

文章编号: 1674—8247(2024)02—0039—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.02.007

隧道突出气体特征及形成机理研究

强新刚 袁东 何平 岳志勤 张广泽

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:为研究高原隧道不明突出气体特征及形成机理,本文采用资料收集、现场调查测试与监测、室内岩石学、地球化学试验等方法与手段,研究突出气体赋存地质环境,揭示突出气体成分、演化过程及演化规律,结合区域地质条件演化过程,建立突出气体形成、演化模式。研究结果表明:(1)该横洞及周边地区不具备发育大规模油气资源的岩性条件,该突出气体应属有机成因与无机成因混合气范畴;(2)突出气体含量随时间呈逐渐减小趋势,气体储量有限,不具有易燃性,具有微~中等腐蚀性;(3)该横洞突出气体是一类成分多样、形成演化过程复杂的有机成因和无机成因混合气,其形成先后经历有机成因阶段与无机成因阶段,区域地质历史时期活跃的岩浆活动和出气孔处发育的碳酸盐岩为突出气体的无机成因提供了证据。研究成果可为类似高原隧道突出气体研究和评价提供参考。

关键词:隧道;突出气体;气体检测;成因机制

中图分类号:U25

文献标志码:A

Study on Characteristics and Formation Mechanisms of Tunnel Gas Outbursts

QIANG Xingang YUAN Dong HE Ping YUE Zhiqin ZHANG Guangze

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: To investigate the characteristics and formation mechanisms of unexplained gas outbursts in high-altitude tunnels, this paper employed a multidisciplinary approach encompassing data collection, field surveys, testing, monitoring, experimental petrology, and geochemical experimentation. By examining the geological environment hosting the outburst gases, the study elucidated the composition, evolutionary processes, and governing patterns of these gases. Integrating regional geological evolution, a model for the formation and evolution of the outburst gases was established. The findings reveal: (1) The Mainling Adit and its surrounding area lack the lithological conditions necessary for the development of substantial hydrocarbon resources; hence, the outburst gas is categorized as a mixed organic-inorganic gas. (2) The concentration of the outburst gas exhibits a decreasing trend over time, indicating limited reserves and non-flammability, with moderate to low corrosivity. (3) The Mainling Adit gas outburst represents a diverse and complex mixture of organically and inorganically derived gases, whose formation involves sequential organic and inorganic stages. The region's historically active magmatic activity and the presence of carbonate rocks at gas emission sites provide evidence for the inorganic origin of the outburst gases. These results serve as a reference for analogous studies and evaluations of gas

收稿日期:2023-06-19

作者简介:强新刚(1980-),男,高级工程师。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科技研究开发计划课题(KDNQ201004)

引文格式:强新刚,袁东,何平,等.隧道突出气体特征及形成机理研究[J].高速铁路技术,2024,15(2):39-44.

QIANG Xingang, YUAN Dong, HE Ping, et al. Study on Characteristics and Formation Mechanisms of Tunnel Gas Outbursts [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(2):39-44.

outbursts in high-altitude tunnels.

Key words: tunnel; gas outburst; gas detection; genesis mechanism

随着我国高速铁路和公路的大量建设,线路不可避免地要通过一些特殊地质区域,其中隧道通过发育有突出气体的地层时施工风险极高,有害气体成为主要的工程地质问题^[1]。本文研究的某穿越片麻岩的高原隧道横洞在施工至 HDK 0+264,横洞掌子面 2 个炮孔突出气体,气体压力 0.1 MPa,不仅直接影响隧道施工进度,且其有害性、易燃性、腐蚀性等尚不清楚,成因机理也有待进一步查明,并可能对施工人员健康、建筑材料腐蚀、运营安全等造成影响。因此,开展隧道沿线的地质构造和地层情况的研究,结合突出气体的形成和储藏机理,探讨隧道施工中遇到有害气体的可能性和危害性大小,可为隧道设计与施工提供依据。

目前,国外学者对变质岩区隧道受有害气体危害的工程案例较多,如前苏联阿尔帕-谢万引水隧道,在穿越变质岩接触带时,以巨大压力喷出的 CO₂ 气体涌出量为 150×10⁴ m³,抛出岩石 1 500 t,抛距 150 m;意大利卡波卡那隧洞在穿越以千枚岩为主的变质岩地层时,有害气体以 2 MPa 的压力涌出,涌出量为 5 000~6 000 L/min,以 CO₂ (98.07%) 气体为主,其次为 CH₄ (0.61%)、H₂S (0.08%)、NO₂ (24‰)。

国内发生的变质岩隧道中出现有毒有害气体的案例较多。如襄渝铁路二线财神庙隧道在修建过程中,曾在变质岩区出现过有毒有害气体^[2];汶马高速公路隧道穿越三叠系、志留系的千枚岩、板岩等变质岩地层掌子面有 H₂S、CO₂、CH₄ 有毒有害气体逸出^[3];合武铁路安徽段大别山区段 7 座隧道在穿越区域变质岩——早石炭世变质石英片岩时发生瓦斯燃烧^[4]。大临铁路红豆山隧道在穿越浅变质花岗岩区时,遇到高浓度 CO₂ 气体爆突,除 CO₂ 气体严重超标外,红豆山隧道还发现多种有害气体,如 H₂S、CH₄、NO₂、NH₃ 等^[5]。随着高速交通向西部山区推进,穿越变质岩区的隧道越来越多,变质岩区隧道受有毒有害气体危害的案例也逐渐增多,因此近年来变质岩区隧道有毒有害气体研究也引起了工程界的高度关注^[6-9]。

目前,国内外大多数专家、学者对隧道有毒有害气体的研究更多地关注于可燃气体上,其中煤层瓦斯是研究的重点。煤层瓦斯隧道的施工及通风运营技术、揭煤防突技术、施工地质超前预报技术、有毒有害气体的动态监测与适时跟踪预报技术、有毒有害气体

灾害危险性评价体系等方面都做了深入研究。但是,与常见的穿越煤系地层隧道相比,由于变质岩地层有毒有害气体分布具有较大的随机性和不均性,往往不易被发现^[10]。

因此,本文旨在揭示变质岩突出气体分布特征、成分特征与成因机理,为可能出现该类突出气体的邻区隧道进行预测与防治提供参考,研究具有重要的理论及实践意义。

1 研究区地质概况

1.1 地形地貌

研究区地处青藏高原南部西藏“一江两河”(雅鲁藏布江、拉萨河和尼洋河)东部,区内喜马拉雅等山脉呈近东西走向延展,属高山峡谷地貌。

该横洞位于藏南谷地高山区。横洞及邻区海拔高程在 2 800~3 800 m 之间,山体雄厚,坡度约 25°~40°,呈典型宽谷形态。

1.2 地层岩性

研究区属冈底斯-念青唐古拉分区、申扎-拉萨小区,主要出露元古界、古生界、中生界白垩系及第四系地层,古近系地层有少量出露。除第四系地层,其余地层均遭受了不同程度的区域变质作用。

该横洞及周边地区出露地层主要为第四系全新统坡残积层、冲洪积层与上更新统冰水堆积层,下伏基岩为新元古~中元古界念青唐古拉岩群八拉岩组(P_{t2-3b})片麻岩、糜棱岩及碳酸盐岩块(Ca);新鲜基岩较坚硬、完整,结构面发育一般,以共轭剖面“X”节理为主。隧道横洞剖面如图 1 所示。

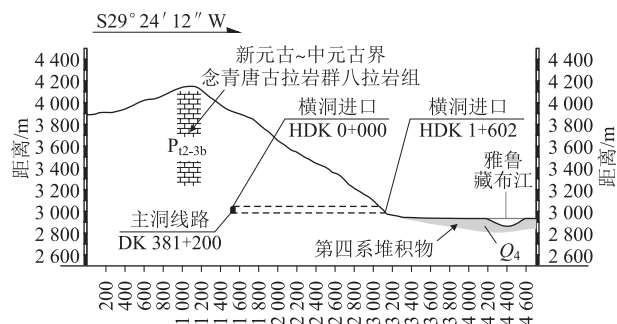


图1 横洞工程地质剖面图

1.3 地质构造

研究区属印度构造域、冈底斯-念青唐古拉板块、雅鲁藏布江对接带,北部以班公湖-怒江结合带及其

邻近地区为界,南部以雅鲁藏布结合带为界,区内沉积作用类型复杂、岩浆活动强烈,变形变质作用、构造样式复杂多样。区内发育的区域性断裂主要有夺松 – 比丁断裂(F1)、茄子弄 – 滚没 – 色苏断裂东段力底断裂(F2)、下白若 – 米林断裂东段(F3)、拉邦断裂(F4)、色拉 – 色崩断裂(F5)。

根据现场调查,横洞周边的主要构造框架为 SN 向和 NE – SW 向的断层构造,以出露于雅鲁藏布江左岸的力底断层距离横洞最近,直线距离约 5 km。该断层总体走向为 NE – NEE 向,倾向 NW,具左旋逆冲性质。

1.4 高地应力岩爆

横洞施工过程中岩爆现象较为发育,且集中分布于 HDK 0 + 003 ~ 0 + 059、HDK 0 + 209 ~ 0 + 258 洞段,多为轻微 ~ 中等岩爆,表明在横洞区域属高地应力区,突出气体出现位置(HDK 0 + 200)恰好位于岩爆区附近。

根据地应力测试成果、数值模拟与岩爆等高地应力现象,横洞及周边区域应属高地应力区。三向主应力关系为: $S_H > S_v > S_h$,主应力量级随埋深增加而逐步增大,最大水平主应力量级稳定在 25 ~ 30 MPa 之间,地应力状态受控于区域构造应力。

1.5 水文地质特征

研究区地表水主要为沟水及河流,雨季及冰雪融化季节沟中有流水,枯水季节沟中水量较小。地下水按赋存条件,可分为第四系孔隙潜水和基岩裂隙水。第四系孔隙水主要为大气降水及地表水补给,基岩孔隙水主要分布于片麻岩、糜棱岩及碳酸盐岩块(Ca)中,其水量大小主要受岩层分布面积及孔裂隙率大小控制。总体上看,由于受到雅鲁藏布江河谷深切作用,地下水埋深大,属中等 ~ 弱富水性,主要接受大气降水入渗补给。

1.6 油气资源分布

研究区地表水主要为沟水及河流,雨季及冰雪融化季节沟中有流水,枯水季节沟中水量较小。地下水按赋存条件,可分为第四系孔隙潜水和基岩裂隙水。第四系孔隙水主要为大气降水及地表水补给,基岩孔

裂隙水主要分布于片麻岩、糜棱岩及碳酸盐岩块(Ca)中,其水量大小主要受岩层分布面积及孔裂隙率大小控制。总体上看,由于受到雅鲁藏布江河谷深切作用,地下水埋深大,属中等 ~ 弱富水性,主要接受大气降水入渗补给。

2 突出气体特征及演化规律

突出气体首次出现时间为 2016 年 7 月 22 日,为施工炮眼钻孔(直径 35 mm)过程中揭露,位于隧道横洞 HDK 0 + 200 m 掌子面左拱腰附近,垂直埋深约 810 m,出气口附近风速为 59 m/s。出露岩性为新元古 ~ 中元古界念青唐古拉岩群八拉岩组片麻岩,围岩类别为 II 类,岩体较完整。

2.1 突出气体成分特征

8 月 7—8 日,在挖掘机、钻孔机等设备及施工均停工的情况下,在突出气体出气口、距离掌子面 5 m 处与隧道洞口 3 处位置开展了取样及检测工作,每处分别测试 3 次,检测结果表明,该突出气体具有如下特征:

(1)突出气体与大气成分存在明显差异。突出气体以二氧化碳含量最多,约占 67%,含氧量仅约 0.3%,温度约为 12 ℃ ~ 13 ℃。其余组分,如:总烃、一氧化碳、硫化氢、二氧化硫、氮氧化物与氨的含量约为大气含量的数十倍至百倍,属于狭义天然气范畴。

(2)突出气体与大气混合后,有害气体含量迅速减小。含氧量与隧道洞口处基本一致,总烃、一氧化碳、硫化氢、二氧化硫、氮氧化物与氨的含量较出气口处明显降低,已基本接近隧道洞口大气测试值。

(3)该突出气体总烃含量高达 183.3 mg/m³,约占突出气体总体积的 14.22%。无机成因的气体中烃类含量一般很低,因此,可认为该突出气体具有有机成因气的特征。宋岩^[11]等根据我国不同成因的 212 个气样及澳大利亚、泰国、新西兰、菲律宾、加拿大、前苏联 100 多个样品的 CO₂ 组分和碳同位素组成数据资料,编制的有机和无机二氧化碳鉴别图版认为:CO₂ 含量大于 60%均为无机成因,而横洞突出气体中 CO₂ 约占 67%,因此,可认为该气体亦具有无机成因气的特征。

表 1 突出气体成分测试结果表

位置	氨/(mg/m ³)	二氧化氮/(mg/m ³)	二氧化硫/(mg/m ³)	一氧化碳(高原)/(mg/m ³)	硫化氢/(mg/m ³)	总烃/%	含氧量/%	二氧化碳/%
出气口	2.90	11.80	5.92	5.00	5.92	183.3	0.30	67.80
距离掌子面 5 m 处	0.03	0.05	0.29	1.80	0.29	11.6	19.23	1.80
横洞洞口	0.02	0.01	0.02	0.80	0.01	1.11	10.04	1.00

气体成分分析结果表明:该突出气体成分 CO_2 含量较高,且包含烃类,属于狭义天然气范畴,具有有机成因、无机成因气体的双重特点。

2.2 突出气体演化规律

为揭示该突出气体各成分含量随时间变化规律,通过在出气口附近及周边布置甲烷传感器、一氧化碳传感器及硫化氢传感器,24 h 全天候监测(监测 1 次/h)甲烷、一氧化碳与硫化氢体积浓度,监测在隧道通风并有挖掘机、钻孔机等设备及施工均正常工作的情况下进行。

根据 9 月 1 日—10 月 31 日监测数据,取 24 h 监测数据的平均值作为该天监测结果,如图 5、图 6 所示,分析甲烷、一氧化碳与硫化氢体积浓度随时间变化趋势,结果表明:

(1) 自突出气体首次出现始, H_2S 体积浓度呈逐渐减小趋势,之后约 40 d 内趋于 0,即 H_2S 已基本消散。

(2) CO 体积浓度则呈规律性变化,即:在 15 ppm (约为 18.8 mg/m^3) 附近波动(如图 2 所示);进一步分析 CO 体积浓度的 24 h 变化规律(如图 3 所示),可知在每天 9 时和 20 时存在体积浓度峰值,分别约为 300 ppm、360 ppm,该峰值出现时间与隧道密集施工时间重叠。因此,导致 CO 体积浓度呈有规律波动的原因可能与施工爆破、工程设备、车辆运行产生的尾气有关。

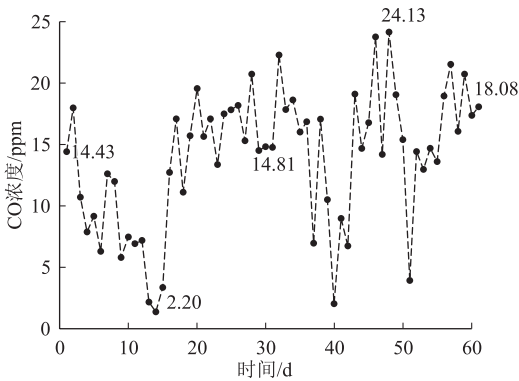


图2 CO 体积浓度随时间变化图

(3) CH_4 浓度基本保持不变,约为 0.05 ppm,这也与工程设备、车辆运行产生的尾气有关。

突出气体自 7 月 22 日首次约 30 d 的时间中,气体已基本消散,说明该气体储量有限。

2.3 突出气体危害性评价

该突出气体包含多种成分,且均对人体有害。结合各类规范的要求,选取相应的危害性组分,利用不同时间点测得的组分含量,对比评价突出气体的危

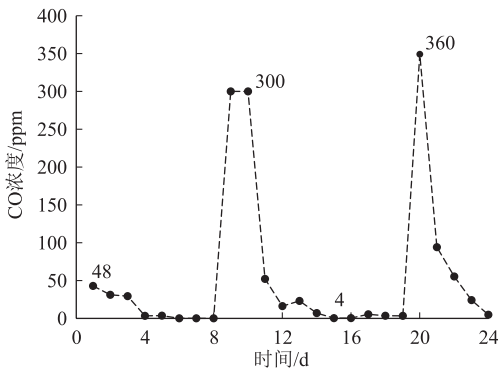


图3 24 h CO 体积浓度随时间变化图

害性。

统计表明,该横洞突出气体初次出现时,氨、一氧化碳、硫化氢容许浓度满足规范要求,仅出气口处二氧化氮、二氧化硫浓度超过 15 min 短间接接触浓度容许值。而后期监测统计表明,一氧化碳的最高容许浓度超过规范要求,这并非由突出气体本身所导致,而主要与工程设备、车辆运行产生的尾气有关。

突出气体中包含各种性质不一的组分,且体现出有害性、易燃性及腐蚀性等。对比现行规范中的界限值,该突出气体不具有易燃性;出气口处各成分对建筑材料具有弱~中等腐蚀性,离掌子面 5 m 处硫化氢对建筑材料具有微~中等腐蚀性;一氧化碳的最高容许浓度超过规范要求,但由于其并非由突出气体所导致,而是与工程设备、车辆运行产生的尾气有关,加强施工期隧道通风可减小或避免其有害性。

3 岩石矿物与地球化学特征

采用薄片鉴定与原子吸收法分别开展岩石矿物成分与地球化学元素分析,详细查明横洞所处区域的岩石特征,为揭示突出气体成因奠定基础。研究表明,岩石矿物成分与地球化学元素具有如下特征:

(1) 按取样位置与风化程度,宏观上可将岩样划分为 3 组:①出气口岩样;②地表风化岩样;③横洞新鲜岩样。三类岩样均含有变质作用标志矿物,如:出气口岩样含黧帘石与阳起石;地表风化岩样与新鲜岩样含绿帘石或绿泥石。

(2) 除均含有变质作用标志矿物外,在矿物成分上,三类岩样存在显著差异:出气口岩样基本不含普通角闪石或斜长石,而地表风化岩样与新鲜岩样的普通角闪石及斜长石含量较高。

(3) 不同位置的新鲜岩样矿物成分也存在区别。取自出气口两侧的岩石基本不含钾长石及白云母;而取自横洞与主线交点处岩样含有相当数量的钾长石

及白云母。

(4)新鲜岩样的地球化学元素含量具有的高硅铝的特点,而出气口岩样中硅元素含量明显低于其他两类岩样,但钙含量明显增高。

(5)矿物成分与地球化学元素特征表明,出气口附近岩石并非风化作用产物,且也与横洞内普遍发育的区域变质岩存在差异。

4 突出气体形成机理

4.1 测区岩石样品的原岩恢复

由于该横洞及周边地区岩石历经多期次的变质和变形作用,原岩地质产状及变余结构、构造难以确认。仅依靠野外观察的地质产状、岩石组合特点和岩相学特点来恢复变质岩原岩建造是比较困难的。因此,为确定气体赋存的变质岩的原岩类型,需要借助变质岩的岩石地球化学特征。这是因为变质岩在变质过程中除了伴随有强烈交代作用及各种交代蚀变外,所有变质作用都是原岩在相对封闭的条件下形成的,其化学成分变化基本为等化学。

4.2 突出气体成因分析

有机成因与无机成因天然气的区别主要从两方面来考虑:一是成分上有较大的区别,有机成因天然气中烃类气体含量很高,无机成因天然气成分中 CO_2 为主要成分,若二者兼有则可能为混合成因;二是源岩不同,有机成因的气体源岩主要是泥质岩源岩、碳酸盐岩源岩和煤系源岩,而无机成因气体是岩石化学成因或幔源成因。隧道突出气体成分分析表明,气体为烃类和非烃类混合物,与大气成分存在明显差异。总烃含量高达 227 mg/m^3 ,约占突出气体总体积的14.22%,具有有机成因特征;但 CO_2 含量高达67%,故亦具有无机成因特征。

从原岩恢复结果来看,该地区存在有机成因气体的源岩:泥质岩,这为突出气体的有机成因奠定了基础;而该地区地质历史时期活跃的岩浆活动和出气孔处发育的变质岩,表明出气口中储集的物质与其周围一定范围内岩石之间发生变质作用,为突出气体的无机成因提供了证据。

根据前述突出气体成分、岩石矿物及地球化学元素分析与变质岩原岩恢复等结果可知,横洞突出气体是一类成分多样、形成演化过程复杂的有机成因和无机成因混合气,结合地质环境背景分析,其形成演化过程可分为如下几个阶段:

(1)有机成因阶段

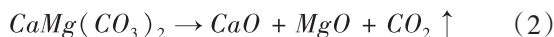
有机成因气系指由沉积岩中的集中或分散有机

质通过细菌作用、化学作用和物理作用形成的气体。在富含有机质的浅海和湖泊沉积时微生物生命活动的有利环境中,有机质被生物降解的过程广泛存在。根据原岩恢复结果,横洞出气口处原岩为泥质沉积岩,是有机成因气体的源岩之一。沉积物在沉积成岩的各阶段均有可能形成气体,其核心是有机质在微生物或适当温度条件下经过生物化学作用或化学作用生成以烃类气体为主,含有少量 H_2S 、 CO_2 的气体。

(2)无机成因阶段

先期形成的有机气体在其源岩中得以保存。在后期的地质历史演化中,横洞所处区域经历了大规模的岩浆活动及变质作用,岩浆活动使得先期存在的岩石温度升高,为岩石化学反应提供了有利条件。现场取样揭露,出气孔附近 $8\sim 10\text{ cm}$ 宽度内的岩石呈白色,与新鲜的青灰色岩石存在明显差别,表明出气口围岩与赋存的气体进行了岩石化学反应,导致围岩中方解石含量高达70%以上。

在此阶段,岩浆活动为岩石化学反应的发生提供了高温环境,出气孔岩石中高含量的碳酸钙岩浆在高温烘烤作用下,可以发生如下反应:



出气孔中前期储集的气体不断与围岩发生反应,后期围岩在岩浆作用和区域变质作用中不断反应释放出以 CO_2 为主的气体,从而改变了原来气体的成分,使得突出气体中 CO_2 含量不断升高。

5 结论

本文通过采用资料收集、现场调查测试与监测、室内岩石学、地球化学试验等方法与手段,揭示隧道突出气体孕育的工程地质条件及演化过程;基于现场测试与全天候监测,揭露突出气体成分及演化规律;采用室内岩石学、地球化学试验,结合区域地质条件演化过程,建立突出气体形成、演化模式。得到主要结论如下:

(1)该横洞位于藏南谷地高山区,下伏基岩为新元古~中元古界片麻岩、糜棱岩及碳酸盐岩块,属高地应力区,横洞及周边地区不具备发育大规模油气资源的岩性条件。

(2)突出气体成分复杂,含有氨、二氧化氮、二氧化硫、一氧化碳、硫化氢、二氧化碳及总烃等,且以二氧化碳含量最多,约占67%,含氧量较少,属有机成因与无机成因混合气范畴。

(3)突出气体含量随时间呈逐渐减小趋势,气体

储量有限,不具有易燃性,硫化氢对建筑材料具有微~中等腐蚀性,针对一氧化碳应加强施工期隧道通风可减小或避免其有害性。

(4)碳酸盐岩的存在为突出气体的有机成因奠定了基础,而该地区地质历史时期活跃的岩浆活动和出气孔处发育的碳酸盐岩为突出气体的无机成因提供了证据。

(5)该横洞突出气体是一类成分多样、形成演化过程复杂的有机成因和无机成因混合气,其形成先后经历有机成因阶段与无机成因阶段。

参考文献:

[1] 陈明浩,李东,张广泽,等. 西南山区高速铁路主要工程地质问题研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(2): 1-5, 12.
CHEN Minghao, LI Dong, ZHANG Guangze, et al. A Study on Main Geological Problems of High-speed Railway in the Mountainous Area in Southwest China [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(2): 1-5, 12.

[2] 高红杰. 襄渝线财神庙隧道瓦斯特征及处理对策[J]. 铁道工程学报, 2009, 26(10): 84-89.
GAO Hongjie. The Gas Characteristics of Caishenmiao Tunnel on Xiangfan-Chongqing Railway and Its Treatment Measures [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 26(10): 84-89.

[3] 杜毅,程强. 汶马高速米亚罗3号隧道瓦斯涌(突)出机理研究分析[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(4): 203-209.
DU Yi, CHENG Qiang. Study and Analysis of the Mechanism of Gas Emission (Outburst) in Miyaluo No. 3 Tunnel on Wenchuan-Maerkang Highway[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(4): 203-209.

[4] 熊畅华. 合武铁路安徽段金寨(大别山)区段隧道燃烧现象的研究[J]. 西部探矿工程, 2006, 18(8): 170-172.
XIONG Changhua. Study on Tunnel Combustion in Jinzhai (Dabie Mountain) Section of Anhui Section of Hefei-Wuhan Railway [J]. West-China Exploration Engineering, 2006, 18(8): 170-172.

[5] 陈浩栋. 大临铁路红豆山非煤系隧道有害气体成因机制与防治

技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
CHEN Haodong. Study on Formation Mechanism and Prevention Technology of Harmful Gas in Hongdoushan Non-coal Tunnel of Dalin Railway [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.

[6] 张雨露,丁文富,宋章,等. 泛亚铁路某隧道有害气体成因分析及防治对策[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(12): 56-61.
ZHANG Yulu, DING Wenfu, SONG Zhang, et al. Origin Analysis and Prevention Countermeasures for Harmful Gas in a Tunnel of Pan-Asian Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(12): 56-61.

[7] 陈其学,何成,权晓亮. 非煤系地层隧道施工期瓦斯涌(突)出灾害分析研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(3): 146-150.
CHEN Qixue, HE Cheng, QUAN Xiaoliang. Analytical Investigation of Gas Burst Disasters during Tunnelling in Non-coal Measure Strata [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(3): 146-150.

[8] 苏培东,廖军兆,王奇,等. 四川盆地龙泉山含油气构造浅层天然气对隧道工程危害研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(6): 1287-1293.
SU Peidong, LIAO Junzhao, WANG Qi, et al. Harm to Tunnel Engineering Due to Gas in Shallow Oil-gas Structures at Longquan Mountains [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(6): 1287-1293.

[9] 苏培东,李作兵,范晓丽,等. 成简一级公路龙泉山隧道浅层天然气检测研究[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(4): 52-57.
SU Peidong, LI Zuobing, FAN Xiaoli, et al. Study on Shallow Gas Detection for Longquan Mountain Tunnels on Chengdu-Jianyan First Class Highway [J]. Modern Tunnelling Technology, 2009, 46(4): 52-57.

[10] KANG X B, XU M, LUO S, et al. Study on Formation Mechanism of Gas Tunnel in Non-coal Strata[J]. Natural Hazards, 2013, 66(2): 291-301.

[11] 宋岩,戴金星,李先奇,等. 中国大中型气田主要地球化学和地质特征[J]. 石油学报, 1998, 19(1): 11-15.
SONG Yan, DAI Jinxing, LI Xianqi, et al. Main Geochemical and Geological Characteristics of Large and Medium-sized Gas Fields in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(1): 11-15.