

川西高原非煤系地层隧道瓦斯涌出模式与 瓦斯逸散规律

牟力¹, 邓昌中², 谭书平², 张文居¹, 刘宏², 徐岗²

(1. 四川藏区高速公路有限责任公司, 成都 610041; 2. 四川久马高速公路有限责任公司, 成都 610213)

摘要: 国家基础设施建设进入新一轮快速发展阶段, 川西隧道建设也呈现出密集发展态势, 在隧道建设过程中, 瓦斯涌突灾害频发, 造成了巨大的经济损失和重大的人员伤亡。本文依托川西高原汶马高速和久马高速的所有瓦斯隧道, 通过资料收集、现场调查以及数值分析, 概况了非煤系地层瓦斯隧道灾害的3种涌出模式: ①生烃岩层直接揭露型; ②深埋气藏导气构造连通型; ③气源构造间接揭露型。针对导气构造型瓦斯隧道, 发现断层与掌子面斜交时, 容易发生瓦斯局部富集的现象, 揭示了不同类型断层等导气构造对浅埋隧道瓦斯逸散规律的影响。

关键词: 瓦斯涌突; 瓦斯隧道; 非煤系地层; 瓦斯逸散; 涌出模式

中图分类号: P642; U459.2 **文献标识码:** A

EMISSION MODES AND RUNAWAY CHARACTERISTICS OF GAS IN NON-COAL STRATA TUNNEL IN WESTERN SICHUAN PLATEAU

MOU Li¹, DENG Chang-zhong², TAN Shu-ping², ZHANG Wen-ju¹, LIU Hong², XU Gang²

(1. Sichuan Tibetan Area Expressway Co., LTD., Chengdu 610041, China;

2. Sichuan Jiuma Expressway Co., LTD., Chengdu 610213, China)

Abstract: The national infrastructure construction has entered a new stage of rapid development, and the construction of the West Sichuan Tunnel has also shown a dense development trend. During the tunnel construction process, gas outburst disasters occur frequently, causing huge economic losses and significant casualties. This article relies on all the gas tunnels of the Wenma Expressway and the Jiuma Expressway that have been built in the western Sichuan Plateau. Through data collection, on-site investigation, and numerical analysis, three types of gas emission mode of gas tunnel disasters in non-coal bearing strata are summarized: ① direct exposure type of hydrocarbon generating strata; ② Deep buried gas reservoirs with connected gas conducting structures; ③ The indirect exposure type of gas source structure reveals. For gas conducting structural gas tunnels, it is found that when faults intersect with the face of the tunnel, local gas enrichment is prone to occur, this reveals the influence of different types of gas conducting structures such as faults on the gas escape law of shallow buried tunnels.

Key words: gas outburst disasters; gas tunnel; non coal bearing strata; gas escape; gas emission mode

随着国家基础设施建设进入新一轮快速发展阶段,川西地区隧道建设也呈现密集型发展态势。川西地区地质复杂、构造活跃、岩性多变,给隧道工程安全建设带来严重挑战。近年来新建的汶马高速和在建的久马高速是四川向西的重要通道,连接了青

海、新疆,形成了内地深入阿坝藏区羌区的经济走廊和战略走廊^[1]。瓦斯涌突是隧道工程地质灾害的重要类型之一^[2],然而瓦斯隧道建设工程中,时有发生瓦斯燃烧、瓦斯爆炸等事故,造成巨大的经济损失和重大的人员伤亡(表 1)^[3]。

表 1 隧道瓦斯事故统计表

隧道名称	岩性构造	事故时间	瓦斯灾害	引发原因	死亡人数
岩脚寨隧道	背斜西南翼煤系地层	1959.01.27	2 次燃烧,5 次爆炸	大量瓦斯涌出遇明火	33 人
炮台山隧道	断裂带	1994.04.03	1 次燃烧,2 次爆炸	照明灯爆裂和汽车引发	42 人
董家山隧道	煤系地层	2005.12.22	多次燃烧,1 次爆炸	大量瓦斯涌出遇短路火花	44 人
五洛路 1 号隧道	—	2015.02.24	爆炸	风机关闭瓦斯集聚遇汽车火花	1 人
七崩岩隧道	煤系地层	2017.05.02	爆炸	—	12 人
静宁隧道	—	2007.07.11	爆炸	—	3 人
扎西隧道	—	2019.04.01	爆炸	—	2 人
林场隧道	非煤系地层	2020.10.29	1 次燃烧	—	—

按地层性质,瓦斯隧道可分为煤系地层瓦斯隧道和非煤系地层瓦斯隧道^[4]。由表 1 可以看出,已发生瓦斯事故的隧道中,非煤系地层的隧道数量要远大于煤系地层的数量,这主要是由于非煤系地层的瓦斯涌出较煤系地层而言具有随机性、分布不均匀性的特点,因此该类隧道所产生的瓦斯灾害往往具有更大的危害性。

针对煤系地层瓦斯灾害,学者们已进行大量研究并取得丰富成果,对于非煤系地层瓦斯隧道灾害成因机理则十分有限。康小兵强调了非煤地层瓦斯隧道瓦斯形成机制研究的意义,总结提出了非煤系地层瓦斯隧道有构造连通型、围岩变质型及复合型等 3 种成因类型^[5]。苏培东等通过对穿越龙泉山的 8 座隧道共 20 个钻孔进行天然气浓度检测,揭示了隧道所处构造位置和地层岩性是隧道受浅层天然气危害大小的主要因素^[6]。黄雄军对某铁路瓦斯高风险隧道瓦斯突出的破坏机理进行研究,从超前地质预报、瓦斯监测、施工通风、揭煤方式方面总结提出了相应的预防、控制和安全措施^[7]。王威等研究发现川西坳陷洛带气田沙溪庙组砂岩地层是浅层天然气主要储气层^[8]。张文选强调油气田区瓦斯不同于煤层瓦斯,其分布特征分散、随机,无处不在,地质构造、断层、节理发育带通常会有瓦斯溢出^[9]。苏培东等研究发现隧道所处构造位置和地层岩性是隧道受浅层天然气威胁的主要因素;苏培东指出隧道底部烃源岩地层成为瓦斯的补给源,在隧道施工过程中将面临浅层天然气的威胁^[10]。唐斌(2019)通过地质钻孔检查发现,龙泉山隧道浅层天然气与砂岩层相关性明显,其运移规律为主要沿砂岩储层及断层破碎带运移至隧道开挖空间,并据此划分为“两高、三低”风险区段设防,全隧道瓦斯集中分布在 3 处地

质构造附近,尤其在卧龙寺向斜西翼深部砂岩地层显示浓度高值^[11]。黄兵等指出非煤系地层瓦斯隧道具有三大不确定因素:瓦斯涌出地点不确定、瓦斯压力不确定、瓦斯涌出量不确定,这些因素增加了非煤系地层隧道瓦斯灾害防控的难度^[12]。

本文依托川西高原已建的汶马高速和在建的久马高速的所有瓦斯隧道,通过资料收集、现场调查以及数值分析,概况了非煤系地层瓦斯隧道灾害的涌出模式,针对导气构造型瓦斯隧道,分析了不同断层影响下隧道瓦斯的逸散规律,揭示了不同类型断层等导气构造对浅埋隧道瓦斯逸散规律的影响。研究成果可为非煤系地层区隧道工程安全建设提供科学参考。

1 工程概况

2015 年 5 月,汶马高速的开工建设,开启了四川西向、北向高速公路建设的大幕。汶马高速公路起于汶川县城以南凤坪坝,接映汶高速公路,经汶川、理县、古尔沟、米亚罗、梭磨、卓克基,止于马尔康市城东,全长 170.267 km(图 1)。



图 1 久马高速、汶马高速线路位置图

久马高速项目起于四川青海省界,经阿坝州阿坝县、红原县至马尔康市王家寨,止于汶马高速王家寨互通。项目主线设置桥梁 52 km/130 座(特大桥 11 座)、隧道 40 km/20 座(特长隧道 6 座),桥隧比 42.1%。全线设互通立交 7 处,服务区 4 处,停车区 3 处,预留红原枢纽互通连接规划中的川主寺至马尔康高速公路。全线共有神座隧道、海子山 1 号隧道、查针梁子隧道、马塘隧道和王家寨互通 5 个控制

性工程。

汶马高速、久马高速公路施工期间,发现多座隧道出现瓦斯涌出、瓦斯燃烧等现象(图 2)。如汶马高速鹫鹑山隧道、王家寨隧道、米亚罗 3 号隧道以及久马高速林场隧道、三家寨隧道等;其中,王家寨隧道和米亚罗 3 号隧道为高瓦斯隧道,林场隧道、三家寨隧道为低瓦斯隧道。此外,两条高速还有多座隧道为微瓦斯隧道。

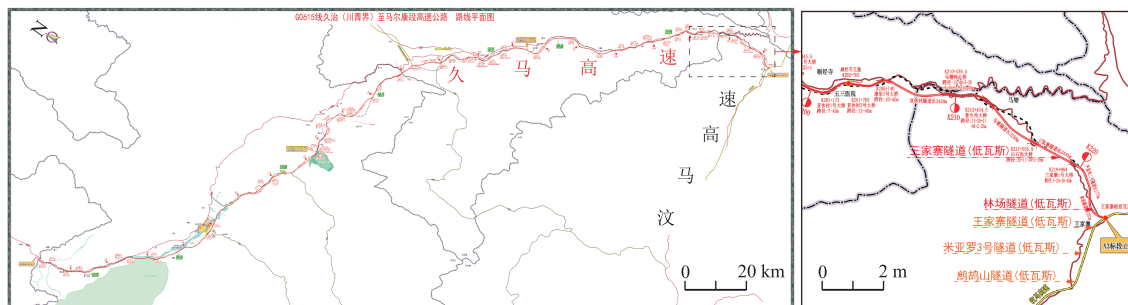


图 2 久马高速线路图及主要瓦斯隧道分布图

2 非煤系地层隧道瓦斯涌出模式

为研究川西非煤系地层隧道瓦斯涌出模式,依托汶马高速、久马高速主要瓦斯隧道,并介绍这些隧道瓦斯的涌出情况。

2.1 林场隧道

林场隧道于 2020 年 7 月开工,至 2020 年 10 月,左洞掘进 26 m、右洞掘进 75 m 之前均未发现瓦斯等有毒、有害气体涌出;2020 年 10 月 29 日下午 16:30 分,右洞 K223+950 处上台阶掌子面放炮后约 3 min 左右,值班组长进入洞内,发现掌子面右下角有一团火焰缓慢向上飘动,火焰持续时间约 3 min 左右后熄灭。

隧址区出露地层主要为中生界三叠系西康群侏倭组(T_3zh)、杂谷脑组(T_2z_2)上段,岩性以变质砂岩、板岩为主,局部存在炭质板岩,具有生烃能力。大地构造为紧密线状弧形褶皱,伴有数条呈北西至南东向压扭性断裂带,承受过两次以上不同方式和方向的构造运动作用,导致老构造成分歪曲、改造、转化和新构造运动的叠加,促进复合现象频繁出现,地质构造十分复杂。隧址区位于钻金楼倒转背斜西翼,未发现较大断层,围岩封闭条件较好。总体而言,地质构造对瓦斯生成和赋存创造了有利条件,地质构造复杂地段容易造成瓦斯富集,揭穿含炭质地层时将遇瓦斯涌出。因此,林场隧道在施工过程中遇瓦斯涌出的现象,系掌子面揭穿含炭质地层,遇裂

隙瓦斯带所致。

2.2 米亚罗 3 号隧道

项目部施工过程中,3 号隧道横洞左线掌子面打钻孔时,有无色、带刺鼻性气味的不明气体从钻孔孔眼及岩石裂缝中涌出,靠近掌子面地面多个积水处亦有大量气泡冒出。经项目部瓦斯检测人员和相关技术人员采用便携式和低浓度光干涉瓦检仪初步检测,掌子面拱顶炮眼口涌出的不明气体浓度达到 10% 以上(使用低浓度光学瓦检仪,最大量程 10%)。

通常情况下,储集层或气藏中的瓦斯等气体多埋藏于地腹深处,隧址区内主要发育构造有小夹壁向斜,米亚罗压扭性断层,米亚罗 3 号隧道地质条件复杂,当这些构造裂隙与储集层或气藏导通时,便可产生裂隙瓦斯喷出,其强度主要与裂隙的大小及导通程度相关。若隧道施工中遇导通性较好的深大断裂构造时,有可能产生高压瓦斯喷出,在接近地质构造带时,除加强瓦斯检查和通风外,还需要对巷道加强支护,隔绝瓦斯释放路径,若监测瓦斯压力大,还应进行抽放,隧道施工中若遇地质构造带时必须对瓦斯加以防范,避免爆炸、窒息等伤亡事故发生。

米亚罗 3 号隧道地质条件复杂,不良地质发育,不良地质现象主要有滑坡、崩塌、泥石流、季节性冻土等。隧道不良地质现象主要有集中涌突水、隧道有毒有害气体及地温、危岩与崩塌、围岩大变形等;含煤岩系的沉积环境,岩性组合特征,顶、底板岩性及其隔气、透气性能,煤的变质程度,区域地质构造,

水文地质条件,岩浆作用,以及埋藏深度等地质因素都对瓦斯赋存有着重大影响,摸清瓦斯赋存规律对瓦斯隧道的施工将具有重要指导意义。

2.3 鹧鸪山隧道

隧址区位于马尔康北西向构造带内,即米亚罗断裂带以西,松岗-抚边河断裂带以东,为一系列呈北西-南东向展布的线状紧密褶皱,并伴有数条同方向展布的压扭性断裂。隧道穿越钻金楼倒转背斜,米亚罗断裂对隧道有影响。钻金楼倒转背斜两翼次级褶皱发育,类型复杂,并有斜歪、倒转、尖棱、平卧褶皱等;米亚罗断层及米亚罗支断层在鹧鸪山隧道附近岩体破碎,结构松散,岩层扭曲挤压严重。隧道地层中存在炭质千枚岩和炭质板岩,具生烃能力,地质构造对瓦斯生成和赋存创造了有利条件。

地质构造复杂地段容易造成瓦斯富集,形成“瓦斯包”,揭穿含炭质地层时易造成瓦斯涌出异常,甚至诱发突出事故。因此,隧道在施工过程中遇瓦斯等有毒、有害气体大量涌出的现象,系掌子面揭穿地质构造带,遇高压瓦斯气囊所致可能性较大。在构造带附近,由于地应力和高压气体的共同作用,隧道偶有岩石与二氧化碳(瓦斯)动力现象。

依托汶马高速和久马高速探查到的瓦斯隧道

(参见图 2),如:汶马高速鹧鸪山隧道、王家寨隧道、米亚罗 3 号隧道以及久马高速林场隧道、三家寨隧道等。其中,王家寨隧道和米亚罗 3 号隧道为高瓦斯隧道,林场隧道、三家寨隧道为低瓦斯隧道。

3 非煤系地层隧道瓦斯涌出模式

综合国内外研究成果发现,非煤系地层隧道瓦斯涌出有别于煤系地层隧道瓦斯涌出机制,其瓦斯来源除了前述生烃岩层直接解析外,更多的是来源于地质构造导致的瓦斯局部聚集或者深部埋藏的瓦斯气藏。深部瓦斯气藏可通过长大断裂等导气构造与浅表岩土体发生联系,一旦隧道开挖揭露这些生烃岩层、局部瓦斯包和导气构造时,便会产生瓦斯涌出、突出、爆炸等现象。当然,隧道开挖瓦斯的涌出量以及瓦斯灾害等级还受到岩层生烃能力、构造储层、导气构造的联通情况等因素影响。结合上述非煤系地层隧道瓦斯涌出机制,总结形成如下非煤系地层隧道瓦斯涌出模式(图 3):

- (1) 生烃岩层直接揭露型;
- (2) 深埋气藏导气构造连通型;
- (3) 气源构造间接揭露型。

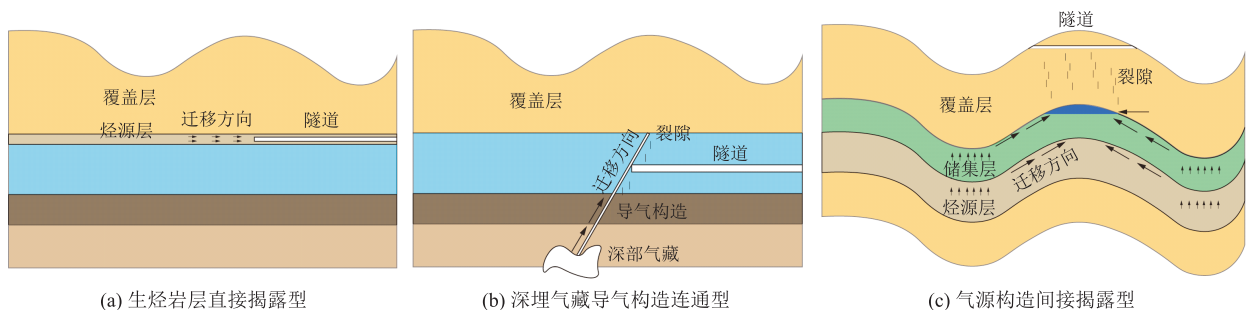


图 3 非煤系地层隧道瓦斯涌出模式

针对上述 3 种主要的非煤系地层隧道瓦斯涌出模式,在工程建设中一方面需要严格现场取样测试,分析非煤系地层(代表性的炭质千枚岩)的瓦斯解析能力,同时还需要关注渗透性较好的砂岩。以久马高速林场隧道为例,隧址区出露地层有第四系全新统崩坡积层(Q_4^{col+dl})及中生界三叠系上统西康群新都桥组(T_3x)板(千枚)岩夹变质砂岩、西康群侏倭组(T_3zh)变质砂岩、板(千枚)岩互层。通常情况下,砂岩渗透性较强、空间延展性好,一旦与远场气源相联系,可以成为良好的储气构造;另一方面需要分析裂缝、断层等导气构造的渗透特性,从而为预测隧道开挖引起的瓦斯涌出量提供依据。

4 导气构造作用下隧道瓦斯逸散规律

除了直接揭露储气岩层导致瓦斯灾害,隧道开挖过程中还可能揭穿断层等导气构造,与深部气藏发生联系,形成隧道瓦斯灾害。由于断层产状不同,倾斜断层的局部将与隧道掌子面提前接触,所以根据断层倾角与隧道轴线的夹角,又可以大致分为 3 种工况,即:倾向掌子面型、直立型、背离掌子面型(图 4)。其中,倾向掌子面型和背离掌子面型都是局部率先揭露,气源点集中;而直立型接触面大,表现为全掌子面揭露,危害较严重。

断层与掌子面斜交或正交时,在掌子面上表现

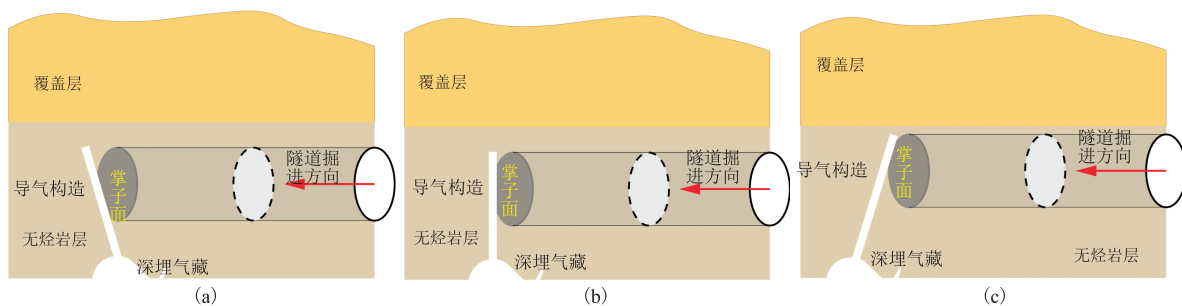


图4 导气构造作用下隧道瓦斯逸散类型

为局部或整体涌出瓦斯,通过改变掌子面上不同位置的涌气面模拟不同相交情况下的瓦斯流速分布情况。

4.1 断层与隧道轴线斜交

由图5可看出,当断层斜交掌子面上部时,流速在水平方向上沿轴线由入口向出口递减,垂直方向上在轴线上流速最大,向周围递减,流速等值面表现

为圆台状,当向下减小到 0.05 m/s 时,在下部形成涡流。

由图6可看出,当断层斜交掌子面下部时,流速在水平方向上沿轴线由入口向出口递减,垂直方向上在轴线上流速最大,向周围递减,流速等值面表现为圆台状,当向上减小到 0.05 m/s 时,在上部形成涡流。

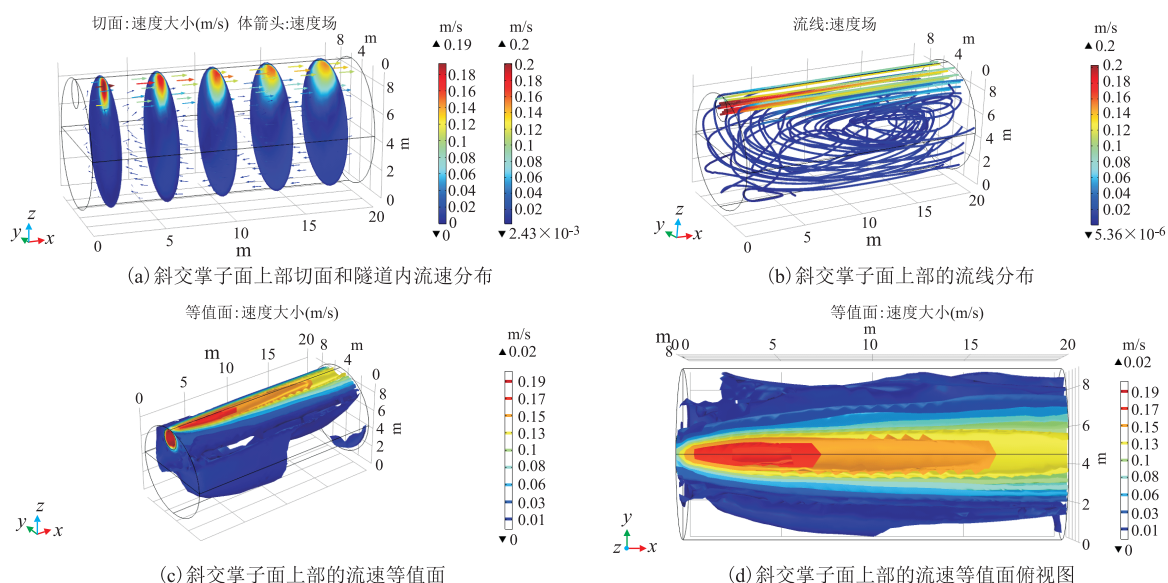


图5 斜交掌子面上部流速与流速等值面分布

4.2 断层与隧道轴线正交

当断层与掘进方向正交时,掌子面全断面产生瓦斯涌出,但是由于导气构造通常是将深部气藏的瓦斯气体传导至浅表处,因此,在断层等导气构造的不同部位,其瓦斯压力和瓦斯浓度会有一定的差异。在洞底处,瓦斯压力通常较大,洞顶相对减小,表现出梯形分布规律。为此,为了反映掌子面不同位置存在的不同瓦斯压力,在模拟过程中利用不同线性函数的方式来表示掌子面上各点的瓦斯压力大小。图7为瓦斯压力呈三角形分布时的计算结果,即掌子面顶部瓦斯压力为零,底部存在较大瓦斯压力情况的流速分布图;图8为瓦斯压力呈梯形分布时的

计算结果,即掌子面顶部瓦斯压力较小,底部瓦斯压力较大情况的流速分布图;图9为瓦斯压力呈矩形分布时的计算结果,即掌子面上流速均匀的流速分布图。

(1) 瓦斯压力呈三角形分布

由图7可以看出,当掌子面顶部瓦斯压力为零、底部存在较大瓦斯压力时,流速沿轴线方向相较于初速度几乎没有变化。在垂直方向上流速分布与涌出面压力线性函数分布相同,在隧道下方流速最大,隧道上方流速最小。

(2) 瓦斯压力呈梯形分布

由图8可以看出,当掌子面顶部瓦斯压力较小、

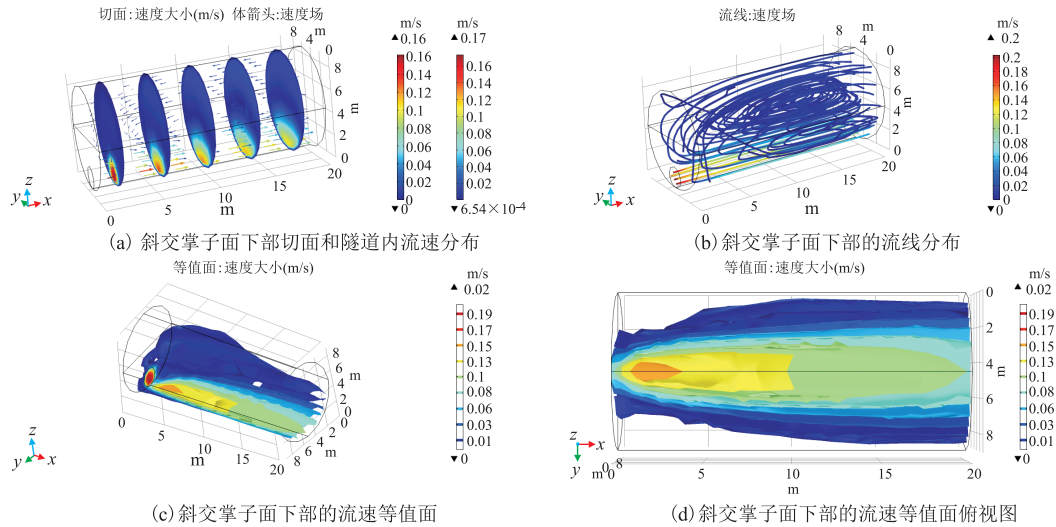


图 6 斜交掌子面下部流速与流速等值面分布

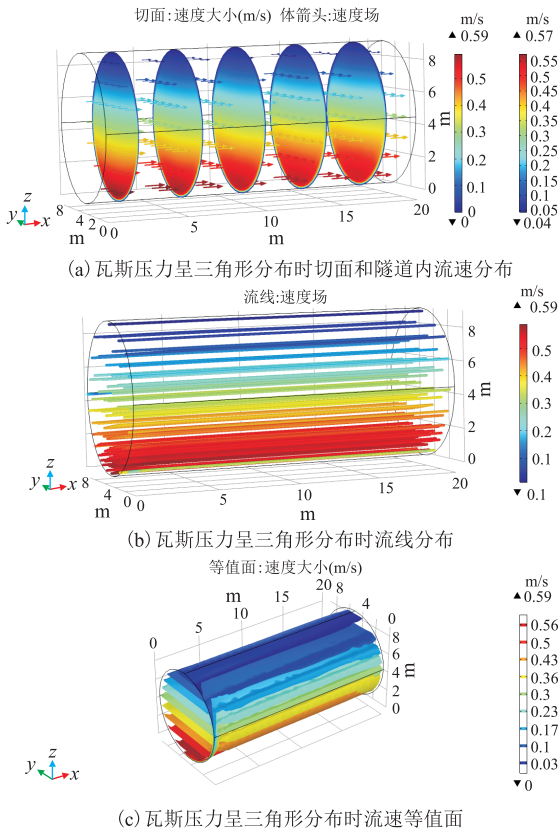


图 7 瓦斯压力呈三角形分布时流速与流速等值面分布

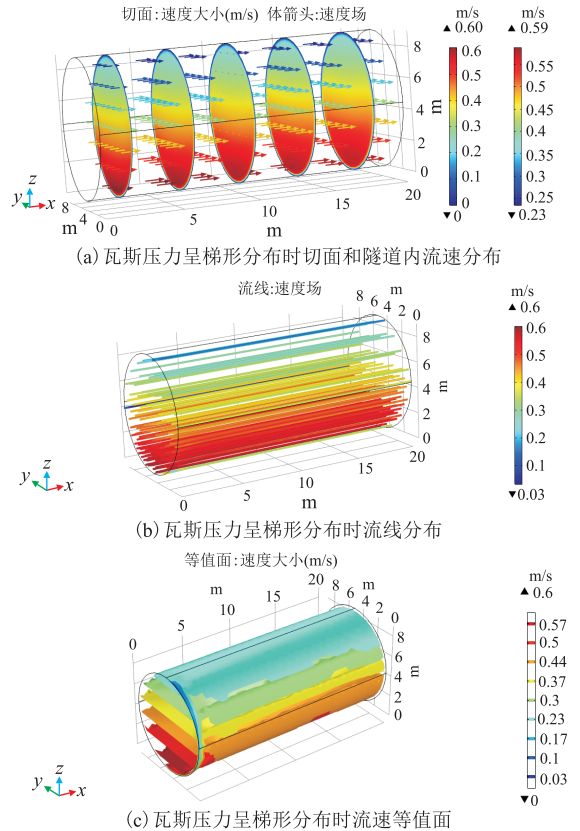


图 8 瓦斯压力呈梯形分布时流速与流速等值面分布

底部瓦斯压力较大时,流速沿轴线方向相较于初速度几乎没有变化。在垂直方向上流速分布与涌出面压力线性函数分布相同,在隧道下方流速最大,隧道上方流速最小。

(3) 瓦斯压力呈矩形分布

由图 9 可以看出,隧道开挖后,瓦斯在隧道中沿着近乎平行隧道开挖轴线方向进行逸散,隧道内流速分布为沿轴线方向,流速由入口向出口方向递增,

垂直于轴线方向,流速由中轴线向隧道壁方向递增,贴近隧道壁时急剧减小。

5 主要结论

本文采用资料收集、现场调查以及数值分析手段,依托汶马高速和久马高速瓦斯隧道,概况了非煤系地层瓦斯隧道灾害的涌出模式,分析了不同断层影响下隧道瓦斯的逸散规律。主要研究结论如下:

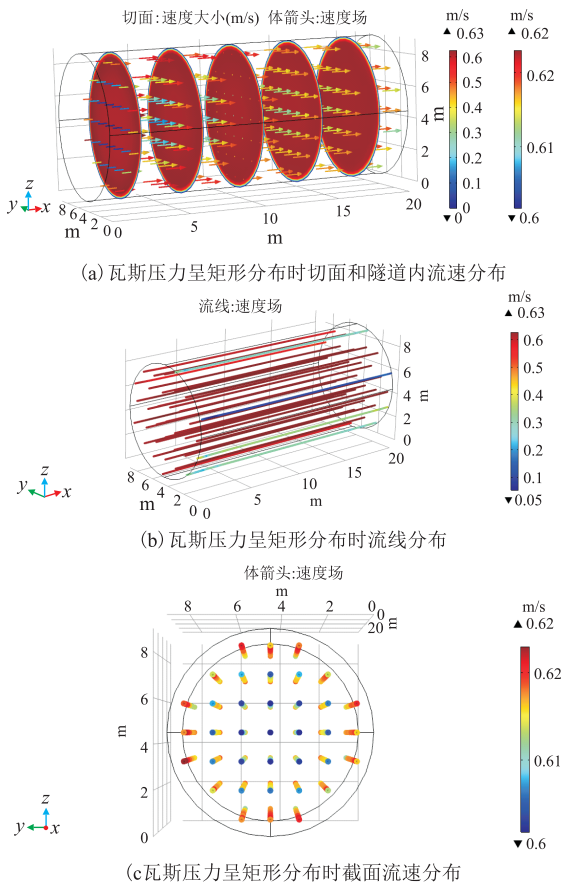


图9 瓦斯压力呈矩形分布时流速与流速等值面分布

(1) 综合汶马高速、久马高速瓦斯隧道以及国内典型瓦斯隧道瓦斯涌出特点,提出非煤系地层隧道瓦斯涌出模式,主要包括:①生烃岩层直接揭露型;②深埋气藏导气构造连通型;③气源构造间接揭露型。

(2) 针对导气构造型瓦斯隧道,分析了不同断层影响下隧道瓦斯的逸散规律,断层与掌子面斜交时,容易发生瓦斯局部富集的现象。

(3) 当断层等导气构造与隧道轴线正交时,导气构造内瓦斯压力分布可划分为呈三角形分布、呈梯形分布、呈矩形分布。呈三角形分布时,在隧道下方瓦斯流速最大,隧道上方流速最小;呈梯形分布时,在竖直方向上流速分布与涌出面压力线性函数分布相同,在隧道下方流速最大,隧道上方流速最小;呈矩形分布时,瓦斯在隧道中沿着近乎平行隧道开挖轴方向进行逸散,流速由入口向出口方向递增,流速由中轴线向隧道壁方向递增,贴近隧道壁时急剧减小。

作者简介: 牟力(1966—),男,四川阆中人,正高级工程师,主要从事公路工程,四川藏区高速公路有限责任公司。
E-mail:304768242@qq.com

参考文献

- [1] 李琦,陈若洋,曾雄智,等. 川西高原公路隧道中间段节能照明标准研究[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(S1):457-462.
- [2] 李天斌,孟陆波,朱劲,等. 隧道超前地质预报综合分析方法[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(12):2429-2436.
- [3] 王兰生,李天斌,徐进,等. 高地应力区域公路隧道围岩稳定性及施工地质监测预报系统[J]. 世界隧道,1999,36(2):57-59.
- [4] 王顺意,牟力,魏凯,等. 不同水力条件下圆柱桥墩局部冲刷试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2020,40(3):425-431.
- [5] 康小兵. 非煤系地层瓦斯隧道形成机制研究[J]. 现代隧道技术,2011,48(3):35-39+45.
- [6] 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.
- [7] 黄雄军. 含瓦斯突出隧道破坏机理及其控制探讨[J]. 现代隧道技术,2015,52(3):205-210.
- [8] 王威. 川东北地区须家河组天然气高效成藏模式探讨[J]. 岩性油气藏,2018,30(3):27-34.
- [9] 张文选,刘毅. 针对油气田瓦斯隧道异常涌出段采取的处理措施[J]. 四川水力发电,2019,38(S1):4-6+15+142.
- [10] 苏培东,黎俊麟,徐正宣,等. 非煤系地层浅层天然气赋存规律及瓦斯隧道工程防护方案[J]. 中国铁道科学,2021,42(02):88-97.
- [11] 唐斌. 成都地铁龙泉山隧道浅层天然气分布特征及运移规律研究[J]. 现代隧道技术,2019,56(6):41-46.
- [12] 黄兵,冉海荣,陈柯,等. 非伴煤瓦斯隧道强瓦斯涌出现象及应对措施研究——以云顶山一号特长隧道为例[J]. 建筑安全,2014,29(5):10-13.
- [13] 孙意. 成贵铁路四川红层段瓦斯特征分析及勘察阶段划分隧道瓦斯工区类别的建议[J]. 现代隧道技术,2022,59(1):195-199.
- [14] 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):1300-1307.
- [15] 杨义. 非煤系地层瓦斯隧道施工关键技术与管理研究[J]. 现代隧道技术,2023,60(1):249-255.
- [16] 任青阳,彭洋,孟欣,等. 复杂煤系地层隧道超前地质钻探法应用研究[J]. 公路,2021,66(5):309-315.
- [17] 郑仕跃,彭文彬,朱应,等. 高瓦斯多煤层隧道揭煤防突技术研究[J]. 西部交通科技,2022,17(1):118-120.
- [18] 杨洋,王才静,方瀚卿,等. 瓦斯隧道揭煤施工安全风险分析及开挖方法选择[J]. 云南水力发电,2021,37(12):55-60.
- [19] 许汝杭,王海洋,柯善剑,等. 多煤层高瓦斯隧道爆破后瓦斯异常涌出量预测模型分析[J]. 现代隧道技术,2021,58(增1):458-463.
- [20] 崔志成. 煤与瓦斯突出隧道爆破方案优化设计研究[J]. 铁道建筑技术,2021,59(6):105-109.