

# 气态水在沥青混合料中的扩散特性和影响因素

李 辉<sup>1</sup>, 杨 炳<sup>1</sup>, 葛乃玲<sup>2</sup>, 张恒基<sup>3</sup>, 谢 宁<sup>1</sup>, 张 毅<sup>4</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 苏州思萃融合基建技术研究所有限公司, 江苏 苏州 215131; 3. 山西黄河  
前沿新材料研究院有限公司, 山西 太原 030000; 4. 上海公路桥梁(集团)有限公司 上海绿色路面材料工程技术研究中心, 上海 200433)

**摘要:** 为了探究水汽在沥青混合料中的扩散规律及影响因素, 设计了穿透型水汽扩散试验装置, 制备了 7%、17% 和 24% 这 3 种空隙率的沥青混合料试件, 分别在 25℃、30℃ 和 40℃ 下进行水汽扩散试验。研究发现水汽在沥青混合料中的扩散速率随着温度的增大而增大, 在较低温度下(25℃ 和 30℃), 空隙率对沥青混合料的水汽扩散速率起主导作用, 在较高温度下(40℃), 温度对水汽扩散速率起主导作用, 2 种多孔沥青混合料的水汽扩散通量和扩散系数明显高于密级配沥青混合料; 水汽在沥青混合料中的积聚量随空隙率的增大而增大, 随温度的增大而减小。结果表明温度和空隙率均对水汽扩散有显著性影响, 且温度越高, 空隙率影响越显著; 空隙率越大, 温度影响越显著。

**关键词:** 沥青路面; 水汽扩散; 空隙率; 温度; 扩散系数

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

## Diffusion Characteristics and Influencing Factors of Water Vapor in Asphalt Mixture

LI Hui<sup>1</sup>, YANG Bing<sup>1</sup>, GE Nailing<sup>2</sup>, ZHANG Hengji<sup>3</sup>, XIE Ning<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Suzhou Sicui Fusion Infrastructure Technology Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215131, China; 3. Shanxi Yellow River Frontier Materials Research Institute Co., Ltd., Taiyuan 030000, China; 4. Shanghai Engineering Research Center of Green Pavement Materials, Shanghai Road and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

**Abstract:** In order to explore the diffusion law and influencing factors of water vapor in asphalt mixture, a penetration water vapor diffusion test device was designed, and three types of asphalt mixtures with porosities of 7%, 17%, and 24% were prepared. Water

vapor diffusion tests were conducted at 25℃, 30℃, and 40℃, respectively. The results show that the diffusivity of water vapor in asphalt mixture increases with the increase of temperature. The porosity plays a dominant role in the diffusion of water vapor in asphalt mixture at a lower temperature (25℃ and 30℃), and temperature plays a dominant role at a higher temperature (40℃). The diffusivity of two porous asphalt mixtures is obviously higher than that of dense asphalt mixture. The amount of water vapor accumulation in asphalt mixture increases with the increase of porosity and decreases with the increase of temperature. The TSR decreases with the increase of water vapor accumulation. The results indicate that both porosity and temperature have a significant effect on diffusivity, and the higher the temperature, the more significant the effect of porosity on the diffusivity. The higher the porosity, the more significant the effect of temperature on diffusivity. The water stability of dense asphalt mixture is more affected by water vapor diffusion.

**Key words:** asphalt pavement; water vapor diffusion; porosity; temperature; diffusivity

环境对沥青混合料的性能会产生重要影响, 尤其是温度、阳光照射导致沥青混合料老化, 加之水和荷载的共同作用, 路面产生剥落、松散及坑槽等<sup>[1-2]</sup>。其中, 水的存在容易导致沥青与集料的黏附性变差<sup>[3-5]</sup>, 进而导致沥青剥落, 这种剥落一般认为有两方面的原因<sup>[6]</sup>: 一方面, 水分通过吸附、置换、乳化、扩散等作用, 渗透进入沥青, 导致沥青胶结料自身的黏聚强度降低; 另一方面, 水进入混合料界面内部而导致界面黏附性降低。对于不同空隙率类型的沥青混合料, 一般认为密级配沥青混合料中, 若集料洁净且

收稿日期: 2021-09-24

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(22120220177); 宁夏科技厅重点研发计划重点项目(2022BEG02008); 山东省交通运输厅科技计划(2021B47)

第一作者: 李 辉(1983—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为: 低碳生态交通基础设施可持续性。

E-mail: hli@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

干燥,那么沥青混合料产生剥落的主要原因为沥青内聚力的消散<sup>[7]</sup>。相比一般密级配沥青混合料,水分很容易进入多孔沥青混合料内部,但是因为其具备高渗透性,水分也会很快排出。但是多孔结构意味着具有更大的表面积,沥青氧化面积以及接触水分的面积更大,研究表明多孔沥青混合料力学性能的衰变与接触水分面积大有关<sup>[8]</sup>。

水分进入沥青混合料的途径主要有3种:一是液态水的渗透作用,二是外部环境及路基中水蒸汽扩散,三是毛细作用<sup>[9-10]</sup>。当水流以较大速度进入混合料内部,集料表面的部分胶结料会被冲刷剥落,尤其对于多孔沥青混合料影响较大<sup>[11]</sup>。因此,许多研究人员研究了液态水对沥青混合料水稳定性的影响,将水的渗透率及扩散系数作为评价沥青混合料水稳定性的指标。Kutay<sup>[12]</sup>提出了一种基于格子玻尔兹曼方法的沥青混合料液态水渗透模型,为预测路面内渗透性及扩散模型提供了基础。为进一步确定沥青混合料渗透性对集料剥落的影响,Choubane等<sup>[13]</sup>用最大渗透系数对体积设计法进行改进,认为渗透系数低于 $10^{-3}$ 可以有效降低沥青混合料剥落风险。Masad等<sup>[9]</sup>通过CT扫描技术研究了沥青混合料中水的毛细运动,发现水的毛细作用可以使得混合料内部产生更多连通孔隙,孔隙半径越小,开裂的发展速度越高,半径越大,则剥落的风险越小<sup>[14]</sup>。

近年来已有学者开始关注道路沥青混合料内部存在的水汽运动以及水汽的扩散规律,并采用扩散系数表征。研究表明,沥青膜的扩散系数会随着测量方法的不同而产生较大差异<sup>[15]</sup>,而粗集料的扩散系数差异性也很明显,不同类型岩石扩散系数不同,即使是同一种岩石,产地不同,扩散系数也存在较大差异<sup>[16-17]</sup>。关于沥青混合料扩散系数的测试方法,主要是2种,一种是重量法,是美国材料试验协会ASTM E96标准<sup>[18]</sup>中所提出的一种测量水汽在试件中穿透扩散特性的方法,该方法所需装置制作简单,操作方便,但往往需要较长的测试周期<sup>[19-20]</sup>;另一种是重量吸附法,将干燥试件放置在一定温度及湿度的环境箱中,称量试件重量变化,得到吸附量与时间的变化曲线,该方法测试周期短,但是仅能够模拟水汽在沥青混合料中的积聚过程<sup>[21-22]</sup>。研究人员还采用有限元方法对水汽在混合料中的扩散进行了模拟,而沥青与集料的水汽扩散系数是重要的参数<sup>[19]</sup>。同时结合断裂力学原理,可以模拟水汽扩散和荷载共同作用下混合料的开裂行为,研究水汽扩散对水损坏性能的影响<sup>[23]</sup>。

对比气态水和液态水,气态水在自然界中的存在更为广泛。即使在我国年降雨量较低的西北部地区,仍然存在明显的早期水损害情况。例如,我国的新疆的哈密地区属于典型的沙漠气候,年降雨量不到40mm,但是调查发现当地的G312公路依然出现了早期水损害问题<sup>[24]</sup>。这些现象表明,液态水并不是沥青路面发生水损害的唯一来源,气态水扩散至沥青路面内部液化或以气态形式扩散至沥青混合料内部,同样会对沥青路面产生水损害。基于此,选取3种不同空隙率的沥青混合料,设计穿透型水汽扩散模拟装置,进行不同温度下的水汽扩散试验,研究水汽在沥青混合料中的扩散规律和影响因素。

## 1 沥青混合料水汽扩散试验方法

### 1.1 水汽扩散运动形式

沥青混合料水汽扩散是气态水分子由于热运动在混合料内部空隙中产生的物质迁移现象。水分子在空隙中运动的路径有2种,一种是积聚型扩散运动,该过程主要发生在路面的修建初期,路面刚刚铺筑完成时,路面内部不含或者含有少量水分子,此时水分子从空气或者地基向路面内部扩散,并不断在路面内部积聚,该过程以积聚型扩散运动为主导。另一种是穿透型扩散运动,随着水汽在路面内部的积聚,路面内部的水汽含量逐渐趋于饱和,水汽运动形式将从积聚型转变为穿透型为主导,由于地基水分趋于饱和,水汽会穿透路面进入空气中<sup>[20, 22-23]</sup>。

根据水分子平均自由程 $\lambda$ 与沥青混合料空隙直径 $d$ 的大小关系,又可以将水汽扩散分为菲克扩散、努森扩散和过渡扩散<sup>[25]</sup>。当空隙直径 $d \geq 100\lambda$ 时,空隙直径远大于分子自由程,分子运动主要为分子与分子之间的碰撞,此扩散认为是菲克扩散;当空隙直径 $d \leq 0.1\lambda$ 时,分子主要与空隙壁碰撞,此时认为是努森扩散;当空隙直径 $d$ 在两者之间时,分子与分子碰撞、分子与空隙壁碰撞都存在,此时的扩散称为过渡扩散。沥青混合料中的空隙直径大于分子自由程,气态水在路面内部的扩散形式为菲克扩散。

### 1.2 试验装置及试验方案设计

#### 1.2.1 试验装置设计

依据 ASTM E96 (Standard Test Methods for Gravimetric Determination of Water Vapor Transmission Rate of Materials)所述的测试方法,模拟自然界中气态水穿透路面的过程,装置示意图如图1所示。试验装置主要由试件、环形硅胶圈和密

封容器组成,密封容器中装有蒸馏水。这样装置内部的蒸馏水充满整个空间,使得装置内部相对湿度为 $U_1$ ,装置被放置于一个环境箱中,环境箱中的湿度 $U_2$ 通过放置干燥剂和环境箱控制,保持环境箱中湿度 $U_2$ 为20%左右。该装置可以造成沥青混合料内外的湿度差,驱使水汽竖向经由沥青混合料试件从上表面散发出去,模拟了穿透型水汽扩散的扩散模式。根据图1,装置的具体制备过程如图2所示:a制作盛水装置;b倒入蒸馏水;c试件密封;d保鲜膜密封;e放入环境箱。

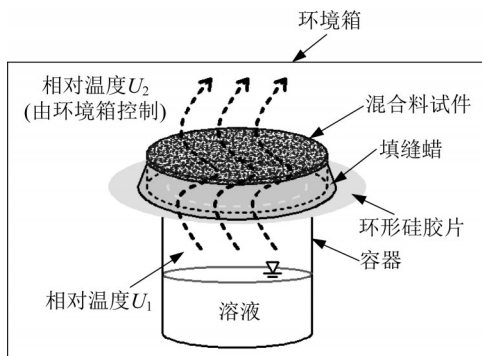


图1 重量法试验装置示意<sup>[26]</sup>  
Fig. 1 Diagram of test device<sup>[26]</sup>

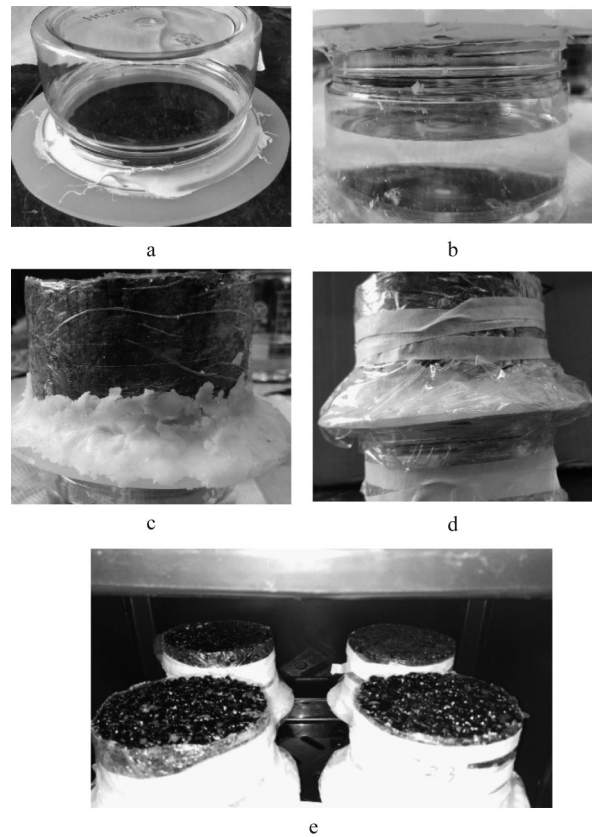


图2 试验装置制备过程  
Fig. 2 Preparation of test device

上述装置制备好后,先放入环境箱中24h,待试件下面湿度饱和后测试试验装置初始质量 $M_0$ ,然后进行水汽扩散试验。每个温度下试验周期为20d,用精度为0.001g的天平时称量试验装置质量 $M_t$ 。试验完毕后称量混合料试件本身质量 $m_t$ ,试件初始质量 $m_0$ ,可计算水汽积聚量 $\Delta m = m_t - m_0$ 。

1.2.2 试验方案设计

以往的研究中常常采用的试验温度是常见的室温 $20^\circ\text{C}$ <sup>[22]</sup>、 $25^\circ\text{C}$ <sup>[16, 27]</sup>或者 $35^\circ\text{C}$ <sup>[19]</sup>,也有研究关注了不同温度对水汽扩散的影响,最高温度达到 $50^\circ\text{C}$ <sup>[28]</sup>。为了探究不同温度对不同空隙率沥青混合料内部水汽扩散的影响,同时为了避免过高温度导致水汽扩散过快,以至于装置中水量不足,以及过高温度可能引起的混合料老化和试件体积参数的变化,选取 $25^\circ\text{C}$ 、 $30^\circ\text{C}$ 和 $40^\circ\text{C}$ 这3个温度。依据现行沥青混合料设计规范《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2019)中规定的马歇尔试验配合比设计方法,选用密级配AC-13和开级配OGFC-13,设计空隙率7%(VV7%)、17%(VV17%)和24%(VV24%)3种沥青混合料,根据空隙率和马歇尔实验结果确定最佳油石比,设计结果如表1所示,每种级配、每种试验条件制备3个平行试件。

表1 不同空隙率沥青混合料级配范围

Tab. 1 Aggregate gradation of different asphalt mixtures

筛孔尺寸/mm	通过不同筛孔的质量百分率/%		
	VV7%	VV17%	VV24%
16	100.0	100.0	100.0
13.2	100.0	100.0	95.0
9.5	76.5	68.0	70.0
4.75	53.0	28.0	21.0
2.36	37.0	16.0	16.0
1.18	26.5	12.0	12.0
0.6	19.0	8.0	9.5
0.3	10.0	6.0	7.5
0.15	5.0	5.0	5.5
0.075	5.0	5.0	4.0
油石比/%	5.0	4.93	4.61

1.3 水汽参数计算

外界与路面内部的湿度差和温度差是造成水汽在路面内部与外界交换运动的驱动力,因此水汽在沥青混合料中的运动规律是由温度和湿度共同决定的。为表征水汽在混合料内部的运动规律,研究人员提出可以通过测量扩散系数来衡量水汽扩散速率。扩散系数是指当浓度梯度为一个单位时,单位时间内通过单位面积的气体量<sup>[29]</sup>。

扩散系数采用菲克定律进行拟合求解。菲克定律常用于描述多孔介质中空气的流动,可以用来描述沥青混合料中水汽扩散运动,并对水汽扩散系数进行求解。菲克第一定律认为气体在介质中的扩散是稳态扩散,即扩散通量和水汽浓度不随时间变化,在扩散进行过程中,介质各点的水汽浓度只随距离变化,其如式(1):

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

式中: $J$ 为扩散通量,表示单位时间内垂直通过扩散方向的单位面积的物质质量,  $g \cdot m^2 \cdot h^{-1}$ ;  $D$ 为扩散系数,  $m^2 \cdot h^{-1}$ ;  $C$ 为扩散物质的体积浓度,  $mol \cdot m^{-3}$ ;  $x$ 为扩散距离,  $m$ 。

而在自然界中的大多数扩散现象都是非稳态的,即扩散现象随着时间和距离均发生变化。因此考虑时间的影响,在菲克第一定律基础上,将扩散通量对时间 $t$ 求导,就得到菲克第二定律,如式(2):

$$\frac{\partial J}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2)$$

式中: $t$ 为扩散时间,  $h$ 。

根据现有的扩散系数研究结果,实验室模拟的水汽扩散为稳态扩散,即扩散规律服从菲克第一定律,因此式(1)可以转化成式(3):

$$J = -D \frac{dC}{dx} = -D \left( -\frac{\Delta C}{L} \right) = \frac{D}{L} \cdot \Delta C \quad (3)$$

式中:“ $-$ ”表示扩散方向为水汽浓度梯度的反方向; $L$ 为试件高度,  $m$ 。

试验过程中会实时称量装置总质量  $W_{H_2O}$ , 计算质量损失的时间变化率,即水汽穿透率为  $dW_{H_2O}/dt$ , 水汽穿透率用  $P_R$  (penetration rate) 表示。根据扩散通量  $J$  的定义,  $J$  的计算如式(4)所示:

$$J = \frac{dW_{H_2O}}{Adt} \quad (4)$$

式中: $A$ 为扩散面积,  $m^2$ 。

温度一定时,水汽扩散的驱动力为路面内外相对湿度差  $\Delta U$ , 已知

$$U = \frac{P}{P_0} P = \frac{RTC}{m_{H_2O}} \Delta C = C_1 - C_2$$

那么

$$\Delta U = U_1 - U_2 = \frac{1}{P_0} \cdot \frac{RT}{m_{H_2O}} \cdot (C_1 - C_2) = \frac{RT}{P_0 m_{H_2O}} \cdot \Delta C \quad (5)$$

式中: $P_0$ 为试验温度下的饱和蒸气压,  $Pa$ ;  $R$ 为通用气体常数,  $8.314 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ ;  $T$ 为热力学温度,  $K$ ;

$m_{H_2O}$ 为水的相对分子质量,  $18.015 g \cdot mol^{-1}$ ;  $C_1$ 、 $C_2$ 分别为容器内部液体上方水汽浓度和环境箱水汽浓度,  $g \cdot m^{-3}$ 。根据《水和水蒸气热力性质图表(第二版)》,各温度下水的饱和蒸气压如表2所示。

表2 各温度下饱和蒸气压

Tab. 2 Saturated vapor pressure at different temperatures

温度/°C	饱和蒸气压/Pa
25	3169.0
30	4245.5
40	7381.4

结合式(3)~(5),联立可以得到水汽扩散系数计算公式,如式(6)所示:

$$D = J \cdot \frac{LRT}{P_0 \cdot m_{H_2O} \cdot \Delta U} = \frac{dW_{H_2O}}{A \cdot dt} \cdot \frac{LRT}{P_0 \cdot m_{H_2O}} \cdot \frac{1}{U_1 - U_2} \quad (6)$$

由此可见,测得装置的水汽穿透率  $dW_{H_2O}/dt$ , 即可计算得到沥青混合料的扩散系数  $D$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 穿透率拟合结果

3种温度和3种混合料水汽扩散试验完成后,可以得到水汽扩散质量随扩散时长的变化,如图3所示。从图中可以看出,水汽扩散质量随扩散时间呈线性变化,对图中的扩散质量与扩散时间曲线进行线性拟合,即可得到水汽穿透率  $dW_{H_2O}/dt$ , 曲线的拟合参数  $R^2$  均在0.95以上(表3),因此沥青混合料水汽扩散穿透率可以认为是一个常数,接近于稳态扩散,随着扩散时长的延长,水汽扩散质量线性增长。对比密级配沥青混合料和多孔沥青混合料,密级配沥青混合料在温度较低时,扩散运动变化不显著,其在25°C和30°C试验温度条件下的拟合曲线几乎重合。而多孔沥青混合料各温度之间的穿透率均有显著差异,在实际测试中,多孔沥青混合料空隙率均在17%及以上,说明多孔沥青混合料穿透型水汽扩散运动受温度的影响较大。随着温度增大,扩散时长与扩散质量线性拟合的斜率增大,穿透率增大,说明温度对混合料内部水汽扩散运动具有显著影响。

此外,拟合结果显示不同温度下各平行试验离散性有显著差异,因此计算了穿透率的变异系数如表4所示。结果表明,无论是密级配还是多孔沥青混合料,试验温度为25°C时,平行试验的变异系数最小,温度增加后变异系数随之增大。这是因为气体

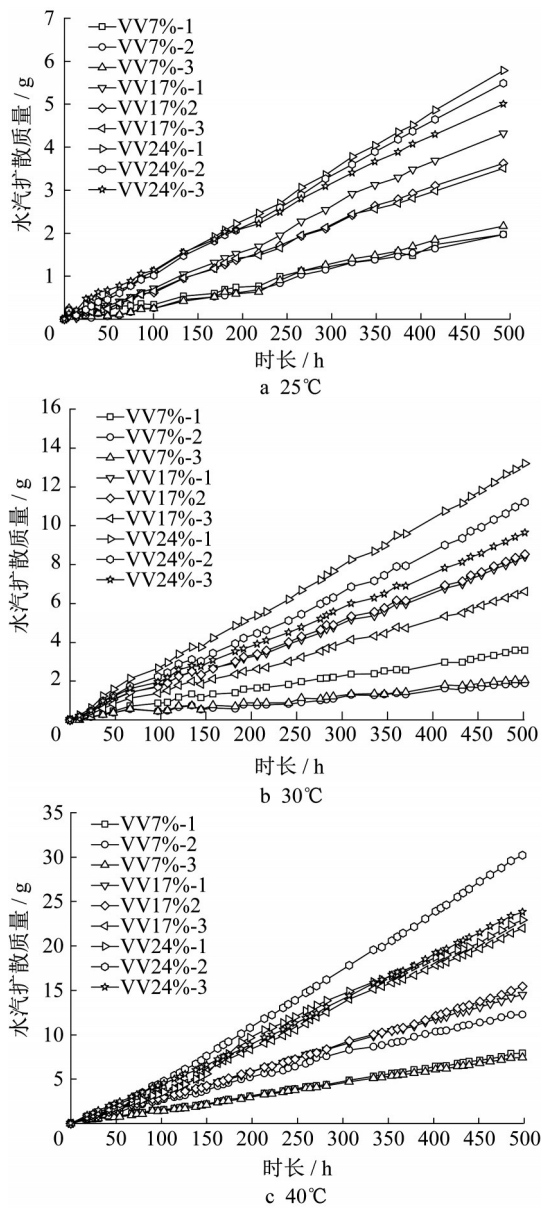


图3 水汽扩散质量随时间变化关系

Fig. 3 Variation of water vapor diffusion with time

表3 水汽扩散渗透率拟合参数

Tab. 3 Fitting parameters of water vapor diffusion penetration

混合料类型	25°C			30°C			40°C		
	试验 1	试验 2	试验 3	试验 1	试验 2	试验 3	试验 1	试验 2	试验 3
VV7%	0.990	0.978	0.971	0.994	0.984	0.987	0.999	0.998	0.999
VV17%	0.996	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	1.000	0.998	0.998
VV24%	0.999	0.999	0.998	0.999	0.998	0.998	0.994	0.998	0.999

分子热运动随温度增大而增大,而水汽分子的运动是无序的,导致分子扩散路径的差异增大,水分子在混合料内部的停留时间不同,最终分子的穿透时长不一,渗透率随之变化。此外,计算了不同沥青混合

料相对于25°C下的单位温度渗透率增长率 $P_R$ ,计算方式如式(7)所示:

$$P_R = \frac{P_{RT} - P_{R25}}{P_{R25} \times (T - 25)} \times 100 \quad (7)$$

式中: $P_R$ 为单位温度渗透率增长率, $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ; $P_{RT}$ 为温度 $T$ 下的渗透率, $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ ; $P_{R25}$ 为25°C下的渗透率, $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

单位温度渗透率增长率的结果如图4所示。在30°C下,密级配沥青混合料的单位温度渗透率增长率仅为2.9%,而2种多孔沥青混合料分别为18.2%和20.4%,这表明在较低温度下,空隙率的增长能够明显加快水汽的扩散;但是对于不同多孔沥青混合料来讲,空隙率的增长对水汽扩散速率的影响较小。在40°C下,3种沥青混合料的单位温度渗透率增长率分别为23.7%、23.0%和25.7%,这表明在较高温度下,沥青混合料的空隙率对水汽扩散的增长率影响不大。上述结果表明,在较低温度下,空隙率对水汽扩散速率起主导作用,在较高温度下,温度对水汽扩散起主导作用。这可能是因为在较低温度下,分子热运动较慢,如果空隙率低,水汽扩散会受到明显的“阻碍”;在较高温度下,水汽热运动加剧,即使空隙率低,试件依然能够获得较高的扩散效率。

### 2.2 扩散通量

根据式(4)可以计算扩散通量 $J$ ,即为水汽渗透率 $dW_{\text{H}_2\text{O}}/dt$ 与扩散面积的比值。水汽扩散面积为环形硅胶圈内圈面积,内径为89mm,计算扩散面积 $A$ 为6 218  $\text{mm}^2$ ,根据式(4)计算各温度下水汽扩散通量,如图5所示,取每个空隙率、每个温度下3个平行试验的扩散通量的平均值。实际上,扩散通量为单位面积上的水汽渗透率,其变化趋势应与表4中渗透率的变化趋势一致。因此,与渗透率的结果类似,扩散通量随温度增大而增大,且两者之间呈非线性变化,温度增大,扩散通量增长速率随之增大,与现有研究结果一致<sup>[26]</sup>。并且,在较低温度下(25°C~30°C),空隙率能显著影响沥青混合料的水汽扩散通量,在较高温度下,温度则占据主导作用,但是空隙率的作用依然不可忽视。即使在40°C下,VV24%的沥青混合料的扩散通量是VV7%的沥青混合料的扩散通量的3倍。在相同的温度下,多孔沥青混合料空隙率更高,扩散通道更丰富,单位面积上扩散出去的水汽量就更高。

### 2.3 扩散系数

扩散系数是指当水汽浓度梯度为一个单位时,单位时间内通过单位面积的气体量,可以根据式(6)计算,计算结果如图6所示,图示结果取每个空隙

表 4 穿透率变异系数

Tab. 4 Coefficient of variation of penetration rate

混合料类型	温度/°C	平行试验序号	穿透率/(g·h <sup>-1</sup> )	平均值/(g·h <sup>-1</sup> )	标准差	变异系数
VV7%	25	1	0.004 0	0.004 1	0.000 2	0.055 9
		2	0.004 0			
		3	0.004 4			
	30	1	0.006 8	0.004 7	0.001 8	0.380 5
		2	0.003 5			
		3	0.003 9			
	40	1	0.015 9	0.018 7	0.005 6	0.299 7
		2	0.025 2			
		3	0.015 1			
VV17%	25	1	0.009 0	0.007 9	0.000 9	0.117 1
		2	0.007 5			
		3	0.007 3			
	30	1	0.016 2	0.015 2	0.002 1	0.137 4
		2	0.016 6			
		3	0.012 8			
	40	1	0.029 1	0.035 1	0.009 3	0.264 7
		2	0.030 4			
		3	0.045 8			
VV24%	25	1	0.011 6	0.010 9	0.000 8	0.076 2
		2	0.011 2			
		3	0.010 0			
	30	1	0.025 8	0.022 1	0.003 6	0.163 5
		2	0.021 8			
		3	0.018 6			
	40	1	0.048 1	0.053 0	0.008 3	0.157 5
		2	0.062 6			
		3	0.048 2			

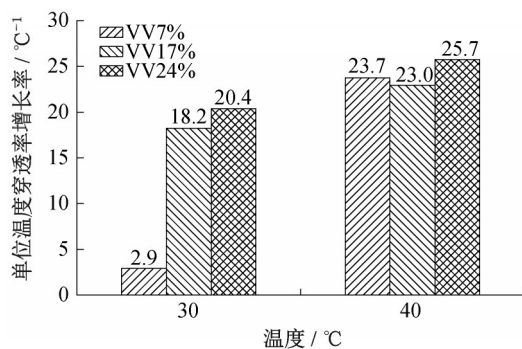


图 4 单位温度穿透率增长率

Fig. 4 Increasing rate of penetration rate per unit temperature

率、每个温度下 3 个平行试验的扩散系数的平均值。结果表明扩散系数随温度的增大而呈现增大的趋势,这表明在相同时间内,温度越高,穿过混合料的水汽量越大。图 7 展示了相对于 25°C 的扩散系数增长率,在温度较低时(25°C~30°C),VV7% 的密级配沥青混合料的扩散系数随温度变化不明显,甚至有所降低,而多孔沥青混合料随温度变化增长幅度则远大于 VV7% 的沥青混合料。这是由于多孔沥青混合料自身空隙率远高于密级配的沥青混合料,水

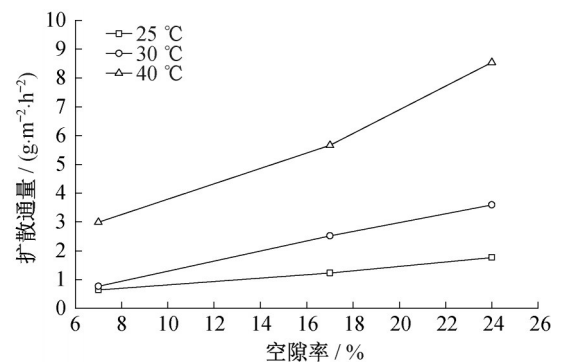


图 5 不同温度下扩散通量结果

Fig. 5 Results of diffusion flux at different temperatures

汽分子在多孔沥青混合料内部扩散空间更大、扩散路径更丰富,因而有更多的水分子扩散出去。当温度逐渐升高,空隙内部水分子运动速度会加快,使得空隙率中的水汽分子加速扩散至外界。因此温度从 30°C 升高至 40°C 时, VV7% 的沥青混合料的扩散系数增长率也显著提升,与多孔沥青混合料增长率相当,但是由于空隙率小,扩散系数值仍显著小于多孔沥青混合料。此外,温度达到 40°C,空隙率达到 17% 后,其扩散系数增长率有所增大,这表明温度变高,

扩散系数依然受到空隙率的影响。水汽穿透率、扩散通量和扩散系数的结果表明,对于沥青混合料而言,空隙率是决定其扩散速率的内因,其自身的空隙率大小决定了其扩散速率的下限,空隙率越大,即使较低温度下也能获得较高的扩散系数;温度是外因,温度的高低决定了扩散系数的上限,即使是低空隙率的密级配沥青混合料,升高温度,扩散系数能够获得明显提升。由此可见,相比于密级配的沥青混合料,多孔沥青混合料水汽扩散受温度和空隙率影响较大,温度越大、空隙率越大,扩散运动越剧烈。

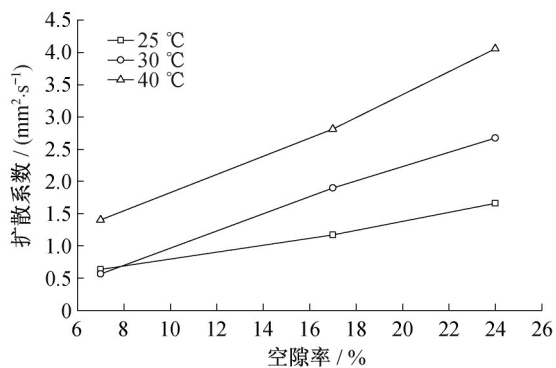


图6 扩散系数与温度变化关系

Fig. 6 Diffusivity at different temperatures

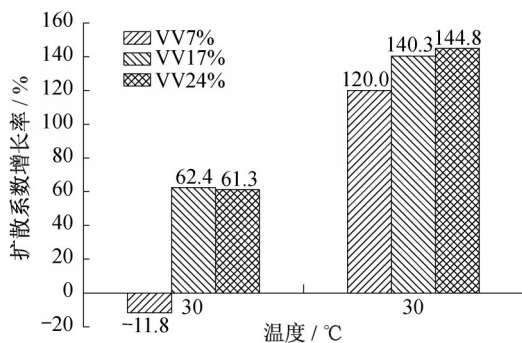


图7 扩散系数增长率

Fig. 7 Increasing rate of diffusivity

## 2.4 水汽积聚量

对水汽扩散养生前后马歇尔试件进行称重,可以得到养生过程中水汽在多孔沥青混合料内部的积聚质量,结果如图8所示。从试件的称重结果来看,温度是影响积聚水质量的重要因素,温度越低试件内部积聚水量越多。这是因为当温度较低时(25°C),水汽扩散运动不够强烈,大量水汽会液化并吸附在混合料空隙表面,这也是温度较低时扩散系数不大的原因之一。温度上升,水的积聚量先急剧降低,然后幅度减缓。也就是说温度上升后,温度的影响会逐渐降低。对比密级配和

多孔沥青混合料的大孔隙和多孔隙决定了其单位时间内的水汽扩散量会增大,但是残留在内部的水汽量也会增大。因此多孔沥青混合料不仅接触水汽的面积比密级配沥青混合料大,接触时长也更大。在这个过程中,水分子可能会逐渐扩散至沥青内部甚至沥青与集料界面,破坏沥青的黏结性能和两者之间的黏附性。

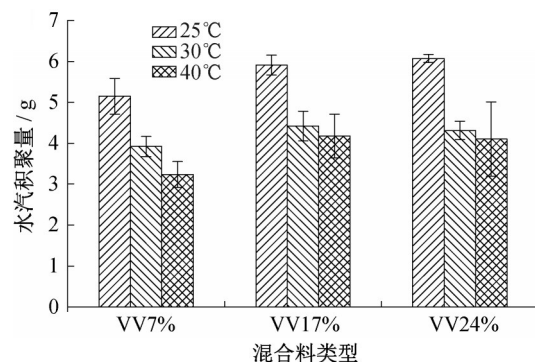


图8 水汽积聚量

Fig. 8 Water vapor accumulation

## 2.5 采用双因素方差方法分析各因素对扩散系数的影响

为了进一步探究空隙率和温度2个因素(自变量)对扩散系数(因变量)的影响,以及这2个因素之间可能存在交互作用的影响,利用SPSS数据分析软件,采用双因素方差分析的方法,对相关数据进行统计分析<sup>[30]</sup>。其中,因素空隙率( $P$ )有7%、17%和24%这3个水平,因素温度( $T$ )有25°C、30°C和40°C这3个水平。用于双因素方差分析的扩散系数详细数据如表5所示,对表中27组数据进行双因素方差分析,方差分析结果见表6,双因素方差分析取显著性水平0.05。

由表6可以看到温度或空隙率的显著性 $p$ 值均为零, $p < 0.05$ ,因此在0.05的水平下温度或空隙率对扩散系数的影响有显著性差异,具有统计学意义,也就是说空隙率或者温度的变化均会对水汽在沥青混合料中的扩散产生显著性影响。此外,对比 $F$ 值可以看出,空隙率影响的显著性更强。 $T \cdot P$ 指温度和空隙率的交互作用,由表6可知,温度和空隙率的交互作用的显著性 $p$ 值为0.0504, $p > 0.05$ ,由于温度与空隙率的交互作用的 $p$ 值与0.05接近,交互作用对扩散系数的影响是否具有显著性尚需进一步分析。

采用SPSS软件自带的LSD比较检验方法对空隙率和温度的交互作用进行了进一步的显著性检

表 5 不同因素下的扩散系数  
Tab. 5 Diffusivity at different factors

混合料类型	温度/°C	平行试验序号	扩散系数/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	扩散系数平均值/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )
VV7%	25	1	0.640	0.658
		2	0.636	
		3	0.699	
	30	1	0.804	0.562
		2	0.419	
		3	0.464	
	40	1	1.197	1.409
		2	1.884	
		3	1.147	
VV17%	25	1	1.371	1.211
		2	1.151	
		3	1.110	
	30	1	1.960	1.843
		2	2.026	
		3	1.543	
	40	1	2.275	2.804
		2	2.397	
		3	3.739	
VV24%	25	1	1.764	1.647
		2	1.696	
		3	1.481	
	30	1	3.159	2.642
		2	2.579	
		3	2.188	
	40	1	3.610	4.044
		2	4.797	
		3	3.726	

表 6 方差分析结果  
Tab. 6 Results of variance analysis

方差来源	III 类平方和	自由度	均方	F	显著性
T	11.710	2	5.855	31.892	0
P	16.357	2	8.179	44.550	0
T·P	2.145	4	0.536	2.921	0.050 4
误差	3.304	18	0.184		

表 7 固定温度下交互作用成对比较结果

Tab. 7 Pairwise comparison results of interaction at fixed temperature

温度/°C	空隙率/%	对比空隙率/%	平均值差值	标准误差	显著性	差值的 95% 置信区间	
						下限	上限
25	7	17	-0.552	0.350	0.132	-1.287	0.183
	7	24	-0.989 <sup>*</sup>	0.350	0.011	-1.724	-0.254
	17	7	0.552	0.350	0.132	-0.183	1.287
	17	24	-0.436	0.350	0.228	-1.171	0.299
	24	7	0.989 <sup>*</sup>	0.350	0.011	0.254	1.724
	24	17	0.436	0.350	0.228	-0.299	1.171
30	7	17	-1.281 <sup>*</sup>	0.350	0.002	-2.016	-0.546
	7	24	-2.080 <sup>*</sup>	0.350	0	-2.815	-1.345
	17	7	1.281 <sup>*</sup>	0.350	0.002	0.546	2.016
	17	24	-0.799 <sup>*</sup>	0.350	0.035	-1.534	-0.064
	24	7	2.080 <sup>*</sup>	0.350	0	1.345	2.815
	24	17	0.799 <sup>*</sup>	0.350	0.035	0.064	1.534
40	7	17	-1.394 <sup>*</sup>	0.350	0.001	-2.129	-0.659
	7	24	-2.635 <sup>*</sup>	0.350	0	-3.370	-1.900
	17	7	1.394 <sup>*</sup>	0.350	0.001	0.659	2.129
	17	24	-1.241 <sup>*</sup>	0.350	0.002	-1.976	-0.506

验。表 7 显示的是固定温度不同空隙率下扩散系数两两比较的结果,固定温度为 25°C 时,7% 空隙率和 17% 空隙率下的扩散系数的显著性  $p=0.132 > 0.05$ , 而 7% 空隙率和 24% 空隙率下的扩散系数的显著性  $p=0.011 < 0.05$ 。这表明在 25°C 时,7% 空隙率和 24% 空隙率下的扩散系数具有统计学差异,并且 24% 空隙率下的扩散系数更大。当固定温度为 30°C 或 40°C 时,任意 2 个空隙率下扩散系数的显著性  $p$  值均小于 0.05。这表明在 30°C 或 40°C 温度下,不同空隙率两两比较,其扩散系数均存在统计学差异。此外,当温度为 40°C 时,任意 2 个空隙率下扩散系数的平均值差值的显著性  $p$  值均小于 0.01,这表明温度越高,空隙率对沥青混合料的扩散系数的影响就越显著。

表 8 结果表明,对于空隙率为 7% 的沥青混合料,25°C 和 30°C 下的扩散系数的显著性  $p$  值大于 0.05,不存在统计学差异;而 25°C 和 40°C 或 30°C 和 40°C 下的扩散系数的显著性  $p$  值均小于 0.05,存在统计学差异。这表明温度差值越大,沥青混合料的扩散系数变化越显著。同样,对于空隙率为 17% 的沥青混合料,25°C 和 30°C 下的扩散系数的显著性  $p$  值大于 0.05,不存在统计学差异;而 25°C 和 40°C 或 30°C 和 40°C 下的扩散系数的显著性  $p$  值均小于 0.05,存在统计学差异。对于空隙率为 24% 的沥青混合料,任意 2 个温度下的沥青混合料的扩散系数的显著性  $p$  值均小于 0.05,存在统计学差异,这表明空隙率越大,温度差异对沥青混合料的扩散系数的影响就越显著。



续表

温度/°C	空隙率/%	对比空隙率/%	平均值差值	标准误差	显著性	差值的 95% 置信区间	
						下限	上限
	24	7	2.635*	0.350	0	1.900	3.370
	24	17	1.241*	0.350	0.002	0.506	1.976

注:\*表示平均值差值的显著性水平小于0.05,具有显著性。

表 8 固定空隙率下交互作用成对比较结果

Tab. 8 Pairwise comparison results of interaction at fixed porosity

空隙率/%	温度/°C	对比温度/°C	平均值差值	标准误差	显著性	差值的 95% 置信区间	
						下限	上限
7	25	30	0.096	0.350	0.787	-0.639	0.831
	25	40	-0.751*	0.350	0.046	-1.486	-0.016
	30	25	-0.096	0.350	0.787	-0.831	0.639
	30	40	-0.847*	0.350	0.026	-1.582	-0.112
	40	25	0.751*	0.350	0.046	0.016	1.486
	40	30	0.847*	0.350	0.026	0.112	1.582
17	25	30	-0.633	0.350	0.087	-1.368	0.102
	25	40	-1.593*	0.350	0	-2.328	-0.858
	30	25	0.633	0.350	0.087	-0.102	1.368
	30	40	-0.960*	0.350	0.013	-1.695	-0.225
	40	25	1.593*	0.350	0.000	0.858	2.328
	40	30	0.960*	0.350	0.013	0.225	1.695
24	25	30	-0.995*	0.350	0.011	-1.730	-0.260
	25	40	-2.397*	0.350	0	-3.132	-1.662
	30	25	0.995*	0.350	0.011	0.260	1.730
	30	40	-1.402*	0.350	0.001	-2.137	-0.667
	40	25	2.397*	0.350	0	1.662	3.132
	40	30	1.402*	0.350	0.001	0.667	2.137

注:\*表示平均值差值的显著性水平小于0.05,具有显著性。

综上,空隙率和温度对水汽在沥青混合中的扩散系数的影响在 0.05 的水平下有显著性差异,两者的交互作用对水汽在沥青混合料中的扩散系数的影响需要具体分析。温度越高,空隙率对沥青混合料的扩散系数的影响就越显著;空隙率越大,温度对沥青混合料的扩散系数的影响就越显著。这与图 5 和表 5 的结果一致,温度越高,空隙率越大,水汽扩散系数也越大。

### 3 结论

基于穿透型水汽扩散试验,研究了不同温度对不同空隙率的沥青混合料水汽扩散行为的影响,通过对试验结果的分析 and 总结,可以得出以下结论:

(1)空隙率是决定水汽扩散速率的内因,沥青混合料的空隙率大小决定了其扩散速率的下限,空隙率越大,即使较低温度下也能获得较高的扩散系数;

温度是外因,温度的高低决定了扩散系数的上限,即使是低空隙率的密级配沥青混合料,升高温度,扩散系数就能够获得明显提升。

(2)温度越高,水分子运动越剧烈,水分子更容易从试件穿透,试件内部水汽积聚量也就越少;空隙率越大,水汽穿透量越大,水汽与混合料接触面积越大,水汽积聚量也越大。

(3)双因素方差分析结果显示空隙率和温度对水汽在沥青混合料中的扩散有显著性影响,且两者存在一定的交互作用,温度越高,空隙率对水汽扩散的影响就越显著;空隙率越高,温度对水汽扩散的影响就越显著。

#### 作者贡献声明:

李 辉:论文的构思者及负责人,指导实验开展、论文写作与修改。

杨 炳:负责试验设计与实施,完成数据分析与论文初稿的写作。

葛乃玲:负责试验设计和试验结果分析,参与论文写作与绘图。

张恒基:参与试验实施和结果分析。

谢 宁:参与试验结果分析和论文修改。

张 毅:参与试验数据处理和论文修改。

#### 参考文献:

- [1] LU Q, HARVEY J T. Evaluation of moisture sensitivity of hot mix asphalt by flexural beam fatigue test [C]//Proceedings of R Lytton Symposium on Mechanics of Flexible Pavements. Baton Rouge: American Society of Civil Engineers, 2006: 124-133.
- [2] 杨新燕. 基于有限元的温度-荷载-行车速度耦合作用下路面结构动孔隙水压力对比研究 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (5): 23.
- [3] YANG Xinyan. Comparative study on dynamic pore water pressure of pavement structure under coupling of temperature, load and driving speed based on FE method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(5): 23.
- [4] HAGOS E T. The effect of aging on binder properties of porous asphalt concrete [D]. Delft: Delft University of Technology, 2008.
- [5] LI H, YU J, WU S, et al. Effect of moisture conditioning on mechanical and healing properties of inductive asphalt concrete

- [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 241: 118139.
- [5] BIDGOLI M A, HAJIKARIMI P, POUREBRAHIMI M R, *et al.* Introducing adhesion-cohesion index to evaluate moisture susceptibility of asphalt mixtures using a registration image-processing method [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(12): 4020376.
- [6] KRINGOS N, SCARPAS A, KASBERGEN C. Three dimensional elasto-visco-plastic finite element model for combined physical-mechanical moisture induced damage in asphaltic mixes [J]. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 2007, 76: 495.
- [7] JIMÉNEZ Del Barco Carrión A, CARVAJAL-MUÑOZ J S, LO PRESTI D, *et al.* Intrinsic adhesive and cohesive assessment of the moisture sensitivity of bio-rejuvenated recycled asphalt binders [J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2019, 20(sup1): S347.
- [8] POULIKAKOS L D, PARTL M N. A multi-scale fundamental investigation of moisture induced deterioration of porous asphalt concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 36: 1025.
- [9] MASAD E, ARAMBULA E, KETCHAM R A, *et al.* Nondestructive measurement of moisture transport in asphalt mixtures [J]. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 2007, 76: 919.
- [10] 陶泽峰, 钱劲松, 凌建明, 等. 湿度影响下的重载交通沥青路面动力响应[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(5): 734.  
TAO Zefeng, QIAN Jingsong, LING Jianming, *et al.* Dynamic response of heavy duty asphalt pavement affected by moisture [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(5): 734.
- [11] BAGAMPADDE U. Investigations on moisture damage-related behaviour of bituminous materials [D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2005.
- [12] KUTAY M E. Modeling moisture transport in asphalt pavements [D]. Maryland: University of Maryland, College Park, 2005.
- [13] CHOUBANE B, PAGE G C, MUSSELMAN J A. Investigation of water permeability of coarse graded superpave pavements [J]. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 1998, 67: 254.
- [14] ARAMBULA E, MASAD E, MARTIN A E. Influence of air void distribution on the moisture susceptibility of asphalt mixes [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007, 19(8): 655.
- [15] NGUYEN T, BYRD E, LIN C. A spectroscopic technique for in situ measurement of water at the coating/metal interface [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 1991, 5(9): 697.
- [16] KASSEM E, MASAD E, BULUT R, *et al.* Measurements of moisture suction and diffusion coefficient in hot-mix asphalt and their relationships to moisture damage [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2006, 1970: 45.
- [17] WITTHUSER K, ARNEPALLI D, SINGH D N. Investigations on diffusion characteristics of granite and chalk rock mass [J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2006, 24(2): 325.
- [18] American Society for Testing and Materials. CHARLES J P. Standard test methods for gravimetric determination of water vapor transmission rate of materials: ASTM E96/E96M [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2022.
- [19] ARAMBULA E, CARO S, MASAD E. Experimental measurement and numerical simulation of water vapor diffusion through asphalt pavement materials [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 22(6): 588.
- [20] LUO R, TU C. Actual diffusivities and diffusion paths of water vapor in asphalt mixtures [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 207: 145.
- [21] LUO R, HUANG T, ZHANG D, *et al.* Water vapor diffusion in asphalt mixtures under different relative humidity differentials [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 136: 126.
- [22] 罗蓉, 黄婷婷. 沥青混合料内的水气运动 [J]. *重庆交通大学学报: 自然科学版*, 2016, 35(S1): 49.  
LUO Rong, HUANG Tingting. Water vapor diffusion in asphalt mixtures [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2016, 35(S1): 49.
- [23] SHAKIBA M, DARABI M K, ABU AL-RUB R K, *et al.* Three-dimensional microstructural modelling of coupled moisture-mechanical response of asphalt concrete [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2015, 16(5/6): 445.
- [24] 周峰. 沥青路面水损害及其防治方法 [J]. *大陆桥视野(下半月)*, 2011(10): 92.  
ZHOU Feng. Moisture damage of asphalt pavement and its prevention methods [J]. *New Silk Road Horizon*, 2011(10): 92.
- [25] 司胜利. 影响煤层气解吸扩散运移的地质因素 [J]. *云南地质*, 2004, 23(2): 212.  
SI Shengli. The geological factors affecting desorption diffusion and movement of seam gas [J]. *Yunnan Geology*, 2004, 23(2): 212.
- [26] 柳子尧. 沥青混合料穿透型水气扩散影响因素研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.  
LIU Ziyao. Study of the influence factors of water vapor passing through asphalt mixtures [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [27] KASSEM E, MASAD E, LYTTON R, *et al.* Measurements of the moisture diffusion coefficient of asphalt mixtures and its relationship to mixture composition [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2009, 10(6): 389.
- [28] HUANG T, LUO R. Investigation of effect of temperature on water vapor diffusing into asphalt mixtures [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 187: 1204.
- [29] 周磊. 开关柜故障特征气体组分分析研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.  
ZHOU Lei. The analysis and research of switchgear characteristic gas composition [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [30] 叶向, 李亚平. 统计数据分析基础教程: 基于 SPSS 20 和 Excel 2010 的调查数据分析 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2015.  
YE Xiang, LI Yaping. Basic course of statistical data analysis: survey data analysis based on SPSS 20 and Excel 2010 [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2015.