

聚氨酯改性沥青热储离析行为及储存稳定性评价

温森元¹, 严世涛^{2,*}

1. 广西路桥工程集团有限公司, 广西 南宁, 530001

2. 广西交通职业技术学院, 路桥工程学院, 广西 南宁, 530126

摘要: 为评价聚氨酯改性沥青在高温储运阶段的热储稳定性, 以 70#基质沥青和反应型聚氨酯外掺剂为原料, 制备聚氨酯掺量为 5.0%、7.5%、10.0%和 12.5%的改性沥青, 采用表面自由能、热储后顶层软化点差 ΔS 、针入度差 ΔP 、10 °C延度差 ΔD 、64 °C上下层车辙因子差 ΔR 、相位角差 $\Delta\delta$ 及荧光显微开展综合评价。结果表明, 随着聚氨酯掺量增加, 总表面自由能由 18.8 mJ/m^2 降至 16.4 mJ/m^2 , 极性分量由 2.1 mJ/m^2 降至 1.2 mJ/m^2 。经 163 °C静置 48 h 后, 各组试样 ΔS 、 ΔP 、 ΔD 、 ΔR 和 $\Delta\delta$ 分别为 0.98~1.32 °C、2.1~3.0 (0.1 mm)、0.9~1.6 cm、0.20~0.28 kPa 和 0.32°~0.55°, 整体均处于较低水平, 且多项差值均在 PU-10 组达到相对高点后于 PU-12.5 组回落。荧光显微结果表明, 热储后聚氨酯改性相仅发生局部重排, 未出现明显大尺度团聚与连续富集。研究表明, 聚氨酯改性沥青的热储稳定性与掺量之间并非简单单调关系, 中等掺量阶段对热储作用更敏感, 而较高掺量下更完整的聚氨酯网络有利于抑制组分迁移和层间黏弹分化。

关键词: 聚氨酯改性沥青; 储存稳定性; 表面自由能; 延度差; 相位角差

Thermal Storage Segregation Behavior and Storage Stability Evaluation of *Polyurethane-Modified Asphalt*

Senyuan Wen¹, Shitao Yan^{2,*}

1. Guangxi Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530001, China

2. Guangxi Vocational and Technical College of Communications, Road and Bridge School, Nanning, Guangxi, 530126, China

Abstract: To evaluate the thermal storage stability of *polyurethane-modified asphalt* during high-temperature storage and transportation, modified asphalt binders with polyurethane dosages of 5.0%, 7.5%, 10.0% and 12.5% were prepared using 70# base asphalt and a reactive polyurethane external additive. A comprehensive evaluation was conducted using surface free energy, top-bottom softening point difference ΔS , penetration difference ΔP , 10 °C ductility difference ΔD , 64 °C rutting factor difference ΔR , phase angle difference $\Delta\delta$, and fluorescence microscopy after thermal storage. The results show that, with increasing polyurethane dosage, the total surface free energy decreased from 18.8 mJ/m^2 to 16.4 mJ/m^2 , and the polar component decreased from 2.1 mJ/m^2 to 1.2 mJ/m^2 . After standing at 163 °C for 48 h, ΔS , ΔP , ΔD , ΔR and $\Delta\delta$ were 0.98-1.32 °C, 2.1-3.0 (0.1 mm), 0.9-1.6 cm, 0.20-0.28 kPa and 0.32°-0.55°, respectively, indicating relatively low interlayer differences. Several indices reached relatively high values in the PU-10 group and then decreased in the PU-12.5 group. Fluorescence microscopy shows that the polyurethane-modified phase underwent only local rearrangement after thermal

storage, without obvious large-scale agglomeration or continuous enrichment. The study indicates that the storage stability of polyurethane-modified asphalt does not vary monotonically with dosage; the medium dosage stage is more sensitive to thermal storage, while a more complete polyurethane network at higher dosage helps inhibit component migration and interlayer viscoelastic differentiation.

Keywords: Polyurethane-modified asphalt; Storage stability; Surface free energy; Ductility difference; Phase angle difference

1 引言

聚氨酯改性沥青属于典型的反应型改性体系,能够通过活性基团作用在沥青基体中形成相对稳定的网络结构,从而改善高温抗变形能力、界面黏附性和耐久性^[1, 2]。与以物理共混为主的热塑性改性体系相比,聚氨酯改性沥青的性能形成更依赖于反应路径、网络构筑和相态组织,因此其工程适用性不仅取决于初始路用性能,也与高温储存和施工前保温阶段的分散稳定性密切相关。

现有国内外研究已从原材料选择、反应方式和流变性能等方面对聚氨酯改性沥青开展了较多工作^[3, 4]。国内研究普遍表明,聚氨酯可显著改善沥青的高温稳定性和综合力学性能,但在掺量提高或网络结构增强后,体系施工黏度和热储分层风险也可能随之变化^[5, 6]。Gong 等^[7]通过原位聚合法研究了绿色聚氨酯改性沥青的形成机制,指出反应网络的构筑会同步影响其黏弹响应与结构稳定性;Lu 等^[8]的综述进一步表明,聚氨酯改性沥青研究已由工艺可行性和单指标比较逐步转向围绕结构形成、储存稳定性和应用适配的系统分析。

围绕储存稳定性评价,现有研究仍多以软化点差作为主要判据,并辅以针入度或车辙因子等指标进行补充^[5, 6]。这类方法能够较好反映热储后顶底层高温性质差异,但对低温延展性变化、黏弹组成分层以及界面润湿特征的关注仍显不足。Zhao 等^[9]基于分子模拟指出,聚氨酯改性沥青的界面扩散与黏附行为会显著影响其界面状态和后续稳定性;Zhang 等和 Wang 等^[10, 11]的研究也表明,高低温流变性能及界面黏附变化与聚氨酯改性体系的组织结构密切相关。

基于此,本文围绕聚氨酯改性沥青的热储稳定性开展多指标评价研究。除软化点差 ΔS 外,进一步引入顶底层针入度差 ΔP 、10 °C 延度差 ΔD 、64 °C 上下层车辙因子差 ΔR 和相位角差 $\Delta \delta$,并结合基于接触角计算的表面自由能以及热储前后荧光显微图,对聚氨酯改性沥青在不同掺量条件下的储存稳定性进行综合分析,以期反应型聚氨酯改性沥青的热储评价提供更完整的试验依据。

2 试验材料与方法

2.1 原材料

试验所用基质沥青为 70#道路石油沥青;聚氨酯改性剂为以芳香族异氰酸酯为主要活性组分的反应型外掺剂,NCO 含量不低于 33%。主要原材料技术指标如表 1 所示。

表 1 原材料主要技术指标

Table 1 Main technical properties of raw materials

材料	指标	单位	数值
70#基质沥青	针入度 (25 °C, 100 g, 5 s)	0.1 mm	66
	软化点	°C	48.6
	延度 (10°C)	cm	20.5
聚氨酯改性剂	NCO 含量	%	≥33.0
	25 °C黏度	mPa·s	180~260

2.2 试样制备

采用外掺复配方式制备聚氨酯改性沥青。先将 70# 基质沥青加热至 140 °C 并保持流动状态，按基质沥青质量分数分别加入 5.0%、7.5%、10.0% 和 12.5% 的聚氨酯改性剂，在 4000 r/min 条件下高速剪切 30 min，得到不同聚氨酯掺量试样，分别记为 PU-5、PU-7.5、PU-10 和 PU-12.5。随后对各试样进行热储试验，并分别取上、下层样品开展常规指标与流变性能测试。热储处理采用铝管热储法，在 163 °C 条件下静置 48 h，用于模拟聚氨酯改性沥青在储运和施工前保温阶段可能经历的高温静置环境，如图 1 所示。



图 1 铝管热储沥青试样

Fig. 1 Aluminum tube samples for thermal storage of asphalt

2.3 试验方法

本文热储稳定性评价所涉及的软化点、针入度、延度及动态剪切流变试验均依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG 3410-2025) 相关方法进行^[12]。其中，软化点采用环球法测定，用于评价热储后顶底层高温性质差异；针入度在 25 °C、100 g、5 s 条件下测试，用于表征热储后稠度分化；10 °C 延度按规范条件测定，用于反映热储后低温延展性差异，试验设备及试样如图 2 所示。



(a) 针入度仪



(b) 软化点仪



(c) 延度仪



(d) 沥青试样

图 2 三大指标试验设备及试样

Fig. 2 Test equipment and asphalt samples for conventional properties

动态剪切流变试验采用 25 mm 平行板和 1 mm 间隙，在 9.9 rad/s 频率下进行温度扫描，并在 64 °C 条件下提取车辙因子和相位角，用以评价热储后上下层高温黏弹组成差异，设备如图 3 所示。

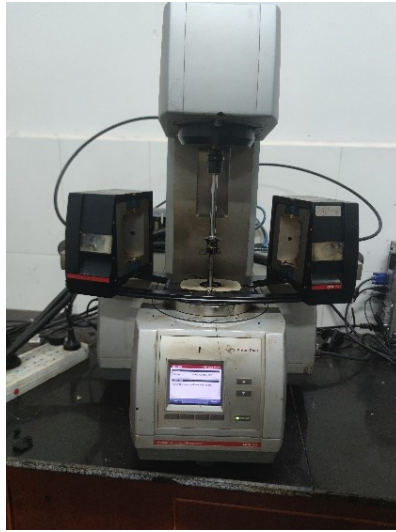


图 3 动态剪切流变

Fig. 3 Dynamic shear rheometer



图 4 接触角测试设备

Fig. 4 Contact angle test equipment

接触角试验采用去离子水、甘油和二碘甲烷作为探针液，在恒温条件下测定液滴在试样表面的平衡接触角，并依据 OWRK 模型计算表面自由能总量及其色散分量与极性分量，如图 4 所示。计算公式如下：

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p \quad (1)$$

$$\gamma_l(1 + \cos\theta) = 2 \left(\sqrt{\gamma_s^d \gamma_l^d} + \sqrt{\gamma_s^p \gamma_l^p} \right) \quad (2)$$

式中， γ_s 为试样表面自由能总量， γ_s^d 和 γ_s^p 分别为色散分量和极性分量； γ_l 为探针液表面张力， γ_l^d 和 γ_l^p 分别为其色散分量和极性分量； θ 为探针液在试样表面的接触角。接触角主要用于表征聚氨酯改性沥青的界面润湿特征，表面自由能则用于分析其界面能状态与热储稳定性之间的对应关系。荧光显微观察选取代表性试样，在相同放大倍数和拍摄参数下对热储前后样品进行对比，以表征聚氨酯改性相在热储过程中的空间分布变化。

3 结果与分析

3.1 表面自由能分析

不同试样的接触角及表面自由能计算结果见表 2。

表 2 不同试样接触角及表面自由能

试验结果	PU-5	PU-7.5	PU-10	PU-12.5
去离子水/ $^{\circ}$	86.4	88.2	90.6	91.3
甘油/ $^{\circ}$	75.8	77.4	79.5	80.4
二碘甲烷/ $^{\circ}$	38.6	40.1	42.4	44
色散分量/ (mJ/m^2)	16.7	16.2	15.6	15.2
极性分量/ (mJ/m^2)	2.1	1.7	1.4	1.2
总表面自由能/ (mJ/m^2)	18.8	17.9	17	16.4

随着聚氨酯掺量提高, 去离子水、甘油和二碘甲烷在试样表面的接触角整体增大, 说明聚氨酯改性后试样表面对探针液的润湿能力逐步减弱, 表面状态趋于更低能化。由 OWRK 模型计算得到的色散分量、极性分量和总表面自由能显示, 聚氨酯掺量增加后总表面自由能由 $18.8 \text{ mJ}/\text{m}^2$ 降至 $16.4 \text{ mJ}/\text{m}^2$, 其中色散分量由 $16.7 \text{ mJ}/\text{m}^2$ 缓慢降至 $15.2 \text{ mJ}/\text{m}^2$, 而极性分量由 $2.1 \text{ mJ}/\text{m}^2$ 降至 $1.2 \text{ mJ}/\text{m}^2$, 下降幅度更为明显。说明总表面自由能降低主要来自极性分量衰减。

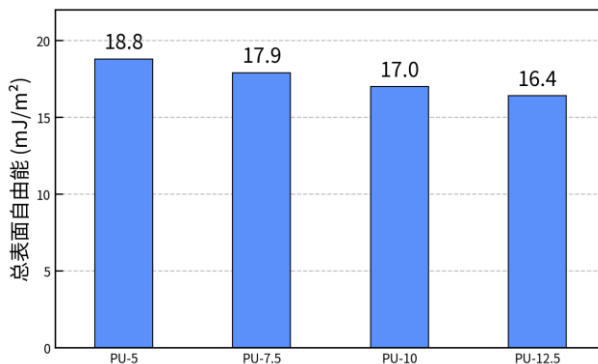


图 5 不同试样总表面自由能对比

Fig. 5 Comparison of total surface free energy of different samples

图 5 进一步给出了不同试样总表面自由能的变化规律。可以看出, 总表面自由能随聚氨酯掺量增加持续下降, 其中 PU-12.5 较 PU-5 降低约 12.8%, 而极性分量降幅达到 42.9%, 说明聚氨酯掺量提高后, 界面能状态的变化主要体现为极性作用减弱。就变化趋势而言, 表面自由能降低意味着体系表面的活性位点和润湿驱动力有所下降; 从关键数据看, PU-10 和 PU-12.5 两组的总表面自由能已降至 $17.0 \text{ mJ}/\text{m}^2$ 以下, 表明改性剂引入后界面状态已发生明显调整。造成这种现象的原因在于, 聚氨酯反应网络逐步形成后, 部分极性基团被包裹于改性相内部, 外露界面上可参与润湿作用的高能位点减少, 从而使表面极性分量和总表面自由能同步下降。

3.2 热储后常规指标差异分析

在热储分层评价中, 软化点差与针入度差能够分别从高温软化特征和常温软硬分化两个角度反映聚氨酯改性沥青的储存稳定性, 图 6 反映了聚氨酯改性沥青热储后顶层软化点差 ΔS 和针入度差 ΔP 的变化情况。随着聚氨酯掺量由 5.0% 增至 10.0%, ΔS 由 $0.98 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 增至 $1.32 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ΔP 由 2.1 (0.1 mm) 增至 3.0 (0.1 mm), 分别提高 34.7% 和 42.9%, 说明热储后上、下层在高温性质和稠度上的差异有所扩大; 当聚氨酯掺量进一步增至 12.5% 时, ΔS 和 ΔP 又分别回落至 $1.08 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 2.4 (0.1

mm)，表明这种层间差异有所减弱。两项指标始终保持一致的先增后降规律，说明热储过程中顶层性质变化具有较好的同步性。其原因在于，低至中等掺量阶段聚氨酯改性相虽已开始对体系产生结构约束，但网络连续性仍有限，高温静置条件下局部组分迁移和相态重排更容易引起上下层软硬分化；而当掺量继续提高后，聚氨酯反应网络更加完整，对基质组分迁移的限制作用增强，因而软化点差和针入度差重新减小。

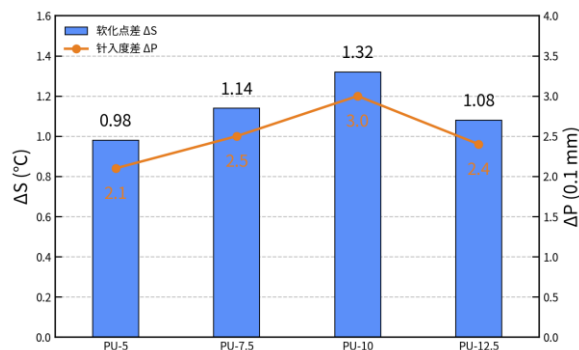


图6 改性沥青热储后软化点差与针入度差

Fig. 6 Softening point difference and penetration difference of modified asphalt after thermal storage

图7给出了聚氨酯改性沥青热储后10℃延度差 ΔD 的变化特征。可以看出， ΔD 同样随聚氨酯掺量增加呈现先增后降的变化规律，PU-5、PU-7.5、PU-10和PU-12.5组分别为0.9、1.2、1.6和1.1 cm，其中PU-10组较PU-5组增大77.8%，表明中等掺量下热储后上、下层低温延展性差异更为明显；当掺量提高至12.5%后， ΔD 下降至1.1 cm，较PU-10组降低31.3%。不过从绝对值看，各组 ΔD 均小于2.0 cm，说明热储对低温延展性的整体影响仍较有限。延度差的变化与前述软化点差和针入度差具有一致趋势，说明热储分层不仅表现为高温性质的局部差异，也会同步反映到低温变形能力上。造成这一现象的原因同样与聚氨酯改性相的组织状态有关：中等掺量时，改性相分布尚未达到更高程度的连续和稳定，热储过程中局部结构调整会放大上下层链段运动协调性的差异；而在较高掺量下，网络结构的连续性增强，对体系内部相态分布的约束更均匀，因此低温延展性差异有所回落。

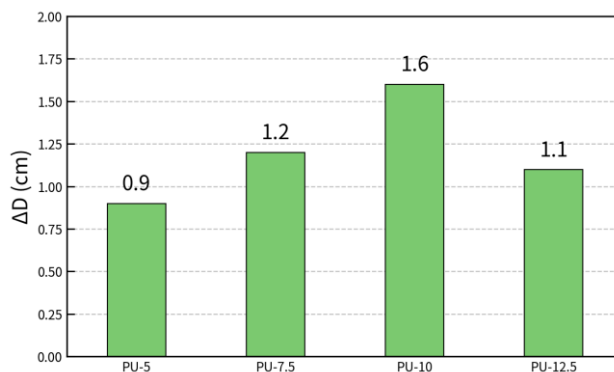


图7 改性沥青热储后10℃延度差

Fig. 7 Difference in 10°C ductility of modified asphalt after thermal storage

综合图6和图7可知，在163℃静置48 h条件下，各组试样的 ΔS 、 ΔP 和 ΔD 均保持在较低范围内，说明聚氨酯改性沥青整体未出现明显宏观离析。三项指标均在PU-10组达到相对高点，而在

PU-12.5 组重新减小, 表明热储稳定性并不是随掺量增加而单调变化, 而是受到聚氨酯改性相连续性和网络约束能力共同影响。中等掺量阶段上下层性质差异相对更敏感, 而较高掺量下更完整的反应网络能够进一步抑制组分迁移和局部重排, 使体系重新表现出更好的热储稳定性。

3.3 热储后上下层流变差异分析

图 8 反映了聚氨酯改性沥青热储后 64 °C 上下层车辙因子差 ΔR 的变化情况。随着聚氨酯掺量由 5.0% 增至 10.0%, ΔR 由 0.20 kPa 增至 0.28 kPa, 增幅为 40.0%, 说明热储后上、下层在高温抗变形能力上的差异有所扩大; 当聚氨酯掺量进一步提高至 12.5% 后, ΔR 又回落至 0.22 kPa, 较 PU-10 组下降 21.4%。整体来看, 各组 ΔR 均处于 0.20~0.28 kPa 的较小范围内, 表明热储后体系并未出现明显的高温流变分层。其变化规律与前述常规指标保持一致, 说明中等掺量阶段热储后上下层结构状态更容易出现细微差异, 而在较高掺量条件下, 这种差异又得到一定程度的抑制。这主要是因为车辙因子反映的是材料高温条件下弹性贡献与模量水平共同作用的结果, 中等掺量时聚氨酯改性相虽已形成一定结构增强作用, 但连续性仍不充分, 高温静置过程中局部相态重排更容易引起层间高温响应分化; 当掺量继续增加后, 聚氨酯反应网络更趋完整, 对基质和改性相的约束更加均匀, 从而减弱了上、下层在高温抗变形能力上的差异。

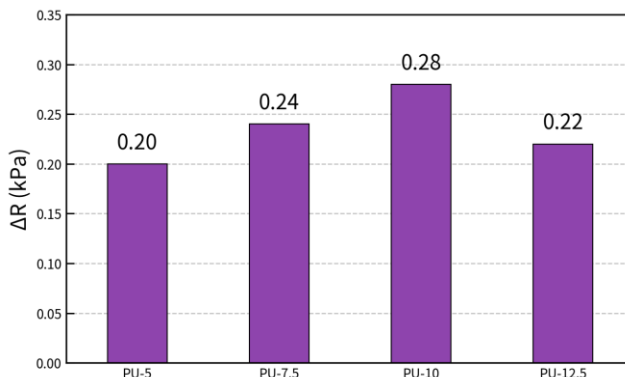


图 8 改性沥青热储后 64 °C 上下层车辙因子差

Fig. 8 Difference in 64 °C rutting factor between the upper and lower layers after thermal storage

图 9 给出了聚氨酯改性沥青热储后 64 °C 上下层相位角差 $\Delta\delta$ 的变化特征。可以看出, $\Delta\delta$ 同样呈现先增后降的变化规律, PU-5、PU-7.5、PU-10 和 PU-12.5 组分别为 0.32°、0.41°、0.55° 和 0.36°。其中, PU-10 组较 PU-5 组提高 71.9%, 增幅高于 ΔR , 说明相位角对热储后层间黏弹组成差异的响应更为敏感; 当聚氨酯掺量进一步提高至 12.5% 后, $\Delta\delta$ 降至 0.36°, 较 PU-10 组下降 34.5%。不过从绝对值看, 各组 $\Delta\delta$ 均小于 1°, 表明热储后上、下层弹性与黏性组成差异总体较小。相位角差的变化与车辙因子差具有一致趋势, 说明热储过程不仅会影响高温抗变形能力, 也会同步影响材料内部黏弹响应的协调性。造成这一现象的原因在于, 中等掺量阶段聚氨酯改性相与沥青基体之间的局部组织调整更容易改变链段运动受限程度, 使上、下层在弹性恢复能力和黏性耗散特征上出现更明显差异; 而在较高掺量下, 改性相连续性增强, 体系内部结构更加均一, 因而相位角差重新减小。

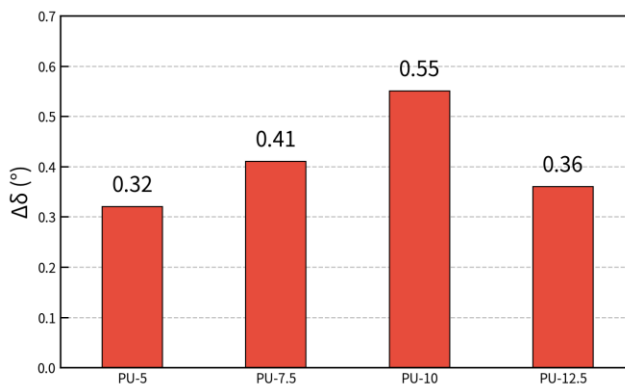


图 9 改性沥青热储后 64 °C 上下层相位角差

Fig. 9 Difference in 64 °C phase angle between the upper and lower layers after thermal storage

综合图 8 和图 9 可知, 各组试样热储后 ΔR 和 $\Delta\delta$ 均保持在较低水平, 说明聚氨酯改性沥青在 64 °C 条件下并未表现出显著的流变分层。两项指标均在 PU-10 组达到相对高点, 并在 PU-12.5 组重新回落, 表明热储后层间流变差异同样受聚氨酯网络连续性和结构均一性控制。结合 3.2 节结果可以看出, 常规指标与流变指标在变化趋势上具有较好一致性, 说明中等掺量阶段体系对热储更为敏感, 而较高掺量下更完整的反应网络能够进一步抑制层间黏弹性质分化, 从而保持较好的储存稳定性。

3.4 热储前后荧光显微分析

代表性聚氨酯改性沥青热储前后的荧光显微图见图 10。总体上, 热储前试样中聚氨酯改性相主要以细小点状形式均匀弥散于沥青基体中, 亮相分布连续而分散, 未见明显的大尺度富集区; 热储后, 局部亮点数量略有增加, 个别区域亮相边界变得稍清晰, 但整体仍保持细小分散状态, 未出现条带状聚集或连续富集带。

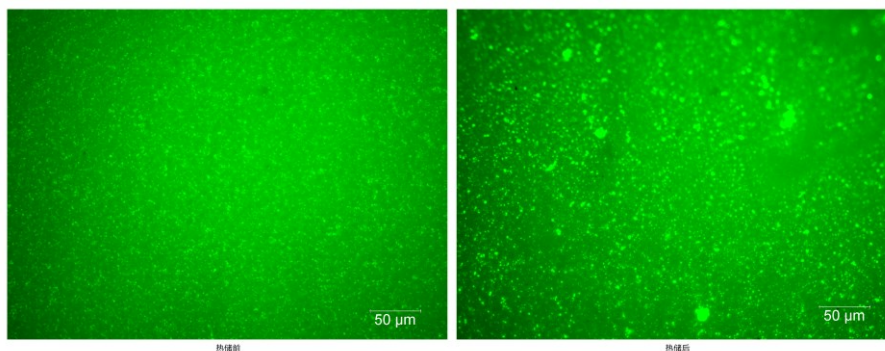


图 10 代表性聚氨酯改性沥青热储前后荧光显微图

Fig. 10 Fluorescence micrographs of representative polyurethane-modified asphalt before and after thermal storage

从微观变化特征看, 热储过程对聚氨酯改性相空间分布的影响主要表现为局部重排, 而不是宏观相分离。这与前述 ΔS 、 ΔP 、 ΔD 、 ΔR 和 $\Delta\delta$ 均保持在较低水平的结果相一致, 也说明热储后顶底层差异更多是局部组织调整所致, 而非大尺度迁移或连续相断裂。造成这一现象的原因在于, 聚氨酯反应网络在沥青基体中能够提供一定的空间约束, 使改性相在高温静置条件下仍保持较稳定的分散状态; 即使局部区域发生重排, 也尚不足以发展成明显的宏观离析。荧光显微结果因此为多指标

热储稳定性评价提供了直接的微观证据, 并表明常规指标、低温指标和流变指标在结构层面具有较好的对应关系。

4 结论

(1) 随着聚氨酯掺量由 5.0%增至 12.5%, 试样总表面自由能由 18.8 mJ/m^2 降至 16.4 mJ/m^2 , 极性分量由 2.1 mJ/m^2 降至 1.2 mJ/m^2 , 说明界面能状态变化主要表现为极性作用减弱。

(2) 热储后各组试样 ΔS 、 ΔP 和 ΔD 分别为 $0.98\sim 1.32 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $2.1\sim 3.0 (0.1 \text{ mm})$ 和 $0.9\sim 1.6 \text{ cm}$, 整体均较小, 说明体系未发生明显宏观离析。三项指标均在 PU-10 组达到相对高点, 并在 PU-12.5 组回落, 表明较高掺量下更完整的聚氨酯网络有利于抑制组分迁移。

(3) 各组试样 ΔR 和 $\Delta\delta$ 分别为 $0.20\sim 0.28 \text{ kPa}$ 和 $0.32^\circ\sim 0.55^\circ$, 同样呈现先增后降规律, 说明热储后高温流变分层不明显, 且层间流变差异与常规指标变化具有一致性。

(4) 荧光显微结果表明, 热储后聚氨酯改性相仍保持细小分散状态, 仅表现为局部重排。综合表面自由能、常规指标、流变指标和荧光显微结果可知, 在本文试验条件下, 5.0%~12.5%掺量范围内聚氨酯改性沥青均具有较好的热储稳定性, 其中 PU-10 组对热储更敏感, PU-12.5 组结构稳定性更好。

参考文献

- [1] 孙敏, 郑木莲, 毕玉峰, 等. 聚氨酯改性沥青改性机理和性能[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(2): 49-58.
- [2] 刘颖, 辛星. 道路用聚氨酯改性沥青的性能研究[J]. 石油沥青, 2015, 29(1): 48-53.
- [3] 金鑫, 郭乃胜, 尤占平, 等. 聚氨酯改性沥青研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2019, 33(21): 3686-3694.
- [4] 方滢, 谢玮琪, 杨建华. 聚氨酯预聚物改性沥青的制备及其流变行为[J]. 功能材料, 2019, 50(6): 6197-6205.
- [5] 张海伦, 李博宇, 牛鑫, 等. 聚氨酯改性沥青制备工艺参数及其老化性能研究[J]. 公路交通技术, 2023, 39(5): 38-44.
- [6] 陈芳, 杨秋菊, 段婷, 等. 聚氨酯改性沥青的改性技术及相容性研究[J]. 公路交通技术, 2022, 38(1): 1-6.
- [7] Gong X, Liu Q, Chen P, et al. Modification mechanism of green polyurethane modified asphalt prepared by in-situ polymerization[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 330: 129810.
- [8] Lu J, Xu S, Li C, et al. The latest research progress of polyurethane modified asphalt binder: Synthesis, characterization, and applications[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2025, 140: 104035.
- [9] Zhao S, Zhang H, Feng Y, et al. Effect of diffusion on interfacial properties of polyurethane-modified asphalt-aggregate using molecular dynamic simulation[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2022, 61(1): 778-794.
- [10] Zhang Z, Huang T, Sun J, et al. Laboratory study and molecular dynamics simulation of high- and low-temperature properties of polyurethane-modified asphalt[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 35(8): 04023257.
- [11] Wang M, Li J, Chen L, et al. Research on aging characteristics and interfacial adhesion performance of polyurethane-modified asphalt[J]. Coatings, 2025, 15(10): 1194.
- [12] 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 3410-2025[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2025.

基金项目: 广西科技计划项目资助(桂科 AD23026265); 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2022KY1140)。

第1作者简介: 温森元(1985-), 工学学士, 高级工程师, 广西路桥工程集团有限公司, 研究方向: 为大跨度桥梁施工技术。电子邮箱: wensenyuan044@sina.com。

*** 通讯作者简介:** 严世涛(1986-), 工学博士, 教授, 高级工程师, 主要研究方向为道路新材料研发与应用。电子邮箱: 123560763@gxjtc.edu.cn。