

复杂地质条件下隧洞瓦斯定向抽排技术实践

谭 鹏

中国水利水电第九工程局有限公司 贵州 贵阳 550081

【摘要】：复杂地质条件下隧洞瓦斯治理的核心在于通过定向抽排实现源头控制和精准治理。针对瓦斯赋存位置难以准确控制、钻孔成孔质量不稳定、抽排系统连续性不足等问题，文章围绕地质探查、定向布孔、封孔负压控制和监测反馈等环节展开分析，提出以“精准识别、定向释放、动态调控、协同施工”为主线的技术路径。实践表明，定向抽排技术能够提高瓦斯治理精准度，降低施工安全风险，提升抽排效率和隧洞施工连续性。

【关键词】：复杂地质；隧洞施工；瓦斯治理；定向抽排；安全控制

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.004

引言

复杂地质条件下隧洞施工面临断层破碎、裂隙发育、煤系夹层隐伏和瓦斯异常涌出等多重风险，传统通风稀释和普通钻孔抽排方式已难以满足精准治理要求。瓦斯治理若停留在局部处置层面，容易造成抽排盲区、施工停滞和安全风险累积。定向抽排技术能够将钻孔轨迹主动延伸至瓦斯富集区域，实现开挖前预抽、施工中监测、异常时调整的全过程控制。本文围绕中国水利水电第九工程局有限公司毕大 1 标工程施工支洞瓦斯抽排这一技术实践展开研究，有助于提升复杂地质隧洞施工的安全性、连续性和精细化管理水平。

1 工程概况

1.1 项目地质条件

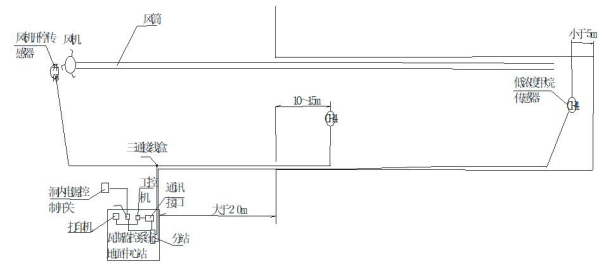
本工程施工支洞区域地质构造复杂，存在断层破碎带，局部隧洞岩体为 P3I 中厚层细砂岩、粉砂岩，泥岩含煤 30~50 层，岩体破碎，节理裂隙发育，该洞段施工属煤系地层施工。

1.2 瓦斯赋存及涌出机理

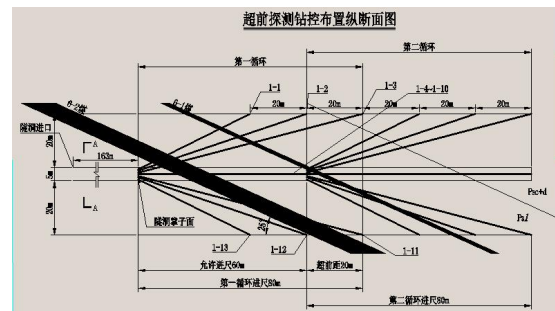
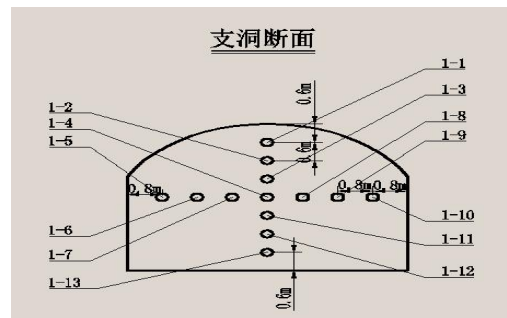
煤系地层围岩稳定性差，该隧洞区域瓦斯主要以游离态、吸附态两种方式赋存在煤系围岩当中；瓦斯气体伴随围岩渗水共同涌出，且瓦斯呈间歇性涌出，浓度波动大，局部极易出现瓦斯超限，增加施工治理难度以及爆破开挖作业极易诱发安全事故。

1.3 瓦斯抽排设计

(1) 瓦斯检测与监控：结合本工程的实际特点，项目选用重庆某公司生产的瓦斯监控设备，瓦斯检测采用便携式智能光干涉甲烷测定器、便携式甲烷检测报警仪和安全监测监控系统三种方式进行。瓦斯监控系统面布设图如下：



(2) 煤层超前探测：在隧洞掌子面开展超前地质钻孔探测，探明前方煤系地层分布范围、瓦斯压力、瓦斯含量，精准判定瓦斯危险等级，为后续抽排施工提供数据依据。超前探测布置如下：



(3) 钻孔抽放设计：钻孔位置设在距煤层厚度 1/2 处，孔距不大于 2 倍排放半径，孔底间距不大于 2m，并以此计算各孔的角度和长度；当煤层倾角小、煤层厚、一次排放钻孔过长、俯角过大时，采用分阶段分部多次排放，首次排放钻孔的穿煤深度不小于 1.0m。钻孔排放施工按喷 15cm 厚 C20 砼封闭工作面→加固支护安装钻机→布置钻机钻孔→排放效果检验。当煤

层有突出危险时,采用预抽瓦斯措施来加快煤层瓦斯排放速度,利用隧道两侧预埋的 $\Phi 150\text{mm}$ 管道和YWB-15型智能式瓦斯抽放移动泵实施抽放。

(4) 防突措施及效果检验:防治突出技术措施采用多排钻孔排放抽放。揭煤工作面预测钻孔钻进煤层时,委托有资质的单位采集钻孔煤样,利用1~3mm的筛子筛分钻屑,用MD-2钻屑瓦斯解吸仪、WTC钻屑瓦斯突出参数仪分别测定其瓦斯解吸指标 Δh_2 和K1值。瓦斯解吸指标的突出临界值根据实测数据确定。

(5) 现场安全管控措施:配套机械强制通风系统,利用新鲜空气置换洞内滞留瓦斯,稀释残余气体浓度。合理规划进排风路线,避免瓦斯气流回流滞留,和瓦斯抽排技术形成互补,双重保障洞内气体指标达标。洞内全部采用防爆型电气设备、防爆照明与防爆机械,杜绝电火花产生;安排专人实时全天候监测瓦斯浓度,配备气体报警装置,数据异常立即停工处置;严格管控爆破作业,优化爆破药量,减少爆破冲击造成的瓦斯大量瞬时涌出;加强施工现场人员安全教育培训,完善应急救援预案,定期开展安全演练;做好抽排管道日常检修维护,保证瓦斯抽排系统稳定连续运行。

2 工程应用效果的总结与分析

2.1 隧洞施工中瓦斯治理的重要性

复杂地质条件下隧洞施工瓦斯治理的重点在于降低施工空间内的瓦斯浓度,更在于提前削弱围岩内部瓦斯压力,控制瓦斯释放路径,使开挖、出渣、支护、衬砌等工序处于可控环境中运行。将绿色安全、智慧监测、源头治理理念融入隧洞瓦斯防控,可减少被动停工和重复处置,提高复杂地质隧洞施工的安全韧性。

2.2 传统瓦斯抽排方式的应用情况

传统瓦斯抽排多以普通钻孔、局部预抽、通风稀释和临时管路抽放为主,施工组织相对简便,能够在地质条件稳定、瓦斯赋存范围较明确的区段发挥一定作用。但在复杂地质隧洞中,常规钻孔受孔深、孔向、成孔精度和围岩稳定性限制,钻孔轨迹难以准确进入瓦斯富集层位,抽排半径有限,容易形成抽排空白区^[1]。破碎带、软硬互层和富水裂隙区还会导致塌孔、堵孔、漏风和封孔失效,使负压传递能力下降,瓦斯抽排浓度和流量波动较大。传统方式偏重事后控制和局部处理,抽排系统与超前地质预报、动态监测、施工进尺之间衔接不足,难以满足复杂地质条件下精细化、连续化、主动化治理要求。

2.3 定向抽排技术应用的现实需求

复杂地质条件下隧洞瓦斯治理需要由粗放布孔向精准定位、由单点抽排向区域协同、由经验控制向数据驱动转变。定向抽排技术能够根据地质探查结果、瓦斯赋存规律和施工推进方向,对钻孔轨迹、延伸距离、分支位置和抽排范围进行针对

性控制,使钻孔穿越目标层位、裂隙富集带及掌子面前方高风险区域,提升瓦斯预抽的有效覆盖率。该技术可与超前预报、实时监测、负压调控和分区管理结合,形成“探查—布孔—抽排—反馈—调整”的闭环模式,减少无效钻孔和重复施工。其应用需求集中体现在提高抽排精准度、保障开挖连续性、降低瓦斯超限风险和推动隧洞施工安全管理智能化等方面。

3 复杂地质条件下瓦斯抽排精准性不足问题

3.1 瓦斯赋存位置难以准确控制

复杂地质条件下隧洞穿越地层瓦斯不再呈现稳定、连续、规则的分布状态,而是受构造面导通、封闭层阻隔和局部应力集中影响,形成点状富集、带状富集或局部异常涌出。施工过程中,掌子面受钻爆扰动和卸荷作用影响,瓦斯压力释放路径持续变化,原有探测结果与实际涌出位置容易产生偏差。常规探孔和普通钻孔多以直线推进为主,对侧向裂隙、斜交断层和隐蔽含气层控制能力不足,难以精准覆盖高风险区域,导致部分瓦斯富集区不能提前释放,增加后续开挖阶段瓦斯超限和突涌风险。

3.2 钻孔成孔质量不稳定

复杂地质隧洞实施瓦斯抽排钻孔时,破碎围岩、软硬互层、富水夹层和高地应力区会显著影响成孔稳定性。钻进过程中,孔壁受岩体完整性差、泥化软化、裂隙渗水和钻具振动影响,容易发生塌孔、缩径、掉块、卡钻和孔道偏斜,使设计孔深、孔向和有效抽排长度难以保证^[2]。成孔质量不足还会造成抽排管安装困难、封孔段不密实、孔内通道堵塞等问题,削弱负压向围岩深部传递的能力。若钻孔轨迹偏离目标含气区域,抽排范围将明显缩小;若孔壁稳定性不足,抽排过程中还可能出现漏风、负压衰减和瓦斯浓度下降,影响定向抽排技术的持续治理效果。

3.3 抽排系统连续性不足

随着掌子面不断前移、支护工序快速跟进、地质条件动态变化等特点,瓦斯抽排系统若缺乏连续布置和动态衔接,容易出现抽排滞后、管路分散、负压不均和监测断点。部分区段仅在瓦斯异常后临时布孔处理,抽排时间不足,难以在开挖前形成稳定降压效果;部分钻孔之间缺乏联动管理,抽排盲区和低效孔未能及时识别,导致瓦斯治理呈现片段化状态。随着隧洞向复杂构造带推进,原有抽排管路受施工干扰、渣土堆积、支护封闭和设备转移影响,容易出现连接松动、管路积水、堵塞和负压损失。抽排系统无法与地质预报、瓦斯监测、施工进尺同步调整,将直接削弱定向抽排的整体控制能力。

4 定向钻进与分区抽排协同控制

4.1 开展地质探查确定瓦斯富集区

复杂地质条件下隧洞瓦斯定向抽排应以超前地质探查作

为前置环节,重点查明断层破碎带、煤系夹层、裂隙密集区、软弱夹层及富水构造的空间展布关系。施工前需整合地质勘察资料、瓦斯含量检测、超前钻探成果和物探解释结果,判断瓦斯可能聚集的层位、通道和封闭边界。施工过程中应结合掌子面揭露情况,对岩性变化、裂隙发育、瓦斯浓度波动和钻孔出气特征进行动态校核,避免单纯依赖前期资料造成抽排靶区偏差。对于瓦斯异常区,应按照风险等级划分重点预抽区、加强控制区和跟踪观察区,明确不同区段的钻孔深度、方位和抽排时限,使定向钻孔能够准确指向瓦斯富集范围,为后续精准抽排提供可靠依据。

4.2 优化定向钻孔布置提高抽排覆盖率

定向钻孔布置应围绕瓦斯富集区、隧洞开挖轮廓线和掌子面推进方向进行系统设计,避免钻孔分散、重叠或偏离目标层位。高风险区可采用超前长钻孔控制掌子面前方瓦斯,侧向钻孔控制边墙及拱肩裂隙瓦斯,补充钻孔处理局部抽排盲区,使抽排范围由单点控制转向立体覆盖^[3]。钻孔参数应根据隧洞断面尺寸、岩层倾角、构造走向和瓦斯压力确定,重点控制方位角、倾角、孔深、孔距和终孔位置。钻进过程中应利用轨迹测量和随钻修正技术,及时纠正孔斜偏差,保证钻孔穿越目标含气层位。对于破碎带和软硬互层,应适当降低钻进扰动,优化钻压、转速和排渣方式,提升成孔稳定性和有效抽排长度。

4.3 完善封孔与负压抽排系统

封孔质量直接影响定向抽排效果,应根据围岩完整性、裂隙发育程度和孔内渗水情况选择封孔工艺,确保封孔段长度、密封度和抗漏风能力满足抽排要求。破碎围岩区应加长封孔段,采用分段注浆、柔性封堵与刚性加固相结合的方式,提高孔口稳定性和气密性。抽排管路布设应减少弯折、积水和漏接,管径、阀门、汇流装置和负压设备应与抽排规模匹配,保证瓦斯能够稳定进入主管系统。负压控制不宜单纯追求高强度,应结合单孔浓度、流量和压力变化进行分区调节,防止过大负压引起外部漏风和孔壁破坏。低浓度孔应及时开展扫孔、补封和管路检查,高浓度孔应保持连续抽排,形成稳定可靠的抽排运行状态。

参考文献:

- [1] 谭云亮,杨生龙,刘学生,等.深部岩层动力灾害防控基本原理与工程学[J].采矿与岩层控制工程学报,2026,8(01):206-225.
- [2] 郝俊锁,张祥炳,王石光,等.含天然气砂岩地层隧洞瓦斯赋存特征与防治技术研究[J].现代隧道技术,2025,62(02):241-253.
- [3] 龚文豪.岩溶地层溶洞对隧道衬砌的影响研究[D].鲁东大学,2023.
- [4] 李术才,李利平,孙子正,等.超长定向钻注装各关键技术分析及发展趋势[J].岩土力学,2023,44(01):1-30.
- [5] 彭杨皓.深部厚煤层沿底巷道变形破坏机理及帮顶协同支护研究[D].中国矿业大学(北京),2021.

5 定向抽排技术的实践成效

5.1 提高瓦斯治理精准度

定向抽排技术的应用使复杂地质条件下隧洞瓦斯治理由大范围经验布孔转向靶向控制,抽排对象更加明确,钻孔轨迹能够围绕含气裂隙、煤系夹层、断层导气带及掌子面前方高风险区展开布设。通过超前探查成果与钻孔轨迹控制相结合,可将瓦斯富集区、围岩破碎区和施工扰动区纳入统一判断范围,减少普通钻孔偏离目标层位造成的无效抽排。不同地层瓦斯抽排参数差异明显,必须依据实测渗透率、压力和抽排流量确定布孔间距与抽排时长,不能照搬煤层瓦斯参数。该思路能够提高瓦斯抽排设计的针对性,使抽排范围、抽排时间和钻孔位置更加匹配实际地质条件。

5.2 增强隧洞施工安全性

定向抽排技术能够在开挖扰动前提前释放作业面前方及周边围岩中的瓦斯压力,降低瓦斯沿裂隙突然涌入施工空间的概率。复杂地质隧洞中,断层破碎带、软弱夹层和富水裂隙容易形成瓦斯运移通道,若仅依靠通风稀释,瓦斯治理具有明显滞后性^[4-5]。定向钻孔可将抽排端延伸至开挖轮廓线外侧和掌子面前方控制范围,使瓦斯在进入作业面前得到预先削减。抽排过程中结合孔口浓度、负压、流量和回风流监测数据,可及时识别瓦斯异常变化,避免局部积聚发展为超限风险。对于钻爆施工、盾构掘进、初期支护和封闭衬砌等连续工序,定向抽排能够减轻施工扰动造成的瞬时涌出影响,使瓦斯控制从被动处置转向源头削减,提高人员、设备和作业环境的安全保障水平。

6 结语

复杂地质条件下隧洞瓦斯定向抽排技术应以地质探查为基础,以精准布孔、稳定成孔、严密封孔和动态监测为核心,形成源头削减与过程控制相结合的治理路径。通过定向钻孔提前释放瓦斯压力,能够提高抽排覆盖率,降低掌子面瓦斯异常涌出风险,保障开挖、支护和衬砌工序连续推进。其应用价值体现在瓦斯治理效果提升,更体现在施工安全管理由被动处置向主动控制转变。