

高模量沥青混合料路用性能试验 及 AHP 综合性能评价

孙雅珍, 顾彬诚

(沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究高模量沥青混合料的路用性能,并建立沥青混合料在不同沥青路面气候分区的综合性能评价体系. 方法 采用 70#、SBS 以及两种高模量沥青混合料 (Honeywell7686 和路宝) 进行试验研究,分析高模量剂对沥青混合料路用性能的影响. 选取部分气候分区,基于层次分析法建立比较矩阵模型,得到各指标权重系数. 结合各项性能指标评分,对不同分区下高模量沥青混合料综合性能进行客观评估. 结果 高模量剂能显著提高沥青混合料路用性能,进行综合评分后发现高模量沥青混合料综合性能更优. 结论 笔者提出的评价方法可以建立不同气候分区下沥青混合料综合性能评价体系,为不同气候分区下沥青混合料优选提供参考.

关键词 道路工程;综合评价体系;层次分析法;高模量沥青混合料;气候分区

中图分类号 TU535;U414 文献标志码 A

Road Performance Tests and Evaluation of Comprehensive Performance of HMAM Based on Improved AHP and Climate Zones

SUN Yazhen, GU Bincheng

(School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to study the performance of high modulus asphalt mixture (HMAM) and establish a comprehensive performance evaluation system for asphalt mixtures based on different climate zones. The performance tests were conducted using ordinary 70-penetration, SBS asphalt mixtures and two kinds of HMAM and the effect of the high modulus modifiers on the performance of the asphalt mixture was analyzed. Several climate zones were selected and a comparative matrix model was established through the analytic hierarchy process (AHP). The weight coefficients of indicators were obtained, the weight coefficients and the performance index score were combined to rank the comprehensive performance, and HMAM was evaluated more objectively. High modulus modifiers are capable of remarkably improving the overall performance, and HMAM were ranked higher by each climate zone. It was found that the comprehensive performance of HMAM was better after

收稿日期:2018-10-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51478276);辽宁省自然科学基金项目(20170540770)

作者简介:孙雅珍(1970—),女,教授,博士,主要从事路面损伤等方面研究.

comprehensive scoring. The evaluation method proposed by the author can establish the comprehensive performance evaluation system of asphalt mixture under different climatic zones and provide certain reference for the selection of asphalt mixtures under different climatic zones.

Key words: road engineering; comprehensive evaluation system; analytic hierarchy process; high modulus asphalt mixture (HMAM); climate zones

随着交通量迅速增长,公路渠化等问题的加重,沥青路面损坏的比例越来越大^[1].高模量沥青混合料(High Modulus Asphalt Mixture)在我国主要通过向集料中直接掺加高模量改性剂制成,可以提高沥青混合料的综合性能,从而改善面层材料的高温抗变形能力和抗疲劳性能^[2].而在沥青混合料的综合性能评估时需要综合考虑抗车辙、抗水损害等众多因素,且由于不同地区气候差异较大,导致混合料在不同气候分区的适用性也不同.因此还要根据气候分区特点来考虑各因素权重,对沥青混合料综合性能进行综合评价^[3].

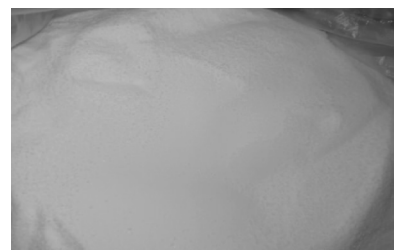
目前许多学者对高模量沥青混合料进行了试验研究.王琨等^[4-5]通过掺入添加剂的方式制成高模量沥青混合料,与普通沥青混合料进行对比试验,结果表明前者路用性能更为优异.陈剩^[6]采用DXG-2作为高模量剂,并通过劈裂强度、静态回弹模量等试验,发现沥青混合料的力学性能随着高模量剂掺量的增加而显著提高.路用性能试验可以对沥青混合料技术性能直观判断,但当需要综合考虑抗车辙、抗水损害等因素来衡量沥青混合料的综合性能时,需要依据路用性能试验结果,采用一定的评价体系来进行.美国T. L. Saaty教授^[7-8]提出了一种对定性问题进行定量分析的多准则决策方法—层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP).目前国内外学者对AHP进行研究并运用于工程领域^[9-15],但鲜有对不同气候分区条件下AHP应用的研究,对不同分区下沥青混合料性能缺乏评价体系.在进行路用性能试验研究之后,建立基于气候分区的综合性能评价体系对工程中材料选用具有重要意义.基于此,笔者对4种沥青混合料进行路用性能试

验,采用AHP法以高低温、抗水损害和力学性能为评价指标建立比较矩阵模型,结合不同气候分区各性能等级,提出不同气候分区下路用性能各因素权重分配的方法,最后结合试验结果评价沥青混合料的综合性能.

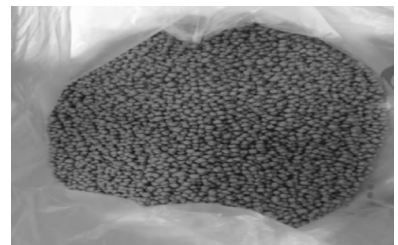
1 原材料与矿料级配

1.1 原材料

试验采用70#沥青,其针入度(25℃, 100 g, 5 s)为63.2,软化点为49.1,延度(5 cm/min, 15℃)为126,黏度(177℃)为4.1,粗集料采用玄武岩.两种高模量剂分别是Honeywell7686(简称H7686)和路宝(见图1).H7686是一种分子量相对较低的白色粉状复合材料,可溶于沥青,具有抗车辙、抗水损害,温拌工艺施工等特点.路宝是一种高密度聚乙烯材料,具有良好的化学稳定性和相对较高的分子质量,无味、无毒,其原理是对沥青进行改性,以提高混合料的路用性能.



(a) Honeywell7686



(b) 路宝

图1 高模量改性剂

Fig. 1 High modulus modifiers

1.2 矿料级配

笔者采用级配类型为 AC-20,采用马歇尔设计方法得到 H7686、路宝、基质沥青及 SBS 沥青混合料的最佳油石比分别为 4.6%、4.5%、4.4% 和 4.4%。H7686 及路宝的掺量根据厂家推荐最佳掺量:分别占沥青混合料总质量的 0.4% 和 0.5%。

2 不同沥青混合料路用性能试验

2.1 车辙试验

沥青路面抗车辙性能可以由动稳定度(DS)所表征,其值越大表明路面高温抗车辙性能越好^[16]。采用车辙试验仪进行标准车辙试验。试件尺寸 300 mm × 300 mm × 50 mm,试验参照文献 [17] 进行。试验过程中车辙变形随时间的变化曲线如图 2 所示。

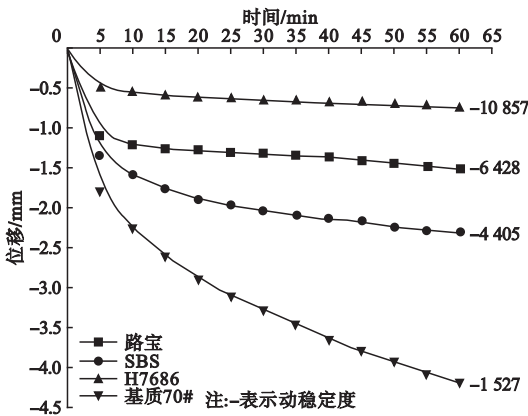


图 2 高温车辙试验

Fig. 2 The rutting test at high temperature

由图 2 可以看出, H7686 和路宝两种高模量沥青混合料高温性能明显优于普通沥青混合料,其动稳定度与基质沥青相比分别提高了 7 倍和 4 倍,且掺加 H7686 沥青混合料高温表现优于掺加路宝;两者相比于 SBS 沥青混合料,分别提高了 2.5 及 1.5 倍。表明高模量剂的添加可以显著提高沥青混合料的高温抗变形能力。

2.2 低温弯曲试验

为验证高模量沥青混合料的低温性能,

对 4 种不同混合料进行低温弯曲试验。试件采用车辙板切割成 250 mm × 30 mm × 35 mm 的小梁试件,小梁跨度为 200 mm,弯曲试验温度 -10 ℃,低温弯曲破坏应变结果如图 3 所示。

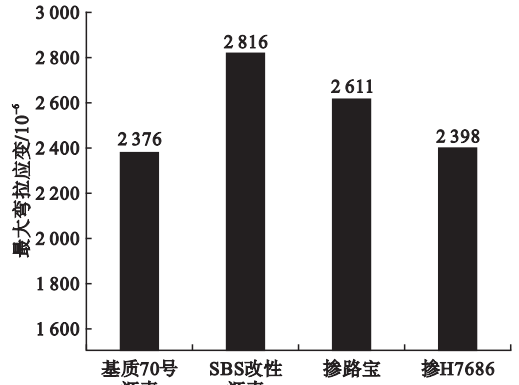


图 3 低温弯曲试验结果

Fig. 3 Bending test results at low temperature

从图 3 可以看出,若从最大弯拉应变指标进行分析, SBS 改性沥青混合料低温性能最优,其次为路宝,基质沥青和掺 H7686 沥青混合料表现相近,两种外掺剂混合料低温性能均不如 SBS 沥青混合料。

2.3 水稳定性试验

为评价不同混合料的抗水损害能力,笔者采用稳定度仪等设备分别进行了浸水马歇尔和冻融劈裂试验,试验参照文献 [17] 进行,得到的残留稳定度及冻融劈裂强度结果如图 4 所示。

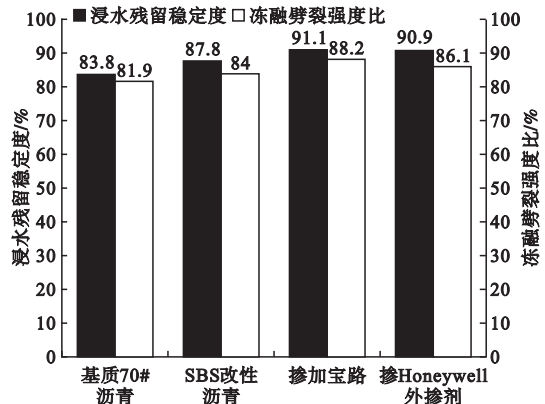


图 4 水稳定性结果对比

Fig. 4 Comparison of water stability results

从图4可以看出,两种高模量沥青混合料残留稳定度、冻融劈裂强度比(TSR)最高,其次是SBS沥青混合料。说明高模量改性剂对沥青路面抗水损害能力有一定提高,同时能兼顾较好的抗车辙能力,对南方高温多雨地区建议推广使用。

2.4 不同沥青混合料的直接压缩试验

为研究劲度模量随温度变化规律和高模量剂的掺入对沥青混合料模量的影响,采用万能材料试验机对4种沥青混合料进行直接压缩试验,试验温度分别为5℃、15℃、20℃、30℃、45℃及60℃,加载速率50 mm/min,试件尺寸为80 mm×40 mm×40 mm,试件在保温箱内养护4 h以上保证试件达到预期的温度。

根据试验规程,首先计算得到沥青混合料的抗压强度,再依据抗压强度及荷载-变形曲线直线阶段变形量计算出沥青混合料劲度模量,计算结果见表1。

表1 试验结果
Table 1 Test results

试验温度/℃	劲度模量/MPa			
	基质沥青混合料	SBS 沥青混合料	掺路宝混合料	掺 H7686 混合料
5	1 366	1 402	2 632	2 470
15	1 016	1 192	2 148	2 006
20	838	994	1 872	1 826
30	474	498	796	846
45	92	134	284	378
60	68	96	132	186

表2 比较矩阵模型

Table 2 Model of the comparative matrix

指标	高温性能	低温性能	抗水损害性能	感温性能
高温性能	1	高温/低温重要程度	高温/抗水损害重要程度	高温/感温重要程度
低温性能	—	1	低温/抗水损害重要程度	低温/感温重要程度
抗水损害性能	—	—	1	抗水损害/感温重要程度
感温性能	—	—	—	1

因素间对于某一因素的重要程度。笔者参照文献[19],采用5/5-9/1标度建立的判断

由表1可以看出,沥青混合料的温度敏感性很强,这主要因为随着温度升高,沥青混合料开始从弹性向黏性转化,使得混合料模量降低,抗变形能力减弱。高模量沥青混合料在各温度下模量均高于其他沥青混合料,且掺H7686相比掺路宝沥青混合料的高温性能更优异。

3 沥青混合料综合性能评价

3.1 比较矩阵法

层次分析法中比较矩阵法可以确定各指标的权重系数^[18]。其核心思路:通过指标之间相对重要程度来建立比较矩阵,在比较矩阵基础上求得特征向量即可作为权重系数。笔者选择的评价要素为高、低温性能、抗水损害性能和感温性能;根据不同气候分区的不同性能等级确定彼此指标的相对重要程度,从而确定相应评价要素的权重。运用AHP处理问题步骤如下:

(1) 建立结构层次模型

将模型中各目标、各因素按彼此关系绘出模型图。确定评价指标总体 $U: U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$,笔者采用4个指标,即高温性能、低温性能、抗水损害性能和感温性能,故 $n = 4$ 。以高温性能为基准,相比于其他性能的重要程度为元素构建矩阵模型如表2所示。

(2) 确定矩阵标度

比较第 i 个元素相对于第 j 个因素的重要性时,使用数量化的相对权重 a_{ij} 来描述各

矩阵偏差最小,更符合客观实际。笔者根据高温、低温等指标的等级差距来定义,采用改进

的5/5-9/1标度来赋予相对重要程度系数,具体系数见表3.

表3 改进的比较矩阵标度

Table 3 Improved scale of the comparison matrix

相对重要性	重要程度说明	元素 <i>i</i> 高出元素 <i>j</i> 等级
5/5 = 1.00	同等重要	0级
6/4 = 1.50	略重要	1级
7/3 = 2.33	较重要	2级
8/2 = 4.00	非常重要	3级
9/1 = 9.00	绝对重要	4级
5.5/4.5, 6.5/3.5, 7.5/2.5, 8.5/1.5	需要折中时采用	—

(3) 构造比较矩阵

对于比较矩阵的标度赋值,采用两两相互比较的方式进行.两个指标的重要程度比值均需采用一个基准性能作为参照,笔者采取高温性能作为基准指标进行其他系数的推算,自身性能重要程度相同,即 $r_{i,i} = 1$.例如第二行的 $r_{2,3}$,则需要 $r_{1,3}/r_{1,2}$,即可得到低温相对于抗水损害的重要程度系数,另一半矩阵根据 $r_{i,j} = 1/r_{j,i}$ 即可得出建立的比较矩阵模型如下所示:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

3.2 气候分区的选取

在我国沥青路面气候分区图上由南向北,选取了6个分区作为案例,根据气候分区确定各指标等级.其中温差等级是对不同分区按温差范围进行划分,分别为大温差区、中温差区和小温差区,分别对应1级、2级和3级.各气候分区气候指标等级汇总见表4.

3.3 比较矩阵法计算权重系数

根据上述各气候分区各项性能等级差距,采用5/5-9/1标度,依照3.1节中的赋值方法对6个分区分别建立比较矩阵:

表4 各气候分区性能指标等级

Table 4 Performance indicators levels of different climate zones

气候分区	高温等级	低温等级	降水量等级	温差等级
1-2-4	1	2	4	1
1-3-2	1	3	2	2
1-4-1	1	4	1	3
1-4-2	1	4	2	3
2-1-3	2	1	3	1
2-2-2	2	2	2	2

$$R_{1-2-4} = \begin{bmatrix} 1 & 1.5 & 4 & 1 \\ 1.5 & 1 & 1.55 & 0.667 \\ 0.25 & 0.645 & 1 & 0.429 \\ 1 & 1.5 & 2.33 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{1-3-2} = \begin{bmatrix} 1 & 2.33 & 1.5 & 1.5 \\ 0.429 & 1 & 0.644 & 0.644 \\ 0.667 & 1.553 & 1 & 1 \\ 0.667 & 1.553 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{1-4-1} = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & 2.33 \\ 0.25 & 1 & 0.25 & 0.5825 \\ 1 & 4 & 1 & 2.33 \\ 0.429 & 1.717 & 0.429 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{1-4-2} = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1.5 & 2.33 \\ 0.25 & 1 & 0.375 & 0.5825 \\ 0.667 & 2.667 & 1 & 1.553 \\ 0.429 & 1.717 & 0.644 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{2-1-3} = \begin{bmatrix} 1 & 0.667 & 1.5 & 0.667 \\ 1.5 & 1 & 2.25 & 1 \\ 0.667 & 0.444 & 1 & 0.444 \\ 1.5 & 1 & 2.25 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{2-2-2} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

求解出上述矩阵的特征向量和最大特征值后,进行归一化得到:

$$\omega_{1-2-4} = (0.336, 0.259, 0.112, 0.292)^T, \lambda_{\max} = 4.3650.$$

$$\omega_{1-3-2} = (0.362, 0.155, 0.241,$$

$$0.241)^T, \lambda_{\max} = 4.000\ 2.$$

$$\omega_{1-4-1} = (0.373, 0.093, 0.373,$$

$$0.160)^T, \lambda_{\max} = 4.000\ 4.$$

$$\omega_{1-4-2} = (0.426, 0.107, 0.284,$$

$$0.183)^T, \lambda_{\max} = 4.000\ 1.$$

$$\omega_{2-1-3} = (0.214, 0.322, 0.143,$$

$$0.321)^T, \lambda_{\max} = 4.000\ 0.$$

$$\omega_{2-2-2} = (0.250, 0.250, 0.250,$$

$$0.250)^T, \lambda_{\max} = 4.000\ 0.$$

由此可以得出不同气候分区内沥青混合料各项性能权重推荐值,结果见表5.

表5 不同气候分区内推荐权重系数

Table 5 Recommended weight coefficients of different climate zones

气候分区	高温性能权重	低温性能权重	抗水损害权重	感温性能权重
1-2-4	0.336	0.259	0.112	0.292
1-3-2	0.362	0.155	0.241	0.241
1-4-1	0.373	0.093	0.373	0.160
1-4-2	0.426	0.107	0.284	0.183
2-1-3	0.214	0.322	0.143	0.321
2-2-2	0.250	0.250	0.250	0.250

根据上述方法得到的权重系数分配表,可以综合考虑沥青混合料各项技术指标在不同气候分区下的重要性程度,客观地分配各技术指标权重系数.

3.4 各项性能指标的评分依据

设立评分依据是将各指标分为优、良、中和及格共四等,分别取值9、8、7和6.笔者在

表7 四种沥青混合料各项指标评分

Table 7 Indicator scores of four kinds of asphalt mixtures

材料	动稳定度评分	低温应变评分	残留稳定度评分	劈裂强度比评分	模量变化率评分
基质沥青混合料	6	7	7	7	6
SBS 沥青混合料	7	8	8	7	6
掺路宝混合料	8	8	9	8	7
掺 H7686 混合料	9	7	9	8	8

3.5 沥青混合料综合性能评价

根据上述各项指标的评分依据得出评分

文献[20]的最低技术要求基础上,采用一定间距划分,自拟了每个指标等级划分的相邻段间距.高温性能对应动稳定度指标,低温性能对应最大破坏应变,抗水损害性能对应残留稳定度和劈裂强度比.

由直接压缩试验结果可以看出,温度是影响混合料力学性能的重要因素.因此在对感温性能划分评分标准时,以15℃和20℃下劲度模量这两个路面结构设计参数的变化率作为指标.模量变化率越低,沥青混合料对温度的敏感性越低,抵抗温差能力更强.水稳定性两个评价指标采用相同评分依据.模量变化率 ν 计算式为

$$\nu = \frac{E_{15} - E_{20}}{E_{15}} \quad (8)$$

式中: E_{15} 、 E_{20} 分别为15℃、20℃的劲度模量值.

各项指标评分依据见表6.

表6 各项指标评分依据

Table 6 The score basis of each index

DS/(次·mm ⁻¹)	弯曲破坏应变/10 ⁻⁶	残留稳定性和劈裂强度比/%	ν /%	评分
<600	<2 000	<75	>20	0
600~2 800	2 000~2 200	75~80	15~20	6
2 800~5 000	2 200~2 400	80~85	10~15	7
5 000~7 200	2 400~2 600	85~90	5~10	8
>7 200	>2 600	>90	<5	9

依据试验结果及表6所示评分依据,对沥青混合料性能进行评分,结果见表7.

结果,结合不同气候分区下对应指标的权重系数,可以计算沥青混合料综合性能评分.设

S 为综合性能评分,计算式为

$$S_{i-j-k} = A\omega_A + B\omega_B + C\omega_C + D\omega_D + E\omega_E \quad (9)$$

式中: A 为动稳定度评分; B 为低温弯曲应变评分; C 为残留稳定度评分; D 为劈裂强度比评分; E 为模量变化率 ν 评分; $\omega_A \sim \omega_E$ 为各项对应指标的权重系数,由于抗水损害性能

采用双指标(残留稳定度和 TSR),故 ω_C 和 ω_D 各占抗水损害性能权重的一半。

按照综合性能评分计算公式,计算不同沥青混合料在各气候分区下综合得分,并给出各分区推荐材料,评价结果见表 8。

表 8 沥青混合料在不同气候分区的评分及综合性能排序

Table 8 The scores and rankings of asphalt mixtures under different climate zones

气候分区	不同气候分区下沥青混合料综合性能评分				推荐材料
	基质沥青混合料	SBS 沥青混合料	掺路宝混合料	掺 H7686 混合料	
1-2-4	6.37	5.40	8.02	8.13	H7686
1-3-2	6.39	5.77	8.03	8.32	H7686
1-4-1	6.46	7.11	8.11	8.46	H7686
1-4-2	6.39	7.07	8.07	8.46	H7686
2-1-3	6.47	7.07	8.07	7.96	路宝
2-2-2	6.50	7.13	8.13	8.13	路宝/H7686

通过进行综合评分,可以得出结论:1-2-4、1-3-2、1-4-1、1-4-2 及 2-2-2 分区建议采用 H7686 沥青混合料,2-1-3 及 2-2-2 分区建议采用路宝沥青混合料。高模量沥青混合料综合排名更高。

4 结 论

(1) 高模量剂对沥青混合料的抗车辙性能明显改善,并且可以提高沥青混合料的劲度模量,但其低温性能仍不够理想。

(2) 采用所建立的比较矩阵模型,可以对各气候分区下路用性能指标进行权重系数分配,为沥青混合料的综合性能评价提出了一种科学合理的方法。

(3) 笔者选取部分气候分区作为案例对沥青混合料综合性能进行评价,此评价体系也可以应用于其他气候分区,并基于实际工程对沥青混合料进行优选。

参考文献

[1] HAJJ E Y, SEBAALY P E, SATHANATHAN T, et al. Impact of antistripping additives on pavement performance using mechanistic-empirical pavement design guide [J]. Journal of materi-

als in civil engineering, 2013, 25 (3): 308 - 317.
 [2] 田卫群,周彬,丛菱,等. 改性沥青混合料高温性能及其评价方法[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(3): 285 - 287.
 (TIAN Weiqun, ZHOU Bin, CONG Ling, et al. High-temperature performance of modified asphalt mixture and its evaluation method [J]. Journal of building materials, 2009, 12 (3): 285 - 287.)
 [3] 段周洋. 沥青性能综合分析与优选方法研究[D]. 西安:长安大学, 2015.
 (DUAN Zhouyang. Comprehensive analysis and optimization method of asphalt performance [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.)
 [4] 王琨,郝培文. 高模量沥青及其混合料路用性能研究[J]. 公路工程, 2015, 40(3): 5 - 8.
 (WANG Kun, HAO Peiwen. Research on road performance of high modulus asphalt and its mixture [J]. Highway engineering, 2015, 40 (3): 5 - 8.)
 [5] 施晓强,陈先华,杨军. 高模量沥青混合料的路用性能评价[J]. 公路工程, 2014 (6): 175 - 179.
 (SHI Xiaoqiang, CHEN Xianhua, YANG Jun. Evaluation of road performance of high modulus asphalt mixture [J]. Highway engineering, 2014(6): 175 - 179.)
 [6] 陈剩. 高模量沥青混合料的力学性能分析[J]. 西部交通科技, 2016(8): 6 - 9.
 (CHEN Sheng. Analysis of mechanical properties of high modulus asphalt mixture [J]. Western communications technology, 2016 (8): 6 - 9.)

- [7] SAATY T L, VARGAS L G. Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process [J]. *International*, 2012, 7(2): 159 - 172.
- [8] SAATY T L, SHANG J S. An innovative orders-of-magnitude approach to AHP-based multi-criteria decision making: prioritizing divergent intangible humane acts [J]. *European journal of operational research*, 2011, 214(3): 703 - 715.
- [9] 柳明亮, 石振武, 王黎明, 等. 基于层次分析与模糊评价理论的温拌沥青混合料综合性能评价 [J]. *中外公路*, 2015, 35(5): 246 - 250. (LIU Mingliang, SHI Zhenwu, WANG Liming, et al. Comprehensive performance evaluation of warm mix asphalt mixture based on analytic hierarchy process and fuzzy evaluation theory [J]. *China foreign highway*, 2015, 35(5): 246 - 250.)
- [10] 张敏江, 张文博, 于保阳. 基于层次分析法的沥青路面冷再生技术后评价指标权重分析 [J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2012, 28(4): 634 - 639. (ZHANG Minjiang, ZHANG Wenbo, YU Baoyang. Analytic hierarchy analysis based weight analysis of post-assessment index of asphalt pavement cold recycling technology [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university(natural science)*, 2012, 28(4): 634 - 639.)
- [11] 和世明. 基于比较矩阵法的沥青混合料路用性能权重研究 [J]. *路基工程*, 2012(1): 18 - 20. (HE Shiming. Study on road usage performance weight of asphalt mixture based on comparison matrix method [J]. *Subgrade engineering*, 2012(1): 18 - 20.)
- [12] OU Y W, YU G F, ZHU F F. Research on anti-rutting performance of high modulus asphalt concrete pavement [J]. *Journal of highway & transportation research & development*, 2011, 167(2): 4474 - 4477.
- [13] HADI V A, NIAZI M M. An improved voting analytic hierarchy process data envelopment analysis methodology for suppliers selection [J]. *International journal of computer integrated manufacturing*, 2011, 24(3): 189 - 197.
- [14] HERATH G. Incorporating community objectives in improved wetland management: the use of the analytic hierarchy process [J]. *Journal of environmental management*, 2004, 70(3): 263 - 273.
- [15] 李道西, 王一博. 基于改进层次分析法的节水灌溉模式优选 [J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(3): 23 - 26. (LI Daoxi, WANG Yibo. Water-saving irrigation model optimization based on improved analytic hierarchy process [J]. *Journal of north China university of water resources and hydro-power(natural science)*, 2016, 37(3): 23 - 26.)
- [16] 王刚, 刘黎萍, 孙立军. 高模量沥青混凝土抗变形性能研究 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(2): 217 - 222. (WANG Gang, LIU Liping, SUN Lijun. Study on the deformation resistance of high modulus asphalt concrete [J]. *Journal of tongji university(natural science)*, 2012, 40(2): 217 - 222.)
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2011.)
- [18] VEISI H, LIAGHATI H, ALIPOUR A. Developing an ethics-based approach to indicators of sustainable agriculture using analytic hierarchy process (AHP) [J]. *Ecological indicators*, 2016, 60: 644 - 654.
- [19] 郭亚军, 张发明, 易平涛. 标度选择对综合评价结果的影响及合理性分析 [J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(7): 1277 - 1280. (GUO Yajun, ZHANG Faming, YI Pingtao. Impact of scale selection on comprehensive evaluation results and rationality analysis [J]. *Systems engineering and electronics*, 2008, 30(7): 1277 - 1280.)
- [20] 交通部公路科学研究所. 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, 2005. (Institute of Highway Science, Ministry of Communications. Technical specification for construction of highway asphalt pavement: JTG F40—2004 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2005.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)