

隧道及地下工程竖井施工关键技术与适用性评价研究

徐海廷

中铁隧道勘察设计研究院有限公司 广东 广州 511400

摘要：竖井是隧道及地下工程中承担通风、排水、运输、勘探及安全救援的关键结构，其施工技术选型直接决定工程安全、效率与经济性。针对当前复杂地质、深部赋存、城市敏感环境下竖井施工面临的技术选择困难、机理认知不足、评价体系缺失等问题，本文系统梳理了隧道硬岩竖井与地下工程软土竖井两大类施工技术体系，综述钻爆法、反井法、全断面竖井掘进机（竖井TBM）法、沉井法、冻结法、注浆法及地下连续墙法的技术机理、工艺要点、适用范围与控制指标；构建了包含安全性、效率、经济性、地质适应性、环境影响的多维度量化评价体系。最后总结竖井施工面临的突水、坍塌、偏斜、冻胀融沉等核心风险与防控对策，展望智能掘进、实时监测、绿色施工、深部长寿命竖井等发展方向。研究成果可为隧道及地下工程竖井施工技术选型、方案优化与风险控制提供系统参考。

关键词：隧道工程；地下工程；竖井施工；施工技术；适用性评价；智能建造；风险控制

0 引言

随着我国交通、水利、市政及城市地下空间开发向深部化、复杂化、大型化发展，竖井已成为隧道与地下工程不可或缺的组成部分，广泛用于施工通风、排水降压、物料运输、应急救援及永久运营通道等，其施工穿越地层多变、赋存环境复杂、风险高度集中，突水涌泥、井壁坍塌、结构偏斜、周边环境变形等事故频发。国内外学者围绕竖井施工开展了大量研究。在硬岩竖井领域，钻爆法工艺优化、光面爆破参数、锚喷支护机理已形成成熟体系；反井法以施工安全、扰动小的优势在中深部稳定地层广泛应用；竖井TBM技术实现破岩、出渣、支护一体化，显著提升成井质量与效率。在软土富水竖井领域，沉井法、注浆加固、冻结止水、地下连续墙围护等形成了系列成套技术，可有效应对高水压、软弱地层、敏感环境等难题。如何根据特定工程的地质条件、环境限制及工期要求，科学选择竖井施工技术，成为确保工程质量、控制成本及规避安全隐患的核心环节。本文对隧道及地下工程竖井施工关键技术进行全面综述，建立适用性评价体系，总结核心风险与防控对策，展望未来发展趋势，为工程实践提供系统理论支撑^[1]。

1 竖井分类及工程特性

1.1 竖井分类

按使用功能分为：施工竖井、通风竖井、排水竖井、逃生竖井、勘探竖井；按地层条件分为：硬岩竖井、软土竖井、富水破碎地层竖井；按埋深分为：浅埋竖井（埋深<50m）、中埋竖井（50~200m）、深埋竖井（>200m）；按断面形式分为：圆形竖井、矩形竖井、马蹄形竖井。

1.2 核心工程特性

（1）空间约束强：断面狭小、作业高度大、垂直运输难度高；（2）地质风险高：易遭遇断层、富水带、软弱破碎围岩、高地应力；（3）环境敏感：城市区域需严格控制沉降、振动、噪声及地下水扰动；（4）工序耦合紧密：开挖、出渣、支护、止水、监测需高度协同^[2]。

2 硬岩隧道竖井施工关键技术

2.1 钻爆法

钻爆法是隧道竖井施工中应用最广泛的传统技术，适用于各类硬岩及中硬岩地层。核心机理：钻孔装药爆破破岩，分段开挖、及时支护。关键工艺：锁口圈施工→超前支护→掏槽孔与辅助孔布设→分段爆破→通风排险→出渣→锚喷网/钢拱架支护→循环施工。控制要点：单段最大装药量、循环进尺、围岩松动圈控制、超欠挖管理。优势：设备简单、适应性广、造价低；劣势：振动大、安全性一般、效率偏低。

2.2 反井法

反井法适用于中浅埋、地质相对稳定的竖井工程，具有效率高、扰动小的特点，适用于围岩整体性较好的中深部地层。核心机理：自上而下导孔钻进→自下而上扩孔开挖→渣石自重落渣。关键工艺：导孔精准定向→扩孔刀组选型→姿态控制→围岩支护。优势：安全性高、围岩扰动小、超挖量小、出渣便捷；劣势：设备门槛高、地质适应性有限^[3]。

2.3 全断面竖井掘进机（竖井TBM）法

竖井TBM法代表了竖井施工的机械化发展方向，特别适合长距离、硬岩、地质条件相对均匀的地层。核心机理：全断面机械破岩，连续掘进、同步出渣与支护。关键参数：刀盘推力、转速、贯入度、滚刀磨损、导向

精度。优势：成井质量高（超挖 < 1%）、掘进速度快（3 ~ 8m/d）、环境友好；劣势：设备投资高、地质突变适应性弱。

2.4 竖井支护技术选型

支护是竖井成型的最后一道安全屏障，常用形式及适用性对比见表1。

表1 隧道竖井常用支护形式及适用性对比

支护形式	核心机理	适用场景	优点	缺点
锚喷支护	锚杆锚固 + 喷射混凝土封闭	围岩较稳定、整体性好	及时性强、成本低、柔性好	对软弱地层适应性差
钢支撑支护	型钢框架提供刚性抗力	破碎围岩、大变形、临时支护	承载力高、架设快、可回收	占用空间大，成本较高
钢筋混凝土衬砌	整体式刚性结构	深埋、地质极差、永久结构	防水性好、强度高、寿命长	施工工序繁琐、工期长

3 软土及富水地下工程竖井施工关键技术

3.1 沉井法

沉井法利用井筒自重克服井壁摩阻力，实现下沉就位，分段制作、分段下沉、封底成井。适用于软土、砂土地层，浅 ~ 中埋竖井^[4]。

施工风险控制：

3.1.1 制作与下沉平衡：沉井制作需严格控制底板刚度，防止突沉；下沉过程中需实时监测姿态，通过调整挖土顺序（如空气幕减摩、射水助沉）来纠偏。

3.1.2 封底工艺：针对高地下水位，采用水下混凝土导管法封底，确保封底混凝土的密实度，防止渗漏。

优势：占地小、对环境影响小、结构整体性好；劣势：深度受限、易偏斜、工期较长。

3.2 冻结法

冻结法是解决富水软弱地层开挖的“终极手段”。适用于富水砂层、淤泥质黏土、流塑地层等高风险地层。

技术原理：通过制冷系统将地层孔隙水冻结成冰，形成高强度的冻结帷幕，隔绝地下水并提供临时支护抗力^[5]。

施工管理要点：

3.2.1 温度场控制：需连续监测冻结壁的平均温度，确保厚度满足设计要求（通常 > 1.5m）。

3.2.2 变形监测：冻结过程会产生地层冻胀，融沉过程会产生沉降。需对周边建筑物、管线进行严密监测，及时调整注浆参数。

优势：在地铁车站、越江隧道等复杂地段，能有效阻断涌水，确保施工安全；劣势：能耗高、周期长、冻融风险需控制。

3.3 注浆加固法

注浆法是通过物理化学手段改良地层性质。适用于软弱地层、破碎带、渗漏通道预处理。

核心机理：浆液填充、胶结、挤密地层，提高强度

与抗渗性^[6]。

工艺关键：

材料选择：软土地层常用水泥-水玻璃双液浆（快凝），砂层常用水泥浆（渗透）。

参数控制：注浆压力需控制在劈裂压力以内，避免压裂地层导致冒浆；注浆流量需与地层吸浆量匹配。

组合应用：单独注浆往往难以满足复杂需求，常与TBM法或沉井法结合，作为超前预支护手段。

3.4 地下连续墙法

地下连续墙作为深大竖井的围护结构，兼具承重与防水功能。适用于城市深大竖井、超敏感环境、高水土压力工况。

技术核心：

3.4.1 成槽精度：采用抓斗或铣刨机成槽，利用超声波测壁仪监控槽段垂直度（偏差 < 1/500）。

3.4.2 接头防水：槽段间采用锁口管或接头箱连接，内埋遇水膨胀止水条，确保整体防水性。

3.4.3 结构协同：地下连续墙可作为主体结构的侧墙，与内衬共同承受竖向荷载，实现“两墙合一”。

优势：刚度大、沉降小、防水耐久、可兼作主体结构；劣势：造价高、设备要求高^[7]。

4 竖井施工适用性评价体系

4.1 评价指标构建

（1）安全性：坍塌/突水风险、结构可靠性、环境风险；（2）施工效率：掘进速度、工序周期、设备利用率；（3）经济性：造价、工期成本、维护成本；（4）地质适应性：围岩级别、地下水、埋深、断层发育程度；（5）环境影响：振动、噪声、沉降、地下水扰动、能耗。

4.2 量化评价模型

采用层次分析法（AHP）确定权重，结合模糊综合评价实现定量评分，输出综合适应性指数。评价结果分级：Ⅰ级（优先推荐）、Ⅱ级（推荐）、Ⅲ级（可行）、Ⅳ

级（不推荐）。

4.3 综合评价对比

表2 竖井施工适用性综合评价对比表

评价指标	钻爆法	反井法	竖井TBM	冻结+地连墙
安全性	中	高	高	极高
效率	中	高	极高	中
经济性	低	中	高	高
地质适应性	硬岩广	稳定地层	硬岩优	复杂富水优
环境影响	大	小	小	中

选型结论（1）硬岩长竖井：优先选用竖井TBM或反井法，效率与安全性最优；（2）软土富水城市竖井：冻结法+地下连续墙为首选方案；（3）短竖井、一般地层：钻爆法性价比最高；（4）深大、高风险、永久竖井：地下连续墙+内衬结构综合效益最优^[8]。

5 竖井施工核心风险与防控对策

5.1 主要风险类型

（1）突水涌泥：富水断层、破碎带、帷幕失效引发；（2）井壁坍塌：围岩失稳、支护滞后、止水失效引发；（3）结构偏斜：开挖不均、支撑不对称、地层软硬不均引发；（4）冻胀融沉：冻结法施工温度场失控引发；（5）环境破坏：地表沉降、管线变形、建筑物开裂。

5.2 系统防控对策

（1）超前地质预报：TSP、地质雷达、超前钻探；（2）预加固预处理：超前注浆、冻结止水、管棚支护；（3）信息化施工：实时监测围岩变形、井壁应力、地下水、地表沉降；（4）工序严控：短进尺、强支护、快封闭、勤量测；（5）应急体系：突水封堵、坍塌回填、备用排水、人员逃生通道^[9]。

6 智能建造与发展趋势

（1）智能掘进装备：自适应TBM、智能反井钻机、自动导向与纠偏；（2）数字孪生与BIM：全生命周期设计—施工—运维一体化管控；（3）物联网智能监测：变形、应力、地下水、温度实时感知与预警；（4）绿色低碳施工：低能耗冻结、环保注浆、渣土资源化利用；（5）深部长寿命竖井：高地应力、高水压、长期耐久性设计与防护^[10]。

7 结论与展望

7.1 结论

（1）竖井施工技术可分为硬岩开挖体系与软土止水围护体系，钻爆法、反井法、竖井TBM法、沉井、冻结、注浆、地下连续墙构成主流技术谱系，各自具有明确地层与工况适用性。（2）建立的五维度定量评价体系可科学实现

竖井施工技术比选，为工程方案决策提供依据。（3）硬岩竖井以机械化方案优势突出，软土富水竖井以冻结+地连墙安全性最优，常规竖井以钻爆法性价比最高。（4）竖井施工核心风险为突水、坍塌、偏斜及环境变形，必须采用超前预报、预加固、信息化施工与应急体系联合防控。

7.2 展望

未来竖井施工将向机械化、智能化、绿色化、长寿命方向发展。深部复杂地质竖井、城市超敏感环境竖井、水下与海底竖井、低碳节能施工、智能感知与自主决策建造将成为研究热点。建议进一步加强多工法协同、全过程数值模拟、智能装备与监测预警技术研发，提升竖井工程安全水平与综合效益。

参考文献

[1]钟长伟.深竖井施工技术与风险控制研究[J].施工技术,2021,50(12):88-91.

[2]胡新明.反井钻机在深部竖井施工中的应用[J].煤炭工程,2020,52(7):1-4.

[3]周建军,陈馈.隧道TBM智能掘进技术研究进展[J].隧道建设,2022,42(3):457-468.

[4]朱叶艇,陈页,杨平.城市复杂环境竖井施工沉降控制[J].现代隧道技术,2020,57(S2):342-348.

[5]杜嘉东,王卫东.沉井法施工技术与工程应用[J].施工技术,2019,48(10):1-5.

[6]陈页,杨平,朱叶艇.软土竖井冻结施工温度场与变形控制[J].现代隧道技术,2022,59(3):187-194.

[7]杨天亮,黄茂松.软土地层注浆加固机理与设计方法[J].岩土力学,2021,42(S1):1-6.

[8]韩煊,李宁.地下连续墙设计与施工关键技术[J].岩土工程学报,2020,42(S1):1-4.

[9]王非,胡欣雨,张顶立.地铁近接竖井施工地层变形机理[J].北京交通大学学报,2020,44(2):1-8.

[10]马栋,谭忠盛.铁路隧道智能建造技术发展与应用[J].铁道工程学报,2023,40(1):1-8.