

玉京山隧道施工组织动态管控研究

邓明高

(中铁五局集团有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 玉京山隧道是成贵铁路上一座单洞双线客运专线长大隧道, 穿越瓦斯突出煤层、巨型溶洞、岩溶发育、破碎富水及浅埋等多种不良地质, 周边环境复杂, 施工难度大, 安全风险高, 工期紧张。施工中, 通过对施工组织制约因素分析, 实施施工组织方案调整, 开展管控对策研究, 经攻坚克难, 安全完成了该隧道施工任务, 确保了全线按期开通运营, 可为类似工程提供参考。

关键词: 铁路隧道; 瓦斯突出; 穿越巨型溶洞; 反坡富水; 施工组织管理

中图分类号: U45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 05—0142—04

随着高速铁路建设纵深推进, 越来越多的长大复杂地质条件隧道不断出现。如何保证隧道安全按期建成, 对参建单位提出更高要求; 若施工组织不当, 将影响隧道如期建成, 甚至制约全线按期开通运营。本文结合玉京山隧道穿越煤系地层、岩溶发育、破碎富水等不良地质情况, 以及复杂的周边环境, 分析制约施工组织的主要因素, 阐述施工组织方案调整与施工组织管控对策, 望为今后类似长大复杂隧道施工组织提供有益参考。

1 工程概况

成贵铁路玉京山隧道为客运专线单洞双线隧道,

进口里程 D3K277+860, 出口里程 D1K284+164, 全长 6306m, 30‰单面上坡, 最大埋深约 350m。该隧道位于云南省威信县境内, 出口位于县城, 隧址区为中山地貌, 地质条件复杂多变, 穿越煤系地层、巨型溶洞、岩溶发育、破碎富水、浅埋等不良地质段落, 为极高风险隧道, 是全线重难点控制性工程。

为加快施工进度, 兼顾施工通风等问题, 结合地形、地质条件, 隧道采用“进口平导+中部(D3K280+700)横洞”的辅助坑道方案, 采取进口、横洞、出口 3 个工区组织施工, 设计指导性施工组织如下表 1 所示。

参考文献:

- [1] 金克帆, 王鸿东, 易宏, 等. 海上无人装备关键技术与智能演进展望 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13(6): 1-8.
- [2] 张晓东, 刘世亮, 刘宇, 等. 无人水面艇收放技术发展趋势探讨 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13(6): 50-57.
- [3] LIU L, WANG D, PENG Z H. State recovery and disturbance estimation of unmanned surface vehicles based on nonlinear extended state observers[J]. Ocean Engineering, 2019, 171: 625-632.
- [4] 柳晨光, 初秀民, 吴青, 等. USV 发展现状及展望 [J]. 中国造船, 2014, 55(4): 194-205.
- [5] 王伟嘉, 郑雅婷, 林国政, 等. 集群机器人研究综述 [J]. 机器人, 2020, 42(2): 232-256.
- [6] 秦梓荷. 水面无人艇运动控制及集群协调规划方法研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2018.
- [7] 张辰, 周乐来, 李贻斌. 多机器人协同导航技术综述

[J]. 无人系统技术, 2020, 3(02): 1-8.

- [8] 胡建章, 唐国元, 王建军, 等. 水面无人艇集群系统研究 [J]. 舰船科学技术, 2019, 41(4): 83-88.
- [9] 张崧, 刘淑华. 多机器人任务分配的研究与进展 [J]. 智能系统学报, 2008, 3(2): 115-120.
- [10] 郭今戈, 卫鸿婧. 集群无人机通信控制方式 [J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(11): 122-126.
- [11] Gazi V. Swarm aggregations using artificial potentials and sliding-mode control[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(6): 1208-1214.
- [12] 周卫东, 刘一萌, 查羊羊. 抗时滞无人艇编队队形控制及变换 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(11): 1865-1869.
- [13] Shen H, Hashimoto H, Matsuda A, et al. Automatic collision avoidance of multiple ships based on deep Q-learning[J]. Applied Ocean Research, 2019, 86: 268-288.

表1 玉京山隧道设计指导性施工组织简表

序号	工区	平导长(m)	横洞长(m)	正洞长(m)	正洞里程范围	运输方式	瓦斯工区情况	排水方式
1	进口工区	2665		2555	D3K277+960~D3K290+415	有轨运输	瓦斯突出	顺坡
2	横洞工区		1460	2210	D3K280+415~D3K282+625	无轨运输	低瓦斯	进口方向(285m): 反坡 出口方向(1925m): 顺坡
3	出口工区			1541	D3K282+625~D1K284+148	无轨运输	非瓦斯	反坡

受瓦斯突出煤层、有轨运输适应性差、岩溶发育、巨型溶洞、洞口房屋拆迁困难等多种不利因素影响,该隧道施工组织方案进行多次调整,并通过加强过程管控,实现了隧道节点工期目标,确保了全线按期开通运营。

2 隧道施工组织制约因素

玉京山隧道是一座集瓦斯突出、岩溶发育、破碎富水等多种复杂地质条件于一体的隧道,且周边环境复杂,经分析,主要存在以下制约施工组织的不利因素:

(1) 瓦斯突出。进口 D3K279+061 ~ D3K279+500 段隧道穿越二叠系龙潭组(P2l)含煤地层,可遇煤 11 ~ 31 层,煤层总厚度最大约 4 ~ 6m,部分煤层具有突出危险性。施工中,实测 C5 煤层具有突出危险性,其区域煤层瓦斯含量:平导范围 8.88 ~ 10.67m³/t,正洞范围 9.35 ~ 10.81m³/t,均超过《防突规定》判断突出的临界值 8m³/t。由于 C5 煤层为瓦斯突出煤层,故施工安全风险极高;因瓦斯防突施工具有不确定性,故进口工区工期风险亦高。

(2) 岩溶发育。原进口工区隧道 D3K279+515 ~ D3K280+310 段(长度 795m)岩溶强烈发育,调整施工区段后,横洞工区施工中于 D3K279+948 揭示一处巨型溶洞。该溶洞平面发育呈“蚕豆”形,沿隧道纵向发育最长约 93m,横向发育最宽约 230m;溶洞顶部呈穹窿状,其顶部与洞底基岩高差约 50m ~ 120m;溶洞底部堆积物厚约 30m ~ 90m,横向由右至左呈斜坡向下状;溶洞左侧坡脚发育一条暗河,河面宽 5 ~ 15m。隧道高悬于溶洞顶板附近,距离堆积物顶面约 40 ~ 45m。该溶洞空腔体积巨大,洞壁不稳定,水文地质条件复杂,处置方案研究时间长,施工安全风险极高,工期异常紧张。

(3) 涌(突)水、涌(突)泥风险。横洞工区隧道正洞穿越多段岩溶弱~中等发育地段的可溶岩与非可溶岩接触带,存在涌(突)水、涌(突)泥风险。施工中于 D3K281+700 揭示一处岩溶管道水。

(4) 富水反坡施工干扰大。出口工区穿越破碎富

水带,设计平常期涌水量 11276m³/d,雨季最大涌水量 22552m³/d,为反坡排水施工。

(5) 隧道出口位于威信县城,洞口附近房屋较多,拆迁困难。

3 隧道施工组织方案调整

为确保复杂地质长大隧道施工组织有序推进,在保证安全质量环保的前提下,合理划分施工区段,选择合适的施工方案,加强施工资源配置,严格现场施工组织管理,统筹安排、整体推进施工进度。施工中,按照“抓重点、克难点、保节点”的工作要求,定期分析施工组织推进情况,结合实际,及时进行任务调整、方案优化、资源配置、过程控制等动态管控。玉京山隧道施工组织方案调整主要情况如下:

(1) 进口工区有轨运输方式调整为无轨运输。由于场地限制,有轨运输车场布置困难,且有轨运输也无法避免开挖作业面的无轨机械作业等问题;而无轨运输较有轨运输对洞口施工场地要求低、施工组织灵活、有利于工期的保证,同时能有效解决台阶法开挖与有轨运输方式匹配条件差的困难。为提高玉京山隧道进口工区施工效率,确保施工安全,编制了无轨运输专项施工方案,采取无轨运输设备防爆改装和其他瓦斯防治措施,经专家论证、建设单位及上级主管部门批准后实施。

(2) 工区施工任务调整。由于进口为瓦斯突出工区,需通过具有突出危险性煤层,实施防突措施,对进度影响大,工期紧张。受 C5 煤层瓦斯抽排影响,进度严重滞后。为满足工期要求,经建设单位批准,进口与横洞工区分界里程由 D3K280+415 调整为 D3K279+600,并将横洞工区由低瓦斯工区调整为高瓦斯工区管理。

(3) 隧道穿越巨型溶洞处置方案。2016 年 7 月,横洞工区隧道正洞施工揭示巨型溶洞,其地质、水文、工程等条件极为复杂。经地质勘探、方案研究,2018 年 12 月底最终确定玉京山隧道穿越巨型溶洞的总体处置方案,即“暗河改道+溶洞回填+穹顶防护+回填体中暗挖隧道+桥梁跨越”。

(4) 出口工区进洞方案调整。隧道出口位于威信县城,洞口附近房屋较多,拆迁困难。为减少拆迁滞后对工期的不利影响,将出口工区由洞口 D1K284+164 进洞调整为浅埋明挖段 D3K283+800 ~ +850 进洞,实现

了尽早进洞施工目标。

4 隧道施工组织管控对策

为有效推进玉京山隧道施工组织,攻克施工难点,采取了如下管控对策:

(1) 隧道超前地质预报。玉京山隧道地质复杂多变,实施超前地质预报是进一步探明隧道地质条件的重要手段,也是做好方案优化、保障施工安全、质量和工期的基础,纳入施工工序管理。该隧道采用地质分析法、超前水平钻探、加深炮孔、TSP 隧道地震波反射法、地质雷达、红外探测等手段的综合预报。施工单位实施地质分析、超前水平钻探、加深炮孔,委托具有相关资质的第三方单位实施其他预报与综合预报分析。煤层段的超前地质预报、煤与瓦斯突出评价工作由被委托的煤科院负责实施,保证了预报、评价的准确性。建立超前预报工作信息管理平台,使预报工作与现场施工组织有效衔接,及时反馈预报成果,以便对不良地质段落制定有针对性的施工处理措施。如,在超前地质预报中发现 D3K281+700 处存在岩溶管道水,采取长距离钻孔排水消能,并按照“边探边掘”的原则,加强掘进工作面的加深炮孔工作,消除了开挖中的突水突泥风险。

(2) 瓦斯突出工区施工。进口工区隧道穿越煤层段长 439m,煤层具有突出危险性,是全线唯一瓦斯突出工区,需进行瓦斯防突,施工安全风险极高,工期具有不确定性。为提高施工效率,经比选论证,采用无轨运输方式。为避免因无轨运输设备产生的高温或火花引起瓦斯爆炸,借鉴西成铁路黄家梁隧道、渝黔铁路天坪隧道等无轨运输施工经验,对洞内施工机械设备进行防爆改装,包括挖掘机、装载机、自卸汽车、混凝土罐车、喷射混凝土机、混凝土输送泵、二衬台车等。机械设备改装包括对设备动力系统改装和电力系统改装,委托有资质的单位实施,通过政府监督部门验收且验收合格,满足 TB10120-2002《铁路瓦斯隧道技术规范》中“隧道内高瓦斯工区和瓦斯突出工区的电气设备与作业机械必须使用防爆型”要求才能投入使用。使用过程中,严格设备改装出厂合格证明控制、进场防爆性能测试验收、日常检查与维护管理,确保防爆性能可靠有效。

为确保玉京山隧道进口瓦斯突出工区施工安全,编制了揭煤防突专项施工、超前地质预报、施工通风、瓦

斯监测等方案和应急预案,采用“超前钻孔探瓦斯,昼夜监控测瓦斯,严控火源防瓦斯,加强通风治瓦斯”的综合防灾技术。除对无轨运输设备进行防爆改装外,还采取如下主要瓦斯防治措施:①对隧道通风、瓦斯监测、瓦斯防突、爆破作业等采用专业化班组作业;②洞内配置防爆型设备,电力供应和电气设备严格执行“三专两闭锁”和“MA”准入制度;③严格洞口 24 小时门禁管理,严禁火源进洞;④严格超前地质预报与瓦斯危险性评估工序管理;⑤采用双风机、双风管的压入式通风方案,保障不间断通风;⑥采用“瓦斯人工检测+瓦斯自动监控报警系统”的双监测机制;⑦采用水压爆破,使用煤矿许用炸药和雷管,煤层段采用洞外起爆;⑧洞内执行动火审批制度;⑨瓦斯突出煤层严格落实区域、局部两个“四位一体”防突措施,其中 C5 煤层区域防突措施为穿煤层钻孔预抽排瓦斯,局部防突措施为工作面钻孔自然排放瓦斯。

(3) 调整任务施工管控。受进口揭煤施工进度严重滞后影响,将横洞工区进口方向施工范围予以延长,并将横洞工区由低瓦斯工区调整为高瓦斯工区管理,洞内移动设备调整为防爆型设备,通风方案也进行同步调整。横洞工区巨型溶洞揭示后,为给地质勘探和现场处理提供作业条件,洞内增设一处辅助施工通道,并加快进口平导施工,使其尽早与溶洞大厅连通,于 2017 年 3 月实现贯通;在平导内增设一处横通道,于 D3K279+780 处迂回施工与溶洞相连的进口端隧道正洞。及时实施进口与横洞工区施工任务调整,为巨型溶洞发现及处理提前工期约 15 个月。进口与横洞工区贯通后,对隧道整体施工通风方案进行再次调整,并加强洞内作业区域的风速、风向、瓦斯浓度监测,建立瓦斯与风机管理联动机制,保证了施工期的有效通风。

(4) 隧道穿越巨型溶洞处置。玉京山隧道穿越巨型溶洞面临溶洞空腔巨大、洞壁不稳定、水文条件复杂、线路高悬于溶洞顶板附近等诸多困难,其处置方案复杂:①为溶洞地质勘探、暗河改移及溶洞回填,设置多条不同高程的施工辅助通道;②为避免暗河水对施工及运营产生不利影响,采用泄水洞对暗河水改道;③为提供隧道拱部开挖作业平台,消除后期溶洞壁不稳定等不利因素,采用隧道洞渣为主的填料对溶洞大厅进行满填;④为解决围岩永久稳定问题,对隧道拱部的溶洞顶板采用

“锚索-锚网喷钢纤维混凝土”综合防护；⑤考虑回填体的沉降不确定性，为避免运营期间发生无砟轨道线路沉降，采用桥梁跨越溶洞；⑥为避免溶洞顶板与回填体对桥梁线路造成运营安全影响，在回填体中设置隧道衬砌结构防护；⑦为保证运营期排水通畅，增设与洞外联通的排水通道。

从溶洞地质勘探到处置方案确定过程时间长，按照“边设计、边施工、边优化”的原则组织推进。通过开展专题技术研究，优化施工方案，强化现场施工组织，确保了项目安全、优质、按期完成。2018年12月底确定最终处置方案时，剩余回填体内暗挖隧道、跨越溶洞段197m长的现浇连续梁等工程未施工。为确保成贵铁路于2019年底全线建成运营，研究制定了“先桥梁支架现浇、后隧道二次衬砌”的桥隧综合施工方案。为解决回填体内432m²超大断面隧道开挖难题，缩短作业时间，对隧道两侧回填体进行深孔控域超前注浆加固，研发了“五台阶设钢管临时横撑”的隧道开挖支护工法，实现安全快速施工。为解决暗挖隧道二次衬砌与桥梁现浇的交叉施工干扰难题，运用BIM信息化技术，对施工工序进行模拟分析，发现了交叉作业工序相互碰撞问题，研制了隧道边墙二次衬砌内拉法加固模架体系、隧道拱部二次衬砌可移动支架模架体系，于2019年7月完成，实现了桥隧组合的高效施工。为解决沉降变形观测期不足问题，开展了溶洞处理段桥梁与隧道工程的变形观测与评估研究，采取加密变形观测点布置、加大观测频次，提早进行评估分析，为尽早施工无砟轨道创造了条件；通过对连续梁长期收缩徐变（1500d）计算分析，结合WJ-8B扣件轨下垫板可调范围，对连续梁主跨108m段上的WJ-8B扣件铺设进行优化调整，即施工时预先在轨下垫板下铺设5mm轨下微调垫板。经运营考验，线路未出现异常变化。

（5）出口反坡工区施工。受洞口房屋拆迁影响，出口工区调整为浅埋明挖段进洞。进洞前，先对地表自然水沟和既有乡村道路改移，避免自然水系和运输车辆对隧道施工造成影响。出口工区围岩破碎、裂隙水发育，采取“周边注浆为主、超前注浆为辅”的处理措施。为解决反坡富水的施工干扰难题，编制了反坡排水实施方案，采用梯级抽排水至洞外，即将仰拱端头临时集水井

内的水抽到相邻泵级站内、再由各泵级站抽排至洞外自然排水沟，实现了反坡富水段顺利施工。

5 结束语

（1）采取无轨运输设备防爆改造、瓦斯抽排等瓦斯防治措施，实现了瓦斯突出煤层段隧道施工安全。

（2）及时实施施工任务调整，提前揭示巨型溶洞，有利于缩短隧道总体工期。

（3）按照“边设计、边施工、边优化”原则，开展隧道穿越巨型溶洞处置专题研究，实现了高效施工。

综上所述，针对该隧道瓦斯突出、巨型溶洞、反坡富水等多种不良地质，以及复杂的周边环境，分析施工组织制约因素，实施方案调整，研究管控对策，严格动态管理，经攻坚克难，于2019年7月完成该隧道施工，确保了全线2019年底开通运营，可为类似工程提供参考。

参考文献：

- [1] 鲜国. 成兰铁路跃龙门隧道动态施工组织管理研究[J]. 隧道建设, 2020, 40(3): 452-463.
- [2] 邓明高. 巨型溶洞回填体内桥梁隧道高效施工技术[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(9): 105-108.
- [3] 邓明高. 大跨度铁路连续梁桥变形评估及无砟轨道设置优化[J]. 建筑工程技术与设计, 2021, 9(2): 114, 64.

