

改进型骨架密实下面层沥青混凝土在湿热地区的应用

卢旭¹, 吴延凯¹, 陈搏²

(1.保利长大工程有限公司, 广东 广州 510620; 2.广州肖宁道路工程技术研究事务所有限公司, 广东 广州 510641)

摘要:为提升华南地区沥青路面的抗水损性能与耐久性,采用改进型骨架密实沥青混凝土设计下面层结构。根据原材料的选择、目标配合比设计、生产配合比设计与验证,确定了优良的抗车辙、抗水损害、抗疲劳性能的混合料配比参数,介绍施工前的下封层、附属工程施工工艺与要点;对沥青混合料的拌和生产参数、运输料车的设置、混合料摊铺作业的机械参数设定、混合料碾压过程的方案对比以及施工温度动态监控进行明确;采用无核密度仪、三维探地雷达等无损技术手段评价沥青路面的施工离析、施工厚度均匀性。通过下面层的原材料控制、配合比设计、功能层与混合料施工等环节的精细化管理,可以明显提升沥青路面的平整度、压实度、厚度及其他路用性能,是一种较为经济有效的方式。

关键词: 沥青混凝土;骨架密实;配合比设计;施工工艺;精细化管理

中图分类号: U416.217

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)05-0174-06

0 引言

广东省地处东亚季风区,降雨较大(年均降水量1 300~2 500 mm),夏季平均气温28~29℃,且雨热同期。沥青路面在重载、湿热的荷载和气候环境条件下易发生开裂、车辙、坑槽及松散等病害,因此对沥青混凝土路面抗水损害性能、抗疲劳性能要求较高。GAC型沥青混凝土是基于AC型沥青混凝土的改进型,优化思路是将级配设计向骨架密实型调整并降低施工难度,使得成品沥青混凝土路面的抗车辙性能、抗疲劳性能、抗水损害性能大幅度提高,因而GAC型沥青混凝土近十年来在广东省及周边地区的沥青路面得到了广泛应用^[1-2]。

GAC-25C作为骨架密实型连续级配沥青下面层,其使用性能及寿命大幅受到混合料级配设计及施工工艺的影响,对施工过程的技术要求较高^[3-4]。已有研究表明,路面的病害相当大部分是由施工过程的原材料、摊铺、碾压等环节的执行效果不足导致,实质上可理解为工程实体与原设计存在局部的不符合性,文献^[5]基于最优尺度回归法和费效法对水稳结构施工质量进行统计分析^[5],发现精细化施工的性价比明显优于原材料性能控制。本研究依托广东省清云高速公路项目,对GAC-25C沥青下面

层施工的全过程施工环节进行监控,精细化调整各环节关键参数,最终使项目交工检测的结果达到省内优良水准。通过对本项目施工关键技术进行梳理,总结出一套科学的质量管控方案,以期向条件相似项目施工提供参考借鉴。

1 工程概况

依托广东省清云高速沥青路面施工项目,清云高速起点为清远市,终点为云浮市,是连接粤西、粤北与珠三角的快速通道。采用双向4车道设计,沥青路面结构组合为:4.5 cm GAC-16(上面层)+5.5 cm GAC-20C(中面层)+8 cm GAC-25(下面层),上、中面层使用SBS改性沥青,下面层使用70#基质沥青。

2 配合比设计

2.1 原材料

(1)沥青:下面层使用南粤物流有限公司所供应的壳牌A-70#基质沥青,自检、抽检及外委检测各性能指标均满足规范及设计文件要求,汇总主要性能参数见表1。

(2)集料:使用当地石场的10~25 mm、10~20 mm、5~10 mm、3~5 mm碎石和石灰岩岩性的0~3 mm机制砂,其表观干燥洁净、级配均匀,无超粒径及串料现象,各项性能指标均满足规范及设计文件要求,汇总主要性能指标见表2、表3。

(3)填料:采用石灰岩矿粉,各项性能指标均满足

收稿日期:2022-03-08

作者简介:卢旭(1991—),男,硕士,工程师,主要从事高速公路路面施工管理工作。

表 1 沥青性能指标

试验项目	技术要求	试验结果
针入度(25 ℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	60~70	66.0
软化点 TR&B/℃	≥47	48.0
延度(10 ℃,5 cm/min)/cm	≥15	31
延度(15 ℃,5 cm/min)/cm	≥100	>100
密度(25 ℃)/(g·cm ⁻³)	≥1.000	1.031
旋转薄膜加热试验残留物(163 ℃,85 min)		
质量变化 /%	±0.8	-0.002 0
残留延度(10 ℃,5 cm/min)/cm	≥6	6.4
残留针入度比(25 ℃)/%	≥61	74

表 2 粗集料性能指标

检验指标	设计 要求	试验结果			
		10~25	10~20	5~10	3~5
石料压碎值 /%	≤22	/	15.5	/	/
洛杉矶磨耗损失 /%	≤28	/	/	10.2	/
表观相对密度	≥2.60	2.735	2.732	2.732	2.736
吸水率 /%	≤2.5	0.32	0.29	0.31	0.49
针片状颗粒含量 /%	≤18	11.5	12.0	10.3	/
水洗法<0.075 mm 颗粒含量 /%	≤1.0	0.4	0.4	0.4	0.6

表 3 细集料性能指标

检验指标	设计要求	试验结果
表观相对密度	≥2.50	2.703
砂当量 /%	≥65	76

规范及设计文件要求,汇总主要性能指标见表 4。

表 4 矿粉性能指标

检验指标	设计要求	试验结果
表观相对密度	≥2.5	2.682
含水量 /%	≤1	0.6
0.6 mm	100	100
通过率 /%	0.15 mm	90~100
	0.075 mm	75~100
亲水系数	<1	0.50
塑性指数	<4	3
外观	无团粒结块	无团粒结块

2.2 目标配合比设计

2.2.1 矿料级配设计

广东省地处东亚季风区,降雨较大(年均降水量 1 300~2 500 mm),夏季平均气温 28~29℃,且雨热同期。因此,对沥青下面层开展目标配合比设计时,应优先考虑路面的抗疲劳性能、抗高温性能及抗水损害的能力。增加混合料中 4.5 mm 规格以上的集料

比例,可以使沥青混合料中的粗集料构成骨架嵌挤结构,从而改善下面层的抗疲劳性能;适当减少混合料中 19 mm 及 26.5 mm 规格以上的集料比例,可以改善沥青混合料的施工均匀性,更不易产生路面施工离析,从而提高抗水损害能力;适当减少混合料中 2.36~4.75 mm 规格的集料比例,以进一步增强粗集料骨架嵌挤结构;适当增加混合料中 1.18 mm 规格以下细集料的比例,以使骨架间的空隙被充分充填。根据华南地区已有项目及研究经验,确定以 4.0%~6.0%作为级配设计的目标空隙率。经试配,目标配合比矿料合成级配如图 1 所示,粗细骨料的关键筛孔 4.75 mm 通过率为 31.6%。

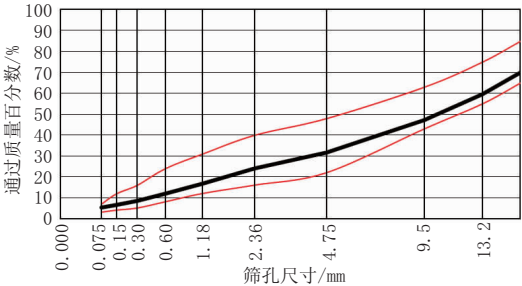


图 1 目标配合比级配曲线图

2.2.2 沥青混合料性能试验结果

根据马歇尔配合比设计要求和规范中热拌沥青混合料配合比设计方法,确定最佳油石比为 3.9%,采用 GAC-25 沥青混合料目标配合比为:10~25 mm : 10~20 mm : 5~10 mm : 3~5 mm : 0~3 mm : 矿粉 : 水泥 =18 : 36 : 14 : 5 : 24 : 1.5 : 1.5。汇总混合料性能参数见表 5,可以看出,所设计的混合料体积指标和力学性能均满足要求。根据美国联邦公路总署(FHWA)和美国国家沥青路面协会(NAPA)对于骨架的评定标准,当混合料中粗集料骨架外的体积 VCA_{mix} 小于捣实状态下的粗集料骨架间隙率 VCA_{DRC} 时,则表明混合料形成骨架。根据实测结果发现, VCA_{mix} 为 37.2%,小于 VCA_{DRC} 的 37.8%,混合料骨架良好。

表 5 混合料性能测试结果

检测项目	指标要求	实测结果
空隙率 /%	4~6	4.0
矿料间隙率 /%	-	12.2
饱和度 /%	60~75	67.4
VCA_{mix} /%	-	37.2
VCA_{DRC} /%	-	37.8
稳定度 /kN	≥8.0	12.25
流值 /mm	1.5~4.0	3.36
残留稳定度 /%	≥80	92.4
60℃车辙动稳定度 /(次·mm ⁻¹)	≥1 500	2 229

2.3 生产配合比设计

热料仓集料粒径规格分别为 23~30 mm、12~23 mm、6~12 mm、3~6 mm 和 0~3 mm。进行下面层生产配合比设计,确定各材料的生产配合比(重量比)为:22~30 mm : 12~22 mm : 7~11 mm : 4~7 mm : 0~4 mm : 矿粉 : 水泥 = 16 : 35 : 16 : 4.5 : 25 : 2 : 1.5。

3 施工过程质量控制

3.1 施工准备

3.1.1 下承层界面处理

首先安排水车对试验段下承层上的树叶、灰尘等杂物进行冲洗,确保下承层洁净、无污染;然后采用森林灭火器及扫把清洁工作界面,保证路表无积水;最后对即将施工的工作面做好交通围闭,禁止往来车辆带来的污染。

3.1.2 构造物相交部位处理

对同步碎石下封层喷洒作业面以外部位(路缘石、护栏等构造物),均采用塑料薄膜进行覆盖防护,避免沥青喷洒时造成污染。

施工前应完成对中央分隔带的填土填铺与路肩培土绿化;路缘石与急流槽采用喇叭口顺接,减少路表水流对边坡的冲刷与积水问题。

3.1.3 同步碎石封层施工

同步碎石封层主要设置在沥青下面层与水稳基层之间,起到防水以及提高面层的整体强度的作用。同步碎石下封层所撒布碎石采用沥青面层 4.75~9.5 mm 档集料,所喷洒沥青使用 SBS 改性热沥青。其相关工艺参数见表 6。

表 6 沥青喷洒工艺参数

结构层	设备	工作宽度 /m	工作速度 / (km·h ⁻¹)	单机工效 (8 h)/m ³
封层	同步碎石封层撒布车	4.0	6	12 000

在同步碎石下封层撒布前采用铁盘法承接并对盘中的沥青和碎石进行称重,以便对同步封层车进行计量标定和均匀性标定,试撒过程如图 2 所示,校核碎石覆盖率 60%~70%、沥青用量 1.4~1.6 kg/m² 后进行正式撒布。

3.1.4 其它附属工程施工

沥青喷洒设备沿道路方向纵向喷洒,相邻喷洒区域间搭接 0~5 cm。喷洒完成后对喷洒区域进行人工排查,对漏洒及边角位置进行人工补洒;对碎石撒布过多区域,采用吹风机配合人工清理多余碎石。

施工前摊铺路段须完成对中央分隔带的填土填



图 2 同步封层车试洒

铺与对路肩的培土绿化,路缘石与急流槽采用喇叭口顺接,施工前使用薄膜覆盖,以达到零污染施工条件,并对中央分隔带底部人工涂刷乳化沥青。

路面横坡下游一侧采用 10~20 mm 档位碎石设置碎石盲沟,并采用透水性土工布包裹。

须于沥青混合料摊铺前 24 h 完成下封层撒布,保证改性热沥青与瓜子石同时洒布,并严格控制撒布均匀性,使覆盖率控制在 60%~70%。

压路机组进场时,应对施工作业面起点前 20 m 范围内铺设彩条布,并在碾压前对压路设备仔细清洗,以免施工过程中因锈迹、污渍等污染碾压界面。

3.2 沥青混合料的拌和

拌合设备为安迈 4000 型间歇式沥青拌合楼,生产前须对拌合设备进行标定,设定沥青加热温度为 155~165 ℃,集料加热温度为 165~185 ℃,拌和后混合料出料温度达到 145~165 ℃。拌和工艺参数及关键控制要点:先向搅拌缸投入集料、粉料,干拌 5 s,再加入沥青湿拌 35 s;混合料出厂目标控制温度范围为 155~165 ℃;确保拌出的混合料均匀、无花白。

生产过程中,需根据计算机用料清单进行每小时产能和搅拌周期的统计,以评价拌和楼的生产稳定性。如图 3 所示,除了开机启动的 3:00—3:59、8:00—8:59 及收工的 12:00—12:06 时间段,其他连续生产时段的拌合楼产能基本稳定,接近设置产能。如图 4 所示,大部分批次的拌和周期在 65~70 s 范围,个别批次拌和周期达到 150 s 以上,结合现场情况,与该批次的等料、溢料及人工操作不连续有关。

3.3 混合料装载与运输

GAC-25C 混合料采用大吨位的车辆运输,根据生产运输匹配性计算,车辆数量为 13 台,满足生产需求。

从拌和楼向运料车装载混合料时,按“后、前、中”三次挪动汽车位置,实现“品”字形装料,可以减

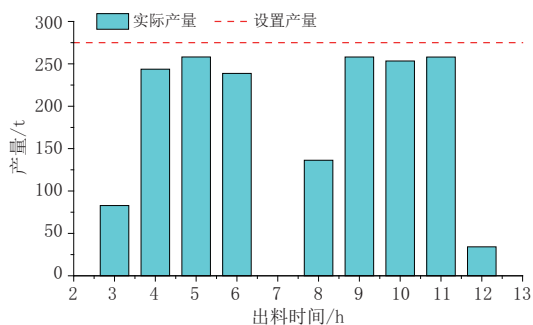


图3 拌和楼产能变化

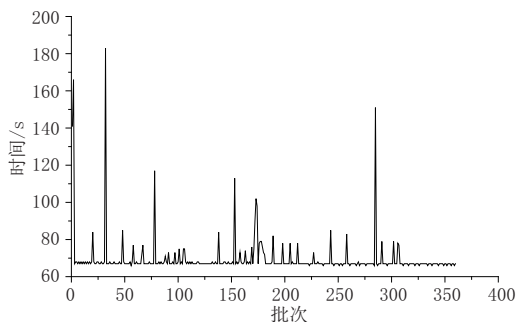


图4 搅拌时间周期变化

少粗细集料的离析现象。

运料车应采用厚苫布覆盖严密，苫布至少下挂到车厢板的一半，卸料过程中仍继续覆盖直到卸料结束；在气温较低时运料车车厢侧面应加装保温层，确保混合料温度稳定。

开工前对车辆进行集中清洗，将轮胎清洗干净，确保无泥土或油污。

卸料过程中，运料车在摊铺机前 10~30 cm 处停住，运料车不得撞击摊铺机。卸料过程中运料车应挂空档，靠摊铺机推动前进。

3.4 混合料的摊铺

试验段宽度为 11.5 m，为最大程度减少布料离析，现场采用 1 台福格勒摊铺机进行全宽铺筑。鉴于上基层平整度控制较好，平均为 1.52 mm，故采用非接触式平衡梁方式自动找平，GAC-25C 的松铺系数设定两端分别为 1.2、1.3。为精准确定 GAC-25C 改性沥青混合料碾压的松铺系数，施工过程中操作如下：

(1)在上基层取 13 个断面，右 3 m、右 10.8 m 测量相应的高程，做相应记录。

(2)在摊铺 GAC-25C 混合料时，量测已标记好的 13 断面对应位置点的高程，计算松铺厚度。

(3)采用相对标高法测试压实合格后的厚度，以确定实际松铺系数。

摊铺作业开始前 1 h，对熨平板采用电预热，确保开始摊铺作业时温度高于 100 ℃。摊铺过程中，须

将初始压实度控制在 85% 之上，将摊铺速度控制在 1.5~2 m/min，并使布料面连续、均匀。为了维持料位相对稳定，应合理调整螺旋布料器与料位器，使输料螺旋中的料位保持在 2/3 之上。

因在卸料结束时摊铺机中尾料往往含有较多粗集料，易使摊铺面产生离析，故应尽量减少收斗，且收斗后需等待新混合料进入料槽充分搅拌后再进行摊铺。

3.5 混合料的碾压

采用碾压设备 3 台宝马格双钢轮压路机与 3 台徐工胶轮压路机 + 小型压路机进行边部碾压，碾压技术要点如下。

(1)碾压过程遵循“紧跟、慢压、高频、低幅”原则。初压前静后振，尽快压实混合料，减少热量散失；复压采用搓揉压实形式，紧跟在初压后开始，碾压段的总长度控制在 50~80 m。

(2)钢轮压路机喷洒洁净自来水作为隔离剂，喷水量以使钢轮表面湿润不粘轮为准。

(3)轮胎压路机上装有自动涂油装置，在轮胎压路机碾压作业过程中对胶轮进行自动适量涂油（植物油：水 = 1：2），防止沥青混合料粘轮。禁止使用柴油、机油等作为压路机隔离剂。

(4)碾压程序完成后，压路机须停放在工作面以外，压路机不得在未碾压成型的路段上转向、调头、加水、停留、左右移动位置或突然刹车和从刚碾压完毕的路段进出。

(5)振动压路机在已成型的路面上行驶时关闭振动，压实成型的沥青面层待完全冷却，沥青混合料表面低于 50 ℃ 后才能开放交通。

在碾压的过程中，施工员应紧跟工作面，推荐采用无核密度仪监控技术进行碾压遍数的控制，对碾压不理想的位置，及时安排压路机补压。本项目采用两种不同碾压方案，详情见表 7、表 8。

第一种碾压方案为：双钢轮路机碾压 4 遍 + 胶轮压路机碾压 6 遍 + 双钢轮压路机静压 2 遍，在现场碾压过程中出现了过压（压实度均值 100.7%）、油脂上浮现象，摊铺机下料口位置尤其严重。经及时改变碾压方案，调整方案二为：双钢轮路机碾压 4 遍 + 胶轮压路机碾压 5 遍 + 双钢轮压路机静压 2 遍，后续施工压实效果良好（压实度均值 100%），不泛油，终压过后无轮迹，表面均匀。

3.6 施工过程温度控制

为精准把控施工全过程沥青混合料温度，以及

表 7 碾压方案一

碾压方案		初压	复压	终压(收迹)
方案 1 (①④ 段落)	设备	2 台双钢轮 压路机	2 台胶轮 压路机	1 台双钢轮 压路机
	碾压方式	静压 4 遍 (前静后振)	搓揉 6 遍	静压 2 遍

表 8 碾压方案二

碾压方案		初压	复压	终压(收迹)
方案 2 (②③ 段落)	设备	2 台双钢轮 压路机	2 台胶轮 压路机	1 台双钢轮 压路机
	碾压方式	静压 4 遍 (前静后振)	搓揉 5 遍	静压 2 遍

注:1.碾压过程中压路机 1 个来回定义为碾压 1 遍。
2.压路机初压复压碾压段为 50~80 m,终压段落控制为 80~150 m,前后两遍碾压区域重叠碾压宽度的 1/3。

时作出反应调整,本项目采用 FLIR 手持式红外热像仪进行全过程、大范围的温度监控。根据工程应用经验及 70# 基质沥青黏温特性,对各环节具体温度控制提出要求为^[6]:混合料到场温度控制在 150℃以上;料槽混合料温度控制在 155~160℃;摊铺后的混合料表面温度应处于 150~155℃;初压温度应处于 140~150℃,初压后表面温度应维持在约 130℃左右;复压温度在 130℃左右。开始终压温度应为 90~100℃,终压完成温度应在 80℃以上。

根据手持式红外热像设备测试温度,料车卸料时温度均匀性较好,如图 5 所示,试验段混合料到场温度为 152~155℃;料槽混合料温度约为 155℃;摊铺后的混合料表面温度为 150℃;初压温度为 145℃,初压后表面温度约 139℃;复压温度约 120~130℃;终压完成温度为 80℃,现场施工过程中混合料温度控制良好。

4 施工质量检测与评价

4.1 压实度检测

本次检测项目采用 PQI380 无核密度仪检测路面压实度,以 0.5 m 为间隔绘制全断面方格采集检测区域共 1 298 个测点数据,空隙率分布灰度图如图 6 所示。按空隙率的范围分为:细离析、非离析、中度粗离析、严重粗离析四种离析程度^[7]。检测区域非离析区域占比为 82.5%,严重离析区域仅占比 1.0%。综合现场情况,检测区域边部区域存在轻微粗离析现象,分析为摊铺机在布料过程中,粗集料在边部堆积,在碾压遍数一致的情况下,边部空隙率偏大;摊铺机搭接位置局部存在轻微粗离析现象;建议加强

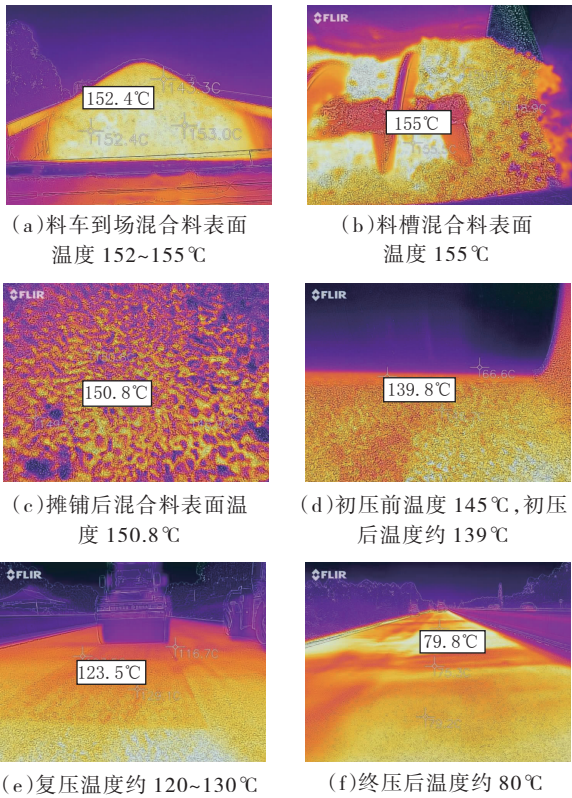


图 5 施工过程温度热成像测试

边部碾压控制及摊铺机搭接工艺的调整,安排专人进行离析处理;加强前后场沟通协调,前场摊铺速度应根据出料量进行适当调整,保证摊铺连续性,提高沥青下面层摊铺的均匀性。

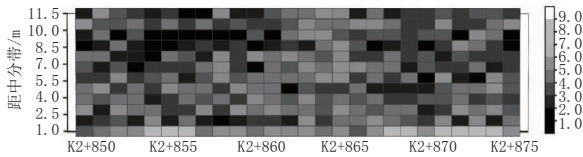


图 6 空隙率分布

4.2 雷达厚度检测

根据相关规范及设计文件要求,施工过程中每一层次厚度偏差值不超过设计值的 8%。本项目沥青下面层设计厚度为 8 cm,容许偏差为 0.64 cm。由于传统的钻芯取样方式对路面结构的破坏较大,容易产生较多的局部薄弱位置,故不宜大面积使用。近年来一种三维探地雷达技术发展较快,可以实现车道全断面的结构厚度无损探测。本项目采用 DXG 系列地面耦合天线阵向地下发送脉冲形式的高频电磁波,通过多测道往返测量得到全断面下面层厚度状况^[8],选取的检测段落长度为 240 m,共采集 82 400 个数据点,绘制厚度云图如图 7 所示。统计该路段厚度均值满足规范及设计要求,偏薄区域仅占比 4.3%,且偏薄区域多为小块分散分布,对后续使用性能及性能影响较小,可认为沥青下面层施工厚度均

匀性较好。

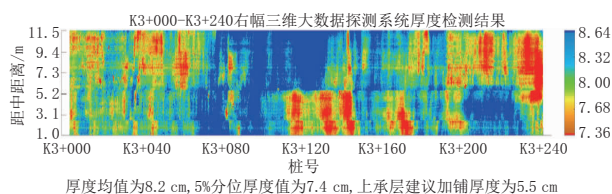


图7 施工厚度分布

4.3 其他路用性能指标

(1)渗水系数:对施工面层进行渗水检测,共检测8个断面,均值为16.0 mL/min,极值为100 mL/min,满足规范及设计不大于200 mL/min的要求。

(2)平整度:采用连续式平整度仪对施工面层进行测试,共检测16个区间,标准差最大值1.19 mm,最小值0.89 mm,平均值1.03 mm,合格率100%,满足规范及设计对下面层平整度标准差应小于1.5 mm的要求。

(3)弯沉:采用落锤式弯沉仪对施工面层进行弯沉测试,共测点41处,平均值为0.048 mm,标准差为0.01312 mm,代表值为0.105 mm,达到设计文件的要求。

(4)从芯样剖面(如图8所示)可明显看出,芙蓉段芯样主骨架嵌挤效果显著,主骨架主要由10~20、10~25规格粗集料构建,骨架稳定性更强,粗集料之间由沥青胶浆填充密实;此外,剖面感官上看,集料颜色与质地分布均匀。



图8 芯样图像

5 结论

(1)针对广东省湿热气候,设计了一种骨架密实

型沥青混合料,体积指标和力学指标均明显优于设计要求,且混合料中粗集料骨架外的体积 VCA_{mix} 小于捣实状态下的粗集料骨架间隙率 VCA_{DRC} ,混合料骨架嵌挤状态较好。

(2)施工准备阶段,分别对下承层界面、构造物相交部位、同步碎石封层施工、其它附属工程施工要点进行了总结,以减少沥青路面边界位置的薄弱点。

(3)施工过程中,首先对沥青混合料拌和生产过程的产能和搅拌周期变化监测技术,然后分别总结了混合料装载与运输、摊铺、碾压过程的控制要点,此外还对不同施工环节的温度采取了红外热像采集与监控。

(4)施工结束后,推荐采用无核密度检测技术进行沥青混合料空隙率分布的采集,以便评价施工离析并排查整改;推荐采用三维探地雷达的无损检测技术对沥青路面施工厚度信息进行探测,以实现全断面的施工厚度合格率的评价。

参考文献:

- [1] 刘宏. 广东省高速公路沥青路面结构使用性能调查与分析[D].广州:华南理工大学,2016.
- [2] 卜力平.骨架密实型沥青混合料实用设计方法[J].公路工程,2014,39(2):148-153.
- [3] 王斐,钮宏,田浩.骨架密实型沥青混合料的设计方法与配合比实验[J].公路工程,2017,42(5):227-232.
- [4] 彭浩,王福成,杨涛,等.矿料级配对沥青混合料路用性能影响的试验分析[J].公路工程,2013,38(2):36-39,64.
- [5] 赖智钦,熊春龙.基于最优尺度回归法和费效法的水泥稳定碎石结构施工标准[J].公路,2020,65(9):32-39.
- [6] 王璟,祖国家,杜华钊.新式组合式碾压工艺在低温条件下沥青路面施工中的应用[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(7):33-35.
- [7] 倪罗峰.沥青路面施工质量动态控制技术研究[J].黑龙江交通科技,2018,41(9):82,84.
- [8] 刘涛.基于无损检测方法的沥青路面介电特性与施工质量评价研究[D].广州:华南理工大学,2016.