

不同热氧老化时间对沥青流变性能影响的研究

张哲伟

重庆市永川区城市管理局 重庆 402160

摘要: 为分析不同老化时间对沥青流变性能的影响,利用动态剪切流变仪(DSR)测试 70# 基质沥青和 SBS 改性沥青在不同老化时间下的流变性能。利用复数模量主曲线,相位角主曲线;G-R 参数,抗疲劳能量指数 FREI;劲度模量 S,蠕变速率 m,临界温度差 ΔT_c 评价两种沥青在不同老化时间下的流变性能。结果表明:老化利于提高沥青的抗变形能力与内部的弹性比例;G-R 参数对老化较为敏感,FREI 适合分析沥青抗裂性能随老化时间增加的变化规律;S 比 m 受低温的影响更敏感, ΔT_c 综合考虑了沥青的低温变形能力和应力松弛能力,利于分析其低温性能。因此,建议采用 FREI 和 ΔT_c 来分析沥青的疲劳性能与低温性能。

关键词: 沥青材料;压力老化;流变性能;抗疲劳能量指数 FREI;临界温度差 ΔT_c

沥青在服役期间受各种环境因素的影响会发生老化,且在环境温度与车辆荷载的作用下,老化沥青路面极易出现开裂,从而加速沥青路面水稳定性能下降,最终缩短沥青路面的服役年限[1-2]。因此,了解沥青在不同服役阶段的路用性能利于为路面的养护提供指导。

沥青老化主要分为短期老化和长期老化两阶段。在室内,前者主要采用旋转薄膜老化烘箱(RTFOT)进行模拟;后者主要采用压力老化箱(PAV)进行模拟。然而,研究表明室内老化方法(2.1MPa, 100℃, 20h)并不能模拟实际沥青路面的老化过程。因此,有学者通过延长时间,增加温度或减少沥青膜厚度来加速其老化进程[3-5]。

目前,部分学者通过分析沥青老化前后某些指标的变化幅度来评价其耐老化性能。研究表明,相较于物理和化学指标,流变学指标与其路用性能有较好的相关性,如车辙因子 $G^*/\sin \delta$,零剪切粘度 ZSV,疲劳因子 $G^* \cdot \sin \delta$,劲度模量 S,蠕变速率 m[6-8]。因此,本文对沥青进行不同时间的压力老化;采用不同的流变学指标表征沥青在不同老化阶段的粘弹、疲劳、低温性能;最后选择出合适的流变学指标。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以 70# 基质沥青和 SBS 改性沥青作为研究对象。SBS 改性沥青的制备步骤:1)取一定质量的 70# 基质沥青至于烧杯中,放入 130℃烘箱中,直至流动状态;2)称取 4% 的 SBS 改性剂(以 70# 沥青质量为基准)置于 70# 沥青中,用玻璃

棒搅拌 5min;3)采用高速剪切机在 180℃,5000r/min 条件下对 70# 沥青和 4.0%SBS 改性剂剪切 45min,再以 300r/min 的速率搅拌 45min;4)加入稳定剂,以 300r/min 的速率搅拌 45min;5)将 SBS 改性沥青放入 130℃烘箱中发育 60min。

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011),对两种沥青的基本性能进行测试,结果如表 1 所示。

表 1 沥青的基本性能指标

沥青类型	25℃针入度 /0.1mm	软化点 /℃	10℃延度 /cm	60℃粘度 /Pa·s
70# 基质沥青	71.5	45.7	>150	200
SBS 改性沥青	65.8	66.9	>150	963

1.2 老化试验

短期老化试验:取 $35 \pm 0.5g$ 沥青置于老化瓶中,对称放入旋转薄膜烘箱中,转速为 $15 \pm 0.2r/min$,温度为 $163 \pm 0.5^\circ C$,并以 4000mL/min 的流速吹入热空气,时间为 75min。

长期老化试验:取 $50 \pm 0.5g$ 短期老化后的沥青置于老化盘中,再将其放入预热后的 PAV 中,气压为 $2.1 \pm 0.1MPa$,温度为 100℃,时间为 20h、40h、60h。

1.3 流变试验

1.3.1 粘弹性能试验

采用 DSR 对沥青进行不同温度下的频率扫描试验,根据时间-温度等效原理(TTSP)构建沥青复数模量 G^* 与相位角 δ 的主曲线,试验参数如下:

- 应变水平: 2%;

- 扫描频率: 0.1rad/s~100rad/s;
- 测试温度: 45℃、55℃、65℃;
- 间隙和平行板直径: 1mm 和 25mm。

1.3.2 疲劳性能试验

Glover-Rowe (G-R) 参数表征沥青的抗开裂性能, 如式

1-1 所示, 试验参数如下:

- 应变水平: 1%;
- 扫描频率: 0.1rad/s~100rad/s;
- 测试温度: 5℃、15℃、25℃;
- 间隙和平行板直径: 2mm 和 8mm。

$$G-R = \frac{G^* \times (\cos \delta)^2}{\sin \delta} (1-1)$$

式中, G^* ——15℃和 0.005rad/s 下的复数模量;

δ ——15℃和 0.005rad/s 下的相位角。

G-R 参数是在 LVE 条件下测试的, 表征沥青的疲劳损伤存在缺陷。因此, 采用抗疲劳能量指数 FREI 来进行评价, 如式 1-2 所示。试验参数如下:

- 扫描频率: 10Hz;
- 应变范围: 0.1%~30% (线性增加);
- 测试温度: 25℃;
- 间隙和平行板直径: 2mm 和 8mm。

$$FREI = \frac{J_{f-\tau_{max}}}{G_{0.5\tau_{max}}} (\gamma_{0.5\tau_{max}})^2 (1-2)$$

式中, $J_{f-\tau_{max}}$ ——最大应力下的剪切断裂能;

$G_{0.5\tau_{max}}$ ——最大剪应力一半处的模量;

$\gamma_{0.5\tau_{max}}$ ——最大剪应力的一半处的剪切应变。

1.3.3 低温性能试验

通过弯曲梁流变试验 (简称 BBR) 获取的劲度模量 S 和蠕变速率 m 可分析沥青低温性能。然而, BBR 试验存在样品量多、耗时长等问题。因此有学者提出使用 4mm-DSR 试验代替 BBR 试验。试验参数如下:

- 应变水平: 0.1%;
- 扫描频率: 0.2rad/s~100rad/s;
- 测试温度: -6℃、-12℃、-16℃;
- 间隙和平行板直径: 2.2mm 和 4mm。

2 结果与讨论

2.1 老化对沥青粘弹性能的影响

2.1.1 复数模量主曲线分析

由 TTSP 可知, 将不同温度条件下频率扫描结果平移到

参考温度, 建立的复数模量主曲线和相位角主曲线。复数模量 G^* 越大表明其抵抗外部荷载能力越强。以 55℃作为参考温度, 建立两种沥青在不同老化时间下的复数模量主曲线, 如图 1 所示。

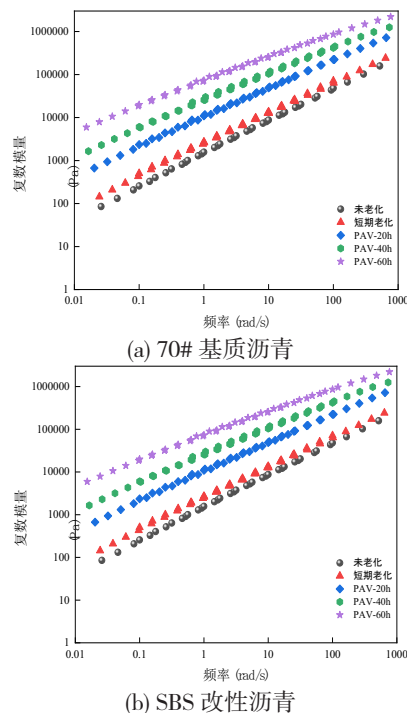


图 1 不同老化时间下的复数模量主曲线

由图 3-1 可知, 随着老化时间的增加, 两种沥青的复数模量主曲线逐渐往上移, 说明老化导致沥青变硬。在高频 (低温) 段, 老化时间对复数模量的影响逐渐减小, 说明老化对沥青流变性能的影响逐渐被高频 (低温) 取代。在低频 (高温) 段, 老化对复数模量的影响较为显著, 在同一个低频 (高温) 下, 两种沥青的复数模量均随老化时间的增加而增加, 表明老化利于改善其抗车辙性能。

2.1.2 相位角主曲线分析

相位角 δ 反映了沥青内部的粘弹性比例。相位角 δ 越大, 说明其内部的粘性比例越大; 反之, 则弹性比例越大。以 55℃作为参考温度, 建立两种沥青在不同老化时间下的相位角主曲线, 如图 2 所示。

由图 2 可知, 随着老化时间的增加, 两种沥青的相位角主曲线逐渐向下移动, 说明老化增加了沥青的弹性比例。相比于 70# 基质沥青, SBS 改性沥青的相位角主曲线存在一个“平台期”。这是因为在改性剂的作用下, 沥青的化学结构中会出现网络三维结构, 从而抑制了沥青向粘流态转化。

此外,相比于图 3-1, SBS 改性沥青的相位角主曲线呈现不连续的形状,可能是因为沥青在不同温度下存在晶体结构。

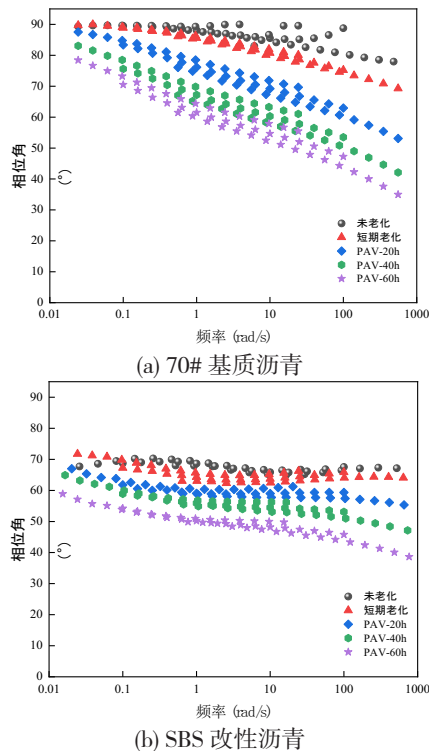
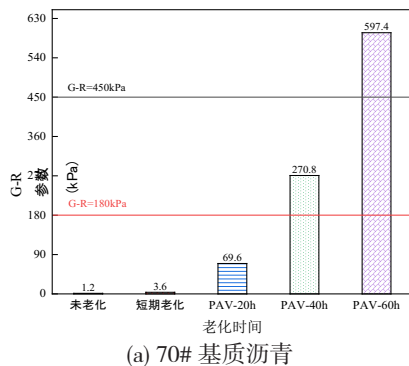


图 2 不同老化时间下的相位角主曲线

2.2 老化对沥青疲劳性能的影响

2.2.1 G-R 参数分析

G-R 参数越大,表明沥青的抗裂性能越差,且 G-R 参数分别对应裂缝起始值 (G-R 参数 =180kPa) 和裂缝严重值 (G-R 参数 =450kPa)。本文采用 G-R 参数来分析两种沥青在不同老化时间下的抗裂性能,如图 3 所示。



(a) 70# 基质沥青

由图 3-3 可知,随着老化时间的增加,两种沥青的 G-R 参数呈现上升趋势,且变化幅度极为明显。在未老化和短期老化下, SBS 改性沥青的 G-R 参数高于 70# 基质沥青,表明 70# 基质沥青的抗裂性能优于 SBS 改性沥青,这与传统

观点 (改性沥青的抗裂性能优于基质沥青) 相矛盾。然而,在 PAV20~60h 状态下, 70# 基质沥青的 G-R 参数高于 SBS 改性沥青。因此, G-R 参数更适用于评价沥青在长期老化下的抗裂性能。

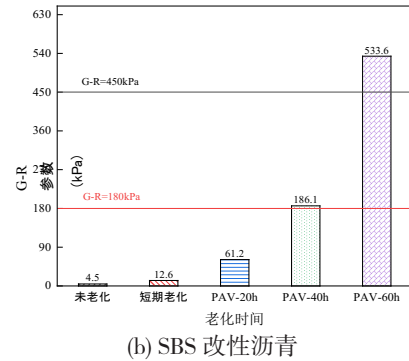
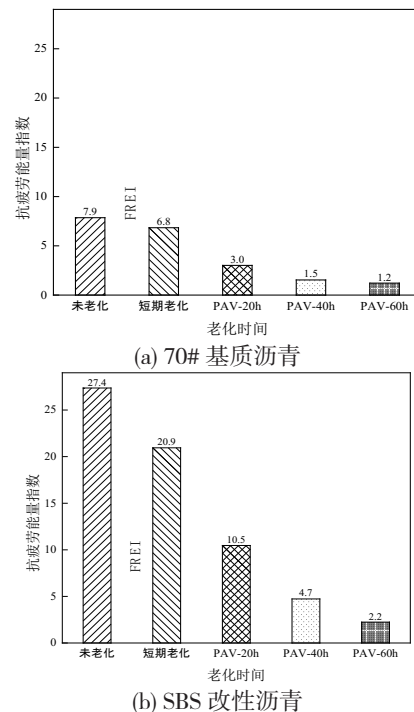


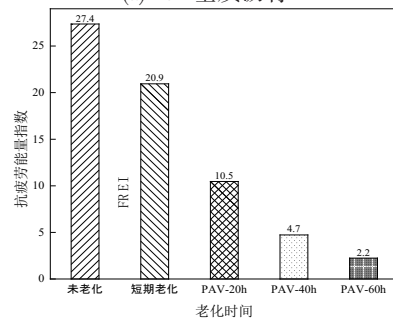
图 3 不同老化时间下的 G-R 参数

2.2.2 抗疲劳能量指数 FREI 分析

抗疲劳能量指数 FREI 越大,表明其抗疲劳开裂性能越好。本文采用 FREI 分析两种沥青在不同老化时间下的抗疲劳性能,如图 4 所示。



(a) 70# 基质沥青



(b) SBS 改性沥青

图 4 不同老化时间下的抗疲劳能量指数 FREI

由图 4 可知,随着老化时间的增加,两种沥青的抗疲劳能量指数 FREI 呈现下降趋势,说明老化降低了沥青的抗疲劳开裂性能。此外,在同等老化时间下, SBS 改性沥青的 FREI 均大于 70# 基质沥青。相比于 G-R 参数, FREI 更利

于分析沥青的抗裂性能。可能是因为 FREI 从材料裂纹扩展角度所建立的指标，而 G-R 参数仅考虑沥青在线性粘弹范围的力学响应。

2.3 老化对沥青低温性能的影响

2.3.1 劲度模量 S 与蠕变速率 m 分析

劲度模量 S 与蠕变速率 m 分别描述沥青的变形能力与应力松弛能力。劲度模量 S 越小，蠕变速率 m 越大，说明沥青的低温变形性能越好。根据 Superpave 沥青结合料性能规范，在 $t=60s$ 时， $S \leq 300MPa$ ，且 $m > 0.30$ 。本文采用劲度模量 S 与蠕变速率 m 分析了两种沥青在 $-6^{\circ}C$ 、 $-12^{\circ}C$ 、 $-18^{\circ}C$ 下的 S 和 m，如图 5 图 6 所示。

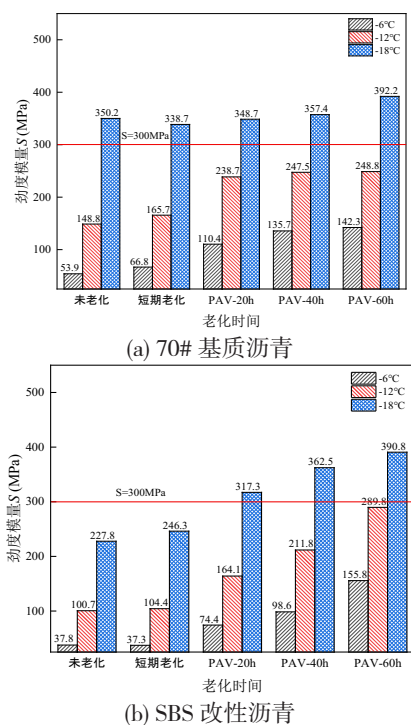


图 5 不同老化时间下的劲度模量 S

由图 5 可知，在同等温度条件下，随着老化时间的增加，两种沥青的劲度模量 S 呈现上升趋势，说明老化导致沥青的低温变形能力下降；在同等老化条件下，随着温度的下降，两种沥青的劲度模量 S 也呈现上升趋势；说明低温也降低了沥青的变形能力。因为沥青是感温性材料，低温会增加沥青脆性。在同等条件下，SBS 改性沥青的劲度模量 S 也均低于 70# 基质沥青，说明 SBS 改性沥青的低温抗裂性能优于 70# 基质沥青。此外，在未老化条件下，两种沥青的劲度模量 S 的存在明显的差距，如在 $-18^{\circ}C$ 条件下，其劲度模量 S 相差 34.95%，随着老化时间的增加，两者的劲度模量 S 逐渐缩小，

如在 PAV-60h 和 $-18^{\circ}C$ 条件下，其劲度模量 S 相差 0.36%。因为老化导致 SBS 改性剂降解，其内部的网络结构劣化。

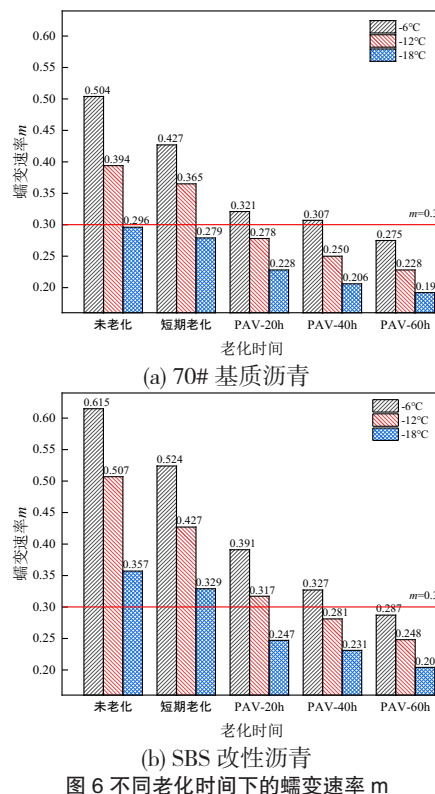


图 6 不同老化时间下的蠕变速率 m

由图 6 可知，在同等温度条件下，随着老化时间的增加，两种沥青的蠕变速率 m 呈现下降趋势；在同等老化条件下，随着温度的下降，两种沥青的蠕变速率 m 也呈现下降趋势；说明老化和低温均降低了沥青的应力松弛能力，增加了其低温开裂风险。在同等条件下，SBS 改性沥青的蠕变速率 m 均高于 70# 基质沥青，意味着 SBS 改性沥青的松弛能力优于 70# 基质沥青。此外，在未老化条件下，两种沥青蠕变速率 m 的差距较劲度模量 S 较低，如在 $-18^{\circ}C$ 条件下，其蠕变速率 m 相差 17.08%。可能的原因是沥青的硬性脆性受低温的影响更为敏感。值得注意，70# 基质沥青的蠕变速率 m 在 PAV-60h 和三个温度条件下均低于 0.3，而其劲度模量 S 在 PAV-60h 与 $-18^{\circ}C$ 条件下大于 300MPa；同样地，SBS 改性沥青也会出现同样的结果，说明沥青的低温性能结果不一致，意味着仅采用劲度模量 S 或蠕变速率 m 来评价其低温性能存在片面性。

2.3.2 临界温度差 ΔT_c 分析

临界温度差 ΔT_c 是作为评价沥青低温性能的常用指标之一。该指标被定义为的临界温度 TS(劲度模量 $S=300MPa$)

与临界温度 T_m (蠕变速率 $m=0.3$) 的差值, 综合考虑沥青低温变形能力和应力松弛能力。临界温度差 ΔT_c 越小, 说明沥青的脆性越大, 且 ΔT_c 对应着低温初始开裂值 ($\Delta T_c \geq -2.5^\circ\text{C}$) 和严重开裂值 ($\Delta T_c \geq -5.0^\circ\text{C}$)。计算公式如式 (3-4) 所示。

$$\Delta T_c = T_s - T_m \quad (3-4)$$

式中, T_s —— $S=300\text{MPa}$ 的温度;

T_m —— $m=0.3$ 的温度。

因此, 本文计算了两种沥青在不同老化时间下的临界温度差 ΔT_c , 结果图 3-7 所示。

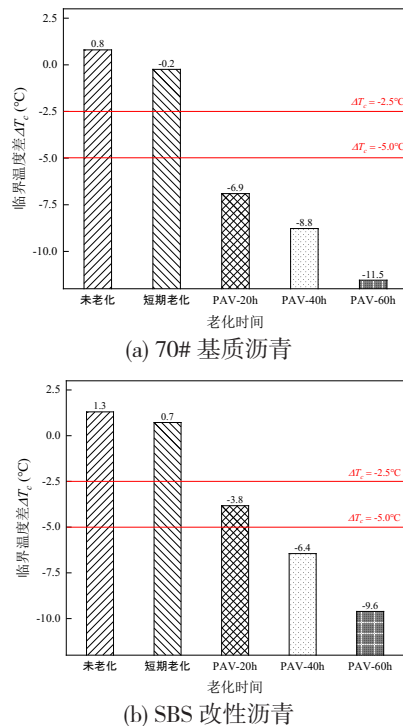


图 7 不同老化时间下的临界温度差 ΔT_c

由图 7 可知, 70# 基质沥青同一老化状态下对应的 ΔT_c 低于 SBS 改性沥青, 未老化状态下的 70# 基质沥青 ΔT_c 仅为 SBS 改性沥青的 60% 左右; 随着沥青的老化, 70# 基质沥青 ΔT_c 达 -0.2°C , 而 SBS 改性沥青 ΔT_c 达 0.7°C ; 随着老化加剧, 70# 基质沥青在 PAV-20h 对应的 ΔT_c 大幅下降, 约为 -6.9°C , 超过了严重开裂值 -5.0°C , 而 SBS 改性沥青 ΔT_c 达 -3.8°C , 超过了初始开裂值 -2.5°C , 但仍在可控范围内。因此, SBS 改性沥青的低温性能要优于 70# 基质沥青, 同时 ΔT_c 可以更好评价沥青的低温性能。

3. 结论

(1) 随着老化程度的增加, 两种沥青的复数模量主曲线逐渐向上移动, 表明老化增加了其抗变形能力, 在高频 (低

温) 条件下, 沥青在不同老化时间下的复数模量 G^* 差距较小, 而在低频 (高温) 条件下, 则相反; 相位角主曲线逐渐向下移动, 表明老化降低了沥青的粘性比例, 增加了其弹性比例, SBS 改性沥青的相位角主曲线存在“平台期”, 抑制了沥青向粘流态转化。

(2) G-R 参数对老化较为敏感, 且适合评价沥青老化后的抗裂性能; 在同等老化条件下, SBS 改性沥青的抗疲劳能量指数 FREI 均大于 70# 基质沥青, 相比于 G-R 参数, FREI 更利于分析沥青的抗裂性能。

(3) 随着老化程度的增加与温度的下降 (同等老化条件), 两种沥青的劲度模量 S 和蠕变速率 m 分别呈现上升和下降趋势, 意味着低温和老化均会增加其低温开裂风险, 且劲度模量 S 比蠕变速率 m 受低温的影响更为敏感; 临界温度差 ΔT_c 综合考虑沥青低温变形能力和应力松弛能力, 更利于分析沥青的低温性能。

参考文献:

- [1] 屈鑫, 丁鹤洋, 汪海年. 道路沥青老化评价方法进展 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(06): 205-220.
- [2] 冯新军, 康兆杰, 明廷军. 热、光、水耦合老化对高黏度改性沥青性能的影响及微观机理 [J]. 公路, 2023, 68(10): 65-73.
- [3] 王永宁, 李波, 任小遇, 等. 不同老化时间的 SBS 改性沥青再生红外光谱分析 [J]. 材料科学与工程学报, 2020, 38(4): 643-647, 565.
- [4] 金大勇, 颜川奇, 易宏宇, 等. 老化对改性沥青宽温度域黏弹特性的影响 [J]. 建筑材料学报, 2022, 25(12): 1321-1328.
- [5] 林梅, 李萍, 念腾飞, 等. 再生沥青微观结构对流变性能的影响 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2019, 47(6): 121-126.
- [6] 刘建阳. 公路沥青老化的影响因素及其预防对策研究进展 [J]. 合成材料老化与应用, 2024, 53(05): 73-75.
- [7] 彭吉瑞. 沥青加速老化流变特性及化学特性研究 [J]. 西部交通科技, 2024, (03): 64-67.
- [8] 潘文慧. 不同老化程度下沥青路用性能变化规律 [J]. 山东交通科技, 2022, (04): 80-83.
- [9] 王岚, 王子豪, 李超. 基于黏弹性理论的多聚磷酸改性沥青低温性能 [J]. 复合材料学报, 2017, 34(02): 322-328.

作者简介: 张哲伟 (1975—), 男, 汉族, 大学, 高级工程师, 研究方向: 道路工程材料。