

中文引用格式:王立川,肖红武,安丰华,等. 非稳定含煤地层隧道施工中瓦斯异常涌出防控技术[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(4): 85-93.

英文引用格式:Wang Lichuan, Xiao Hongwu, An Fenghua, et al. Prevention and control technologies for abnormal gas emission in tunnel construction through unstable coal-bearing strata[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(4): 85-93.

非稳定含煤地层隧道施工中瓦斯异常涌出防控技术*

王立川¹正高级工程师, 肖红武²正高级工程师, 安丰华^{**3,4}副教授,

刘延龙²正高级工程师, 王兆丰⁴教授, 周宗青⁵教授

(1 中铁十八局集团有限公司, 天津 300222; 2 中铁二十三局集团有限公司, 四川 成都 610072;

3 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 4 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 5 山东大学 齐鲁交通学院, 山东 济南 250002)

中图分类号:X936;U25

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.04.0133

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB2302403-05);国家自然科学基金资助(52474266, 52174172);中铁二十三局集团有限公司科技研发计划(2019-10C)。

【摘要】 为治理非稳定含煤地层条件下隧道瓦斯异常涌出风险,以成昆铁路扩改项目保安营1号隧道1号斜井工区为对象,通过现场测试、数值模拟和工程试验相结合的方法,研究瓦斯涌出特征、异常涌出风险判识方法及防控技术。结果表明:隧道瓦斯源于洞身穿过地层中的不稳定煤层、碳质岩,围岩含煤、含碳情况及地质体破碎程度与瓦斯涌出息息相关;可采用物探+钻探综合测试方法,以不良地质体、岩性变化、钻孔瓦斯体积分数及涌出量作为多元辨识指标,确立瓦斯异常涌出超前判识方法;针对非稳定赋存瓦斯异常涌出风险,提出“钻墙”高效截流防治技术,在隧道两侧钻场内施工围绕掘进隧道的“钻墙”钻孔,抽截煤岩瓦斯。现场应用结果证明:此方法有助于减少施工干扰,提高进尺速度。

【关键词】 非稳定含煤地层; 隧道施工; 瓦斯异常涌出; 防控技术; 超前判识方法; 截流抽采

Prevention and control technologies for abnormal gas emission in tunnel construction through unstable coal-bearing strata

Wang Lichuan¹, Xiao Hongwu², An Fenghua^{3,4}, Liu Yanlong²,

Wang Zhaofeng⁴, Zhou Zongqing⁵

(1 China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 2 China Railway 23rd Bureau Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610072, China; 3 School of Mechanics

and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China;

4 School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003, China; 5 School of Qilu Transportation, Shandong University, Ji'nan Shandong 250002, China)

Abstract: To prevent the risk of abnormal gas emissions during tunnel excavation through unstable coal-bearing strata, this study focused on the inclined shaft section of Baoanying No. 1 Tunnel in the Chengdu-

* 文章编号:1003-3033(2026)04-0085-09; 收稿日期:2025-11-14; 修稿日期:2026-02-05

** 通信作者:安丰华(1984—),男,山东临沂人,博士,副教授,主要从事工程管理、矿山灾害防治方面的研究。E-mail: fenghuazm009@126.com。

Kunming Railway Expansion Project. Through on-site monitoring, numerical simulation, and engineering application, gas emission patterns, risk identification methods, and prevention technologies were investigated. The results indicate that tunnel gas originates from unstable coal seams and carbonaceous rocks within the strata, and gas emissions correlate strongly with coal/carbon content in surrounding rocks and the degree of geological fracturing. Then an integrated geophysical-geological drilling approach was employed to establish an advanced identification method for abnormal gas emissions. This method utilizes multiple indicators: unfavorable geological bodies, lithological variations, borehole gas concentrations, and emission rates. A "borehole curtain" interception technique was developed for high-efficiency gas risk prevention and control. Boreholes arranged in curtain patterns were drilled from both side chambers to intercept and extract coal-rock gas ahead of the advancing tunnel face. Field applications demonstrate that this technology reduces construction interference and increases advance rates.

Keywords: unstable coal-bearing strata; tunnel construction; abnormal gas emission; control technology; advanced identification method; interception and drainage

0 引言

伴随国家出疆、入藏、西部陆海新通道等战略骨干通道建设,隧道建设数量呈大幅增长趋势^[1],瓦斯隧道建设愈发普遍。瓦斯隧道施工安全事故多为较大以上事故,且主要集中在西南地区^[2],多次造成人员伤亡和巨额经济损失。同时,受地调和勘察限制,瓦斯隧道前期概算费用不易确定和控制^[3],瓦斯防治相关投入会引起隧道建设成本大幅增加^[4],给隧道建设带来诸多问题。通风是治理隧道瓦斯的基本方法,为提高通风效果、避免瓦斯积聚,在通风设施^[5-6]、布置参数^[7]优化等方面已有较多研究。但强化施工通风不能解决高瓦斯、瓦斯突出隧道遇到的瓦斯大量涌出、突出动力灾害问题,近年来,在瓦斯预抽^[8]、割缝^[9]、压裂增透^[10]、抽排参数影响^[11]、加固煤岩防突^[12]等多方面开展了瓦斯治理研究,进一步提高了瓦斯隧道治理能力。

西南很多矿区如宝鼎矿区^[13]、六盘水煤田^[14]等为煤层群赋存条件,层次多而薄,厚度变化大,大多属于非稳定赋存的煤层。在西南地区多个隧道也发现碳质岩带来局部瓦斯大量积聚^[15-16],导致非煤

地层瓦斯风险。成昆铁路扩改项目米(易)-攀(枝花)段保安营1号隧道所处的宝鼎矿区含煤地层为三叠系上统,煤层间距在3.0 m以下的近距离煤层居多,且煤层间岩性多为泥岩、碳质泥岩,具备含气条件。由于煤/碳质岩赋存不稳定,造成瓦斯赋存不稳定、探查困难、常规钻孔施工多、排放周期长等问题,导致隧道施工进度迟缓,因此,需要构建适应于非稳定含煤地层条件下隧道瓦斯治理技术。

鉴于此,笔者拟以保安营1号隧道1号斜井工区为对象,分析瓦斯来源及其涌出特征,确定异常瓦斯涌出区超前判识方法,形成适用于非稳定含煤地层中隧道施工的瓦斯异常涌出防控技术,以期保障安全高效施工。

1 保安营1号隧道工程背景

保安营1号隧道全长13 326 m,设计为80 km的单线客货共线电力牵引铁路隧道,最大埋深887 m,属大埋深特长隧道。为满足工期、施工通风、防灾救援等需求,全隧3共设1号(主2 460 m/副2 432 m)、2号(1 808 m)、3号(884 m)3座斜井,如图1所示,其中,1号斜井穿越三叠系上统宝鼎组下

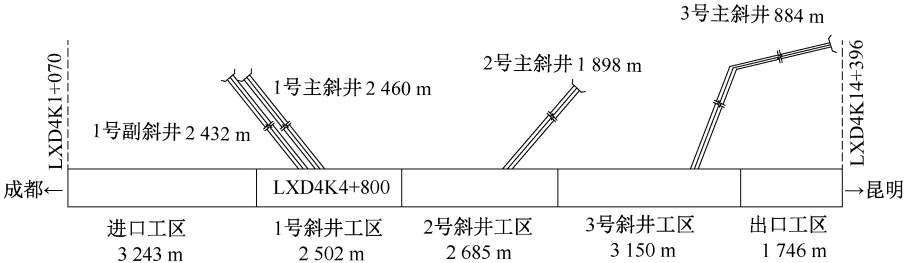


图1 保安营1号隧道工区划分

Fig. 1 Division of working sections of Baoanying No. 1 tunnel

段(T3bd1)含煤地层。

1号主斜井施工至X1DK1+570处时,开挖工作面左侧边墙岩层顺滑,出露深黑色碳质页岩,瓦斯大量涌出,涌出点瓦斯体积分数达98%,工作面瓦斯体积分数达4.3%。此后1号主、副斜井施工中多次发生瓦斯异常涌出,导致工作面瓦斯超限、施工停止,需要提出有针对性的瓦斯异常涌出防控技术,以超前判识和高效治理瓦斯异常涌出区。

2 瓦斯异常涌出区超前判识防控技术

为避免常规排放钻孔带来钻孔工程量大、治理周期长、迟滞施工进度等问题,需分析瓦斯来源及其涌出特征,超前判识前方可能出现大量瓦斯涌出的异常区域,以提高瓦斯治理效率。

2.1 瓦斯涌出来源及特征

2.1.1 瓦斯涌出来源分析

保安营1号隧道正洞穿越三叠系上统宝鼎组下段(T3bd1),包括砂岩、页岩互层、碳质页岩、砾岩及煤。隧道钻探揭示,煤层多以薄层状(煤线)及少量团块状分布于砂岩及页岩中,分布及厚度不稳定,部分地段见碳质页岩分布。

1号主、副斜井施工中多次遭遇不稳定含煤地层,在开挖工作面揭露煤段采集煤样进行了实验室参数测试,结果表明:煤样挥发分为35.66%~39.21%,属于低中变质程度烟煤,纯煤的最大吸附量 $21.09\text{ m}^3/\text{t}$,煤样坚固性系数0.32,属Ⅲ类软煤。

为确定1号斜井涌出气体成分,在1号副斜井开挖工作面(FX1DK0+836处)2号钻孔采样进行气体成分测试,结果表明:1号斜井涌出瓦斯主要以 CH_4 为主,占比约为90%,还包括少量 N_2 、 CO_2 ,几乎不含重烃类气体。

通过以上分析可初步确定,隧道涌出瓦斯主要是煤及碳质岩生成瓦斯,含煤/碳质地层分布是影响瓦斯赋存、涌出的关键因素之一。这在鹁鸽山隧道^[15]、川藏铁路部分隧道^[17]、南大巴山地区隧道^[18]等施工过程中已经证实,非稳定含煤地层瓦斯具有随机性强、难以查明特性,给施工安全带来极大风险。

为进一步厘清瓦斯源于裂隙存储空间还是含气储层,观察瓦斯涌出与围岩条件变化关系发现,揭露有碳质岩或煤线的表面可测到高浓度瓦斯,碳质岩内探孔瓦斯体积分数达30%以上,而花岗岩探孔内瓦斯体积分数相对较低。另外,瓦斯涌出情况与围岩中碳质岩分布密切相关。在主斜井X1DK0+572

处,工作面左右拱脚积水处有少量瓦斯气泡冒出,表明底板有气源层。向前开挖8 m后,在工作面拱脚发现有碳质页岩线出露,中部有少许碳质页岩线。因此,瓦斯源于隧道斜井穿过地层中的不稳定煤层、碳质岩,瓦斯高效治理需探查前方地质条件。

2.1.2 瓦斯涌出特征

针对储层、瓦斯分布不均匀,施工中需加强超前钻探和物探等综合预报方法^[15]。为进一步分析瓦斯涌出特征,观测不同岩性条件下钻孔流量。在副斜井FX1DK0+836处施工2个测试钻孔,其中,1号钻孔穿过煤线及碳质页岩,3号钻孔位于开挖工作面右侧仅见少量煤线,以碳质页岩为主;在主斜井X1DK0+798处施工4号钻孔,此处隧道围岩主要为花岗岩;在副斜井FX1DK0+797处施工5号钻孔,此处出现薄煤层、煤线和碳质页岩。不同岩性条件下钻孔瓦斯涌出如图2所示。可以看出,钻孔周边含煤/碳质岩条件对瓦斯涌出影响显著。1号及5号钻孔在含煤条件下瓦斯流量大,且前期衰减快、后期仍有一定涌出,而3号钻孔很快完全衰减,5号钻孔无瓦斯流量。因此,钻孔瓦斯流量情况对开挖工作面前方煤层赋存情况有预警作用,在钻孔瓦斯流量较大时可判断开挖工作面前方附近有碳质岩存在及瓦斯异常涌出风险。

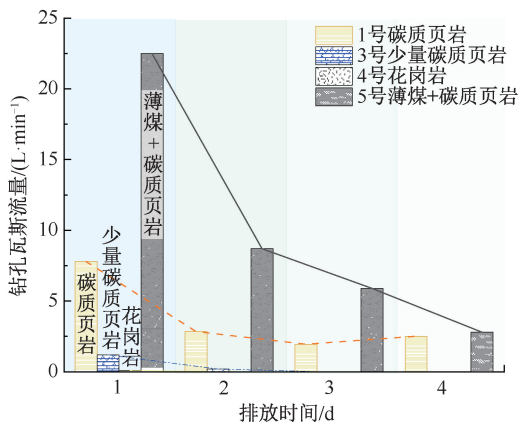


图2 1号斜井不同岩性钻孔流量观测

Fig. 2 Flow change of borehole in No. 1 auxiliary inclined well

为分析探孔瓦斯浓度指标对隧道瓦斯涌出的指示作用,跟踪考察1号主斜井、副斜井开挖工作面探孔瓦斯浓度。其中,1号、3号探孔靠近开挖工作面两帮,2号探孔位于开挖工作面中部。探孔瓦斯体积分数与回风瓦斯变化如图3所示。可以看出,隧道瓦斯具有阶段性特点,且探孔瓦斯浓度与回风瓦斯浓度有相似变化趋势。在探孔瓦斯浓度高时开挖

工作面风流瓦斯浓度高,探孔浓度降低时开挖工作面风流瓦斯浓度下降。因此,探孔体积分数及变化能够作为瓦斯涌出情况的重要指标。此外,各个探孔瓦斯浓度变化有阶段性差异,表明隧道瓦斯涌出具有不均匀性,应对不同方位布置的超前探孔综合

分析。同时,2号探孔作为向前探测的主探孔,更快进入前方含瓦斯岩层,造成瓦斯体积分数普遍高于1号、3号探孔。在后续研究中可进一步分析探孔空间分布对瓦斯分布及涌出预测影响,以优化探孔布置方案。

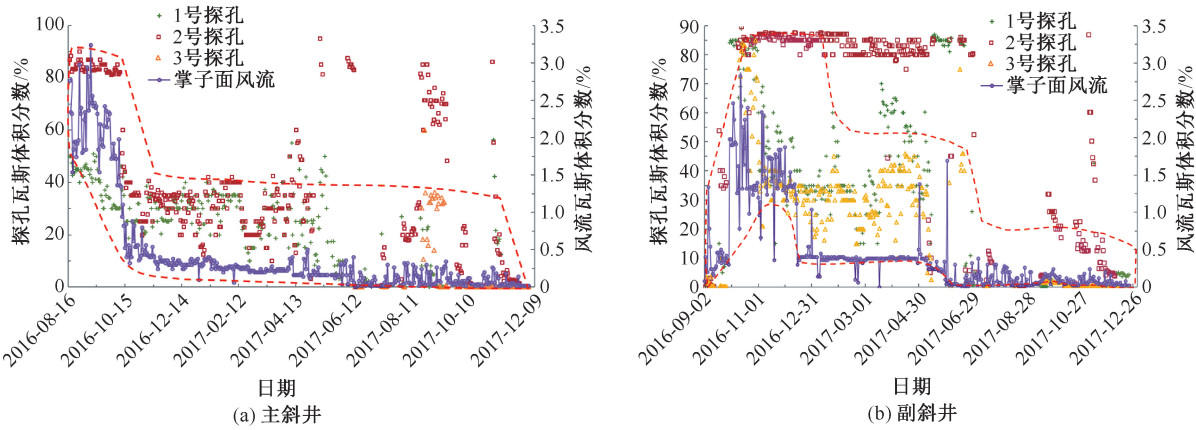


图3 1号主、副斜井探孔瓦斯体积分数与回风瓦斯趋势

Fig. 3 Gas volume fraction trend of exploration hole and return air concentration in No. 1 main and auxiliary inclined shafts

2.2 瓦斯异常涌出超前判识方法

研究表明:煤层厚度、瓦斯含量等是分析隧道施工瓦斯灾害风险的关键评价指标^[19],但对非稳定含煤地层难以适用。瓦斯生-储条件、地质体破碎情况都是决定瓦斯涌出的先决条件。基于此,建立以物探超前探测地质体、开挖工作面前方岩性钻探分析与钻孔瓦斯涌出动态变化测试相结合的综合超前判识方法。

2.2.1 地质异常体超前探测

研究表明:构造裂隙是碳质层主要储存和运移通道^[16-18]。含碳岩层相对于花岗岩等岩体破碎程度高,含较多沟通裂隙的煤岩体是发生瓦斯异常涌出的必要条件。因此,可利用物探方法超前探测前方地质异常体,特别是破碎区域。在1号主斜井、副斜井每150 m进行一次隧道地震波预报勘探(Tunnel Seismic Prediction, TSP),探测结果表明:不同里程段隧道围岩完整性、破碎程度会有所变化。部分里程段隧道围岩完整性较差,岩体较破碎,经常出现节理裂隙或局部节理裂隙较发育。对探测到的围岩完整性相对较差、岩体相对较破碎、节理裂隙相对较发育地段判断为地质异常体,具有瓦斯大量涌出风险。在1号主斜井施工过程中,发现X1DK1+570、X1DK0+910、FX1DK0+836等里程处存在岩体相对破碎、节理裂隙相对发育的探测结果,在掘进时

发生瓦斯涌出显著增大。

2.2.2 前探钻孔瓦斯涌出随钻测试装置

通过物探超前探测可提前发现开挖工作面前方存在裂隙发育的地质异常体,再进一步利用超前探孔测试其瓦斯涌出特性。钻孔瓦斯体积分数和流量是表征瓦斯涌出特性的直接指标。其中,瓦斯体积分数可在钻孔内直接进行测量。为快速、准确地测试钻孔瓦斯流量,设计不退钻杆条件下钻孔瓦斯流量随钻测试装置,如图4所示。

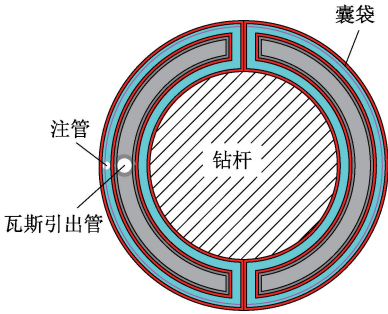


图4 随钻测试瓦斯流量装置

Fig. 4 Gas flow rate device for while-drilling testing

2.2.3 瓦斯异常涌出区超前判识方法

结合地质预报、超前探孔、瓦斯涌出测试等多种手段,建立瓦斯异常涌出区超前判识方法及应对措施,流程如图5所示。首先,采用TSP203地震波地质预报系统,超前探测开挖工作面前方130 m范围

内构造破碎带、富水带等不良地质体的界面位置;其次,在物探的基础上,在开挖工作面布置 3 ~ 5 个直径 108 mm、深度 125 m 的超前钻孔,测定钻孔施工过程中的瓦斯体积分数、瓦斯流量、瓦斯动力现象等情况;然后,利用瓦斯自动监测监控系统,收集和分析风流瓦斯涌出量资料;最后,综合分析物探信息、

钻探资料和隧道瓦斯涌出动态变化特征,超前探测和判识开挖工作面前方瓦斯异常区及其危险程度。根据上述方法构建多元辨识指标,以实现非稳定含煤地层瓦斯异常涌出区超前预测预警,并确定 4 种瓦斯工况条件下相应的治理措施。在超前探孔瓦斯涌出量超过 0.1 m³/min 时,需要施工截流钻孔进行抽排。

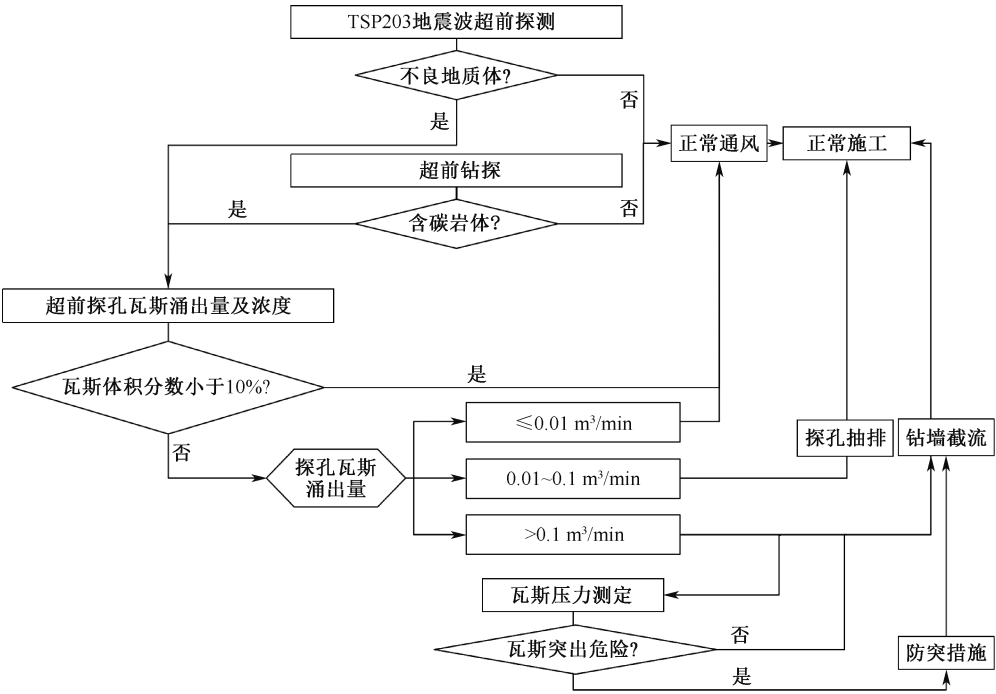


图 5 瓦斯异常涌出超前判识方法流程

Fig. 5 Flowchart of advanced identification method of abnormal gas emission

3 “钻墙”高效截流瓦斯防控技术

3.1 “钻墙”高效截流瓦斯技术原理及设计

目前,隧道瓦斯治理可采用密集钻孔促抽、水力化措施增透等技术加强抽采效果。但这些方法多是针对于有稳定赋存的煤层瓦斯。为减少工期消耗、施工干扰和治理成本,提出“钻墙”高效截流瓦斯防控技术。在不影响隧道施工的情况下,减少瓦斯涌出、消除瓦斯异常涌出,形成适用于非稳定含煤地层的瓦斯异常涌出防控技术。钻孔设计如图 6 所示,在开挖工作面 10 m 后隧道两侧交错施工钻场,同侧钻场间距 125 m,为避免应力集中,两侧钻场前后错开 30 m。在每个钻场内施工 16 个直径 108 mm 的钻孔,使之在隧道轮廓线外(约 4 m)岩(煤)体内形成一堵弯曲的“钻墙”,“包裹”要掘进的隧道,抽截煤岩瓦斯,且钻孔施工、抽采都在两侧钻场内,对开挖工作面施工影响小。

为进一步分析“钻墙”截流瓦斯技术原理,构建

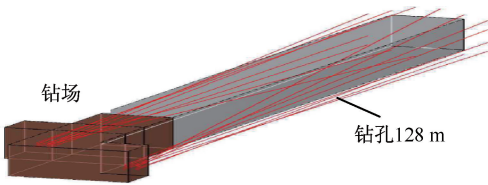


图 6 “钻墙”截流瓦斯钻孔布置

Fig. 6 Layout of "drill wall" for gas interception

隧道周边煤岩体瓦斯运移模型,利用 COMSOL 数值计算软件仿真分析了截流抽采后周边煤岩体瓦斯流场变化。

3.1.1 煤岩瓦斯运移模型

假设隧道周边为含气煤岩,煤岩内瓦斯气体运移连续性方程为^[20]:

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g V_g) = 0$$

(1)

式中: m 为瓦斯含量,kg/m³; t 为时间,s; ρ_g 为瓦斯密度,kg/m³; V_g 为瓦斯的渗流速度,m/s。

煤岩中瓦斯包括吸附和游离 2 部分,其中,煤岩孔隙裂隙内游离的瓦斯在压力梯度下运动时符合达

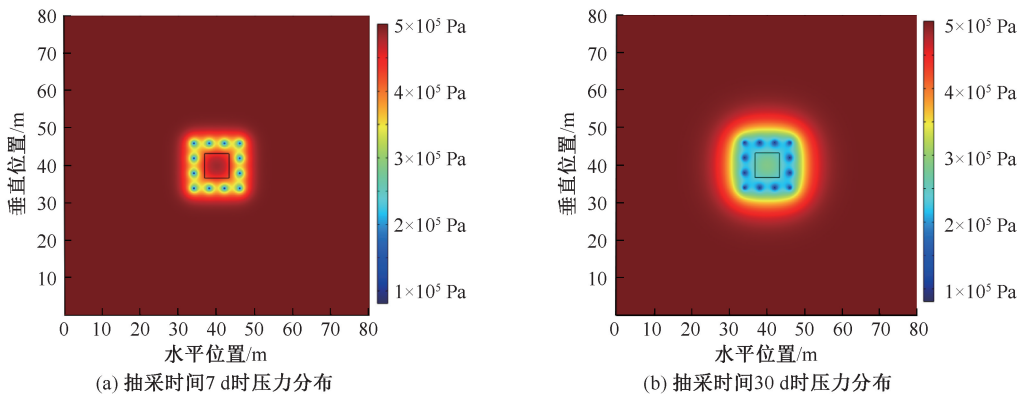


图 8 开挖工作面前方截流钻孔不同预抽时间瓦斯压力分布

Fig. 8 Gas pressure distribution at different pre-pumping times in interception borehole in front of excavation face

体瓦斯压力有明显降低,在隧道开挖之后“钻墙”钻孔仍然会有截流抽采保护作用。以开挖工作面开挖 7 天后为例,开挖工作面截流钻孔继续抽采和不再

接抽时瓦斯分布如图 9 所示,从图 9 可以看出,“钻墙”钻孔截流作用能够改善隧道周边流场,在隧道喷浆、衬砌前后减少瓦斯涌出。

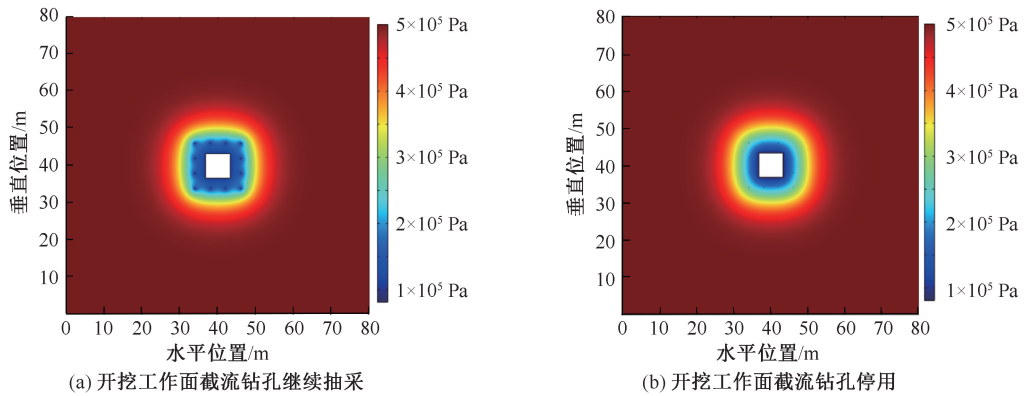


图 9 开挖工作面开挖 7d 后瓦斯压力分布

Fig. 9 Gas pressure distribution after 7 days of excavation at excavation face

3.3 超前辨识及截流抽采防控技术应用效果

在保安营 1 号隧道应用了瓦斯异常涌出防控技术,通过实施瓦斯异常涌出超前判识法,在 X1DK0+630、X1DK0+550 等多个区域判识前方有瓦斯异常涌出风险,实施“钻墙”截流抽采钻孔对前方岩体进行预抽、截流,如 X1DK0+630 处钻孔抽采瓦斯体积分数达 37%,抽采流量达 2.35 m³/min。

瓦斯监控数据表明:实施“钻墙”钻孔截流瓦斯后,开挖工作面及回风流瓦斯体积分数在正常通风条件下都小于 0.5%,未发生异常瓦斯涌出情况。工作面的瓦斯抽采循环长度由原来的 30 m 提高到 125 m,大大减少了循环次数,用于钻孔施工和瓦斯抽采的停工时间大幅度减少,工作面月进度由原来的 60 m 提高到 100 m,达到了安全高效掘进目的。

4 结 论

- 1) 隧道瓦斯源于隧道斜井穿过地层中的碳质岩、不稳定煤层,工作面前方碳质页岩(煤线)夹层厚度是决定瓦斯涌出的主要因素。同时,围岩含碳情况、地质体破碎情况与瓦斯涌出高度关联。
- 2) 采用物探+钻探综合手段,以不良地质体、岩性变化、瓦斯涌出量及体积分数共 4 个指标作为多元辨识指标,建立了非稳定含煤地层瓦斯异常涌出区域的判识方法和 4 种条件下应对措施。在探孔瓦斯涌出量超过 0.1 m³/min 时,施工截流钻孔进行抽排。
- 3) 为适应瓦斯非稳定赋存条件,提出“钻墙”高效截流瓦斯技术,数值分析表明:在两侧钻场施工钻孔抽截开挖工作面煤岩瓦斯,能够大幅度消减隧道涌出瓦斯量。

4) 现场应用表明:“钻墙”高效截流抽采技术可有效避免工作面瓦斯异常涌出,减少施工干扰,工作面月进度由原来的 60 m 提高到 100 m,形成的瓦斯异常涌出防控技术可为类似地质条件下隧道瓦斯治理提供参考。

参考文献

- [1] 赵树磊, 孙兵, 陈稳干, 等. 超高海拔隧道施工人员生理指标变化及劳动强度研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(4):239-246.
Zhao Shulei, Sun Bing, Chen Wen'gan, et al. Physiological indicators and labor intensity of tunnel construction workers at ultra-high altitude[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4):239-246.
- [2] 王海洋, 赵树磊, 陈祥, 等. 我国隧道瓦斯事故统计及影响因素分析[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(4):34-40.
Wang Haiyang, Zhao Shulei, Chen Xiang, et al. Statistics and influencing factors analysis of tunnel gas accidents in China[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(4):34-40.
- [3] 张丹. 铁路隧道高瓦斯工区施工技术经济现状分析[J]. 铁路工程技术与经济, 2021, 36(6):46-48.
Zhang Dan. Analysis on the current situation of construction technology and economy in high gas work area of railway tunnel[J]. Railway Engineering Technology and Economy, 2021, 36(6):46-48.
- [4] 夏正君, 李丽. 西南地区大断面瓦斯铁路隧道专项措施及费用分析[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(增刊1):1-6.
Xia Zhengjun, Li Li. Special measures and cost analysis of large-section gas railway tunnel in southwest China[J]. Modern Tunnel Technology, 2023, 60(S1):1-6.
- [5] 王阅章. 基于正交试验的瓦斯隧道施工通风方案优化研究[J]. 中国公路学报, 2021, 66(12):395-403.
Wang Yuezhong. Research on optimization of ventilation scheme for gas tunnel construction based on orthogonal test[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 66(12):395-403.
- [6] 任松, 牟其博, 李玉, 等. 脉动通风在螺旋隧道施工期的应用研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(11):144-151.
Ren Song, Mou Qibo, Li Yu, et al. Application research of pulsed ventilation construction period of spiral tunnel[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(11):144-151.
- [7] 冉健, 王林峰, 李鸣, 等. 考虑开挖过程的瓦斯隧道施工通风影响机制:以鸡鸣隧道为例[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2):804-811.
Ran Jian, Wang Linfeng, Li Ming, et al. Influence mechanism of gas tunnel construction ventilation considering excavation process: a case study of Jiming tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(2):804-811.
- [8] 龙港, 黄飞, 李树清, 等. 大断面公路隧道穿越构造煤层瓦斯抽放技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(增刊1):486-492.
Long Gang, Huang Fei, Li Shuqing, et al. Study on gas extraction technology of cross-structural coal seam in large-section highway tunnel[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(S1):486-492.
- [9] 邓华易. 超高压水力割缝增透技术在隧道大断面快速揭煤中应用研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(9):118-120.
Deng Huayi. Application of ultra-high pressure hydraulic slit permeation enhancement technology in rapid coal removal in large section of tunnel[J]. Coal Technology, 2022, 41(9):118-120.
- [10] 李文树, 周东平, 郭臣业, 等. 大断面瓦斯隧道“五步法”预测揭煤技术应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(1):262-268.
Li Wenshu, Zhou Dongping, Guo Chenye, et al. Research on the application of "five-step method" prediction of coal removal technology for large-section gas tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(1):262-268.
- [11] 任宏伟. 穿突出煤层隧道瓦斯抽排参数对抽排效果的影响分析:以扎西隧道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(2):257-264.
Ren Hongwei. Analysis on the influence of gas extraction parameters on pumping effect of tunnel through outburst coal seam: a case study of Tashi tunnel[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(2):257-264.
- [12] 杨玉容, 黄红婷, 晏启祥, 等. 铁路隧道穿越瓦斯煤系地层的旋喷围桩防突工法探析[J]. 隧道建设(中英文),

2022, 42(7): 1 300–1 307.

Yang Yurong, Huang Hongting, Yan Qixiang, et al. Analysis on the anti-outburst construction method of rotary grouting enclosure pile for railway tunnel crossing gas coal measure strata[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(7): 1 300–1 307.

- [13] 李永金. 宝鼎矿区采煤沉陷区损毁特征及治理措施研究[J]. 煤炭技术, 2021, 40(5):128–131.

Li Yongjin. Study on damage characteristics and management measures of coal mining subsidence area in Baoding mining area[J]. Coal Technology, 2021, 40(5):128–131.

- [14] 高为, 韩忠勤, 金军, 等. 六盘水煤田煤层气赋存特征及有利区评价[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(5):81–89.

Gao Wei, Han Zhongqin, Jin Jun, et al. Occurrence characteristics and assessment of favorable areas of coalbed methane exploration in Liupanshui coalfield[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(5):81–89.

- [15] 刘家民, 杨枫, 李晓洪, 等. 汶马高速公路鹁鸪山隧道非煤地层瓦斯赋存特性与风险防控研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(4):172–177.

Liu Jiamin, Yang Feng, Li Xiaohong, et al. Study on occurrence characteristics and risk prevention measures of gas in non-coal strata in Zhegushan tunnel on Wenchuan-Maerkang expressway[J]. Modern Tunnel Technology, 2023, 60(4): 172–177.

- [16] 袁传保, 张广泽, 宋章. 川西复杂隧道特殊瓦斯灾害成因及特征研究[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(8):29–34.

Yuan Chuanbao, Zhang Guangze, Song Zhang. Study on the causes and characteristics of special gas disasters in complex tunnels in western Sichuan[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(8):29–34.

- [17] 王朋, 宋章, 张广泽, 等. CZ 铁路隧道重难点地质问题及减灾防治对策[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(12):89–94.

Wang Peng, Song Zhang, Zhang Guangze, et al. Important and difficult geological problems of tunnel and its disaster reduction and prevention measures for CZ railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(12):89–94.

- [18] 张营旭, 陈明浩, 苏培东, 等. 南大巴山地区隧道有害气体特征分析[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(12):86–90, 109.

Zhang Yingxu, Chen Minghao, Su Peidong, et al. Analysis of harmful gas characteristics in tunnels in southern Dabashan area[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(12):86–90, 109.

- [19] 翟强, 顾伟红, 赵映璿. 基于未确知测度理论的隧道施工瓦斯灾害风险评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(3):803–812.

Zhai Qiang, Gu Weihong, Zhao Yingying. Risk assessment of gas disaster in tunnel construction based on unascertained measurement theory[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(3):803–812.

- [20] 李志强, 鲜学福, 姜永东, 等. 地球物理场中煤层气渗流控制方程及其数值解[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊1):3 226–3 233.

Li Zhiqiang, Xian Xuefu, Jiang Yongdong, et al. Seepage control equation of coalbed methane in geophysical field and its numerical solutions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1):3 226–3 233.

- [21] 赵文杰, 赵洪宝, 荆士杰. 深部储层岩石渗流的滑脱效应研究:以煤和砂岩为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(9):2 189–2 200.

Zhao Wenjie, Zhao Hongbao, Jing Shijie. Research on the slippage effect of deep reservoir rock seepage: a case study of coal and sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(9):2 189–2 200.

- [22] Liu Shimin, Harpalani S. Permeability prediction of coalbed methane reservoirs during primary depletion [J]. International Journal of Coal Geology, 2013, 113: 1–10.



作者简介: 王立川 (1965—), 男, 河南孟州人, 博士, 正高级工程师, 主要从事隧道与地下工程的建设技术、缺陷与病害成因分析和整治技术、爆破振动与冲击波传播规律等方面的工作。E-mail:wlc773747@126.com。