

文章编号: 1674—8247(2020)03—0001—06  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.03.001

## 特长油气田区高瓦斯隧道地质构造与瓦斯 精准探测方法研究

姚海波<sup>1</sup> 高峰<sup>2</sup> 张文选<sup>2</sup> 孟庆明<sup>3</sup> 罗世刚<sup>2</sup>

(1. 北方工业大学, 北京 100088; 2. 中国水利水电第七工程局有限公司第一分局, 四川 眉山 620860;  
3. 中国电建集团铁路建设有限公司成都公司, 成都 610017)

**摘要:** 本文依托成都某特长油气田区高瓦斯隧道, 通过对区域沉积建造与构造演化的分析和对隧址区油气生成、运移与储集机制的研究, 查明隧道瓦斯灾害孕灾机制。根据其特点, 利用地貌构造高分辨率影像解译技术识别微地貌构造格架与力学机制, 利用 EH4 探查构造深部发育与含水情况。根据瓦斯储集地质构造条件, 将全线隧道围岩进行瓦斯风险分级分区, 为地质构造精确探测与瓦斯防治奠定坚实的基础。在施工过程中, 利用 TSP 方法实现对构造带的米级误差识别。掌子面开挖前, 借助 3 孔超前水平钻探, 探查并精确计算构造面隧道中心里程与首次揭露里程。通过以上一系列由宏观到微观层次递进的工作方法, 最终实现了地质构造与瓦斯亚米级误差的精准探测。

**关键词:** 油气田区; 高瓦斯隧道; 地质灾害; 精准预测

**中图分类号:** U452.1<sup>+</sup>3 **文献标志码:** A

1

## Research on Geological Structure and Exact Gas Exploring Method of High Gas Tunnel in Extra-long Oil and Gas Field

YAO Haibo<sup>1</sup> GAO Feng<sup>2</sup> ZHANG Wenxuan<sup>2</sup> MENG Qingming<sup>3</sup> LUO Shigang<sup>2</sup>

(1. North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. Branch NO.1 of Sinohydro 7 Co., Ltd., Meishan 620860, China;

3. Chengdu Branch of PowerChina Railway Construction Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

**Abstract:** Based on analysis of regional sedimentary construction and structural evolution, and study of the mechanism of formation, migration and storage of oil and gas in the tunnel site, this paper finds out the mechanism of tunnel gas disaster. According to its characteristics, high-resolution image interpretation technology of geomorphic structure is used to identify the micro-geomorphic tectonic framework and mechanical mechanism, and EH4 method is used to probe the deep development and water containing of the structure. According to the geological structure conditions of gas storage area, the risk of gas in the tunnel surrounding rock in the whole line is classified and zoned, which lay a solid foundation for geological structure precise exploration and gas prevention. During construction, TSP method is used to realize the meter level error identification of structural belt. Before excavation of the working face, 3-hole advanced horizontal drilling is used to probe and accurately calculate the center mileage and the first exposed mileage of the tunnel on the structural face. By means of the above series of work methods from macro level to micro level, the exploring error of

收稿日期: 2020-01-30

作者简介: 姚海波(1971-), 男, 教授。

引文格式: 姚海波, 高峰, 张文选, 等. 特长油气田区高瓦斯隧道地质构造与瓦斯精准探测方法研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(2): 1-6.

YAO Haibo, GAO Feng, ZHANG Wenxuan, et al. Research on Geological Structure and Exact Gas Exploring Method of High Gas Tunnel[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2): 1-6.

geological structure and gas is controlled accurately within 1 meter.

**Key words:** oil and gas field; high gas tunnel; geological disaster; precise prediction

21世纪以来,我国隧道与地下工程得到了长足的发展。仅就铁路系统统计<sup>[1]</sup>,2018年新增开通运营线路隧道550座,总长1 005 km。其中,长度10 km以上的特长隧道12座,总长约144 km;在建铁路隧道3 477座,总长7 465 km。规划隧道6 327座,总长15 634 km。

我国幅员辽阔,地质条件复杂多变,大规模的隧道建设,尤其是特长隧道的施工,经常引发恶性地质灾害。其中,瓦斯隧道就是一类极具特点的高风险隧道工程。2015年2月24日,龙泉驿区洛带镇五洛路1号隧道发生瓦斯爆炸事故,造成7人死亡、19人受伤,直接经济损失超过1 620万元;2017年5月2日,成贵高速铁路七扇岩隧道发生瓦斯爆炸,造成12人死亡、12人受伤。而上溯至2005年12月22日,四川省都江堰至汶川高速公路董家山隧道工程发生特别重大瓦斯爆炸事故,造成44人死亡、11人受伤,直接经济损失2 035万元。可见,瓦斯隧道施工风险极高,与瓦斯相关的事后果异常严重。因此,加强瓦斯探测方法的研究,提高探测精度是瓦斯防治的重要前提。

## 1 工程背景

某铁路隧道分为左、右线,左线隧道起止里程为ZCK 41 + 295 ~ ZCK 50 + 952,全长9 657 m;右线隧道起止里程为YCK 41 + 295 ~ YCK 50 + 990,全长9 695 m,隧道最大埋深275 m。隧道区域为龙泉山油气田分布区域,沿线地质条件多变,为高瓦斯隧道。其中YCK 42 + 017 ~ YCK 43 + 750和YCK 44 + 450 ~ YCK 47 + 500为高瓦斯段,其余段落为低瓦斯段。高瓦斯区域与低瓦斯区域各约占隧道长度的50%。

龙泉山由北东走向南西,横亘于川西平原与川中丘陵之间,为天然的地理分界线。山体地面高程可达480 ~ 985 m,其地势高耸,山形险峻,相对高差50 ~ 300 m,因而地貌起伏大,多处悬崖峭壁。测区属扬子准地台四川台坳川西台陷构造单元,主要构造体系为龙泉山断褶束,以龙泉山箱状大背斜为主,含一系列褶皱、冲断层,走向北东20° ~ 30°。隧址区发育构造包括卧龙寺向斜、龙泉驿背斜、龙泉驿断层和马鞍山断层。测区地层自上而下依次为第四系全新统粉质黏土、侏罗系上统蓬莱镇组(J<sub>3p</sub>)泥岩夹砂岩、侏罗系上统遂宁组(J<sub>3s</sub>)泥岩夹砂岩、侏罗系中统上沙溪庙组(J<sub>2s</sub>)泥岩夹砂岩。

## 2 孕灾机制研究

在漫长的地质历史中,龙泉山经历了特殊的沉积建造和构造演化过程,从而赋予了龙泉山独特的油气富集机制。

### 2.1 区域沉积建造与构造演化研究<sup>[2]</sup>

#### 2.1.1 寒武纪—三叠纪演化特征

研究区处于四川盆地,在区域构造上归属于扬子准地台中二级构造单元—四川台坳。呈北东向的菱形盆地状,西以江油—灌县断裂、东以七曜山断裂为界。它在古生代是一个相对隆起区,发育了海相地台型建造序列,沉积物厚度比周边薄。台坳核部是一北东向的陆核。川中普遍缺失泥盆系和石炭系,古隆起核部二叠系常与下奥陶统或寒武系平行不整合接触。

早三叠世晚期,该区发育成为半封闭的内海盆地,以龙泉山和华蓥山为中心逐步形成“水下高地”,发育蒸发式建造。中三叠世时两个水下高地进一步发展,周边古陆扩大,使海盆封闭更趋完善,发育了蒸发式建造。内陆盆地的形成始于晚三叠世晚期。受印支运动末幕的影响,三叠纪后本区进入陆相沉积阶段。红色复陆屑建造西厚东薄,西部上三叠统—第四系发育齐全,厚度巨大,具多层砾岩,向东厚度减薄,甚至缺失。

#### 2.1.2 侏罗纪岩相古地理

##### (1) 早侏罗世珍珠冲期—自流井期

本期属湖泊相沉积,可进一步划分为深湖、浅湖、滨湖相,而且早世各期的深湖相区几乎全位于四川湖的偏北部,大致以南充—达县为中心。深湖相沉积物以黑色泥页岩为主,发育水平层理;浅湖相为灰绿色砂泥岩夹泥灰岩;滨湖相则为紫红色砂岩、含砾砂岩等粗粒且分选较好的沉积物。

##### (2) 中侏罗世新田沟期—上沙溪庙期

中侏罗世,四川盆地大范围抬升,在新田沟期之初,盆底出露水面,遭受剥蚀,形成砾岩堆积。随后小幅下降,沉入水下,接受灰绿、紫红色砂岩、泥岩沉积,大区域属浅湖—滨湖或滨湖沼泽环境。

晚新田沟期,以紫红色泥岩、砂岩为主,发育交错层理,冲刷构造,具有河流相沉积特征。

新田沟期末,燕山运动波及本区,随四川西部山区的强烈隆升,盆地区也相继隆升,致使新田沟组被剥蚀殆尽或大部遭受剥蚀致使在龙门山地中段前缘,下沙溪庙组底部厚达千米的冲积扇相砾岩、砂砾岩超覆于

自流井组之上。

上、下沙溪庙期则沉积了近千余米厚红色碎屑岩沉积,其粒度粗、分选差,发育平行层理与交错层理,显示为河流冲击与洪积物沉积。泥岩中见薄层石膏沉积,表明中侏罗世中、晚期的气候已趋于干旱。

### (3)晚侏罗世遂宁期-蓬莱镇期

遂宁期四川盆地相对宁静,沉积了大面积的紫红色厚层泥岩夹粉砂岩地层,水平层理发育,可见波痕、泥裂,局部含薄层石膏沉积,表明当时气候干旱,为强氧化的浅湖沉积环境。

蓬莱镇期龙门山强烈褶皱隆起,四川盆地(川西台陷部分)接受了深达1 200~1 800 m的冲积扇相堆积,扇顶砾岩可达50~500 m。盆地中部和东南部为典型的河流-洪泛盆地,沉积物主要为韵律式的砂泥岩,砂岩普遍发育交错和平行层理,时见冲刷构造和滞留灰质砾岩透镜体。这一时期的构造运动特点是以多次升降运动为主,台区内部无褶皱运动。燕山运动在四川盆地的主要表现为震荡升降,普遍存在的侏罗系下、中统之间和白垩系与上侏罗统之间的平行不整合是这种性质的表征。

本区喜马拉雅运动发生于早第三纪-晚更新世。是四川东部最重要的构造运动,它席卷了整个四川盆地,使盆地自震旦纪以来的沉积盖层全部褶皱隆升,结束了湖盆沉积的历史。

### 2.1.3 龙泉山深大断裂带

根据区域地质与地球物理的研究,龙泉山为一深大断裂带<sup>[3]</sup>。其南自仁寿,向北经老君场后走向渐转为北20°东,绵延超过120 km。地貌表现为南高北低,构造带核部出露最老地层为中侏罗统沙溪庙组。构造带轴部平缓,两翼倾斜,局部陡立,东、西两翼各发育1条走向逆冲断层,中间夹持地体整体隆升,地面形态呈“箱状”或“似箱状”褶皱,形成逆冲-地垒型构造模式。以中部李家咀所在的2 km典型地垒构造区段为过渡段,因两翼犁式逆冲断层优势地位不同而使其平面上呈“S”型展布。在北段,以西翼逆冲断层为优势断层,构造带向西凸出,剖面形态为西高东低,地面背斜构造形态较为典型、完整。在南段,则以东翼逆冲断层为主,向东凸出,剖面形态为东高西低。

## 2.2 油气生成、运移、储集机制研究

### 2.2.1 气源生成特点

研究表明,龙泉山油气产自上三叠统须家河组烃源层<sup>[4]</sup>,上覆的侏罗系地层无生烃能力。该地层具有以下特征:

#### (1)生气烃源岩厚度大

上三叠统须家河组地层厚度300~1 100 m,一般大于500 m,坳陷中心高达1 100 m。

#### (2)有机质丰度高

地层泥岩有机碳含量0.5%~6.5%,平均为1.83%。

#### (3)生气强度高,目前正处于生气高峰期

南部地区油气储量大于 $50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ,北部地区油气储量为 $20 \sim 40 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。上三叠统烃源岩生烃高峰期为白垩纪-早第三纪。现今上三叠统烃源岩干酪根热演化程度高,处于高成熟~过成熟阶段,属湿气~干气生气范围,现正处于生气高峰期,为川西侏罗系沙溪庙组浅层气藏形成提供了充足的物质基础,如图1所示。从图中可知,龙泉山区域油气储量为 $6 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。

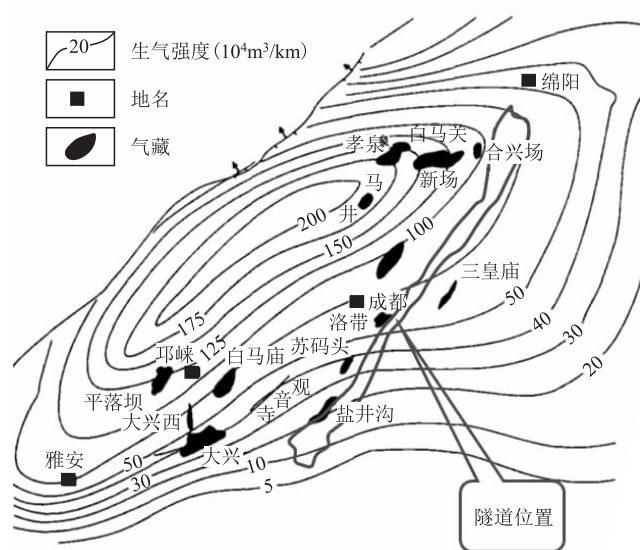


图1 四川盆地侏罗系地层储气情况与气藏分布图

### 2.2.2 油气储集空间

龙泉山油气储集空间分为两类,砂岩空隙和构造裂隙。

#### (1)砂岩空隙

沉积建造中富含空隙、溶隙和连通性的砂岩地层为油气提供了原生的储集空间。超覆于四川中生代油气盆地烃源层的地层为侏罗系巨厚砂泥岩地层,沉积厚度可达2 500 m。

侏罗系沙溪庙组属河湖相沉积,沉积砂层类型多样,包含河流相的河道砂、边滩砂,三角洲相的分流河道砂、席状砂等类型,其体量巨大,成为沙溪庙组的主要含油气砂体。

#### (2)构造裂隙

不同期次与尺度的断裂构造裂隙为油气运移开辟了良好的通道和储集空间。龙泉山是四川境内一条区

域深大的断裂,隧址区位于该构造带北段,此处西翼断层自西向东、由浅入深贯穿地腹深部,断面斜切整个龙泉山构造主体,直达东翼断层下方,与东翼次级断裂一起组成反“y”字型,如图2所示。作为遭受挤压推覆的上盘,龙泉山山体次级断裂极为发育。地腹逆掩带最宽处约3 km,最大落差约2 000 m<sup>[3]</sup>。

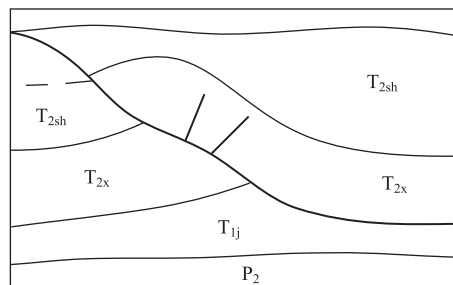


图2 隧址区反“y”型区域断裂带

### 2.2.3 圈闭构造

天然气作为流体,遵从自高地应力区向低地应力区运移的规律,因此,其富集的前提是具有封闭的空间构造。典型的封闭构造包括褶皱型圈闭构造、逆断层型圈闭构造和岩性型圈闭构造<sup>[4]</sup>以及成生于各个地质时代的短轴背斜、穹隆、倾覆背斜等构造。油气藏与侏罗纪沙溪庙组地层穹隆与倾覆褶皱构造之间密切的空间关系如图3所示。从图中可以看出,新场、平落坝、大兴西、白马庙气藏形成于开阔的古穹隆区域,而观音寺、盐井沟、洛带等气藏均位于古倾覆背斜附近的古斜坡地带。

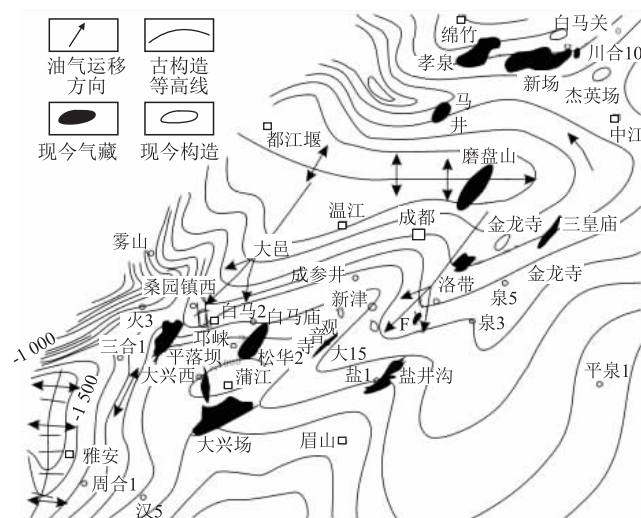


图3 川西白垩纪沉积前沙溪庙组顶古构造与油气运聚关系图

逆断层型圈闭构造包含背冲式地垒构造和单断式逆冲构造两种类型,是水平岩层遭受横向挤压条件下,

产生褶断效应,形成宽缓背斜与逆冲断层或逆掩推覆构造分别组合而成。具体而言,可以是两个逆冲断层夹持褶曲核部而成的地垒构造,也可以是单个逆冲(逆掩)断层与宽缓背斜组合而成的单断式逆冲构造。

岩性型圈闭构造是指巨厚的泥岩与砂岩互层,形成泥包砂岩性层,封堵油气上升通道而成为封闭良好的空间。

### 2.3 龙泉山瓦斯灾害孕育机制

四川盆地、龙泉山油气藏成藏机制,即孕灾机制如下:

(1)三叠系须家河组地层是本区天然气的生气层,由于沉积层厚,有机质丰度高且正处于生气高峰期而成为优质气源。

(2)上覆侏罗系、白垩系地层虽然同属中生代沉积盖层,但不具有生烃能力,因而本身不产气。但其中的砂岩层空隙、次生溶孔形成了良好的储气空间。

(3)印支、喜山期的造山运动,对四川台坳产生了强烈的水平挤压和大规模的褶断作用,形成大型的表皮滑脱构造(如龙泉山断褶带),同时伴生了规模各异的短轴背斜、穹隆和鼻状等表层圈闭构造和各种尺度的断层与裂隙带,为气藏的运移和储存提供了有利条件。

(4)中生代盖层属河湖相沉积,纵向上泥岩与砂岩频繁互层且以泥岩为主,产状平缓,为天然气的富集提供了良好的盖层条件。

## 3 裂隙带米级误差识别与评价方法研究

由以上对龙泉山瓦斯赋存与运移机制的研究可知,(1)龙泉山隧道瓦斯无处不在,这是因为龙泉山历经多次构造运动,发育了数量巨大的断层与节理构造带。(2)对瓦斯的探测可以转化为对裂隙构造的探测。作为隧道围岩的沙溪庙组地层与蓬莱镇组地层,泥岩占绝对优势,多为厚度超过1 m的块状层,而与其互层的砂岩厚度则小得多,以20 cm常见,在体量上处于绝对的少数。

本层次对于裂隙带的识别主要采取 Google-Earth 3D 卫星场景影像、无人机 3D LiDAR 技术、地表 EH<sub>4</sub> 探测和洞内 TSP 超前探测。

### 3.1 Google-Earth 3D 卫星场景构造影像识别

Google-Earth 是一款由 Google 公司开发的的虚拟地球仪软件,将卫星图像、地图整合在一起,形成全球地形地貌的三维模型。用户可以在电脑上对地貌实施 360°三维场景观测。其影像有效分辨率在大城市可达



1 m 和 0.5 m,视角高度分别约为 500 m 和 350 m。本次解译采用的图像分辨率可达 1 m,而且可以获取自 1984 年以来的各个阶段的卫星图片。本次研究采用构造地貌解译方法,对隧址区 50 km<sup>2</sup> 区域进行构造解译,可识别出对施工具有重大影响的大型线状构造、地表水体等风险源。

3.2 无人机 LiDAR 技术微地貌构造解译

LiDAR 即激光探测与测量,利用 GPS 和 IMU 进行机载激光扫描,其所测得的数据为数字表面模型。应用分类技术在这些原始数字表面模型中移除建筑物、人造物、覆盖植物等测点,即可获得数字高程模型 (DEM),从而剔除地表植被、地物对于地貌图像的影响。同时,该技术具有 3cm 的超高分辨率,可以为构造微地貌解译提供精准的三维数据模型。

3.3 重点靶区 EH<sub>4</sub> 地表深层构造探测

龙泉驿背斜谷地与隧道相交处有一个水库,此处为重要风险源。采用 EH<sub>4</sub> 实施探测,利用其测深大

(最大探测深度可达 1 000 m)、对水反应敏感的特点,进一步查明深部构造发育情况及其含水性,为隧道施工提供准确依据。

3.4 隧道风险分级分区体系研究与建立

通过对龙泉山孕灾机制的研究和不同尺度构造带的识别、重点靶区的 EH<sub>4</sub> 探测,结合隧道勘察设计文件,依据瓦斯赋存条件,将龙泉山隧道围岩分为 3 级风险区段和 9 个瓦斯分区。3 级风险区段即高瓦斯风险区段、中瓦斯风险区段和低瓦斯风险区段。

(1)高瓦斯风险区段:具有背斜或穹隆圈闭构造、缓倾单斜构造、山形完整,隧道埋深大。

(2)中瓦斯风险区段:向斜核部,埋深浅,深部发育隐伏断层;背斜核部侵蚀为 V 型谷,但埋深较大,发育通天逆断层;山形完整的单斜岩层,但埋深居中。

(3)低瓦斯风险区段:通天断层及其影响带,隧道埋深浅,主要在洞口附近。

龙泉山隧道瓦斯风险分级分区评价如表 1 所示。

表 1 龙泉山隧道瓦斯风险分级分区评价表

序号	里程	风险分级	瓦斯赋存条件
1	YDK 41 + 345 ~ YDK 42 + 035	低	围岩为侏罗系上统遂宁组地层,处于龙泉驿犁式主断层地表出露处,隧道进口区,埋深浅,洞口深处局部埋深较大区段因岩层为地形线切割而具有较好的瓦斯放散条件,因而整体瓦斯风险评价为低瓦斯风险区段
2	YDK 42 + 035 ~ YDK 43 + 876	高	围岩为侏罗系上统遂宁组地层,岩层产状近水平且山形完整,泥岩盖层封闭条件好,埋深大,为高瓦斯风险区段
3	YDK 43 + 876 ~ YDK 44 + 670	中	围岩为侏罗系上统遂宁组地层,卧龙寺向斜与龙泉驿背斜枢纽影响带区段。向斜区段封闭好,下伏地层发育张性构造带,为良好的瓦斯通道,但因断层发育区岩较为破碎,地形剥蚀为 V 型谷,隧道埋深浅。枢纽影响带岩层陡倾,瓦斯封闭条件较差,但此区段埋深较大,综合评价为中度风险区段
4	YDK 44 + 670 ~ YDK 45 + 980	高	围岩为侏罗系中统沙溪庙组地层,上覆遂宁组地层,构造上属龙泉驿箱状背斜西翼,岩层近水平产出,隧道埋深大。瓦斯圈闭条件好,下伏龙泉驿主断层沟通了须家河组气源地层,为高瓦斯风险区段
5	YDK 45 + 980 ~ YDK 46 + 340	中	围岩为侏罗系中统沙溪庙组地层,构造上属龙泉驿箱状背斜轴部构造带,因断层发育岩石破碎而侵蚀为 V 型宽谷,因两侧对称发育逆冲断层而为地垒构造,逆断层属压性构造,具备一定的瓦斯封闭能力,同时因埋深较大而瓦斯封闭能力得以保留,综合评价为中度瓦斯风险区段
6	YDK 46 + 340 ~ YDK 47 + 660	高	围岩为侏罗系中统沙溪庙组地层,上覆遂宁组地层,构造上属龙泉驿箱状背斜东翼,岩层近水平产出,隧道埋深大。瓦斯圈闭条件好,下伏龙泉驿主断层沟通了须家河组气源地层,为高瓦斯风险区段
7	YDK 47 + 660 ~ YDK 49 + 335	低	围岩为侏罗系上统遂宁组与蓬莱镇组地层。构造上属马鞍山断层及其影响带,该构造带为通天断层,断层核心区域侵蚀为 V 型宽谷,隧道埋深浅,瓦斯放散能力强,中部龙泉驿背斜枢纽影响带岩层陡倾,瓦斯封闭条件差,为低瓦斯风险区段
8	YDK 49 + 335 ~ YDK 50 + 480	中	围岩为侏罗系上统蓬莱镇组地层,为缓倾单斜岩层,山形较为完整,埋深居中,瓦斯封闭条件尚可,为中度瓦斯风险区段
9	YDK 50 + 480 ~ YDK 51 + 069	低	围岩为侏罗系上统蓬莱镇组地层,为龙泉山构造带边缘,隧道出口段,埋深浅,为低瓦斯风险区段

3.5 TSP 洞内构造探测

瓦斯风险分级分区的确立,为施工过程中瓦斯的进一步探测指明了方向,为瓦斯防治奠定了基础。在隧道开挖过程中,采用 TSP 对开挖面前方实施超前探测,寻找构造裂隙带。在该阶段,借助前述工作建立的地质构造知识体系,结合掌子面地质观测与推断,可以有效规避 TSP 物探解译的多解性,提高构造识别的精

度。现场地质跟踪实证研究表明,对于宽度在 3 m 及以上裂隙带的识别,基本可达 100%,其里程误差在 1 ~ 6 m 不等。

4 裂隙带亚米级误差识别与评价方法研究

对构造带空间位置的精细预报包含两个指标,一

是构造面的隧道中心里程,二是构造面的首次揭露里程,即隧道横截面开挖净空范围内与构造面首次交接位置的里程。本文所指的裂隙带里程预报误差就是以上指标预测值与实际开挖揭露值之间的误差。

裂隙带亚米级误差识别的实现依赖于两方面的工作,一是在区域地质分析-孕灾机制研究-瓦斯风险分级分区-瓦斯构造带米级误差识别这一系列由宏观到微观、层层深入研究工作的基础上,提前根据掌子面前方围岩质量与构造发育状态、瓦斯风险的状况,建立起三维系统的知识体系。二是采用30 m超前水平钻探,精确锁定构造面空间位置。本项目,要求掌子面开挖前至少有3个钻孔控制。钻探过程中,量测钻孔揭露构造带的深度与钻孔倾覆角,计算构造面该探测点空间坐标,如此获得同一构造面3点坐标,即可计算该构造面的产状<sup>[5]</sup>,进而计算隧道中心里程与首次揭露里程。在钻进过程中,每进尺1 m,均要利用瓦斯检测仪量测钻孔瓦斯含量,以确定构造带的瓦斯赋存情况。

## 5 结论

(1)基于沉积建造与构造演化及油气生成、运移与储集机理的孕灾机制研究,是进行地质构造与瓦斯精准预测的必要前提。

(2)利用高分辨率LiDAR技术实施微地貌构造精确解译,创新了隧道施工细部构造识别方法,有效提高了地质预报精度。

(3)在油气储集机制研究的基础上,对特长油气田瓦斯隧道进行瓦斯风险分级、分区,为地质构造精准预报和瓦斯施工防治奠定了坚实的基础。

(4)依托孕灾机制研究、构造地貌三维影像精确解译、针对性物理探测、构造带钻探精查层次递进四位一体的预测模式,实现了特长油气田高瓦斯隧道地质构造与瓦斯的亚米级误差精准预报,形成了系统的探

测方法。

(5)通过缜密而精细的研究与探查工作,龙泉山隧道地质预报工作取得了良好的效果,全线20 km的隧道施工,未发生任何瓦斯事故,获得了良好的安全效益、社会效益和经济效益。

## 参考文献:

- [1] 赵勇,田四明.截至2018年底中国铁路隧道情况统计[J].隧道建设(中英文),2019,39(2):324-335.  
ZHAO Yong, TIAN Siming. Statistics of Chinese Railway Tunnels By the End of 2018 [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(2):324-335.
- [2] 四川省地质矿产局.四川省区域地质志[M].北京:地质出版社,1991.  
Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province, Regional Geology Records of Sichuan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.
- [3] 于佳男,李忠权,曾庆,等.龙泉山构造带构造特征及扭动形迹成因探讨[J].天然气勘探与开发,2013,36(3):1-3.  
YU Jianan, LI Zhongquan, ZENG Qing, et al. Structural Characteristics and Origin of Twisted Traces in Longquanshan Tectonic Belt [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2013, 36(3):1-3.
- [4] 唐大海,陈洪斌,谢继容,等.四川盆地西部侏罗系沙溪庙组气藏成藏条件[J].天然气勘探与开发,2005,28(3):14-19.  
TANG Dahai, CHEN Hongbin, XIE Jirong, et al. Reservoir Forming Conditions of Jurassic Shaximiao Formation, West Sichuan Basin [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2005, 28(3):14-19.
- [5] 刘洪涛.利用向量代数和空间解析几何原理确定岩层产状的方法[J].铁道勘察,2013,39(2):31-33.  
LIU Hongtao. Method for Determining the Attitude of Rock Formation by Using Vector Algebra and Space Analytic Geometry Principle [J]. Railway Investigation and Surveying, 2013, 39(2):31-33.

(编辑:车晓娟 苏玲梅)