

# 红层地区高瓦斯引水隧洞施工关键技术研究

滕 堃<sup>1</sup>, 杨 帆<sup>1</sup>, 何 诚<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072;

2. 四川省亭子口灌区建设开发有限公司, 四川 南充 637000)

**摘要:**以亭子口灌区一期工程Ⅲ标金鸡梁隧洞为例, 针对红层地区高瓦斯引水隧洞施工安全问题, 结合红层地区粉砂质泥岩特性, 分析了隧洞施工过程中采用的相应措施。结果表明: 采用超前地质钻孔进行瓦斯释放与预报; 利用人工检测与自动监测相结合的方式加强瓦斯监控; 按照“一备一用”的要求配置以加强洞内通风; 对机械设备加装车载瓦斯自动监控报警与断电系统以及尾气火花熄灭器, 对隧洞用电进行“三专”“两闭锁”改造等有针对性的措施, 可以时刻掌握隧洞内的瓦斯浓度变化, 消除隐患, 保证隧洞施工的安全, 所取得的经验可为类似工程借鉴。

**关键词:**水利工程; 红层地区; 引水隧洞; 高瓦斯; 施工技术; 瓦斯防治; 金鸡梁隧洞

中图分类号: [TV91]; TV76; TV52; TV554

文献标志码: B

文章编号: 1001-2184(2024)02-0093-03

## Research on Key Technologies for Construction of High Gas Water Diversion Tunnels in the Red-bed Area

TENG Yun<sup>1</sup>, YANG Fan<sup>1</sup>, HE Cheng<sup>2</sup>

(1. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan 610072;

2. Sichuan Tingzikou Irrigation Area Consturction Development Co., Ltd., Nanchong Sichuan 637000)

**Abstract:** Taking Jinjiliang tunnel of the third bid of Tingzikou Irrigation Area Phase I Project as an example, aiming at the safety problem of high gas construction of diversion tunnel in red-bed area, combined with the characteristics of silty mudstone in red-bed area, the corresponding measures adopted in the construction process are analyzed. The results show that the gas release and prediction are carried out by advanced geological drilling. A the combination of manual detection and automatic monitoring is used to strengthen gas monitoring; configuration is carried out in accordance with the requirements of "one standby and one ready" to enhance ventilation in the tunnels; the mechanical equipment is equipped with a vehicle-mounted gas automatic monitoring alarm and power-off system and an exhaust spark extinguisher, and the tunnel power consumption is transformed into "three specialties" and "two locking"; it can always grasp the change of gas concentration in the tunnel, eliminate hidden dangers, ensure the safety of tunnel construction, and provide reference for similar projects.

**Keywords:** Water conservancy project; Red-bed area; Diversion tunnel; High gas; Construction technology; Gas prevention and control; Jinjiliang Tunnel

## 1 概述

随着我国大型水利工程建设逐渐增多, 在其建设过程中面临着许多复杂的施工难题, 其中包含高瓦斯隧洞施工。鉴于高瓦斯隧洞施工具有技术难度大、安全风险高等特点, 目前针对高瓦斯隧洞施工的研究大多数是公路、铁路或煤矿, 而且此类隧洞的瓦斯处理施工技术已趋于成熟, 并形成了瓦斯隧洞施工规范与标准等<sup>[1-4]</sup>。但在水利工程建设中, 其面临的隧洞大多数为超深长距离引水隧洞, 导致无法精准预报深埋地层中的瓦斯

情况, 而且水利工程隧洞还具有造价低、工期紧、断面小的特点<sup>[5-8]</sup>, 因此, 针对红层地区中瓦斯隧洞施工防治技术进行的研究较少, 且大部分已有的瓦斯隧洞施工技术措施并不一定适用于红层地区水利工程引水隧洞施工。基于此, 笔者以亭子口灌区一期工程Ⅲ标中的金鸡梁高瓦斯隧洞施工为例, 从超前地质预报、瓦斯检测、施工通风、机械设备改造以及临时用电管理等方面对红层地区水利工程高瓦斯引水隧洞防治技术进行了分析总结, 旨在为后续工程施工积累经验。

亭子口灌区一期工程Ⅲ标范围内的金鸡梁隧

洞属于长隧洞,全长4 282.05 m,隧洞坡度为1/3 000的下坡,设计流量为 $48.35 \text{ m}^3/\text{s}$ ,采用圆形断面,断面面积为 $43\sim 46.57 \text{ m}^2$ 。整个洞段岩性以粉砂质泥岩为主,岩性软弱,为薄~中厚层状结构,岩层层间接合能力差,层面易脱层掉块,围岩类别主要为Ⅳ、Ⅴ类,稳定性较差;粉砂质泥岩吸水易崩解,具有弱膨胀性。在金鸡梁隧洞开挖过程中存在可燃性气体,100 m超前钻孔气体检测结果显示样品中可燃气体含量较高,尤其是甲烷( $\text{CH}_4$ )含量在53%以上,并含有少量的乙烷、丙烷、丁烷等,具有典型的天然气成分,单位时间最大绝对涌出量为 $4.87 \text{ m}^3/\text{min}$ ,被设计确定为高瓦斯工区。

鉴于瓦斯为地下空气中的有害气体,主要成份为甲烷,其特性包括:(1)爆炸性;(2)渗透性;(3)不稳定性;(4)窒息性。因此,根据对瓦斯特性进行的分析得知:瓦斯隧洞出现的灾害主要表现为中毒、窒息、燃烧、爆炸四种情况,其中最主要的安全问题为瓦斯爆炸。但瓦斯爆炸需要在特定的条件下才会发生,当瓦斯浓度为5%~16%时,混合空气中的氧气遇到火源便会发生爆炸,且其浓度在9.5%时爆炸威力最大;浓度在7%~8%时最易引燃。因此,对高瓦斯引水隧洞施工的关键技术进行研究非常必要。

## 2 金鸡梁隧洞施工关键技术

鉴于金鸡梁隧洞的开挖采用钻爆法施工,爆破后对围岩的破坏会产生裂隙,进而增加了瓦斯的溢出通道,有可能发生瓦斯突涌;同时,开挖形成的空腔以及超挖形成的凹陷等部位空气不易流通,通风条件较差;因此,未及时进行支护的开挖掌子面附近易产生瓦斯积聚而造成瓦斯浓度升高,导致发生瓦斯爆炸的可能性增大。

根据爆炸三角原理,针对高瓦斯隧洞的现场施工需要加强对瓦斯的检测与通风,防止瓦斯聚集,同时应加强火源的管控,防止瓦斯爆炸。因此,施工现场应采用的最关键的防治技术为超前探测、瓦斯检测、施工通风、隔绝火源及科学管理体系等。

(1)超前地质预报。金鸡梁隧洞围岩以泥岩夹砂岩为主,岩体软弱、破碎,自稳性差,瓦斯赋存于砂岩和各种构造裂隙带中,泥岩构成隔水层和天然气的盖层,这种特殊的组合结构决定了构造

破碎带既是瓦斯赋存的场所,也是瓦斯溢出的通道。因此,为确保高瓦斯隧洞的施工安全,金鸡梁隧洞采用的是超前地质钻孔的方式,用以探测掌子面前方的砂层、构造破碎带中瓦斯赋存的情况。

金鸡梁隧洞采用液压式坑道防爆钻机(ZY-750)进行超前地质钻探施工,湿式钻进作业,于掌子面中部及两侧布设了3个直径均为76 mm的钻孔,每循环超前探测长度为100 m,前后两次搭接的长度不小于8 m。钻进过程中,每钻进5 m即停钻、进行一次孔内可燃气体的跟踪检测,期间瓦检人员全程跟班旁站观察孔口排出的浆液变化情况,及时收集喷孔、顶钻等瓦斯动力现象并做好记录。钻孔作业时,在距拱顶20 cm处悬挂一台自动监测甲烷传感器和便携式瓦斯检测报警仪,随时监控掌子面附近的瓦斯浓度并及时报警;当瓦斯浓度超过1%时,停止钻孔作业并采取加强通风等措施以降低瓦斯的浓度;待瓦斯浓度降到1%以下时方可恢复打钻工作。

(2)瓦斯的检测与防控。为保证隧洞内的施工安全,采取了人工检测和自动检测相结合的方式对开挖工作面的 $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}$ 等气体浓度进行检测,随时掌握隧洞内的有毒有害气体浓度,防止施工过程中瓦斯突涌导致的瓦斯浓度超标,消除隐患,保障施工的正常进行及现场人员的生命财产安全。同时,当瓦斯浓度超标时及时报警,对隧洞内的瓦斯含量进行主动干预与控制,采取相应的措施,安全撤离,避免瓦斯爆炸等重大灾害的发生。

①人工检测瓦斯。人工检测瓦斯采用24 h两班轮换制,每班配备不少于2名专职瓦检员,按照50 m间距、以每2 h检测一次的频率对全隧洞进行24 h不间断地循环检测。专职瓦检员需配备高浓度、低浓度光干涉式甲烷测定器以及便携式甲烷检测报警仪,用以检测隧洞内的 $\text{CH}_4$ 和 $\text{CO}_2$ 等有毒有害气体的浓度。

在日常巡检过程中,瓦检员需检查拱顶、隧洞两腰部、两侧拱脚和拱底中点等周边20 cm处的瓦斯浓度;针对瓦斯容易聚积的顶拱、开挖形成的空腔以及超挖形成的凹陷等部位和易产生火源的电机、变压器、电器开关等部位附近进行重点监测;当需要爆破以及动火作业时应加强监测,对作业区域附近20 m范围进行瓦斯浓度检测。当瓦斯浓度超过0.5%时,应对掌子面随时进行检测,

发现异常情况时及时报告并采取有效措施以保证施工过程安全,严禁隧洞内一切动火作业。

瓦斯隧洞钻爆作业时,必须坚持“一炮三检制”和“三人连锁爆破制”,即装药前、爆破前、爆破后均应对相关区域进行检测,安全员、爆破员、专职瓦检员应同时检测作业区域20 m范围内的瓦斯浓度并填写一炮三检记录表。

②瓦斯自动监控系统。高瓦斯隧洞的检测采用KJ90NA自动监控系统,其可及时准确地对洞内各工作面的瓦斯浓度进行24 h全方位监控,进而保障了隧洞安全生产。该系统通过在隧洞内安装甲烷传感器、硫化氢传感器、风速传感器、一氧化碳传感器等对洞内的瓦斯、风速、风量进行监测,并将检测数据回馈到主控计算机进行数据分析处理。当检测到的瓦斯浓度超过标准限值时,布置在洞内的传感器和洞外监控中心将会自动声光报警,并通过机械设备上安装的开停传感器、馈电断路器对被控设备自动断电,实施瓦电闭锁。

项目部根据瓦斯隧洞的施工特点以及瓦斯中有毒有害气体的特性在隧洞内安装了2组传感器;在开挖掌子面安装了一组传感器;在距离回风流中的一定距离安装了一组传感器,并根据掌子面进尺调整传感器的位置。

③门禁系统与管理制。项目部在瓦斯隧洞口设置了门禁系统和一间安检室,每班实行双保安制度,配置了置物架、物品储物柜、门禁系统,悬挂了人员进洞须知、瓦斯隧洞洞内作业要求、进洞人员登记制度、安检人员值班制度。施工人员进洞时必须实行严格检查,更换防静电服、保安用扫描仪进行全身扫描、安全告知书签字、挂牌、登记后方可进洞。严禁将火柴、打火机、香烟、手机及其它可燃、易燃易爆等物品带入隧洞。实行一人一牌、一人一储藏柜、一人一检的“三一”要求。同时,安保人员负责瓦斯隧洞突发异常情况的报告工作,加强与瓦检员及通风工的联系,严格执行进出洞人员门禁清点制度。

(3)隧洞通风。瓦斯隧洞的施工采用压入式通风,在隧洞出口安装轴流式风机,通过柔性阻燃风筒将新鲜空气压入掌子面用以置换出隧洞内污浊的空气;在洞内拐弯处加装了弯管接头;对于单向掘进长度大于1 500 m的洞段,在其中间适当位置加装了接力风机和射流风机以保证供风量、

及时排除洞内的废气;同时,在掌子面出风口设专人对风量、风速进行定期监测;压入式通风机安装在隧洞口外20 m以上处,以避免吸入洞内排出的废气,且每台风机设置同等性能的备用风机以保证主风机发生故障时备用风机能够及时启用向隧洞内通风。同时,为避免开挖掌子面附近瓦斯积聚,选用FBYNo4.0/5.5型矿用隔爆轴流局部通风机实行局部加强通风的方法以消除瓦斯的积聚。

(4)机械设备的改造。该项目隧洞开挖采用钻爆法施工,利用渣土车出渣。施工过程中需要大量的内燃施工机械及设备,其主要为挖掘机、装载机、湿喷机、钢模台车等。为避免施工过程中施工机械产生火花,项目部对所有设备均进行了防爆改装,主要措施为加装车载瓦斯自动监控报警与断电系统以及尾气火花熄灭器,实时监测工作范围内的瓦斯浓度。当环境瓦斯浓度超过报警限值时设备自动熄火断电,进而从根本上切断了瓦斯爆炸的风险源,实现了安全施工。

①车载瓦斯自动监控报警与断电系统。车载瓦斯自动监控报警与断电系统主要包括车载式甲烷断电仪主机和低浓度甲烷传感器。在施工作业面安装的低浓度甲烷传感器实时采集现场环境的瓦斯浓度数据、经无线传输到系统控制中心进行分析处理。当作业环境中的瓦斯浓度达到0.3%时系统即自动进行报警,现场停止作业,现场专职瓦检员进行瓦斯浓度检测,待解除隐患后再进行作业;若现场瓦斯浓度急剧上升、浓度达到0.5%时机械自动实现闭锁,关闭总电源,防止机车因火花造成瓦斯燃烧或爆炸事故。

②尾气火花熄灭器。尾气火花熄灭器安装在设备排气管出口处,其作用为消除可能排出的火花。尾气火花熄灭器是在罩内排气出口处设置阻火栅栏用以消除排气引发的危险高温和排气火花。尾气火花熄灭器安装后不改变设备的动力特性。

(5)临时用电。瓦斯隧洞的施工供电必须做到“三专”“两闭锁”,即开挖工作面的局部通风机供电必须设专用变压器、专用线路、专用开关;对于局部通风机和工作面的电气设备必须装设风电闭锁和瓦电闭锁装置以保证局部通风机停止运转

(下转第102页)

表 6 单个 3.2 MW 光伏子阵采用不同光伏组串数经济比较表

项目	26 片串联方案			28 片串联方案	
	单价 / 元	工程量	总价 / 万元	工程量	总价 / 万元
组件 / 片		6 682		6 664	
支架 / t	7 500	138	103.5	135	101.25
支架基础 + 施工(单根桩)	140	2 570	35.98	2 380	33.32
直流电缆 + 穿管 + 施工 / km	51 000	37.99	193.75	37.8	192.78
合计 / 万元			333.23		327.35

案比采用 26 片串联方案可节省费用约 5.88 万元。按 1 GW 项目测算,可节省直接成本约 1 840 万元,同时可减少光伏阵列用地近 5%,其经济性明显较好。

笔者针对高海拔光伏电站光伏组件串联数设计进行了研究,在综合考虑某项目海拔高度、辐照度、环境温度、光伏组件温度等影响因素的前提下,结合国标及 IEC 相关规程规范,提出了计算光伏组件串联数的优化综合方法,旨在为类似情况的光伏电站组串设计提供参考与借鉴。

#### 参考文献:

(上接第 95 页)

或隧洞内瓦斯超限时能够立即自动切断隧洞中电气设备的电源,防止爆炸事故的发生。

#### 4 结 语

亭子口灌区一期工程Ⅲ标金鸡梁隧洞属于高瓦斯隧洞,自发现瓦斯后,项目部针对现场施工的具体情况,将所采取的各项施工技术措施落实到位,施工过程未发生安全事故,并在施工过程中对防治方案不断进行优化,目前防治措施已趋于完善,防治效果亦有明显提升。在红层地区高瓦斯引水长隧洞施工过程中,采用超前地质钻孔进行瓦斯的释放与预报;利用人工检测与自动监测相结合的方式加强对瓦斯的监控;按照“一备一用”的要求配置轴流式风机压入式通风,并在特殊部位采取局扇消除了瓦斯积聚,保证了供风量并及时排除了洞内废气;对机械设备加装了车载瓦斯自动监控报警与断电系统以及尾气火花熄灭器;对隧洞内的用电设备进行了“三专”“两闭锁”改造,严控隧洞火花以及火源的产生。该工程瓦斯隧洞的施工以“强通风、控火源,重监测、防涌出”为原则,认真贯彻“先测后进,有疑必测,不明不进”的指导方针,将“一通二防”(通风、防治瓦斯、防火)作为安全工作的重点,强化日常监管,零容

- [1] 王忆麟. 光伏电站中光伏组件串联数的新设计思路[J]. 太阳能,2021,42(1):62-67.
- [2] 杨旭,易坤,左超. 光伏电站中光伏组件串联数的优化设计[J]. 太阳能,2021,42(3):68-74.
- [3] Photovoltaic system performance - Part 2: Capacity evaluation method; IEC/ TS 61724-2-2016[S].
- [4] 李善寿,张兴. 改进的光伏组件工程数学模型建模方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(9):108-112.
- [5] 光伏发电站设计规范,GB 50797-2012[S].

#### 作者简介:

李 翔(1987-),男,四川成都人,副高级工程师,硕士,从事新能源发电设计工作。  
(编辑:李燕辉)

忍落实通风、火源、监测关键“三要素”,确保了现场施工安全,加快了施工进度。

#### 参考文献:

- [1] 肖广智. 我国几类特殊地质条件铁路隧道修建问题与对策概述[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(11):1748-1758.
- [2] 吴光松,肖昌,赵瑞桐. 瓦斯隧道施工防灾设计与监控方案[J]. 西部探矿工程,2019,31(1):174-176.
- [3] 陈涛,杨中委. 浅谈地铁高瓦斯隧道信息化智慧平台建设[J]. 四川水力发电,2019,38(增刊 1):65-70.
- [4] 孙龙俊. 瓦斯通风技术在高速公路隧道建设中的应用[J]. 绿色环保建材,2021,8(9):93-94.
- [5] 王文军. 小断面水利隧洞高瓦斯段施工控制分析[J]. 浙江水利水电学院学报,2023,35(4):53-58.
- [6] 王睿锋. 引水瓦斯隧洞施工机械与用电线路改装[J]. 中国高新科技,2023,30(10):91-93.
- [7] 任明武. 夹岩水利工程瓦斯突出隧洞综合防突技术研究[J]. 施工技术,2021,50(7):85-89,93.
- [8] 高俊. 水工高瓦斯深埋长隧洞施工关键技术研究[J]. 城市建设理论研究(电子版),2022,12(23):103-105.

#### 作者简介:

滕 黎(1996-),男,湖北恩施人,助理工程师,工程硕士,从事水利工程项目施工技术与管理工作;  
杨 帆(1994-),男,四川南充人,助理工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与安全管理工作;  
何 诚(1978-),男,四川南充人,会计师,从事水利工程项目管理与资金管理。  
(编辑:李燕辉)