

基于不同方法的泡沫温拌沥青混合料配合比设计对比研究

林芳燕

(广东交科检测有限公司, 广东 广州 510550)

摘要: 针对泡沫温拌沥青混合料马歇尔配合比设计方法存在的局限性, 选用70号基质沥青和SBS改性沥青作为研究对象, 分别采用马歇尔法、轮碾法及平衡设计法探究两种沥青混合料的最佳油石比, 并通过对比分析设计结果和设计过程, 探究不同设计方法的优缺点。结果表明: 轮碾配合比设计法碾压成型方式更接近于路面实际情况, 确定的油石比较马歇尔法更合理, 而平衡设计法更着重考虑路面性能, 实现性能优化; 平衡设计法确定的沥青混合料油石比最小, 马歇尔法确定的油石比次之, 轮碾法确定的油石比最大; 采用平衡设计法确定油石比时, 两种泡沫温拌沥青混合料高温性能最优, 低温性能则三者相当, 抗水损害能力差距不显著。

关键词: 泡沫沥青; 温拌技术; 配合比设计; 轮碾法; 平衡设计

中图分类号: U414.7

文献标识码: A

Comparative Study on the Mix Design of Warm Foamed Asphalt Mixtures Based on Different Methods

LIN Fangyan

(Guangdong Jiaoke Testing Co., Ltd., Guangzhou 510550, Guangdong, China)

Abstract: In response to the limitations of the Marshall mix design method for foam warm mix asphalt mixtures (foam warm mix asphalt mixture, FWMA), this study selected No. 70 base asphalt and SBS-modified asphalt as research subjects. The optimal asphalt-aggregate ratio for both asphalt mixtures was determined using the Marshall method, the rotary compaction method, and the equilibrium design method. Through comparative analysis of the design results and processes, the advantages and disadvantages of different design methods were explored. The results indicate: the rotary compaction mix design method, with its rolling compaction process, more closely resembles actual pavement conditions, yielding a more reasonable asphalt-aggregate ratio than the Marshall method. The equilibrium design method, in contrast, places greater emphasis on pavement performance, achieving optimized performance. The asphalt-aggregate ratios determined by the equilibrium design method are the lowest, followed by the Marshall method, while the rotary compaction method yields the highest ratio. Under the equilibrium asphalt-aggregate ratio, both foam warm mix asphalt mixtures exhibit optimal high-temperature performance, while their low-temperature performance is comparable, with no significant difference in water damage resistance.

Key words: foamed asphalt; warm mix technology; mix design; rotary compaction method; balanced design

针对泡沫温拌沥青混合料 (foam warm mix asphalt mixture, FWMA) 的配合比设计方法, 国内外学者多沿用热拌沥青混合料的设计体系, 即马歇尔设计法^[1-3]。然而, 工程实践表明, 采用

该设计方法得到的 FWMA 某些性能指标难以完全满足规范要求。而油石比作为影响 FWMA 路用性能及路面服役寿命的关键因素, 其合理选取尤为重要^[4]。因此, 选用科学合理的配合比设计

收稿日期: 2025-10-13

作者简介: 林燕芳, 工程师, 本科, 研究方向为道路工程

方法对保障 FWMA 路面服役寿命具有重要的工程实践价值。

韦万峰^[5]、肖温博^[6]分别采用马歇尔配合比设计和 Superpave 设计方法对 FWMA 进行了研究,并分析评价了其路用性能。结果表明,FWMA 的水稳定性和高温性能相较于热拌沥青混合料较差,但低温性能差距较小。王春等^[7]通过轮碾法成型三种温拌沥青混合料,探究了其压实特性,分析得出采用轮碾法成型比马歇尔成型更为合理。张凯丰等^[8]采用平衡设计法,平衡温拌改性沥青混合料抗车辙与抗裂之间的矛盾,结果表明,平衡设计法制备的温拌改性沥青混合料具有优异的抗车辙与抗裂性能。杨明等^[9]通过对比混合料马歇尔设计法、Superpave 设计法及平衡设计法三者的差异,发现传统的沥青混合料配合比设计方法所采用的体积参数指标与路用性能之间缺乏较好的关联性,而平衡设计法则能更好地兼顾抗车辙和抗开裂性能。

综上所述,FWMA 自身存在高温稳定性与水稳定性不足的缺陷,而传统设计方法无法确保其综合路用性能达到均衡优异的水平,因此,对比不同 FWMA 配合比,设计方法的优劣显得至关重要。基于此,本文选用 70 号基质沥青和 SBS 改性沥青作为研究对象,分别采用马歇尔法、轮碾法及性能平衡设计法确定两种沥青混合料的最佳油石比,并通过对设计结果和设计过程的对比分析,探究了不同设计方法的优缺点。研究结果可为泡沫沥青温拌技术的推广应用提供理论依据。

1 原材料及级配

1.1 原材料技术指标

本文沥青选用 70 号基质沥青及 SBS (I -D) 改性沥青,不同沥青技术指标如表 1 所示;粗、细集料及填料采用石灰岩,各项技术指标如表 2 所示。

表 1 沥青技术指标

检测项目	测试值		试验方法
	70 号基质沥青	SBS(I -D) 改性沥青	
针入度 (25℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	69.0	48.3	T0604—2011
软化点 (环球法)/℃	48.0	83.1	T0605—2011
延度/cm	>100(15℃)	26.4(5℃)	T0606—2011

表 2 粗、细集料及矿粉测试指标

材料类型	粒径 /mm	毛体积相对密度	表观相对密度	试验方法
粗集料	16 ~ 22	2.831	2.860	T0304—2005
	11 ~ 16	2.802	2.828	
	6 ~ 11	2.826	2.842	
	3 ~ 6	2.752	2.826	
细集料	0 ~ 3	2.693	2.753	T0330—2005
矿粉	—	—	2.7591	T0352—2004

注:矿粉表观密度单位为 g/m³;粗、细集料相对密度无量纲。试验方法执行《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)。

1.2 级配设计

本文采用 AC - 20 级配,各档集料掺配比例及通过率如表 3 所示,合成级配曲线如图 1 所示。

表 3 AC-20 级配设计表

筛孔 /mm	粒径					矿粉	合成级配	工程设计级配范围/%		
	16 ~ 22 mm	11 ~ 16 mm	6 ~ 11 mm	3 ~ 6 mm	0 ~ 3 mm			级配下限	级配中值	级配上限
26.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100	100	100	100
19	95.4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	98.9	90	95	100
16	64.0	96.7	100.0	100.0	100.0	100.0	90.6	78	85	92
13.2	24.2	81.7	100.0	100.0	100.0	100.0	77.8	62	71	80
9.5	0.7	5.6	93.1	100.0	100.0	100.0	54.2	50	61	72
4.75	0.1	0.3	8.1	83.7	100.0	100.0	36.1	26	41	56
2.36	0.1	0.3	0.4	8.0	85.1	100.0	24.3	16	30	44
1.18	0.1	0.3	0.4	1.0	54.9	100.0	16.4	12	23	33
0.6	0.1	0.3	0.4	0.5	32.0	100.0	10.9	8	16	24
0.3	0.1	0.3	0.4	0.5	23.5	100.0	8.8	5	11	17
0.15	0.1	0.3	0.4	0.5	15.7	98.7	6.9	4	8.5	13
0.075	0.1	0.3	0.4	0.5	8.7	83.9	4.8	3	5	7
比例/%	24.0	22.0	18.0	9.0	24.0	3.0	100.0	—	—	—

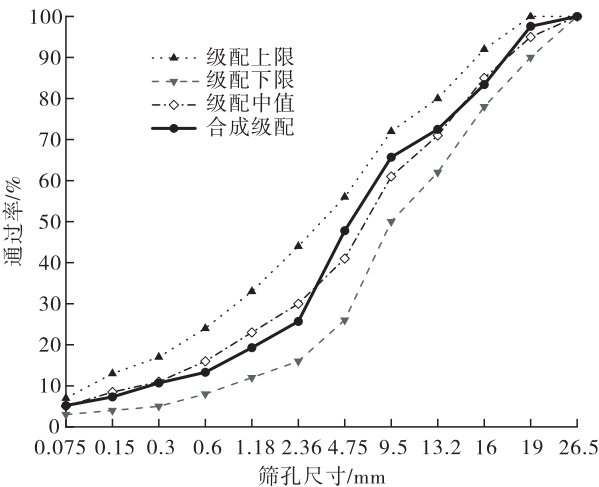


图1 AC-20 级配曲线图

1.3 工艺参数

本文中两种泡沫沥青最佳发泡条件及对应温拌混合料的拌和温度与压实温度如表4所示。

表4 两种沥青及对应温拌混合料工艺参数

工艺参数	沥青种类	
	70号基质沥青	SBS（I-D）改性沥青
最佳发泡用水量/%	2.5	2.0
最佳发泡温度/℃	155	175
拌和温度/℃	140	150
压实温度/℃	130	140

2 泡沫温拌沥青混合料配合比设计方法研究

2.1 马歇尔配合比设计方法

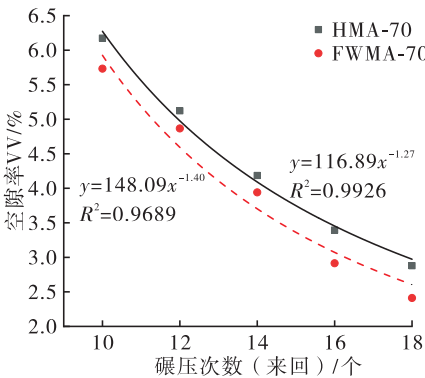
针对70号基质沥青泡沫温拌混合料（FWMA-70）及SBS（I-D）改性沥青泡沫温拌混合料（FWMA-SBS）两种混合料，选取5种油石比（3.5%、4.0%、4.5%、5.0%、5.5%）成型AC-20马歇尔试件。待试件冷却脱模后，测定其马歇尔稳定度、流值、空隙率、矿料间隙率及沥青饱和度等指标。根据各项体积指标与油石比的曲线走势，以4%空隙率为目标设计空隙率，按照马歇尔试验配合比设计步骤确定两种沥青混合料的最佳油石比，在最佳油石比下的各项物理力学指标见表5。

表5 各类沥青混合料最佳油石比及对应指标（马歇尔法）

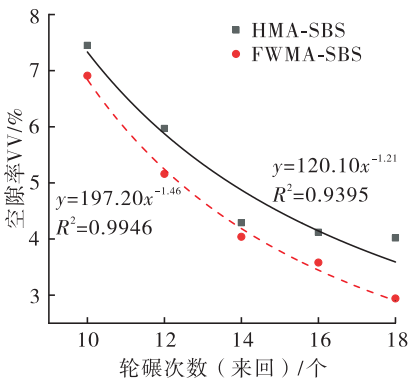
沥青混合料类型	最佳油石比(P)/%	毛体积相对密度	空隙率(VV)/%	矿料间隙率(VMA)/%	沥青饱和度(VFA)/%	稳定度(MS)/kN	流值(FL)/mm
FWMA-70	4.1	2.529	4.00	13.1	69.5	8.8	2.53
FWMA-SBS	4.3	2.523	4.03	13.5	70.2	12.9	3.62
技术要求	—	—	3~6	≥13	65~75	>8	1.5~4

2.2 轮碾法配合比设计方法

对70号基质热拌沥青混合料（HMA-70）、FWMA-70、SBS（I-D）改性热拌沥青混合料（HMA-SBS）及FWMA-SBS四种沥青混合料在相应工艺参数下采用不同轮碾次数（10、12、14、16、18来回）成型车辙板，分析空隙率随碾压次数变化规律，从而确定本文轮碾法所采用的碾压次数，为了减少质量对其影响，所用沥青混合料质量为11 kg，试验结果如图2所示。



(a) 基质沥青混合料



(b) 改性沥青混合料

图2 不同沥青混合料碾压次数-空隙率关系图

分析图2可知，随碾压次数增加FWMA-70空隙率呈幂函数趋势降低。当碾压次数由10个来回增至14个来回时，其空隙率降低较快，约降低62.9%，且在碾压次数达到14个来回之后下降幅度明显减小；达到18个来回时，空隙率仅降低1.0%左右。FWMA-SBS与FWMA-70轮碾次数-空隙率呈现相同的变化趋势。

进一步分析可得，泡沫温拌沥青混合料在碾压14个来回后，其空隙率均在4%左右波动，误差不超过0.5%，因此推荐碾压14个来回作为泡沫温拌沥青混合料设计轮碾次数。

选用 AC-20 级配对 FWMA-70 及 FWMA-SBS 沥青混合料按 5 种油石比（3.5%、4.0%、4.5%、5.0%、5.5%）成型尺寸为 300 mm × 300 mm × 50 mm 的车辙板试件。待试件冷却脱模后钻芯取样，测定试件毛体积相对密度、空隙率、矿料间隙率、压实度及沥青饱和度等体积指标。绘制各项体积指标与油石比的关系曲线，初步选取空隙率 4% 所对应的油石比为最佳油石比；当该油石比下矿料间隙率、压实度及沥青饱和度等体积指标均满足规范要求时，即可将其定位为轮碾法配合比设计的最佳油石比，最佳油石比对应的体积参数见表 6。

表 6 各类沥青混合料最佳油石比及对应指标（轮碾法）						
沥青混合料类型	最佳油石比 (P)/%	毛体积相对密度	空隙率 VV/%	矿料间隙率 VMA/%	沥青饱和度 VFA/%	压实度 /%
FWMA-70	4.2	2.525	4.04	13.4	69.8	96.0
FWMA-SBS	4.4	2.520	4.00	13.7	70.8	96.0
技术要求	—	—	3~6	≥13	65~75	≥95

2.3 基于性能平衡的泡沫温拌沥青混合料配合比设计方法

轮碾法配合比设计在确定最佳沥青用量时，仅以体积指标设计，未涉及沥青混合料的性能。针对这一不足，为了兼顾泡沫温拌沥青混合料的高低温性能，本文在轮碾法配合比设计的基础上，结合高低温性能开展混合料性能平衡设计。首先选择轮碾法配合比设计确定的空隙率 4% 所对应的油石比为初始油石比，以 0.4% 为间距调整油石比，成型车辙板试件；然后进行 60℃ 车辙动稳定度及 -10℃ 低温弯曲小梁破坏应变作为高低温平衡指标，划定同时满足规范要求的动稳定度及破坏应变的油石比区间；再通过浸水马歇尔试验及冻融劈裂试验测试其水损害性能；最后统计设计油石比下的体积参数，从而实现泡沫温拌沥青混合料性能平衡设计，相关试验方法参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》执行。两种沥青混合料的动稳定度与弯曲破坏应变指标与油石比的关系曲线、水损害测试曲线分别如图 3 和图 4 所示；性能平衡设计油石比下的体积特征参数如表 7 所示。

如图 3 所示，FWMA-70 动稳定度与油石比呈负相关关系。这种变化规律主要源于两个方

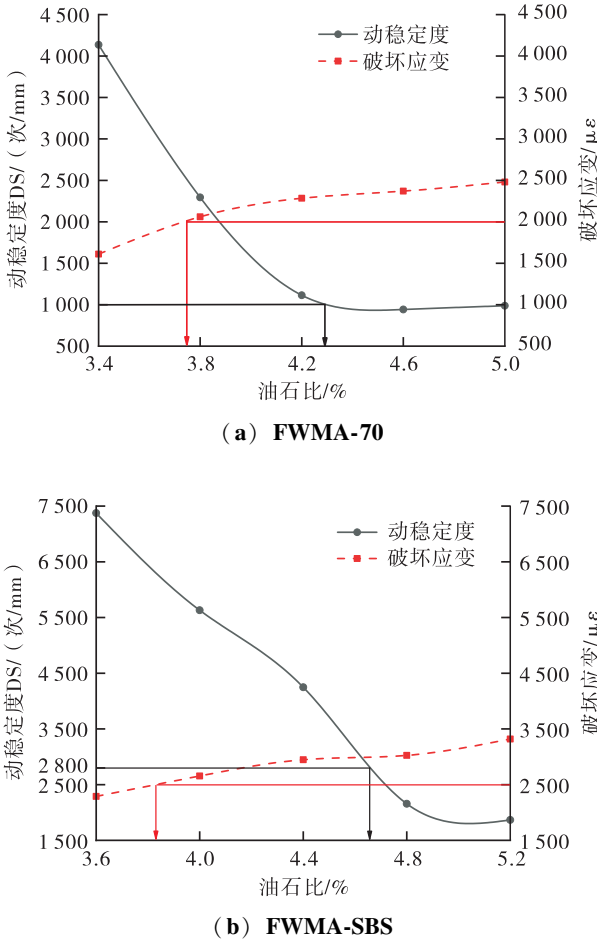
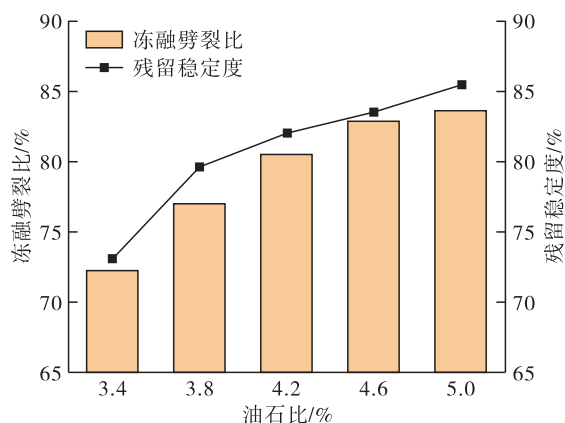


图 3 泡沫温拌沥青混合料动稳定度和破坏应变与油石比关系曲线

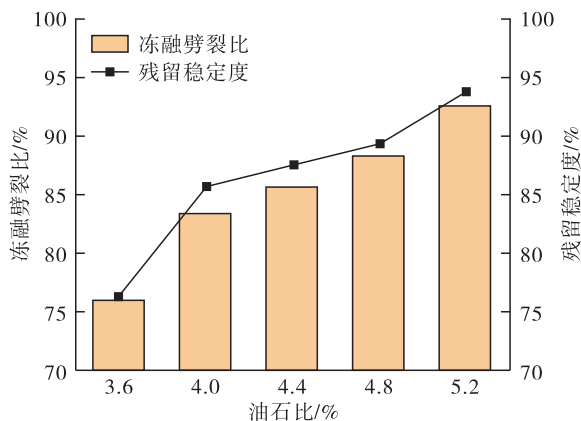
面：首先，随着油石比的增加，混合料中自由沥青含量上升，导致材料更易发生变形；其次，泡沫沥青中残留的水分也会对动稳定度产生不利影响^[10]。而弯曲破坏应变则随着油石比增大呈现上升趋势，究其原因是油石比增加，使得集料表面沥青膜厚度增大，增强了沥青黏结性和柔韧性，从而提升了混合料抗裂能力^[11]。FWMA-SBS 动稳定度和破坏应变随油石比的变化趋势与 FWMA-70 一致，但数值显著优于 FWMA-70。

分析图 3，结合《公路沥青路面施工技术规范》（JTGF40—2004）中对于夏热冬温区（1~4 区）规定基质沥青混合料动稳定度大于 1 000 次/mm，弯曲破坏应变大于 2 000 με；改性沥青混合料动稳定度大于 2 800 次/mm，弯曲破坏应变大于 2 500 με。FWMA-70 和 FWMA-SBS 分别满足动稳定度和破坏应变的油石比范围为 3.7%~4.3%，3.9%~4.6%。拟选择混合料同时满足动稳定度和弯曲破坏应变要求的油石比范围中值作为最佳油石比。最终 FWMA-70 和 FWMA-SBS 的平衡油石

比分别确定为4.0%、4.2%。



(a) FWMA-70



(b) FWMA-SBS

图4 泡沫温拌沥青混合料水损害测试结果

分析对比图4可知,对于FWMA-SBS而言,随油石比增加,其残留稳定度与冻融劈裂比均得到提升。当油石比从3.6%上升至4.0%时,二者均出现大幅度上升,分别提高了9.3%和7.5%,并在4.0%油石比下达到规范规定的最低标准。当油石比从4.0%上升至4.8%,二者也呈现上升趋势,但是增长幅度明显变缓,仅仅增长了3.7%和4.9%,且在平衡油石比4.2%下远超出规范,故FWMA-SBS水损害测试合格。FWMA-70的残留稳定度和冻融劈裂比变化趋势与SBS改性沥青相似,但是在平衡油石比下,二者均略高于规范规定的最低合格阈值(下限),虽然通过水损害性能测试但也说明基质沥青泡沫温拌混合料水稳定性能仍有优化空间。

由表7可知,通过性能平衡设计后确定的油石比各项体积指标均符合规范要求,故最终确定FWMA-70和FWMA-SBS最佳油石比分别为4.0%、4.2%。

表7 两种沥青混合料平衡油石比下的体积特征参数及对应指标

沥青混合料类型	最佳油石比 P /%	毛体积相对密度	空隙率 VV /%	矿料间隙率 VMA /%	沥青饱和度 VFA /%	压实度 /%
FWMA-70	4.0	2.517	4.35	13.48	67.76	95.7
FWMA-SBS	4.2	2.515	4.20	13.72	69.38	95.8
技术要求	—	—	36	≥13	65~75	≥95

3 三种配合比设计方法对比

对比FWMA-70及FWMA-SBS两种沥青混合料在分别采用马歇尔法、轮碾法及平衡设计法确定的最佳油石比及相关的性能指标见表8。

表8 三种配合比设计方法对比

混合料类型	配合比设计方法	油石比 /%	空隙率 VV /%	动稳定度 DS / (次/mm)	残留稳定度 /%	冻融劈裂比 /%	破坏应变 / $\mu\epsilon$
FWMA-70	马歇尔法	4.1	4.00	1346	81.3	78.7	2116
	平衡设计法	4.0	4.35	1683	81.7	79.9	2245
	轮碾法	4.2	4.04	1114	82.0	80.4	2285
FWMA-SBS	马歇尔法	4.3	4.03	4638	85.3	84.2	2890
	平衡设计法	4.2	4.20	4936	86.4	84.9	2911
	轮碾法	4.4	4.00	4248	87.5	85.5	2947

从表8可以看出:

(1) 无论FWMA-70还是FWMA-SBS,采用三种配合比设计法确定的油石比排序均为:轮碾法>马歇尔法>平衡设计法,且三者差距范围为0~0.2%。分析原因主要是采用轮碾成型时压实功总体上略低于马歇尔击实仪的击实功,从而有效减少了矿质集料的损伤,维持了原有级配,故轮碾法较马歇尔法更为合理准确;平衡设计法在配合比设计时偏向于考虑规范中对于混合料性能的要求,故确定出的油石比总体上偏低。

(2) 经性能平衡设计得到的两种泡沫温拌沥青混合料均表现出优异的抗车辙能力,且动稳定度值显著高于其他两种油石比下的混合料;而破坏应变并未因油石比变化发生明显的变化。由此可见,该平衡设计法可使泡沫温拌沥青混合料抵抗高温环境变化的能力提升。

(3) 三种配合比设计得到的油石比下,沥青混合料残留稳定度与冻融劈裂比差异不显著。对于FWMA-SBS而言,其残留稳定度与冻融劈裂比均远超规范值80%及85%,说明SBS改性可使

(下转第110页)

- [12]张彦文,马菲菲.职业教育集团实体化办学的治理结构和运行机制创新[J].中国职业技术教育,2022(13):32-37.
- [13]许建领.新质生产力驱动“新双高”构建产教融合新生态的路径创新[J].中国高等教育,2025(22):29-35.
- [14]教育部.教育部公示首批现代产业学院名单[EB/OL].(2021-12-10)[2026-05-18].https://news.eol.cn/yaowen/202112/t20211210_2186590.shtml.
- [15]广东省现代产业学院发展联盟.广东已有50所本科高校建有285个产业学院[EB/OL].(2023-11-15)[2026-05-18].<https://xdcylm.dgut.edu.cn/info/1041/1321.htm>.
- [16]李晓光,袁海军,肖萍萍.应用型高校建设现代产业学院:特征、模式及方向[J].职业技术教育,2022,43(22):62-67.
- [17]广东发布新一轮高等教育“冲补强”方案:到2030年新增约3所“双一流”高校[EB/OL].(2026-05-16)[2026-05-18].<https://www.21jingji.com/article/20260515/herald/4d2ca66a2f911f4f9bf1567d52a307ea.html>.
- [18]广州职业技术大学.我校与荣电集团举行“数字贸易产业学院”签约(揭牌)仪式[EB/OL].(2025-05-21)[2026-05-15].https://www.gzpyp.edu.cn/yhtg/content_68137.
- [19]中国教育新闻网.广州职业技术大学:以“校中厂”深化产教融合育人[EB/OL].(2026-05-14)[2026-05-18].http://www.jyb.cn/rmtzcg/xwy/wzxw/202605/t20260514_2111478439.html.
- [20]广州职业技术大学高等职业教育质量报告(2025年度)[EB/OL].(2026-01-06)[2026-05-18].https://www.gzpyp.edu.cn/gzj/zlnb/rcpyzl/content_71202.

(上接第34页)

泡沫温拌沥青混合料具有较为良好的水稳定性,但FWMA-70的性能仅略高于规范规定的75%和80%,这表明基质沥青虽然发泡特性良好,但抗水损害性能还需进一步提升,究其原因主要是泡沫沥青中含有的残余水分降低了沥青与集料之间的黏附性。

(4) 沥青混合料马歇尔配合比设计法流程简单,但成型方式与实际路面压实差异性过大;相比之下,轮碾法配合比设计的碾压方式更接近路面实际情况,但二者与路面性能关联性较弱;平衡设计法在设计时着重考虑路面性能实现了性能优化。

4 结论

通过对比分析FWMA-70及FWMA-SBS两种沥青混合料采用马歇尔法、轮碾法及性能平衡设计法确定的最佳油石比、高温性能、低温性能及抗水损害能力,可以得出以下结论:

(1) 无论是FWMA-70还是FWMA-SBS,采用三种配合比设计法确定的油石比排序均为:轮碾法>马歇尔法>平衡设计法,且三者差值介于0~0.2%之间。

(2) FWMA-70及FWMA-SBS采用性能平衡设计油石比时,高温性能均优于马歇尔法及轮碾法,低温性能三者表现相当;三种配合比设计得到的油石比下,泡沫温拌沥青混合料水稳定性差距不显著。

(3) 轮碾配合比设计法碾压成型方式更接近路面实际情况,得出的油石比较马歇尔法更合理;平衡设计法侧重考量路面性能,实现性能优化。

参考文献:

- [1]任亮.表面活性剂辅助温拌泡沫SBS沥青技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2023.
- [2]YIN F, ARÁMBULA-MERCADO E, NEWCOMB D. Mix design procedure for foamed asphalt mixtures[J]. Road Materials and Pavement Design, 2016, 17(4): 946-957.
- [3]SALEH A, GÁSPÁR L. Optimizing foamed bitumen bound asphalt mixture design using neural network[J]. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2024, 68(4): 1040-1051.
- [4]张玉石.不同配合比设计方法对大空隙排水沥青混合料性能影响研究[J].交通世界,2021(22):137-138.
- [5]韦万峰.温拌泡沫沥青发泡特性及混合料路用性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.
- [6]温肖博.泡沫温拌沥青混合料性能研究与环境影响评价[D].南京:东南大学,2016.
- [7]王春,张喜艳,郝培文.温拌沥青混合料压实特性研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2023,47(4):676-681.
- [8]张凯丰,张脩,刘芳,等.废食用油基温拌改性沥青及其混合料路用性能研究[J].太原理工大学学报,2025,56(5):976-985.
- [9]杨明.基于平衡设计法的沥青混合料骨架结构及性能研究[D].长沙:长沙理工大学,2022.
- [10]李宁,李包,陈晨,等.高速公路泡沫温拌沥青混合料高温性能评价[J].新型建筑材料,2021,48(2):36-41.
- [11]曾蔚,吴义华,刘德胜,等.泡沫温拌沥青混合料半圆弯曲抗裂性能研究[J].公路交通科技,2023,40(S1):58-64.