

高原冻土区域沥青路面施工技术及其质量控制

文 / 杨 甄 中铁十五局集团第一工程有限公司

摘要：高原冻土区域的道路建设是我国基础设施发展中面临的重大技术挑战。这类地区不仅具有高海拔、低气压、高寒等自然环境特征，更因其独特的冻土地质条件，给沥青路面的施工和质量控制带来了前所未有的挑战。基于此，本文结合青海省道224多彩至扎青公路工程实验，探讨了高海拔、低温环境下沥青路面施工的关键技术要点和质量控制措施。通过分析工程地质条件、冻土分布特征及气候环境特征，提出了适应性路面结构设计方案和低温施工工艺，包括温度控制、摊铺技术、压实工艺和接缝处理等关键技术。同时，建立完善的质量控制体系，确保工程质量。以期采用针对性的施工技术和严格的质量控制措施，保证高原冻土区域沥青路面的施工质量和使用寿命。

关键词：高原冻土；沥青路面；施工技术；质量控制

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.05.049

引言

高原冻土区域道路建设面临着特殊的地质条件和环境挑战，其中沥青路面施工尤其困难，该类地区具有高海拔、低温、昼夜温差大等特点，同时冻土的热-力耦合效应对路面结构稳定性造成显著影响。传统的沥青路面施工技术在此类环境下往往难以满足工程要求，需要开发适应性强的施工技术和质量控制措施。

一、工程概况

本标段为省道224多彩至扎青公路工程DZ-SG2标段，位于青海省玉树州治多县与杂多县之间，海拔4610~5100m之间；起讫桩号：K66+200—K115+400，线路长49.2km，设计时速分别采用30km/h和40km/h两种，公路等级为三级公路，加铺沥青混凝土路面26.165km，其他未维持既有砂砾。一般路段（含少冰、多冰路段）加铺沥青混凝土面层和水稳基层；富冰、饱冰含土冰层冻土路段仍维持既有砂砾路面，对病害严重路段进行整治。

本次路面改造方案的制定充分考虑了路段实际使用状况、交通需求和工程造价等多方面因素，既确保道路整体通行质量，又体现因地制宜、经济合理的建设原则。

二、工程地质条件分析

（一）冻土分布特征

工程区域冻土发育普遍，根据地质勘察资料，冻土类型可分为少冰、多冰、富冰和饱和冰四种类型。其中，少冰和多冰冻土区域占比约65%，主要分布在坡地和台地区域，具有相对稳定的工程特性。富冰和饱和冰冻土区域主要分布在沟谷低洼处和阴坡地带，占比约35%，具有明显的热敏感性和不稳定性。活动层厚度随地形、植被覆盖度等因素变化，一般为2.5~3.5m。冻土温度在-0.5℃到-1.5℃之间，年变幅较小，但受全球气候变暖影响，存在退化趋势。这种复杂的冻土分布特征对路面结构设计和施工工艺提出了较高要求^[1]。

（二）气候环境特征

青南高原地区以治多县和杂多县为代表，具有典

型的高原半干旱气候特征。该区域气候寒冷，年均温在-1.8℃至0.18℃之间，极端最低气温可达-32℃，最高气温约20.7℃，日温差显著，最大可达36.8℃。地区年降水量在421~548mm之间，具有光照充足、太阳辐射强烈的特点，年日照时数达2575小时以上。气候呈现明显的冷暖两季特征，冷季长达8~9个月，暖季仅3~4个月，且无绝对无霜期。东部山区因地形起伏，还具有明显的山地气候垂直带特征。

三、施工技术要点

（一）路面结构设计

改性沥青选用SBS改性沥青，提高了路面的低温抗裂性和高温稳定性。水泥稳定碎石基层采用高强度配合比，并掺入防裂纤维，提升整体承载能力。在富冰、饱和冰路段，考虑到冻土的不稳定性，维持原有砂砾路面，并采用土工格栅加强处理，以减少融沉变形。路面横坡采用2%，确保良好的排水效果。同时，在关键部位设置隔热层，减少路面结构对下伏冻土的扰动。在为解决多年冻土地区工程建设难题，项目经理部与石家庄铁道大学开展科研合作，开发一段40m的试验工点（图1），成功研发出将太阳能应用于冻土保护，系统由太阳能光储供电系统、地表热转化机组、地基制冷段和远程智能控制系统四大部分构成，能够全年不间断输出负温，实现对冻土温度的实时精确调控，有效防治地基融沉，为冻土地区工程建设提供了新的技术解决方案。



图1 试验工点

(二) 低温施工工艺

1. 温度控制措施

为确保改性沥青混合料的施工质量，建立了从生产、运输到施工的全过程温度控制体系。由于项目处于高海拔地区，温度比正常状态高于5℃左右。在混合料生产环节，由于项目处于高海拔地区，出厂温度控制在175-185℃之间，每车出厂前必须进行温度检测并记录。运输车辆采用双层保温篷布进行全覆盖，篷布要求完好无破损，并确保边角密封到位，防止温度损失。运输过程中要选择最优运输路线，缩短运输时间。施工现场的摊铺温度必须保持在165℃以上，碾压终止温度不得低于120℃。为应对温度波动，在施工现场配备移动式加热装置，可随时对摊铺机械刮板进行预热，保证摊铺设备始终处于适宜的工作温度。原材料储存采用标准保温仓库，配备温控系统，集料需进行预热处理，温度要求达到60℃以上，这样可以减少与热沥青混合时的温度损失^[2]。

此外，还应建立温度监测网络系统，在拌合站、运输车辆和施工现场设置多个温度检测点，实现温度数据的实时监控和预警。在寒冷天气施工时，施工人员可采用保温棚作业，并在摊铺机前方设置移动式热风机进行路面预热，提高基层温度。拌合站要配备智能温控系统，根据环境温度自动调节加热温度和时间，确保混合料的温度均匀性。运输车辆还应配备GPS定位和温度监测系统，实时掌握运输车辆位置和混合料温度变化情况，必要时启动应急预热设备。

2. 摊铺技术

改性沥青路面摊铺采用智能摊铺机配合高精度控制系统进行施工，以确保路面的平整度和均匀性。摊铺机配备全自动找平装置和智能测温系统，可实现精确控制，摊铺机的行进速度严格控制在1~3m/min之间，且要保持匀速施工，避免忽快忽慢造成离析。摊铺前必须对熨平板进行充分预热，预热温度不得低于120℃，整个施工过程中采用恒温控制系统实时监控温度变化。在急弯段和陡坡段等特殊路段施工时，需要适当降低摊铺速度，并增加人工找平频次，确保路面平整度。环境气温低于5℃时不得施工，但任何情况下改性沥青混合料都不得超过195℃，以防止沥青老化。遇到雨雪天气时，必须停止摊铺作业，已摊铺的路面要采取防雨措施。

3. 压实工艺

高原冻土区域改性沥青混合料的压实工艺是确保路面质量的关键环节，由于高原地区气温低、昼夜温差大，施工人员要严格控制压实温度。改性沥青混合料初压温度不得低于150℃，复压温度不低于140℃，终压温度不得低于110℃。为确保温度要求，采用“快速压实”策略，配备3-4台压路机梯队作业，缩短降温时间。同时，科学调整压实工艺参数。初压采用12吨以上双钢轮压路机，静压2遍，不得振动，防止混合料

表 1 改性沥青路面摊铺施工主要技术参数表

项目	参数要求
摊铺速度	1 ~ 3m/min
熨平板预热温度	≥ 120℃
标准摊铺宽度	7.5m
相邻车道摊铺时间间隔	≤ 2h
低温摊铺温度调整	+10-15℃
最高摊铺温度	≤ 195℃
最低施工气温	≥ 5℃
横向接缝坡度	45°

推移；复压采用重型轮胎压路机，碾压4-6遍，确保压实均匀；终压使用双钢轮压路机，碾压2-3遍，消除痕迹。在低温环境下，应增加1-2遍碾压遍数，并适当降低压路机速度，确保压实效果。同时，要求一次摊铺宽度不超过7.5m，避免混合料温度不均匀。

4. 接缝处理

在路面施工过程中，接缝的处理质量直接影响路面使用性能和使用寿命。沥青路面的施工必须接缝紧密、连接平顺，不得产生明显的接缝离析。上下层的横向接缝错位1m以上。横向接缝应采用垂直的平接缝，平接缝采用切割机在铺设当天混合料冷却但尚未结硬时垂直切除端部层厚不足部分，使工作缝成直角连接。切割不得损伤下层路面。切割时留下的泥水必须冲洗干净，待干燥后涂刷粘层油。同时，涂刷时注意用量适中，既要确保黏结性能，又要防止过量导致泛油。施工时应控制切缝面的垂直度，偏差不得超过3度。铺筑新混合料接头应使接茬软化，压路机先进行横向碾压，再纵向碾压成为一体，充分压实，连接平顺。接缝施工应用3m直尺检查，确保平整度符合要求。切除后用高压风枪彻底清理切缝处的灰尘、杂物，确保结合面清洁。随后均匀涂刷足量乳化沥青，涂刷宽度要超出切缝边缘2—3cm。在接缝处预先铺设玻纤格栅，可以显著提高路面的抗裂性能，格栅铺设应平整，不得出现褶皱^[3]。

四、质量控制措施

(一) 路面基层温度与材料控制措施

在高原冻土区域进行沥青路面施工时，基层温度控制至关重要，施工人员应在施工前使用红外测温仪对基层温度进行全面检测，确保基层温度不低于5℃，为应对温度骤变的影响，可采用保温材料对基层进行覆盖保护。施工过程中，要求运输车辆必须配备保温车厢，并使用专用保温布覆盖，确保混合料运达现场时的温度不低于规定值。还应建立完善的温度监测记录制度，实时记录基层温度、混合料温度等关键数据，为质量控制提供依据。

为加强全过程质量管理，施工单位可建立“进场检验-过程控制-成品检验”的三级管理体系。为确保沥青路面工程质量，施工单位要建立严格完善的原材料检验

制度，如本项目中工程所需的水泥、钢材、木材等外购材料，必须经过规范化检验并取得合格报告后方可用于生产。如改性沥青作为关键原材料，需进行全面的性能检测，包括针入度、软化点、延度等常规指标，同时还要进行DSR流变性能测试以评估其高温稳定性。考虑高原环境的特殊性，对改性沥青性能指标提出更高要求，如软化点在常规基础上提高5℃，延度增加10cm，确保其在极端环境下的适应性。在集料质量控制方面，要严格执行进场检验制度，每批集料须进行级配分析、压碎值、磨耗值、针片状含量等项目检测。矿粉作为重要的填充料，除了常规的细度、亲水性检测外，还需增加比表面积、密度等指标的检测，并建立原材料追溯档案。现场可设置标准化试验室，配备高精度检测设备，包括沥青针入度仪、软化点测定仪、马歇尔试验仪、筛分振荡筛机等，并定期进行设备校准。试验室实行见证取样制度，所有检测过程必须有见证人在场，检测数据要求及时、准确、完整，发现任何异常及时反馈和处理，确保检测数据的可靠性。

（二）路面施工过程控制

为实现全过程质量控制，项目部建立以项目经理为第一责任人的质量管理组织机构，设立专职质量管理员，各工序配备专职质检员，形成横向到边、纵向到底的质量管理网络。本工程施工中，项目经理部将从施工布置、施工组织、施工程序安排、施工通风、施工排水、施工设备配置、施工工艺等多方面充分体现环保和文明施工目标。在配合比设计环节，按GTM设计法进行并通过马歇尔试验法进行对比验证，通过高温性能检测、水稳定性检测、低温抗裂性能检测等试验评估混合料的性能。要充分确定集料、沥青和空隙的比例，防止疲劳开裂、低温开裂、老化、水损害，提高抗滑能力、施工和易性以及其经济性。如对冬季温度低、且低温持续时间长的高原地区道路及更次等级道路宜选用细型密级配沥青混合料（AC-型），并取较低的设计空隙率。配合比确定后，进行生产配合比的验证，确保其在规模化生产中的适用性。针对高原特殊路段，如大交通流量路段、陡坡段等，适当提高混合料性能指标要求。摊铺施工过程中，可采用激光测平仪进行实时监测，确保路面平整度达标。横坡采用水准仪进行抽检，纵坡需采用全站仪进行测量。压实度检测采用核子密度仪，检测点布设科学合理，每100m路面不少于3个检测点，重点路段和特殊部位适当增加检测密度。同时，建立质量问题快速响应机制，发现质量问题后2小时内提出处理方案，24小时内完成整改。施工现场要设置质量管理看板，实时更新施工质量数据，完善质量管理台账，记录各项检测数据、巡查记录、问题整改等信息，做到质量全过程可追溯。

（三）特殊环境应对措施

针对高原地区气候多变、空气稀薄、温差大等特

点，项目部制定了“预防为主、监测预警、快速响应”的质量管理策略。如建立气象监测预警系统，配备专业气象监测设备，实时监测气温、风速、降水等天气要素，根据监测数据及时调整施工计划。当风速超过6级时，需增设移动式挡风设施；风速达到8级以上时，必须暂停施工作业。在低温环境下施工时，需要将改性沥青出厂温度提高10-15℃（通常在165-185℃），低温环境时提高到185-195℃。以确保运输和施工过程中沥青能保持适当的工作温度。为应对雨雪天气，编制了详细的应急预案，配备足够数量的防雨布和保温材料，一旦出现降水，立即对已摊铺路面进行覆盖保护。针对高原环境特点，要对施工机械设备进行专门改装：发动机功率提升15%~20%，改装液压系统的密封装置，更换耐低温润滑油，增加零部件强度。考虑到材料运输距离长的实际情况，可采用分段运输方式，每200km设置一个保温中转站，配备加热设施，确保混合料温度符合要求。

此外，加强施工人员的高原环境适应性培训，进场前必须进行体检和高原应急知识培训，现场配备医疗保障设施，包括氧气瓶、急救药品等，并与当地医疗机构建立应急联动机制。建立完善的通信系统，采用卫星电话作为备用通讯方式，确保通信畅通。施工单位要定期组织召开环境因素分析会议，研究气候变化规律，总结施工经验。根据不同季节特点，制定差异化的施工方案和质量控制措施，重点关注环境温度、风速对施工质量的影响，建立环境参数与施工参数的关联分析模型，指导施工过程优化。针对特殊天气，建立预案库，提高应急处置能力。

结束语

综上所述，通过对省道224多彩至扎青公路工程的实践，证明了项目部采取的措施能保证高原冻土区域沥青路面施工质量，但需要采取针对性的技术措施和严格的质量控制体系。研究表明，合理的路面结构设计、科学的施工工艺和完善的质量控制是确保工程质量的关键。同时，必须充分考虑高原环境特点，建立应对措施，确保施工安全和工程质量。本文的研究成果可为类似工程提供借鉴，但仍需要在实践中不断总结经验，完善技术措施，提高施工质量和效率。

参考文献

- [1] 甄玉超. 季冻区沥青混凝土路面施工技术[J]. 交通世界, 2021, (09): 114-115.
- [2] 马亚飞. 高原多年冻土地地区路基路面典型结构施工研究[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(06): 52-53.
- [3] 白玉芳. 高海拔冻土地地区沥青路面病害机理与防控措施研究[J]. 现代物业(中旬刊), 2020, (01): 207.
- [4] 辜瑞谊. 高原公路沥青路面施工质量的控制技术[J]. 中国建材科技, 2019, 28(06): 140-141.

作者简介：杨甄，1983-09-07，男，汉，陕西省山阳县，本科，工程师，研究方向：高原冻土区域沥青路面施工技术 & 质量控制。