

# 基于流变性能的再生剂用量确定方法

丁彬<sup>1,2</sup>, 徐金玉<sup>1,2</sup>, 袁梦<sup>1,2</sup>, 韩超<sup>1,2</sup>, 岳学军<sup>1,2</sup>

1. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 211112; 2. 新型道路材料国家工程研究中心, 江苏 南京 211112

**摘要:**为提高就地热再生沥青混合料的综合路用性能,基于车辙因子、蠕变劲度、蠕变速率和临界温差等流变性能参数,研究再生剂用量对再生沥青性能的影响,提出根据不同再生剂与回收沥青的质量比下再生沥青连续高温等级和连续低温等级的关系,综合平衡再生沥青高温、低温性能确定再生剂与回收沥青的质量比;根据确定的再生剂与回收沥青的质量比制备沥青混合料,与基于针入度方法确定的再生剂与回收沥青的质量比下沥青混合料的高温、低温性能对比。结果表明:随再生剂与回收沥青的质量比增大,动态剪切流变试验测得的再生沥青车辙因子逐渐减小,弯曲梁流变试验测得的蠕变劲度减小,蠕变速率增大,柔韧性增强。基于连续高温等级和连续低温等级确定再生剂与回收沥青的质量比,以此得到的再生沥青混合料高温性能略降,但浸水马歇尔残留稳定度增大9.4%,冻融劈裂强度比增大7.9%,小梁弯曲破坏应变增大5.5%,能更有效地平衡再生沥青混合料高温和低温性能。

**关键词:**就地热再生;再生剂;流变性能;沥青性能等级;高低温性能平衡

**中图分类号:**U416.217

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-0032(2025)03-0068-06

**引用格式:**丁彬,徐金玉,袁梦,等. 基于流变性能的再生剂用量确定方法[J]. 山东交通学院学报,2025,33(3): 68-73.

DING Bin, XU Jinyu, YUAN Meng, et al. The determination method of the rejuvenator dosage based on rheological property[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(3): 68-73.

## 0 引言

就地热再生技术可实现沥青混合料回收料(reclaimed asphalt pavement, RAP)100%循环再生利用,减少道路建设对沥青、天然骨料的依赖,降低材料运输成本,并最大限度地减少温室气体排放,具有显著的经济和环境效益,在公路养护领域得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。回收沥青老化变硬,黏度增大,物理和力学性能衰退,需掺加一定比例的再生剂改善再生沥青混合料的抗裂性能<sup>[4-5]</sup>。再生剂是一种生物或化学添加剂,通常含有大量的轻质组分,如饱和烃、芳香烃等,能补充沥青在施工和服役期间因氧化等因素流失的组分,是影响就地热再生沥青混合料质量的重要因素。再生剂扩散可有效降低沥青混合料的弯曲刚度,改善再生沥青混合料抗裂性不足的问题,但其效果依赖于材料选择、工艺控制及性能平衡设计,实际应用中需结合试验数据与工程需求进行综合优化<sup>[6-8]</sup>。再生剂用量显著影响再生沥青混合料的路用性能,对再生效果起关键作用<sup>[9-10]</sup>。

根据再生沥青的目标标号,采用试配法确定再生剂与回收沥青的质量比,将一定质量的再生剂掺入回收沥青,根据针入度、软化点、延度等指标的恢复情况确定再生剂与回收沥青的质量比。RAP回收过程中不可避免会有微量粉料进入回收沥青,常出现针入度恢复效果较好但延度不达标的情况<sup>[11]</sup>。部分再生剂的生产厂家也会推荐再生剂与回收沥青的质量比,受回收沥青材料及新沥青性能等级的差异性

收稿日期:2024-07-25

基金项目:四川省科技计划项目(2020YFS0450)

第一作者简介:丁彬(1984—),男,南京人,高级工程师,主要研究方向为沥青路面新材料、新技术、新工艺,E-mail:db1453@jsti.com。

限制,普适性较差。熊颖等<sup>[12]</sup>通过掺加一定质量的再生剂改善再生沥青混合料性能,进行马歇尔试验,构建马歇尔综合指标评价模型,获取稳定度、浸水马歇尔稳定度、冻融劈裂抗拉强度及冻融劈裂抗拉强度比等关键指标的相对权重,分析单位再生剂用量与综合马歇尔性能指标的变化规律。徐衍亮等<sup>[13]</sup>通过动态剪切流变试验、弯曲梁流变试验测得的沥青流变指标对比不同沥青再生剂的质量差异,研究短期老化和长期老化对回收沥青及再生沥青的影响。苏刚等<sup>[14]</sup>以车辙因子确定再生剂与回收沥青质量比的上限,蠕变劲度与蠕变速率确定再生剂与回收沥青质量比的下限,据此确定再生剂与回收沥青的最佳质量比,并通过常规沥青试验、红外光谱试验等进行力学性能验证。黄雪林<sup>[15]</sup>分析现有实际工程案例与再生剂确定方法间存在偏差的问题,通过宏观试验并采用原子力显微镜观察等多角度分析偏差产生的原因,并以试验结果为基础提出改进方法。目前尚未形成统一的再生剂与回收沥青质量比的确定方法,且现有方法无法精准匹配老化沥青的梯度劣化,易导致再生沥青混合料路用性能的波动<sup>[16-17]</sup>。

本文基于再生沥青连续高温等级和连续低温等级的关系,考虑再生沥青的目标等级与再生沥青高低温性能平衡,提出再生剂与回收沥青质量比的确定方法,并与传统再生剂确定方法比较,以期提高再生工程质量。

## 1 原材料及试验方法

### 1.1 原材料

RAP 取自宁扬高速,再生剂为苏博特瑞强 RA102(D)型,常温下为黏稠状液体。回收沥青、苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene-butadiene-styrene block copolymer,SBS)改性沥青与再生剂的路用性能试验结果如表1~4所示。

表1 回收沥青试验结果

| 针入度 <sup>①</sup> /(0.1 mm) | 软化点/℃ | 延度 <sup>②</sup> /cm | 旋转黏度 <sup>③</sup> /(Pa·s <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------|-------|---------------------|------------------------------------------|
| 21                         | 69.5  | 脆断                  | 83 860                                   |

①25℃,100 g,5 s;②5℃,5 cm/min;③60℃。

表2 SBS改性沥青试验结果

| 项目                   | 针入度 <sup>①</sup> /(0.1 mm) | 针入度指数 | 延度 <sup>②</sup> /cm | 软化点 <sup>③</sup> /℃ | 旋转黏度 <sup>④</sup> /(kPa·s <sup>-1</sup> ) | 运动黏度 <sup>⑤</sup> /(Pa·s <sup>-1</sup> ) | 弹性恢复/% | 离析/℃ | 溶解度/%  | 闪点/℃ |
|----------------------|----------------------------|-------|---------------------|---------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|--------|------|--------|------|
| 试验结果                 | 58                         | 0.51  | 32                  | 90.0                | >20                                       | 2.750                                    | 98     | 0.7  | 99.67  | 328  |
| 技术要求 <sup>[18]</sup> | 40~70                      | 实测    | ≥25                 | ≥70.0               | ≥20                                       | ≤3.000                                   | ≥80    | ≤2.5 | ≥99.00 | ≥245 |

①25℃,100 g,5 s;②5℃;③60℃;④135℃;⑤25℃。

表3 SBS改性沥青旋转薄膜烘箱试验结果

| 项目                   | 质量变化/%      | 残留针入度比 <sup>①</sup> /% | 残留延度 <sup>②</sup> /cm | PG <sup>③</sup> |
|----------------------|-------------|------------------------|-----------------------|-----------------|
| 试验结果                 | -0.06       | 79.3                   | 21                    | 76-22           |
| 技术要求 <sup>[18]</sup> | -0.50~+0.50 | ≥65.0                  | ≥15                   | 76-22           |

①25℃;②5℃;③沥青性能等级(performance grade,PG)。

表4 再生剂试验结果

| 项目                   | 黏度 <sup>①</sup> /(mPa·s <sup>-1</sup> ) | 闪点/℃ | 饱和分质量分数/% | 芳香分质量分数/% | 薄膜烘箱试验前后黏度比 | 薄膜烘箱试验后质量变化/% | 密度 <sup>②</sup> /(g·cm <sup>-3</sup> ) |
|----------------------|-----------------------------------------|------|-----------|-----------|-------------|---------------|----------------------------------------|
| 试验结果                 | 803                                     | 241  | 18.4      | 63.2      | 1.4         | 0.4           | 0.99                                   |
| 技术要求 <sup>[11]</sup> | 600~1 200                               | ≥220 | ≤30.0     | 实测记录      | ≤3.0        | -3.0~4.0      | 实测记录                                   |

①25℃;②15℃。

1.2 试验方法

采用弯曲梁流变仪测量沥青结合料在低温下的弯曲蠕变劲度和蠕变速率,反映沥青结合料的抗低温开裂性能。蠕变劲度越小,蠕变速率越大,沥青结合料的柔韧性越高,抗开裂能力越强;反之,沥青结合料的柔韧性越低,抗开裂能力越弱。一般压力老化后,沥青结合料的蠕变劲度不大于 300 MPa,蠕变速率不小于 0.3。

采用动态剪切流变仪测量沥青结合料在不同温度和频率下的剪切模量和相位角,反映沥青结合料的高温性能。一般以车辙因子( $G^*/\sin \delta$ ,  $G^*$  为复数剪切模量,  $\delta$  为相位角,车辙因子越大,材料弹性响应越强,高温下抗车辙性能越好)作为评价指标,原样沥青的车辙因子不小于 1.0 kPa,旋转薄膜烘箱老化后残留沥青的车辙因子不小于 2.2 kPa<sup>[16]</sup>。

2 最佳再生剂用量确定

2.1 再生沥青流变性能

添加与回收沥青不同质量比的再生剂,按回收沥青与 SBS 改性沥青的质量比为 85 : 15 制备再生沥青,通过动态剪切流变试验和弯曲梁流变试验,得到不同温度(76、82 ℃)、再生剂与回收沥青质量比  $w$  (0、3%、5%、7%、9%)下,原样沥青和旋转薄膜烘箱老化后残留沥青的车辙因子,如表 5 所示。不同温度(-6、-12 ℃)下再生沥青弯曲蠕变劲度  $S$  与蠕变速率  $m$  如表 6 所示。

表 5 不同温度、不同  $w$  下再生沥青的车辙因子

| $w/\%$ | 76℃ 车辙因子/ kPa |               | 82℃ 车辙因子/ kPa |               |
|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|        | 原样沥青          | 旋转薄膜烘箱老化后残留沥青 | 原样沥青          | 旋转薄膜烘箱老化后残留沥青 |
| 0      | 4.13          | 4.94          | 1.89          | 2.38          |
| 3      | 3.02          | 4.42          | 1.43          | 1.97          |
| 5      | 2.35          | 4.28          | 1.05          | 1.76          |
| 7      | 1.74          | 3.86          | 0.58          | 1.43          |
| 9      | 0.98          | 3.39          | 0.07          | 1.17          |

表 6 不同温度、不同  $w$  下再生沥青的弯曲蠕变劲度和蠕变速率

| $w/\%$ | 蠕变劲度/MPa |         | 蠕变速率   |         |
|--------|----------|---------|--------|---------|
|        | 温度为-6℃   | 温度为-12℃ | 温度为-6℃ | 温度为-12℃ |
| 0      | 175      | 281     | 0.315  | 0.238   |
| 3      | 102      | 224     | 0.353  | 0.262   |
| 5      | 87       | 204     | 0.371  | 0.287   |
| 7      | 71       | 179     | 0.386  | 0.305   |
| 9      | 64       | 155     | 0.403  | 0.324   |

由表 5 可知:随  $w$  增大,76、82 ℃下,原样沥青和旋转薄膜烘箱老化后残留沥青的车辙因子均减小,表明加入再生剂对沥青的流变性能有一定影响。根据 PG 评价标准<sup>[16]</sup>,再生沥青的高温性能等级由 82 降至 76。 $w$  增大对再生沥青的高温抗车辙能力有不利影响。

由表 6 可知:随  $w$  增大,再生沥青的弯曲蠕变劲度减小,蠕变速率增大,低温性能提高,柔韧性增强,低温开裂风险略降。根据 PG 评价标准<sup>[16]</sup>,再生沥青的低温性能等级由-16 提高至-22。

RAP 中的沥青成分复杂,难以从单一维度评价其力学性能和路用性能,尤其是抗裂性能受低温时的变形能力及应力松弛能力等多重因素影响。仅依赖蠕变劲度或蠕变速率无法全面且准确地评估回收沥

青的低温抗裂性能。引入临界温差  $\Delta T_c$  反映材料模量和松弛能力的平衡,一般  $\Delta T_c$  越小,沥青老化越显著, $\Delta T_c < -2.5$  °C 时,路面显著开裂<sup>[17]</sup>。计算方法为:

$$\Delta T_c = T_s - T_m, \quad (1)$$

式中: $T_s$  为  $S=300$  MPa 时的临界温度, $T_m$  为  $m=0.3$  时的临界温度。

无量纲方程

$$\{T_s\} = \{T_1\} - 10 + (\{T_1\} - \{T_2\}) (\log 300 - \log \{S_1\}) / (\log \{S_1\} - \log \{S_2\}),$$

式中: $\{T_1\}$ 、 $\{T_2\}$  为温度  $T_1$ 、 $T_2$  的数值, $T_1 = -6$  °C, $T_2 = -12$  °C; $\{S_1\}$ 、 $\{S_2\}$  为温度分别为  $T_1$ 、 $T_2$  时的弯曲蠕变劲度  $S_1$ 、 $S_2$  的数值。

无量纲方程

$$\{T_m\} = \{T_1\} - 10 + (\{T_1\} - \{T_2\}) (0.3 - \{m_1\}) / (\{m_1\} - \{m_2\}),$$

式中: $\{m_1\}$ 、 $\{m_2\}$  为温度分别为  $T_1$ 、 $T_2$  时的蠕变速率  $m_1$ 、 $m_2$  的数值。

再生剂与回收沥青质量比分别为 0、3%、5%、7%、9% 时,再生沥青的  $\Delta T_c$  分别为 -5.8、-5.0、-3.8、-2.9、-2.3 °C,表明随  $w$  增大,再生沥青  $\Delta T_c$  增大。当  $w \approx 8\%$  时, $\Delta T_c$  超过起裂线 2.5 °C,再生沥青的抗开裂能力较好。

## 2.2 再生剂用量

综合考虑连续高温等级(performance grade high,PGH)和连续低温等级(performance grade low,PGL)的关系,在满足高、低温性能的基础上,综合平衡沥青高、低温性能,确定  $w$ 。以未老化再生沥青车辙因子为 1.0 时的临界温度、旋转薄膜烘箱老化后再生沥青车辙因子为 2.2 时的最小临界温度作为再生沥青连续高温等级,以压力老化后再生沥青弯曲蠕变劲度控制的临界温度与蠕变速率控制的最大临界温度作为再生沥青连续低温等级,与  $w$  线性拟合,获取沥青性能等级恢复至目标等级时对应的  $w$  范围。考虑高、低温性能平衡,以中间值作为最佳  $w$ 。

不同  $w$  下的临界温度如表 7 所示,计算得到不同  $w$  下再生沥青的连续高温等级 PGH 和连续低温等级 PGL 变化曲线,如图 1 所示。

由图 1 可知:为更好恢复再生沥青性能,参照新沥青常用性能等级 PG76-22<sup>[11]</sup>,将再生沥青低温性能等级恢复至 PG-22 时, $w$  应大于 6.3%,将再生沥青 PG 高温等级降至 76 时, $w$  不应超过 8.9%,考虑再生沥青高温、低温性能的平衡,取中间值 7.6% 为最佳  $w$ 。经验证, $w=7.6\%$  的再生沥青疲劳因子(31 °C)为 2.859 MPa,小于 5.000 MPa,满足要求<sup>[16]</sup>。

基于针入度体系的再生剂用量确定方法是保证再生沥青达到规定针入度和软化点,满足最终沥青混合料的性能要求,并根据经济性综合确定。不同  $w$  下再生沥青的针入度、延度、软化点试验结果如表 8 所示。由表 8 可知: $w=5\%$  时,再生沥青的针入度、软化点、延度均能满足要求<sup>[18]</sup>,由此确定基于针入度体系的再生剂与回收沥青的质量比为 5.0%。

表 7 再生沥青连续高温等级与连续低温等级的临界温度

| $w/\%$ | 临界温度/°C              |                            |                       |                     |
|--------|----------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------|
|        | 未老化再生沥青<br>车辙因子为 1.0 | 旋转薄膜烘箱老化后再生<br>沥青车辙因子为 2.2 | 压力老化后再生沥青<br>弯曲蠕变劲度控制 | 压力老化后再生沥青<br>蠕变速率控制 |
| 0      | 84.4                 | 82.4                       | -22.8                 | -17.0               |
| 3      | 83.6                 | 81.4                       | -24.2                 | -19.3               |
| 5      | 82.2                 | 81.0                       | -24.7                 | -21.0               |
| 7      | 79.8                 | 80.1                       | -25.4                 | -22.4               |
| 9      | 75.9                 | 79.2                       | -26.4                 | -24.1               |

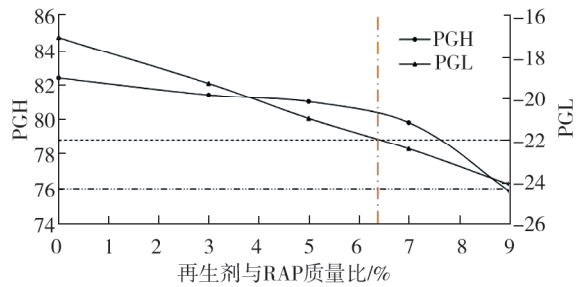


图 1 不同  $w$  下再生沥青连续高温等级、连续低温等级变化

表 8 再生沥青针入度、延度和软化点的试验结果

| $w/\%$               | 针入度 <sup>①</sup> /(0.1 mm) | 软化点 <sup>②</sup> /℃ | 延度/cm |
|----------------------|----------------------------|---------------------|-------|
| 0                    | 21                         | 69.5                | 6     |
| 3                    | 42                         | 64.5                | 12    |
| 5                    | 47                         | 63.0                | 17    |
| 7                    | 56                         | 60.5                | 19    |
| 技术要求 <sup>[18]</sup> | 40~60                      | 减小量不超过 10           | ≥15   |

①25℃,100 g,5 s;②15℃。

3 再生沥青混合料性能的对比较证

与现有再生剂用量确定方法对比,设计沥青玛蹄脂碎石混合料(stone mastic asphalt,SMA)-13。新添加沥青混合料与回收沥青的质量比为 15:85,再生沥青混合料油石比为 5.9%,木质素纤维与新添加矿料的质量比为 0.3%,合成级配如图 2 所示。再生剂与回收沥青的质量比分别为 5.0%、7.6%,毛体积相对密度分别为 2.507、2.517,最大理论相对密度分别为 2.612、2.615,基于针入度体系和流变性能的再生剂用量确定方法下,再生沥青混合料性能试验结果如表 9 所示。

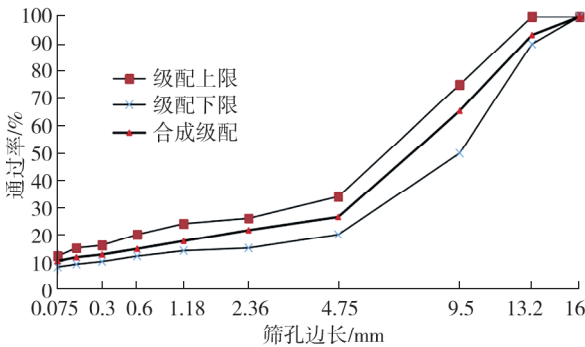


图 2 合成级配

表 9 不同再生剂用量确定方法下再生沥青混合料性能对比

| 再生剂<br>确定方法 | 空隙<br>率/% | 稳定<br>度/kN | 流值/<br>(0.1 mm) | 析漏损失<br>率/% | 飞散损失<br>率/% | 残留<br>稳定度/% | 冻融劈裂<br>强度比/% | 破坏<br>应变/ $10^{-6}$ | 动稳定度/<br>(次· $\text{mm}^{-1}$ ) |
|-------------|-----------|------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------------|---------------------------------|
| 针入度体系       | 4.0       | 11.55      | 32.2            | 0.04        | 6.8         | 87.2        | 83.7          | 2 541.0             | 5 787                           |
| 流变性能        | 3.8       | 11.07      | 33.2            | 0.03        | 5.1         | 95.4        | 90.3          | 2 681.8             | 4 936                           |
| 技术要求        | 3.0~4.5   | ≥6.00      | 20.0~50.0       | ≤0.10       | ≤15.0       | ≥85.0       | ≥80.0         | ≥2 500.0            | ≥3 000                          |

由表 9 可知:基于流变性能确定  $w$  的方法制备的 SMA-13,相比基于针入度体系方法制备的 SMA-13 再生沥青混合料,残留稳定度增大 9.4%,冻融劈裂强度比增大 7.9%,小梁弯曲破坏应变增大 5.5%,动稳定度减小 14.7%,但仍满足不小于 3 000 次/mm 的要求<sup>[18]</sup>,具有较好的高温稳定性能。再生剂与回收沥青质量比的合理提高,虽在一定程度上对沥青混合料的高温性能产生不利影响,但沥青混合料的水稳定性、低温性能、耐久性能提高,沥青混合料的高温、低温性能在一定程度上得到平衡。

4 结论

基于沥青的流变性能,考虑沥青混合料高温、低温性能的平衡,提出基于流变性能的再生剂用量确定方法,并与传统针入度确定法比较。

1)随着再生剂与回收沥青质量比的增大,沥青混合料车辙因子减小,弯曲蠕变劲度减小,蠕变速率增大,柔韧性增强。

2)根据再生沥青连续高温等级、连续低温等级和沥青性能目标等级,综合考虑沥青高温、低温性能平衡确定再生剂的用量,基于针入度体系方法的再生剂与回收沥青的最佳质量比为 5.0%。

3)与基于针入度确定再生剂用量方法并以此制备得到的 SMA-13 再生沥青混合料对比,基于流变性能的方法并以此制备得到的 SMA-13 再生沥青混合料高温性能略有降低,残留稳定度增大 9.4%,冻融劈裂强度比增大 7.9%,小梁弯曲破坏应变增大 5.5%,更有效的平衡沥青混合料高温、低温性能,建议在实际应用中根据再生沥青流变性能确定再生剂与回收沥青的最佳质量比。

#### 参考文献:

- [1] MA Y T, POLACZYK P, PARK H, et al. Performance evaluation of temperature effect on hot in-place recycling asphalt mixtures[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277:124093.
- [2] 朱浩然,张杨,马辉,等.微波辅助加热就地热再生在高速公路养护中的应用研究[J].中外公路,2023,43(5):37-42.
- [3] 郭小宏,陶梦欣,邓莉,等.清洁化视角下就地热再生技术评价[J].土木工程与管理学报,2023,40(1):7-13.
- [4] ZHONG H B, HUANG W D, YAN C Q, et al. Investigating binder aging during hot in-place recycling (HIR) of asphalt pavement[J]. Construction and Building Materials, 2021, 276:122188.
- [5] YAO Y Q, YANG J G, GAO J, et al. Strategy for improving the effect of hot in-place recycling of asphalt pavement [J]. Construction and Building Materials, 2023, 366:130054.
- [6] 孙皓.再生剂用量对再生沥青混合料水稳定性影响研究[J].交通节能与环保,2023,19(5):212-216.
- [7] WANG L S, SHEN A Q, MOU G, et al. Effect of RAP gradation subdivision and addition of a rejuvenator on recycled asphalt mixture engineering performance[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18:e02136.
- [8] ALAE M, XU L, CAO Z L, et al. Fatigue and intermediate-temperature cracking performance of rejuvenated recycled asphalt binders and mixtures:A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 384:135587.
- [9] LI D N, DING Y J, WANG J J, et al. Multiscale molecular simulations on the rejuvenation of recycled asphalt mixture: An insight into molecular impact of rejuvenators in aged asphalt binders[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 414:137621.
- [10] LU Y J, SANTOS MAIA R S, HAJJ R. Multiscale evaluation of asphalt binder rejuvenation dosing and efficacy [J]. Construction and Building Materials,2023, 408:133813.
- [11] 中华人民共和国交通运输部,交通运输部公路科学研究院.公路沥青路面再生技术规范:JTG/T 5521—2019[S].北京:人民交通出版社,2019.
- [12] 熊颖,陈维,姚玉权,等.基于马歇尔指标的就地热再生沥青混合料再生剂用量分析[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(8):80-84.
- [13] 徐衍亮,吕正龙.基于流变指标的沥青再生剂应用评价研究[J].石油沥青,2023,37(1):7-12.
- [14] 苏刚,肖庆一,龚芳媛,等.基于平衡设计法理念确定最佳再生剂用量技术研究[J].公路,2024,69(3):340-347.
- [15] 黄雪林.高掺量厂拌热再生沥青混合料再生剂掺量确定方法研究[J].现代交通技术,2019,16(6):14-17.
- [16] AASHTO. Performance-Graded Asphalt Binder: M320-22[S]. [S. l.]: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2022.
- [17] ANDERSON R M, KING G N, HANSON D I, et al. Evaluation of the relationship between asphalt binder properties and non-load related cracking[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2011,80:615-663.
- [18] 江苏交通控股有限公司.江苏高速公路沥青路面养护设计指南:Q/SJKGYHB2-001—2020[S].南京:江苏交通控股有限公司,2019.

## The determination method of the rejuvenator dosage based on rheological property

DING Bin<sup>1,2</sup>, XU Jinyu<sup>1,2</sup>, YUAN Meng<sup>1,2</sup>, HAN Chao<sup>1,2</sup>, YUE Xuejun<sup>1,2</sup>

1. JSTI GROUP, Nanjing 211112, China; 2. National Engineering Research Center of Advanced Road Materials, Nanjing 211112, China

**Abstract:** To improve the comprehensive road performance of in-situ recycled asphalt mixtures, this study investigates

(下转第 101 页)

braking modes. The results show that when the accelerator pedal opening reaches 95%, the regenerative efficiencies under forced and gentle braking modes are 60.3% and 14.6%, respectively, which align closely with the target values of 60.0% and 15.0%. Additionally, higher braking deceleration and longer regenerative braking duration lead to greater recovered energy. The forced braking mode of the drive motor can significantly increase regenerative energy, thereby extending the driving range of micro electric vehicles.

**Keywords:** micro electric vehicle; regenerative braking; test system; simulation

(责任编辑:赵玉真)

.....  
(上接第73页)

the impact of the amount of rejuvenator on the performance of recycled asphalt based on rheological performance parameters such as rutting factor, creep stiffness, creep rate, and critical temperature difference. It proposes a method for determining the quality ratio of rejuvenator to reclaimed asphalt based on the relationship between continuous high-temperature grades and continuous low-temperature grades. This method balances the high-temperature and low-temperature performance of asphalt to define the quality ratio of rejuvenator to reclaimed asphalt. Based on the determined quality ratio, asphalt mixtures are prepared, and the high-temperature and low-temperature performance of these mixtures is compared with those determined by the penetration method for the same quality ratio of rejuvenator to reclaimed asphalt. The results indicate that as the quality ratio of rejuvenator to reclaimed asphalt increases, the rutting factor of recycled asphalt measured by dynamic shear rheology gradually decreases, the creep stiffness measured by bending beam rheology decreases, the creep rate increases, and flexibility improves. The quality ratio of rejuvenator to reclaimed asphalt determined based on continuous high-temperature and low-temperature grades results in a slight decrease in the high-temperature performance of the recycled asphalt mixture, but the water-saturated Marshall residual stability increases by 9.4%, the freeze-thaw splitting tensile strength ratio increases by 7.9%, and the bending failure strain of the small beam increases by 5.5%, effectively balancing the high-temperature and low-temperature performance of the recycled asphalt mixture.

**Keywords:** geothermal regeneration; rejuvenator; rheological property; PG; balance of high and low temperature performance

(责任编辑:王惠)