文章编号:1673-9469(2022)04-0056-06

DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-9469. 2022. 04. 008

基于流变学方法的沥青中高温性能及胶浆抗剪强度研究

张泽¹,白子玉^{1*},贺玉莹²,姜涛³,曹东伟⁴

(1. 重庆交通大学 土木工程学院,重庆 400074;2. 河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056000;

3. 大连海洋大学 海洋与土木工程学院,辽宁 大连 116023;4. 中路高科交通检测检验认证有限公司,北京 100088)

摘要:为了探究不同改性剂对基质沥青各项性能指标的改性效果,选取三种不同的改性沥青,SBS 改性沥青、TPE 改性沥青和高黏高弹改性沥青,进行室内试验研究对比。通过改性沥青胶浆锥入度试验、PG 高温分级试验、温度扫描试验和 MSCR 试验,从抗剪强度、中高温性能、抗永久变形及变形恢复等方面系统地评估三种改性沥青的路用效果。研究结果表明:改性沥青及胶浆的制备,需要将制备时间、剪切速率、温度等参数严格控制在合理的范围之内,保证材料满足要求;各种沥青胶浆抗剪强度与温度呈现良好的相关性,并且各个回归方程的相关系数 R^2 非常高,TPE 改性沥青胶浆有着较高的抗剪强度;三种改性沥青流变试验显示,TPE 改性沥青的中高温抗变性能力和高温蠕变恢复能力最佳,高黏高弹改性沥青次之,SBS 改性沥青低于前两种沥青。

关键词: 道路工程:改性沥青:沥青胶浆:抗剪强度:流变性能

中图分类号:U414

文献标识码:A

Study on Mid-high Temperature Performance Based on Rheological Method and Shear Strength of Asphalt Mortar

ZHANG Ze¹, BAI Ziyu^{1*}, HE Yuying², JIANG Tao³, CAO Dongwei⁴

- (1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
- 2. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056000, China;
- 3. College of Ocean and Civil Engineering, Dalian Ocean University, Dalian, Liaoning 116023, China;
 - 4. Middle Road High-tech Traffic Inspection and Certification Co. ,Ltd. ,Beijing 100088, China)

Abstract: In order to explore the modification effect of different modifiers on various performance indexes of matrix asphalt, three different modified asphalts, SBS modified asphalt, TPE modified asphalt and high viscosity and high elasticity modified asphalt were selected for indoor test and comparison. Through the cone penetration test of modified asphalt mortar, PG high temperature classification test, temperature scanning test and MSCR test, the pavement effects of the three modified asphalts are systematically evaluated from the aspects of shear strength, medium and high temperature performance, permanent deformation resistance and deformation recovery. The results show that the preparation of modified asphalt and mortar needs to strictly control the preparation time, shear rate, temperature and other parameters within a reasonable range to ensure that the material meets the requirements. The shear strength of various asphalt mortars has a good correlation with temperature, and the correlation coefficient R^2 of each regression equation is very high, and the TPE modified asphalt mortar has a high shear strength. The rheological tests of three modified asphalts show that TPE modified asphalt has the best medium-high temperature anti-denatured ability and high temperature creep recovery ability, followed by high viscosity and high elasticity modified asphalt, and SBS modified asphalt is lower than the first two asphalts.

收稿日期:2022-07-12

基金项目:河北重大科技专项(190438172);河北省交通运输厅科技项目(XF2018-10)

作者简介:张泽(1995-),男,河北张家口人,硕士,研究方向:道路与铁道工程。

^{*}通讯作者:白子玉(1995-),男,山西临汾人,博士研究生,研究方向:道路与铁道工程。

Key words: road engineering; modified asphalt; asphalt mortar; shear strength; rheological properties

为了满足路面使用需求,各个专家团队研发 各种新型的改性沥青,在实际道路工程中被广泛 使用[1]。高黏高弹改性沥青是一类特种沥青,一 般将其应用于特殊工程,比如交通量、荷载量较 大或者比较重要的公路路段,桥隧铺装等,解决 重载交通带来的车辙、路面开裂的一系列问 题[2-5]。TPE 改性沥青是利用热塑性弹性体 (TPE)材料与沥青发生反应得到的一种复合改 性沥青,热塑性弹性体(TPE)材料是通过塑胶和 橡胶两种不同的高分子原材料制得,但是由于两 者的价格转高,现将橡胶粉的分散相和线型低密 度聚乙烯(Linear Low-Density Polyethy-lene, LL-DPE) 改性剂共混反应,得到性能相当的改性材 料,这样也可以实现废旧橡胶粉的循环利用,达 到绿色发展的目的[6-11]。张争奇[12]等通过材料 比选和优化确定高黏高弹沥青制备参数,并分析 其复合改性机理。谭吉昕[13]通过均匀试验设计 和数据拟合,确定改性剂的最佳掺量,制备橡塑 合金改性高粘沥青,并对其进行性能验证,并研 究其改性机理。孔令云[14]等制备了5种改性沥 青,并对比它们的高低温性能,改性机理以及微观 结构。

本文以 SBS 改性沥青、TPE 改性沥青以及高黏高弹改性沥青为研究对象,通过室内试验,对三种沥青及其胶浆材料的抗剪强度与流变性能展开分析,分析不同沥青的优缺点,为几种沥青以后的研究与应用提供新的理论支撑。

1 试验原材料

1.1 沥青

制备高黏高弹沥青:将备用的基质沥青在 180 ℃~185 ℃温度下进行剪切,转速为 2 000 ~ 3 000 r/min,在剪切过程中缓缓加入各种添加剂,此时将剪切机转速调至 3 000 ~ 5 000 r/min,温度不变,剪切时间为 40 min,剪切完成后,在 180 ℃左右使用低速搅拌机搅拌 2~3 h,得到高黏高弹改性沥青。

制备 TPE 改性沥青:基质沥青中,加入沥青质量 4%的 LLDPE 改性剂,在 170 $^{\circ}$ 均匀搅拌 20 min,加入 18%的脱硫橡胶粉,温度不变,以 5 500 r/min 的速率剪切 1 h,最后进行发育。

将制备好的两种改性沥青与 SBS 改性沥青分

别进行基本性能试验,试验结果见表1。

表 1 沥青基本性能试验结果

Tab. 1 Test results of basic performance of asphalt

 指标	沥青种类		
1日7小	SBS	TPE	高黏高弹
25 ℃针入度/0.1 mm	54. 0	45. 9	50.0
软化点/℃	86. 4	98. 4	96. 2
180 ℃粘度/(Pa・s)	0.401	1.895	0.893
5 ℃延度/cm	30.0	29.0	37. 7
25 ℃弹性恢复/%	97	100	100

1.2 沥青胶浆

沥青胶浆制备选用的填料是石灰岩矿粉,选 用粉胶比为 0.8:1,制备完成的胶浆应该光洁透 亮,无任何杂质,基本性能试验结果见表 2。

表 2 沥青胶浆基本性能试验结果

Tab. 2 Basic performance test results of asphalt mortar

指标	胶浆种类(FB=0.8)		
1日7小	SBS	TPE	高黏高弹
25 ℃针入度/0.1mm	34. 1	30. 4	37. 1
软化点/℃	95. 9	101.3	94.4
5 ℃延度/cm	5. 3	4. 9	10.6
165 ℃运动粘度/(Pa・	s) 1.48	10.31	3.06
135 ℃运动粘度/(Pa・	s) 7.95	41.64	14. 52
	s) 90. 14	超量程	155. 30

2 试验结果与讨论

2.1 抗剪强度分析

试验温度为 15 $\,^{\circ}$ 、25 $\,^{\circ}$ 、30 $\,^{\circ}$ 、40 $\,^{\circ}$ 、50 $\,^{\circ}$ 五个水平,锥针在砝码作用下贯入胶浆时间为 5 $\,^{\circ}$ 、锥针顶角为 30°、贯入质量 150 $\,^{\circ}$,试验结果见表 3。

表 3 沥青胶浆锥入度试验结果(0.1 mm)

Tab. 3 The cone penetration test results of asphalt mortar (0.1 mm)

温度	Þ	交浆种类(FB=	0.8)
<u> 通</u> 吳 —	SBS	TPE	高黏高弹
15 ℃	9. 5	10. 5	15. 2
25 ℃	30. 6	23.8	31. 5
30 ℃	44. 6	37. 3	45. 0
40 ℃	89. 8	65. 9	84. 5
50 ℃	152. 4	110.7	129. 1

由测得的锥入度试验结果按照下列公式推得 不同沥青胶浆在不同温度下的抗剪强度:

$$\tau = k \, \frac{m}{h^2} \tag{1}$$

$$k = 980 \frac{\cos^2(\frac{\alpha}{2})}{\pi \tan(\frac{\alpha}{2})}$$
 (2)

式中: τ 为抗剪强度,单位为 kPa;m 为贯入质量,本文贯入总质量为 150 g(连杆、锥针、砝码);h 为 贯入深度(锥入度),单位为 0.1 mm;k 为计算常数,由公式(2)可以得出; α 为锥针顶角(30°)。

表 4 沥青胶浆抗剪强度结果(单位:kPa)

Tab. 4 Shear strength results of asphalt mortar

温度	P	贷浆种类(FΒ=	0.8)
血)支 -	SBS	TPE	高黏高弹
15 ℃	1 085.3	1 477. 8	705. 2
25 ℃	174. 0	287. 6	164. 2
30 ℃	81.9	117. 1	80. 5
40 ℃	20. 2	37. 5	22. 8
50 ℃	7. 0	13. 3	9. 8

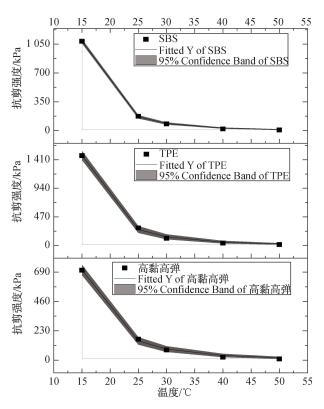


图 1 抗剪强度与温度的拟合曲线

Fig. 1 Fitting curve of shear strength and temperature

对不同沥青胶浆的抗剪强度与温度利用 Origin 软件进行相关性分析。

胶浆材料的抗剪强度与温度相关性满足乘幂函数的关系,即符合方程 $\gamma = ax^b$,并且在 95%的置

信区间内,各相关系数 R^2 基本达到 0.99 以上,其中,一般认为 a 表示沥青胶浆抗剪强度的变异性, a 值越高,说明抗剪强度的变异性越强,如 SBS 改性沥青胶浆的 15 $^{\circ}$ $^{\circ}$ 和 50 $^{\circ}$ 的抗剪强度相差近 100 倍;回归系数 $^{\circ}$ $^{\circ}$ 代表抗剪强度对温度敏感性。

在 15 ℃~25 ℃范围内,三种改性沥青胶浆抗剪强度大小顺序为 SBS 胶浆<TPE 胶浆<高黏高弹胶浆,25 ℃~40 ℃范围内,TPE 胶浆<SBS 胶浆<高黏高弹胶浆,40 ℃~50 ℃范围内,TPE 胶浆<高黏高弹胶浆<SBS 胶浆。

2.2 流变性能分析

2.2.1 PG 高温分级试验

按照要求需要设定参数,应变数值、角频率以及平行板的上下间距,分别为 12%、10 rad/s 以及 1 mm。SHRP 规划中明确要求原样沥青这一指标不得低于 1 kPa。试验结果如表 5 所示。

表 5 沥青的高温分级结果

Tab. 5 High temperature classification results of asphalt

沥青类型	温度/℃	SBS	TPE	高黏高弹
	64	5. 01	10.00	8. 17
	70	2. 93	6. 29	5. 56
原样沥青	76	1. 79	4. 02	3. 98
车辙因子/kPa	82	1. 14	2. 59	3.09
	88	0.78	1.68	2.49
	94	_	1. 10	2. 03
TFOT 残留物 车辙因子/kPa	64	7. 52	12.40	8. 21
	70	4. 42	7.72	5. 13
	76	2. 67	4. 84	3. 27
	82	1.65	3.04	2. 12
	88		1. 90	

由表 5 看出,各种沥青的车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 都随着温度的升高呈下降趋势, TPE 和高黏高弹改性沥青的抗变形能力比 SBS 改性沥青高, TPE 改性沥青的车辙因子随温度升高下降速率较快,在 64 $^{\circ}$ $^{\circ}$

三种改性沥青老化后抗变形能力的大小关系 无明显变化,高黏高弹改性沥青老化后的车辙因 子 $G^*/\sin\delta$ 在温度范围内变小,因为高黏高弹特 种沥青较粘稠,在老化过程中无法形成均衡的薄 膜,长时间高温使得胶质减少,更加容易发生永久 变形;相对而言,其它两种改性沥青老化后车辙因

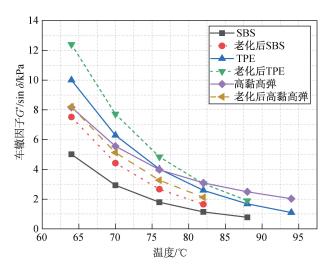


图 2 车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 随温度的变化情况

Fig. 2 The change of rutting factor $G^*/\sin \delta$ with temperature

子 G*/sin δ 高于原样沥青,但随着试验温度的逐渐升高,老化后沥青车辙因子下降速率很快,并且老化前后出现交叉或有交叉趋势,在相对低温状态下老化后的沥青表现出较好的抗车辙性能,但是在高温热养老化环境下,沥青中的轻质组分部分挥发,小分子链发生裂解,大分子基团得到不同程度的破坏,流动相减少,黏性成分增多,弹性变差,因此在试验中老化后沥青对温度表现的更加敏感,车辙因子下降速率变大。

综上所述,三种改性沥青都有着较好的高温性能,高黏高弹改性沥青的温度敏感性更强,TPE改性沥青和 SBS 改性沥青的耐老化性能更好,与老化前相比表现出更好的抗变形能力。

2.2.2 温度扫描试验

设置应力参数为 100 Pa, 试验扫描温度范围 为 64 $\,$ ℃ ~ 94 $\,$ ℃, 使用 25 mm 的平行板。

该部分对不同改性沥青及其胶浆予以温度扫描分析,得到相位角 δ 、车辙因子大小情况。 δ 越低则反映出沥青材料恢复性能越理想,车辙因子越大则反馈沥青材料抗剪切变形本领越强。下图反映了相位角 δ 、车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 分别与温度的关系。

由图 3 可知,相同的试验温度下,TPE 改性沥青与高黏高弹改性沥青的相位角明显小于 SBS 改性沥青,而动态剪切模量和车辙因子远大于 SBS 改性沥青,说明与 SBS 改性沥青相比,其它两种改性沥青具有更高的高温抗车辙性能,SBS 改性沥青和 TPE 改性沥青的相位角随扫描温度的升高先有小幅度提高,然后下降,在 64 $^{\circ}$ ~ 76 $^{\circ}$ 温度范围内表现出更多的黏性成分,温度高于 76 $^{\circ}$ 时,黏

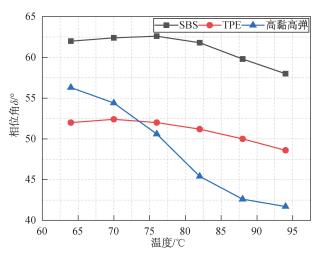


图 3 沥青相位角 δ 随温度的变化情况

Fig. 3 The variation of asphalt phase angle δ with temperature

性成分相对减小,表现更多的弹性,高温性能升高;而高黏高弹改性沥青的相位角呈大幅度下降状态,尤其在温度为70℃~88℃时,相位角的下降速率较大,说明沥青的弹性随温度的变化较为敏感,并表现更多的弹性,高温恢复能力提高。

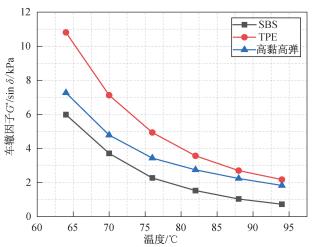


图 4 沥青车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 随温度的变化情况 Fig. 4 Variation of asphalt rutting factor $G^*/\sin\delta$ with temperature

由图 4 可知,在温度范围内,三种改性沥青车 辙因子的大小关系始终为 TPE 改性沥青>高黏高 弹改性沥青>SBS 改性沥青,也表明了三种改性沥 青抗车辙性能的大小关系。

就三种改性沥青胶浆的车辙因子而言,TPE 改性沥青胶浆抗车辙性能变化趋势与原沥青相比 几乎没有变化,反观其它两种胶浆,与原沥青车辙 因子的大小关系正好相反,说明矿粉对两种改性 沥青的影响方式不同,但是因为沥青和胶浆车辙 因子的数量级相差比较大,所以是否存在误差还 有待于深入研究。

2.2.3 多应力重复蠕变恢复试验(MSCR)

在试验开始前,也需按照要求设定相应的试验参数,其中包括 25 mm 的平行板,0.1 kPa 和 3.2 kPa 两个应力参数。每个应力水平作用时间为 100 s,总共 200 s,10 s 一个周期。

试验温度设为 $60 \, ^{\circ}$ 、试验完成后,可以得到两个应力水平下几种改性沥青的应变随时间的变化曲线,如图 5、图 6 所示。

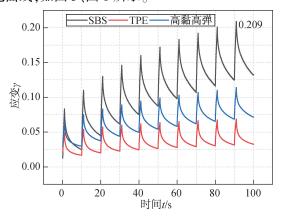


图 5 100 Pa 应力水平下沥青时间-应变关系 Fig. 5 Time-strain relationship of asphalt under 100 Pa stress level

由图 5 可知,在应力水平为 100 Pa 时,三种改性沥青的应变大小关系为 SBS 改性沥青>高黏高弹改性沥青>TPE 改性沥青,可以得到三种改性沥青抵抗变形能力的大小顺序为 TPE 改性沥青>高黏高弹改性沥青>SBS 改性沥青,SBS 改性沥青的最大应变可以达到 0. 209;高黏高弹改性沥青与TPE 改性沥青的蠕变恢复能力相当,但比 SBS 改性沥青明显高很多。

由图 6 可知,当应力水平变为 3 200 Pa 时,三种改性沥青的形变值都有大幅度增加,SBS 改性沥青的最大形变达到了 9.18,与此同时,三种改性沥青的抗变形能力大小没有太大变化,但 TPE 改性沥青和高黏高弹改性沥青的蠕变恢复能力更加接近,并且远远高于 SBS 改性沥青,与应力水平为100 Pa 相比,三种改性沥青的蠕变恢复能力有所下降。

通过各种应变参数可以得到蠕变恢复率 R 及蠕变柔量 $J_{nr}^{[15]}$,计算公式如下:

$$R = (\gamma_{\rho} - \gamma_{\rm nr})/(\gamma_{\rho} - \gamma_{0}) \tag{3}$$

$$J_{\rm nr} = \gamma_{\rm nr}/\tau \tag{4}$$

$$R_{0.1} = \frac{\sum_{i=1}^{10} R_{0.1i}}{10} \tag{5}$$

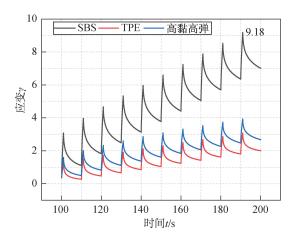


图 6 3 200 Pa 应力水平下沥青时间-应变关系 Fig. 6 Time-strain relationship of asphalt under 3 200 Pa stress level

$$J_{\text{nr0.1}} = \frac{\sum_{i=1}^{10} J_{\text{nr0.1}i}}{10} \tag{6}$$

式中, γ 为每个周期内的峰值应变; γ_{nr} 为每个周期内的残留应变; γ_0 为每个周期内的初始应变; τ 为蠕变应力; $R_{0.1i}$ 为 100 Pa 应力水平下每个蠕变循环恢复率,其中 $i=1,2,3,\cdots,10$; $J_{nr0.1i}$ 为 100 Pa 应力水平下每个不可恢复蠕变柔量,其中 $i=1,2,3,\cdots,10$ 。

表 6 沥青 MSCR 试验计算结果

Tab. 6 Calculation results of MSCR test for asphalt

指标	$R_{0. 1}$	$R_{3.2}$	$J_{\rm nr0.1}/{\rm kPa}^{-1}$	$J_{\rm nr3.2}/{\rm kPa^{-1}}$
SBS	1.043 6	0. 932 7	0.439 6	1. 275 9
TPE	1. 282 3	1. 134 1	0. 265 5	0.3568
高黏高弹	1. 154 4	1.0729	0.5398	0.5227

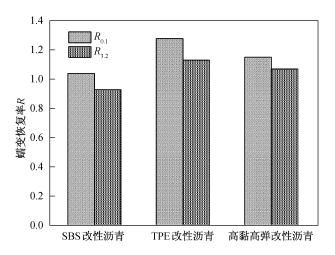


图 7 不同应力水平下沥青蠕变恢复率对比

Fig. 7 Comparison of asphalt creep recovery rate under different stress levels

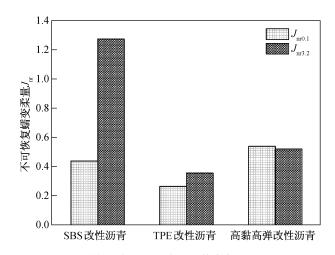


图 8 不同应力水平下沥青不可恢复蠕变柔量对比 Fig. 8 Comparison of unrecoverable creep compliance of asphalt under different stress levels

由表 6 可知,在两个应力水平下,三种沥青材料都表现出不同的恢复能力,并且无论应力水平是 100 Pa 或者 3 200 Pa,三种改性沥青的蠕变恢复能力大小顺序都是 TPE 改性沥青>高黏高弹改性沥青>SBS 改性沥青,但是三者差距的幅度不大。

蠕变柔量 J_{nr} 能够更加准确的表征沥青的高温抗车辙性能。 J_{nr} 越大表示沥青的不可恢复变形越大,则沥青抗变形能力越弱^[16]。应力水平为100 Pa 时,三种改性沥青抗车辙性能大小关系为TPE 改性沥青>SBS 改性沥青>高黏高弹改性沥青,此时高黏高弹改性沥青表现更多的黏性成分;当应力水平达到 3 200 Pa 时,SBS 改性沥青的不可恢复蠕变柔量突增到 1.275 9,与其它两种改性沥青相差至少 3 个数量级,在此应力水平下,SBS 改性沥青的变形几乎达到不可恢复的地步,抗车辙性能大小关系为 TPE 改性沥青>高黏高弹改性沥青>SBS 改性沥青。

综上所述,三种改性沥青中,TPE 改性沥青的高温稳定性最佳,高黏高弹改性沥青次之,SBS 改性沥青相对低于前两种沥青。

3 结论

- 1) TPE 改性沥青的制备、高黏高弹改性沥青的制备以及胶浆材料的制备,为了保证材料性能,需要将制备的时间、剪切速率、温度等参数严格控制在合理的范围之内,在制备过程中,要时刻观察沥青的状态,尤其是均匀性必须满足要求。
- 2) 胶浆材料的抗剪强度与温度相关性满足乘幂函数的关系,即符合方程 $y = ax^b$,并且在 95%的置信

区间内,各相关系数 R^2 基本达到 0.99 以上; 三种改性沥青胶浆的锥入度试验显示, TPE 改性沥青胶浆与其它两种改性沥青胶浆相比, 抗剪强度最高, 而其它两种改性沥青胶浆则在相应的温度范围内较高。

3)通过三种改性沥青及胶浆的流变试验,发现 TPE 改性沥青的抗永久变形能力和蠕变恢复能力最佳,高黏高弹改性沥青次之,SBS 改性沥青相对低于前两种沥青;TPE 改性沥青和 SBS 改性沥青的耐老化性能更好,与老化前相比表现出更好的抗变形能力。

参考文献:

- [1]孙春阳,曲恒辉,张圣涛,等.不同改性剂改性基质沥青性能试验[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2019,16(2):28-35.
- [2]张争奇,张英楠,黄硕磊. SBS-PU 复合改性沥青及其混合料路用性能研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2020,39(5):76-84.
- [3]邓文广. 高黏高弹改性沥青的研究与应用现状[J]. 石 化技术,2019,26(11):281+286.
- [4] 胡曙光,李 潜,孙 政,等. 基于防水黏结应力吸收层的 高黏高弹改性沥青的研制与性能研究[J]. 公路,2010 (2):134-137.
- [5]万建军,赵立东,韩丁丁,等.严寒地区高黏高弹改性沥青应力吸收层沥青混合料路用性能研究[J].公路工程,2020,45(2):68-71.
- [6]李亚楠,陈殿龙,范军领,等.基于废旧轮胎胶粉的热塑性弹性体的制备及发泡性能研究[J].弹性体,2013,23(5):23-28.
- [7] 张琳慧. 橡塑合金(TPE) 改性沥青路面施工技术[J]. 交通科技与经济,2014,16(4):91-94.
- [8]陈智蓉. 新型橡塑合金改性沥青性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学,2013.
- [9] LEE S H, ZHANG Z X, XU D, et al. Dynamic Reaction Involving Surface Modified Waste Ground Rubber Tire Powder/Polypropylene[J]. Polymer Engineering and Science, 2009, 49(1).
- [10]李因翔,陈洪庆,李闯民,等. 废旧轮胎热解炭黑改性 沥青性能室内试验研究[J]. 中外公路,2021,41(2): 296-301.
- [11]颜字. 橡塑合金(TPE)沥青改性剂路用性能研究 [D]. 重庆:重庆交通大学,2012.
- [12] 张争奇, 田中男, 黄硕磊, 等. SBS-PU 高黏高弹沥青材料组成及工艺参数研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23 (1):100-107.
- [13] 谭吉昕. 新型橡塑合金(TPE) 改性高粘沥青开发及其改性机理研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.

(下转第85页)

参考文献:

- [1] 张清明,王 荆,汪自力,等. 我国典型堤防工程管理现 状调查分析[J]. 中国水利,2020(10):36-38.
- [2]毛昶熙. 堤防工程手册[M]. 北京:中国水利水电出版 社,2009.
- [3]时铁城,阮建飞,张 晓. 库水位骤降情况下土石坝坝坡 稳定分析[J]. 人民黄河,2014,36(2):93-94+97.
- [4]朱 朋,卢书强,薛聪聪,等. 库水位升降与降雨条件下滑坡的渗流及稳定性分析[J]. 长江科学院院报,2015,32(11);87-92.
- [5] 岑威钧,李邓军,和浩楠. 持续强降雨引发水位耦合变化条件下堤防渗流及稳定性分析[J]. 河海大学学报. 2016,44(4):364-369.
- [6]刘俊新. 非饱和渗流条件下红层路堤稳定性研究[D]. 成都:西南交通大学,2007.
- [7] 孙冬梅,张 杨,SEMPRICH S,等. 水位下降过程中气相 对土坡稳定性的影响[J]. 地下空间与工程学报,2015, 11(2);511-518.
- [8] AXEL M, PIETER A V, MAXIMILIAN H. A Probabilistic Finite Element Analysis of Embankment Stability Under Transient Seepage Conditions [J]. Georisk Assessment & Management of Risk for Engineered Systems & Geo-
- (上接第61页)
- [14] 孔令云,管明阳,全秀洁. APAO& SBS 复合改性沥青性能研究[J]. 应用化工,2020,49(12):3051-3054.
- [15] SHENOY A. Nonrecovered Compliance From Dynamic Oscillatory Test Vis-a-Vis Nonrecovered Compliance From Multiple Stress Creep Recovery Test in the Dynamic Shear Rheometer [J]. International Journal of Pavement

- hazards, 2011, 5(2):110-119.
- [9]吴平,万燎榕. 库水位骤降偶遇地震作用下黏土心墙 坝渗透及抗震稳定性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2019,3(6):194-199.
- [10] 詹美礼, 踪金梁, 严飞, 等. 堤外水位升降条件下非稳 定渗流模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(S1): 91-96+111.
- [11]徐照明,易思勇,宋子亨,等.南京市高淳区水阳江干流左岸(小蔡河—乌溪河段)堤防加固工程初步设计报告[R].武汉:长江勘测规划设计研究有限责任公司,2020.
- [12]沈振中,岑威钧,徐力群,等.工程渗流分析与控制 [M].北京:科学出版社,2020:35-40.
- [13]毛昶熙,段祥宝,李祖贻,等. 渗流数值计算与程序应用[M]. 南京:河海大学出版社,1999,22-24.
- [14] GENUCHTEN M T V. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils [J]. Journal of the Soil Science Society of America, 1980,44(5):892-898.
- [15] 岑威钧,邓同春,石从浩,等. 复杂渠坡稳定性分析方法比较[J]. 水利水运工程学报,2013(4):29-34.

(责任编辑 周雪梅)

- Engineering, 2008, 9(5): 329-341.
- [16] 林江涛, 樊 亮, 马士杰, 等. 温度扫描下 SBS 改性沥青 动态力学行为分析 [J]. 新型建筑材料, 2012, 39(8): 39-41.
- [17] 薛振华, 樊兴华. 碳纳米管改性沥青的性能及改性机理研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(6): 106-110.

(责任编辑 周雪梅)