

热再生沥青混合料路用性能评价

Evaluation of the Road Performance of Hot Recycled Asphalt Mixtures Using the Grey Target Decision Model

蔡燕霞^{1,2,3}, 崔雨豪¹, 赵云刚⁴, 杨杰^{2,3}, 陈少鹏⁴

- (1. 河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038; 2. 中路高科 (北京) 公路技术有限公司, 北京 100088;
3. 公路建设与养护新材料技术应用交通运输行业研发中心, 北京 100088;
4. 邯郸市交通运输局高速公路建设管理中心, 邯郸 056000)

摘要: 为充分利用沥青路面回收料, 通过高温车辙、小梁弯曲、浸水马歇尔和冻融劈裂等试验方法, 分析 RAP 掺量对厂拌热再生沥青混合料路用性能的影响; 通过灰靶决策模型确定 RAP 掺量的最优配比方案。结果表明: 随着 RAP 掺量增大, 厂拌热再生沥青混合料的高温稳定性逐渐提高, 水稳定性和低温抗裂性逐渐下降; 并且在 30%~40% 的 RAP 掺量范围内高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性的评价指标变化速度加快; 再生剂改善了厂拌热再生沥青混合料低温抗裂和水稳定性; 基于灰靶决策模型, 最终确定添加再生剂且 RAP 掺量为 40% 的沥青混合料为最佳方案。

关键词: 路面工程; 厂拌热再生; 灰靶决策模型; RAP 掺量; 再生剂; 路用性能

中图分类号: U416.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 02-0131-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.022

CAI Yanxia^{1,2,3}, CUI Yuhao¹, ZHAO Yungang⁴, YANG Jie^{2,3}, CHEN Shaopeng⁴

- (1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Zhonglu High Tech (Beijing) Highway Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China; 3. Research and Development Center for the Application of New Materials Technology in Highway Construction and Maintenance Transportation Industry, Beijing 100088, China; 4. Highway Construction Management Center of Handan Transportation Bureau, Handan 056000, China)

Abstract: To fully utilize recycled asphalt pavement materials, the influence of RAP content on the road performance of factory mixed hot recycled asphalt mixture was analyzed through high-temperature rutting, small beam bending, immersion Marshall test, and freeze-thaw splitting test methods; Determine the optimal ratio scheme for RAP dosage through the grey target decision model. The results showed that as the RAP content increased, the high-temperature stability of the factory mixed hot recycled asphalt mixture gradually improved, while the water stability and low-temperature crack resistance gradually decreased; And the evaluation indicators for high temperature stability, low temperature crack resistance, and water stability change faster within the RAP content range of 30% to 40%; The rejuvenator improves the low-temperature crack resistance and water stability of the factory mixed hot recycled asphalt mixture; Based on the grey target decision model, the asphalt

作者简介: 蔡燕霞 (1984—), 博士, 高级工程师, 研究方向: 路面结构与材料。

通信作者: 崔雨豪 (1998—), 硕士研究生, 研究方向: 路面结构与材料。

收稿日期: 2024-10-30

道桥技术

mixture with 40% RAP content and the addition of rejuvenator was ultimately determined as the optimal solution.

Key words: road surface engineering; hot mix regeneration; grey target decision model; RAP content; regenerant; road performance

0 引言

随着已运营公路进入大修周期，产生大量的沥青路面回收料，其再生利用尤为重要。厂拌热再生沥青路面回收料是应用最广且再生后路用性能最佳的再利用技术，相较于传统的全新材料沥青混合料，厂拌热再生沥青混合料不仅能够显著降低材料成本，还具有良好的经济、环境效益，并能有效解决沥青路面养护问题^[1-2]。沥青路面回收料（RAP）掺量是影响热再生沥青混合料性能的关键因素之一^[3-4]。关于 RAP 掺量对混合料性能影响已有大量研究，Xiao 等^[5]通过试验表明，当 RAP 掺量较低时（≤15%），RAP 掺量对热再生沥青混合料的配合比影响较小，但 RAP 掺量较高时（>25%），需通过精细化配比设计，减小 RAP 变异性的影响。高磊等^[6]通过室内试验和试验路验证发现再生沥青混合料的高温性能随 RAP 掺量的增加而不断提升，而低温性能和水稳性能在 RAP 掺量为 30% 时达到最佳。通过改变 RAP 掺量发现厂拌热再生混合料的变异影响程度不同，随着 RAP 掺量的增加，再生沥青混合料的离析程度和级配变异性增大^[7-8]。通过对不同 RAP 掺量的观察，再生沥青混合料的低温性能和水稳定随着 RAP 掺量的增大显著降低，因此需针对性地提升这两种性能^[9-10]。杨彦海等^[11]通过单轴贯入强度试验说明厂拌热再生沥青混合料高温性能处于较高水平。狄金海^[12]通过增加 RAP 掺量，采用高温车辙试验得出热再生沥青混合料动稳定度大幅度提升，高温性能得到提高。张雄等^[13]、肖庆一等^[14]通过增加 RAP 掺量，热再生沥青混合料低温性能逐渐降低，高温性能逐渐升高，水稳定性呈现先升高后降低的变化规律，综合经济效益和环境效益，推荐热再生沥青混合料回收料最佳掺量为 30% 左右。左锋等^[15]通过高温车辙、半圆弯曲、四点弯曲疲劳、冻融劈裂、汉堡车辙等试验综合评价不同 RAP 掺量的沥青混合料路用性能，利用灰色关联度结合红外光谱得出 RAP 掺量最佳为 30%。

综上，多数研究仅分别从常规路用性能角度判断热再生沥青的 RAP 掺量，而从整体角度分析研究较少。通过高温车辙、小梁弯曲、浸水马歇尔和冻融劈裂等试验，分析 RAP 掺量为 20%~50% 对厂拌热再生沥青混合料路用性能的影响，并基于灰靶决策理论，建立 RAP 掺量优选模型，揭示 RAP 掺量和再生剂对混合料高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性的影响规律，确定最优的厂拌热再生沥青混合料方案。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

将 RAP 和新集料按照不同配比并加入新沥青搅拌混合。新集料为石灰岩，规格为 9.5~19、4.75~9.5 与 0~4.75 mm，技术指标见表 1、表 2，筛分结果见表 3；RAP 料取自河北某省道改扩建工程，将 RAP 料在自然条件下干燥处理，将干燥后的 RAP 料采用 9.5 mm 筛孔筛分，分为 RAP 粗料和 RAP 细料，将粗、细 RAP 料进行适当加热，采用离心抽提方法提取沥青含量为 3.48% 和 6.81%，RAP 料级配筛分结果见表 4；试验选用 70# 基质沥青，其技术指标见表 5。检测提取后的旧沥青，针入度为 29 mm，老化比较严重，但满足规范针入度大于 20 mm 的要求，加入再生剂对旧沥青进行再生试验，试验结果见表 6。当再生剂掺量为 8% 时，再生沥青针入度、延度、软化点等指标均满足 JTG F40—2004《公路沥青路面

表 1 新粗集料技术指标
Table 1 Technical indicators for new coarse aggregate

指标	试验结果		规范
	4.75~<9.5 mm	9.5~<19 mm	
表观相对密度	2.73	2.72	≥2.45
毛体积相对密度	2.67	2.68	
吸水率/%	0.72	0.65	≤3.00
针片状颗粒含量/%	2.2	3.1	≤15.0
<0.075 mm/%	0.5	0.3	
洛杉矶磨耗值/%		23	≤30
石料压碎值/%		21	≤26
与沥青的黏附性/级		5	≥4 级

表 2 新细集料技术指标

Table 2 Technical indicators of new fine aggregate

指标	表观相对密度	砂当量 / %	亚甲蓝值 / (g/kg)	棱角性 (流动时间/s)	坚固性 / %
检测值	2.73	62.00	0.80	38.00	3.50
规范	≥2.50	≥60.00	≤2.50	≥30.00	≥12.00

表 3 集料筛分结果

Table 3 Aggregate screening results

筛孔/mm	筛分通过率/%		
	9.5 ~ <19 mm	4.75 ~ <9.5 mm	<4.75 mm
26.5	100	100	100
19	86.9	100	100
16	59.7	100	100
13.2	29.0	100	100
9.5	3.7	91.9	100
4.75	0.3	0.4	99.4
2.36	0.3	0.4	78.2
1.18	0.3	0.4	47.9
0.6	0.3	0.4	34.7
0.3	0.3	0.4	18.1
0.15	0.3	0.4	13.9

表 4 RAP 料级配筛分结果

Table 4 RAP material grading screening results

筛孔/mm	筛分通过率%	
	<9.5 mm	9.5 ~ <19 mm
26.5	100.0	100.0
19	100.0	100.0
16	100.0	98.0
13.2	100.0	91.9
9.5	100.0	63.8
4.75	81.4	34.3
2.36	53.5	20.8
1.18	27.6	11.2
0.6	18.0	7.7
0.3	7.7	3.3
0.15	4.9	1.9
0.075	0.1	0.1

表 5 70#基质沥青技术指标

Table 5 70 # Technical indicators of matrix aspha

针入度 (25 ℃) /0.1 mm	延度 (15 ℃) /cm	软化点 /℃	60 ℃ 动力黏度 / (Pa · s)
70.0	150.0	47.0	174.0

表 6 再生沥青技术指标

Table 6 Technical indicators of recycled asphalt

再生剂掺量/%	针入度 (25 ℃, 100 g, 5 s) / (0.1 mm)	软化点 /℃	延度 (5 cm · min ⁻¹ , 15 ℃) /cm
6	59	52.8	49.5
8	65	48.1	150.0
10	75	47.9	150.0

施工技术规范》^[16]中基质沥青技术要求，所以拟定再生剂掺量为 8%。

1.2 配合比设计及试验方法

根据 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》确定 AC—20 级配范围，通过新集料与 RAP 材料抽提后的筛分结果进行集料级配合成，并使 RAP 材料掺量分别为 20%、30%、40% 和 50%，其混合料合成级配曲线接近，合成级配见表 7；按照马歇尔设计法确定再生沥青混合料沥青用量，见表 8；不同混合料的技术指标见表 9。

根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[17]规范要求，将 4 种 RAP 掺量的热再生沥青混合料按规范分别成型试件，通过高温车辙试验、低温弯曲小梁试验、浸水马歇尔和冻融劈裂试验，测定相关的路用性能指标，综合分析，得出厂伴热再生沥青混合料最佳 RAP 掺量方案。

表 7 集料合成级配

Table 7 Composite gradation of aggregate

筛孔/mm	对照组	RAP 级配			
		20%	30%	40%	50%
26.5	100	100	100	100	100
19	95.3	95.6	95.8	96.4	96.8
16	85.5	85.4	85.4	86.1	85.2
13.2	72.1	72.4	72.6	74.4	73.7
9.5	56.7	57.0	57.2	59.8	58.5
4.75	39.8	39.8	40.3	40.3	39.9
2.36	30.7	29.2	29.1	28.1	28.1
1.18	19.1	17.9	18.0	17.7	17.8
0.6	13.6	12.6	12.9	12.9	13.0
0.3	9.4	8.5	8.9	9.1	9.3
0.15	8.0	7.2	7.6	7.9	8.1
0.075	6.4	5.7	6.0	6.2	6.4

表 8 再生沥青混合料沥青用量

Table 8 Recycled asphalt mixture asphalt dosage /%

RAP 掺量	新沥青用量	总沥青用量
	4.00	4.00
20 *	2.90	4.10
20 +	2.70	4.00
30 *	2.40	4.20
30 +	2.10	4.00
40 *	2.10	4.40
40 +	1.50	4.00
50 *	2.00	4.60
50 +	1.20	4.00

注：* 代表未掺再生剂；+ 代表掺加再生剂。

道桥技术

表9 沥青混合料技术指标

Table 9 Technical indicators of asphalt mixture

RAP 掺量/%	油石比/%	毛体积相对密度	孔隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/(0.1 mm)
	4.2	2.46	5.2	14.0	63.1	11.24	3.56
20*	4.3	2.43	4.6	13.5	66.4	13.88	3.43
20*	4.2	2.44	4.2	12.9	67.9	15.54	3.38
30*	4.5	2.43	4.3	13.4	68.2	14.22	3.28
30+	4.2	2.45	3.6	12.7	72.1	13.37	2.88
40*	4.6	2.44	4.3	14.0	69.3	14.44	2.89
40+	4.2	2.45	3.4	12.8	73.7	14.68	2.89
50*	4.8	2.44	3.4	13.5	74.4	14.84	3.12
50+	4.2	2.46	3.1	12.6	74.9	14.00	2.75

注：*代表未掺再生剂；+代表参加再生剂。

2 试验结果与分析

2.1 高温稳定性

再生沥青混合料动稳定度试验结果如图1所示。随着RAP掺量的增加，再生沥青混合料动稳定度逐渐增大，并且RAP掺量在20%~50%范围内均满足规范技术要求（≥1000次/mm）；相较于新料，RAP掺量40%的再生混合料动稳定度增长率比30%的提高接近1倍，即RAP掺量在30%~40%范围内，再生沥青混合料动稳定度的增长速度较快；加入再生剂后的动稳定度和其增长率均有小幅度下降。究其原因，沥青混合料的黏附性、黏度和矿粉与骨架之间的嵌挤作用影响高温稳定性，然而沥青在老化过程中轻质组分逐渐挥发，重质组分含量较大，新旧沥青混溶后形成的沥青结合料黏度增大，从而提升了再生沥青混合料高温抗车辙能力；添加再生剂会恢复或增强沥青的柔韧性和流动性，导致沥青混合料抗车辙能力减弱。

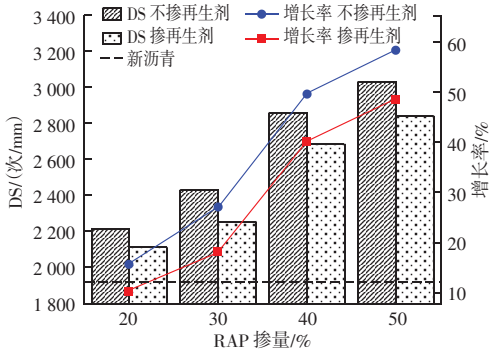


图1 动稳定度

Fig.1 Dynamic stability

车辙深度试验结果如图2所示。随着RAP掺量的增加，车辙深度逐渐降低。分析原因为，RAP中

的老化沥青因为受到温度、光照、空气和降水等外界环境因素的影响以及车辆荷载的作用，会发生挥发、氧化等一系列不可逆的化学变化，导致沥青性质发生较大的变化，其饱和分和芳香分减少，沥青质和胶质含量增加，导致沥青的黏度和弹性模量提高，从而增强了混合料的抗变形能力。

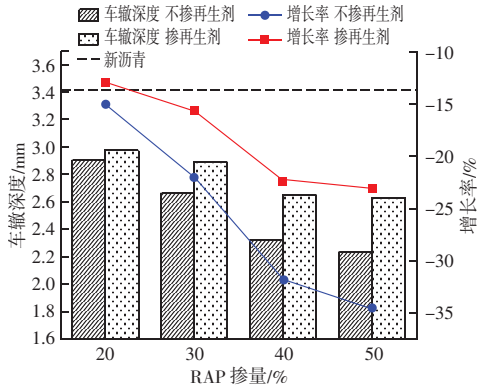


图2 车辙深度

Fig.2 Rut depth

2.2 低温抗裂性能

低温抗裂性能试验结果如图3所示。RAP掺量在20%~50%范围内，随着RAP掺量的增加，再生沥青混合料的弯曲抗拉强度和劲度模量逐渐提高，然而其弯拉应变逐渐减小，当不掺再生剂时，RAP掺量在20%~30%范围内，再生沥青混合料弯拉应变均满足规范技术要求（≥2000 με）；RAP掺量在40%~50%范围内，再生沥青混合料弯拉应变则小于规范技术要求。掺加再生剂，20%~50%的RAP掺量沥青混合料弯曲抗拉应变均满足规范技术要求。相较于不掺再生剂的新沥青，40%的RAP掺量下再生沥青混合料弯曲抗拉应变下降率比掺30%的提高了0.5倍以上，掺入再生剂后变化速率减慢。其原因在于，RAP料中老化沥青变硬变脆，黏弹性能变差以及旧料掺量增加导致与新骨料之间的黏附性较差，进而使沥青混合料逐渐变硬变脆，低温抗变形能力大幅下降。掺入再生剂，再生剂与沥青之间发生化学变化，恢复了老化沥青的柔韧性和流动性，降低其黏度和弹性模量，并且增强了沥青与集料之间的黏结力，促进新旧沥青之间的融合，形成均匀的沥青胶结料，减少RAP颗粒表面的老化沥青膜对沥青混合料的不利影响，提高沥青混合料整体抗裂性能。

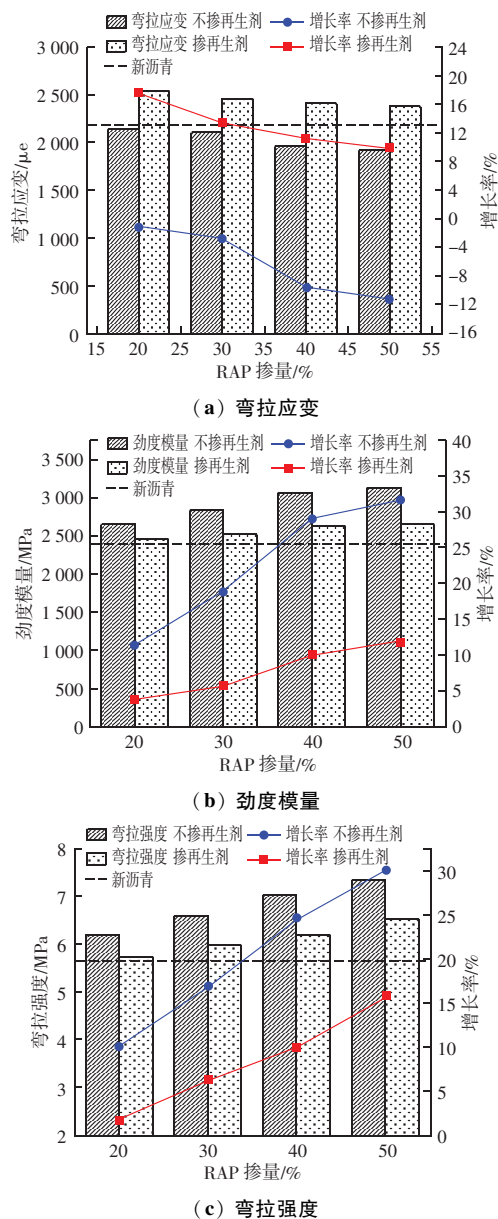


图3 低温抗裂性能
Fig. 3 Low temperature crack resistance

2.3 水稳定性能

浸水马歇尔试验结果如图4所示。随着RAP掺量的增加,再生沥青混合料的残留稳定度逐渐降低,并且RAP掺量在20%~50%范围内,残留稳定度均满足规范技术要求($\geq 80\%$);同经水浴48 h沥青混合料相比,水浴0.5 h的再生沥青混合料稳定度提高幅度更大,但提高幅度与RAP掺量之间的关系均未表现出明显规律。相较于新沥青而言,在不掺再生剂的条件下,RAP掺量40%下的残留稳定度减少率比掺30%的提升近1倍;掺入再生剂后,沥青混合

料残留稳定度减少率变化趋于稳定。究其原因,RAP料中老化沥青掺量的增加,使再生沥青混合料中存在大量的新旧沥青黏结面,这些黏结面是水损害的薄弱面,从而导致再生沥青混合料水稳定性大幅度下降。通过掺入再生剂,增强了沥青与集料之间的黏结力,这种黏结力的增强有助于抵抗水分子对沥青膜的剥离作用,改善了新旧沥青的融合程度,促进了RAP与新沥青、新集料之间的充分拌和,提高了混合料的均匀性,减少水损害的发生。

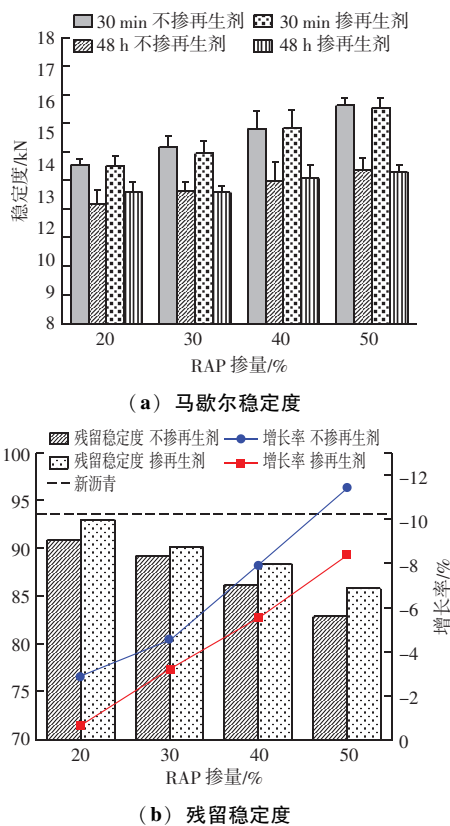


图4 浸水马歇尔
Fig. 4 Immersion Marshall

冻融劈裂试验结果如图5所示。随着RAP掺量的增加,再生沥青混合料的冻融劈裂强度逐渐降低,并且RAP掺量在20%~50%范围内冻融劈裂强度比均满足规范技术要求($\geq 75\%$)。掺入再生剂后,劈裂强度随着RAP掺量的增加逐渐增大;不掺再生剂时,随着RAP的增大,劈裂强度为先增大后减小。相较于新沥青而言,掺再生剂后冻融劈裂强度比增长率均高于不掺再生剂。原因在于,随着RAP掺量的增加,在冻融循环的过程中,水分浸入混合料内部,在荷载和低温环境下,混合料产生温度应力和

道桥技术

动水压力，破坏混合料的嵌挤结构，导致混合料结构破坏。由于 RAP 存在的裂缝和孔隙较多，更容易吸水，从而在冻融循环中表现出更低的劈裂强度比。掺入再生剂后能够渗透并填充集料孔隙和微裂缝，有助于减少水分的渗透和在冻融过程中的膨胀压力。

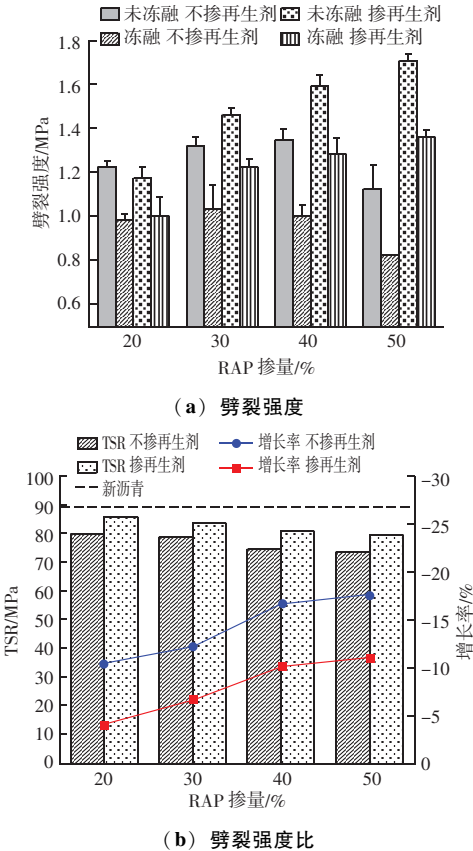


图5 冻融劈裂
Fig. 5 Freeze-thaw splitting

3 基于灰靶决策理论的 RAP 掺量优选

RAP 掺量对沥青混合料的各项路用性能的影响显著，为充分发挥厂拌热再生沥青混合料的性能，优选出综合路用性能最优的 RAP 掺量。采用灰靶决策理论^[18]，选取沥青混合料的高温稳定性能、水稳定性能以及低温抗裂性能各项指标，建立最佳 RAP 掺量模型，确定厂拌热再生沥青混合料的最优方案。

3.1 灰靶决策理论及模型建立

灰靶决策理论，作为一种新兴的决策分析工具，其核心在于将复杂的决策问题抽象为寻找最优解的过程，即命中“灰靶”的中心。该理论通过构建灰

靶数学模型，对决策方案进行综合评价和优选^[18]。

以不同 RAP 掺量下的厂拌热沥青混合料的动稳定度、弯拉应变、TSR、残留稳定度等指标建立 RAP 掺量优选模型。设 S_i 为决策方案，决策矩阵 $X = (X_{ij})_{n \times m}$ ，进行规范化转化 $R = (r_{ij})_{n \times m}$ 。决策矩阵 $X = (X_{ij})_{n \times m}$ 的取值为 $X = X_{ij}$, $j \in M$, $i \in N$, $M = \{1, 2, \dots, m\}$, $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 。

X_{ij} 是决策方案 S_i 对 A_j 的效果样本值，设效益型指标和成本型指标的下标集分别为 A_1 、 A_2 。

当为 A_1 效益型指标时，则

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - u_j}{\max \left\{ \max_i \{x_{ij}\} - u_j, u_j - \max_i \{x_{ij}\} \right\}} \quad (1)$$

当为 A_2 成本型指标时，则

$$r_{ij} = \frac{u_j - x_{ij}}{\max \left\{ \max_i \{x_{ij}\} - u_j, u_j - \max_i \{x_{ij}\} \right\}} \quad (2)$$

其中， $u_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$ 。

设 $r_j^0 = \max \{r_{ij} | 1 \leq i \leq n\}$ ，靶心为 $r [r_1^0, r_2^0, \dots, r_m^0]$ ，距离最优 RAP 掺量方案的靶心距为 SD_i 。靶心距计算公式为

$$SD_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (r_{ij} - r_j^0)^2} \quad (3)$$

其中， $\omega_j > 0$, $\sum_{j=1}^m \omega_j = 1$ 。

代入 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_m)$ 计算靶心距，靶心距 SD_i 越小，表示方案 S_i 越优。

3.2 基于路用性能的 RAP 掺量优选

试验测得的各指标因素数值见表 10。根据灰靶决策建模理论，对动稳定度、残留稳定度、冻融劈裂强度比、弯拉应变等指标作为效益型指标进行计算，对车辙深度、弯曲劲度模量、弯拉强度等指标作为成本型指标进行计算，计算结果见表 11。

根据表 11 可以看出理想 RAP 掺量方案的灰色效果测度向量为 $\omega = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$ ，指标权重为 $\gamma = (1.000\ 0, 1.000\ 0, 0.969\ 1, 0.699\ 8, 0.812\ 2, 0.855\ 2, 1.000\ 0)$ 。按照式 (3) 可以计算得出 RAP 掺量方案灰色效果测度与理想最优 RAP 掺量方案灰色效果测度向量之间的靶心距，见表 12。

表 10 不同 RAP 掺量各性能数据统计表
Table 10 Statistical table of performance data for different RAP dosages

RAP 掺量 /%	DS / (次/mm)	车辙深度 /mm	弯拉应变 /με	劲度模量 /MPa	弯拉强度 /MPa	残留稳定 度/%	劈裂强度 比/%
20 *	2 217	2.90	2 139	2 652	6.19	91	80.1
30 *	2 434	2.66	2 103	2 833	6.58	89	78.6
40 *	2 865	2.33	1 957	3 074	7.01	86	74.5
50 *	3 032	2.23	1 922	3 137	7.32	83	73.7
20 +	2 114	2.98	2 541	2 472	5.72	93	85.9
30 +	2 261	2.88	2 452	2 517	5.98	90	83.6
40 +	2 683	2.65	2 404	2 621	6.19	88	80.4
50 +	2 845	2.63	2 375	2 661	6.51	86	79.7

注：* 代表未掺再生剂；+ 代表掺再生剂。

表 11 各指标灰色效果测度变化值
Table 11 Change values of grey effect measurement for each indicator

RAP 掺量 /%	DS / (次/mm)	车辙深度 /mm	弯拉应变 /με	劲度模量 /MPa	弯拉强度 /MPa	残留稳定 度/%	劈裂强度 比/%
20 *	-0.71	-0.57	-0.31	0.24	0.28	0.47	0.09
30 *	-0.20	-0.01	-0.43	-0.22	-0.16	0.18	-0.16
40 *	0.65	0.78	-0.89	-0.84	-0.65	-0.39	-0.80
50 *	1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-0.92
20 +	-0.93	-0.75	0.97	0.70	0.81	0.86	1.00
30 +	-0.62	-0.52	0.69	0.59	0.52	0.34	0.63
40 +	0.27	0.01	0.53	0.32	0.28	0.01	0.13
50 +	0.10	0.07	0.44	0.22	-0.08	-0.47	0.02

表 12 不同 RAP 掺量靶心距计算结果
Table 12 Calculation results of target distance for different RAP dosages

RAP 掺量/%	SD
20 *	1.103 5
30 *	1.078 2
40 *	1.358 7
50 *	1.566 1
20 +	0.983 5
30 +	0.888 5
40 +	0.717 8
50 +	0.904 1

由表 12 可以看出，不同 RAP 掺量计算的靶心距大小排序为 $SD_{50*} > SD_{40*} > SD_{20*} > SD_{30*} > SD_{20+} > SD_{50+} > SD_{30+} > SD_{40+}$ ， SD_{40+} 靶心距最小， SD_{50*} 的靶心距最大。根据灰靶决策理论可知，掺再生剂后 RAP 掺量为 40% 时，厂拌热再生沥青混合料的各项路用性能达到平衡最优。因此从综合利用性能角度考虑，添加再生剂时 RAP 掺量为 40% 的方案为实际最优方案。

4 结论

系统探讨了 RAP 掺量对厂拌热再生沥青混合料路用性能的影响。通过对高温稳定性、低温抗裂性及水稳定性的综合测试，并基于灰靶决策理论，进

行 RAP 掺量优选，得到以下主要结论：

(1) 随着 RAP 掺量的增大，厂拌热再生沥青混合料动稳定度逐渐增大，低温抗裂性能和水稳定性逐渐降低。

(2) 相较于新料而言，不掺再生剂沥青混合料 RAP 掺量在 30%~40% 范围中，动稳定度、弯拉应变、残留稳定度等变化速度加快。

(3) 掺再生剂对于新旧沥青间的混溶具有积极作用，可以有效提高厂拌热再生沥青混合料的低温抗裂性能、水稳定性能，小幅度降低高温稳定性能。

(4) 基于灰靶决策理论，当掺入再生剂后 RAP 掺量为 40% 时，厂拌热再生沥青混合料的各项路用性能表现最优。

参 考 文 献

[1] 程其瑜, 仰建岗, 祝谭雍. 厂拌热再生沥青混合料中 RAP 掺量对马歇尔指标的影响分析 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2019, 15 (7): 83-86.

[2] 杜傲伟. 厂拌热再生技术在沥青路面养护工程中的应用 [J]. 中国高新科技, 2024 (18): 121-123.

[3] 荆靖, 高稳成. 厂拌热再生沥青混合料质量控制关键技术研究 [J]. 山东理工大学学报 (自然科学版), 2024, 38 (5): 69-72, 78.

[4] 翟晓成, 丁攀, 雷雨涛, 等. 基于响应曲面法的大掺量 RAP 厂拌热再生沥青混合料级配优化设计 [J]. 兰州理工大学学报, 2023, 49 (6): 119-128.

[5] XIAO F, AMIRKHANIAN S N. Moisture susceptibility and rut resistance of RAP asphalt mixtures with high percentage of natural sand [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27 (7): 04014217.

[6] 高磊, 林鹏. 厂拌热再生沥青混合料的最佳 RAP 掺量研究 [J]. 华东交通大学学报, 2018, 35 (1): 103-108.

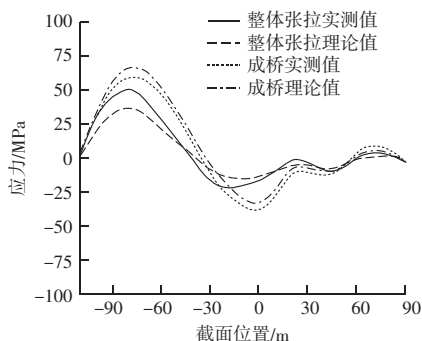
[7] 袁秋波, 施公佐, 熊分清, 等. RAP 料级配变异性对厂拌热再生混合料级配离析的影响研究 [J]. 公路, 2022, 67 (4): 28-34.

[8] 夏旭, 王鹏飞, 孙向进, 等. 废旧沥青混合料厂拌热再生技术综述 [J]. 现代交通与冶金材料, 2024, 4 (4): 23-33, 40.

[9] 叶永奇. RAP 掺量对厂拌热再生沥青混合料性能的影响研究 [J]. 企业科技与发展, 2024 (8): 90-93.

[10] 安茂平, 李雄傲, 董煊, 等. 高掺量厂拌热再生沥青混合料再生方法及其路用性能 [J]. 交通世界, 2024 (17): 8-10.

[11] 杨彦海, 崔宏, 杨野, 等. 沥青路面厂拌热再生技术使用效果分析与评价 [J]. 中外公路, 2023, 43 (1): 63-68.



(d) 南桥下缘应力

图6 北桥和南桥上下缘应力

Fig.6 Stress on the upper and lower edges of the North bridge and South bridge

5 结论

采用 Midas/Civil 有限元分析方法,对南北对称单塔斜拉桥无应力索长进行了研究,得到以下主要结论:

(1) 通过比较南北桥斜拉索索力,发现临时张拉时实测索力与设计索力吻合,但整体张拉时两者之间的误差值明显增大。经历第三次调索后,成桥时的斜拉索索力值基本达到设计值,且通过成桥时的无应力索长也与设计值一致。

(2) 通过对比桥梁线型发现,调索前、第二次调索与第三次调索这三个阶段的实测数据变化趋势受到索力变化的影响,随着索力的优化,实测值与理论值之间的误差最终被控制在一个合理的范围内。

(3) 无论是在整体张拉还是在成桥时,两座主桥的上下缘应力均在 172.5 m 处的截面,并且实测数据的变化趋势与理论数据的变化趋势一致。这表明了无支架多次张拉施工方案可行,为类似工程施工提供了指导。

参 考 文 献

- [1] 郭新宇,方圣恩.基于门控循环单元神经网络的大跨径斜拉桥索力预测[J].振动工程学报,2023,36(6):1480-1484.
- [2] 徐伟.大跨度连续梁拱肋与吊杆张拉关键技术研究[J].中国设备工程,2023(7):15-17.
- [3] 桂水荣,雷鸣宇,陈水生,等.矮塔斜拉桥动静力特性对结构参数敏感性影响分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2023,39(1):79-87.
- [4] 付春雨,劳永升,谢周余,等.考虑梁重误差效应的节段拼装混凝土斜拉桥索力调整[J].中国铁道科学,2023,44(2):66-72.
- [5] 李鹏飞,王石磊,魏思聪,等.大型空间异形钢塔斜拉桥拉索张拉控制[J].公路交通科技,2022,39(10):49-58.
- [6] 黄春阳.基于监测数据的独塔斜拉桥施工过程受力性能分析[J].安徽建筑,2023,30(4):137-138,185.
- [7] 占玉林,侯之瑶,邵俊虎,等.基于响应面法及粒子群算法的异形斜拉桥索力优化[J].桥梁建设,2022,52(3):16-23.
- [8] 余小勇.基于支架法施工的独塔斜拉桥施工监控分析[J].铁道建筑技术,2022(4):113-117.
- [9] 简伟锋.矮塔钢-混凝土组合梁斜拉桥的索力优化[J].内蒙古公路与运输,2020(3):38-41.
- [10] 孙全胜,侯淞译.某地锚式边缆多次张拉人行悬索桥施工控制及分析[J].低温建筑技术,2019,41(11):103-107.
- [11] 赖嘉洲,张子健.考虑施工过程的斜拉桥索力动态优化方法研究[J].工程建设,2022,54(6):42-48.
- [12] 曹鸿猷,李志,黄鑫.考虑施工及运营荷载作用的斜拉桥索力优化研究[J].武汉理工大学学报,2022,44(4):49-56.
- [13] 黄侨,王翼超,任远,等.基于微波干涉雷达的斜拉桥索力测量方法[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):144-151.
- [14] 刘庭凯.基于影响矩阵法的非对称斜拉桥索力优化分析[J].山西建筑,2022,48(3):163-165.
- [15] 彭瀚舒,覃华桥,吕柯梁,等.基于磁通量法的斜拉桥索力监测应用研究[J].江西建材,2022(4):39-41.

(上接第 137 页)

- [12] 狄金海.厂拌热再生沥青路面性能研究[J].工程建设与设计,2023(18):154-156.
- [13] 张雄,熊腾飞.回收料掺量对热再生沥青混合料路用性能的影响[J].新型建筑材料,2024,51(4):15-17.
- [14] 肖庆一,宇锦涛,龚芳媛,等.厂拌热再生混合料平衡设计法与马歇尔设计法的对比研究[J].公路交通科技,2022,39(11):26-35.
- [15] 左锋,叶奋,宋卿卿.RAP 掺量对再生沥青混合料路用性能影

- 响[J].吉林大学学报(工学版),2020,50(4):1403-1410.
- [16] 交通部公路科学研究院.公路沥青路面施工技术规范:JTG F40-2004[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [17] 中华人民共和国行业标准.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20-2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [18] 申爱琴,陈祥,郭寅川,等.基于灰靶决策理论的钢渣沥青混合料路用性能评价[J].硅酸盐通报,2019,38(4):1245-1252.