

# 再生剂对高RAP掺量厂拌热再生沥青混合料性能影响研究

郭永刚

[上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200433]

**摘要:** 随着我国道路建设事业的蓬勃发展,旧沥青路面回收材料(reclaimed asphalt pavement, RAP)的资源化利用需求日益凸显。针对RAP掺量为50%的厂拌热再生沥青混合料,系统研究了0%、2%、5%、8%、11%不同再生剂掺量对其性能的影响。通过回收RAP中的老化沥青[针入度18.2(0.1 mm)、软化点68.5℃],测试再生剂对沥青性能的恢复效果。结果表明:当再生剂掺量达到8%时,针入度提升至53.1(0.1 mm),软化点降至56.3℃,黏弹特性显著改善;当掺量超过8%后,沥青的高温稳定性明显衰减。在AC-20混合料设计中,新油石比优化至2.26%,级配满足规范要求。性能试验显示:8%再生剂掺量下,混合料空隙率降至4.21%,马歇尔稳定度达12.95 kN,提升了17.7%,动稳定度达4 165次/mm,提升了31.2%;水稳定性方面,浸水残留稳定度( $MS_0$ )和冻融劈裂强度比(TSR)分别达94.7%和86.6%,较未掺再生剂时分别提升了7.5%和6.66%。当再生剂掺量超过8%时,会稀释沥青黏度,导致混合料的高温稳定性和水稳定性下降。研究表明,在50% RAP掺量下再生剂的最佳掺量为8%,该方案实现了老化沥青性能恢复、混合料体积参数优化与力学性能提升的协同,为高掺量再生技术提供一些可参考的意见。

**关键词:** 再生剂掺量;高RAP掺量;厂拌热再生;沥青混合料性能;老化沥青恢复

中图分类号: U414;TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)03-0117-04

## Study on Influence of Regenerant on Performance of High RAP Content Plant Mixed Hot-recycled Asphalt Mixture

GUO Yonggang

[Shanghai Road and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China]

**Abstract:** With the vigorous development of road construction industry in China, the demand for resource utilization of recycled asphalt pavement materials (reclaimed asphalt pavement, RAP) has become increasingly prominent. For the plant-mixed hot recycled asphalt mixtures with a RAP content of 50%, the effects of different regenerant dosages of 0%, 2%, 5%, 8% and 11% on its performance are systematically studied. By recycling the aged asphalt from RAP [with a penetration of 18.2 (0.1 mm) and a softening point of 68.5 °C], the recovery effect of the regenerant on asphalt performance is tested. The results show that when the dosage of regenerant reaches 8%, the penetration degree increases to 53.1 (0.1 mm), the softening point decreases to 56.3 °C, and the viscoelastic properties are significantly improved. After the dosage exceeds 8%, the high-temperature stability of asphalt significantly deteriorates. In the design of AC-20 mixture, the new asphalt-aggregate ratio is optimized to 2.26%, and the gradation meets the specification requirements. Performance tests show that at an 8% dosage of regenerant, the void fraction of the mixture decreases to 4.21%, and the Marshall stability reaches 12.95 kN, with an increase of 17.7%. And the dynamic stability reaches 4 165 times/mm, with an increase of 31.2%. In terms of water stability, the residual stability after immersion ( $MS_0$ ) and the freeze-thaw splitting strength ratio (TSR) reach 94.7% and 86.6%, respectively, which are 7.5% and 6.66% higher than those without the addition of regenerant. When the dosage of regenerant exceeds 8%, the viscosity of asphalt will be diluted, resulting in a decrease in the high-temperature stability and water stability of the mixture. Research shows that the optimal dosage of regenerant with 50% RAP is 8%. This scheme achieves the synergy of restoring the performance of aged asphalt, optimizing the volume parameters of the mixture and enhancing its mechanical properties, providing some reference suggestions for high-dosage recycling technology.

**Keywords:** regenerant dosage; high-RAP dosage; plant-mixed hot regeneration; asphalt mixture performance; aging asphalt recovery

收稿日期: 2025-07-23

作者简介: 郭永刚(1983—),男,本科,高级工程师,从事沥青路面施工技术与管理工

0 引言

在城市不断扩张和交通网络持续完善的背景下,我国道路建设领域正经历着快速发展。交通运输部数据显示,我国每年产生的旧沥青路面回收材料(RAP)超1亿t,若直接堆存,不仅占用超5 000 hm<sup>2</sup>土地,还会因沥青组分缓慢释放造成土壤与地下水污染,资源化利用需求极为迫切。大量沥青路面在长期使用中,因车辆碾压、自然环境侵蚀等因素,逐渐进入需要大规模养护修缮阶段,由此产生的RAP数量十分庞大。RAP的资源化利用不仅是环保需求,更是经济效益与社会效益的结合点,也是推动交通建设领域绿色发展、提升整体效益的关键环节。通过合理回收再利用,能大幅减少新原材料的使用,在节约成本的同时,助力实现可持续发展目标<sup>[1-3]</sup>。然而,当RAP在再生混合料中的占比提高时,其中老化沥青的性能缺陷会更突出,如黏性过强、柔韧性不足等。同时,旧料与新集料的搭配也更难协调,容易导致混合料结构稳定性不佳等问题<sup>[4-6]</sup>,这让高掺量RAP的有效利用面临不少挑战。

再生剂作为改善老化沥青性能的核心材料,通

过补充老化沥青缺失的芳香分、饱和分等轻质组分,恢复沥青的黏弹特性<sup>[7-9]</sup>。目前相关研究多集中在中低比例RAP应用场景,已有规范要求,老化沥青掺量超过30%,需要专门论证。而现有研究多聚焦于中等RAP掺量(30%~40%)场景<sup>[10-12]</sup>,但在高RAP掺量的情况下,其作用效果、与老化沥青的适配性,以及对整个混合料性能的综合影响,还有很多需要深入探究的地方<sup>[13-14]</sup>。因此,本文重点研究更高比例RAP掺量下,再生剂用量对厂拌热再生沥青混合料性能的影响,为高比例RAP的高效再生利用提供新的思路 and 依据。

1 原材料

1.1 RAP

本研究的RAP取自上海市公路投资集团管理的某公路养护路段,回收和运输过程均进行了严格管控。旧料经破碎筛分后,分为粗RAP(9.5~20 mm)和细RAP(0~9.5 mm)。其中,粗RAP的平均含水率为0.39%,细RAP的平均含水率为1.68%。0~20 mm RAP中沥青占矿料总质量的2.88%。回收料级配过筛率见表1。

表1 RAP级配过筛率

|         |     |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
|---------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 筛孔尺寸/mm | 16  | 13.2 | 9.5  | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6  | 0.3  | 0.15 | 0.075 |
| 通过百分比/% | 100 | 94.5 | 52.8 | 25.6 | 20.3 | 17.9 | 15.7 | 13.3 | 11.6 | 9.3   |

1.2 新沥青

新沥青选用90#道路沥青,由上海石化生产,其技术指标见表2。

表2 基质沥青技术指标

| 检测项目                          | 检测结果  | 规范标准   |
|-------------------------------|-------|--------|
| 针入度(25℃,100 g,5 s)/0.1 mm     | 82.8  | 80~100 |
| 软化点/℃                         | 45.3  | ≥45    |
| 闪点/℃                          | >295  | ≥245   |
| 密度(25℃)/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 1.049 | —      |
| 延度(5 cm/min,15℃)              | >100  | ≥100   |

1.3 再生剂

已有研究表明,当RAP的掺量低于30%时,即便不加入再生剂,重新拌合后的混合料性能也能达到基本使用标准<sup>[15]</sup>。但本次研究中RAP掺量超过了这一比例,因此引入自制再生剂来改善性能。该再生剂富含轻质成分,活性较强,其闪点不低于260℃,在60℃条件下的黏度为236 mm<sup>2</sup>/s,主要功能是增强再生后沥青的流动性能,弥补老化沥青因轻质组分流失造成的性能缺陷。具体性能指标见表3。

表3 再生剂性能指标

| 密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 闪点/℃ | 60℃黏度/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ) | 饱和分量/% | TFOT前后质量变化/% |
|--------------------------|------|-------------------------------------------|--------|--------------|
| 0.99~1.04                | ≥260 | 236                                       | 24.5   | 1.86         |

1.4 新集料

粗集料选用辉绿岩,其压碎值不大于25%,洛杉矶磨耗损失不超过27%,针片状颗粒含量不大于12%。细集料选用粒径小于2.36 mm的石灰岩机制砂及石屑,表观相对密度不小于2.52 t/m<sup>3</sup>,含泥量(筛洗法)不超过2.5%,砂当量不小于65%。矿粉选用由石灰岩磨细而成的石灰石粉。

2 旧沥青性能试验及结果

2.1 旧沥青回收性能

为获取RAP中的旧沥青并分析其性能,研究采用抽提、离心与蒸发三种方式进行回收处理,随后对回收沥青的25℃针入度、软化点及135℃布氏黏度等关键指标展开测试,具体检测数据见表4。

从表4中可知,三个旧沥青样本的25℃针入度

表 4 旧沥青回收性能检测结果

| 项目                  | R-1  | R-2  | R-3  | 平均值  |
|---------------------|------|------|------|------|
| 25℃针入度/0.1 mm       | 18.5 | 18.1 | 18.0 | 18.2 |
| 软化点/℃               | 68.3 | 68.7 | 68.5 | 68.5 |
| 135℃布氏黏度<br>(mPa·s) | 2160 | 2140 | 2150 | 2150 |

均值为 18.2(0.1 mm),软化点均值达 68.5℃,135℃布氏黏度均值为 2 150 mPa·s。这些指标清晰反映出 RAP 中的旧沥青老化程度显著。针入度偏小表示沥青硬度增加,软化点偏高显示沥青耐热性异常提升,黏度增大表明流动性大幅下降,整体性能已偏离新沥青的技术标准,必须借助再生剂的作用才能恢复其使用性能。

2.2 再生剂对老化沥青的恢复效果

将回收得到的旧沥青分别与掺量为 0%、2%、5%、8%、11% 的自制再生剂相混合,在 135℃环境下搅拌至均匀状态后,对混合沥青的 25℃针入度、软化点及 135℃布氏黏度进行检测,以此分析再生剂对老化沥青性能的修复效果。具体试验数据详见表 5。

表 5 再生剂不同掺量下老化沥青性能测试结果

| 再生剂掺量/% | 25℃针入度/<br>0.1 mm | 软化点/℃ | 135℃布氏黏度/<br>(Pa·s) |
|---------|-------------------|-------|---------------------|
| 0       | 18.2              | 68.5  | 2.150               |
| 2       | 26.5              | 65.7  | 1.890               |
| 5       | 42.3              | 61.5  | 1.430               |
| 8       | 53.1              | 56.3  | 1.120               |
| 11      | 60.2              | 54.1  | 0.880               |

从表 5 可知,再生剂掺量对老化沥青性能的影响并非呈线性关系。在掺量为 0%~2% 时,老化沥青的性能改善并不明显,针入度仅从 18.2(0.1 mm)升至 26.5(0.1 mm),软化点下降不到 3℃,135℃布氏黏度的降低速度也较为缓慢,说明此阶段再生剂尚未充分渗透并分散到老化沥青中。当再生剂掺量提高到 5% 时,变化开始显著,针入度上升至 42.3(0.1 mm),软化点降至 61.5℃,布氏黏度大幅下降至 1.430 Pa·s,老化沥青的黏弹性得到了较好恢复。掺量进一步增加到 8% 时,针入度达到 53.1(0.1 mm),软化点降至 56.3℃左右,此时沥青的流动性和低温变形能力均处于较理想的状态。当掺量超过 8% 后,性能改善的效果开始减弱。在 11% 的掺量下,尽管针入度继续增至 60.2(0.1 mm),但软化点降至 54.1℃,布氏黏度低至 0.880 Pa·s,导致沥青的高温稳定性明显下滑。

3 混合料配合比设计

本次研究选取 AC-20 型沥青混合料作为研究对象,设定 RAP 的掺量为 50% 来设计再生混合料的配合比。重点研究 0%、2%、5%、8%、11% 这几种不同再生剂掺量对混合料性能产生的作用,通过目标配合比的优化,确定再生剂的最佳添加比例及合理的级配参数。在 50% RAP 掺量下,0~20 mm RAP 的级配通过百分率为:16 mm 筛孔 100%、9.5 mm 筛孔 52.8%、4.75 mm 筛孔 25.6%、0.075 mm 筛孔 9.3%。与新集料按比例复配后,目标配合比中 16 mm 筛孔通过率为 83.6%,4.75 mm 筛孔通过率为 33.3%,0.075 mm 筛孔通过率为 7.6%,满足 AC-20 型级配范围要求。级配曲线图如图 1 所示。

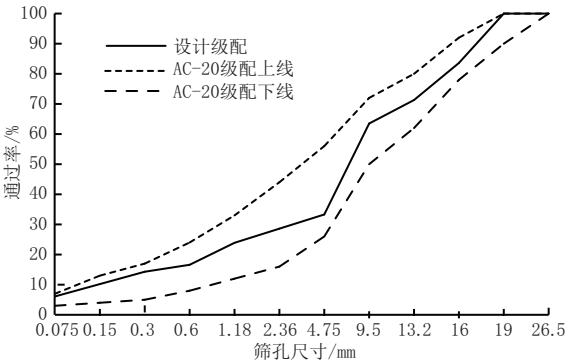


图 1 50%RAP 掺量下 AC-20 再生混合料级配

已知 AC-20 混合料的基准油石比设定为 3.7%,经检测,RAP 中旧沥青的油石比为 2.88%。为合理控制沥青总用量,新沥青的油石比通过“新油石比=基准油石比-(RAP 掺量×RAP 旧油石比)”的公式计算得出。按此公式核算,新油石比为 2.26%,相较于 AC-20 的基准油石比减少了 38.9%,既避免了新沥青的过量使用,又充分利用了 RAP 中的旧沥青,实现了新旧沥青的高效协同应用。

4 性能试验

4.1 马歇尔试验

为分析再生剂掺量对 AC-20 再生混合料密实程度、结构强度及形变性能的作用,试验测定了混合料的空隙率、矿料间隙率、马歇尔稳定度与流值等指标。试验结果见表 6。

从表 6 可知,再生剂掺量从 0% 增加到 8% 的过程中,稳定度提升了 17.7%。这是由于再生剂填补了老化沥青中流失的轻质成分,让沥青胶浆的黏结能力得以增强。当掺量超过 8% 后,稳定度出现小幅回

表6 不同再生剂掺量下混合料马歇尔试验结果

| 再生剂<br>掺量/% | 空隙率/<br>% | VMA/<br>% | VFA/<br>% | 稳定度/<br>kN | 流值/<br>0.1 mm |
|-------------|-----------|-----------|-----------|------------|---------------|
| 0           | 4.96      | 14.3      | 65.7      | 11.00      | 33.60         |
| 2           | 4.73      | 13.9      | 66.3      | 11.58      | 32.40         |
| 5           | 4.49      | 13.6      | 67.2      | 12.17      | 31.21         |
| 8           | 4.21      | 13.2      | 68.4      | 12.95      | 30.30         |
| 11          | 4.06      | 13.0      | 69.0      | 12.45      | 30.93         |

落。这是因为过多的再生剂会降低沥青胶浆的黏度,使集料之间的黏结力变弱。同时,随着再生剂掺量的增加,混合料空隙率逐步减小,在掺量为8%时降至4.21%,处于规范要求的3%~6%区间内,且VFA升至68.4%。这一变化说明再生剂优化了沥青的流动性能,让胶浆能更好地包裹集料,提升了混合料的密实性。

4.2 高温性能

为评估再生剂掺量0%、2%、5%、8%、11%对50% RAP掺量的AC-20再生混合料在高温环境下抵抗永久变形的能力,试验采用高温车辙测试,以此模拟车辆荷载反复作用于路面时的高温受力状态,进而明确再生剂对混合料高温稳定性的改善作用。试验结果如图2所示。

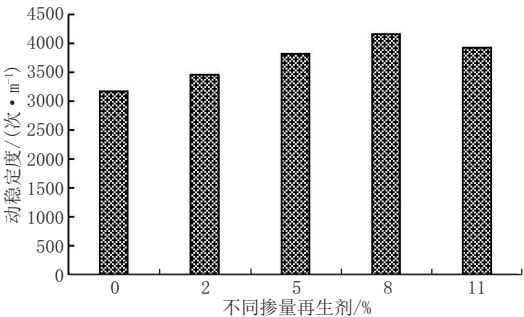


图2 不同再生剂掺量下混合料高温车辙试验结果

如图2所示,旧集料构成的骨架与再生沥青胶浆相互配合,当再生剂掺量为8%时,动稳定度达到最高值,比未添加再生剂提高了31.2%。这说明加入适量再生剂后,沥青的黏弹性能得到恢复,使混合料在高温环境下的永久变形减少。当再生剂掺量超过8%时,动稳定度呈现下降趋势。这是因为过多的再生剂会降低沥青的黏度,致使集料间胶浆的黏结力变弱,在高温条件下容易出现滑移变形的情况。

4.3 水稳定性能

为分析再生剂掺量(0%、2%、5%、8%、11%)对50% RAP掺量AC-20再生混合料抗水损害性能的影响,并验证再生剂能否修复老化沥青与集料界面的黏结力,试验采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验

进行检测。试验结果见表7。

表7 不同再生剂掺量下混合料水稳定性试验结果 单位:%

| 再生剂掺量 | 冻融劈裂抗拉强度比 | 浸水残留稳定度MS <sub>0</sub> |
|-------|-----------|------------------------|
|       | TSR       |                        |
| 0     | 81.23     | 88.12                  |
| 2     | 83.31     | 90.84                  |
| 5     | 85.52     | 93.05                  |
| 8     | 86.64     | 94.73                  |
| 11    | 83.51     | 91.62                  |

从表7可知,再生剂掺量为8%时,浸水残留稳定度(MS<sub>0</sub>)达到94.73%,冻融劈裂抗拉强度比(TSR)达到86.64%,相较于未添加再生剂的情况,分别提高了7.5%和6.66%。这是由于再生剂含有的极性成分会与老化沥青的氧化产物产生化学作用,让沥青重新获得良好的浸润能力,减少了因水分渗透引发的界面剥离现象,充分说明再生剂对沥青与集料间的黏附性能有显著改善。当再生剂掺量超过8%后,TSR降至83.51%。结合再生剂自身60℃黏度(236 mm<sup>2</sup>/s)及沥青胶浆黏弹特性变化规律可推断,过量再生剂会进一步稀释沥青胶浆黏度,导致沥青膜在集料表面的铺展均匀性下降,形成局部薄弱区域,增加水分渗透通道,最终造成水稳定性下降。

5 结 论

综上所述,不同再生剂掺量对老化沥青性能的非线性恢复效应和混合料性能优化的临界掺量效应及工程应用的量化设计方案得出以下结论:

(1)在RAP掺量达到50%这一极高水平时,老化沥青表现出显著的硬化特征,针入度仅为18.2(0.1 mm),软化点高达68.5℃。再生剂通过补充轻质组分可有效恢复沥青性能,其中,8%掺量为关键临界点,此时针入度提升至53.1(0.1 mm),软化点降至56.3℃,黏弹特性与低温变形能力显著改善。但当掺量超过8%后,沥青高温稳定性因黏度过度降低而衰减,11%掺量时软化点降至54.1℃,印证了存在最佳掺量边界。

(2)当再生剂掺量为8%时,AC-20再生混合料的体积参数与力学性能达到最优,空隙率为4.21%,VFA为68.4%,马歇尔稳定度为12.95 kN,较未掺时提升17.7%;高温动稳定度达4 165次/mm,提升31.2%;水稳定性能指标MS<sub>0</sub>和TSR分别达94.7%和86.6%,提升7.5%和6.66%。当掺量超过8%后,因沥青胶浆黏度稀释及界面致密性下降,混合料强度、抗车辙及抗水损害能力均出现不同程度回落。

(下转第152页)