

基于数值模型的农膜改性沥青流变性研究

杨帅, 吴建涛, 刘泉, 陈俊

(河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了研究废旧农膜塑料对基质沥青流变性的改性效果,采用高速剪切法制成0%、2%、3%共3种含量(质量分数)改性沥青样品并进行动态剪切流变仪(DSR)频率扫描测试。首先运用 Master Curve 和 Black-Diagram 定性分析了不同改性沥青试样的流变性;然后基于 Sigmoidal、CAM 和 2S2P1D 共3种典型的流变数值模型拟合不同改性沥青试样的复数剪切模量主曲线,对比模型参数差异量化分析农膜掺量对沥青改性效果的影响。研究结果表明:农膜改性沥青与原样沥青流变性之间存在较大差异,农膜掺量增加至3%时,农膜改性沥青呈现典型的塑性类改性沥青特征。该文选取的3种数值模型均能较好地拟合不同改性样的复数剪切模量主曲线,数值模型参数是量化区分不同沥青流变性的有效手段。因不同数值模型的构建原理存在差异,区分流变性差异的量化指标也会发生变化。

关键词: 数值模型; 农膜改性沥青; 动态剪切流变仪; 流变性

大棚农膜技术的广泛应用也伴随着废旧残留农膜的环境污染,农膜的主要成分是聚乙烯,而聚乙烯(PE)改性沥青是典型的聚合物改性方法之一,在中国的路面工程中很早就得到了应用(1988年北京东长部分路段采用的就是聚乙烯改性沥青),因此运用农膜改性沥青既能改善沥青路用性能又能够有效解决废旧农膜的污染问题。已有研究中聚乙烯对沥青性能的影响还存在争议,特别是低温性能,Beker认为PE聚合物对沥青结合料的低温性能没有改善作用,Hesp则从断裂力学的角度分析了聚乙烯对沥青低温性能的改善。这些不确定因素使得PE改性沥青没有在工程中得到进一步的推广和普及。

对流变性的正确认识是沥青路面设计的基本前提。1954年Van der Poel首次提出Shell诺谟图来预测沥青结合料的劲度模量,此后研究者们发展了许多沥青及沥青混合料流变模型,这些流变模型主要分为两大类:①数值模型,主要包含Sigmoidal模型、CA模型、CAM模型、MCAM模型以及分数模型;②流变模型,主要包括Kelvin模型、Maxwell模型、Huet模型、Huet-Sayegh模型以及2S2P1D模型。国内外运用流变模型对沥青流变性进行预测的研究很多,但是将流变模型作为评价沥青改性效果的研究还较少。

该文基于DSR研究农膜改性沥青结合料的流变

性能,定性分析不同掺量改性沥青的黏弹性;基于Sigmoidal、CAM和2S2P1D共3种典型的流变数值模型对不同改性沥青试样的复数剪切模量主曲线进行拟合,通过比较拟合的模型参数,定量分析不同改性沥青试样流变性之间的差异,并分析流变数值模型作为评价沥青改性效果的方法的适用性。

1 试验材料与研究方案

1.1 试验材料

试验采用的基质沥青为70#道路石油沥青,其3大指标测试结果满足JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》相关要求。选用的普通大棚农膜主要成分为LDPE,剪切成约10 mm×1 mm的丝状形态,见图1(a)。

1.2 改性工艺

如图1(b)所示,研究采用高速剪切法对基质沥青进行改性,试验中根据梯度递增分别按照2%、3%、4%的质量比向沥青中投放农膜,在4 000 r/min的速率下对沥青和农膜的混溶物进行高速剪切搅拌,试验过程温度控制在(163±5)℃,剪切约40 min后得到改性沥青样品。图1(c)为农膜2%掺量改性沥青样品,从图中可以看出:沥青与农膜混溶情况良好,无明

收稿日期:2018-12-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51108157);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:2015B17214)

作者简介:杨帅,男,硕士研究生,E-mail:1466780550@qq.com

显改性剂析出现象。

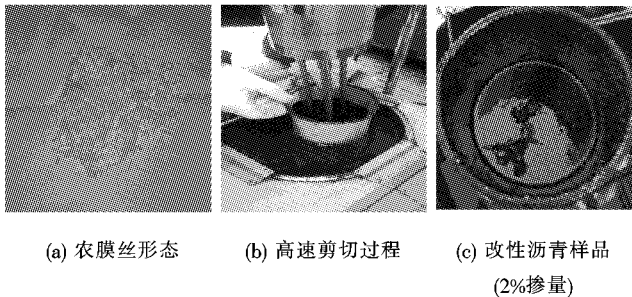


图 1 改性沥青配制工艺示意图

1.3 试验研究方案

该文基于 DSR 对不同掺量的农膜改性沥青试样进行频率扫描试验并绘制复数剪切模量主曲线、相位角主曲线以及 Black-Diagram 曲线,在此基础上定性分析不同掺量改性沥青之间的流变性差异;基于流变数值模型对复数剪切模量主曲线进行拟合,比较各模型参数异同并量化分析不同沥青试样的流变性差异。

频率扫描测试能够得到沥青类材料在不同温度一定频率变化范围内的各项流变性指标,基于时温等效原理得到的主曲线能够更加全面地反映沥青的流变特性。试验采用由美国 TA 公司生产的 AR1500^{ex} 动态剪切流变仪,各项试验参数选择如下:① 加载模式:应变控制模式;② 温度范围:35~85 °C (5 °C 一个梯度);③ 频率范围:0.1~10 Hz;④ 测试片:25 mm 直径和 1 000 μm 间距;⑤ 应变值:0.1% (黏弹线性范围内)。

2 流变模型

不同流变模型存在着一定的差异性,其物理意义及应用存在着区别,对沥青流变性的区分度也不尽相同。该文选用 3 种不同的典型流变模型,采用不同的量化指标,对沥青流变性进行描述,便于从多角度判断沥青流变性,同时还能够观察不同流变模型对沥青流变性的适用性。

2.1 Sigmoidal 模型

NCHRP(美国国家公路合作研究项目)建议采用 Sigmoidal 模型来描述沥青的主曲线结构,因为主曲线结构与 Sigmoidal 函数曲线极为相似,所以将 Sigmoidal 函数引入到主曲线描述中,式(1)为沥青 Sigmoidal 模型表达式:

$$\log |G^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log \omega}} \quad (1)$$

式中: G^* 为复数剪切模量; ω 为换算频率; δ 为模型下部水平渐近线的值; α 为两条水平渐近线的距离; β 和 γ 为形状参数。

每个模型参数定义见图 2(a)。通常沥青结合料的玻璃态模量为 1 GPa,在实际拟合过程中可以认为 δ 与 α 之和为 9。

2.2 CAM 模型

Christensen 和 Anderson 在 SHRP 中对 8 种典型的沥青进行动态力学分析(DMA),提出了 CA 模型。CA 模型认为 4 个主要的参数能够充分地描述任何沥青的流变性质,分别是玻璃态模量 G_g 、稳定黏度、交叉频率和流变指数 R 。图 2(b)为 CA 模型相关参数的含义,复数剪切模量的表达式如下:

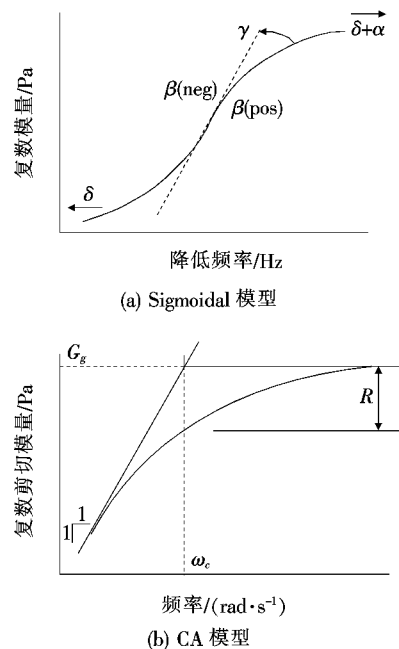


图 2 流变数值模型示意图

$$|G^*| = G_g \left[1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)^{\frac{R}{\log 2}} \right] \quad (2)$$

Marasteanu 和 Anderson 在 CA 模型的基础上进行了优化,提出了 CAM 模型,具体函数表达式如下:

$$|G^*| = G_g \left[1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)^v \right]^{-\frac{w}{v}} \quad (3)$$

式中: v 、 w 为主曲线模型的拟合参数。

2.3 2S2P1D 模型

2S2P1D 模型是由两个弹性元件(S)、两个非线性元件(P)和一个线性黏性元件(D)构成的流变模型,见图 3。2S2P1D 模型由广义 Heut-Sayegh 模型发展得到,可以同时描述沥青胶结料和混合料的流变性能,包

含 7 个模型参数,具体表达式如式(4):

$$G^* = G_0 + (G_\infty - G_0) / [1 + \alpha(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}] \quad (4)$$

式中: h 和 k 为 $0 \sim 1$ 之间的指数; d 为无量纲常数; τ 为加载时间; β 为与温度有关的常数; i 为复数符号; ω 为频率; G_∞ 为玻璃态模量; G_0 为频率接近 0 时的极限模量。

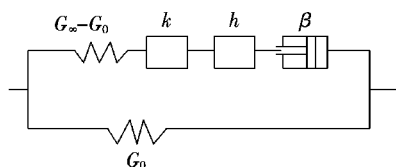


图 3 2S2P1D 模型示意图

3 结果与讨论

3.1 定性分析

(1) 等时曲线

前期试验结果表明:以 3% 和 4% 质量比向沥青中投放农膜,其改性沥青复数剪切模量随温度的变化曲线极为接近。为了区分不同农膜质量比对沥青改性的影响,故将 4% 掺量舍去,仅选择 2% 以及 3% 掺量进行对比。

在一定连续频率或者加载时间作用下系统的行为规律称为等时曲线。该文选取 1.6 Hz 荷载作用频率绘制复数剪切模量随温度变化的等时曲线,得到图 4。

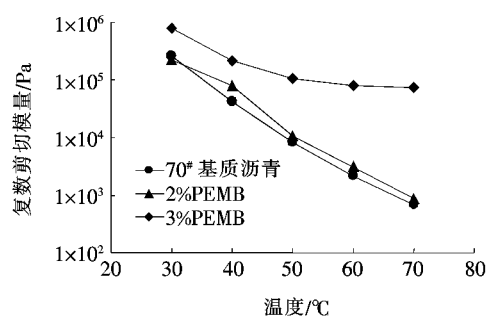


图 4 农膜改性沥青等时曲线

从图 4 可以看出:农膜的掺入整体提高了沥青结合料的复数剪切模量。当掺量为 2% 时,改性沥青与原样沥青的等时曲线基本平行,说明改性沥青与原样沥青的温度敏感性相同。当掺量增加至 3% 时,改性沥青的等时曲线较原样沥青发生明显的变化且温度敏感性明显减小。

(2) Master Curve

图 5 为不同掺量农膜 PE 改性沥青的复数剪切模量和相位角主曲线。

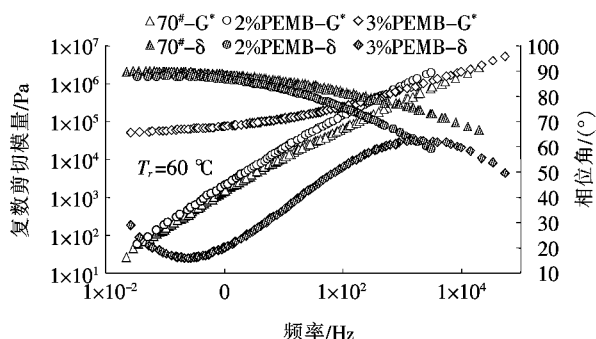


图 5 不同掺量农膜改性沥青主曲线

从图 5 可以看出:随着农膜掺量的增加,复数剪切模量主曲线逐渐向上移动,相同频率作用下农膜掺量越高,复数剪切模量越大,说明农膜的加入提高了沥青的复数剪切模量;高频荷载/低温作用时,3 种含量改性沥青的复数剪切模量主曲线差别不大,这说明在高频荷载/低温作用下,农膜在结合料中的改性作用基本没有发挥,随着频率的降低/温度的升高,3% 含量改性沥青的复数剪切模量主曲线与 2% 含量改性沥青的主曲线差距越来越大,说明随着频率的降低/温度的升高,农膜的改性作用逐步显现,比较 3 种含量改性沥青的复数剪切模量主曲线可以发现,当农膜掺量为 3% 时能够有效地改善沥青结合料的高温性能。

从图 5 中还可以看出:随着农膜掺量的增加,相位角主曲线逐渐向下移动,相同频率作用下农膜掺量越高,相位角越小,这说明农膜的加入提高了沥青结合料中的弹性比例,改善了沥青结合料的抗车辙性能。另一方面,3% 含量改性沥青的相位角主曲线呈现“S”形,在 $0.1 \sim 10\,000$ Hz 变化区间内,改性沥青的相位角随着频率的降低而降低,沥青的黏性成分比例并没有随着频率的降低(温度的升高)而增加,这是因为当农膜的掺量达到 3% 时,沥青内部的结构发生了变化,Gordon 等的研究都曾多次论述过改性沥青内部结构会随着改性剂含量增加而改变,在一定范围内该变化往往能够改善改性沥青的性能。

(3) Black-Diagram 曲线

Black-Diagram 曲线中没有时间和温度的参数,只表征沥青复数剪切模量和相位角之间的关系,能够更加直观地反映沥青结合料的流变性差异。图 6 为基质沥青、2% 和 3% 含量改性沥青的 Black-Diagram 曲线。

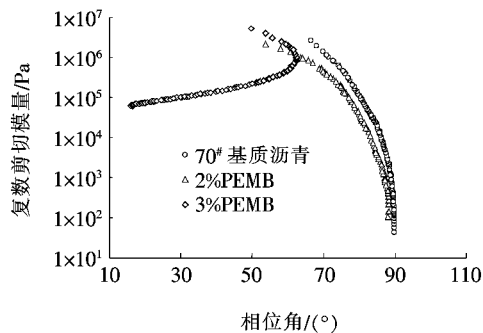


图 6 农膜改性沥青 Black-Diagram 曲线

从图 6 可以看出:2%含量农膜改性沥青的 Black-Diagram 曲线与基质沥青的 Black-Diagram 曲线基本保持一致,说明基质沥青中掺入 2% 含量的农膜并没有从根本上改变沥青的流变特性;但是 3% 含量农膜改性沥青的 Black-Diagram 曲线与基质沥青的 Black-Diagram 曲线有明显的差别。3% 含量农膜改性沥青的 Black-Diagram 曲线复数剪切模量普遍较高,且变化幅度较小,此外,3% 含量农膜改性沥青的 Black-diagram 曲线中随着复数剪切模量的增加,相位角先增大后减小,这表明农膜含量为 3% 时,在高温/低频条件下虽然复数剪切模量减小,但弹性成分比例在增加,农膜的掺入改变了沥青结合料的黏弹成分比例。

3.2 定量分析

该文采用 Excel 中的 Solver 模块分别构建农膜改性沥青的 Sigmoidal、CAM 和 2S2P1D 模型,在前人研究的基础上拟定各个参数的取值区间,通过模块中的演化算法求得最优解。

(1) Sigmoidal 模型

图 7 为农膜改性沥青 Sigmoidal 模型的拟合结果。

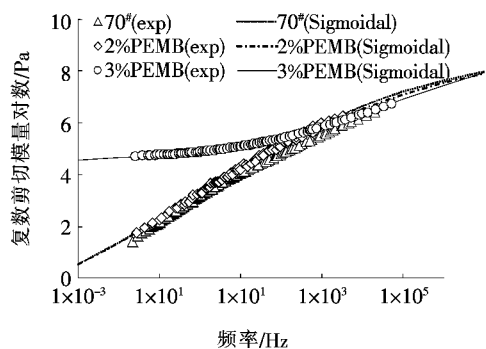


图 7 不同掺量农膜改性沥青 Sigmoidal 模型

从图 7 可以看出:Sigmoidal 模型能够很好地拟合

基质沥青和农膜改性沥青的流变特性。2%农膜含量改性沥青的 Sigmoidal 模型与基质沥青的 Sigmoidal 模型基本保持一致,这与定性分析结果相吻合。

表 1 为 3 种沥青 Sigmoidal 模型的各参数值。

表 1 农膜改性沥青 Sigmoidal 模型参数

沥青种类	δ	α	β	γ
70# 基质沥青	-2.87	11.87	0.2	-0.32
2%PEMB	-2.80	11.8	0.2	-0.33
3%PEMB	4.52	4.48	2.89	-0.52

从表 1 可以看出:基质沥青与 2%改性沥青 3 个参数差别很小,3%改性沥青的 3 个模型参数与基质沥青有很大的不同, δ 与高温条件下的沥青强度有关,3%改性沥青的 δ 值从负变为正,说明高温条件下 3%改性沥青的强度明显改善, γ 与沥青的温度敏感性有关,3%改性沥青的 γ 值从-0.32 变化到-1,说明 3%改性沥青的温度敏感性降低,由此可以判断 3%掺量改性沥青性能改性更优,即 3%掺量为最优掺量。

(2) CAM 模型

图 8 为农膜改性沥青 CAM 模型的拟合结果。

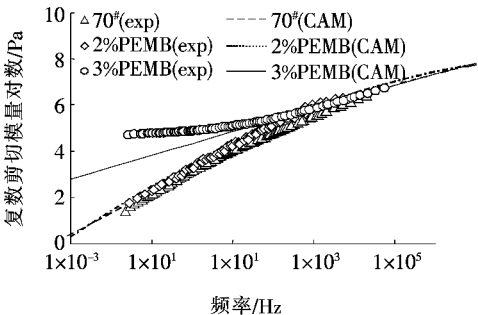


图 8 不同掺量农膜改性沥青 CAM 模型拟合

从图 8 可以看出:CAM 模型对基质沥青及 2%改性沥青的试验数据拟合良好,但是对于 3%改性沥青高温条件下的试验数据拟合性较差,说明 CAM 模型对高浓度改性沥青存在不适用性。

表 2 为 3 种沥青 CAM 模型的各参数值。

表 2 农膜改性沥青 CAM 模型参数

沥青种类	w	ν	ω_c / MHz	G_g
70# 基质沥青	0.95	0.18	4.679	7.82×10^8
2%PEMB	1.31	0.13	0.007	7.82×10^8
3%PEMB	0.50	0.58	8765.213	8.17×10^8

从表 2 可以看出:基质沥青与 2%改性沥青的 ν 数值相近,但是比较 ω_c 值可以发现:2%改性沥青远远

小于基质沥青,这说明 CAM 模型对沥青流变性质的区别能力优于 Sigmoidal 模型,利用 CAM 模型评价沥青的流变性更加能够辨别出沥青流变性之间的差异。

(3) 2S2P1D 模型

图 9 为农膜改性沥青 2S2P1D 模型的拟合结果。

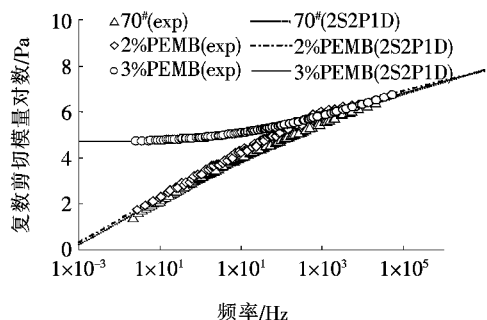


图 9 不同掺量农膜改性沥青 2S2P1D 模型拟合

从图 9 可以看出:2S2P1D 模型也能够很好地拟合基质沥青和农膜改性沥青的流变特性;3%含量改性沥青与基质沥青的 2S2P1D 模型主要差别在于高温/低频条件下,3%含量改性沥青的复数剪切模量极限值

不等于 0,而是在 50 000 Pa 附近,表明 3%含量改性沥青在高温条件下的强度是由网状结构的农膜和沥青结合料共同组成;在低温/高频条件下,3 种沥青结合料的模型曲线基本重合,这表明在低温条件下,农膜改性的作用没有发挥出来。

表 3 为 3 种沥青 2S2P1D 模型的各项数值。从表 3 可以看出:3%改性沥青的 τ 值小于基质沥青,这表明农膜的掺入改善了沥青的温度敏感性。对于 4 个形状参数,2%改性沥青和基质沥青略有差异,但是 3%改性沥青与基质沥青的形状参数差别很大, h 、 α 和 β 都发生了数量级的改变,这说明此时两种沥青的流变性质已经有很大的差异;在实际拟合过程中,拟合结果对 k 值变化的敏感性不强,说明 3 种沥青结合料在复数剪切模量逐渐收敛于 1 GPa 时,3 种沥青的收敛方式相近,表明低温/高频条件下 3 种沥青的流变性质相似。

综上分析表明:低温/高频条件下,掺加农膜对沥青改性影响不大;高温/低频条件下,掺加农膜对沥青改性影响较大,最优掺量为 3%。

表 3 农膜改性沥青 2S2P1D 模型参数

沥青种类	G_0	$G_g/(\times 10^9)$	k	h	α	$\tau/(\times 10^{-9})$	β
70# 基质沥青	0	1	0.54	0.01	1.5	0.26	1 000
2%PEMB	0	1	0.44	0.02	2.5	0.29	1 200
3%PEMB	50 000	1	0.50	0.50	21.0	36.00	2 000

4 结论

基于 DSR 试验研究了农膜(LDPE)在沥青改性中的应用效果、农膜,不同掺量对改性沥青流变性能的影响,并分别构建了 Sigmoidal、CAM 和 2S2P1D 3 种流变数值模型。得出以下主要结论:

(1) 农膜的掺入能够显著改善沥青的高温流变性能,农膜含量为 3%时,沥青结合料的复数剪切模量增加明显,农膜对沥青的改性作用发挥显著;农膜含量为 4%时,沥青结合料的复数剪切模量与农膜含量 3%时极为接近,其改性作用显著下降,因此农膜含量 3%为最优含量。

(2) Sigmoidal、CAM 和 2S2P1D 3 种流变数值模型均能很好地描述改性沥青的流变性,但是 CAM 对于高浓度改性沥青存在不适用性。所以采用流变模型

对沥青结合料进行流变性描述时要考虑其适用性。

(3) 数值模型参数是量化区分不同沥青流变性的有效手段。选取不同的流变模型,量化的指标也会有所差异,且不同的模型参数对流变性的区分度也不同。2S2P1D 模型量化指标更为准确,对流变性区分度较高,在 3 种流变数值模型中相对更好。

参考文献:

- [1] 肖川,蒋兴华,杨锡武,等.废旧塑料改性沥青储存稳定性试验[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2011(5).
- [2] 赵可,杜月宗.PE 复合改性沥青技术研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2010(6).
- [3] 原健安.PE 改性沥青中几个问题的讨论[J].西安公路交通大学学报,1999(1).
- [4] 黎珍薇,夏传荪.聚乙烯改性沥青在首都机场高速公路上的应用[J].公路,1994(7).
- [5] 李同祥.PE 改性沥青的路用研究[J].中国公路学报,1994(1).

基于宏观性能及细观结构的多尺度道路 混凝土抗盐冻性能研究

刘策

(中建路桥集团有限公司, 河北 石家庄 050000)

摘要:道路混凝土暴露于自然环境中受到冻融循环与除冰盐的共同作用,导致内部结构疏松、微裂纹扩展,最终造成道路混凝土宏观性能迅速衰减、耐久性劣化。为了从本质上研究道路混凝土盐冻劣化机理,对盐冻作用下的道路混凝土宏观性能衰减进行研究,采用压汞法及 SEM 对盐冻作用下的道路混凝土细观结构进行表征,从宏观性能及细观结构多尺度研究道路混凝土抗盐冻性能。试验结果表明:盐冻作用下道路混凝土相对动弹性模量不断减小、累积剥落量逐渐增加;与冻融单因素作用相比,盐冻作用下试件的劣化更严重,当冻融 150 次后盐冻下试件动弹性模量比冻融单因素时低 11.4%(含气量 4%)、6.3%(含气量 6%),累积剥落量比冻融单因素作用时增长 36.7%(含气量 4%)、47.1%(含气量 6%)。盐冻作用的结晶膨胀效应、渗透效应及温度梯度效应综合作用,造成道路混凝土临界孔径、最可几孔径及平均孔径减小,混凝土内部孔隙不断细化、孔隙连通性提高、渗透路径的曲折性降低;与冻融单因素作用相比,盐冻作用下的多害孔比例增加 1.5 倍(含气量 2%)、0.6 倍(含气量 4%)、1.1 倍(含气量 6%)。

关键词:道路混凝土;盐冻作用;宏观性能;细观结构

1 前言

水泥混凝土由于其强度高、耐久性好、使用寿命长等优点被广泛用于路面、桥梁等道路工程结构物中,然

而实际工作下的道路混凝土暴露于自然环境中,受到温度、腐蚀、应力等环境因素的综合作用。特别是中国北方地区冬季采用除冰盐清除路面、桥面积雪,道路混凝土受到盐冻腐蚀作用表面剥蚀、微裂纹扩展,导致水泥浆体剥落、宏观裂缝产生、内部结构疏松,最终造成

- *****
- [6] Becker Y, Mendez M, Rodriguez Y. VISION TECNOLÓGICA, 2001, 9(1): 39—50.
 - [7] Student S A M H, Woodhams R T. Asphalt—Polyolefin Emulsion Breakdown[J]. Colloid and Polymer Science, 1991, 269(8): 825—834.
 - [8] Munera J C, Ossa E A. Polymer Modified Bitumen: Optimization and Selection[J]. Materials & Design, 2014, 62: 91—97.
 - [9] Airey G D, Mohammed M H, Fichter C. Rheological Characteristics of Synthetic Road Binders[J]. Fuel, 2008, 87(10—11): 1 763—1 775.
 - [10] Yusoff N I M, Jakarni F M, Nguyen V H, et al. Modelling the Rheological Properties of Bituminous Binders U-

- sing Mathematical Equations[J]. Construction and Building Materials. 2013, 40: 174—188.
- [11] Yusoff N I M, Shaw M T, Airey G D. Modelling the Linear Viscoelastic Rheological Properties of Bituminous Binders[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(5): 2 171—2 189.
- [12] Airey G D. Fundamental Binder and Practical Mixture Evaluation of Polymer Modified Bituminous Materials[J]. International Journal of Pavement Engineering. 2004, 5(3): 137—151.
- [13] Airey G D. Use of Black Diagrams to Identify Inconsistencies in Rheological Data[J]. Road Materials and Pavement Design. 2002, 3(4): 403—424.

收稿日期: 2019—08—04(修改稿)

作者简介: 刘策, 男, 大学本科, 高级工程师, E-mail: 496349807@qq.com