

高速公路改扩建沥青混凝土路面面层大断面智能化无人摊铺施工技术

张方敏

中铁十局集团青岛工程有限公司 山东 青岛 266000

摘要: 本文以沥青混凝土路面智能化无人摊铺施工技术为研究对象,详细介绍了该技术的施工原理、施工特点、施工方法。研究成果对沥青混凝土路面施工具有重要意义,为实际应用提供有用的指导。

关键词: 沥青混凝土;智能化;无人摊铺;施工技术

1 引言

随着经济快速发展和城市化进程加速,早期建设的双向四车道高速公路已普遍超负荷,改扩建成为提升路网通行能力的关键途径,改扩建过程出现了断面形式多样、新旧路面衔接难、大断面摊铺质量控制难以及施工效率与成本的困境等各类技术难题,为解决京哈高速公路改扩建沥青路面大断面摊铺质量控制的难题,结合当前国家“十五五规划”的要求“坚持智能化、绿色化、融合化方向”发展,经过现场试验段反复试验、调配、碾压,兼顾施工技术的智能性和科学性、施工成本的适宜性,形成了高速公路改扩建沥青混凝土路面面层大断面智能化无人摊铺施工技术。

2 工程概况

京哈高速公路绥中(冀辽界)至盘锦段改扩建工程某标段全长21.10km。主要施工内容有:路基、路面、桥涵、公路沿线管理、养护及服务用房、交通安全设施、绿化等工程内容,其中主线路面结构形式为:路面结构层厚105cm;功能层为17cm级配碎石;水稳层3层厚度为60cm;沥青层厚28cm,功能层为4cmAC-10沥青混凝土、下面层为12cmATB-25厂拌热再生沥青混凝土、中面层为8cm高模量沥青混凝土AC-20、表面层为4cm改性沥青玛蹄脂碎石SMA-13,面层之间设置粘层,基层与沥青之间设置封层、透层。于2022年6月开工,于2024年10月完成路面工程摊铺^[1]。

3 施工原理

3.1 北斗差分定位技术实现设备的实时定位

沥青路面无人化集群主要由无人摊铺系统与无人驾驶碾压系统组成。两者均通过卫星定位及基站差分数据为机群精准提供平面坐标,北斗高精度定位通过地基、星基增强系统来补充实现,能够消除电离层误差、对流层误差、卫星轨道和钟差等误差。中下面层通过域激光发

射器引导高程,上面层通过非接触式平衡梁激光找平束自动找平。无人摊铺机通过雷达测厚系统、GNSS定位装置等设备,实现对摊铺厚度、边界等的精准控制;无人驾驶压路机则通过沥青压实雷达密度检测系统,实时反馈压实度,根据碾压界限云图自动分析碾压策略,实现零贴边碾压^[2]。

3.2 采用智能调度算法实现摊铺机群精准协作

智能调度算法是指一种能够高效协调和管理多个设备或任务的算法,通过任务的优先级、设备的能力和当前的施工需求,智能地分配任务给相应的设备。如在无人摊铺机群中,算法需要决定哪台设备负责摊铺,哪台设备负责压实,以及它们的先后顺序和时间安排。其次考虑机群设备的运动路径,确保设备在超宽路面上缓和启停,匀速行进,避免碰撞或偏离预定路径;同时持续监控设备的状态,如位置、速度、工作状态等,根据实时数据动态调整调度策略,以应对突发情况或变化的施工条件,再次协调不同设备之间的动作、调整速度、调整工作模式等,确保它们能够无缝协作,完成复杂的摊铺碾压。

通过北斗高精度定位与智能调度算法的深度融合,机群作业精度达到“厘米级”。

4 施工方法

4.1 施工准备、粘层洒布及基站搭建

施工准备需进行控制基站临时办公车搭建,基站安装固定,移动站校准即与控制点比对,定位误差,确保信号无遮挡;部署毫米波雷达、激光雷达、视觉摄像头等感知设备,实现设备间距离检测、障碍物识别、作业面状态监测;调试传感器数据融合算法,确保多源数据的同步性(时间差 $\leq 0.1s$),避免数据延迟导致的控制偏差

搭建5G+工业以太网双模通讯网络,确保设备间数据传输速率 $\geq 100Mbps$ 、延迟 $\leq 20ms$,在隧道、互通立

交等信号薄弱区域增设中继器；部署智能施工平台，实现设备状态实时监控（行驶速度、作业参数、故障报警）、施工数据实时上传（摊铺厚度、压实度、温度分布）、远程控制指令下发（紧急停机、参数调整）；

检查机群定位与导航系统、数据传输与监控系统、远程操控终端、碾压压实度检测模块系统等确认无误后进行机群空跑，空跑前需提前对拟空跑路段进行道路建模作业，进行联机调试，确保摊铺机与压路机的作业参数联动、数据互通。

选择合适沥青混凝土搅拌机组进行安装调试、进行计量系统标定、配合比调试及试拌，确保拌和设备的生产能力应与摊铺设备施工能力保持一致。同时，在沥青混凝土搅拌机组上安装数据采集终端，对沥青混合料拌和过程中用量、加热温度、级配、油石比、拌和时间等关键参数实时采集、传输、分析、预警、评价。

施工放样阶段需将施工路段的道路数据进行采集，并通过电脑编译成施工地图，由专业技术人员采用手持式打点器沿着拟施工路段边界进行采样，采样完成后通过电脑自动生成施工地图，作为后续摊压作业时设备的施工范围，可以更加精确的控制路面标高。

4.2 沥青混凝土拌和、运输

沥青混凝土应采用间歇式拌和机进行拌制，拌和机安装了全智能数字化智能拌和及称量监测系统，对沥青拌和站生产进行实时监控，要严格按照生产配合比进行上料、称量拌和等。

采用专门的自动同步添加装置，具备自动上料进入拌和锅、自动高精度计量等功能。冷料仓应加设挡隔板且装载机料斗的横向尺寸应小于冷料仓横向尺寸^[1]。

集料温度宜控制在200℃-220℃，混合料拌和前应于拌3-5锅集料并废弃，混合料的投料顺序依次是先将各种规格的集料放入搅拌器内于15s，然后加入沥青拌和40s，最后加入矿粉拌和均匀。每盘拌和时间不宜少于50s。同时混合料的贮存时间不宜超过6h。

每辆沥青混凝土运输车均安装了全自动数字化智能测温装置，全程实时监控沥青混凝土的温度是否满足出场及摊铺要求，随车填好出场单，出厂温度控制在175~185℃。

4.3 沥青混凝土的无人摊铺

无人摊铺施工需严格遵循“基准引领→设备协同→连续作业→动态调整”的流程逻辑，确保各环节无缝衔接，避免因流程中断导致质量缺陷。

沥青混凝土施工前检查所有无人机群的设备状态是否正常，摊铺机上安装了全自动数字化智能监测系统，

采用“GNSS/北斗+激光找平”复合基准，同时通过高精度定位板卡和温度传感器实时采集施工过程中的位置、速度和温度等关键指标，实现全过程的质量监测和智能预警。

摊铺机就位后，采用电加热的方式对熨平板预热，先预热0.5—1h，使熨平板的温度不低于100℃，调整好熨平板高度，使之与松铺厚度相等。振捣频率为40-60Hz，根据混合料类型调整，SMA型混合料采用高频低幅，AC型采用中频中幅，确保混合料压实度。

运输车辆通过GPS定位系统实时反馈到场位置，无人摊铺监控平台根据摊铺机料仓料位自动调度车辆卸料。

卸料时车辆与摊铺机保持同步行驶（速度偏差 $\leq \pm 0.5\text{m/min}$ ），采用“后翻式卸料”避免碰撞摊铺机，卸料时间控制在30-60秒/车，确保摊铺连续无中断。

摊铺速度控制：试验段工艺试验确定摊铺速度控制2-4m/min。系统采用“恒速控制模式”防止路面出现波浪纹或厚度不均；混合料供应充足时，优先采用中高速（3-4m/min）摊铺，提高施工效率；供应紧张时，最低速度不低于2m/min，避免摊铺面因速度过慢导致压实度不足。

松铺厚度与压实度控制：施工前通过试验段确定松铺系数（AC型沥青混合料1.15-1.25，SMA型1.25-1.35，OGF型1.30-1.35），试验段长度 $\geq 200\text{m}$ ，每20m检测松铺厚度与压实后厚度，计算平均系数。无人系统中输入松铺系数后，根据设计压实厚度自动计算松铺厚度（松铺厚度=设计厚度 \times 松铺系数）。

摊铺机与压路机协同（预衔接控制）：提前在BIM模型中规划压路机作业轨迹，无人摊铺机实时向智能压路机传输摊铺轨迹、混合料温度数据。

基准系统实时监控：安排测量员每30分钟复核一次基准点稳定性，重点检查基站信号强度、基准线是否松动或移位；当监控平台显示定位误差超出阈值时，立即暂停施工，重新标定定位系统并复核基准参数，排除信号干扰、设备漂移等问题后再恢复作业。

摊铺过程动态调整即实时参数监控与修正。

摊铺时沥青混凝土温度不能低于170℃，无人摊铺机根据自动生成的施工地图，自动调整摊铺速度及厚度，确保摊铺速度和温度满足施工要求。

4.4 沥青混凝土的无人碾压

压路机群采用“北斗+RTK”双定位模式，静态定位精度 $\leq \pm 1\text{cm}$ ，动态定位精度 $\leq \pm 3\text{cm}$ ，提前完成施工区域基准站架设与信号测试，规避遮挡区域（如桥梁下方），构建施工路段三维模型，导入设计标高、横坡、压

实区域边界等参数,划分碾压分区,重叠宽度控制在10-20cm(钢轮)、30-50cm(胶轮)。

基于摊铺进度动态生成碾压路径,支持“先边后中、先低后高”的常规逻辑,及弯道、坡道等特殊路段的路径优化。打通摊铺机与压路机的数据链路,实时获取摊铺温度(初压 $\geq 155^{\circ}\text{C}$ 、复压 $\geq 150^{\circ}\text{C}$ 、终压 $\geq 120^{\circ}\text{C}$)、摊铺厚度等数据,触发碾压指令。

根据试验段工艺性试验确定碾压顺序为:双钢轮压路机A静压1遍——双钢轮压路机B振动1遍——轮胎压路机A碾压1遍——轮胎压路机B碾压1遍——双钢轮压路机A压路机振动1遍——双钢轮压路机B振动1遍——轮胎压路机A碾压1遍——轮胎压路机B碾压1遍——双钢轮压路机C静压1至两遍消除轮迹。

压实质量实时监测采用“压实度传感器+平整度检测仪”集成系统,实时采集压实度(采用雷达或电磁感应法,检测精度 $\pm 1\%$)、平整度数据,反馈至后台控制中心,形成实时质量曲线。



图1 沥青混凝土智能化初压

4.5 沥青混凝土的路面验收

待路面完全冷却后,按照规范验收要求进行对铺筑质量进行检测,检查验收沥青面层的各项质量指标,包括路面的厚度、压实度、平整度、渗水系数、弯沉、宽度、终断面高程、横坡度等质量指标。

整理施工过程中的所有数据,包括碾压路径轨迹、温度曲线、压实度数据、设备运行参数等,形成数字化验收档案,支持溯源查询。

4.6 施工接缝处理

横向施工缝全部采用平接缝,当碾压完毕后用3m直尺沿纵向位置,不得大于5mm,在摊铺段端部的直尺呈

悬臂状,已摊铺层与直尺脱离接触处定出接缝位置,用风镐凿毛处理。

下一次施工接缝时,将摊铺层锯切时留下的灰浆冲洗干净,涂抹改性乳化沥青,并将接头处预热,然后再摊铺,以便于新旧面的结合。

横向接缝的碾压先用双钢轮压路机进行横向压实,从先铺路面上跨缝逐渐移向新铺路段,伸入新铺层的宽度为10-15cm左右,然后每压一遍逐渐向新铺混合料移动20cm,直至全部在新铺路面上为止。改为纵向碾压时,以45度角斜向碾压,碾压完毕后沿行车方向进行碾压。禁止在横向接缝上垂直碾压,以免引起新旧层错台。

碾压完毕后,对平整度作专门测量,如不符合及时处理。保持接缝平整。相邻两幅及上下层的横向接缝均要错位1m以上。

4.7 开放交通及其它

热拌沥青混合料路面应待摊铺层完全自然冷却,混合料表面温度低于 50°C 后,方可开放交通。

5 应用效果

该技术有效解决了工期紧、劳动力不足、成本高、安全风险高、压实质量控制等技术难题,提高了施工效率和施工质量,改善了沥青混凝土各项路用性能,延长了沥青路面的使用寿命,降低了材料消耗和人工成本,缩短了施工工期,同时还推动了交通建设行业的智能化、绿色化转型。同时从沥青混凝土的拌合、试验检测、运输、无人摊铺、无人碾压等工序所用的施工机械设备均安装了全自动数字化智能监测系统,通过监测设备数据汇总,并将数据发送至监测系统平台,实时分析关键指标的波动情况,并对异常数据进行智能预警,全面掌控施工过程,保证了路面施工效率和施工质量,达到节能减排效果。

参考文献

- [1] 沥青路面无人化摊铺施工技术应用[J].交通科技与管理,2023.
- [2] 基于3D数字化自动摊铺控制系统的沥青混凝土路面应用研究[J].江西建材,2020.
- [3] 沥青混凝土路面3D智能摊铺应用研究[J].西部交通科技,2018.