

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.041

# 湿度对沥青混合料性能影响研究

毛红卫<sup>1</sup>,陈忠华<sup>2</sup>

(1.湖北省交通规划设计院股份有限公司,湖北 武汉 430051;2.中南勘察设计院集团有限公司,湖北 武汉 430071)

**摘要:**为研究湿度对沥青混合料性能影响,采用真空干燥箱和恒温恒湿箱对AC-20C沥青混合料试件进行湿度养生,开展单轴贯入试验、三轴试验、低温弯曲试验以及单轴压缩动态模量试验,获得所选用沥青混合料的高低温性能和不同温度、频率下的动态模量和相位角,并绘制动态模量主曲线。通过分析试验结果,得到如下结论:湿度对沥青混合料的高温性能影响较大,随着湿度增加,沥青混合料黏聚力减小,其高温稳定性主要依靠集料的嵌挤作用;气态水在沥青混合料内部因温度下降而转化为固态会破坏沥青混合料的沥青-集料界面特性,从而导致沥青混合料的低温性能快速下降;湿度对沥青混合料常温黏弹特性也有较大程度影响,具体表现为随着湿度增加,相位角对温度变化更加敏感,同时沥青混合料的动态模量主曲线在低频区间逐渐降低,损害了沥青混合料在该区间抵抗永久变形能力。

**关键词:**道路工程;沥青混合料;湿度;路用性能;黏弹性质

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

## 0 引言

沥青路面有较好的力学性能和行车舒适性,广泛应用于世界各国的高等级公路。但沥青路面在使用初期出现松散、坑洞等水损害现象屡见报道,目前对该现象解释的原因较为统一:水分以液态形式渗入沥青混合料内部,在荷载作用下易产生动水压力和真空吸附作用;同时,集料亲水性质容易诱发水分剥落沥青膜,造成沥青混合料松散、性能下降,在路面服役早期出现病害<sup>[1-2]</sup>。

前期研究者多关注液态水对沥青混合料的影响,采用浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验、汉堡车辙试验等试验手段研究液态水对沥青混合料性能损害作用<sup>[3-4]</sup>。中国高等级道路沥青路面多采用密级配沥青混合料,液态水容易被路表面截留,沿着横坡流向排水沟,并不总是在内部积聚,而且在中国干旱少雨的西北地区也有水损害现象<sup>[5-6]</sup>。液态水对沥青混合料的破坏作用并不是导致沥青路面水损害的唯一原因或者主要原因。传统的研究者对宏观状态下的液态水所造成沥青混合料水损害关注较多,却很少关注路面内部积聚的气态水对沥青混合料的沥青-集料

界面状态的微观破坏作用。近年来,已有相关学者对该领域开展了研究工作,结果表明气态水对沥青混合料的水损害有较大程度贡献,气态水在沥青混合料内部迁移、积聚,并最终对沥青膜产生剥落效果,使沥青路面产生松散、坑洞等典型水损害病害<sup>[7-8]</sup>。刚颖<sup>[9]</sup>通过设计水蒸气扩散试验装置,分析水气扩散系数与温度、相对湿度、绝对湿度之间的关系,得出了增加环境温度、增大环境中相对湿度和绝对湿度都会影响水汽扩散进程的结论;罗晶等<sup>[10]</sup>研究相对湿度对沥青与集料黏附性能的关系,发现湿度增加会损害沥青与集料的黏附性;罗蓉等<sup>[11]</sup>通过真空干燥箱和恒温恒湿箱养护沥青混合料试件,开展了单轴拉伸动态模量试验,绘制了不同湿度下沥青混合料的动态模量和相位角主曲线,发现湿度对动态模量和相位角影响显著。

上述研究多从水气扩散、沥青-集料黏附性能和黏弹性能方向研究湿度对沥青混合料的影响,较少关注其路用性能,从而难以对工程实践有现实的指导作用。总之,沥青混合料足够密实条件下,液态水难以渗透进沥青混合料内部,对沥青混合料的水损害贡献也相对较小,而密级配混合料内部气态水却具有相当程度的自由扩散能力,能够影响沥青混合

收稿日期:2022-10-19

作者简介:毛红卫,男,大学本科,高级工程师.E-mail:44886547@qq.com

料的沥青-集料界面性能,从而造成沥青的黏结性能下降,损害沥青混合料的路用性能。处于自然条件下的路面暴露在大气中,内部的湿度有一个逐渐平衡的过程,可采用一定的技术条件对沥青混合料进行湿度养生,以模拟气态水在沥青混合料内部聚集、迁移,最终剥落沥青膜的过程。

本文借鉴水泥混凝土湿度养生试验,采用恒温恒湿箱对沥青混合料试件进行湿度养生,并开展沥青混合料性能试验。为对比研究干燥情况沥青混合料的性能,把真空干燥箱养生沥青混合料试件作为对照组。探讨湿度对沥青混合料性能影响规律,有利于量化湿度对沥青混合料性能损害程度的研究,

从而指导工程实践。

## 1 材料与方案

### 1.1 试验材料

选择AC-20C沥青混合料作为本文的研究对象,该类型沥青混合料多用于沥青路面中面层,而沥青路面中面层液态水较少,其水损害主要是因为受到了内部积聚的气态水影响。AC-20C沥青混合料采用SBS改性沥青,粗集料为玄武岩、细集料为机制砂,级配见表1。

表1 AC-20C沥青混合料级配

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配上限	100	100	92	80	72	56	44	33	24	17	13	7
级配下限	100	90	78	62	50	26	16	12	8	5	4	3
级配中值	100	95	85	71	61	41	22.5	16	16	11	8.5	5
合成级配	100	98.0	90.8	78.5	51.1	32.7	20.3	14.0	9.4	7.0	5.9	4.9

根据规范<sup>[12]</sup>,确定AC-20C的最佳油石比为4.3%,其基本指标见表2。

表2 AC-20C沥青混合料基本指标

指标	单位	检验结果	技术要求
油石比	%	4.3	
空隙率	%	4.1	3~6
矿料间隙率	%	13.5	≥13.1
沥青饱和度	%	67.9	65~75
流值	mm	2.6	1.5~4.0
稳定度	kN	11.85	≥8.0
动稳定度	次/mm	5 893	≥2 800

## 1.2 试验方案

### 1.2.1 养生条件

采用真空干燥箱模拟0湿度条件,以养护水泥混凝土所用的恒温恒湿箱模拟50%和100%湿度条件,温度为室温(25℃),在真空干燥箱和恒温恒湿箱内对试验所采用的试件养生1年以上,以模拟路面在气态水长期作用下沥青混合料的沥青膜剥落现象。湿度养生后立即采用塑料薄膜对试件进行密封处理,以备后续试验所需。

### 1.2.2 单轴贯入试验

单轴贯入试验条件与路面实际受力状态相吻合,可较好表征沥青混合料的高温性能,能获得沥青混合料高温抗剪强度<sup>[13]</sup>。再加上单轴贯入试验持续时间较短,可避免试件试验时间过长而导致内部湿度条件发生变化。因此,本文选择单轴贯入试验评价湿度对沥青混合料试件高温性能的影响,而并非传统的车辙试验。试验时通过贯入压头在试件上部施加压力,测定贯入压头的应力应变,然后通过力学公式,求出沥青混合料的高温抗剪强度<sup>[14]</sup>。

单轴贯入试验试件尺寸为 $\phi 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ,试验条件为:湿度养生后在60℃保温箱(空气浴)保温5h,采用42mm的压头,以1mm/min的加载速率对试件施加荷载直至破坏为止。

### 1.2.3 三轴试验

路面在荷载作用下,沥青混合料实际处于三向受力状态,因此可以采用三轴试验获得沥青混合料的高温抗剪性能,从而准确表征沥青混合料的高温性能。采用三轴试验评价试件的高温性能主要是为了与单轴试验进行比较,对单轴试验进行补充。采用莫尔-库仑准则分析沥青混合料高温抗剪强度,并

用两个强度参数:黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  作为分析指标<sup>[15-16]</sup>。

由三轴剪切强度试验获得的沥青混合料黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  由以下公式确定<sup>[17]</sup>:

$$p = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 \quad (1)$$

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 \quad (2)$$

$$\varphi = \sin^{-1}(\tan \alpha) \quad (3)$$

$$c = a_0 / \cos \varphi \quad (4)$$

式中: $p$ 为平均正应力; $q$ 为最大剪应力; $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ 分别为最大和最小主应力; $c$ 、 $\varphi$ 为黏聚力和内摩擦角; $\alpha$ 、 $a_0$ 为由3个以上不同围压下三轴试验数据回归得到的  $p$ - $q$  直线的斜率和截距。

三轴试验试件采用尺寸为  $\phi 100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  的圆柱体试件,试验温度为  $60^\circ\text{C}$ 。采用 UTM-100 多功能材料试验系统开展三轴试验,参考相关文献<sup>[17]</sup>,轴向加载速度为  $1.27 \text{ mm/min}$ ,围压分别为  $0$ 、 $138 \text{ kPa}$ 、 $276 \text{ kPa}$ 。

#### 1.2.4 低温弯曲试验

在开展试验之前,将用塑料薄膜密封处理的试件放在低温箱(空气浴)中,在  $-10^\circ\text{C}$  下保温  $6 \text{ h}$ ,此时沥青混合料内部的气态水已经转化为固态。因此,可利用低温弯曲梁试验,测定不同湿度养生条件的沥青混合料试件的弯拉应变和抗弯拉强度,以探讨不同湿度养生下沥青混合料低温性能变化,进而间接反映气态水转化为固态后对沥青混合料的沥青-集料界面特性的影响。低温弯曲试验的评价指标主要有抗弯拉强度  $R_B$  (MPa)、最大弯拉应变  $\epsilon_B$  ( $\mu\epsilon$ ) 和弯曲劲度模量  $S_B$  (MPa),可由试验时最大破坏荷载  $P_B$  及对应的挠度  $d$  计算得到,具体计算公式如下:

$$R_B = \frac{3 \times L \times P_B}{2 \times b \times h^2} \quad (5)$$

$$\epsilon_B = \frac{6 \times h \times d}{L^2} \quad (6)$$

$$S_B = \frac{R_B}{\epsilon_B} \quad (7)$$

式中: $b$ 为跨中断面试件的宽度(mm); $h$ 为跨中断面试件的高度(mm); $L$ 为试件的跨径(mm)。

低温弯曲试验过程参照规范<sup>[12]</sup>,试验温度为  $-10^\circ\text{C}$ ,加载速率为  $50 \text{ mm/min}$ 。试验设备为 UTM-100 多功能材料试验系统。

#### 1.2.5 单轴压缩动态模量

沥青混合料作为典型黏弹性材料,其模量、相位角对温度和荷载频率敏感。因此,本文通过测试不同温度、频率条件下的 AC-20C 沥青混合料压缩动态模量和相位角,基于时温等效原理,将不同温度和加载频率下的动态模量通过移位因子拟合到参考温度主曲线上<sup>[18-19]</sup>。动态模量主曲线模型采用西格摩德模型,见式(8)<sup>[20]</sup>。移位因子可通过 WLF 方程得到,见式(9)。

$$\lg |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(f_f)}} \quad (8)$$

式中: $|E^*|$ 为动态模量(MPa); $\delta$ 为动态模量最小值(MPa); $\alpha + \delta$ 为动态模量最大值(MPa); $\beta$ 、 $\gamma$ 为模型参数; $f_f$ 为频率。

$$\lg \alpha_T = \frac{C_1(T - T_s)}{C_2 + T - T_s} \quad (9)$$

式中: $C_1$ 、 $C_2$ 为常数; $T_s$ 为参考温度; $T$ 为试验温度; $\alpha_T$ 为温度  $T$  时的移位因子。

单轴压缩动态模量试验采用应力控制模式,施加荷载为半正弦波轴向拉应力。试验温度选取为  $5^\circ\text{C}$ 、 $20^\circ\text{C}$ 、 $35^\circ\text{C}$ 、 $50^\circ\text{C}$ ,加载频率选取为  $0.1 \text{ Hz}$ 、 $0.5 \text{ Hz}$ 、 $1 \text{ Hz}$ 、 $5 \text{ Hz}$ 、 $10 \text{ Hz}$ 、 $25 \text{ Hz}$ 。试验由低温向高温,高频向低频依次进行,加载频率间隔  $5 \text{ min}$ ,平行试验次数及加载重复次数采取规范<sup>[12]</sup>推荐值。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 高温性能

根据单轴贯入试验结果,绘制贯入曲线(图1)。

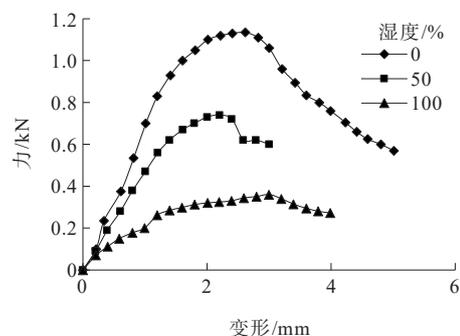


图1 不同湿度养生条件下贯入曲线

根据三轴试验结果,采用前文方法确定了沥青混合料黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ ,结果见表3。

表3 AC-25C 沥青混合料 $c$ 、 $\varphi$ 值

湿度/%	$\sigma_1$ /kPa	$\sigma_3$ /kPa	$c$ /kPa	$\varphi$ /( $^\circ$ )
0	768	0	225	40.2
	1 403	138		
	1 766	276		
50	700	0	202	39.6
	1 264	138		
	1 695	276		
100	666	0	178	40.0
	1 086	138		
	1 670	276		

从图1可以看出:随着湿度增加,沥青混合料贯入强度逐渐减小,因此沥青混合料中的沥青在气态水置换作用下高温稳定性能受到破坏。从表3可以看出:随着湿度增加,黏聚力持续减小,而内摩擦角几乎不变。综合分析图1和表3,可得出结论:

(1) 0湿度养生条件下,沥青混合料的贯入强度随变形先稳定增加后逐步减小,表现出一定的稳定性和规律性,沥青混合料抗剪性能由黏聚力和内摩擦力共同承担,因此其贯入强度衰减有一个平稳的过程。

(2) 50%湿度养生条件下,沥青混合料贯入强度先逐渐增加后突然减小并保持稳定,产生该现象的原因在于气态水对沥青薄膜产生了轻微剥落作用,因此在荷载作用下沥青混合料逐渐丧失强度,曲线后期的强度主要来源于集料骨架作用以及未剥落部分的沥青黏聚力。

(3) 100%湿度养生条件下沥青混合料贯入强度随变形平稳增加,但贯入强度较小,因此可以认为该养生条件下气态水对沥青混合料产生了较强的剥落作用,从而导致沥青黏聚力的快速下降,其高温稳定性主要依靠集料骨架作用。

因此,在路面设计过程中应适当考虑湿度对沥青路面高温性能的影响,通过选择合适的沥青胶结料提高沥青与集料的黏结能力,以提高沥青混合料在湿度/温度耦合作用下的抗剪切能力。

## 2.2 低温抗裂性能

低温弯曲试验结果见表4。从表4可以得出:

(1) 抗弯拉强度 $R_B$ 与最大拉伸应变 $\epsilon_B$ 随着湿度增加逐渐减小,表明湿度养生后沥青混合料内部积聚的气态水转化为固态之后损害了沥青混合料的低温性能。

表4 低温弯曲试验结果

湿度/%	$R_B$ /MPa	$\epsilon_B$ / $\mu\epsilon$	$S_B$ /MPa
0	9.73	1 612	6 036
50	8.62	1 482	5 816
100	6.05	1 048	5 773

(2) 弯曲劲度模量 $S_B$ 也随着湿度增加而减小,证实了混合料内部集料表面的部分沥青被水分置换,导致其界面特性发生变化,从而使得其模量减小,低温抗裂性能下降。

## 2.3 黏弹性能

黏结性能试验结果见图2、3。

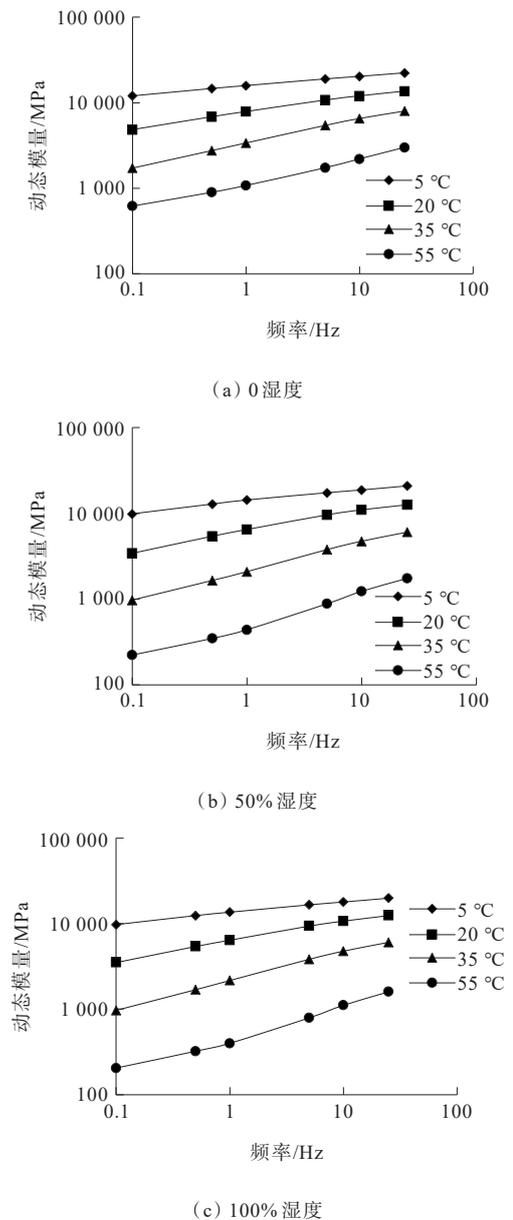


图2 动态模量随加载频率变化曲线

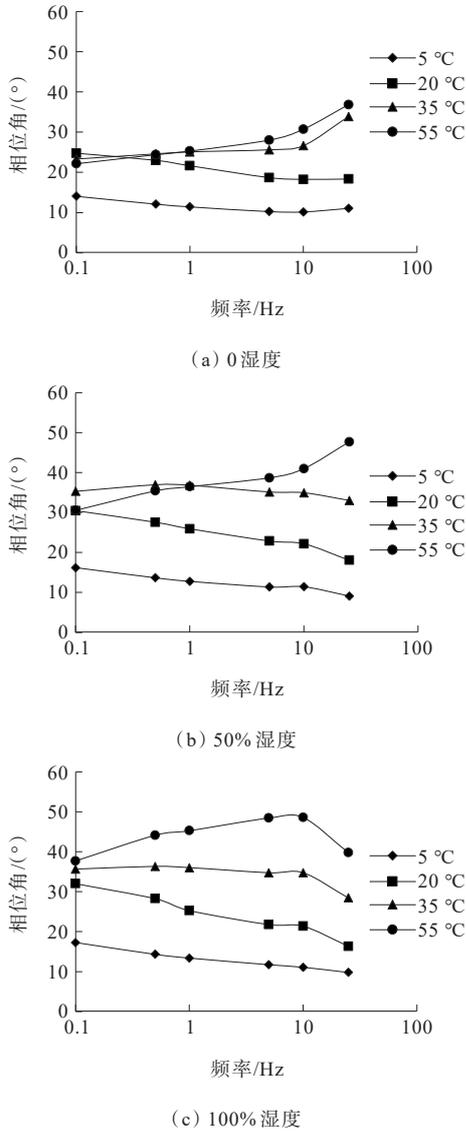


图3 相位角随加载频率变化曲线

从图2可以看出:不同湿度养生条件下沥青混合料随着加载频率的增加,动态模量均表现为先平缓增大。在5℃、20℃、35℃条件下,在低频范围相对陡峭而在高频范围相对平缓。在55℃条件下,低频平缓而高频陡峭。表明不同养生条件下的沥青混合料均对加载频率和温度有较大的敏感性。同时,随着湿度增加,35℃与55℃动态模量变化曲线间距增大,低频区间与高频区间的曲线斜率差距增大,湿度因素加剧了沥青混凝土的温度敏感性和荷载频率敏感性。

从图3可知:随着湿度的变化,相位角变化规律有较大的改变,主要在相位角随频率变化规律和相位角随温度变化规律方面有较大不同。具体而言,高频时,0湿度沥青混合料相位角增大,表明沥青混

合料偏弹性性质,抵抗永久变形的能力有所提高,而50%、100%湿度下沥青混合料在高频下相位角甚至还有下降趋势。同时,随着湿度增加,不同温度下的相位角曲线间隔增大,表现出了较强的温度敏感性。因此,可以认为湿度对沥青混合料沥青-集料界面性质的破坏改变了沥青混合料的黏弹性质,从而导致沥青混合料在高频下抵抗变形能力下降。

不同湿度养生条件下沥青混合料的动态模量主曲线见图4。移位因子及拟合参数见表5、6。

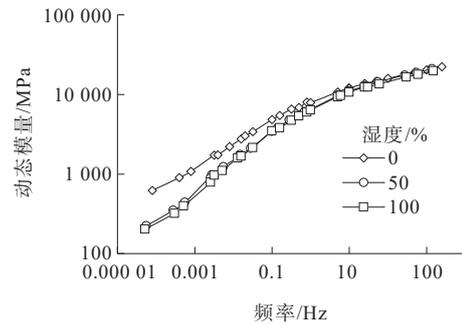


图4 不同湿度动态模量主曲线

表5 移位因子

湿度/%	不同温度(℃)下的移位因子			
	5	20	35	55
0	2.001	0	-1.495	-3.097
50	1.744	0	-1.553	-3.252
100	1.778	0	-1.485	-3.284

表6 西格摩德模型拟合参数

$\delta$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$R^2$
2.794	1.556	-0.975	0.785	0.989 1
2.350	1.972	-1.157	0.799	0.988 6
2.310	1.986	-1.208	0.815	0.988 9

从图4可以看出:50%和100%湿度养生条件下的沥青混合料主曲线与0湿度有明显差别,具体表现为在低频区间低于0湿度,而在高频区间逐渐接近。表明湿度对沥青混合料的低频区间动态模量影响较大,损害了沥青混合料抵抗低速荷载作用下长期变形的能力。值得注意的是,50%湿度条件与100%湿度条件的动态模量主曲线几乎重合。因此,可以推测出气态水对沥青混合料黏弹性能有一定程度影响,但一旦湿度超过某个阈值之后,其影响甚微。考虑到本文的试验重复次数满足规范要求,且试验过程未发现明显试验误差。为了合理解释该现象,需

要研究沥青-集料界面微观变化情况。

### 3 结论

以真空干燥箱和恒温恒湿箱分别创造0、50%、100%湿度的养生环境,将试验所需的试件在上述环境中养生1年,模拟自然界水汽对沥青混合料的破坏作用,开展了单轴贯入试验、三轴试验、低温弯曲试验和单轴压缩试验,得出以下结论:

(1) 气态水(即湿度)对沥青混合料高温性能影响不可忽视,湿度的长期作用将会造成沥青混合料黏聚力下降以及强度下降。

(2) 湿度对沥青混合料的低温性能影响较大,沥青混合料内部积聚的气态水在外部温度下降时将会转化为固态,从而影响沥青-集料的界面性能,导致其低温性能下降。

(3) 湿度对沥青混合料的常温黏弹性能有显著影响,50%和100%湿度养生条件下动态模量主曲线在低频区间低于0湿度;随着湿度增加,相位角对温度的敏感性增加;湿度对单轴压实状态的常温黏弹性破坏作用有一个阈值,超过阈值之后湿度影响便不显著,对该现象的解释需要进一步研究沥青混合料内部沥青-集料界面的微观形态。

#### 参考文献:

- [1] 龚先祁. 矿料与沥青粘附性对混合料水损害的影响机理研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2017.
- [2] 杨美荣. 沥青路面水损害原因及其防治措施研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2006.
- [3] 何中楠. 长期浸水对沥青和集料-沥青界面性能损伤的试验研究[J]. 中外公路,2012,32(2):261-263.
- [4] 曾俊,肖高霞,罗志刚. 沥青混合料水稳定性试验评价方法综述[J]. 公路交通技术,2011,27(1):40-46.
- [5] 陈少全. 甘肃高速公路沥青路面水损害及防治措施研究[D]. 西安:长安大学,2011.
- [6] 牛思学. 甘肃省沥青路面水损坏调查分析[J]. 甘肃科技,2010,26(21):132-134.
- [7] SASAKI I, MORIYOSHI A, HACHIYA Y. Water/gas permeability of bituminous mixtures and involvement in blistering phenomenon[J]. Journal of the Japan Petroleum Institute,2006,49(2):57-64.
- [8] 黄婷婷. 沥青混合料内部积聚型水气运动机理研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2018.
- [9] 刚颖. 温湿度影响下沥青混凝土水汽扩散特征分析[D]. 邯郸:河北工程大学,2018.
- [10] 罗晶,罗蓉,涂崇志. 相对湿度对沥青与集料黏附性的影响[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2021,45(4):757-762.
- [11] 罗蓉,侯强,刘涵奇. 湿度对沥青混合料黏弹性的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(8):77-83.
- [12] 交通运输部公路科学研究院. 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.
- [13] 毕玉峰,孙立军. 沥青混合料抗剪试验方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2005,33(8):1036-1040.
- [14] 许严,孙立军,刘黎萍. 基于单轴贯入重复剪切试验的沥青混合料永久变形[J]. 同济大学学报(自然科学版),2013,41(8):1203-1207.
- [15] WANG H, AL-QADI I L. Near-surface pavement failure under multiaxial stress state in thick asphalt pavement[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2010,2154(1):91-99.
- [16] ZHU S Y, FU Q, CAI C B, et al. Damage evolution and dynamic response of cement asphalt mortar layer of slab track under vehicle dynamic load[J]. Science China Technological Sciences,2014,57(10):1883-1894.
- [17] PELLINEN T K, XIAO S Z. Relationship between triaxial shear strength and indirect tensile strength of hot mix asphalt[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists,2005,74:347-379.
- [18] 陈静云,孙依人,张岩,等. 沥青混合料动态粘弹性行为分析的模拟方法[J]. 中国公路学报,2014,27(8):11-16.
- [19] ROULEAU L, DEÛ J F, LEGAY A, et al. Application of Kramers-Kronig relations to time-temperature superposition for viscoelastic materials[J]. Mechanics of Materials,2013,65:66-75.
- [20] 马翔,倪富健,陈荣生. 沥青混合料动态模量试验及模型预估[J]. 中国公路学报,2008,21(3):35-39,52.