

# 昌宁隧道竖井辅助正洞施工技术研究

Research on Shaft-Assisted Construction Technology for Main Tunnel in Changning Tunnel

杨康, 刘渊, 刘能源, 钟华, 杨毅

(广西路桥工程集团有限公司, 南宁 530200)

**摘要:** 为探讨高速公路特长隧道竖井辅助正洞施工技术, 以昌宁隧道利用竖井辅助正洞施工的方案设计和工程实践为背景, 对竖井辅助正洞施工方案设计、竖井施工方法、竖井转正洞施工方法进行了研究, 结果表明: 复杂地质条件下特长公路隧道利用竖井进行辅助正洞施工是可行的; 竖井采用“正井法”开挖及模筑混凝土初期支护结构、横通道“大包法”转正洞可以安全高效地完成竖井开挖及转正洞施工; 昌宁隧道成功利用竖井辅助正洞施工, 充分验证了复杂地质条件下特长隧道利用竖井辅助正洞施工的技术可行性及经济适用性。成果可为相关工程提供参考。

**关键词:** 特长隧道; 竖井; 辅助施工; 正井法; 模筑混凝土初期支护; 大包法

**中图分类号:** U455.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249(2025)03-0140-05

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.03.025

YANG Kang, LIU Yuan, LIU Nengyuan, ZHONG Hua, YANG Yi

(1. Guangxi Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd., Nanning 530200, China)

**Abstract:** To explore the technology of using shaft to assist construction in super-long highway tunnel, the article makes a study on the project design, shaft construction method, construction of shaft to tunnel, and comes the following conclusions: It is feasible to use shafts to auxiliary main tunnel construction in extremely long highway tunnels under complex geological conditions. Using the "main shaft method" and the initial support structure of concrete, full-envelope construction method can safely and efficiently complete the excavation of shafts and the construction of turning tunnels. The successful use of shafts to assist in the construction of the main tunnel in Changning Tunnel has fully verified the technical feasibility and economic applicability of using vertical shafts to assist in the construction of the main tunnel in extremely long tunnels under complex geological conditions. The findings may serve as practical guidelines for similar engineering applications.

**Key words:** super-long tunnel; shaft; auxiliary construction; front well drill method; mode concrete initial support; full-envelope construction method

## 0 引言

随着我国高速公路不断向西南山区延伸与扩张, 隧道工程逐渐向“更长、更深”的方向发展, 而特长隧道施工仅依靠进出口两端掘进难以满足工期要求。为加快特长隧道施工进度, 可通过增设辅助坑道增加主隧道施工作业面。辅助施工坑道是人员、机械设备、材料进出的通道, 直接制约着隧道施工

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB22080020)。

作者简介: 杨康(1989—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 公路隧道施工技术管理工作。

通信作者: 刘能源(1995—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 隧道施工技术研发工作。

收稿日期: 2024-05-08

安全与效率，合理选择和设计辅助施工坑道是保证主隧道安全及高效施工的关键。公路特长隧道常用斜井作为辅助施工坑道，而竖井一般仅作为施工阶段或运营期间的通风设施，利用竖井作为辅助施工坑道的工程案例少，缺乏相关的技术积累，因此有必要开展竖井辅助隧道正洞施工的相关研究。

国内外学者针对特长隧道辅助施工问题，从辅助施工坑道的选择、辅助坑道的施工、辅助坑道转入隧道正洞以及机械设备配置等开展了大量研究。唐协等<sup>[1]</sup>依托米仓山隧道工程探讨了超长隧道利用辅助坑道施工总体方案的合理性，认为独头掘进大于 5 000 m 或者长度大于 10 000 m 的隧道有必要利用辅助坑道进行辅助施工；李春磊<sup>[2]</sup>认为山区隧道施工，无论铁路公路，只是隧道的正洞是单洞和双洞的区别，在正常进出洞口施工遇到困难后，选用辅助坑道施工方案是隧道施工的必然选择；杨书江<sup>[3]</sup>以地铁竖井施工为例，阐述了竖井锁口圈施工、井身施工、横通道施工等关键工序的施工要点；张宝联等<sup>[4]</sup>针对地铁工程中浅埋暗挖法竖井及横通道施工的重难点进行分析，提出了针对性的解决措施验证了浅埋暗挖法竖井施工工艺的可行性；尚秀云<sup>[5]</sup>、邓敦毅等<sup>[6]</sup>针对地铁工程中竖井横通道转正洞施工工艺进行了研究，提出了马头门进入正洞施工工艺；吴发展等<sup>[7]</sup>提出采用倒挂井壁法开挖与滑模衬砌技术，有效解决了围岩稳定、防水等级提升及施工效率优化等难题；丁张飞<sup>[8]</sup>研发的全断面竖井掘进机集开挖、出渣、支护于一体，显著提升浅竖井施工安全性与机械化水平；范先锋等<sup>[9]</sup>通过应用正井法施工技术，有效解决了小断面 L 型通风竖井与主隧道交叉施工的干扰问题；王宏伟<sup>[10]</sup>以某公路隧道为例，重点分析井筒钻爆、装岩提升、永久支护等关键技术，强调连接部位施工与壁后注浆对竖井整体质量的重要性；江俊杰<sup>[11]</sup>基于数值模拟，验证复合衬砌结合短段掘砌法在软弱围岩竖井中的适用性，发现围岩位移与应力随深度线性增长，支护结构受力满足设计要求；丁国斌<sup>[12]</sup>采用反井钻机正向扩挖法施工，通过优化导孔偏斜控制与滑模衬砌工艺，显著提升施工效率并降低成本；赵东平等<sup>[13]</sup>综述超深竖井井型设计、井壁压力理论与施工技术的研究进展，指出硬岩竖井理论与大断面设计仍是薄弱环

节，未来需发展机械化掘进技术；杨康<sup>[14]</sup>结合昌宁隧道案例，优化正井法工艺，采用模筑混凝土替代锚喷支护，并通过滑模同步施工二衬与中隔板，提升安全性与效率；李静<sup>[15]</sup>对比小导坑爬坡反护法与大包法，提出大包法通过复合初支与门框预加固直接破口施工，减少土体扰动并缩短工期，地表沉降控制更优。

综上，前人针对竖井的研究主要集中在竖井开挖、支护方法以及配套机械设备等方面，针对竖井转隧道正洞及辅助隧道正洞施工的研究成果较少，无法满足当前施工需求。以昌宁隧道竖井工程为背景，针对竖井辅助正洞施工总体方案设计、竖井开挖支护、竖井转横通道施工、横通道转隧道正洞施工开展研究，形成一套完整的竖井辅助隧道正洞施工技术，为同类型工程施工提供技术支撑。

## 1 工程概况

### 1.1 隧道工程概况

昌宁隧道是云南省昌宁至保山高速公路的控制性工程，左线长 5 454 m；右线长 5 429 m，最大埋深 406 m；根据地质调绘及钻孔揭露，隧道穿越主要地层为残破积层、英安岩、砂岩、砂岩夹砾岩、灰岩夹变质砂岩、变质砂岩夹片岩，围岩风化破碎严重，其中强风化岩占 76%，大变形段落占隧道总长的 70%，围岩等级以 V 级围岩为主（占比约 80%），隧道区断裂构造发育，穿越 F30、F32、F33 三条大断裂带。受水平构造应力影响剧烈，最大水平主应力达 18.8 MPa，围岩强度应力比小于 4，为高地应力隧道。

### 1.2 竖井工程概况

昌宁隧道竖井设置在隧道右洞 YK30 + 518 左侧 10 m 处，距离进口端 2 460 m，距离出口端 2 942 m，断面采用圆形断面，衬砌后内径 9.2 m，井深 253 m。竖井区地质为残坡积碎石土、强风化砂岩夹砾岩和中风化砂岩，围岩等级以 III 级围岩为主，具体围岩等级情况见表 1。竖井区地表水不发育，主要为雨季

表 1 竖井围岩等级情况表

Table 1 Grade of surrounding rock in the shaft		
昌宁隧道	竖井/m	比例/%
V 级围岩	15.0	5.90
IV 级围岩	32.5	12.80
III 级围岩	205.5	81.30

## 道桥技术

暂时性坡面片流、漫流,对竖井建设基本无影响,地下水为孔隙滞水、基岩裂隙水,地下水稳定水位埋深 185 m。井口区地形较平坦,靠近村道,附近有

县级道路通过,交通条件相对便利。昌宁隧道施工平面图如图 1 所示。

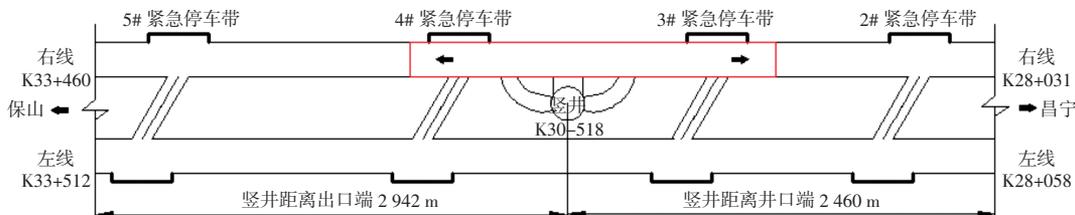


图 1 昌宁隧道施工平面图

Fig. 1 Construction plan of changning tunnel

## 2 竖井辅助正洞施工设计及施工方法

### 2.1 竖井转正洞施工方案设计

采用三台阶预留核心土法完成竖井转横通道马头门施工,然后施工横通道,横通道采用“大包法”直接转入正洞施工,最终完成竖井转正洞施工,竖井转隧道正洞施工原理如图 2 所示。

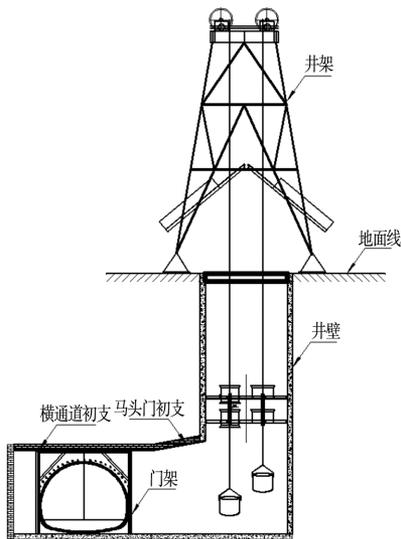


图 2 竖井转隧道正洞施工原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of construction principle for shaft to tunnel main tunnel

### 2.2 竖井施工方法

竖井作为辅助施工坑道,井底隧道正洞尚未施工,只能采用竖井正井法施工,井底增加横通道,形成材料、洞渣及人员的转运场所;根据辅助施工需求,对竖井施工阶段的提升系统、通风、排水、供水、供电、供料系统进行改造,当现场具备进洞条件后,利用横通道直接转入隧道正洞,开始辅助正洞施工。

### 2.3 锁口施工

自下而上绑扎锁口钢筋,并在第一段井壁内预埋钢筋,以保证井壁与锁口的连接,防止锁口发生“脱裤子”事故。采用组合式弧形金属模板砌筑井壁,模板背面设置横竖肋槽钢,提高模板整体刚度。锁口达到拆模养生强度后,及时在锁口背后设计范围内回填 M10 浆砌片石。

### 2.4 竖井初期支护

竖井采用正井法施工,开挖、初支由上往下施工到井底,完成井筒开挖后利用滑模由下往上施工二衬,为确保施工过程中安全,采用模筑混凝土初期支护。在无缝钢管内部设置缓冲装置,采用分灰器、活节管分层、对称浇筑初支,最大限度保障初支混凝土质量。

### 2.5 竖井转横通道施工

选择合适的施工工法对整个工程建设和竖井安全有着重大的意义。按照开挖方法划分,可将马头门施工分为:短进尺多台阶开挖、上下导洞开挖和全断面整体开挖。昌宁隧道竖井采用短进尺多台阶开挖方法,主要施工工艺流程为:破除马头门轮廓线上台阶范围竖井井壁混凝土→按照轮廓线进行上台阶(预留核心土)开挖支护→破除马头门轮廓线中台阶范围竖井井壁,按照轮廓线进行中台阶开挖支护→破除马头门轮廓线下台阶范围竖井井壁,按照轮廓线进行下台阶开挖支护→采用扣件式钢管+木模板组合施工二衬混凝土。

### 2.6 横通道施工

井筒落地后先施工通道 2,再分别施工通道 1 和通道 3(如图 3 所示);通道 2 作为后续转入正洞开挖的施工通道,通道 1 可作为临时存渣区以及机械设

备拼装区域，通道3可作为后续辅助施工期间材料运输通道。横通道开挖采用上下台阶开挖，横通道进入正洞前5 m范围内开始转换为三台阶开挖，确保横通道与正洞交叉口结构稳定。

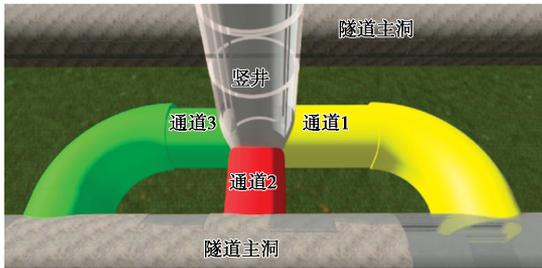


图3 横通道设计模型

Fig. 3 Design model of cross passage

## 2.7 横通道转正洞施工

横通道转入正洞为小断面转入大断面施工，施工难度大、工序转换繁杂、安全风险高，存在应力集中，结构稳定易受影响。常用的横通道转正洞施工方法有小导坑爬坡反扩转入正洞和大包法转正洞两种。昌宁隧道竖井横通道转正洞施工采用“大包法”转正洞，“大包法”是指横通道直边墙的设计高度大于隧道的开挖高度，横通道转正洞时能够在直边墙上破口完成正洞施工。

## 3 昌宁隧道竖井辅助正洞施工实施情况

### 3.1 变形情况监测

竖井监控量测点布设采用十字线法布设，如图4所示，采用数显收敛计量测，从支护结构施工完成即开始量测，10 d内每天测量一次。V级围岩布点断面间距为5 m，IV级围岩布点断面间距为10 m，III级围岩布点断面间距为15 m。变形监测结果显示，竖井井筒平均收敛速度为0.2 mm/d，累计最大收敛3.6 mm。

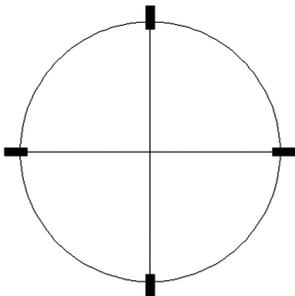


图4 井筒收敛测线布置图

Fig. 4 Shaft convergence monitoring line layout diagram

马头门周边位移、拱顶下沉监测点及测线布设方式为拱顶测点和两条水平测线、两条斜测线，如图5所示，布点断面间距为5 m，10 d内每天测量一次，出现变形异常时加大监测频率。变形监测结果显示，马头门1拱顶最大下沉量为205 mm，周边最大收敛量为142 mm；马头门2拱顶最大下沉量为210 mm，周边最大收敛量为202 mm；马头门3拱顶最大下沉量为204 mm，周边最大收敛量为168 mm。

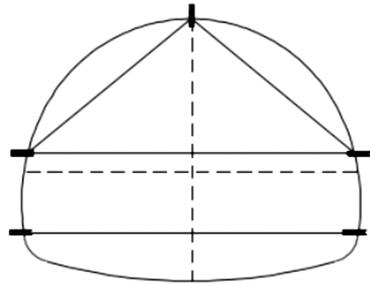


图5 马头门变形测线布置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of deformation monitoring line layout for shaft inset

竖井采用“正井法”开挖及模筑混凝土支护工艺，井筒周边围岩收敛量小，有效保障了井筒结构的稳定性。马头门采用三台阶法开挖，拱顶下沉及周边收敛量小，支护结构保持稳定，确保了竖井与正洞连接的“咽喉”部位结构安全。

### 3.2 竖井辅助正洞施工成效

受限于井筒直径、井底作业空间以及施工组织设计，昌宁隧道竖井只用于辅助右洞施工，竖井辅助施工段与进口端贯通后可采用车行横通道辅助左洞施工。昌宁隧道竖井自2019年2月27日开始施工，2019年10月27日完成井筒施工，2020年5月22日完成横通道转正洞施工，增加右洞正洞两个施工作业面（分别往进口和出口方向掘进）。右洞于2022年2月14日于进口端贯通，竖井累计辅助右洞施工1 209.4 m，节约右洞工期约16个月，为后续采用车行横通道辅助左洞施工创造有利施工条件，对昌宁隧道全线贯通及昌保高速全线通车起到了重要作用。

## 4 结论

特长隧道正洞地质条件复杂、施工进度缓慢，在工程造价、节约工期测算合理、施工技术可行的情况下，采用竖井进行辅助施工坑道以加快正洞施

## 道桥技术

工进度是可行的。

竖井辅助正洞施工的关键是竖井开挖及竖井转正洞施工。竖井采用“正井法”开挖以及模筑混凝土初期支护结构能有效保障井筒结构的稳定；竖井转正洞施工采用三台阶法转横通道、“大包法”转正洞施工工艺，可以安全、快速地完成竖井转正洞，为后续辅助正洞施工奠定基础。

昌宁隧道采用竖井辅助正洞施工节约工期约 16 个月，充分验证了复杂地质条件下特长隧道利用竖井辅助正洞施工的技术可行性及经济适用性。

## 参 考 文 献

- [1] 唐协, 林国进, 何佳, 等. 米仓山隧道利用通风井辅助施工方案设计与实践 [J]. 现代隧道技术, 2020, 57 (4): 12-19.
- [2] 李春磊. 浅谈辅助坑道在山区隧道施工中的应用 [J]. 中华建设, 2018 (4): 118-119.
- [3] 杨书江. 地铁隧道竖井施工技术 [J]. 隧道建设, 2004 (4): 24-26, 55.
- [4] 张宝联, 张旭, 闫向伟. 浅埋暗挖法竖井及横通道新工艺实践 [J]. 天津建设科技, 2008 (4): 54-56.
- [5] 尚秀云. 地铁区间暗挖段竖井和马头门进洞施工关键技术 [J]. 国防交通工程与技术, 2007 (3): 54-57.
- [6] 邓敦毅, 周艳芳. 竖井横通道转入隧道正线的施工关键技术 [J]. 铁道标准设计, 2006 (8): 58-60.
- [7] 吴发展, 刘远鹏, 王亚昭, 等. 浅埋特大断面隧道竖井施工技术 [J]. 低温建筑技术, 2022, 44 (11): 152-156.
- [8] 丁张飞. 全断面竖井掘进机关键技术 [J]. 建筑机械化, 2022, 43 (11): 11-15.
- [9] 范先锋, 王耀毅, 曹达政. 正井法在通风竖井施工技术应用 [J]. 云南水力发电, 2022, 38 (10): 140-143.
- [10] 王宏伟. 公路隧道竖井施工关键技术分析 [J]. 交通世界, 2022 (12): 54-55.
- [11] 江俊杰. 软弱围岩通风竖井开挖稳定性研究 [J]. 交通节能与环保, 2022, 18 (2): 124-129.
- [12] 丁国斌. 五老山长大隧道通风竖井施工技术研究 [J]. 工程建设与设计, 2022 (6): 158-161.
- [13] 赵东平, 吴楠, 李华, 等. 隧道超深竖井设计施工技术研究现状及展望 [J]. 铁道勘察, 2022, 48 (3): 10-16, 25.
- [14] 杨康. 山区高速公路大直径深竖井正井法施工技术研究 [J]. 西部交通科技, 2022 (2): 143-147.
- [15] 李静. 竖井横通道转正洞施工方案比选 [J]. 隧道建设, 2008 (4): 476-478.
- [16] 韩建军, 赵道松, 李建平. 基于 BP 神经网络的垃圾飞灰混凝土抗压强度预测模型 [J]. 混凝土, 2022 (9): 78-81.
- [17] 王晓明, 左文洲, 李长印, 等. 基于掘进试验和神经网络的渣土改良研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (5): 27-32.
- [18] 朱文邦, 郑秀梅, 杨增增, 等. 基于遗传算法优化 BP 神经网络的沙漠砂混凝土强度预测 [J]. 混凝土, 2024 (5): 48-51, 56.
- [19] NAJAFI Z, AHANGARI K. The prediction of concrete temperature during curing using regression and artificial neural network [J]. Journal of Engineering, 2013: 946829.
- [20] 许凯文. 基于遗传算法优化 BP 神经网络的深基坑地连墙变形预测 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (5): 6-11.

(上接第 139 页)