

湿热地区高速公路沥青混合料功能性设计

——以茂湛高速为例

李维杰¹, 李伟雄², 陈搏², 揭继兴²

(1. 广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广州 510440;

2. 广州肖宁道路工程技术研究事务所有限公司, 广州 510641)

摘要: 为指导湿热地区沥青混合料设计, 依托茂湛高速, 分析项目的气候条件, 梳理沥青路面功能需求, 最后推荐适用高湿热地区的混合料设计方案。研究表明, 优化设计后的骨架型 AC-20 与 SMA-13 沥青混合料, 70℃动稳定度可提升 40% 以上; 为提高沥青路面水稳定性, 推荐了适宜的目标空隙率和施工配比方案; 室内加速磨光试验表明, SMA-13 混合料的抗滑耐久性性能优于 AC-16 混合料; 50# 硬质沥青混合料的动稳定度比 70# 沥青提升 150%, 具有更好的适应性与经济性。

关键词: 沥青路面; 湿热气候; 功能性; 骨架密实型; 硬质沥青

中图分类号: U416.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)22-0318-05

湿热气候环境下, 沥青路面容易出现高温车辙变形、浸水松散掉粒、坑槽、开裂等早期破坏, 尤其是重载作用下, 大幅缩短沥青路面的服役寿命, 导致道路资产价值的流失。基于环境特征开展沥青混合料功能性设计, 是解决湿热环境沥青路面应用问题的有效途径。沥青混合料的使用功能, 很大程度上由其矿料骨架级配设计与沥青胶结料效果决定^[1]。目前行业内较为通用的设计方案可分为经验法、体积法及力学设计法三类^[2,3]。我国现行的施工技术规范主要为经验设计法, 难以指导沥青混合料的功能性设计。

近年来, 业内研究者基于不同沥青路面的功能需求, 延伸出了较多独具特色的级配设计方法。刘朝晖等^[4]、邵广军等^[5]提出 SAC 矿料级配设计方法, 采用细集料与填料充满粗集料形成的骨架空隙中, 对混合料的抗车辙性能进行了改良。刘文建^[6]通过室内试验对比了 6 种沥青混合料路用性能, 发现密实-骨架型沥青混合料可以兼顾高温抗车辙性能和抗裂性能。李胜^[7]使用分形理论对沥青混合料矿料级配模拟解析, 提出粗集料、细集料分维数取值范围, 建立了矿料级配分形维数与路用性能影响的关联特征。范会斌和张倩^[8]提出沥青混

合料胶砂填充设计法, 使用界限粗集料骨架空隙率 (void in coarse aggregate, VCA) 对粗集料骨架进行沥青胶砂填充, 建立了建立混合料骨架结构行为和路面黏弹性能直接相关的矿料级配合成方法。蔡旭等^[9]采用数字图像处理技术识别混合料粗集料骨架特征, 测试不同参数下的动稳定度, 拟合估算建立了骨架特征参数与路用性能的关联特征模型。可以看出, 为适应不同地区的沥青路面设计要求, 经验法存在明显局限性, 而体积设计法具有良好的理论基础, 但是与路用性能缺乏关联, 能否在高湿热地区进行推广应用, 还需开展系统的研究。

为此, 本文依托广东省茂湛高速公路项目, 调研分析了项目所在地的温度和降雨分布情况, 梳理湿热地区高等级沥青路面结构的功能性需求, 并基于气候特性开展不同沥青层混合料的功能性设计研究, 最后推荐一种较适用湿热地区的沥青路面上、中、下层混合料设计方案, 可为类似项目应用提供参考借鉴。

1 工程概况

茂湛高速公路是沈阳至海口高速公路南部关键段落, 是国家“7918”高速公路宏观布局方案的重

收稿日期: 2024-07-05

作者简介: 李维杰(1978—), 男, 广东东莞人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为道路工程设计与施工管理; 李伟雄(1987—), 男, 广东湛江人, 博士, 正高级工程师, 研究方向为路面工程设计与建设管理; 陈搏(1999—), 男, 广东湛江人, 工程师, 研究方向为路面工程设计与施工管理; 揭继兴(1997—), 男, 湖南常德人, 助理工程师, 研究方向为沥青路面设计与施工技术。

要分段,是串联广东、广西、海南三地的运输主通道,也是畅通广东西部地区物资集散输往湾区的交通动脉。路线起点桩号为 K3362+105,终点桩号为 K3470+698,全长为 108.593 km,于 1999—2005 年分期建设完成通车。随着地区经济水平突飞猛进,原设计双向四车道道路已无法满足剧增车辆的通行需求,为此,项目改扩建迫在眉睫。根据力学验算,沥青路面扩建侧的沥青面层方案为 4 cm 改性沥青、SMA-13+6 cm 改性沥青、AC-20+8 cm 普通沥青、AC-20+14 cm 普通沥青 ATB-25。

2 项目区温度与降雨数据分析

2.1 温度分析

本项目沥青路面靠近茂名市化州市,对化州市 2021—2023 年气温月极端温度进行分析,如图 1 所示。

由图 1 可知,化州市月最高气温主要集中在 6—8 月,最高温度为 36℃,高温期持续 5~6 个月。低温季节主要分布于 12 月至次年 2 月,最低温度为 6℃,低温持续 2~3 个月。考虑到施工进度与典型气候的匹配,选取 2023 年 7 月 24 日(最高温度 36℃,最低温度 26℃)、2023 年 1 月 12 日(最高温度 18℃,最低温度 6℃)的实测数据作为高温期、低温期代表日,日气温变化规律如图 2 所示。

由图 2 可知,代表日的气温水平浮动大致符合正弦曲线,00:00—24:00,气温先降低后升高再降低,因此气温起伏可拟合为正弦函数计算规律,但是其升、降温过程并不严格对称,升温速率大于降温速率,日最低气温通常出现在 06:00,而最高气温通常集中于 15:00。温度对沥青混合料的车辙变形发展有极其重要的影响,根据已有研究,当温度超过 50℃时,沥青路面的车辙变形量发展更加明显而

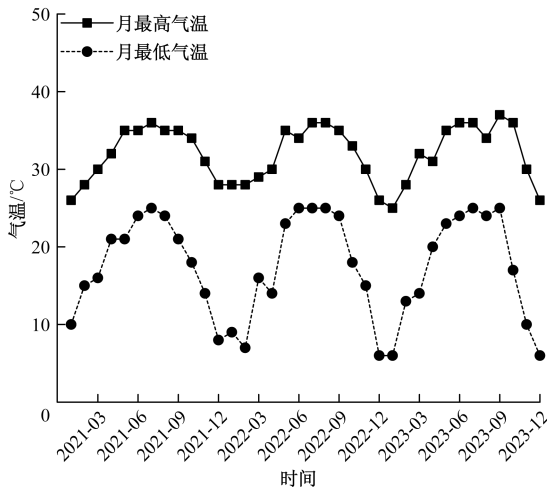


图 1 化州市 2021—2023 年气温变化

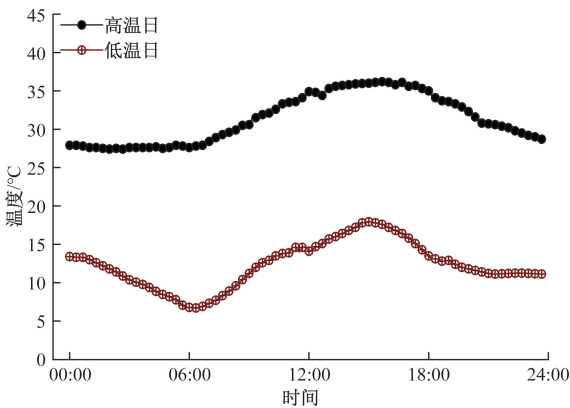


图 2 代表日的日气温变化规律

迅速。同时随着气温的攀升,沥青混合料压密变形阶段和变形稳定增长阶段时间缩短,路面失稳发生剪切破坏的时间大大提前。

2.2 降雨分析

对化州市 2021—2023 年月均降雨量进行分析(图 3)。由图 3 可知,当地的降雨主要集中在 5—11 月,呈现典型的单峰分布,其他月份的降雨量较低。多雨气候下的沥青路面水损害是常见的早期病害之一,水损害不仅会导致沥青混合料的掉粒、松散,进而发展为坑槽等明显损坏,而且极大地影响了路面的行驶安全性和舒适性,缩短了路面的服役期限。水损害的过程相当复杂,一方面水分会侵入沥青内部,破坏沥青与集料的黏附性;另一方面,动水压力冲刷会加速沥青膜的剥离。由于沥青与矿料的胶结是沥青混合料性能的基础,当它们发生剥离、流失时,整个结构的稳定性和强度都会受到严重损伤,骨料间的嵌挤连锁作用减弱,粘结失效,最终导致结构解体,产生松散、剥落等严重病害。

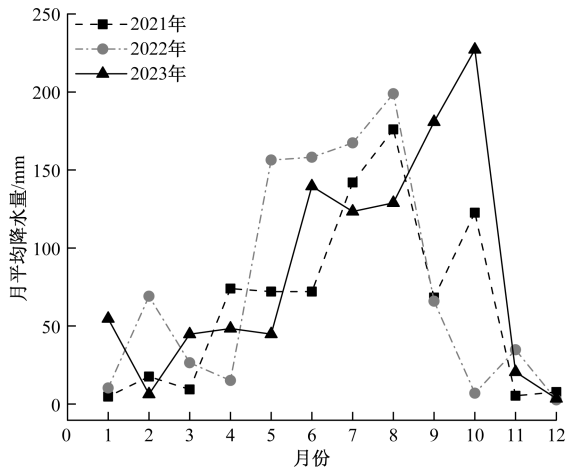


图 3 化州市 2021—2023 年降雨变化

3 湿热地区沥青混合料功能性设计

3.1 沥青混合料高温稳定性

依托项目所在地区高温情况突出,沥青路面表面温度最高可达 60 ℃ 以上故而需要混合料在高热环境下具备较佳的抗车辙表现。根据《沈阳至海口国家高速公路茂名至湛江段改扩建工程可行性研究报告》提供的预测交通量及交通量增长率,设计年限的交通量属于重载交通等级。因此,沥青路面需要具备高的抗永久变能力,在沥青路面结构中,上面层与中面层需要关注其抗车辙的性能要求^[10]。综上,在开展沥青混合料方案选择时,须充分考虑增强沥青面层的抗车辙能力。

南方高温地区密级配沥青混合料在密实的前提下更强调骨架结构的形成,采用较大比例的粗集料形成强骨架嵌挤状态,利于改善混合料的高温抗变形能力^[11]。根据极端高温(70 ℃)工况下的测试(图 4),强骨架的改进型沥青混合料的车辙动稳定度高于普通密实悬浮型 40% 以上。因此,茂湛高速的面层级配选型主要采用改进型密级配,各档集料范围如表 1 所示。

3.2 沥青混合料水稳定性

沥青混合料的水稳定性不佳将使得路面受水侵蚀产生病害,从而时沥青路面过早发生损坏,其破坏表现形式主要有网裂、唧浆、掉粒、松散及坑槽,它不仅导致了路表功能的降低,而且将大幅缩短路面的耐久性与服务年限^[12-13]。项目所在地区年均降雨天数达到 150 d 以上,长期降雨丰富的自

然特征使得沥青路面对水稳性需求很高。

项目沿线的集料主要为砂岩、花岗岩,均为典型酸性岩石,跟沥青之间的黏附能力不强,易于出现水损害。为改善路面的抗水损表现,应强化混合料的密实度及均匀性。相较于多孔结构,密实级配沥青混合料级配设计可提高抗水损能力。另外,路面施工的不均匀性导致的局部区域压实度不足、空隙率偏大是产生水损害的根本原因之一,路面摊铺时,公称粒径越大也易导致混合料出现更多离析。此外,为进一步改善混合料抗水损性能,中面层混合料设计目标空隙率宜为 4.5%~4.8%,上面层混合料宜为 3.8%~4.2%。所有的混合料设计中矿粉添加不宜低于设计范围的中值,以保证混合料的填充密实。大面积施工过程,应选择石灰岩矿粉,并加入 1.5% 的水泥替代部分矿粉,改善沥青与集料的粘附效果。

3.3 沥青混合料抗滑功能

随着时代的发展和人们对出行需求的升级,道路安全成为目前行业关注的重心,路面抗滑性能随之倍受关注。理论研究及工程实践表明,沥青路面抗滑性能需要重点关注两个方面:一是石料自身强度和车轮荷载作用下的耐磨光能力;二是由沥青混合料级配提供的路表轮廓构造形态及深度^[14-15]。耐磨光能力主要来自石料本身自然特性,如压碎值越高、细观纹理越丰富,对于提高和保证抗滑性能越有利等。对于路表轮廓构造形态及深度主要通过加强级配设计,在平衡水损害性能设计的同时,突出强调骨架嵌挤且稳定、适当增加粗集料用量,从而实现路面的大构造和使用期间保证构造持久。

现阶段关于抗滑层级配的情况是,为提高沥青路面抵抗水损坏的能力,保证磨耗层厚度与最大粒径的恰当比例。大量工程测试数据表明,工程中最常选用 AC 沥青路面在通车运营后,抗滑能力下降迅速。广东省的大多高速公路沥青路面在通车运营最初,其横向力系数可达 60 SFC,而在运营 3 年后,往往下降至 30~40 SFC,构造深度自 0.9 mm 下降至约 0.5 mm,部分路面衰减速度更快。由此可见,多雨地区沥青路面表面抗滑性能不够已成为

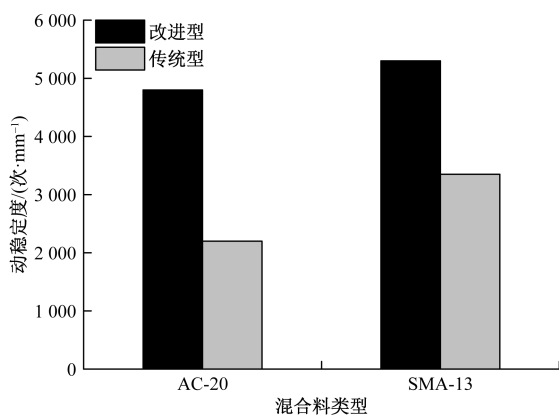


图 4 不同沥青混合料的动稳定度对比

表 1 改进型密级配沥青混合料级配范围

级配类型	通过下列筛孔的质量百分率/%											
	26.5 mm	19 mm	16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
AC-20	100	90~100	76~90	64~80	48~66	25~43	18~34	14~28	8~22	6~16	4~10	3~7
SMA-13	—	—	100	90~100	50~70	22~32	15~26	14~24	12~20	10~16	9~15	8~12

路面维修养护的主要原因之一。

对传统的 AC-16 沥青混合料与 SMA-13 混合料开展室内加速磨光试验,试验结果如图 5 所示。可以看出,AC-16 与 SMA-13 两种沥青混合料经过 0、2、4、6、8 h 轮碾后,测得的构造深度与摆值摩擦系数的变化趋势表明,混合料级配极大地影响了其抗滑能力。随着车轮作用,不论采用什么样的混合料,表面层抗滑能力衰减的趋势都很明显,因此在新建道路时,必须着重设计抗滑性能。SMA-13 相较于传统型 AC-16 级配粗集料比例高,材料相同时,构造深度大一些,抗滑性能更好。为此,华南地区的一些高速公路已经从传统的密实悬浮型 AC-16 混合料级配,改为骨架密实型 SMA-13 级配,取得良好的工程应用效果。

3.4 硬质沥青的应用可行性分析

沥青是决定沥青路面工程质量的最重要的工程材料之一,虽然沥青在路面材料中所占比例不大,但其全面而深刻地影响着沥青路面的使用性

能,同时也从根本原理上影响路面服役年限。有资料表明,即使在国外,车辙等高温损害类型也在路面大中修的原因中占 80% 左右的比例^[16]。因此,国际上使用沥青有向低稠度方向发展的趋势,如法国大量使用针入度 35/50 甚至更低标号的沥青,取得了很好的抗车辙效果。中国自 2001 年起开始进行硬质沥青的研究,其动稳定度比普通 70 号基质沥青提高 5 倍多,具有很好的高温稳定性^[17]。目前,福建、浙江、江西、湖南等南方地区,路面工程已经更多地选择硬质沥青。

广东省全年高温多雨,交通量大、货车重载和超载严重,车辙、拥包和推移等早期高温稳定性病害是现状道路的主要病害。同时,受限于改性沥青高成本,无法大面积使用改性沥青解决路面早期病害,而采用硬质沥青生产的高模量沥青混合料正好能够解决路面高温耐久性问题。另外,硬质沥青价格对于 70 号基质沥青以及 SBS 改性沥青较低,因此经济适用程度更好。同时,无需增加现场改性工序,减少关键控制环节,降低沥青混合料质量稳定性变异风险。采用 50 号硬质沥青进行 AC-25 与 ATB-25 沥青混合料配合比设计,测试动稳定度平均值为 4 462 次/mm,相比普通 70 号沥青混合料,高温性能提升了 150% 以上;而其水稳定性与普通 70 号沥青混合料相当,符合湿热地区对于混合料高温稳定性能的需求。

4 结论

(1) 提出强骨架改进型矿料级配设计 AC-20 与 SMA-13 沥青混合料,车辙板 70 °C 动稳定度指标比传统型混合料提升 40% 以上,更加适应广东省高温气候环境。

(2) 为提高沥青混合料水稳定性,中面层混合料设计目标空隙率宜为 4.5%~4.8%,上面层混合料宜为 3.8%~4.2%,添加部分水泥替代等重量矿粉,有助于改善大面积施工过程沥青与集料的黏附效果。

(3) 使用室内加速磨光试验模拟长期车辆荷载作用,骨架密实型 SMA-13 混合料的长期抗滑耐久性能优于传统 AC-16 混合料,可以改善多雨地区的行车安全性能。

(4) 综合考虑湿热气候与工程经济性,采用 50 号硬质沥青生产下面层沥青混合料,其水稳定性与普通 70 号沥青混合料相当,而动稳定度提升 150%,能够较好地适应湿热地区的高温稳定性能的需求。

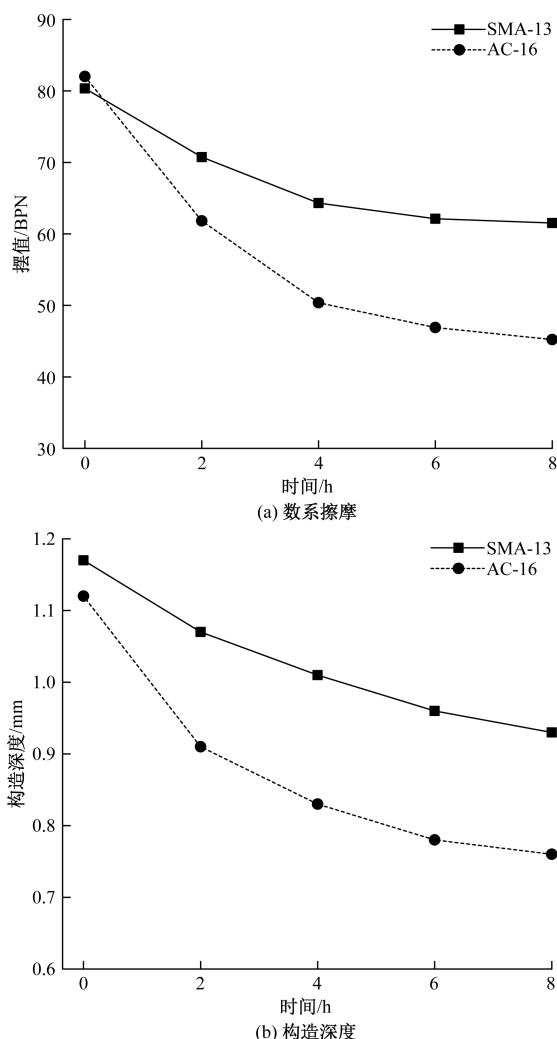


图 5 混合料级配类型影响抗滑性能

参考文献

- [1] 王佳妮, 高世杰, 董元帅, 等. 沥青混合料疲劳损伤试验表征综述[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(7): 2625-2637.
- [2] 宗海, 朱文白, 汪昊, 等. 基于三维细观空隙的超薄罩面层间洒布量设计与性能评价[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(36): 15627-15633.
- [3] 徐希忠, 韦金城, 张晓萌, 等. 基于力学响应的全厚式高模量沥青路面结构组合及优化[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(11): 4581-4587.
- [4] 刘朝晖, 谭炯, 沙庆林. 多碎石沥青混合料 SAC 路用性能[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2008(2): 9-13.
- [5] 邵广军, 张会建, 朱东鹏, 等. SAC 沥青路面在高原多年冻土区适应性试验研究[J]. 路基工程, 2019(1): 90-93.
- [6] 刘文建. 不同级配下面层沥青混合料综合性能对比[J]. 路基工程, 2022(6): 113-118.
- [7] 李胜. 沥青混合料级配分形分析与路用性能研究[J]. 公路与汽运, 2021(1): 59-62.
- [8] 范会斌, 张倩. 沥青混合料胶砂填充设计法[J]. 公路, 2020, 65(3): 275-278.
- [9] 蔡旭, 祝凤丹, 吴旷怀, 等. 沥青混合料骨架稳态参数及模型[J]. 中国公路学报, 2019, 32(2): 39-46.
- [10] 郑茂. 水-热作用下胶粉改性沥青汉堡车辙高温性能[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(6): 2477-2484.
- [11] 石立万, 王端宜. 基于数字图像处理的沥青混合料主骨架评价标准[J]. 中国公路学报, 2017, 30(5): 52-58.
- [12] 郝青, 周世康, 马浩, 等. 花岗岩沥青混合料水稳定性影响因素分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2023, 48(4): 847-856.
- [13] 李康建, 赵曜, 徐沅驰, 等. 水温冻融循环条件下多孔炉渣沥青混合料水稳定性性能衰减试验研究[J]. 科技通报, 2023, 39(7): 86-91.
- [14] 余苗, 曾俊森, 罗延生, 等. 基于室内磨耗试验的沥青表面纹理演化规律分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(12): 31-36.
- [15] 黄宏敏, 罗传熙, 黄志勇, 等. SMA 与 GAC 路面抗滑性能衰变规律[J]. 公路交通科技, 2023, 40(10): 27-34.
- [16] 束毅力, 田绍强, 张俊杰, 等. 非洲西部地区典型硬质沥青技术性能[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(1): 337-346.
- [17] 所怡. 50 号硬质沥青在海南省沥青路面中的应用研究[J]. 石油沥青, 2022, 36(4): 47-51.

Functional Design of Highway Asphalt Mixture in Hot and Humid Areas: A Case Study of Maozhan Expressway

LI Weijie¹, LI Weixiong², CHEN Bo², JIE Jixing²

(1. Guangdong Communication Planning and Design Institute Group Co. Ltd., Guangzhou 510440, China;

2. Xiaoning Institute of Roadway Engineering, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In order to provide guidance for the design of asphalt mixture in hot and humid areas, based on the Maozhan high-speed project, the climatic conditions of the project were analyzed, the functional requirements of asphalt pavement were sorted out, and the mixture design scheme for high hot and humid areas was recommended. The results show that after optimized design, the dynamic stability of skeleton-type AC-20 and SMA-13 asphalt mixture can be increased by more than 40% at 70 °C. In order to improve the water stability of asphalt pavement, the appropriate target voidage and construction ratio scheme are recommended. The indoor accelerated polishing test shows that the anti-skid durability of SMA-13 is better than that of AC-16. The dynamic stability of the mixture using 50# hard asphalt is 150% higher than that of 70# asphalt, which has better adaptability and economy.

Keywords: asphalt pavement; hot and humid climate; functionality; the skeleton dense type; hard grade asphalt