

# 透水沥青混合料老化特性分析

于保阳<sup>1,2</sup>, 孙宗光<sup>1</sup>, 齐琳<sup>3</sup>

(1. 大连海事大学交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026; 2. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168;  
3. 沈阳城市建设学院土木工程系, 辽宁 沈阳 110167)

**摘要** 目的 研究透水沥青混合料(OGFC)老化后的路用性能,比较透水沥青混合料在不同空隙率及不同老化程度下的性能差异并对其老化性能进行预测。方法 以不同时长对空隙率为19%、21%、24%的透水沥青混合料进行老化,进行高、低温及水稳定性性能试验,得到其路用性能的变化规律;扫描电镜获取混合料界面的微观形貌进行宏观试验验证;基于灰色模型,以灰色-马尔科夫模型对老化后的混合料路用性能进行预测。结果 随老化时间的增加,高温稳定性提高,低温稳定性及水稳定性出现不同程度下降;沥青膜的剥落面积随老化时间的增加逐渐增大;灰色-马尔科夫模型可以用于混合料的老化预测;随老化时间的增加,路用性能随之下降,空隙率19%的透水沥青混合料抗老化性能最优。结论 扫描电镜获取的微观形貌图像与路用性能试验较符合,灰色-马尔科夫模型提高了预测精度。

**关键词** 透水沥青混合料;路用性能;老化特性;微观形貌;灰色-马尔科夫模型

中图分类号 TU502;U414 文献标志码 A

## Aging Characteristics of Permeable Asphalt Mixture

YU Baoyang<sup>1,2</sup>, SUN Zongguang<sup>1</sup>, QI Lin<sup>3</sup>

(1. College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, China, 116026; 2. School of Traffic Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. Department of Civil Engineering, Shenyang Urban Construction Institute, Shenyang, China, 110167)

**Abstract:** In this paper the road performance of permeable asphalt concrete (OGFC) after aging and its anti-aging performance with different porosity were studied, and its aging performance is predicted too. First, the permeable asphalt mixtures with porosities of 19%, 21%, and 24% were aged through different aging time. Then, tests of high temperature, low temperature and water stability were carried out to obtain the change law of road performance. Results of the macro experiment were verified by the micro morphology of the mixture interface with the help of scanning electron microscope. Finally, based on the gray model, the road performance after aging

收稿日期:2020-11-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51908378);辽宁省教育厅一般项目(lnjc202014)

作者简介:于保阳(1980—),男,博士研究生,主要从事道路材料方面研究。

was predicted by the gray-Markov model. As the aging time increases, the high temperature stability improves, the low temperature stability and water stability decrease, and the road performance decreases too, the peeling area of the asphalt film gradually increases. Anti-aging performance of permeable asphalt concrete with porosity of 19% is best. The micro-topography image obtained by the scanning electron microscope is more consistent with the road performance test. Gray-Markov model improved prediction accuracy. So the Gray-Markov model can be used to predict the aging of the mixture.

**Key words:** permeable asphalt mixture; road performance; aging properties; micro morphology; Gray-Markov model

透水沥青混合料与普通密级配沥青混合料相比,具有改善路面排水、有效降低路表积水引起的水雾以及降低噪声等诸多优势<sup>[1-2]</sup>。透水沥青混合料因空隙大,易产生老化,致使沥青变脆,在行车荷载和冰胀力作用下发生松散、剥落等路面病害,进一步引起其耐久性衰变<sup>[3]</sup>。另外,若空隙率偏小,会直接妨碍路面排水。因此,选择合适空隙率减轻透水沥青混合料的老化问题显得尤为重要。目前很多学者从高黏改性沥青和掺加聚脂纤维角度出发探究透水沥青混合料的老化特性。赵少宗<sup>[4]</sup>以新型 TPS、SBS、日本 TPS 进行沥青改性,并通过对比分析证明了新型 TPS 提升沥青抗老化性能与混合料耐久性的高效性。马翔等<sup>[5]</sup>以 SBS 改性沥青、高黏沥青以及掺入聚酯纤维的改性沥青制备混合料,并对比研究热老化对透水沥青混合料的影响。通过高黏剂、聚酯纤维进行沥青改性均能实现一定程度的抗老化,且对水稳定性能进一步改善。

透水沥青路面除了可靠的结构设计外,还应为路面的及时养护实现其耐久性变化规律的预测,以期延长路面使用寿命<sup>[6]</sup>。目前路面性能预测方法主要有神经网络法、贝叶斯方法、灰色理论法、马尔科夫模型等<sup>[7-9]</sup>。基于此,笔者考虑其大空隙率特点,以不同老化时长进行透水沥青混合料的路用性能研究,对预测模型进行适用性研究后,建立基于灰色-马尔科夫预测模型,预测经过老化作用后透水沥青混合料的路用性能。

## 1 透水沥青混合料原材料及配合比设计

### 1.1 原材料

由于透水沥青路面与紫外线、氧、水等环境因素的直接接触,同时受到车辆荷载作用使得沥青结合料与集料的粘结力削弱,加快了松散和剥落等一系列问题的发生,最终导致路面发生损坏。粗集料的吸水率对透水沥青混合料的低温、水稳定性的影响很大<sup>[10]</sup>。因此在选用粗集料时,在其他指标满足要求的前提下,应当着重考虑含水率指标。粗集料选用石灰岩,含水率为 0.93%。细集料的种类包括机制砂、天然砂和石屑。天然砂表面粗糙度小与沥青的粘附性弱。石屑中粉尘含量过高,扁平状含量较大,不易于施工压实。机制砂表面粗糙且质地坚硬,同时沥青与石料的粘附性好坏和石料的酸碱碱性有关<sup>[11-13]</sup>,因此细集料选用碱性的机制砂。基质沥青选用辽河 90# 沥青。改性剂为国产 OLB-1 型高黏改性剂,形态外观为淡黄色半透明球状颗粒,改性剂的加入对基质沥青具有加筋、增粘、抗老化等多重改良效果,用外掺法选取改性剂掺量为 12%。测试高黏沥青各项指标均符合要求。

### 1.2 混合料配合比设计

为了得到具有较佳排水功能并拥有良好性能的矿料级配,参考安徽省六潜高速公路选用的 OGFC-13 级配<sup>[13]</sup>,确定所用级配如图 1 所示。以此级配结合 3 种油石比 4.5%、5.1%、5.7% 成型试样,并测量试样空隙率依次为 19%、21%、24%。

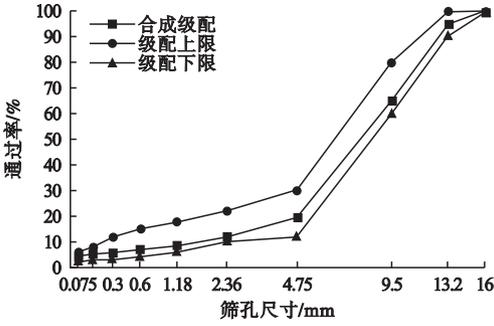


图1 透水沥青混合料(OGFC-13)级配

Fig. 1 The permeable asphalt mixture gradation (OGFC-13)

## 2 不同老化时长下透水沥青混合料的路用性能

通过结合密级配沥青混合料老化的研究,对透水沥青混合料老化试验的老化时间、温度做出调整。将混合料均匀摊铺在搪瓷盘上,摊铺量为  $21 \sim 22 \text{ kg/m}^2$ ,老化温度为  $165 \text{ }^\circ\text{C}$ ,老化时长采用 2、4、6、8、10 h。以此方案探究不同空隙率的混合料随老化时间增加所引起的路用性能变化。

### 2.1 高温稳定性

根据笔者提出的老化实现方法,对 19%、21%、24% 不同空隙率透水沥青混合料进行老化,并进行车辙试验,以动稳定度为评价指标,试验结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,前 6 h 老化后的透水沥青混合料动稳定度有明显增加,6 ~ 10h 的动稳定度有进

一步的增加。空隙率为 24% 的透水沥青混合料的增加幅度最大,空隙率为 19% 的增加幅度最小,空隙率透水沥青混合料老化后的高温稳定性由大到小排序为 24%、21%、19%。

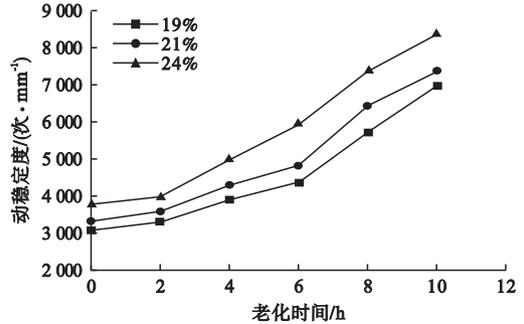


图2 动稳定度随老化时间的变化规律

Fig. 2 Variation of dynamic stability with aging time

### 2.2 低温稳定性

对空隙率为 19%、21%、24% 老化后的透水沥青混合料,进行小梁低温弯曲试验,评价透水沥青混合料的低温抗变形能力。试验结果如图 3 所示。分析图 3 可知,透水沥青混合料经过不同老化时间后,透水沥青混合料的抗弯拉强度和最大弯拉应变随老化时间的延长呈递减趋势。空隙率 24% 试样的低温性能随老化时间无显著变化。而空隙率 19% 试样随老化时间增加,低温性能显著下降。表明空隙率 19% 的试样具有较佳的抗老化能力。透水沥青混合料老化后的低温稳定性由大到小排序为:19%、21%、24%。

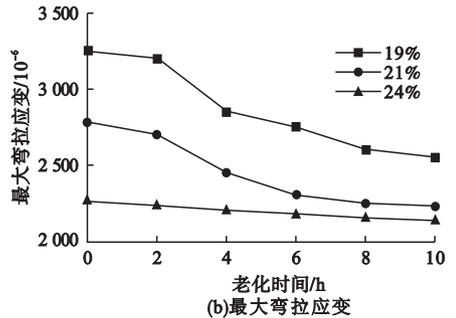
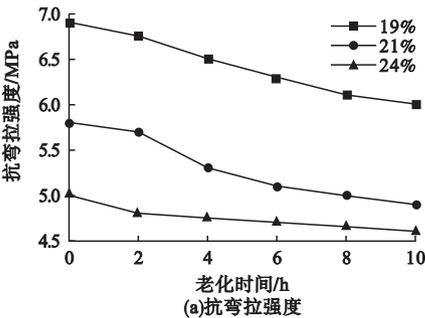
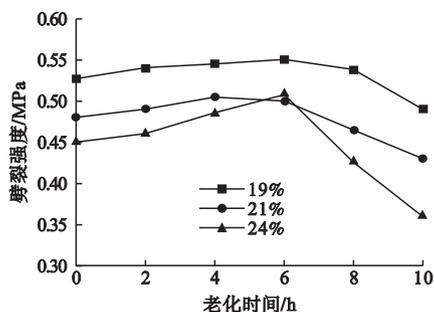


图3 低温性能指标变化规律

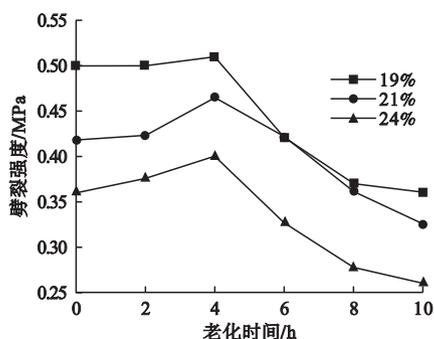
Fig. 3 Variation of low temperature stability with aging time

## 2.3 水稳定性

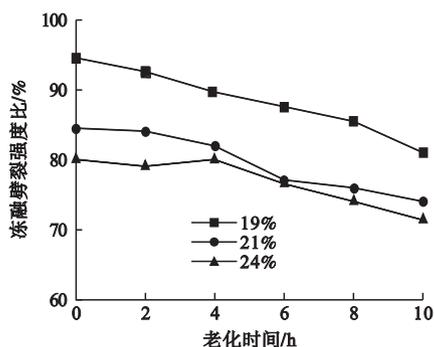
基于冻融劈裂试验研究透水沥青混合料在老化后的水稳定性性能变化规律,结果如图4所示。



(a)未冻融劈裂强度随老化时间的变化规律



(b)经冻融劈裂强度随老化时间的变化规律



(c)冻融劈裂比随老化时间的变化规律

图4 水稳定性随老化时间的变化规律

Fig. 4 Variation of water stability with aging time

分析图4(a)可知,未冻融的试样在老化过程中前6 h,透水沥青混合料随老化时间增加,其劈裂强度不断增加,在6 h之后出现大幅度下降。分析图4(b)可知,冻融的试样在老化过程中前4 h,透水沥青混合料随老化时间增加,其劈裂强度不断增加,而4 h后发生显著下降。通过观察发现,空隙率24%的试

样由于长时间老化,局部发生松散破坏。通过图4(a)、图4(b)对比分析发现,长时间老化后会使混合料的水稳定性性能下降。分析图4(c)可知,空隙率为19%、21%、24%的试样初始冻融劈裂比依次为93.9%、84.1%、79.9%。不同空隙率的试样由于时长的增加呈现出不同的状态。尤为突出的是,时长增至10 h时,空隙率19%的试样冻融劈裂强度比下降了14.9%。其水稳定性性能显著性下降主要是因为沥青含量较高,且持续老化。另外,此时空隙率为19%的冻融劈裂比大于其他空隙率。综上所述,透水沥青混合料老化后水稳定性性能由大到小排序为:19%、21%、24%。

## 3 不同老化时长的透水沥青混合料的微观形貌分析

对经过不同老化时长的试样用夹具取出其内部直径约为0.3~0.5 cm的试样。以便结构面的观测,需对试样喷射金粉。图5为喷金处理后的试样。



图5 喷金处理后的试样

Fig. 5 Specimens after golden spraying process

不同老化时长的试样放大500倍的SEM图像如图6~图8所示。通过SEM电镜放大500倍后所得的图6~图8可观察到,初始时的沥青膜较为光滑。集料与集料界面处的沥青膜随老化时长的增加变得更为粗糙,颜色变深。该现象是由于老化作用减少了沥青中饱和酚、芳香分含量,沥青质增加,导致界面处外露沥青变脆硬且易剥落,在光滑的沥青膜表面形成深浅不一的坑穴。

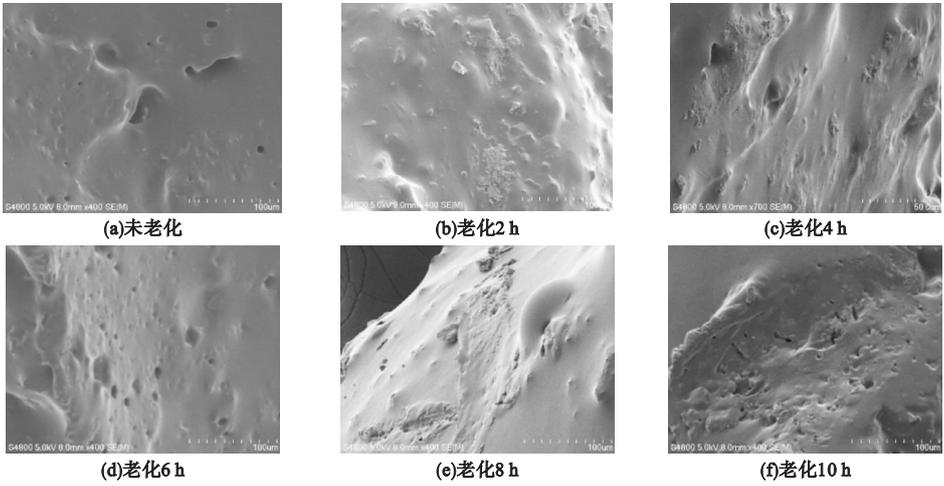


图6 空隙率19%的试样对应不同老化时长的微观形貌图

Fig. 6 Microscopic morphology of permeable asphalt mixture with a porosity of 19% after different aging time

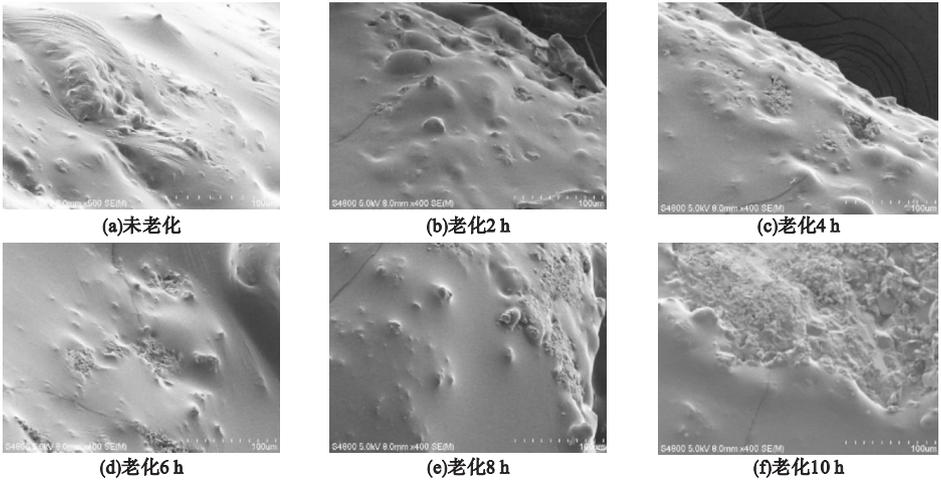


图7 空隙率21%的试样对应不同老化时长的微观形貌图

Fig. 7 Microscopic morphology of permeable asphalt mixture with a porosity of 21% after different aging time

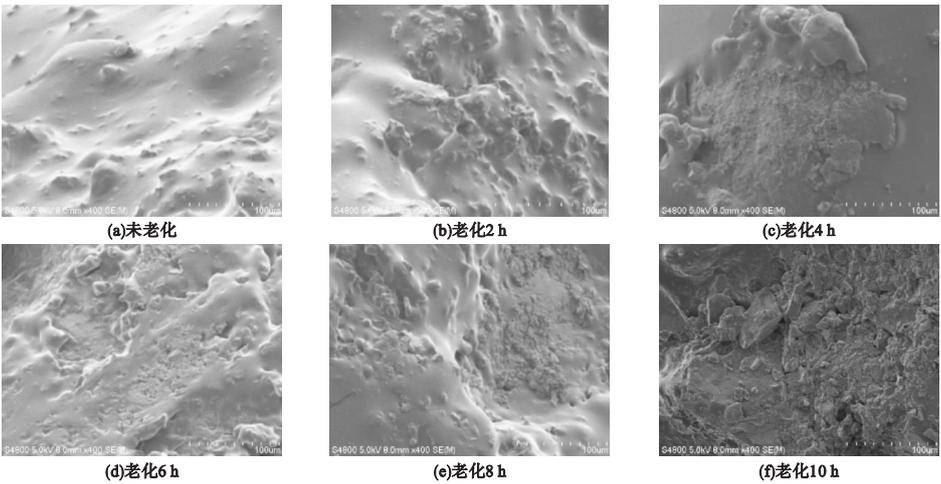


图8 空隙率24%的试样对应不同老化时长的微观形貌图

Fig. 8 Microscopic morphology of permeable asphalt mixture with a porosity of 24% after different aging time

运用图像分析软件 Image J 对 SEM 图像处理,提取剥落面积进行定量分析。沥青膜剥落面积比例为沥青膜剥落面积除 SEM 图像总面积,计算结果如图 9 所示。

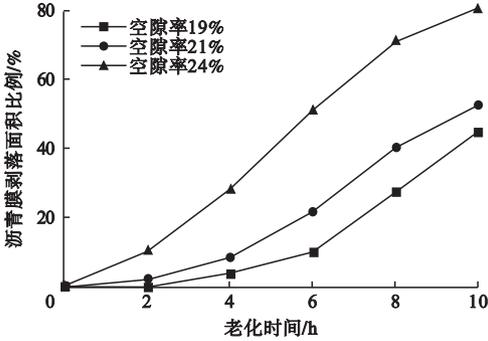


图9 沥青膜剥落面积随老化时间变化规律

Fig. 9 Variation of spalling area of asphalt film with aging time

从图 9 可以看出,自始至终,空隙率为 24% 的试样沥青膜剥落面积比例随老化时间迅速上升。该现象的出现主要是因为未老化时,与其他空隙率试样相比空隙率 24% 试样的沥青膜较薄,在老化作用下更易剥落,致使集料凸显,且随老化时长的增加而发生大面积剥落。与空隙率 21%、24% 的试样相比,空隙率 19% 的试样沥青膜较厚。观察整个老化过程,沥青膜形貌变化程度较小,表明沥青膜厚度对混合料抗老化性能有重要影响,抗老化性能随沥青膜变薄而变差。

## 4 老化作用下透水沥青混合料路用性能的衰变规律

灰色-马尔科夫模型兼具灰色模型与马尔科夫模型的优势,因此以灰色-马尔科夫模型进行性能预测研究。先以试验数据构建灰色模型,并拟合出方程。然后通过残差相对值对耐久性能状态进行合理划分,并构建状态转移矩阵。最后,验证状态是否满足马氏性检验,若满足,修正灰色模型的预测值。

### 4.1 灰色-马尔科夫模型预测

综合考虑经过老化作用后透水沥青混合料路用性能的平衡,选用抗老化效果较强的空隙率为 19% 试样进行模型预测研究。首

先基于其路用性能指标构造灰色模型,以 0、2、4、6、8 h 以上 5 个老化时长的冻融劈裂比构造  $GM(1,1)$  模型,并以此模型对试验数据扩充。以累计试验数据进行马尔科夫模型的建立,并通过修正灰色模型的预测值提高预测精度。

#### (1) 构造原始数据数列

$$X_{(i)} = (94.3, 92.4, 90.31, 87.63, 83.31). \quad (19)$$

#### (2) 累加处理后数据序列

$$Y_{(k)} = (94.3, 186.7, 277.01, 364.64, 447.95). \quad (20)$$

#### (3) 构造数据向量 $Y$ 和数据矩阵 $B$

$$Y = (92.4, 90.31, 87.63, 83.31). \quad (21)$$

$$B^T =$$

$$\begin{bmatrix} -140.5 & -231.855 & -320.825 & -406.295 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

#### (4) 基于 MATLAB 计算待定系数 $a =$

$$0.0309, b = 97.0929.$$

进而得到冻融劈裂强度比灰色预测方程:

$$Y_{(k+1)} = \left( 94.3 - \frac{97.0929}{0.0309} \right) e^{0.0309t} + \frac{97.0929}{0.0309}. \quad (23)$$

(5) 不同老化时长对应残差相对值所处状态如表 1 所示。

表 1 不同老化时长对应残差相对值所处状态

Table 1 Status of residual relative values with different aging time

老化时长/h	$GM(1,1)$ 值/%		$q(k)/\%$	$\varepsilon(k)/\%$	状态
	实测值	预测值			
0	93.9	93.9	0	0	$E_2$
2	92.31	93.57	-1.24	-1.33	$E_1$
2.5	92.85	92.13	-0.05	-0.06	$E_2$
3	92.06	91.72	0.65	0.69	$E_3$
3.5	91.87	90.76	1.25	1.35	$E_3$
4	89.19	88.65	0.36	0.4	$E_2$
6	86.59	85.97	0.46	0.53	$E_3$
6.5	86.06	85.62	-0.43	-0.49	$E_2$
7	84.51	84.91	-0.42	-0.51	$E_1$
7.5	83.27	83.98	-0.88	-1.12	$E_1$
8	82.29	83.47	-1.21	-1.43	$E_1$

通过 GM(1,1) 模型求解预测值  $\hat{X}_{(k)}$ , 以此进一步求解相应残差以及残差相对值。根据所求残差相对值划分状态, 分别为  $E_1 = (-1.5\%, -0.5\%]$ ,  $E_2 = (-0.5\%, 0.5\%]$ ,  $E_3 = (0.5\%, 1.5\%]$ 。其中,  $E_1$  状态左区间点对应于残差相对值的最小值,  $E_3$  状态右区间点对应于残差相对值的最大值。

(6) 由不同老化时长对应残差相对值所处状态, 构造一步转移概率矩阵:

$$P = (P_{ij})_{3 \times 3} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & 0 \\ \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix}. \quad (24)$$

为对序列状态实现马氏性检验, 先对边际概率值  $P_{ij}$  进行计算, 其值如表 2 所示。取显著性水平  $\alpha$  为 0.1, 查阅卡方临界值得  $\chi_{0.1}^2(4) = 7.7794$ , 计算统计量  $\chi^2 = 8.5849$ ,  $\chi^2 > \chi_{0.1}^2(4)$ , 满足马氏性(见表 3)。

表 2 边际概率值

Table 2 Marginal probability values

状态	$P_{.j}$
$E_1$	$\frac{4}{10}$
$E_2$	$\frac{3}{10}$
$E_3$	$\frac{3}{10}$

表 3 统计量计算表

Table 3 Statistical calculation table

状态	$f_{i1} \left  \ln \frac{p_{i1}}{p_{.1}} \right $	$f_{i2} \left  \ln \frac{p_{i2}}{p_{.2}} \right $	$f_{i3} \left  \ln \frac{p_{i3}}{p_{.3}} \right $
$E_1$	1.0217	0.1054	0
$E_2$	0.4463	0	1.0217
$E_3$	0	1.597	0.1054

## 4.2 模型精度验证

透水沥青混合料老化时间 9 h 和 10 h 的冻融劈裂比计算。

构建转移矩阵后, 基于某一老化时长相应状态对下一时刻相应状态进行预测。由老化时长 8 h 时所处状态  $E_1$  确定其残差相对

值初始向量为  $v_0 = (1, 0, 0)$ , 并由一步转移概率得到老化 9 h 的状态分布为

$$I^{(9h)} = v_0 P = (1, 0, 0) \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & 0 \\ \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix} = \left( \frac{2}{3}, \frac{1}{3}, 0 \right). \quad (25)$$

当老化时间为 9 h 时, TSR 残差所处的状态为  $\max\left(\frac{2}{3}, \frac{1}{3}, 0\right)$ , 即为状态  $E_1$ :  $(-1.5\%, -0.5\%]$ 。老化 9 h 时, 冻融劈裂强度比试验值为 82.07%。灰色模型预测值为 83.23%, 其相对误差为 1.41%。灰色模型经由式 (18) 修正后所得修正值为 82.41%, 其相对误差为 0.41%。通过与灰色模型的对比可知, 灰色-马尔科夫模型具有更高的精度, 提高了 70.92%。

计算可得两步转移概率矩阵为

$$I^{(10h)} = v_0 P^2 = (1, 0, 0) \begin{pmatrix} \frac{11}{18} & \frac{2}{9} & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{9} & \frac{4}{9} \end{pmatrix} = \left( \frac{11}{18}, \frac{2}{9}, \frac{1}{6} \right). \quad (26)$$

所以, 老化时间为 10 h 时, TSR 残差所处的状态为  $\max\left(\frac{11}{18}, \frac{2}{9}, \frac{1}{6}\right)$ , 即为状态  $E_1$ :  $(-1.5\%, 0.5\%]$ 。老化 10 h 时, 冻融劈裂强度比试验值为 80.89%。灰色模型预测值为 81.96%, 其相对误差为 1.32%。灰色模型经由式 (18) 修正后所得修正值为 81.15%, 相对误差为 0.31%。通过与灰色模型对比, 同样证明了灰色-马尔科夫模型具有更高的精度, 提高了 76.52%。

## 5 结论

(1) 透水沥青混合料混合料经过老化作

用后,动稳定度呈现增大的趋势;对比混合料老化前后的抗弯拉强度和冻融劈裂强度比均有不同程度的降低。基于高温低温、水稳定性的综合考量,建议可采用抗老化性较佳的透水沥青混合料空隙率为19%。

(2)从微观层面上解释了透水沥青混合料宏观路用性能的差异。相比于空隙率21%、24%,当空隙率为19%时,混合料沥青膜具有较小的微观形貌变化,有利于透水沥青混合料抵抗老化。

(3)基于老化时长与路用性能所构建的灰色-马尔科夫模型,能较准确的由状态转移矩阵预测透水沥青混合料的性能衰变程度,模型预测精度较高。

## 参考文献

- [1] DONG Y M, TAN Y Q, LIU H, et al. Noise performance of drainage asphalt pavement[J]. International journal of pavement research and technology, 2009, 2(6): 280-283.
- [2] NORAZMAN C W C, JAYA R P, HAMZAH M O. Properties of porous asphalt mixture made with styrene butadiene styrene under long term oven ageing [J]. Advanced materials research, 2012, 1705: 378-383.
- [3] 王晓辰. 多场耦合作用下透水沥青路面的动力响应特性研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.  
(WANG Xiaochen. Dynamic response characteristics of permeable asphalt pavement under multi-field coupling [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.)
- [4] 赵少宗. 新型TPS在排水沥青路面中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.  
(ZHAO Shaozong. Study on the application of new TPS in drainage asphalt pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.)
- [5] 马翔, 李强, 李国芬, 等. 热老化对排水性沥青混合料性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(26): 297-299.  
(MA Xiang, LI Qiang, LI Guofen, et al. Effect of thermal aging on performance of porous asphalt mixture [J]. Science technology and engineering, 2014, 14(26): 297-299.)
- [6] 罗跃纲, 李宝家. 基于神经网络的结构损伤诊断分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2000(6): 519-521.  
(LUO Yuegang, LI Baojia. Fault diagnosis and analysis of structure based on neural network [J]. Journal of Shenyang university of technology, 2000, 22(6): 519-521.)
- [7] PARK E S, SMITH R E, FREEMAN T J, et al. A bayesian approach for improved pavement performance prediction [J]. Journal of applied statistics, 2008, 35(11): 1219-1238.
- [8] 戴文亭, 王振, 王宇放, 等. 改进GM(1,1)模型对地铁开挖沉降的预测[J]. 沈阳工业大学学报, 2019, 41(5): 571-577.  
(DAI Wenting, WANG Zhen, WANG Yufang, et al. Prediction of settlement caused by metro excavation based on improved GM(1,1) model [J]. Journal of Shenyang university of technology, 2019, 41(5): 571-577.)
- [9] ABAZA K A. Back-calculation of transition probabilities for markovian-based pavement performance prediction models [J]. International journal of pavement engineering, 2016, 17(3): 253-264.
- [10] 谭瑞梅. 高粘改性剂在OGFC沥青混合料中的应用[D]. 西安: 长安大学, 2011.  
(TAN Ruimei. Study on application of high viscosity modifier in OGFC asphalt mixture [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.)
- [11] 陈静云, 刘逍遥, 孙依人, 等. “再生改性”沥青性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(2): 277-284.  
(CHEN Jingyun, LIU Xiaoyao, SUN Yiren, et al. Study on the performance of recycled -- modified asphalt [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(2): 277-284.)
- [12] 刘羽. 大空隙透水沥青路面路用特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.  
(LIU Yu. Research on road properties of porous drainage asphalt pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.)
- [13] 于志新. 排水性沥青路面在山区高速公路中的应用研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.  
(YU Zhixin. Application and research of porous asphalt pavement in mountain expressway [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2010.)

(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)