.26	257.79
LC-16C	26.17	265.39	LC-16AS	28.18	278.93
LC-16D	23.47	238.51	LC-16BS	27.40	255.08
SMA-16-1	37.96	324.65	LC-16CS	27.64	278.95
SMA-16-2	35.61	309.80			

2 基于贝雷法参数的LC-16沥青混合料级配再优化

本试验结果表明: LC-16D与LC-16B比AC-16更易被压实。通过对LC-16沥青混合料的级配进行优化, 先分析贝雷法参数对密实能指数的影响程度, 再改变贝雷法参数, 最后优化LC-16沥青混合料的级配。

2.1 贝雷法参数对密实能指数的影响程度分析

贝雷法是一套适用于沥青混合料级配设计和检验的系统方法^[18-19], 有CA值、FA_c值和FA_f值3个参数。采用偏最小二乘回归分析法, 分析贝雷法三参数对沥青混合料压实特性的影响。

通过对玄武岩为矿料的8种级配沥青混合料进行计算, 得到了CA值、FA_c值和FA_f值, 其结果见表3。

表3 各沥青混合料贝雷法参数值

Table 3 The Bailey method parameter of asphalt mixture

级配类型	CA值	FA _c 值	FA _f 值
LC-16A	0.616	0.512	0.577
LC-16B	0.506	0.503	0.539
LC-16C	0.423	0.490	0.494
SMA-16A	0.942	0.688	0.682
SMA-16B	0.644	0.692	0.694
SMA-16C	0.455	0.700	0.714
AC-16	1.000	0.510	0.510
LC-16D	0.342	0.503	0.503

表3中贝雷法参数的数量级和量纲与表2的密实能指数CEI和CEI96存在很大差异,将各自变量值 x_{ij} 数据按照式(1)转化为标准化数值 \tilde{x}_{ij} ,减小数量级和量纲差异带来的影响。

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - k_{xj}}{S_{xj}}, i = 1, 2, \dots, 8; j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

式中: S_{xj} 和 k_{xj} 分别为第 j 个自变量的样本标准差和样本均值, $S_{xj} = \sqrt{\frac{1}{8-1} \sum_{i=1}^8 (x_{ij} - k_{xj})^2}$; $k_{xj} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{ij}$

对因变量 y_{ij} 标准化处理,其表达式为:

$$\tilde{y}_{ij} = \frac{y_{ij} - k_{yj}}{S_{yj}}, i = 1, 2, \dots, 8; j = 1, 2, 3 \quad (2)$$

式中: $S_{yj} = \sqrt{\frac{1}{8-1} \sum_{i=1}^8 (y_{ij} - k_{yj})^2}$; $k_{yj} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 y_{ij}$,即 S_{yj} 和 k_{yj} 分别为第 j 个因变量的样本标准差和样本均值。

使用MATLAB软件对密实能指数CEI和CEI96与CA值、 FA_c 值和 FA_f 值3个独立变量之间关系编写程序进行分析,得到各贝雷法参数对CEI和CEI96的影响程度,结果如图1所示。

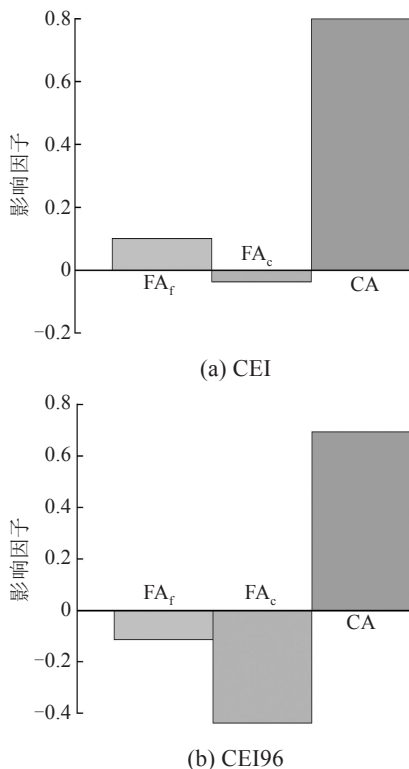


图1 贝雷法参数对CEI及CEI96影响因子

Fig. 1 The Bailey method parameter to impact factor of the CEI and CEI96

从图1中可以看出,沥青混合料从松散状态压实至交通开放状态过程中,CA值的影响最大,与CEI呈正相关性,而 FA_c 值和 FA_f 值在该阶段对压实性能影响小。因此,该阶段粗细集料含量合理时,可以省下很大的压实功。当沥青混合料继续压实至设计空隙率时, FA_c 值的影响增大,与密实能指数呈负相关性, FA_f 值对混合料压实影响仍不大,但CA值对其影响仍很大。因此,CA值与沥青混合料的压实有密切关系,需进一步研究CA值对沥青混合料压实特性的影响。

2.2 LC-16混合料级配再优化

在LC-16D和LC-16B混合料级配的基础上,调配出LC-16E沥青混合料。当筛孔尺寸分别为0.075、0.150、0.300、0.600、1.180、2.360、4.750、9.500、13.200、16.000和19.000 mm时,通过率分别为8.2%、8.9%、9.7%、13.4%、19.3%、29.0%、38.4%、57.0%、79.3%、95.0%和100%。LC-16E与LC-16D相比,最主要的区别在于9.500 mm集料通过率调整至57%时,CA值为0.432。从旋转压实试验构建密实曲线,计算出其CEI值和CEI96值。其中,最佳油石比为5.2%。

由密实曲线计算得到LC-16E的CEI值、CEI96值分别为22.86、220.42。对比表2,当沥青混合料压实至交通开放状态时,LC-16E与AC-16的沥青混合料相比,压实功减少了19.1%;当沥青混合料压实到设计空隙率时,LC-16E与AC-16沥青混合料相比,压实功减少了14.5%。表明:9.500 mm集料通过率对LC-16混合料的压实性能有很大的影响,CA值的变化与沥青混合料的压实性能关系密切。LC-16E混合料的路用性能试验结果见表4,均符合规范的要求。

表4 LC-16E各项路用性能结果
Table 4 Road performance of the LC-16E

试验项目	试验结果	技术要求	试验方法
汉堡车辙深度/mm	4.472	20 000次最大变形 ≤ 10 mm	ASSHTOT324-04
浸水残留稳定度/%	95.0	≥ 80	T0709-2011
冻融劈裂强度比/%	94.3	≥ 80	T0729-2000
低温破坏应变/ $\mu\epsilon$	2 966.6	$\geq 2 500$	T0715-2011

3 LC-16E混合料的压实特性分析

采用空隙率法和斜率法对LC-16E和AC-16混合料的压实性能进行对比。

1) 空隙率法

对比相同旋转压实次数时两种沥青混合料空隙率,可以直观表明沥青混合料的密实程度。LC-16E和AC-16两种级配混合料在旋转压实次数为26次时,16组平行试件空隙率试验和均值结果如图2所示。

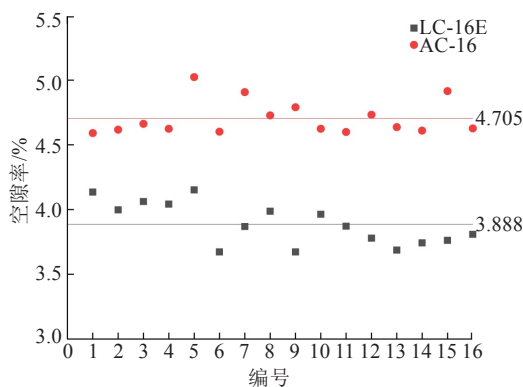


图2 两种沥青混合料空隙率和均值

Fig. 2 Porosity and average value of two asphalt mixtures

从图2中可以看出,16组LC-16E与AC-16的空隙率均分布于均值附近,并且各平行试件空隙率差值较小。计算得到LC-16E的平均空隙率为3.888%,AC-16的为4.705%,LC-16E的空隙率明显小于AC-16的,表明LC-16E更易于被压实。

2) 斜率法

斜率法可以表征沥青混合料在压实过程中的敏感性,表明其从未碾压松散状态压实至设计空隙率状态时的压实效果。

根据试验数据,计算得出LC-16E的平均斜率为0.372,AC-16的平均斜率为0.301。表明:LC-16E更易被压实,密实度增加更快,可以更早达到目标空隙率。根据密实能指数、空隙率法和斜率法,均可得出LC-16E比AC-16更易于被压实的结论。

4 结论

1) 密实能指数CEI值与CEI96值的试验结果表明:LC-16<AC-16<SMA-16,LC-16混合料更

易于被压实。

2) 通过偏最小二乘法对沥青混合料压实特性分析,得出贝雷法三参数CA值、 FA_c 值和 FA_r 值对CEI的影响因子分别为0.7996、-0.0373和0.1075;CA值、 FA_c 值和 FA_r 值对CEI96的影响因子分别为0.6942、-0.4387和-0.1145。其中,CA值的影响因子最大,呈正相关。

3) 设计的LC-16E混合料经26次旋转压实后,得出平均空隙率为3.888%,AC-16的为4.805%。由斜率法算出LC-16E的平均斜率为0.372,AC-16的平均斜率为0.301。表明:LC-16E更易于被压实。

参考文献(References):

- [1] 余永飞,王栋,张征,等.双层一次摊铺工艺沥青路面结构层厚度分析[J].交通科学与工程,2019,35(3):18-22. (YU Yongfei, WANG Dong, ZHANG Zheng, et al. Analysis on asphalt pavement thickness of the double-layer paving process[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019,35(3):18-22.(in Chinese))
- [2] 鲁彬,王亚晓.施工过程中沥青砼路面平整度控制技术[J].公路与汽运,2021(1):76-78. (LU Bin, WANG Yaxiao. Control technology of evenness of asphalt concrete pavement during construction[J]. Highways & Automotive Applications, 2021(1):76-78.(in Chinese))
- [3] 郑健龙,吕松涛,刘超超.长寿命路面的技术体系及关键科学问题与技术前沿[J].科学通报,2020,65(30):3219-3227. (ZHENG Jianlong, LYU Songtao, LIU Chaochao. Technical system, key scientific problems and technical frontier of long-life pavement[J]. Chinese Science Bulletin, 2020,65(30):3219-3227.(in Chinese))
- [4] 朱梦良,严鑫,郁飞,等.温度对胶粉改性沥青混合料体积参数的影响[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2013,10(3):13-19. (ZHU Mengliang, YAN Xin, YU Fei, et al. Effect of temperature on volumetric parameters of rubber modified asphalt mixture[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2013,10(3):13-19.(in Chinese))
- [5] 南秋彩.温拌沥青混合料压实特性影响因素研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(12):63-68. (NAN Qiucui. Influencing factors of compaction characteristics of warm mix asphalt mixture[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2019,38

- (12):63-68.(in Chinese))
- [6] 马翔,李强,葛骁.不同级配沥青混合料压实特性与高温性能相关性[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2015,39(2):246-249.(MA Xiang, LI Qiang, GE Xiao. Relationship of compaction characteristics to different gradation asphalt mixture high temperature performance [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2015,39(2):246-249.(in Chinese))
- [7] 张黎红,董则军,郭绍成.矿料级配对温拌橡胶沥青混合料压实特性的影响[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(8):44-48.(ZHANG Lihong, DONG Zejun, GUO Shaocheng. Influence of aggregate gradation on compaction characteristics of warm mix rubber asphalt mixture[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science),2017,36(8):44-48.(in Chinese))
- [8] 马峰,张耀,傅珍,等.新型橡胶粉和抗车辙剂复合改性沥青混合料级配优化[J].武汉大学学报:工学版,2019,52(8):687-693,702.(MA Feng, ZHANG Yao, FU Zhen, et al. New rubber powder and anti-rutting agent compound optimization of modified asphalt mixture grading[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019,52(8):687-693,702.(in Chinese))
- [9] DAN H C, YANG D, ZHAO L H, et al. Meso-scale study on compaction characteristics of asphalt mixtures in superpave gyratory compaction using smartrock sensors [J]. Construction and Building Materials, 2020, 262: 120874.
- [10] Al-AMMARI M A S, JAKARNI F M, MUNIANDY R, et al. The effect of aggregate and compaction method on the physical properties of hot mix asphalt[J]. IOP Conference Series (Materials Science and Engineering), 2019,512(1): 1-13.
- [11] 张宇,韩冰.贝雷法不同CA参数下沥青混合料的压实性能[J].公路工程,2011,36(4):37-40,44.(ZHANG Yu, HAN Bing. The compaction property of the asphalt mixture with different CA on the bailey method[J]. Highway Engineering, 2011,36(4):37-40,44.(in Chinese))
- [12] 李涛,邹静蓉,汤显平,等.贝雷法在半刚性基层中的应用[J].公路,2018,63(12):19-23.(LI Tao, ZOU Jingrong, TANG Xianping, et al. Application of bailey method in semi-rigid base course[J]. Highway, 2018,63(12):19-23.(in Chinese))
- [13] 邢明亮,孙岳,谢超,等.基于灰熵法的SMA-5混合料级配组成范围研究[J].公路,2017,62(11):225-230.(XING Mingliang, SUN Yue, XIE Chao, et al. Research on gradation composition range of SMA-5 mixture based on grey entropy method[J]. Highway, 2017, 62(11): 225-230.(in Chinese))
- [14] LYU Q, HHANGW D, ZHENG M, et al. Influence of gradation on asphalt mix rutting resistance measured by Hamburg Wheel Tracking test[J]. Construction and Building Materials, 2020,238:117674.
- [15] 张争奇,袁迎捷,王秉纲.沥青混合料旋转压实密实曲线信息及其应用[J].中国公路学报,2005,18(3):1-6.(ZHANG Zhengqi, YUAN Yingjie, WANG Binggang. Information of gyratory compaction densification curve of asphalt mixture and its application[J].China Journal of Highway and Transport, 2005,18(3):1-6.(in Chinese))
- [16] 王玉宝.温拌无纤维SMA沥青混合料应用研究[D].天津:河北工业大学,2015.(WANG Yubao. Applied study on warm mix SMA asphalt mixtures without fiber[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015. (in Chinese))
- [17] 李林萍,张帆.温拌沥青混合料马歇尔击实和旋转压实密实曲线的比较分析[J].公路工程,2015,40(1):29-32,47.(LI Linping, ZHANG Fan. Comparative analysis of warm mix asphalt Marshall and gyratory compaction densification curve[J]. Highway Engineering, 2015, 40(1): 29-32, 47.(in Chinese))
- [18] 段功臻.贝雷法用于橡胶粉改性沥青混合料的级配优化研究[D].武汉:武汉工程大学,2017.(DUAN Gongli. Gradation optimization of crumb rubber modified asphalt mixture based on bailey design method[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2017. (in Chinese))
- [19] 张书华.贝雷法和CAVF法在AK-13A和SMA-13的混合料级配设计中的应用[J].公路交通科技,2018,35(9):15-20.(ZHANG Shuhua. Application of bailey method and CAVF method in designing mixture gradation of AK-13A and SMA-13[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(9): 15-20.(in Chinese))