

沥青混合料马歇尔试验检测与配合比优化

徐小龙

安徽省路桥试验检测有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i3.8793

[摘要] 为提高沥青混合料质量，则需要配合设计上入手强化，目前，确定最优化的沥青混合料配合的方法是实施马歇尔试验。通过此试验可以有效的指导配合比的最优化，对沥青路面的使用性能具有直接的影响。本文基于马歇尔试验方法，系统阐述了沥青混合料配合比设计的三阶段流程，包括目标配合比设计、生产配合比设计及生产配合比验证。通过工程实例，采用马歇尔试验测定不同沥青用量下的混合料体积参数及力学指标，绘制沥青用量与密度、稳定度、流值、空隙率的关系曲线，确定最佳沥青用量初始值 OAC1 及共同范围 OAC2，综合确定最佳沥青用量。同时，以马歇尔试验检测结果为依据，提出配合比优化调整策略。为确保沥青混合道路的使用功能，则需要选取最佳的矿料级配和沥青用量，通过马歇尔试验与配合比优化的有机结合，能偶使得沥青路面的质量得到进一步的提升。

[关键词] 沥青混合料；马歇尔试验；配合比设计；体积参数；最佳沥青用量

Marshall Test Analysis and Mix Design Optimization for Asphalt Mixtures

Xu Xiaolong

Anhui Road & Bridge Testing & Inspection Co., Ltd.

[Abstract] To enhance asphalt mixture quality, strengthening measures must be implemented during mix design. The current method for determining optimal asphalt mixture proportions is through Marshall testing. This test effectively guides proportion optimization, directly impacting the performance of asphalt pavements. Based on Marshall testing methodology, this paper systematically outlines a three-stage process for asphalt mixture proportion design: target proportion design, production proportion design, and production proportion validation. Using engineering examples, Marshall tests were employed to measure volume parameters and mechanical properties of mixtures at different asphalt contents. Relationship curves between asphalt content and density, stability, flow value, and void ratio were plotted to determine initial optimal asphalt content (OAC1) and common range OAC2, ultimately identifying the optimal asphalt dosage. Furthermore, optimization strategies for mix design adjustments were proposed based on Marshall test results. To ensure functional performance of asphalt roads, selecting optimal aggregate gradation and asphalt content is crucial. The integrated application of Marshall testing and proportion optimization can significantly improve asphalt pavement quality.

[Key words] Asphalt mixture; Marshall test; mix design; volume parameters; optimal asphalt content

引言

我国的公路路面形式主要为沥青路面，也是等级最高的公路。沥青公路的使用性能高低和沥青混合料的质量关系密切。沥青混合料的配合比设计是决定路面耐久性、抗车辙能力及水稳定性的核心环节^[1]。马歇尔试验方法是目前我国公路工程中，混凝土配合比设计采用的主要方法，对混合料的密度、稳定度、流值及空隙率等指标进行精准的测定后，由此决定矿料级配和沥青用量^[2]。但是，马歇尔试验检测结果的准确性与配合比设计的合理性在实际的工程应用中，还存在较大的挑战，如：该试验各指标的稳定性受到原材料性质波动及试验条件不同的干扰、传统配合比在控制体积参数和抗车辙性能等方面存在局

限性^[3]。目前，国内外学者在沥青混合料配合比设计方法方面开展了大量研究，如 Superpave 体积设计法、平衡配合比设计法等，为马歇尔设计方法的优化提供了参考和借鉴^[4]。

1 原材料性能与试验方法

1.1 原材料技术性质

选取 SK-70 号道路石油沥青，按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011) 进行性能检验^[5]。经检测，所检指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004) 要求。粗集料采用玄武岩，细集料采用机制砂，矿粉采用石灰岩磨制。粗、细集料及矿粉的各项指标均符合规范要求。

1.2 试验方法

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)进行马歇尔试件成型与测试。主要步骤包括：

第一，试件制备。在沥青用量 4.0%、4.5%、5.0%、5.5%、6.0% (占矿料质量百分比) 五个档次下，各制备 4 组马歇尔试件，双面“击实”75 次，试件高度控制在 $63.5\text{mm} \pm 1.3\text{mm}$ 。

第二，体积参数测定。采用表干法测定试件毛体积密度；根据矿料合成毛体积密度及沥青密度计算理论最大相对密度；计算空隙率 (VV)、矿料间隙率 (VMA)、沥青饱和度 (VFA) 等体积指标。

第三，力学指标测定。在 60°C 恒温水浴中保温 $30 \sim 40\text{min}$ 后，采用马歇尔稳定度仪测定稳定度 (MS) 及流值 (FL)。

第四，最佳沥青用量确定。绘制沥青用量与密度、稳定度、流值、空隙率的关系曲线，按照规范方法计算 OAC1 和 OAC2，综合确定最佳沥青用量 (OAC)。

2 马歇尔试验结果和分析

2.1 马歇尔试验结果

按照上述试验方法，对不同沥青用量下的马歇尔试件进行测试，结果汇总见表 1。

表 1 马歇尔试验结果汇总

沥青用量 (%)	毛体积密度 (g/cm^3)	空隙率 VV (%)	矿料间隙率 VMA (%)	沥青饱和度 VFA (%)	稳定度 MS (kN)	流值 FL (0.1mm)
4.0	2.412	6.8	15.2	55.3	8.56	21.5
4.5	2.435	5.2	14.8	64.9	9.82	24.8
5.0	2.448	3.9	14.6	73.3	10.95	29.6
5.5	2.451	3.1	14.9	79.2	10.28	35.2
6.0	2.446	2.8	15.5	81.9	8.93	42.5
技术标准	-	3-5	≥ 13	65~75	≥ 8	15~40

根据表 1 所示：随着沥青用量的增加，混合料的体积参数和力学指标呈现规律性变化。其中密度随着沥青用量增加，毛体积密度先增大后减小，在 5.5% 附近达到峰值。这是由于沥青用量较低时，沥青不能充分润滑矿料表面，混合料难以压实；沥青用量过高时，多余沥青起润滑作用，使矿料颗粒易于相对滑动，密度反而下降。空隙率随沥青用量增加呈单调下降趋势。当沥青用量为 4.0% 时，空隙率达 6.8%，超过规范上限 (5%)；当沥青用量达到 5.0% 时，空隙率为 3.9%，满足 3%-5% 的规范要求；当沥青用量超过 5.5% 后，空隙率降至 3% 以下，可能影响高温稳定性。矿料间隙率随沥青用量增加呈现先减小后增大的趋势，在 5.0% 处达到最小值 14.6%。VMA 是表征矿料颗粒间空隙体积的参数，其值过小意味着沥青膜厚度不足，影响耐久性；过大则意味着沥青用量可能偏高。沥青饱和度随沥青用量增加持续增大。当沥青用量为 4.0% 时，VFA 仅为 55.3%，低于规范下限 (65%)；当沥青用量为 5.0% 时，VFA 为 73.3%，处于规范要求的 65%-75% 范围内；当沥青用量超过 5.5% 后，VFA 超过 75%，可能影响高温抗车辙能力。稳定度随沥青用量增加呈先增大后减小的抛物线型变化，在 5.0% 处达到峰值 10.95kN。这表明沥青用量过低时，沥青未能充分发挥粘结作用；沥青用量过高时，润滑作用增强，混合料内摩擦力下降，稳定度降低。流值随沥青用量增加持续增大，反映混合料高温变形能力增加。当沥青用量为 4.0%-5.0% 时，流值处于 15-30 (0.1mm) 的适宜范围；当沥青用量达到 6.0% 时，流值达 42.5 (0.1mm)，超过规范上限 (40)。

2.2 最佳沥青用量确定

2.2.1 计算 OAC₁

依据沥青用量与各项指标的关系曲线，读取各峰值点对应的沥青用量，具体数据见表 2。

表 2 OAC₁ 计算参数取值表

指标类型	对应峰值条件	沥青用量 (%)	取值依据
a ₁	最大密度	5.5	密度-沥青用量曲线峰值点
a ₂	最大稳定度	5.0	稳定度-沥青用量曲线峰值点
a ₃	目标空隙率中值 (4%)	4.9	空隙率-沥青用量曲线对应点
OAC ₁	平均值	5.13	$(a_1+a_2+a_3)/3$

由表 3 可知， $OAC_1 = (5.5\% + 5.0\% + 4.9\%) / 3 = 5.13\%$ 。

2.2.2 确定 OAC₂

依据规范规定的各项技术指标标准，分别确定各指标对应的沥青用量允许范围，取其交集作为共同范围，具体数据见表 3。

表 3 OAC₂ 计算参数取值表

技术指标	规范要求	对应沥青用量范围 (%)	交集区间
空隙率 VV	3%-5%	4.6-5.8	OACmin-OACmax
稳定度 MS	$\geq 8\text{kN}$	4.2-5.8	↓
流值 FL	15-40 (0.1mm)	4.0-5.7	↓
沥青饱和度 VFA	65%-75%	4.8-5.4	↓
共同范围	-	4.8-5.4	四项指标交集

由表 4 可知，四项指标的交集共同范围为 $OAC_{\min} - OAC_{\max} = 4.8\% - 5.4\%$ ，则： $OAC_2 = (OAC_{\min} + OAC_{\max}) / 2 = (4.8\% + 5.4\%) / 2 = 5.10\%$ 。

2.2.3 综合确定最佳沥青用量 (OAC)

取 OAC₁ 与 OAC₂ 的中值作为初始最佳沥青用量，结合工程实际进行调整，具体数据见表 4。

表4 最佳沥青用量综合确定表

计算参数	数值 (%)	确定依据
OAC ₁	5.13	密度、稳定性、空隙率峰值平均值
OAC ₂	5.10	各项指标技术标准交集范围中值
初始 OAC	5.12	(OAC ₁ +OAC ₂)/2
最终 OAC	5.0	重载交通条件下， 在共同范围内偏向中下限取值

综合考虑该路段重载交通的实际情况，为增强混合料的高温抗车辙能力，在共同范围（4.8%~5.4%）内偏向中下限取值，最终确定最佳沥青用量为 5.0%。

2.2.4 最佳沥青用量验证

在最佳沥青用量 5.0%条件下，各项马歇尔试验指标验证结果见表 5。各项指标均满足规范要求，表明所确定的最佳沥青用量合理可行。

表5 最佳沥青用量（5.0%）验证结果汇总表

检测指标	检测结果	规范要求	符合性判定
毛体积密度 (g/cm ³)	2.448	-	-
空隙率 VV (%)	3.9	3~5	符合
矿料间隙率 VMA (%)	14.6	≥13	符合
沥青饱和度 VFA (%)	73.3	65~75	符合
稳定度 MS (kN)	10.95	≥8	符合
流值 FL (0.1mm)	29.6	15~40	符合

3 沥青混合料配合比优化策略

3.1 基于体积参数的级配优化

马歇尔试验结果表明，矿料级配是影响混合料体积参数的关键因素。在最佳沥青用量 5.0%条件下，VMA 为 14.6%，略高于规范最小值 13%，但仍有优化空间。VMA 的大小不仅取决于矿料级配的粗细程度、集料粒径及表面纹理，更与各级配筛孔通过率的协调性密切相关。

适当调整粗细集料比例，通过控制 4.75mm 及 2.36mm 等关键筛孔的通过率，增加中间粒径颗粒含量，使矿料形成骨架密实结构，改善“嵌挤”程度；严格控制粗集料的扁平颗粒含量，采用反击式破碎工艺提高集料粒径的立方体程度，增强“内摩阻力”；合理选用矿粉用量，确保矿粉与沥青形成胶泥能有效填充细集料间的空隙，同时避免矿粉过量导致混合料干涩。此外，可通过计算矿料的堆积密度与捣实密度，验证级配的骨架“嵌挤”能力，从源头上优化 VMA，使混合料兼具良好的施工和易性与路面耐久性。

3.2 路用性能的综合优化

沥青混合料的配合比设计不仅要满足马歇尔试验指标，还应综合考虑高温稳定性、低温抗裂性及水稳定性等路用性能。这三项性能之间存在一定的制约关系，优化设计需在满足马歇尔指标的基础上，寻求三者之间的最佳平衡点，使混合料在服役期内兼具抗变形、抗开裂与抗水损的综合能力。

针对高温稳定性问题，可在最佳沥青用量基础上进行车辙试验验证，要求动稳定度通常不低于 2800 次/mm（视气候分区而定）。若动稳定度不满足要求，可考虑在共同范围内适当降低沥青用量 0.1%~0.2%，或优化粗集料骨架结构，必要时添加抗车辙剂、玄武岩纤维等外掺剂，提高高温抗变形能力。针对水稳定性问题，应进行浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验，确保残留稳定度不小于 85%，冻融劈裂强度比不小于 80%。同时，还应关注低温弯曲应变指标，防止因过度追求高温性能而牺牲低温抗裂性。通过平衡多重性能指标，实现混合料配合比的综合优化，确保所确定的配合比可适应具体工程的气候与交通荷载条件，有效提升沥青路面的耐久性与服役质量。

3.3 施工过程的质量控制

配合比设计的优化效果最终要通过施工过程来实现。在目标配合比确定后，应进行生产配合比设计及生产配合比验证阶段的工作：

第一，生产配合比设计。从二次筛分后进入各热料仓的材料取样筛分，精确测定各热料仓矿料的级配组成及密度，确定各仓的供料比例，使合成级配尽可能接近目标配合比级配中值。目标配合比设计的最佳沥青用量 OAC 及其±0.3%进行马歇尔试验，验证体积参数与力学指标，确保生产过程中的可行性。

第二，生产配合比验证。采用生产配合比进行试拌、铺筑试验段，在拌和楼出料口取样及路面碾压成型后钻取芯样，进行马歇尔试验、抽提筛分试验及“芯样”密度检测，检验混合料的均匀性与压实度，最终确定生产用标准配合比。

第三，动态调整机制。施工过程中，应建立拌和楼实时监测与反馈机制。当进场材料筛分结果或“料仓”取样发生波动时，应及时调整“冷料仓”上料比例或热料仓配合比，使混合料级配控制在允许误差范围内，确保混合料质量符合设计。

4 结论

马歇尔试验是沥青混合料配合比设计的有效方法。通过测定不同沥青用量下混合料的密度、空隙率、稳定性、流值等指标，绘制关系曲线，科学确定最佳沥青用量。本文确定的 AC-20 混合料最佳沥青用量为 5.0%，各项指标均满足规范要求。

[参考文献]

- [1]孙培,肖赞,梁子君,等.沥青混合料均匀性及其对路用性能影响研究[J].合肥学院学报:综合版,2022,39(5):94-100.
- [2]李艳华.油石比对高速公路沥青混合料性能的影响研究[J].四川水泥,2025(11):270-272.
- [3]生瑞,王振宇,朱浩,等.SMA-13钢渣沥青混合料配合比设计与应用效果分析[J].四川水泥,2025(3):245-247.
- [4]蔡梦雅.市政道路沥青混合料目标配合比优化及验证分析[J].安徽建筑,2025(9):84-86.
- [5]钟林君.废轮胎颗粒改性的路面沥青混合料配比设计及路用性能研究[J].西部交通科技,2024(7):78-80.