

单粒径沥青混合料的级配研究

钱旭栋¹, 顾珈玮¹, 师峻逸²

(1. 宁波路桥工程建设有限公司, 浙江 宁波 315000; 2. 同济大学 交通学院, 上海市 201804)

摘要: 为解决普通级配沥青混合料在半柔性材料应用中级配设计复杂的问题, 通过适配性筛选与性能优化, 对 16.0~13.2、13.2~9.5、9.50~4.75 mm 这 3 种单粒径级配沥青混合料的连通空隙率和马歇尔强度进行了协同分析。结果表明: 最优单粒径级配为 13.2~9.5 mm, 其最佳油石比为 5.0%, 在此参数下, 沥青混合料马歇尔强度可达 4.2 MPa, 超过《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》要求 40%; 连通空隙率为 35.3%, 仅比上述规程要求的上限高 18%, 可同时满足半柔性材料对承载能力和灌浆适配性的需求。

关键词: 单粒径级配; 混合料; 空隙率; 强度; 油石比

中图分类号: U414; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)02-0112-04

Study on Gradation of Single-particle Size Asphalt Mixtures

QIAN Xudong¹, GU Jiawei¹, SHI Junyi²

(1. Ningbo Road and Bridge Engineering Construction Co., Ltd., Ningbo 315000, China; 2. School of Transportation, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To solve the problem of complex gradation design of common graded asphalt mixtures in semi-flexible material applications, a collaborative analysis is conducted on the connected void ratio and Marshall strength of three single-particle size gradated asphalt mixtures, namely 16.0~13.2 mm, 13.2~9.5 mm, and 9.50~4.75 mm through the compatibility screening and performance optimization. The result shows that the optimal single-particle size gradation is 13.2~9.5 mm, and its optimal asphalt-aggregate ratio is 5.0%. Under this parameter, the Marshall strength of the asphalt mixture can reach 4.2 MPa, exceeding the requirements of the *Test Code for Asphalt and Asphalt Mixture in Highway Engineering* by 40%. The connected void ratio is 35.3%, which is only 18% higher than the upper limit required by the above-mentioned code, and can simultaneously meet the requirements of semi-flexible materials for bearing capacity and grouting adaptability.

Keywords: single-particle size gradation; mixture; void ratio; strength; asphalt-aggregate ratio

0 引言

在道路工程领域, 沥青混合料应用广泛, 是传统路面铺装的核心材料^[1-3]。但其级配设计需将粗、中、细集料及矿粉等多种粒径原料按特定比例组合, 从级配曲线调试到马歇尔性能验证, 需经过多轮参数优化和试验检测, 流程繁琐且耗费大量人力与时间^[4-6], 尤其在半柔性材料应用场景中, 复杂的级配设计常成为施工效率提升的瓶颈。

半柔性材料作为新型路面材料, 兼具沥青混合料的柔韧性与水泥基材料的高稳定性^[7], 在重载道路、交叉口修复等场景中优势显著, 且其对基体沥青混合料的级配要求更为宽泛, 无需严苛的多粒径配

比^[8-10], 为简化设计流程提供了可能。同时, 半柔性材料的性能发挥高度依赖基体沥青混合料^[11], 而混合料的孔隙率是决定灌浆料渗透效果和最终结构强度的关键指标。孔隙率^[12-13]的不足会导致灌浆不充分, 过高或分布不均则易引发开裂, 因此基体混合料的结构设计直接影响着半柔性材料的工程价值。

针对普通级配混合料的设计痛点, 单粒径级配沥青混合料的优势逐渐凸显: 其仅采用单一粒径区间集料(如 16.0~13.2、13.2~9.5 mm 等)配制, 级配组成简单, 可大幅减少设计和配料环节的工作量; 单一粒径颗粒形成的骨架结构能自然构建充足且连通性良好的孔隙^[14-15], 恰好适配半柔性材料的灌浆需求。基于此, 本研究通过分析不同单粒径级配沥青混合料的体积参数和力学性能, 筛选适配半柔性材料的最优级配方案, 旨在为半柔性材料的高效应用提供理论支持, 助力提升施工效率和工程质量。

收稿日期: 2025-09-24

作者简介: 钱旭栋(1980—), 男, 高级工程师, 从事道路桥梁施工管理工作。

1 试验原材料

本研究采用的集料为石灰岩,其压碎值为 19.9%,针片状含量为 9.9%,表观相对密度为 2.7,毛体积相对密度为 2.6,吸水率为 0.3%;采用 SBS 高黏高弹乳化沥青,其指标见表 1。

表 1 基质乳化沥青参数指标

指标	测试结果
破乳速度	慢裂
固含量/%	63
与石灰岩集料黏附等级	5 级
蒸发残留物针入度(25℃)/(0.1 mm)	45.2
蒸发残留物延度(15℃)/cm	110.3
蒸发残留物软化点/℃	84.2

2 试验方法

本研究根据交通部“阳离子乳化沥青及其路用性能研究”课题协作组提供的试件成型方式,将马歇尔试件的成型方式改进为:先对混合料双面各击实 50 次,常温养生 24 h 后进行二次双面击实 25 次。

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程(JTG E20—2011)》(以下简称《规程》),测定沥青混合料的体积指标和马歇尔强度指标。

3 不同单粒径级配混合料的优选

连通空隙率是决定半柔性材料中灌浆料能否顺利灌入、且填充均匀性的核心体积参数,马歇尔强度则是反映沥青混合料承载能力的关键指标。因此本研究分别选择 16~13.2、13.2~9.5、9.5~4.75 mm 这 3 种单粒径级配混合料,油石比则统一采用 4.5%,拟通过混合料连通空隙率与马歇尔强度的协同分析,确定适配半柔性材料的最优单粒径级配。

3.1 连通空隙率分析

3 种级配沥青混合料的连通空隙率试验结果见图 1。

由图 1 可见,随着单粒径集料粒径范围的减小,混合料连通空隙率呈现显著下降趋势:16~13.2 mm 级配混合料的连通空隙率最高,达 37.4%;9.5~4.75 mm 级配混合料较 13.2~9.5 mm 级配混合料的连通空隙率降低了 19.0%。该变化规律表明,单粒径集料粒径越小,颗粒间的嵌挤间隙越小,导致混合料内部可用于灌浆料流动与填充的连通孔隙数量减少、孔径缩小。

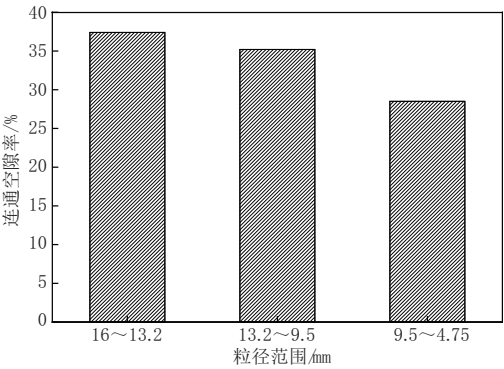


图 1 3 种级配沥青混合料的连通空隙率

3.2 马歇尔强度分析

3 种级配沥青混合料的马歇尔强度指标见图 2。

由图 2 可见,随着单粒径集料粒径范围的减小,混合料的马歇尔强度呈现明显下降趋势:16~13.2 mm 级配混合料的马歇尔强度最高,达 4.3 MPa;9.5~4.75 mm 级配混合料的马歇尔强度相较于 16~13.2 mm 级配混合料降低了 14.0%。这一规律反映出,较大粒径的单粒径集料在混合料中更易形成稳固的骨架结构,能更好地发挥集料自身高强度的优势,减少因颗粒间接触面积占比等因素对强度的削弱,进而使混合料整体表现出更高的承载能力,更能满足对强度有较高要求的工程场景需求。

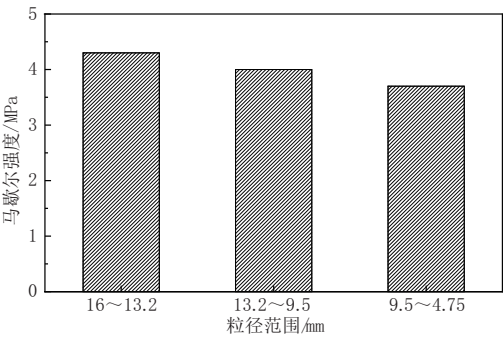


图 2 3 种级配沥青混合料的马歇尔强度指标

3.3 最优单粒径级配确定

半柔性材料要求混合料的连通空隙率为 20%~30%。其中 9.5~4.75 mm 级配的空隙率(28.5%)最符合推荐范围。但通过实际灌浆测试发现,9.5~4.75 mm 级配混合料的孔隙孔径较小,易出现局部堵塞、灌浆料填充不饱满的问题。13.2~9.5 mm 级配混合料的连通空隙率为 35.2%,仅比规范要求高 17.7%,且其马歇尔强度达 4.0 MPa,既能保证灌浆料充分填充以形成整体结构,又具备足够的承载能力抵抗路面荷载。因此确定 13.2~9.5 mm 单粒径级配为适配半柔性材料的最优单粒径级配。

4 优选级配的最佳油石比分析

为进一步优化 13.2~9.5 mm 单粒径级配沥青混合料的路用性能,依据《规程》中关于最佳沥青用量的确定方法,对该级配混合料的油石比进行优化。以

初始设定的 4.5% 油石比为中值,按 0.5% 的梯度差值设置 5 组油石比变量,测定并绘制不同乳液用量与毛体积相对密度、马歇尔稳定度、流值、空隙率 (VV)、矿料间隙率 (VMA) 和有效沥青饱和度 (VFA) 的关系曲线,结果见图 3。

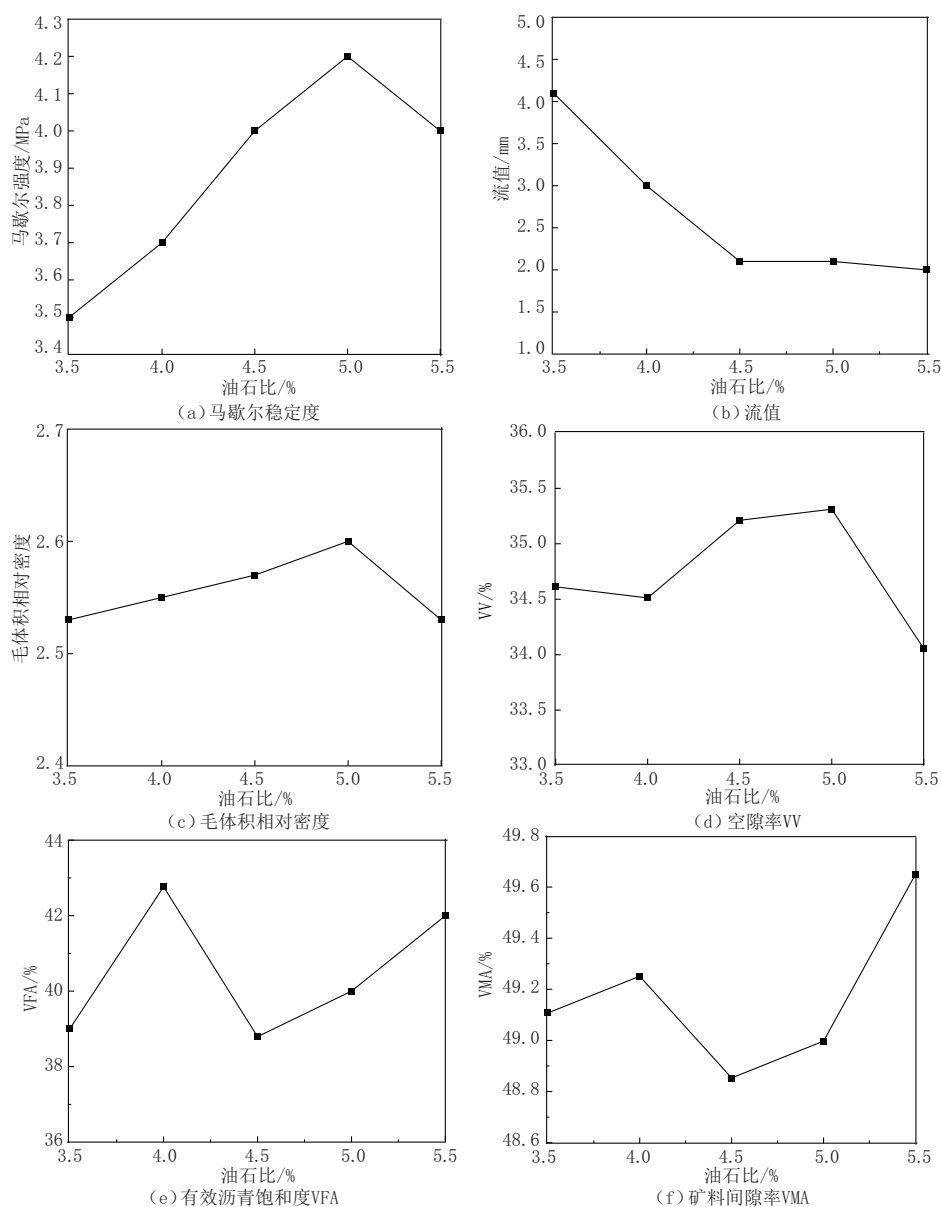


图3 不同乳液用量下的马歇尔试验指标

由图3可见,马歇尔稳定度随着油石比的增加先升后降,在油石比为 5.0% 左右时达到峰值,体现了马歇尔强度先增后减的趋势;流值随着油石比的增大呈下降趋势,说明混合料变形能力减弱;毛体积相对密度随着油石比的增加先缓升后下降,反映了密实度先提升、后因沥青过多而降低的趋势;VV 先略降、上升后再下降,油石比为 5.0% 左右时有较高值,利于灌浆;VMA 整体先升后降再升,与沥青填充矿料间隙的变化相关;VFA 波动较大,先升后降再升,体

现了沥青与矿料的包裹及填充状态随着油石比改变而变化的趋势。这些指标的变化规律相互关联、各有特点,综合反映了油石比对 13.2~9.5 mm 单粒径级配沥青混合料性能的影响,为后续根据上述指标计算最佳沥青用量提供了依据。

最佳沥青用量依据毛体积相对密度、马歇尔稳定度、VV、VFA 的测试数据计算。最终得到最佳沥青用量的最小值、最大值均为 5.00%,故将其值取为 5.0%。即 13.2~9.5 mm 单粒径级配沥青混合料的最

佳油石比为5.0%。

为验证该最佳油石比下混合料的性能,对13.2~9.5 mm单粒径级配沥青混合料的马歇尔指标和连通空隙率展开深入分析。结果显示,其马歇尔强度达到4.2 MPa,相较于《规程》要求的3 MPa,提升幅度高达40%,充分展现出优异的承载能力,能够为路面结构提供坚实支撑,有效抵御车辆荷载的反复作用。同时,连通空隙率为35.3%,仅比规范要求值高出17.7%。这一空隙率水平既保证了有充足的连通孔隙供灌浆料渗透,又不会因孔隙过大而导致混合料强度过度损失,可确保灌浆料在自重或低压作用下顺利灌入混合料内部,并实现均匀填充,兼顾了半柔性材料对高强度承载性能与良好灌浆适配性能的双重需求。

此外,本研究使用13.2~9.5 mm单粒径级配沥青混合料和P·O42.5硅酸盐水泥灌浆料(水灰比0.5)制备了相应的半柔性材料,并按照《规程》测定了其核心指标。优化混合料级配后,所制备的半柔性材料的马歇尔强度高达20 kN、冻融劈裂强度比高达94%、动稳定度高达8 171次/mm,分别比《规程》要求高33.3%、17.5%、104.3%。这再次验证了13.2~9.5 mm单粒径级配沥青混合料作为半柔性材料基体的合理性,证明其能够为半柔性材料的施工和性能发挥奠定坚实基础。

5 结 语

(1)随着集料粒径减小,单粒径级配沥青混合料的连通空隙率呈显著下降趋势,马歇尔强度呈明显上升趋势。其中13.2~9.5 mm单粒径级配为适配半柔性材料的最优单粒径级配。

(2)13.2~9.5 mm单粒径级配沥青混合料的最佳油石比为5.0%,在此参数下混合料马歇尔强度达4.2 MPa,超《规程》要求40%;连通空隙率为35.3%,仅比《规程》要求的上限高18%左右,实现了承载能力与灌浆适配性的最优平衡。

(3)采用13.2~9.5 mm单粒径级配沥青混合料和水灰比0.5的P·O42.5硅酸盐水泥灌浆料制备半柔性材料,其马歇尔强度达20 kN(超《规程》33.3%)、冻融劈裂强度比为94%(超《规程》17.5%)、动稳定度8 171次/mm(超《规程》104.3%),验证了该单粒径级配作为半柔性材料基体的合理性。

(4)本研究明确了半柔性材料用单粒径级配沥青混合料的关键设计参数,为半柔性材料在道路修补、新建路面等工程中的高效应用提供了参考。

参考文献:

- [1] 刘克,张锋.取样制件对浇注式沥青混合料性能和组成的影响研究[J].公路交通技术,2025,41(5):20-24;31.
- [2] 崔亚楠,郭顺,纪德智,等.基于RAP粗集料的温拌再生沥青混合料抗裂性能分析[J/OL].建筑材料学报,2025,27(10):1-14.
- [3] 全佳.玄武岩纤维对硅藻土改性沥青混合料路用性能影响研究[J].公路,2025(10):346-351.
- [4] 余清华,袁文豪,胡力群,等.26.5~53 mm大粒径碎石骨架结构性试验研究[J].现代交通技术,2023,20(2):1-5.
- [5] 梁建.环氧乳化沥青单粒径矿料铺装层技术研究[D].西安:长安大学,2021.
- [6] 李建红.公路沥青路面集料级配波动范围控制指标研究[J].中国建材科技,2020,29(2):58-59.
- [7] 吴平,黄振雄,王斌,等.环氧乳化沥青改性灌浆复合路面的性能研究与应用[J].工程建设与设计,2025(13):81-84.
- [8] 侯剑楠.基于贯入试验的沥青混合料级配设计方法研究[D].长沙:长沙理工大学,2019.
- [9] 苏丽娜,贾晓敏,谢冰.集料组成对沥青混合料均匀性影响的试验分析及数值模拟[J].科技通报,2017,33(11):116-120.
- [10] 易岳林,谢国瑞,房涛,等.粗集料嵌挤能力试验方法研究[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(10):17-20.
- [11] 罗仕豪.级配类型对灌注式半柔性路面性能的影响分析[J].交通科技与管理,2025,6(13):126-128.
- [12] 揭洲萍.灌入式半柔性路面材料性能分析与施工应用[J].交通世界,2025(13):130-133.
- [13] 冯春彦.半柔性路面材料的路用性能与灌注率的指标优化研究[J].工程建设与设计,2025(8):204-206.
- [14] 于阳阳.半柔性路面材料路用性能试验研究[J].交通世界,2025(12):33-35.
- [15] 李立辉.开级配半柔性保水路面混合料性能研究[J].交通世界,2025(12):40-42.