

## 聚醚胺降黏剂对聚氨酯改性沥青施工黏度及性能平衡的影响

温森元<sup>1</sup>, 严世涛<sup>2,\*</sup>

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:** 为缓解聚氨酯改性沥青施工黏度偏高、施工温度较高的问题, 采用 70#基质沥青与聚氨酯改性剂复配制备聚氨酯改性沥青。所用聚氨酯改性剂以芳香族异氰酸酯为主要活性组分, NCO 含量不低于 33%, 具有较强极性和较高反应活性; 降黏剂选用聚醚胺 D230, 其分子主链为柔性聚醚链段、端基为伯胺, 黏度较低、扩散性较好, 与聚氨酯改性沥青体系具有较好的适配性。设置 0、0.3%、0.5%和 0.7%四组聚醚胺掺量, 系统评价其对施工黏度、高温流变性能、低温蠕变性能及短期老化敏感性的影响。结果表明: 聚醚胺可显著降低聚氨酯改性沥青在 120~165°C范围内的旋转黏度, 其中 0.5%掺量可使 135°C黏度由 3.41Pa·s 降至 2.53Pa·s, 并使等黏度施工温度降低约 7~9°C; 在 9.9rad/s 下, 46~82°C范围内复数剪切模量整体仅小幅下降, 64°C车辙因子降幅控制在 5%~8%范围内; 低温 S 值略有下降、m 值略有升高, 短期老化后 135°C黏度增幅保持在 14.4%~16.7%之间。综合分析表明, 聚醚胺 D230 能够在改善聚氨酯改性沥青施工适应性的同时较好地保持其服役性能, 其中 0.5%为较合理的推荐掺量。

**关键词:** 聚氨酯改性沥青; 聚醚胺; 降黏剂; 施工黏度; 复数剪切模量

## Effect of Polyetheramine Viscosity Reducing Agent on Construction Viscosity and Performance Balance of Polyurethane Modified Asphalt

Senyuan Wen<sup>1</sup>, Shitao Yan<sup>2,\*</sup>

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 address the issues of high construction viscosity and elevated mixing temperature associated with polyurethane-modified asphalt (PUA), a PUA binder was prepared by blending 70# base asphalt with a polyurethane modifier. The polyurethane modifier employed aromatic isocyanate as the primary reactive component, with an NCO content of no less than 33%, exhibiting strong polarity and high reactivity. Polyetheramine D230, characterized by a flexible polyether backbone and primary amine terminal groups, was selected as the viscosity reducer owing to its low viscosity, favorable diffusivity, and good compatibility with the PUA system. Four dosage levels of polyetheramine (0, 0.3%, 0.5%, and 0.7% by weight) were investigated to systematically evaluate their effects on construction viscosity, high-temperature rheological performance, low-temperature creep behavior, and short-term aging susceptibility. The results indicate that

polyetheramine D230 significantly reduced the rotational viscosity of PUA within the temperature range of 120-165°C. At an optimal dosage of 0.5%, the viscosity at 135°C decreased from 3.41 Pa·s to 2.53 Pa·s, and the equiviscous construction temperature was reduced by approximately 7-9°C. Under an angular frequency of 9.9 rad/s, the complex shear modulus exhibited only a marginal overall decline across the temperature range of 46-82°C, with the rutting factor at 64°C decreasing by a controlled margin of 5%-8%. The low-temperature stiffness modulus (S-value) showed a slight decrease while the creep rate (m-value) increased marginally, and the viscosity increment at 135°C after short-term aging remained within 14.4%-16.7%. Comprehensive analysis demonstrates that polyetheramine D230 effectively improves the workability of PUA while preserving its in-service performance, with 0.5% identified as the recommended optimal dosage.

**Keywords:** Polyurethane modified asphalt; Polyetheramine; Viscosity reducer; Construction viscosity; Complex shear modulus

聚氨酯改性沥青具有较高的结构可设计性、较强的界面调控能力以及良好的高温抗变形潜力,近年来在反应型改性沥青领域受到较多关注<sup>[1-8]</sup>。相关研究表明,聚氨酯能够通过预聚体法或原位聚合法在沥青中形成较稳定的化学交联或物理-化学复合网络,从而改善高温稳定性、耐久性及综合路用性能<sup>[1-8]</sup>。但与此同时,聚氨酯改性沥青常伴随施工黏度偏高、拌和压实温度上升和施工时间窗口收窄等问题,这在一定程度上制约了其工程应用。

围绕高黏体系的施工适应性改善,温拌技术和降黏剂调控已经形成较丰富的研究基础<sup>[9-15]</sup>。现有文献表明,温拌添加剂可通过表面活化、黏度削减、发泡润滑或有机小分子调节等方式降低沥青在施工温度区间内的流动阻力,并在一定条件下保持较稳定的高温和低温性能<sup>[9-15]</sup>。然而,聚氨酯改性沥青属于反应型材料,其流动特征不仅受温度影响,还与体系内部聚氨酯网络、极性作用和链段运动能力有关,因而不能简单套用常规温拌沥青的经验规律。

对于此类体系,更关键的问题在于建立“降黏收益-性能代价”之间的平衡关系:降黏剂既要有效压缩施工温度窗口,又应尽量避免对高温结构强度造成过度削弱。基于此,本文采用 70#基质沥青与聚氨酯改性剂(NCO 含量≥33%)复配制备聚氨酯改性沥青,并进一步研究聚醚胺降黏剂对其施工黏度、复数剪切模量温度谱、低温蠕变指标及短期老化敏感性的影响,以为聚氨酯改性沥青的工程应用提供更具针对性的施工参数依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 原材料

试验所用基础沥青为 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聚氨酯外掺剂,NCO 含量不低于 33%,可通过较强极性和活性基团作用提高改性体系的结构强度。降黏剂选用聚醚胺 D230,其主链为柔性聚醚链段,分子两端含伯胺基团,具有低黏度、良好流动性及较强扩散能力,与聚氨酯改性沥青体系具有较好的适配性。聚氨酯改性剂与聚醚胺 D230 的主要理化指标见表 1。试验中先按基质沥青质量分数 10%将聚氨酯改性剂掺入 70#基质沥青中,经高温剪切制得聚氨酯改性沥青;随后以该聚氨酯改性沥青为结合料母体,掺入聚醚胺 D230 开展降黏与性能平衡分析。

表1 聚氨酯改性剂与聚醚胺 D230 主要理化指标

Table 1 Main physicochemical indicators of polyurethane modifier and polyetheramine D230

材料	理化指标	指标值
聚氨酯改性剂	外观	棕褐色均匀液体
	NCO 含量/%	≥33.0
	25°C黏度/ (mPa·s)	180~260
	密度 (25°C) / (g/cm <sup>3</sup> )	1.20~1.24
聚醚胺 D230	外观	无色至淡黄色透明液体
	胺值/ (mgKOH/g)	440~500
	25°C黏度/ (mPa·s)	8~15
	密度 (25°C) / (g/cm <sup>3</sup> )	0.94~0.96

## 1.2 试样制备

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 10%加入聚氨酯改性剂（NCO 含量≥33%），使用高速剪切机（图 1）在 4000r/min 条件下剪切 30min，制得聚氨酯改性沥青。随后将其降至 135°C左右，分别加入 0、0.3%、0.5%和 0.7%聚醚胺，在中等搅拌强度下继续混合 20min，使降黏剂均匀分散于体系中，制备好的聚氨酯改性沥青如图 2 所示。各试样分别记为 PU-0、PU-0.3、PU-0.5 和 PU-0.7。



图 1 高速剪切机

Fig. 1 High-speed shear mixer



图2 剪切好的聚氨酯改性沥青

Fig. 2 Sheared polyurethane-modified asphalt

### 1.3 试验方法

本文所涉及各项试验均依据《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<sup>[16]</sup>。旋转黏度试验采用布氏旋转黏度仪进行,如图3所示。该类试验用于测定道路沥青在较高温度条件下的表观黏度,以评价沥青在拌和、运输与摊铺阶段的流动特征。分别在120、135、150和165°C下测试各试样的旋转黏度,并据此绘制黏温关系曲线。进一步以3.0Pa·s和2.0Pa·s两级控制黏度为比较基准,通过插值估算达到相同流动状态所需温度,用于反映施工温度窗口的变化幅度。



图3 旋转黏度仪

Fig. 3 Rotational viscometer

高温流变性能采用 Anton Paar 公司 MCR302 型动态剪切流变仪进行试验评价（图 4）。该试验主要通过复数剪切模量  $G^*$  和相位角  $\delta$  表征沥青结合料的高温黏弹响应与抗变形能力<sup>[16]</sup>。测试时选取 25mm 平行板和 1mm 间隙，在 9.9rad/s 频率下进行 46、52、58、64、70、76 和 82°C 温度扫描，获得复数剪切模量  $G^*$  随温度变化的完整曲线；同时提取 64°C 和 70°C 条件下的车辙因子  $G^*/\sin\delta$ ，用以表征降黏后体系的高温抗变形能力。



图 4 动态剪切流变仪

Fig. 4 Dynamic shear rheometer

低温性能采用美国 CANNON 公司生产的弯曲梁流变仪进行试验评价（图 5）。该试验在规定低温条件下测试试样受恒载作用 60s 时的劲度模量  $S$  及其对数时间斜率  $m$ ，用以评价材料的低温抗裂能力与应力松弛能力<sup>[16]</sup>。本文在 -12°C 条件下测试 60s 劲度模量  $S$  和蠕变速率  $m$ 。 $S$  值反映材料在低温荷载作用下的刚度水平， $m$  值表征应力松弛能力。 $S$  降低且  $m$  增大通常意味着材料低温开裂敏感性减弱。



图 5 弯曲梁流变仪

Fig. 5 Bending beam rheometer

为考察降黏剂对施工阶段热氧敏感性的影响,对各试样进行短期老化处理,并比较老化前后135°C旋转黏度的增幅。短期老化用于模拟沥青在拌和、运输和摊铺阶段所经历的短时热氧老化作用<sup>[6]</sup>。结合聚氨酯改性沥青施工热暴露特征,本文采用薄膜老化烘箱老化6h,取老化后的试样进行测试(图6)。该指标主要用于辅助判断聚醚胺引入后体系在施工加热过程中的黏度增长趋势。



图6 薄膜老化烘箱

Fig. 6 Thin film aging oven

## 2 聚醚胺对施工黏度的调控作用

### 2.1 多温度旋转黏度分析

不同聚醚胺掺量下聚氨酯改性沥青的旋转黏度见表2和图7。整体来看,各试样黏度均随温度升高而显著下降,且加入聚醚胺后各温度点黏度均低于未加剂样,说明聚醚胺能够有效削弱高温状态下体系内部的流动阻力。

表2 不同聚醚胺掺量下的旋转黏度

Table 2 Rotational viscosity at different polyetheramine dosages

试样	120°C/Pa·s	135°C/Pa·s	150°C/Pa·s	165°C/Pa·s
PU-0	5.82	3.41	1.98	1.14
PU-0.3	4.68	2.84	1.70	1.01
PU-0.5	4.09	2.53	1.56	0.94
PU-0.7	3.95	2.48	1.54	0.93

在135°C这一更能体现施工敏感性的温度点,PU-0的旋转黏度为3.41Pa·s;加入0.3%、0.5%和0.7%聚醚胺后,黏度分别降至2.84、2.53和2.48Pa·s,降幅依次为16.7%、25.8%和27.3%。说明当掺量由0增加至0.5%时,降黏效果较为显著;继续增至0.7%后,黏度仅小幅下降,表明体系已逐渐接近降黏平台。

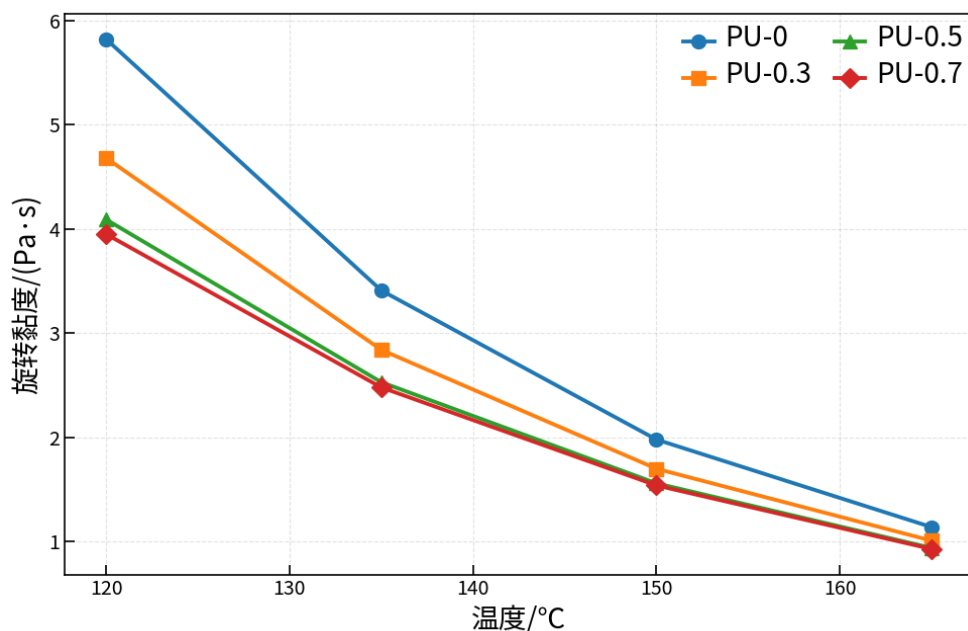


图7 不同聚醚胺掺量下聚氨酯改性沥青黏温关系

Fig. 7 Viscosity-temperature relationship of polyurethane-modified asphalt at different polyetheramine dosages

从120~165°C整体区间看, 0.5%与0.7%两组曲线在高温段已较为接近, 这意味着聚醚胺在一定掺量后对施工流动性的进一步改善幅度有限。对于聚氨酯改性沥青这类反应型结合料而言, 过高掺量虽然仍可带来少量施工性收益, 但其必要性需要结合高温性能保持情况综合判断。

## 2.2 施工温度窗口估算

本文采用“等黏度温度”方法重新表征施工适应性。《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)提出, 改性沥青混合料的拌和与压实温度宜结合黏温关系按等黏度法确定<sup>[17]</sup>。以3.0Pa·s和2.0Pa·s作为两级控制线, 经黏温关系插值后得到的温度结果见表3。

PU-0达到3.0Pa·s和2.0Pa·s分别需要138.5°C和149.7°C。当聚醚胺掺量为0.5%时, 上述两级温度分别降至129.7°C和142.3°C, 对应降幅为8.8°C和7.4°C。这表明在维持相近流动状态的前提下, 0.5%聚醚胺已能够较明显地压缩施工所需温度水平。

表3 不同试样等黏度对应温度估算结果

Table 3 Estimated temperatures corresponding to equal viscosity for different samples

试样	3.0Pa·s/°C	2.0Pa·s/°C	3.0Pa·s 降幅/°C	2.0Pa·s 降幅/°C
PU-0	138.5	149.7	0.0	0.0
PU-0.3	133.4	145.2	5.1	4.5
PU-0.5	129.7	142.3	8.8	7.4
PU-0.7	128.9	141.8	9.6	7.9

PU-0.7组在等黏度温度上略优于PU-0.5, 但差值不足1°C。从实际施工角度看, 这种温度收益已较难转化为明确的工艺优势。因此, 仅从施工性角度判断, 0.5%聚醚胺已接近合理掺量区间上限。

## 3 聚醚胺对服役性能的影响

### 3.1 高温流变性能

表4和图8给出了在9.9rad/s条件下, 46~82°C范围内各试样复数剪切模量的变化规律。整体来看,  $G^*$ 均随温度升高持续下降, 说明聚氨酯改性沥青在高温区间具有明显的温度敏感性。

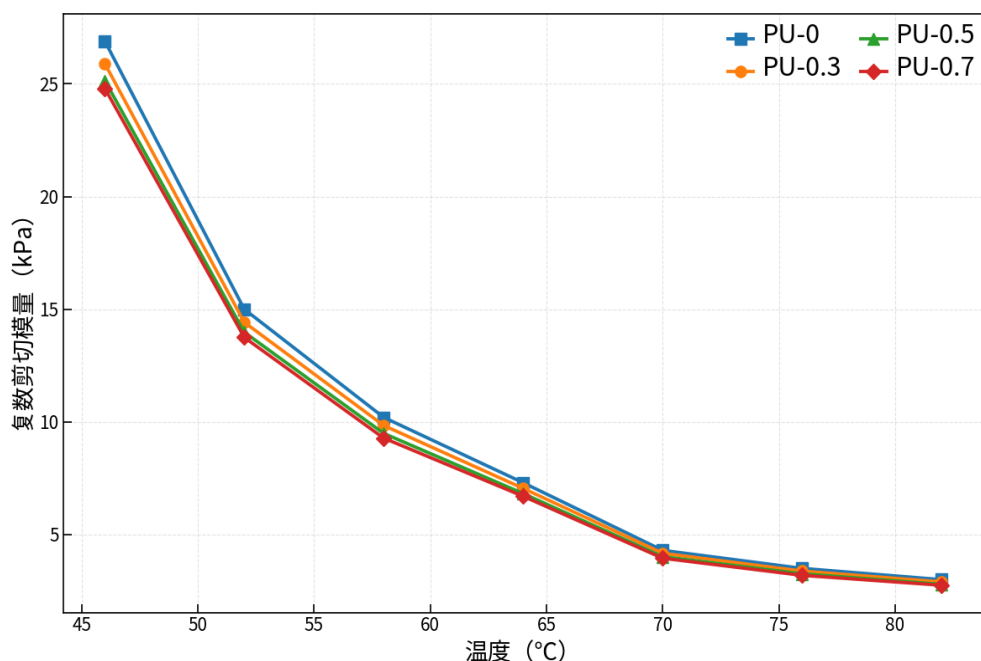


图 8 9.9rad/s 下聚氨酯改性沥青复数剪切模量-温度关系

Fig. 8 Complex shear modulus-temperature relationship of polyurethane-modified asphalt at 9.9rad/s

聚醚胺引入后, 各掺量组模量曲线整体仅小幅下移, 且不同掺量之间保持稳定而有序的分层关系, 说明降黏剂主要表现为对高温模量的温和削弱, 而非对结构强度的突变性破坏。

表 4 9.9rad/s 下不同温度复数剪切模量结果

Table 4 Complex shear modulus results at different temperatures at 9.9rad/s

温度/°C	PU-0	PU-0.3	PU-0.5	PU-0.7
46	26.90	25.90	25.15	24.80
52	15.00	14.42	13.98	13.75
58	10.20	9.84	9.49	9.28
64	7.30	7.05	6.82	6.70
70	4.30	4.17	4.02	3.95
76	3.50	3.38	3.26	3.19
82	3.00	2.90	2.79	2.75

由图 8 可见, PU-0 在 46°C 时  $G^*$  为 26.90kPa, 升温至 58°C 和 64°C 后分别降至 10.20kPa 和 7.30kPa, 82°C 时进一步降至 3.00kPa。加入聚醚胺后, 各温度点  $G^*$  均略有降低, 其中 64°C 数据均位于 58°C 与 70°C 之间、70°C 数据均位于 64°C 与 76°C 之间, 曲线衰减关系较为清晰; PU-0.7 组在全温区处于最低水平。

在复数剪切模量整体温度谱基础上, 进一步提取 64°C 和 70°C 两个关键高温区间的车辙因子, 结果见表 5。PU-0 在 64°C 和 70°C 下的车辙因子分别为 7.82kPa 和 4.21kPa; 加入 0.3%、0.5% 和 0.7% 聚醚胺后, 64°C 车辙因子分别降至 7.53、7.31 和 7.18kPa, 70°C 对应降至 4.08、3.95 和 3.88kPa。说明聚醚胺在显著改善施工流动性的同时, 对关键高温区间抗车辙能力仅带来小幅削弱, 其中 0.5% 掺量仍保持较好的性能平衡。

表5 聚醚胺对车辙因子的影响

Table 5 Effect of polyetheramine on the rutting factor

试样	64℃车辙因子/kPa	70℃车辙因子/kPa
PU-0	7.82	4.21
PU-0.3	7.53	4.08
PU-0.5	7.31	3.95
PU-0.7	7.18	3.88

### 3.2 低温蠕变性能

图9给出了-12℃条件下各试样60s劲度模量S与蠕变速率m的变化。随着聚醚胺掺量增加，S由248MPa逐步降至229MPa，而m值由0.312升至0.320，说明聚醚胺引入后体系低温刚度略有降低、应力松弛能力略有增强。

从变化幅度看，S值降幅为7.7%，m值增幅为2.6%，整体波动较小。对于聚氨酯改性沥青而言，降黏剂的引入并未造成低温性能恶化，反而在一定程度上缓和了体系的刚化倾向。这意味着聚醚胺对该体系的主要影响表现为流动调节和局部柔化，而不是对低温抗裂能力的明显损伤。

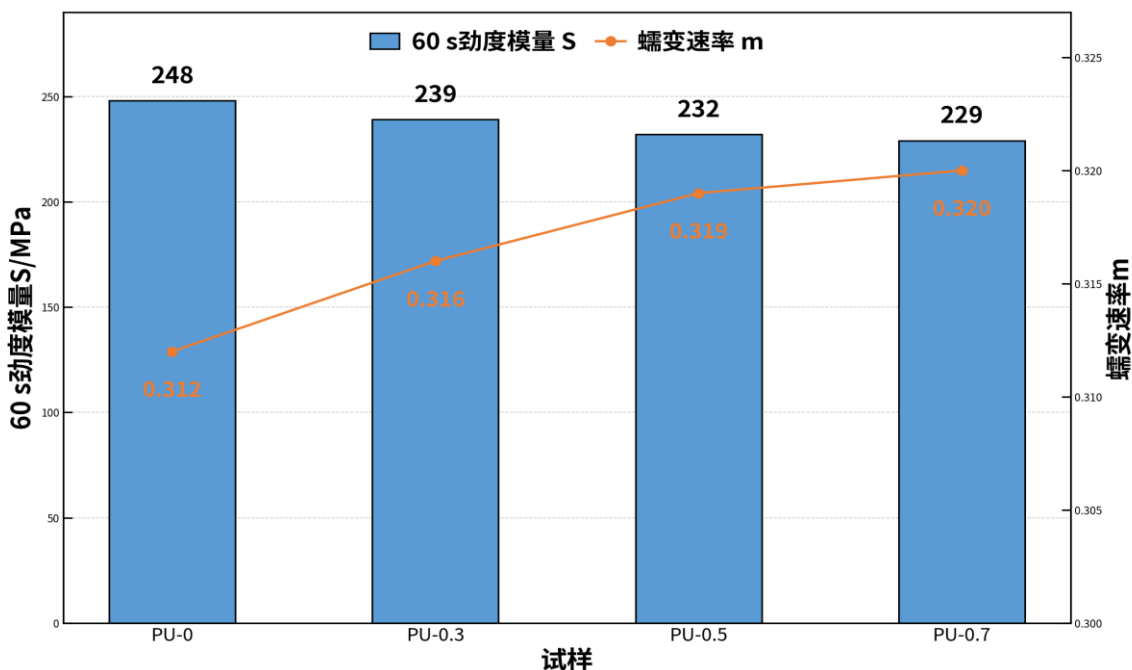


图9 聚醚胺对低温蠕变性能指标的影响

Fig. 9 Effect of polyetheramine on low-temperature creep performance indicators

### 3.3 短期老化敏感性

图10给出了短期老化后135℃黏度增幅的变化。各试样黏度增幅分别为14.4%、15.2%、16.3%和16.7%，整体集中在14.4%~16.7%范围内，说明聚醚胺对短期热氧作用下的黏度增长并未造成突增。0.5%和0.7%两组增幅略高于未加剂样，但整体差异仍处于可接受范围内。

结合图4可以看出，聚醚胺引入后体系在施工加热过程中的热敏感性并未明显放大。综合高温与低温结果可知，聚醚胺对聚氨酯改性沥青的影响具有较明确的双重特征：一方面显著降低施工黏度并压缩施工温度窗口，另一方面仅对高温结构强度带来小幅削弱，同时对低温松弛能力略有改善。

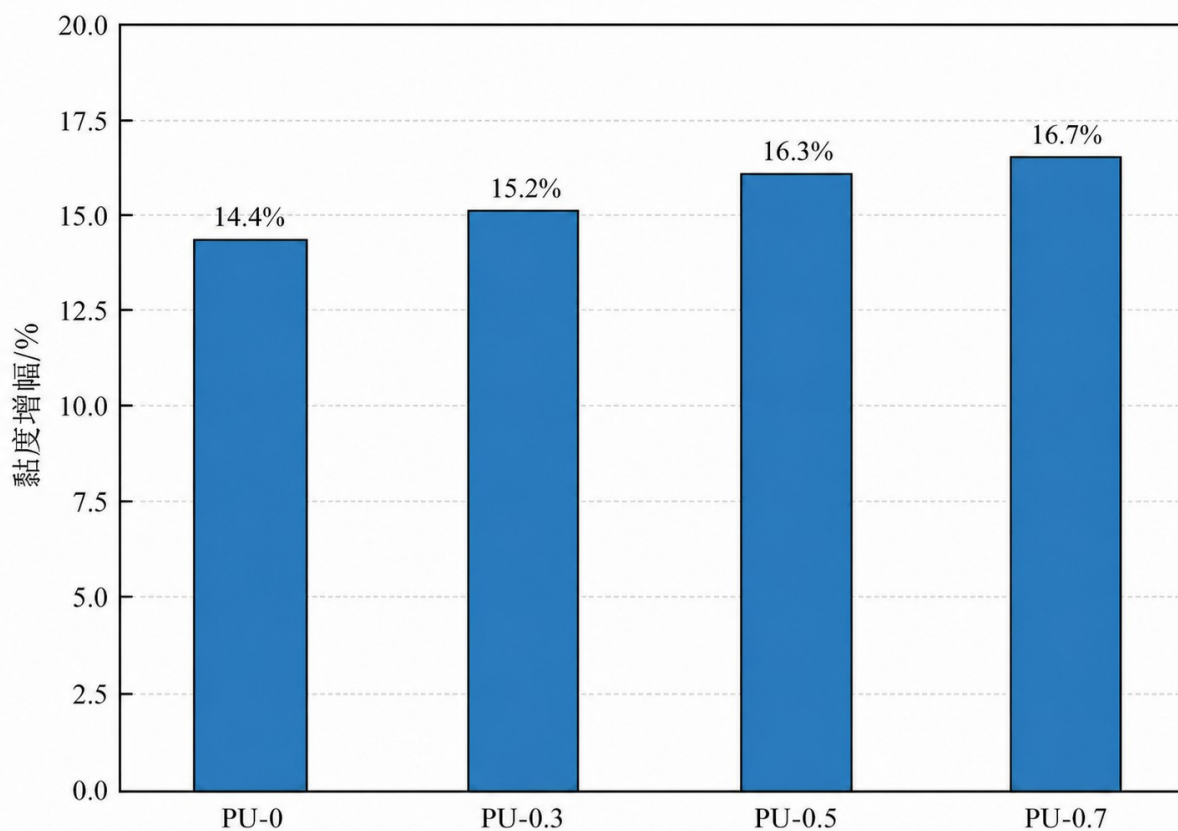


图 10 短期老化后 135°C黏度增幅

Fig. 10 Increase in viscosity at 135°C after short-term aging

#### 4 施工性与服役性能平衡分析

为更直观地比较各掺量下的收益与代价关系，图 11 给出了 135°C降黏率与 64°C车辙因子降幅的对比。

从图 11 可见，0.3%聚醚胺已经能够有效改善施工流动性，且 64°C车辙因子降幅仅为 4%左右；0.5%聚醚胺在降黏率继续提高的同时，64°C车辙因子降幅仍控制在 7%以内，表现出较好的施工性—性能平衡。0.7%聚醚胺虽在降黏率上略高于 0.5%，但额外收益有限，因此若以“单位高温损失所对应的降黏收益”进行比较，0.5%聚醚胺仍表现出更合理的收益—代价匹配关系。

因此，本文建议将 0.5%聚醚胺作为聚氨酯改性沥青的优选降黏剂掺量。该掺量可使 135°C旋转黏度降至 2.53Pa·s，并将等黏度施工温度降低约 7~9°C；与此同时，高温复数剪切模量和车辙因子仅出现约 5%~8%的小幅下降，低温应力松弛能力略有改善，短期老化敏感性保持基本稳定。

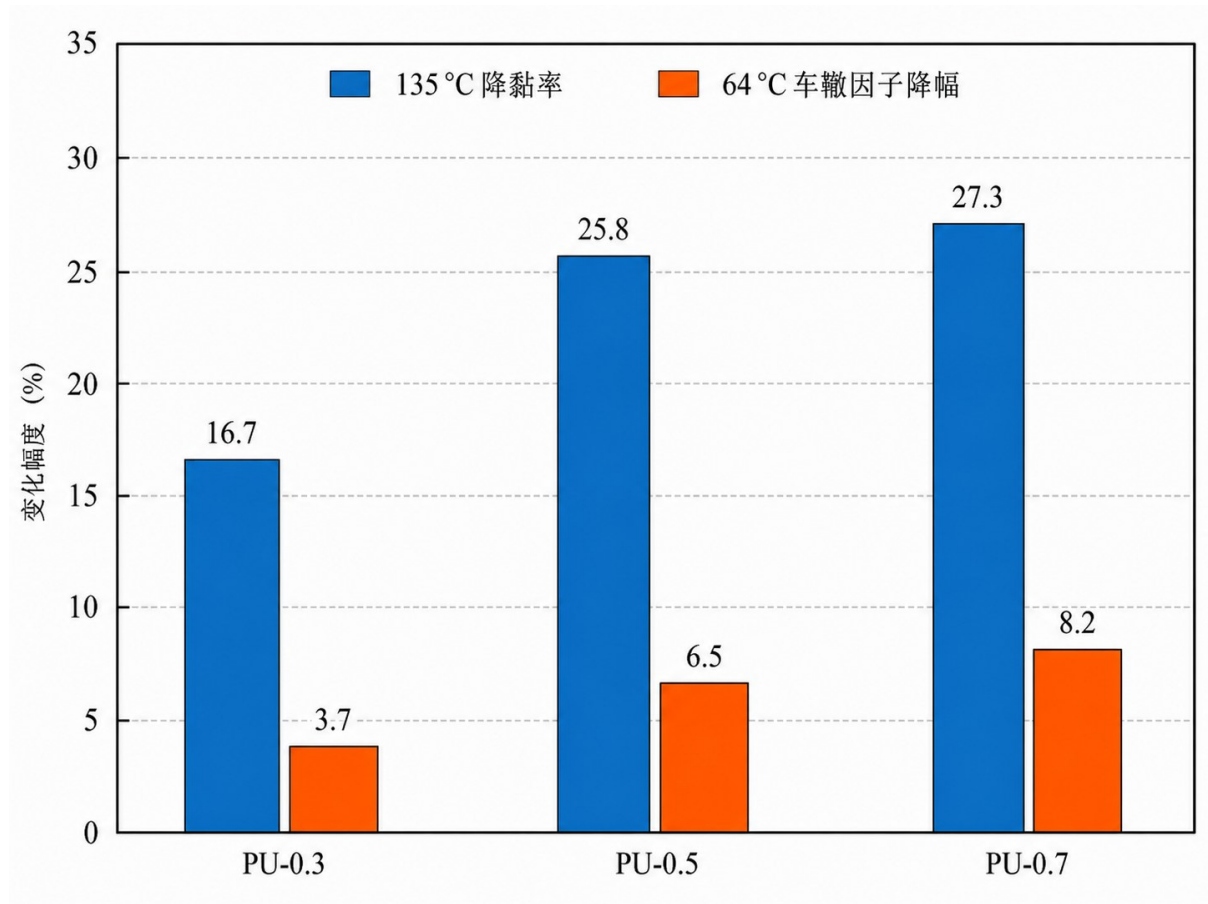


图 11 降黏收益与高温性能损失对比

Fig. 11 Comparison of viscosity reduction benefit and high-temperature performance loss

## 5 结论

(1) 聚醚胺对聚氨酯改性沥青具有明显降黏作用。随着掺量由 0 增加至 0.7%，120~165℃区间内旋转黏度均持续降低，其中 135℃黏度最大降幅达 27.3%。

(2) 按 3.0Pa·s 和 2.0Pa·s 两级控制黏度估算，0.5%聚醚胺可分别使对应温度降低 8.8℃和 7.4℃，表明其能够有效压缩施工温度窗口；继续提高至 0.7%后，温度收益提升已不明显。

(3) 在 9.9rad/s 下，46~82℃范围内各试样复数剪切模量均随温度升高持续衰减，聚醚胺加入后模量曲线整体小幅下移。0.3%、0.5%和 0.7%掺量下 64℃复数剪切模量分别下降 3.4%、6.6%和 8.2%，说明在显著改善施工性的同时，高温结构强度总体仍保持在较稳定水平。

(4) 聚醚胺引入后低温 S 值下降、m 值升高，表明低温应力松弛能力有所改善；短期老化后 135℃黏度增幅整体仍保持在 14.4%~16.7%范围内，未见明显热敏感性放大。

(5) 综合降黏收益、高温性能保持和短期老化敏感性，0.5%聚醚胺可作为该聚氨酯改性沥青体系的推荐掺量。

## 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, 谢玮珺, 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] 金鑫, 郭乃胜, 闫思檬, 等. 聚氨酯复合改性沥青的制备与性能研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 80-94.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 麦健, 张卫强, 陈南. 聚氨酯改性沥青及胶浆的全温域路用性能研究[J]. 上海公路, 2022(1): 82-89, 144-145.
- [9] 梁波, 张海涛, 梁缘, 等. 温拌沥青技术研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(2): 24-46.
- [10] 李旭阳, 索智, 罗亮. 温拌沥青混合料在生产阶段的节能减排量化分析[J]. 材料导报, 2020, 34(S1): 209-212.
- [11] Caputo P, Abe A A, Loise V, et al. The role of additives in warm mix asphalt technology: An insight into their mechanisms of improving an emerging technology[J]. Nanomaterials, 2020, 10(6): 1202.
- [12] Behnood A. A review of the warm mix asphalt (WMA) technologies: Effects on thermo-mechanical and rheological properties[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 259: 120817.
- [13] Rubio M C, Martínez G, Baena L, et al. Warm mix asphalt: An overview[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 24: 76-84.
- [14] Xu S, Xiao F, Amirkhanian S N, et al. Moisture characteristics of mixtures with warm mix asphalt technologies—A review[J]. Construction and Building Materials, 2017, 142: 148-161.
- [15] Zhang J, Li P, Sun C, et al. Effects of composite warm mix additive (CAR) on the physical and rheological performance of bitumen and the pavement performance of its concrete[J]. Materials, 2019, 12(23): 3916.
- [16] 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, 2025.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40-2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

**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: 大跨度桥梁施工技术。E-mail: wensenyuan044@sina.com。

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