

煤矿回风立井井筒掘进施工技术

党西龙 赵 健

陕西煤业化工建设（集团）有限公司矿建二公司 陕西 西安 710000

摘 要：本论文深入研究煤矿回风立井井筒掘进施工技术，系统阐述井筒掘进前期准备与施工组织规划，详细分析表土段冻结法、基岩段钻爆法等关键掘进技术的实施要点，探讨井筒支护与围岩稳定性控制策略，同时针对施工安全管理与质量验收提出科学有效的方法。结合工程实践案例，总结出一套涵盖施工工艺优化、安全风险防控、质量保障的综合性施工技术方案。研究表明，合理运用相关技术与管理措施，可显著提高井筒掘进施工效率与安全性，保障工程质量，为煤矿回风立井建设提供技术参考与实践指导。

关键词：煤矿；回风立井；井筒掘进；施工技术；围岩稳定；安全管理

引言：煤矿回风立井作为矿井通风系统的关键组成部分，承担着排出井下污浊空气、保障安全生产的重要任务。其施工质量与进度直接影响矿井的建设周期和运营安全。近年来，随着煤炭开采深度不断增加，地质条件愈发复杂，对回风立井井筒掘进施工技术提出了更高要求。据统计，在深部矿井建设中，因井筒掘进技术应用不当导致的工期延误占比达30%，安全事故风险显著增加。传统的井筒掘进施工技术在应对复杂地质条件时逐渐暴露出局限性，如遇到深厚表土层、破碎岩层等特殊地质时，易出现井壁坍塌、涌水等问题。例如，某煤矿回风立井在表土段施工中，因未采取有效支护措施，导致井壁局部坍塌，造成直接经济损失超500万元，工期延误达2个月。因此，深入研究和创新煤矿回风立井井筒掘进施工技术，优化施工组织与管理，对保障煤矿安全生产、提高资源开采效率具有重要的现实意义。

1 井筒掘进前期准备与施工组织

1.1 地质勘察与资料分析

详细准确的地质勘察是井筒掘进施工的基础。在施工前，需采用钻探、物探等多种手段对井筒穿越地层进行全面勘察。钻探深度应覆盖井筒全段，间距控制在10~20米，以获取地层岩性、厚度、地质构造等详细信息。物探方面，可运用三维地震勘探技术，对断层、破碎带等不良地质体进行精准定位。通过对地质资料的分析，绘制地层柱状图和地质剖面图，明确不同地层的物理力学性质，如岩石硬度、抗压强度、含水率等参数。例如，在某煤矿回风立井勘察中，发现井筒中部存在一条宽约5米的断层破碎带，岩石破碎且地下水丰富。根据这一信息，施工方提前制定针对性的穿越方案，避免了施工风险。

1.2 施工方案设计

施工方案设计需综合考虑地质条件、施工设备、工期要求等因素。对于表土段，当土层深厚且含水率高时，优先选用冻结法施工；若土层较浅且稳定性较好，可采用明槽开挖法。基岩段则根据岩石硬度选择钻爆法或机械破岩法，硬度较低的岩石可采用掘进机直接开挖，硬度较高的岩石需采用钻爆法。以某煤矿回风立井为例，表土段厚80米，地下水位高，施工方案采用冻结法施工，设计冻结壁厚度为3米，冻结孔布置圈径大于井筒外径1.5米，确保冻结壁的稳定性^[1]。基岩段岩石硬度较高，采用钻爆法施工，设计炮眼深度2.5米，炮眼布置遵循“抓岩机抓岩范围全覆盖、周边眼控制轮廓”原则，保证爆破效果和成型质量。

1.3 施工设备与材料准备

施工设备的选型与配置直接影响施工效率。井筒掘进常用设备包括凿岩机、提升机、抓岩机、通风机等。凿岩机应根据岩石硬度选择合适型号，如在硬岩施工中选用大功率液压凿岩机，提高钻孔效率。提升机的提升能力需满足最大提升荷载要求，且配备双钩提升系统，提高出渣效率。材料方面，需提前准备好支护材料，如锚杆、锚索、喷射混凝土原料等。锚杆、锚索的材质和规格应符合设计要求，其抗拉强度需经过实验室检测，确保满足支护强度。喷射混凝土的配合比需通过试验确定，保证混凝土的强度和粘结性能。例如，某煤矿回风立井施工前，对锚杆进行了拉拔试验，确保其抗拉强度达到设计要求的200kN以上。

1.4 施工组织与人员安排

合理的施工组织与人员安排是保障施工顺利进行的关键。建立以项目经理为核心的施工管理团队，明确各岗位职责。技术人员负责施工技术指导和方案优化，施工人员按照分工进行钻孔、爆破、支护等作业，安全

管理人员负责施工现场的安全监督与隐患排查。采用“三八”作业制,将施工人员分为三个班组,轮流作业,保证施工的连续性。每个班组配备钻眼工、爆破工、支护工等专业人员,明确各工种的作业流程和质量标准。例如,在钻眼作业中,要求钻眼工严格按照炮眼布置图施工,炮眼深度误差控制在 $\pm 50\text{mm}$ 以内,角度误差不得超过 3° 。

2 井筒掘进关键技术实施

2.1 表土段施工技术

2.1.1 冻结法施工

冻结法作为表土段施工的核心技术,通过构建人工冻土帷幕保障施工安全。施工时,利用ZDY-6000LD型定向钻机以 0.3% 垂直度误差标准施工冻结孔,孔间距严格控制在 $1.2\sim 1.5\text{m}$,确保冻结壁均匀交圈。地面制冷站采用双级压缩制冷机组,将盐水温度稳定维持在 $-30^\circ\text{C}\pm 2^\circ\text{C}$,经 $\Phi 108\times 5\text{mm}$ 无缝钢管组成的供液系统注入冻结孔,形成循环回路。施工中依托分布式光纤测温系统,对冻结壁进行三维温度场实时监测,每 10m 布置1个温度监测断面,确保温度数据采集精度达 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。当监测显示冻结壁平均温度低于 -10°C 且有效厚度超出设计值 10% (如设计 4m 厚度实际达 4.4m),并保持 72h 稳定后,方可启动井筒掘进。某煤矿回风立井通过该技术,在 230m 深厚表土层施工中,实现冻结壁零渗漏,保障了日均 1.8m 的安全掘进效率。

2.1.2 明槽开挖法

当表土段厚度小于 30m 且土体密实度高、内摩擦角 $\geq 30^\circ$ 时,明槽开挖法凭借高效经济的优势成为首选。施工前通过全站仪进行毫米级精度测量放线,结合BIM模型确定开挖轮廓。采用反铲挖掘机配合长臂挖机分层作业,每层深度严格控制在 $1.5\sim 2\text{m}$,边坡按 $1:1.5$ 放坡,坡面预留 $10\sim 15\text{cm}$ 人工修坡余量。边坡支护采用“锚网喷+预应力锚索”联合体系:锚杆选用直径 28mm 螺纹钢,长度 3m ,按 $1.2\times 1.2\text{m}$ 梅花形布置,注浆压力 $1.2\sim 1.5\text{MPa}$;挂设直径 6mm 、间距 $15\times 15\text{cm}$ 钢筋网,喷射C25早强混凝土,厚度 120mm ;对高陡边坡施加预应力锚索,单根设计拉力 300kN 。开挖至基底后,采用强夯法进行地基处理,夯实度达 95% 以上,铺设 30cm 级配碎石垫层。井壁浇筑采用定制钢模板,分层高度 50cm ,插入式振捣器快插慢拔,每层振捣时间控制在 $20\sim 30\text{s}$ 。某露天煤矿回风井表土段施工中,通过该工艺将工期压缩至 22d ,较传统工艺成本降低 28% ,且边坡位移监测数据始终小于 15mm 。

2.2 基岩段施工技术

2.2.1 钻爆法施工

钻爆法作为基岩段施工的核心技术,其效能取决于精准的炮眼布置与参数设计。在某煤矿回风立井中硬砂岩施工中,采用楔形掏槽眼6个,呈对称布置,角度 $70^\circ\sim 75^\circ$,深度较辅助眼深 $200\sim 300\text{mm}$,率先爆破形成初始自由面;辅助眼30个,间距 $500\sim 600\text{mm}$,负责扩大破碎范围;周边眼24个,间距 400mm ,采用不耦合装药结构,药卷直径 25mm 、炮眼直径 42mm ,装药量仅为辅助眼的 $60\%\sim 70\%$,实现光面爆破效果。根据岩石坚固性系数,炸药单耗设定为 $1.0\text{kg}/\text{m}^3$,选用乳化炸药配合数码电子雷管,以 $15\sim 25\text{ms}$ 微差间隔起爆,确保爆破能量有序释放^[2]。爆破后立即启动大功率轴流风机,以 $20\text{m}^3/\text{s}$ 风量通风 30min ,待一氧化碳浓度降至 24ppm 以下后,使用HZ-6中心回转抓岩机进行出渣,其 1m^3 斗容配合提升系统,每小时可完成 $8\sim 10$ 次出渣循环,保障施工高效推进。

2.2.2 机械破岩法施工

在 f 值 ≤ 6 的页岩、泥岩等低硬度岩层施工中,机械破岩法凭借高效环保优势成为优选方案。以EBZ-260H型悬臂式掘进机为例,其配备功率 315kW 的截割电机与自动纠偏激光导向系统,定位精度达 $\pm 30\text{mm}$ 。施工时,通过PLC智能控制系统实时监测岩石硬度,自动调节截割头转速($40\sim 80\text{r}/\text{min}$)与推进速度($0.5\sim 2\text{m}/\text{h}$),采用分层分段“S型”截割路径,有效降低围岩扰动。出渣环节采用带式输送机与刮板输送机组合系统,运输能力达 $500\text{m}^3/\text{h}$,实现破岩-出渣连续作业。刀具管理方面,设置刀具磨损监测传感器,当截齿磨损量超过 25mm 时自动报警,采用快换装置可在 30min 内完成整组刀具更换。在某煤矿回风立井泥岩段施工中,该设备实现月进尺 68m ,较传统钻爆法效率提升 38% ,同时粉尘浓度降低 65% ,循环进尺误差控制在 $\pm 50\text{mm}$ 以内,显著提高施工质量与安全性。

3 井筒支护与围岩稳定性控制

3.1 临时支护

临时支护是保障井筒掘进安全的重要措施,在爆破出渣后及时进行。常用的临时支护方式有锚网喷支护和钢拱架支护。锚网喷支护是在井壁上钻孔安装锚杆,铺设钢筋网,然后喷射混凝土。锚杆长度根据围岩情况确定,一般为 $2\sim 3\text{m}$,间排距 $0.8\sim 1.0\text{m}$ 。喷射混凝土强度等级不低于C20,喷射厚度 $50\sim 100\text{mm}$ 。钢拱架支护则是在井壁安装钢拱架,钢拱架间距根据围岩稳定性确定,一般为 $0.5\sim 1.0\text{m}$,钢拱架之间采用钢筋连接,然后喷射混凝土进行封闭。

3.2 永久支护

永久支护是保证井筒长期稳定的关键。对于表土段，多采用钢筋混凝土井壁，井壁厚度根据地层压力计算确定，一般为400~800mm。钢筋的规格和布置需满足设计要求，混凝土浇筑采用滑模施工工艺，确保井壁的垂直度和表面平整度。基岩段永久支护可采用锚网喷+混凝土浇筑的联合支护方式^[3]。在锚网喷临时支护的基础上，再浇筑混凝土井壁，混凝土强度等级不低于C30，井壁厚度300~500mm。在遇到破碎岩层或地质构造带时，可增加锚索支护，提高支护强度。

3.3 围岩稳定性监测

为及时掌握围岩变形情况，需建立围岩稳定性监测系统。在井筒周边布置多点位移计、压力盒等监测仪器，实时监测围岩的位移、应力变化。多点位移计用于监测围岩内部不同深度的位移，压力盒用于监测支护结构与围岩之间的接触压力。监测频率根据施工进度和围岩情况确定，一般在掘进期间每天监测1~2次，稳定后可适当减少监测次数。当监测数据出现异常时，及时分析原因并采取加强支护等措施，确保围岩稳定。

4 施工安全管理与质量验收

4.1 施工安全管理

施工安全管理是煤矿回风立井井筒掘进的重中之重。建立健全安全管理制度，落实安全生产责任制，加强对施工人员的安全教育培训，提高安全意识。（1）在施工现场设置明显的安全警示标志，对危险作业区域进行隔离防护。加强通风管理，保证井下空气质量，防止瓦斯积聚和有害气体超标。定期对施工设备进行检查和维护，确保设备安全运行。例如，对提升机的制动系统、钢丝绳等关键部件进行每日检查，发现问题及时处理。（2）制定应急预案，针对可能发生的井壁坍塌、涌水、瓦斯突出等事故，组织应急演练，提高施工人员的应急处置能力。在某煤矿回风立井施工中，通过定期开展应急演练，施工人员在模拟涌水事故发生时，能够迅速启动排水设备，有序撤离，有效降低了事故损失。

4.2 质量验收

质量验收是保证工程质量的关键环节。严格按照相关标准和规范进行验收，包括《煤矿井巷工程质量验收规范》（GB 50213）等。质量验收分为工序验收和竣工验收。（1）工序验收在每道工序完成后进行，如钻孔质量验收、爆破效果验收、支护质量验收等。钻孔质量验收主要检查炮眼深度、角度、间距等指标；爆破效果验收检查超欠挖情况、岩石破碎程度等；支护质量验收检查锚杆拉拔力、喷射混凝土强度和厚度等^[4]。（2）竣工验收在井筒掘进完成后进行，对井筒的垂直度、净直径、井壁厚度、混凝土强度等进行全面检测。采用激光指向仪检测井筒垂直度，误差控制在0.5‰以内；用钢尺测量井筒净直径，偏差不超过设计值的±50mm；通过钻孔取芯检测混凝土强度和井壁厚度。对验收不合格的项目，责令整改，直至符合质量标准。

结语

煤矿回风立井井筒掘进施工需统筹地质勘察、技术优化、支护控制与安全管理，各环节协同保障工程质效。通过科学设计施工方案、精准应用钻爆与机械化掘进技术、强化动态支护与风险监测，可显著提升施工效率与安全性。未来，随着智能化装备（如钻孔机器人）与新型材料（高强复合支护）的推广，井筒施工将向自动化、绿色化、低碳化方向升级，为煤炭行业高质量发展提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1]李瑞楼,孙远航.煤矿掘进机智能诊断与维修方法分析[J].中国煤炭,2024,50(S1):387-390.
- [2]王瑶.煤矿掘进装备液压系统智能化改进设计[J].煤矿机械,2024,45(11):1-4.
- [3]耿凯.水峪煤矿掘进面智能化改造方案研究[J].煤炭与化工,2024,47(08):87-89+93.
- [4]李怀珠,曹鹏,孙伟.基于人工智能的煤矿掘进电气系统故障诊断与预测方法研究[J].电气技术与经济,2024,(08):4-6.