

瓦斯隧道施工安全控制要点

黎文明

中铁十局集团第八工程有限公司 天津 300000

摘要：瓦斯隧道施工安全管控是地下工程安全建设的核心任务，核心围绕风险防控展开。通过识别瓦斯隧道施工中的各类安全风险，运用科学的识别与评估方法划分风险等级，针对性落实通风管理、瓦斯监测预警、防爆措施及规范施工工艺等关键控制要点，可有效防范瓦斯爆炸、中毒窒息等事故发生。强化施工全流程安全管控，既能保障施工人员生命安全，也能确保工程顺利推进，对地下工程安全技术发展具有重要现实意义。

关键词：瓦斯隧道；施工安全；风险评估；通风管理；防爆措施

引言：瓦斯隧道施工因瓦斯自身特性、封闭作业环境及复杂地质条件，存在较高安全风险，安全控制工作至关重要。瓦斯易积聚且遇火源易引发危险，施工中交叉作业、机械运转等环节进一步放大事故隐患，传统管理模式难以适配动态风险环境。为防范安全事故、保障人员安全、确保工程有序推进，需明确施工安全控制的核心方向，系统梳理风险识别、评估及管控要点，为瓦斯隧道施工安全提供科学指引，下文将详细阐述相关内容。

1 瓦斯隧道施工安全控制的紧迫性和重要性

瓦斯隧道施工安全控制是地下工程建设的重中之重。首先，瓦斯的物理化学特性决定了其高风险性，瓦斯与空气混合达到5%~16%的爆炸极限时，遇明火即发生剧烈爆炸，瞬间释放的能量可摧毁隧道结构并造成人员窒息。其次，隧道施工环境的封闭性导致瓦斯难以自然扩散，在掌子面、断层破碎带等区域易形成局部积聚，增加了安全管控难度。再者，随着隧道埋深增加，地应力和瓦斯压力同步升高，地质条件的复杂性使得瓦斯涌出量呈现不确定性，传统管理模式难以适应动态变化的风险环境。此外，施工过程中的爆破作业、机械运转等环节均可能产生火源，进一步放大了事故发生的概率。因此，强化瓦斯隧道施工安全控制，不仅是保障施工人员生命安全的基本要求，也是确保工程进度、降低经济损失的必然选择，对推动地下工程安全技术发展具有重要现实意义^[1]。

2 瓦斯隧道施工安全风险识别与评估

2.1 瓦斯隧道施工特点及风险点

瓦斯隧道施工环境具有显著特殊性：一是瓦斯赋存状态复杂，受地质构造影响，以游离态或吸附态存在于煤系地层，涌出形式包括普通涌出与特殊涌出（如瓦斯突出），涌出量受地应力、透气性等因素动态影响；二是作业空间受限，隧道断面狭小导致空气流通不畅，瓦斯

易在顶部、凹角等区域积聚；三是施工工序交叉作业频繁，爆破、支护、运输等环节同步进行，增加风险因素相互作用。

主要风险点包括：（1）瓦斯爆炸风险，由瓦斯浓度超标与火源共同引发，是最严重事故类型；（2）瓦斯中毒与窒息风险，瓦斯浓度超过40%时氧气含量低于12%，可导致人员缺氧窒息；（3）隧道坍塌风险，瓦斯突出伴随岩块抛出冲击支护结构引发坍塌；（4）火灾风险，电气设备故障、油料泄漏等引发火灾，有毒烟气扩大危害；（5）机械伤害风险，防爆设备失效或操作不当导致机械伤害，同时可能产生火花引爆瓦斯。

2.2 风险识别方法与流程

风险识别采用多维度方法组合：现场调研法通过实地勘察掌子面地质条件、瓦斯涌出特征、通风效果获取第一手数据；资料收集法系统整理类似工程案例、地质勘察报告、设计文件，分析历史事故诱因；德尔菲法邀请地质、安全、施工等领域专家，通过多轮咨询形成风险共识；故障树分析法（FTA）以事故结果为导向，反向追溯基本事件，明确风险传递路径。

识别流程分四个阶段：（1）风险源识别，通过现场检测确定瓦斯浓度、地质构造、设备状态等潜在危险源，建立风险源清单；（2）风险事件识别，分析风险源可能引发的具体事故类型，如瓦斯积聚、设备失爆等；（3）风险后果分析，评估事故导致的人员伤亡、经济损失、环境影响，量化后果严重程度；（4）风险关联分析，明确不同风险事件因果关系，识别风险叠加效应，如瓦斯突出可能同时引发坍塌和爆炸事故^[2]。

2.3 风险评估技术途径

风险评估采用定性与定量相结合方法。定性评估通过专家打分法、矩阵法划分风险发生可能性和后果严重程度等级（高、中、低），适用于初步风险筛查；定量评

估通过数值模拟、概率分析精确计算风险发生概率和损失值,如采用FLUENT软件模拟瓦斯扩散规律,预测不同通风条件下的浓度分布。

风险等级确定需构建综合评估指标体系,指标包括瓦斯涌出量、通风效率、监测精度、人员操作规范性等,采用层次分析法(AHP)确定指标权重,加权求和得出风险综合评价值。根据评价值划分为四个等级:I级(极高风险)需立即停工整改,II级(高风险)应制定专项方案并加强监测,III级(中风险)需落实常规管控措施,IV级(低风险)可按标准作业流程实施。评估结果应动态更新,随施工进度和地质条件变化调整结论,确保控制措施的针对性和有效性。

3 瓦斯隧道施工安全控制要点

3.1 通风管理

通风系统设计是瓦斯隧道安全控制的核心,需根据隧道长度、断面尺寸、瓦斯涌出量等参数精准计算。风量计算需满足两项要求:一是按公式 $Q=100\times q\times K$ (q 为瓦斯涌出量 m^3/min , K 为备用系数1.2~1.5)稀释瓦斯至0.5%以下;二是按每人每分钟 4m^3 满足人员呼吸需求。风压设计需克服沿程和局部阻力,压入式通风时风筒出口距掌子面不超过15m。优先采用机械通风,隧道长度超1000m时可采用混合式通风,利用自然风压辅助降耗。

通风设备需防爆、高效、耐用。主通风机选用轴流式或离心式防爆风机,匹配设计风量风压,具备双电源;局部通风机采用对旋式,安装位置距洞口不小于10m。设备遵循“一主一备”原则,备用风机10分钟内可切换。风筒采用抗静电、阻燃材料,直径按风量确定,接口严密,百米漏风率 $\leq 2\%$ 。

通风效果监测实行实时监测与定期检测结合。隧道内设置风速和瓦斯传感器,风速 $<0.25\text{m/s}$ 或瓦斯浓度 $>0.5\%$ 时自动报警并切断电源。每日检测风筒出风口风量及完好状况,每周测定各断面风速和瓦斯浓度分布,每月全面测试系统性能。根据监测结果动态调整通风参数,确保安全^[3]。

3.2 瓦斯监测与预警

监测点设置应覆盖隧道全断面及关键区域。掌子面是瓦斯涌出的主要来源,需在距掌子面5m范围内设置1个监测点;隧道顶部易形成瓦斯积聚,每隔50m在拱顶设置1个监测点;机电设备附近、回风巷、施工人员集中区域也需设置监测点。监测点布置密度根据瓦斯等级确定,高瓦斯隧道每20~30m设置1个,突出隧道每10~15m设置1个。监测频率实行分级管理,掌子面及瓦斯异常区域实时监测,其他区域每小时自动记录1次数据,人工巡检每

日不少于3次。

监测设备选择需满足精度和可靠性要求。瓦斯传感器采用催化燃烧式或红外吸收式,测量范围0~4%,精度 $\pm 0.1\%$,响应时间 $\leq 30\text{s}$,具备抗干扰能力和防爆性能(Ex dI)。监测系统采用分布式光纤或无线传感网络,实现数据实时传输至地面监控中心,系统应具备数据存储、曲线显示、历史查询等功能。设备校验严格执行周期校验制度,传感器每7天用标准气样校准1次,每月进行1次全面性能测试,确保监测数据准确无误。备用传感器数量不少于在用数量的20%,确保故障能及时更换。

预警机制构建需分级响应。设置三级预警阈值:一级预警(瓦斯浓度0.3~0.5%),发出提示信号,加强监测频率;二级预警(瓦斯浓度0.5~1.0%),发出报警信号,停止爆破作业,撤离非必要人员;三级预警(瓦斯浓度 $\geq 1.0\%$),发出紧急报警,立即切断隧道内所有电源,组织人员全部撤离。预警响应程序明确各岗位职责,现场安全员负责立即采取控制措施,技术负责人组织分析原因,项目经理决策是否停工整改。预警信息通过声光报警、手机APP、监控中心大屏等多渠道发布,确保相关人员及时接收。

3.3 防爆措施

防爆设备与机械使用必须符合国家标准。隧道内所有电气设备均需取得煤矿安全标志(MA),采用隔爆型或增安型,其防爆等级不低于Ex dI。照明灯具选用防爆白炽灯或LED灯,开关、插座采用防爆型,电缆选用阻燃橡套电缆,接头处使用防爆接线盒。机械设备如装载机、挖掘机等需进行防爆改装,发动机加装防爆火星熄灭器,电气系统采用隔爆设计,液压系统避免使用易产生火花的部件。设备入洞前需经专业机构检测,确认防爆性能合格后方可使用,使用过程中每周检查防爆面、密封圈等关键部件,确保无损坏、无失爆。

火源控制需实施全流程管理。洞口设置安检站,严禁携带火柴、打火机等火种进入隧道,施工人员穿着防静电工作服和胶底鞋,禁止穿带铁钉的鞋。爆破作业使用煤矿许用炸药和雷管,采用毫秒延期电雷管,严禁使用导爆索。焊接、切割等动火作业需办理动火许可证,作业前检测瓦斯浓度(低于0.5%),配备灭火器材,设专人监护,作业后清理现场确认无残留火种。机械设备运转时避免碰撞产生火花,皮带运输机设置防跑偏、防打滑装置,减少摩擦火花产生。

易燃品管理需严格限制存放与运输。隧道内严禁存放汽油、柴油、煤油等易燃液体,施工所需油料由专用防爆罐车运输,在洞口指定区域存放,存放量不超过1天

用量。油料运输采用防爆泵和金属管道,避免使用塑料容器,防止静电积聚。润滑油、棉纱等易燃物品单独存放于密闭金属箱内,使用后及时清理,不得随意丢弃。隧道内设置消防沙、灭火器、消防水带等灭火设施,每隔100m设置1个消防栓,确保火灾发生时能快速响应^[4]。

3.4 施工工艺与操作规范

爆破作业安全控制需严格执行“一炮三检制”和“三人连锁爆破制”。“一炮三检”即装药前、爆破前、爆破后检查瓦斯浓度,浓度超过1%时严禁爆破;“三人连锁”即爆破工、班组长、安全员共同确认爆破条件,分别持有爆破警戒牌、爆破命令牌、爆破解除牌,确保各环节责任落实。爆破参数设计遵循“多打眼、少装药”原则,炮眼深度根据岩性确定,硬岩不超过2.5m,软岩不超过1.8m,装药量控制在炮眼容积的1/3-1/2。采用湿式钻孔,钻孔过程中持续供水,降低粉尘和温度,避免产生火花。起爆方式选用电力起爆,起爆线采用双回路,确保起爆可靠,爆破后等待15分钟以上,经瓦斯检测合格后方可进入掌子面。

开挖与支护作业需坚持“短进尺、快支护”原则。全断面开挖循环进尺不超过2m,台阶法施工台阶长度控制在5-10m,减少围岩暴露时间。开挖后立即进行初喷砼支护,厚度不小于5cm,封闭围岩表面,防止瓦斯逸出。锚杆采用全长粘结式,间距不大于1m,长度不小于2m,确保锚固力达标。钢拱架安装及时跟进,拱架间距根据围岩等级确定,V级围岩不大于0.8m,IV级围岩不大于1.2m,拱架之间采用纵向连接筋固定,形成整体受力结构。喷射砼采用潮喷或湿喷工艺,确保支护强度和密封性,减少瓦斯积聚空间。

电气作业安全规范需严格执行停电、验电、接地程

序。进行电气设备检修时,必须切断上级电源,悬挂“有人工作,禁止合闸”警示牌,验电确认无电压后,装设接地线。电缆敷设需整齐有序,避免挤压、拖拽,高度不低于1.8m,与风筒、水管保持安全距离。电气设备接地系统完善,接地电阻不大于 2Ω ,每年检测2次接地电阻值。漏电保护装置灵敏度符合要求,动作电流不大于30mA,动作时间不大于0.1s。定期对电气设备进行绝缘检测,高压设备每半年1次,低压设备每季度1次,确保设备绝缘良好,防止漏电或短路引发火花^[5]。

结束语: 瓦斯隧道施工安全控制是一项系统性、全过程的工作,需贯穿施工全流程。从风险识别与科学评估入手,精准把握通风管理、瓦斯监测、防爆措施及施工规范等核心要点,落实各项管控要求,才能有效规避各类安全风险。只有强化责任落实、完善管控体系、动态调整防控措施,才能实现瓦斯隧道施工安全,保障人员生命与工程财产安全,为同类地下工程施工安全提供借鉴与参考。

参考文献

- [1]冯云柯.公路工程瓦斯隧道施工技术分析[J].汽车周刊,2025,(09):237-239.
- [2]文挺.公路工程瓦斯隧道施工期间瓦斯防治与管理[J].运输经理世界,2024,(17):81-83.
- [3]江坤,侯维甲.公路工程瓦斯隧道施工安全管理要点浅析[J].区域治理,2025(23):0108-0110
- [4]孙飞.高速公路隧道工程不良地质处治施工探讨[J].交通科技与管理,2024,5(02):135-137.
- [5]孙岩.高速公路工程中的高瓦斯隧道爆破施工技术[J].居业,2023,(05):58-60.