

增韧改性沥青混合料的级配设计与性能分析

王 璐

[上海城投公路投资(集团)有限公司,上海市 200336]

摘 要: 为了提高沥青底面层抗弯拉疲劳应力的能力,以增韧改性沥青为基材,通过优化级配设计方案,进一步强化增韧改性沥青混合料的综合性能。在针对增韧混合料的低温抗裂与抗疲劳性能改良的基础上,通过与普通级配AM-25制备得到的沥青混合料的对比发现,级配优化后的增韧改性沥青混合料的低温抗裂指标提升17.04%~202.78%、抗疲劳性能指标提高62%~121%。该研究成果为增强沥青路面的耐用性与行车安全性提供了全新技术路径,具有实际工程应用价值。

关键词: 沥青路面;增韧改性沥青;级配设计;抗疲劳性能

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0040-03

Gradation Design and Performance Analysis of Toughened Modified Asphalt Mixture

WANG Lu

[Shanghai Chengtou Highway Investment (Group) Co., Ltd., Shanghai 200336, China]

Abstract: To enhance the ability of the asphalt base layer to resist flexural and tensile fatigue stress, taking the toughened modified asphalt as the base material and through the optimization of gradation design scheme, the comprehensive performance of the toughened modified asphalt mixture is further enhanced. On the basis of improving the low-temperature cracking resistance and fatigue resistance of the toughened mixture, and through the comparison with the asphalt mixture prepared by the conventional gradation AM-25, it is found that the low-temperature cracking resistance indicators of the gradation-optimized toughened modified asphalt mixture are increased by 17.04%~202.78%, and its fatigue resistance performance indexes are increased by 62%~121%. This research outcome provides a brand-new technical approach for improving the durability and driving safety of asphalt pavements, and holds significant practical engineering application value.

Keywords: asphalt pavement; toughened modified asphalt; gradation design; fatigue resistance

0 引 言

沥青底面层是路面结构体系中衔接行驶功能的关键过渡层^[1],但却由于该层位技术特性复杂特殊等原因,未能够在工程实践中获得足够关注^[2-4]。在实际的道路设计过程中,普遍存在着设计方式较为单一的问题,大多采用连续式粗级配AM-25,并且通常选用普通沥青制备^[5-7]。这种设计选择导致的直接后果是,在沥青路面的上、中、下三个结构层中,底面层的抗疲劳能力成为最差的一环^[8]。在长期车

辆荷载反复作用下,底面层极易产生疲劳裂缝等病害,导致路面整体服役年限缩短,威胁行车安全。

针对这类技术痛点,工程领域常采用在底面层与半刚性基层之间增设ATB-25/30柔性基层的处置方案^[9-12]。这一举措在一定程度上确实能够延缓和拖延病害的发生,对路面结构起到一定的保护作用。但需要注意的是,ATB-25/30延缓病害的能力是有限的,它并没有从根本上消除病害隐患。此外,国外ATB基层的应用场景多为与级配碎石底基层搭配使用,这种工况与国内半刚性基层之上铺设ATB的情况有着本质的区别^[12-15],所以国外的成功经验并不能直接用于借鉴。因此,探索更有效的提升沥青底面层性能的方法迫在眉睫。

为改善现有问题,本研究着眼于底面层材料,在使用增韧改性沥青的基础上尝试从级配设计的角度

收稿日期: 2026-01-13

基金项目: 上海城投(集团)有限公司科技创新计划(CTKY-ZDZX-2023-003);上海市科委“科技创新行动计划”(23DZ1202901)

作者简介: 王璐(1992—),男,博士,高级工程师,从事道路桥梁施工管理工作。

对增韧改性沥青混合料进一步优化,旨在提升底层所用的沥青混合料的耐久性能与强度性能。

1 原材料指标

1.1 沥青

本研究选用增韧复合改性沥青作为混合料胶结料,用于制备增韧改性沥青混合料,其技术指标实测结果见表 1。

表 1 沥青基础指标

技术指标	增韧复合改性沥青	试验方法
针入度(25℃)/0.1 mm	40	JTG E20 T0604
软化点/℃	64	JTG E20 T0606
177℃运动黏度/(Pa·s)	1.5	JTG E20 T0625
延度(5℃)/cm	40	JTG E20 T0605

1.2 集料

本研究采用的粗集料与细集料,其各项性能指标经测试均满足相关规范要求,具体测试结果见表 2。

表 2 集料性能指标

	技术指标	测试结果	规范要求	测试方法
粗集料性能指标	洛杉矶磨耗损失	22.3%	≤30%	T 0317
	压碎值	18.5%	≤28%	T 0316
	坚固性	7.8%	≤12%	T 0314
	表观相对密度	2.8	≥2.60	T 0304
	针片状含量	9.9%	≤15%	T 0312
细集料性能指标	含泥量	1.32%	≤3%	T 0333
	砂当量	77.6%	≥30%	T 0334
	表观相对密度	2.71	≥2.50	T 0304

2 混合料制备与性能测试

将增韧改性沥青与集料置于 170℃条件下保温,按最优油石比将沥青与集料拌和 3 min,即可制备得到增韧改性沥青混合料。

采用-10℃低温小梁弯曲试验测试增韧改性沥青混合料的抗低温开裂能力^[16]。采用四点弯曲梁疲劳试验,来评价沥青混合料的疲劳性能。四点弯曲试验条件为:温度(15±0.5)℃,加载频率(10±0.1)Hz,试件尺寸 380(±6)×62.5(±6)×50(±6)mm,试验采用应变控制。

3 配合比设计

在沥青混合料的组成结构中,主骨料所形成的嵌挤骨架结构扮演着极为关键的角色,它对密级配沥青混合料的性能提升有着重要意义。

密级配沥青混合料作为道路建设中常用的材料,其性能直接关系到道路的使用质量和寿命。当主骨料相互嵌挤形成稳定的骨架体系时,骨料间会产生较强的内摩擦力与咬合作用,能够有效抵御高温环境下车辆荷载引发的剪切力与变形,避免骨料间出现相对滑动位移。相较于未形成有效嵌挤骨架的混合料,其高温抗变形能力显著提升。例如,在实际的高速公路建设中,采用具有良好嵌挤骨架结构的密级配沥青混合料铺筑路面,经过夏季高温和大量车辆行驶的考验后,路面的车辙深度明显小于采用普通级配混合料的路段。这充分验证了嵌挤骨架结构对保障道路高温稳定性的重要作用。

本研究设计的合成级配,严格遵循《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2017)中关于 AM-25 间断半开级配的相关要求。此外,间断半开级配-25(GATB-25)为本次研究针对沥青底面层抗疲劳需求设计的专用级配类型。为避免主骨料空隙过大,采用 2.36~9.50 mm 区段级配间断设计(粗、中粒式沥青混合料可选择 2.36~9.50 mm 一档间断或 4.75~9.50 mm 两档间断模式)。

GATB-25 采用体积设计法,注重级配的抗疲劳和抗反射裂缝能力,在 2.36~9.50 mm 区段级配间断,空隙率控制在 8%~10%。矿料占比在 15% 以内;2.36 mm 以下适当偏上限,但仍在较低水平。

集料掺配比例、筛孔通过率及矿料合成级配具体参数见表 3,级配曲线如图 1 所示。

表 3 集料掺配比例、筛孔通过率与矿料级配

筛孔/mm	集料 1	集料 2	集料 3	集料 4	矿粉	设计级配	合成级配
掺配比例/%	21	46	25	5	3		
31.50	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
26.50	100.0	100.0	100.0	54.5	100.0	95.3	97.7
19.00	100.0	77.1	99.7	4.8	100.0	78.2	84.6
16.00	100.0	32.0	99.3	0.9	100.0	59.7	64.1
12.20	100.0	12.0	76.2	0.2	100.0	40.3	48.6
9.50	100.0	7.4	11.1	0.1	100.0	22.5	30.2
4.75	100.0	0.5	0.4	0.1	100.0	19.8	24.3
2.36	74.0	0.5	0.1	0.1	100.0	15.0	18.8
1.18	52.3	0.5	0.1	0.1	100.0	12.0	14.5
0.60	29.1	0.5	0.1	0.1	100.0	8.0	9.4
0.30	16.8	0.5	0.1	0.1	100.0	5.5	6.8
0.15	10.5	0.5	0.1	0.1	92.0	4.8	5.3
0.075	6.7	0.5	0.1	0	85.9	4.0	4.2

根据规范所述的马歇尔实验方法,增韧沥青用于合成级配时最佳油石比为 4.9%,用于 AM-25 级配

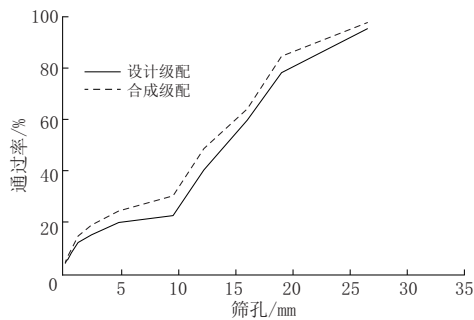


图1 级配曲线图

搭配时最佳油石比为4.6%。

4 试验结果分析

增韧沥青与合成级配制备得到的混合料命名为合成级配混合料,增韧沥青与AM-25级配制备得到的混合料命名为AM-25混合料。两者的低温小梁弯曲试验和疲劳试验数据分别见表4、表5。

表4 低温小梁弯曲试验结果

指标		抗弯拉强度/ MPa	最大弯拉 应变(με)	弯曲劲度 模量/MPa
AM-25 混合料	1	3.5	2 309	3 684
	2	3.7	2 341	3 529
合成级配 混合料	1	11.1	4 011	2 980
	2	10.7	3 997	3 002

表5 疲劳试验结果对比

指标	控制水平 (με)	初始模量/ MPa	疲劳寿命/ 次	平均值/次
AM-25 混合料	400	3 995	256 530	272 020
		4 910	287 510	
	600	4 835	69 880	73 205
		5 148	76 530	
合成级配 混合料	400	4 676	467 090	441 465
		4 568	415 840	
	600	5 032	154 920	162 015
		4 088	169 110	

表4显示在抗弯拉强度上,合成级配混合料两次试验值(11.1、10.7 MPa)均高于AM-25混合料(3.5、3.7 MPa),平均值提升约202.78%,抵抗弯曲破坏能力更强。从骨架结构作用机理而言,合成级配的集料骨架形成了更有效的荷载传递路径,减少了应力集中,提升了抗弯拉强度。在最大弯拉应变方面,合成级配混合料(4 011με、3 997με)较AM-25混合料(2 309με、2 341με)大幅提升,平均值高约72.22%,低温韧性更优;弯曲劲度模量上,合成级配混合料(2 980、3 002 MPa)显著低于AM-25混合料(3 684、3 529 MPa),平均值降低超17%,材料韧性更好。整体来看,合成级配混合料在低温弯曲性能上(强度、

韧性、刚度适配性)优于AM-25混合料,抗低温开裂性能得到显著优化。

表5显示,当应变控制水平设定为400 με时,合成级配混合料的疲劳寿命平均值为441 465次,AM-25混合料的疲劳寿命平均值为272 020次,即合成级配混合料初始模量平均值较AM-25混合料提高约3.81%,疲劳寿命平均值提高约62.29%。由此可见合成级配凭借骨架结构高效传递载荷、弱化应力集中的方式,延缓疲劳裂缝发展,使得疲劳寿命大幅提升。控制水平为600 με时,合成级配混合料初始模量平均值较AM-25混合料降低约8.64%,但疲劳寿命平均值达到162 015次,较AM-25混合料的73 205次提升约121.32%。然而初始模量下两种材料处于相近水平。不过疲劳寿命平均值大幅提高约121.32%。此外,合成级配混合料初始模量和AM-25混合料的初始模量相当。整体来看,合成级配混合料在疲劳寿命方面相比AM-25混合料优势显著,尽管在部分控制水平下初始模量有升有降,但疲劳寿命的提升更为突出。

5 结 语

为了解决沥青底面层抗弯拉疲劳应力的能力,本研究对增韧改性沥青混合料的级配设计优化,从低温抗裂与抗疲劳性能上进行研究。通过与普通级配AM-25制备得到的沥青混合料的对比发现,级配优化后的增韧改性沥青混合料的低温抗裂指标提升17.04%~202.78%、抗疲劳性能指标提高62%~121%。研究成果为提高沥青路面的耐久性和安全性提供了新的思路和方法,对未来沥青路面的建设和维护具有重要的指导意义。

参考文献:

[1] 王国卿. 国道养护大中修沥青路面病害处治探讨[J]. 交通世界, 2024(31): 63-65.

[2] 钟春晓. 道桥工程中路面病害类型及养护技术研究[J]. 运输经理世界, 2024(33): 124-126.

[3] 邓家喜, 张洪刚. 六宜路底面层沥青混合料组成优化设计分析[J]. 西部交通科技, 2013(7): 1-3; 22.

[4] 李剑. 基于分形理论对半刚性沥青路面层间接触状态及力学性能的分析[J]. 兰州工业学院学报, 2016, 23(6): 26-29.

[5] 陈小雪, 孙钢辉, 石颖. 纤维微表处混合料性能室内试验研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(12): 21-25.

[6] 弓锐. 稀浆封层混合料可拌和时间室内试验研究[J]. 公路, 2012(12): 5-9.

[7] 张宜洛. 抗滑级配类型沥青混合料的抗滑性能[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003, 23(1): 7-10.

[8] 傅栋梁, 钱振东. 不同级配类型沥青混合料抗剪性能研究[J]. 土

(下转第51页)