doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202601002

基于原料组成结构对温拌再生沥青抗裂性能的影响分析

仇苏南,杜玉兵,鞠　彬,邢宝东
(盐城工学院 土木工程学院,江苏 盐城　224051)

摘要:为探究沥青原料组成结构对温拌再生沥青抗裂性能的影响,选取2种不同油源的基质沥青(70#A和70#B),根据四组分分析、元素分析等手段解析原料沥青的化学组成与分子结构;将基质沥青制成老化沥青,在进行新旧沥青的融合再生后,分别添加5%、7%、9%的温拌再生剂制备温拌再生沥青;最后采用双边缺口拉伸试验评估几种沥青的抗裂性能。结果表明,两种原料的沥青在针入度、软化点、延度和动力黏度上差异不显著,但化学组成存在明显区别,表现为70#A的沥青质含量远高于70#B,而70#B的饱和酚和芳香酚含量较高,表明70#B具有更强的抗裂性;两种70#沥青均出现老化后脆性显著增强,峰值荷载上升的现象;温拌再生剂的加入能有效恢复沥青的延性,7%掺量的沥青抗裂性能最优。

关键词:温拌再生技术;分子结构;元素分析;双边缺口拉伸试验
中图分类号:U414　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-5322(2026)01-0011-06

Analysis of the Effect of Raw Material Composition Structure on the Anti-cracking Performance of Warm-mix Recycled Asphalt

QIU Sunan, DU Yubing, JU Bin, XING Baodong
(School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu　224051, China)

Abstract: To investigate the effect of the composition and structure of asphalt raw materials on the crack resistance of warm-mix recycled asphalt, this study selected two base asphalts from different oil sources (70#A and 70#B). The chemical composition and molecular structure of the raw asphalt were analyzed through methods such as four-component analysis and elemental analysis. The base asphalts were aged to produce aged asphalt, and after blending new and old asphalt for recycling, 5%, 7%, and 9% of warm-mix rejuvenator were added to prepare warm-mix recycled asphalt. Finally, a double-edge notched tensile test was used to evaluate the crack resistance of the prepared asphalt blends. The results show that the two raw asphalts did not differ significantly in conventional properties (penetration, softening point, ductility) and dynamic viscosity, but their chemical compositions were significantly different. Specifically, 70#A had a much higher asphaltene content than 70#B, while 70#B had higher contents of saturates and aromatics, indicating that 70#B has stronger crack resistance. Both 70# asphalts showed significantly increased brittleness and an increase in peak load after aging. The addition of warm-mix rejuvenator effectively restored the ductility of the asphalt, and the sample with a 7% dosage exhibited the best crack resistance.

Keywords: warm-mix recycling technology; molecular structure; elemental analysis; double-edge notched tension test

收稿日期:2025-11-19

作者简介:仇苏南(2000—),女,江苏宿迁人,硕士生,主要研究方向为沥青路面材料。
通信作者:杜玉兵(1975—),男,江苏盐城人,教授,博士,主要研究方向为长寿命沥青路面结构与材料关键技术、道桥结构健康维护技术等。

沥青路面作为现代交通基础设施的主要铺装形式,其性能与耐久性直接关系到路网畅通性、行车安全性与全寿命经济效益[1]。因而沥青材料的质量对路面服役行为具有决定性影响,优选沥青材料对裂缝早期防控至关重要。为此,众多学者对沥青材料质量的提高进行了大量的研究,黄生勇等[2]通过引入3种纤维材料,证实纤维改性可有效增强沥青的抗裂性能;阳恩慧等[3]研究了Sasobit和ET-3100两种温拌剂对沥青低应变流变性能、高应变延性断裂性能及老化性能的影响,发现Sasobit能显著降低沥青的断裂性能并加剧老化,而ET-3100影响较小且能减缓老化;李彦青等[4]系统探讨了制备温度、剪切时间及再生剂掺量对中温再生沥青性能的影响规律;王波等[5]则基于中温再生沥青混合料,确定了最佳拌和成型工艺并评估了路用性能。

沥青作为原油加工产物,其组成结构受油源影响较为显著[6]。本文从原料油源的化学本质出发,揭示其结构属性对再生沥青抗裂性能的决定性影响。为此,本文结合新旧融合技术,选取2种不同油源的70#沥青作为基质沥青,经老化再生制备对应的温拌再生沥青A与B,借助元素分析解析原材料组成结构与宏观性能的关联机制,再通过双边缺口拉伸试验(double edge notched tension test,DENT)评价温拌再生沥青的抗裂性能,以期为温拌再生沥青的质量控制与抗裂性能优化提供理论支撑。

1 温拌再生沥青的制备

1.1 原材料

1.1.1 沥青

选用2种不同油源的70#沥青作为基质沥青,分别标记为70#A和70#B。依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程(JTG E20—2011)》[7],分别对2种沥青材料进行基础性能评估,包括针入度、软化点、延度测试和60 ℃动力黏度试验,结果如表1所示。由表1可知,两种原料沥青的针入度、软化点、延度和动力黏度差异不显著。

为了分析沥青的组成,还需要按照《石油沥青四组分测定法(NB/SH/T 0509—2010)》[8]对2种70#基质沥青进行测试,得到饱和酚、芳香酚、胶质和沥青质含量的测定结果如表2所示。由表2可以看出,2种沥青的四组分含量差别较大,主要表现为70#B的饱和酚含量和芳香酚含量均高于70#A,而70#A的胶质含量和沥青质含量均高于70#B,其中70#A的沥青质含量约是70#B的6.6倍。

由于沥青中H、C原子质量比可反映沥青分子中烃类组成与环状结构数量,当H、C原子质量比较高时,沥青分子中饱和烃含量较高,抗裂性能更优;H、C原子质量比较低时,环状及芳香结构更为发达,抗车辙性能增强[9]。为了分析沥青中H、C原子质量比,采用德国Elementar UNICUBE元素分析仪对2种基质沥青进行元素分析。分析时,按照CHNS模式,以对氨基苯磺酰胺为参照标样[10],得到2种基质沥青的元素组成如表3所示。由表3可知,两种基质沥青的元素组成以碳、氢为主,并含有少量氮、硫、氧等杂原子,其中70#A的杂原子含量为8.36%,70#B的杂原子含量为7.01%,这与沥青质含量规律相符(杂原子主要存在于沥青质中);70#B具有较高的H、C原子质量比,表明其低温柔韧性及抗裂性能较好,而70#A则表现出更优的抗车辙能力。

需要注意的是,鉴于差减法在测定低氧含量样品时固有的局限性,即各测定元素(C、H、N、S)的微小误差会在计算中被放大,导致氧含量数据可靠性降低。因此,为保证整体数据质量,本文未对氧元素进行定量讨论[11]。

1.1.2 温拌再生剂

温拌再生剂以高分子树脂、橡胶、交联剂及催化剂等为主要原料制成,在常温下呈现出液态膏状,其主要技术指标见表4。

1.2 制备工艺

依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程(JTG E20—2011)》[7],在老化瓶内分别加入2种70#基质沥青(35±0.5)g,置于旋转薄膜烘箱连续加热3次,每次加热260 min,即可制得老化沥青[12-14];将老化沥青与相应的基质沥青按质量比3∶7的比例加入山东菏泽正虹科教仪器有限公司

表1 基质沥青的物理性能

Table 1 Physical properties of base asphalt

基质沥青	25 ℃针入度/0.1 mm	软化点/℃	10 ℃延度/cm	60 ℃动力黏度/(Pa·s)
70#A	70.1	48.4	38.5	218.95
70#B	70.4	48.1	39.0	216.58

表 2　基质沥青的四组分含量
Table 2　Four-component of base asphalt

沥青组分	70#A	70#B
饱和酚含量 S/%	20. 37	27. 56
芳香酚含量 A/%	24. 86	31. 49
胶质含量 R/%	44. 73	39. 43
沥青质含量 A_t/%	10. 04	1. 52

表 3　基质沥青的元素组成
Table 3　Elemental composition of base asphalt

基质沥青	ρ_H/%	ρ_C/%	ρ_N/%	ρ_S/%	其他/%	H、C原子质量比
70#A	8. 06	83. 58	0. 74	3. 96	3. 66	1. 149
70#B	8. 82	84. 17	0. 79	3. 72	2. 50	1. 249

生产的沥青试验机械搅拌机调和，并加热至 130 ℃使沥青呈现流动状态；将事先预热至 80 ℃、搅拌均匀的温拌再生剂按调和后沥青质量的 5%、7%、9% 分别加入热沥青中，搅拌机以 500 r/min 的速率搅拌 30 min[15]，即可制得温拌再生沥青。

表 4　温拌再生剂主要技术指标及测试方法
Table 4　Main technical indicators and test methods of warm-mix rejuvenator

性质	技术要求	测试方法
闪点/℃	>120	T 0611
20 ℃时的密度/(g·cm^{-3})	0. 94~0. 99	T 0603
水分质量百分数/%	<0. 2	GB/T 260
灰分质量百分数/%	<0. 8	T 0614

2　温拌再生沥青的性能测试

2. 1　基本物理性能测试

依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程(JTG E20—2011)》[7]，对制得的老化沥青与 5%、7%、9% 的温拌再生沥青分别进行基础性能评估和 60 ℃的动力黏度试验，结果如表 5 所示。试验全程严格控制温度波动与真空稳定性，避免气泡干扰，确保数据精确可靠。

表 5　沥青的物理性能
Table 5　Physical properties of asphalt

物理性能	老化 A	5%A	7%A	9%A	老化 B	5%B	7%B	9%B
25 ℃针入度/0. 1 mm	21. 4	64. 3	69. 2	75. 8	20. 5	64. 8	71. 1	76. 7
软化点/℃	64. 5	50. 3	48. 6	46. 2	65. 3	50. 1	48. 2	45. 2
10 ℃延度/cm	0	15. 0	29. 0	43. 0	0	16. 3	33. 8	48. 0
60 ℃动力黏度/(Pa·s)	670. 00	313. 50	239. 45	178. 78	685. 00	309. 80	230. 84	170. 49

2. 2　抗裂性能分析

2. 2. 1　双边缺口拉伸试验

根据 ASTM D7313 标准[16]，利用图 1 的双边缺口拉伸试验模具对 2 种 70#基质沥青与制得的老化沥青，以及 5%、7%、9% 的温拌再生沥青分别在 15 ℃下进行双边缺口拉伸试验。图 1 模具的韧带宽度有 3 种规格，分别为 5、10、15 mm。拉伸时，沥青试样的浇筑、刮平、水浴养护及测试流程与延展性检测过程基本一致，并设置拉伸速率为 50 mm/min，记录测力-位移曲线，并计算裂纹尖端张开位移(crack tip opening displacement，CTOD)及断裂能等参数，其中 5 mm 韧带宽度的双边缺口拉伸试验拉力随位移变化的曲线如图 2 所示，5 mm 韧带宽度下沥青峰值荷载变化如图 3 所示。

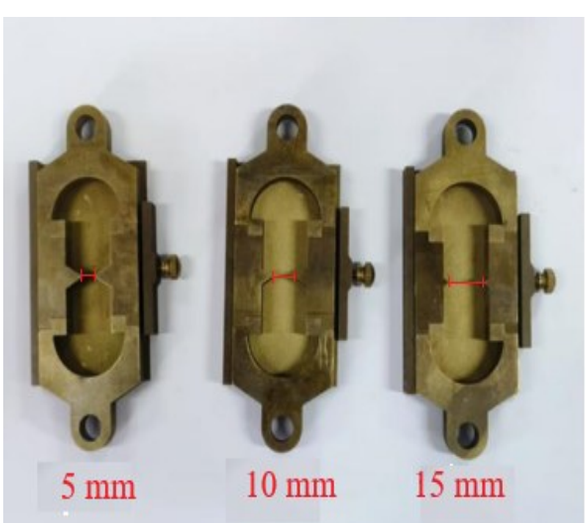
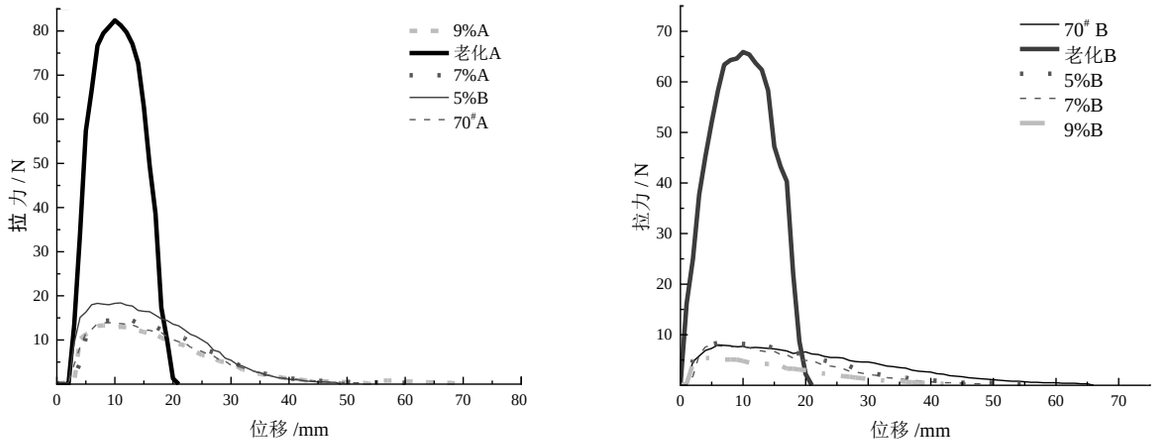


图 1　双边缺口拉伸试验模具
Fig. 1　Double-edge notched tension test mold



a 70#A 基质沥青及其老化再生沥青　　b 70#B 基质沥青及其老化再生沥青

图2　5 mm 韧带宽度的沥青载荷–位移曲线

Fig. 2　Load-displacement curves of asphalt with 5 mm ligament width

裂纹尖端张开位移及断裂能等参数计算公式[17]如下：

$$W_T = W_e + W_p \tag{1}$$

$$\omega_e = \frac{W_e}{B \cdot l} \tag{2}$$

$$\omega_p = \frac{W_p}{l^2 \cdot B \cdot \beta} \tag{3}$$

$$\omega_t = \omega_e + \beta \cdot \omega_p \cdot l \tag{4}$$

$$D = \frac{\omega_e}{\sigma_{net}} \tag{5}$$

$$\sigma_{net} = \frac{P_{peak}}{B \cdot l} \tag{6}$$

式中：W_T为根据测力–位移曲线的包络面积得出作用在试件上的总功，kJ/m²；W_e、W_p分别为断裂功与塑性功，kJ/m²；ω_e、ω_p和ω_t分别为基本断裂功、基本塑性功和断裂总单位功，kJ/m²；B为韧带截面的实测厚度，mm；l为韧带宽度，mm；β为试件的几何特征参数；D为裂纹尖端张开位移，mm；σ_{net}为试件拉伸过程中韧带截面达到充分屈服状态时承受的最大净截面应力，N/m²；P_{peak}为 5 mm 韧带宽度试件的平均峰值荷载，N。

图2与图3结果显示，两种70#基质沥青经老化后，其峰值荷载分别由初始的12.3 N和8.0 N显著上升至82.4 N和65.9 N，表明沥青在延性荷载作用下断裂提前，脆性显著增强[18-19]；添加温拌再生剂后，峰值荷载明显回落，且随掺量增加呈逐渐下降趋势，证实温拌再生剂可有效提升老化沥青的延展性并降低脆性；尽管两种沥青变化趋势一致，A组峰值荷载始终高于B组，反映出A组沥青的脆性大于B组。

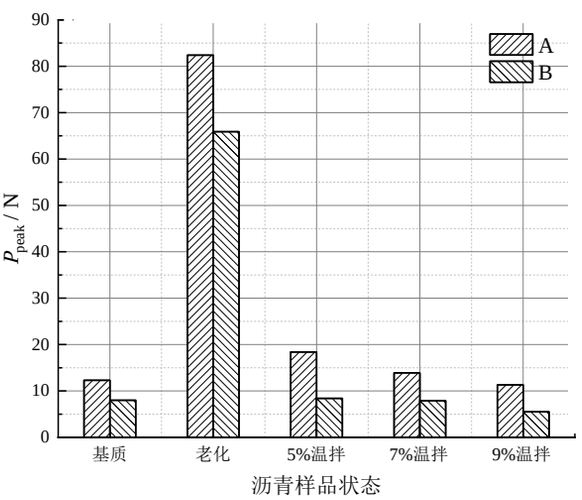


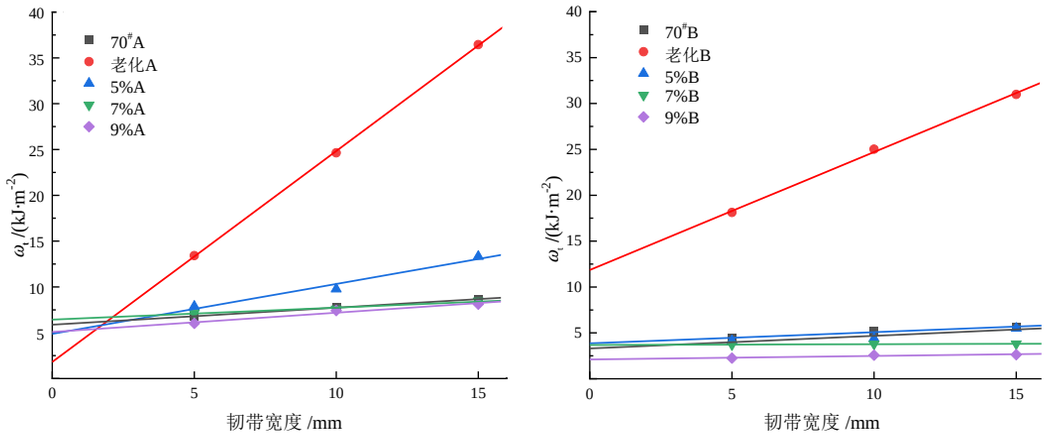
图3　5 mm 韧带宽度下基质沥青及其老化再生沥青的峰值荷载变化图

Fig. 3　Variation of peak load for base asphalt and its aged and recycled asphalt at 5 mm ligament width

2.2.2　温拌再生剂对ω_e和ω_p的影响

对图2拉力–位移曲线中的数据进行拟合，得到断裂总单位功ω_t与韧带宽度l之间的关系，结果如图4所示。由图4可知，沥青材料的断裂总单位功ω_t与韧带宽度l之间存在线性关系，其截距ω_e与斜率$\beta\omega_p$如表6所示。由表6可知，所得拟合结果中决定系数$R^2 \geqslant 0.92$，表明ω_e与$\beta\omega_p$可作为评价温拌再生沥青抗裂性能的可靠指标。

基本断裂功理论认为，基本断裂功ω_e越高，经几何特征参数β修正后的基本塑性功$\beta\omega_p$越低，材料抵抗裂纹扩展的能力越强[20]。随着温拌再生剂掺量的增加，图4中两组沥青的截距ω_e均呈现出先增加后降低的趋势，斜率$\beta\omega_p$呈现先降低



a　70#A 基质沥青及其老化再生沥青　　b　70#B 基质沥青及其老化再生沥青

图 4　沥青材料的断裂总单位功 ω_t 与韧带宽度 l 之间的关系

Fig. 4　Relationship between total specific work of fracture ω_t and ligament width l for asphalt materials

表 6　韧带宽度与断裂总单位功的线性拟合结果

Table 6　Linear fitting results of ligament width against total specific essential work of fracture

项目	A 组			B 组		
	$\beta\omega_p$/(kJ·m^{-2})	ω_e/(kJ·m^{-2})	R^2	$\beta\omega_p$/(kJ·m^{-2})	ω_e/(kJ·m^{-2})	R^2
70#基质沥青	0. 186 7	5. 870 4	0. 97	0. 070 1	4. 549 4	0. 98
老化沥青	2. 202 5	3. 808 0	0. 98	1. 286 1	11. 850 0	0. 99
5% 温拌再生沥青	0. 544 6	4. 878 7	0. 99	0. 137 7	3. 300 8	0. 92
7% 温拌再生沥青	0. 130 6	6. 435 0	0. 95	0. 008 4	3. 684 7	0. 94
9% 温拌再生沥青	0. 210 5	5. 080 6	0. 98	0. 037 7	2. 109 9	0. 95

后增加的趋势，其中 7% 掺量的再生沥青的 $\beta\omega_p$ 最低，表明 7% 掺量可使温拌再生沥青 A 和 B 的低温性能达到最优。

2. 2. 3　温拌再生剂对 CTOD 的影响

根据图 2 拉力-位移曲线中的数据及表 6 与公式(1)~(6)，经计算得到两组沥青的裂纹尖端张开位移，如图 5 所示。

由图 5 可知，两种沥青的 CTOD 值变化趋势相同，都表现为基质沥青的 CTOD 值最高，老化沥青的 CTOD 值最低；随着温拌再生剂的添加，CTOD 值表现为先增大后减小的趋势，并在 7% 掺量时达到最高，但仍小于基质沥青的 CTOD 值；同时，无论是基质沥青，还是老化沥青，或者是再生沥青，A 组的 CTOD 值始终小于 B 组。由于 CTOD 值越高，材料抗裂性能越优[20]。显然，B 组的抗老化与抗裂能力要高于相应的 A 组，且基质沥青的抗老化与抗裂能力最佳；添加温拌再生剂后，7% 掺量时 A、B 两组抗裂性能最优，且差别不大。

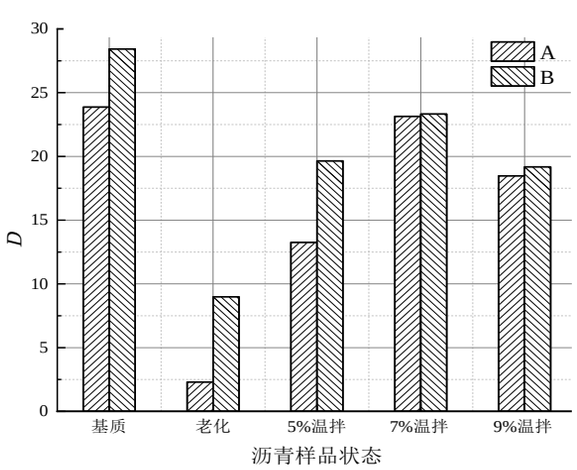


图 5　2 种 70#沥青的裂纹尖端张开位移随老化-再生过程的变化图

Fig. 5　CTOD change diagram of two types of 70# asphalt with aging and regeneration

3　结论

本文从微观层面揭示了原料沥青组成结构对其温拌再生沥青宏观性能的影响机制，并通过

对2种70#基质沥青及其相应的老化沥青、再生沥青的比较分析,得出以下结论。

1)温拌再生剂能有效恢复老化沥青的延性,降低脆性。随着再生剂掺量的增加,再生沥青的峰值荷载逐渐下降,ω_e与CTOD值呈先增后降的趋势,而$\beta\omega_p$则先降后增;在7%的温拌再生剂掺量时,再生沥青的性能恢复最优,此时抗裂性能最佳,说明适量温拌再生剂可优化胶体结构、增强沥青的塑性变形能力。

2)原料沥青的化学组成是决定温拌再生沥青抗裂性能的关键因素,二者呈显著的正相关关系。温拌再生剂通过轻质组分补充与胶体结构重建,在微观上调节了沥青组分的柔性与刚性平衡,宏观上实现了高低温性能的协同提升。

以上成果为沥青材料抗裂性能的优选与应用提供了重要参考,未来可进一步结合更多油源与改性手段,拓展沥青材料性能调控的路径与方法。

参考文献:

[1] 张凤霞. 强化现代工程管理打造品质工程平台:新时代高速公路档案管理的趋势与对策[J]. 档案与建设, 2018(6): 81-85.

[2] 黄生勇, 刘国祥, 吴玉林, 等. 中温条件下纤维改性沥青抗裂性能研究[J]. 公路, 2025, 70(2): 328-335.

[3] 阳恩慧, 徐加秋, 唐由之, 等. 温拌剂对沥青断裂和老化性能的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(2): 604-610.

[4] 李彦青, 蔡莉莉, 吴春颖, 等. 中温温拌再生沥青性能研究[J]. 交通节能与环保, 2024, 20(1): 151-155.

[5] 王波, 蔡莉莉, 吴春颖, 等. 大掺量中温再生沥青混合料性能研究[J]. 石油沥青, 2024, 38(4): 36-39, 51.

[6] REN R B, FAN W M, ZHAO P H, et al. Crude oil source identification of asphalt *via* ATR-FTIR approach combined with multivariate statistical analysis[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020: 2025072.

[7] 中华人民共和国交通运输部. 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.

[8] 全国石油产品和润滑剂标准化技术委员会石油沥青分技术委员会. 石油沥青四组分测定方法: NB/SH/T 0509—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010.

[9] 陈健灵. 蓖麻籽生物油改性沥青性能分析[J]. 福建交通科技, 2024(8): 12-16.

[10] 尚妍, 刘晓华, 穆林. 生物质CHNS含量测定影响因素的实验研究[J]. 实验室科学, 2016(1): 14-17.

[11] 孟修建, 宋家乐, 刘威, 等. 沥青材料微观成分的表征与分析[J]. 石油沥青, 2024, 38(5): 30-35.

[12] 李志伟. 温拌再生SBS改性沥青的流变与粘附特性及其微观机理研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.

[13] MIGLIORI F, CORTÉ J F. Comparative study of RTFOT and PAV aging simulation laboratory tests[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1998, 1638(1): 56-63.

[14] 秦欢. SBS改性沥青再生性能与规律研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.

[15] ZHANG R, YOU Z P, WANG H N, et al. The impact of bio-oil as rejuvenator for aged asphalt binder[J]. Construction and Building Materials, 2019, 196: 134-143.

[16] ASTM INTERNATIONAL. Standard test method for determining fracture energy of asphalt mixtures using the disk-shaped compact tension geometry: ASTM D7313-20[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

[17] 艾长发, 颜薇, 陶雅乐, 等. 基于双边缺口拉伸试验的SBS改性沥青抗疲劳性能评价[J]. 交通科技, 2020(3): 117-121, 141.

[18] CAMPBELL S, DING H B, HESP S A M. Double-edge-notched tension testing of asphalt mastics[J]. Construction and Building Materials, 2018, 166: 87-95.

[19] DAS A K, SINGH D. Investigation of rutting, fracture and thermal cracking behavior of asphalt mastic containing basalt and hydrated lime fillers[J]. Construction and Building Materials, 2017, 141: 442-452.

[20] KATAWARE A V, SINGH D. Evaluation of intermediate temperature cracking performance of warm mix additive modified asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2018, 184: 165-176.

(责任编辑:李华云)