文章编号：1009-6582(2019)02-0170-05 DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2019.02.025

西宁至成都铁路某隧道高压CO_2气体研究及地质选线探析

姚志勇[1,2]
(1 中铁第一勘察设计院集团有限公司，西安 710043；2 陕西省铁道及地下交通工程重点实验室(中铁一院)，西安 710043)

摘　要　西宁至成都铁路定测阶段XCDCSZ-3-1号深孔突发高压CO_2气体，具有压力大、持续喷发时间长的特点。文章在收集和调查该区域地质背景的基础上，通过物探、钻探、气体取样、化验等综合勘察手段，研究了气体产生的原因、分布特征及运移、存储特征；在分析高压气体对工程影响的基础上，从地质角度研究其选线原则。结果表明：高压CO_2气体为无机成因，由基底大理岩受热分解产生，运移通道主要为古风化壳，主要聚集在基底鼻状隆起构造；高压CO_2气体分布与基底地层岩性、埋深、基底构造、盖层岩性、盖层断裂有着密切的联系，通过绕避其相关地质因素，可达到优化线路方案的目的。

关键词　隧道　有害气体　CO_2突出　成因　分布规律　地质选线
中图分类号：U452.1+3　　**文献标识码：A**

1　概　述

新建西宁至成都铁路位于青海、甘肃、四川三省交界地带，走行于青藏高原东部边缘与黄土高原过渡地带，整体呈南北走向，北起青海省东北部的西宁盆地，向南经祁连山、穿秦岭、跨若尔盖草原、抵岷山山脉，于四川省松潘县黄胜关站与成兰铁路接轨，项目新建长度509 km[1]。定测阶段，于西宁盆地XCDCSZ-3-1号深孔突发高压CO_2气体井喷事件，该孔于2017年11月29日开钻，2018年4月23日终孔，终孔深度为380 m。2018年4月25日进行孔内水文地质试验，2018年4月26日15:58提浆至降深160 m时出现响声，随即喷出气体，高压气体雾化泥浆，呈黑色烟雾状，喷射高度达5 m，16:03井内泥浆完全喷出后，目视气体呈现淡蓝色，并伴随较大的声响，如图1所示。现场未闻到特殊气味，截止5月6日封堵，喷出气体状态未见明显变化，具有压力大、持续喷发时间长的特点。考虑高压CO_2气体的影响，如何科学、经济、安全、合理地进行地质选线及工程设置，成为控制西宁至成都铁路前期线路方案的重难点。



图1　XCDCSZ-3-1号深孔突发高压CO_2气体
Fig.1　Burst of high pressure carbon dioxide in the XCDCSZ-3-1 deep hole

随着人类工程建设区域的不断扩展，众多的工程不断遇到气体的问题，如拉林铁路米林隧道[2]、合

修改稿返回日期：2018-09-22
基金项目：中铁第一勘察设计院集团有限公司科研项目.
作者简介：姚志勇(1985-)，男，工学硕士，高级工程师，主要从事铁路勘察与设计工作，E-mail：101934197@qq.com.

武铁路大别山金寨区段隧道[3]、成贵铁路隧道群[4]、渝怀铁路圆梁山隧道[5]和杭新景高速公路窑山顶隧道[6]等，其含气地层主要为含油气、含煤地层，其主要成分为烷烃，其中甲烷占大多数，一般含有硫化氢等其它气体。其气体均呈逸散状态出现。铁路勘察阶段遇到高压CO_2气体尚属首例，可供借鉴的工程经验有限。

因此，有必要对西宁至成都铁路产生高压CO_2气体区域地质背景、气体的分布特征、形成原因进行深入研究，分析气体对工程的影响，提出高压CO_2气体区域地质选线原则，为工程的安全施工和运营提供技术支撑，同时也为类似工程提供经验和方法。

2 区域地质背景

2.1 区域地质概况

西宁盆地是祁连山地槽褶皱系中祁连隆起带东部发育的中-新生代坳陷盆地，经历了前中生代基底构造演化和中-新生代盆地构造演化两大构造发展阶段，主要由基底与盖层组成[7]。基底为下元古界至奥陶系岩浆、变质岩类地层，盆地内少量出露。盖层主要为第三系至侏罗系的沉积岩地层。

钻孔XCDCSZ-3-1揭示地层为：0~3 m为第四系粉质粘土；3~84 m为第三系洪沟组泥岩夹砂岩，局部夹石膏，岩体呈柱状，较完整；84~153.7 m为第三系祁家川组泥岩夹砂岩，局部含砾岩，岩体呈柱状，较完整；153.7~342.6 m为白垩系民和组砾岩夹砂岩为主，局部夹泥岩，岩体呈柱状，较完整(图2)；342.6~380 m为下元古界东岔沟组碎裂化大理岩，岩体呈碎块状，岩体破碎(图3)。

2.2 区域气体研究概况

2002年底，在西部严重缺水地区地下水勘查项目“青海省互助、平安县严重缺水地区地下水勘查”过程中，在青海平安县祁家川河谷阶地后缘钻探揭露出了高含CO_2气水混合高压自流热水井。其间歇



图2 民和组砾岩夹砂岩

Fig.2 Conglomerate with sandstone of Minhe formation



图3 东岔沟组碎裂化大理岩

Fig.3 Fractured marble of Dongchagou formation

2.2 区域气体研究概况

2002年底，在西部严重缺水地区地下水勘查项目“青海省互助、平安县严重缺水地区地下水勘查”过程中，在青海平安县祁家川河谷阶地后缘钻探揭露出了高含CO_2气水混合高压自流热水井。其间歇式自喷周期约为10 min，自喷持续时间210 s，周期稳定，最大瞬时自喷水量达5 834.94 m^3/d[8]。

1977—2000年窑街煤矿多次发生高压CO_2突出矿难，导致累计百人以上死亡，经济损失惨重。如1977年5月24日发生了特大型CO_2突出灾害事故，致90人死亡，喷出的气体组分中CO_2占95.9%~96.6%，累计突出煤岩1 030.32 t。该突出点发生在断裂构造附近，突出点距离地表垂深284.2 m[9,10]。

3 高压气体研究

3.1 气体成分分析

气体样品的采集需要保证足够的样品量以满足实验室测试分析，同时又要避免样品采集运输过程中的空气污染问题。目前，国际通用的采样方法是“预真空采样法”。收集逸出气体时，将漏斗倒置于气口，取样前使用手持抽气泵反复抽取集气装置约5~10 min，直至利用集气瓶/袋收集气体，其气体成分如表1所示。

根据试验结果分析，气体成分以N_2，CO_2，O_2为主，由于孔口取样，由孔底喷出至孔口，气样中混入一定比例的空气。相比于正常空气中CO_2含量比例0.03%来说，CO_2气体含量增加了250~610倍，主要原因为CO_2气体突出。

3.2 气体压强计算

根据现场抽水试验描述，提浆至降深160 m时开始井喷，认为钻孔内的泥浆压强与气体压强处于平衡状态，即根据井喷水柱高度可估算气压为：

$$P=\rho gh=1.07\times9.8\times(380-160)=2\,306.92\ \text{kPa}$$

式中：P为压强(kPa)；ρ为密度，根据现场泥浆稀稠

表1 西宁至成都铁路XCDCSZ-3-1深孔气体成分测试结果

Table 1 Test results of gas composition in deep hole of XCDCSZ-3-1 on Xi′ning-Chengdu railway

取样位置	H_2/(%)	He/(%)	CH_4/(%)	N_2/(%)	C_2H_6/(%)	O_2/(%)	H_2S/(%)	Ar/(%)	CO_2/(%)	C_3H_8/(%)	C_4H_{10}/(%)	SO_2/(%)
出气口	0.00	0.01	0.00	72.50	0.00	19.20	0.00	0.84	7.44	0.00	0.00	0.00
	0.03	0.01	0.00	70.67	0.00	18.66	0.00	0.81	9.83	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	65.54	0.00	16.05	0.00	0.00	18.41	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	72.48	0.00	17.78	0.00	0.00	9.74	0.00	0.00	0.00

程度估算为1.07g/cm³；g为重力加速度(N/kg)；h为水柱高度，即终孔深度380 m减去降深160 m。

3.3 气体产生的来源

目前学术上达成共识的是CO_2气藏可以分为无机成因和有机成因两大类，而无机成因的CO_2主要为地幔脱气作用形成的幔源CO_2，同时还有地壳岩石化学反应、碳酸盐岩受热分解等生成的CO_2等[11]。判别CO_2成因的方法主要有稳定碳同位素$\delta^{13}C$、稀有气体氦同位素R与Ra的比值和^3He与^4He原子数的比值，取样测试结果如表2所示。

表2 西宁至成都铁路深孔$\delta^{13}C$与氦同位素成分测试结果

Table 2 Test results of $\delta^{13}C$ and helium isotope compositions in deep hole on Xi′ning-Chengdu railway

来样编号	碳同位素 $\delta^{13}C_{CO_2}$/(‰)	氦同位素	
		R/Ra	$^3He/^4He$
3-1-1	-0.9	0.29	4.11×10^{-7}
3-1-2	-0.8	0.25	3.50×10^{-7}

(1) 碳同位素

戴金星等[12]指出有机成因的$\delta^{13}C$值主要在-10‰~-30‰，而$\delta^{13}C$值≥-8‰则属无机成因的CO_2[12]；沈平等[13]认为$\delta^{13}C$>-7‰是无机成因CO_2，而有机质分解和细菌活动形成的有机成因CO_2的$\delta^{13}C$值为-10‰~-20‰。综合国内外学者有关$\delta^{13}C$数据，可归总为有机成因$\delta^{13}C$值<-10‰，主要在-10‰~-30‰区间；无机成因$\delta^{13}C$值>-8‰，主要在-8‰~3‰区间。无机成因二氧化碳中，由碳酸盐变质成因的，$\delta^{13}C$值接近于碳酸盐的$\delta^{13}C$值，在0±3‰左右；火山-岩浆成因和幔源的二氧化碳，$\delta^{13}C$值大多在-6‰±2‰。

XCDCSZ-3-1深孔孔口取气样测试$\delta^{13}C$值为-0.8‰~-0.9‰，判定为无机成因，碳酸盐变质成因。

(2) 氦同位素分析

无机成因CO_2大致可分为地幔成因和地壳成因，目前大多数采用氦同位素作为判定地球深部无机成因天然气的重要依据。典型壳源、幔源流体的及大气中^3He与^4He的原子数比分别为2×10^{-8}，1.1×10^{-5}，1.4×10^{-6}，也常用大气氦(Ra)和样品氦(R)的同位素比值来表示气样的氦同位素分布特征，当R/Ra>1，表示气样中幔源氦混入；当R/Ra<0.1时，可以认为气样中氦基本来自壳源[14]。

XCDCSZ-3-1深孔孔口取气样测试^3He与^4He的原子数比值为3.5×10^{-7}~4.11×10^{-7}，接近于10^{-8}和10^{-6}数量级，属于壳源-大气无机成因。

XCDCSZ-3-1深孔孔口取气样测试R/Ra的同位素比值为0.25~0.29，认为氦基本来自壳源，混入部分大气中的氦。

(3) 气体成因分析

钻孔底部揭示出下元古界东岔沟组碎裂化大理岩正好与碳同位素判定一致。大理岩在高温、岩浆接触变质或动力构造热解产生CO_2的反应式为[15]：

$$CaCO_3 \xrightarrow{\text{高温}} CaO + CO_2\uparrow$$

$$CaMg(CO_3)_3 \xrightarrow{\text{高温}} CaO + MgO + 2CO_2\uparrow$$

$$CaCO_3 + SiO_2 \xrightarrow{\text{高温}} CaSiO_3 + CO_2\uparrow$$

$$CaMg(CO_3)_3 + SiO_2 \xrightarrow{\text{高温}} CaMgSiO_4 + 2CO_2\uparrow$$

3.4 气体的分布特征

采用二维地震、大地电磁、测氡3种物探手段结合深孔钻探相互验证。根据XCDCSZ-3-1深孔揭示地层情况，不断调整不同物探方法的间距、炸药量、软件参数等，以求建立解译标志。通过物探剖面解译XCDCSZ-3-1深孔处发育一鼻状隆起构造，往东基底宽度越来越小，埋深越来越大，往西基底宽度逐渐增大，埋深先小后大。气体受鼻状隆起构造控制，主要分布于隆起构造核部。

3.5 气体的运移、存储特征

根据XCDCSZ-3-1钻孔及物探分析，判断该孔处为一处鼻状隆起构造，根据XCDCSZ-3-1钻孔底

部岩芯破碎判定为古风化壳。从气源分布区、流体及压力势分布分析，盆地的隆起构造多处于低流体势和较低的压力分布区[16]。岩体破碎，储层发育，渗透性良好，是气体运移的指向区。

盖层主要为第三系至白垩系的沉积岩，含泥岩、石膏岩，具有足够的厚度及连续性，且具封堵性强、分布范围大、稳定性好等特征，是天然理想的盖储层结构组合。

XCDCSZ-3-1深孔穿透盖层，揭示隆起构造古风化壳，导致含气构造层顶部与地表连通，高压气体顺钻孔喷射而出，如图4所示。

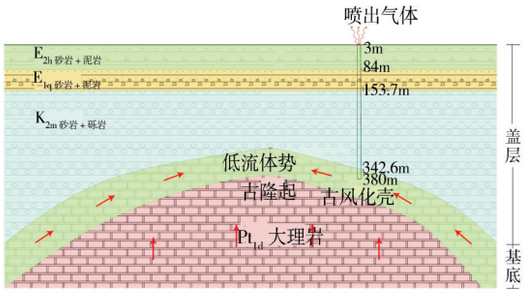


图4 高压气体运移、存储示意

Fig.4 Schematic diagram of high pressure gas migration and storage

4 气体对工程影响分析

对于铁路工程，气体特别对隧道施工及结构设计有很大影响。

（1）对施工人员人身安全影响

其会导致岩石和气体突出，产生掌子面塌方、冒顶，岩、气突出能瞬间导致人员死亡；CO_2浓度处于0.3%~0.4%时，会导致人呼吸加深，出现头疼、耳鸣、血压增高等症状；当浓度高达0.8%以上时会出现死亡现象；恶化施工作业环境，降低劳动生产效率，威胁作业人员健康和安全。

（2）对隧道工程影响

需研究高压CO_2防突隧道支护体系；需研究适应高浓度CO_2条件下的水泥防腐的保护厚度；需研究适应高浓度CO_2条件下的通风系统。

5 高压气体地质选线原则

通过对西宁至成都铁路产生高压CO_2气体区域地质背景、气体的分布特征、形成原因进行深入研究，认为气体的分布与基底地层岩性、埋深、基底构造（褶皱、断裂）、盖层岩性、盖层断裂有着密切的联系，通过查明其地质背景，在线路优化中应遵循以下原则：

（1）从高压气体成因来说，气体产生于基底大理岩，其基底埋深较浅，易产生高压气体问题。建议线路尽量走行于基底构造为凹陷地貌区。

（2）从气体的分布特征来说，建议平面位置上尽量绕避鼻状隆起构造，无法绕避时需保持一定的安全岩柱厚度。

（3）在绕避基底隆起构造的基础上，还需考虑断裂构造为气体的主要运移通道，线路尽量避免以隧道工程穿越中、新生代断裂构造。

6 结 论

（1）西宁至成都铁路产生高压CO_2气体的成因为无机成因，由大理岩受热分解产生；运移通道主要为古风化壳，主要聚集在不整合面基底鼻状隆起构造，局部在上覆白垩统民和组砂岩、砾岩中含气，主控因素为盆地基底构造。

（2）根据钻孔、物探等手段，查明在XCDCSZ-3-1附近存在一走向近东西、枢纽东倾的鼻状隆起构造，往东基底宽度越来越小，埋深越来越大，往西基底宽度逐渐增大，埋深先小后大。

（3）西宁至成都铁路产生高压CO_2气体分布与基底地层岩性、埋深、基底构造（褶皱、断裂）、盖层岩性、盖层断裂有着密切的联系，通过绕避其主控因素，提出地质选线原则，达到优化线路方案的目的。

现代隧道技术

参考文献

References

[1] 中铁第一勘察设计院集团有限公司. 新建铁路西宁至成都线（西宁至黄胜关段）可行性研究报告[R]. 西安: 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 2016.

China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd. Feasibility Study Report on Xining-Chengdu New Railway (Xining-Huangshengguan Section)[R]. Xi′an: China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 2016.

[2] 何财基, 张洁瑜, 陈泽昊, 葛开国. 拉林铁路米林隧道有害气体成因分析及处置措施[J]. 铁道建筑, 2017, 57 (10): 78-80.
HE Caiji, ZHANG Jieyu, CHEN Zehao, GE Kaiguo. Cause Analysis and Treatment Measures of Harmful Gas in Milin Tunnel of Lasa-Nyingchi Railway[J]. Railway Construction, 2017, 57 (10): 78-80.
[3] 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, (8): 170-172.
XIONG Changhua. Study on Burning Phenomenon of Jinzhai (Dabieshan) Tunnel in Anhui Section of Hewu Railway[J]. West-China Exploration Engineering, 2006, (8): 170-172.
[4] 丁浩江, 许 模, 岳志勤, 等. 成贵铁路有害气体地质特征及分布规律[J]. 科学技术与工程, 2018, 18 (5): 309-314.
DING Haojiang, XU Mo, YUE Zhiqin, et al. Geological Characteristics and Distribution Laws of Harmful Gas in Chengdu-Guiyang Railway[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18 (5): 309-314.
[5] 石新栋. 圆梁山隧道主要地质问题及施工对策[J]. 铁道标准设计, 2003, (增 1): 34-36.
SHI Xindong. Main Geological Problems in Yuanliangshan Tunnel and Measures to Deal with Them[J]. Railway Standard Design, 2003, (S1): 34-36.
[6] 郑安梁, 汪永森, 冯海鳌. 杭新景高速公路窑山顶隧道不明可燃气体的分析及处理[J]. 浙江建筑, 2005, (增 1): 131-132.
ZHENG Anliang, WANG Yongsen, FENG Haiao. Analysis and Treatment of Unknown Combustible Gases in Yaoshan Top Tunnel of Hangzhou Xinjing Expressway[J]. Zhejiang Construction, 2005, (S1): 131-132.
[7] 青海省地质局. 1∶20万乐都幅地质图说明书[R]. 西宁: 青海省地质局, 1965.
Qinghai Geological Bureau. 1∶200,000 Ledu Geological Map Instructions[R]. Xining: Qinghai Geological Bureau, 1965.
[8] 郑长远, 张 徽, 师延霞, 胡丽莎, 张 超. 青海平安地区CO_2气藏成藏模式研究[J]. 西北地质, 2016, 49 (3): 148-154.
ZHENG Changyuan, ZHANG Hui, SHI Yanxia, HU Lisa, ZHANG Chao. Study on Carbon Dioxide Gas Reservoir Accumulation Mode in Ping′an Region, Qinghai Province [J]. Northwest Geology, 2016, 49 (3): 148-154.
[9] 高小明, 沈建林. 甘肃窑街矿区CO_2气体突出灾害的成因及防治研究[J]. 中国煤炭地质, 2017, 29 (10): 18-22+29.
GAO Xiaoming, SHEN Jianlin. Study on CO_2 Outburst Hazard Causation and Control in Yaojie, Gansu[J]. Coal Geology of China, 2017, 29 (10): 18-22+29.
[10] 李 伟, 程远平, 杨云峰, 王立国, 等. 窑街煤田CO_2成因及成藏模式研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011,40 (2): 190-195.
LI Wei, CHENG Yuanping, YANG Yunfeng, WANG Liguo, et al. Research on the Genesis and Accumulation of Carbon Dioxide in the Yaojie Coalfield[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2011, 40 (2): 190-195.
[11] 付晓飞, 宋 岩. 松辽盆地无机成因气及气源模式[J]. 石油学报, 2005, (4): 23-28.
FU Xiaofei, SONG Yan. Inorganic Gas and Its Resource in Songliao Basin[J]. Acta Petroleum Sinica, 2005, (4): 23-28.
[12] 戴金星, 宋 岩, 戴春森, 等. 中国东部无机成因气及其气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版设计, 1995.
DAI Jinxing, SONG Yan, DAI Chunsen, et al. Inorganic Genetic Gas and Its Formation Conditions in Eastern China[M]. Beijing: Science Publishing Design, 1995.
[13] 沈 平. 气源岩和天然气地球化学特征及成气机理研究[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991.
SHEN Ping. Geochemical Characteristics and Gas-forming Mechanism of Gas Source Rocks and Natural Gas[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991.
[14] 陶明信, 徐永昌, 陈发源, 等. 窑街煤田CO_2气中氦同位素特征及其意义[J]. 科学通报, 1991, (12): 921-923.
TAO Mingxin, XU Yongchang, CHEN Fayuan, et al. Characteristics and Significance of Helium Isotopes in CO_2 Gas in Yaojie Coalfield[J]. Chinese Scientific Bulletin, 1991, (12): 921-923.
[15] 戴金星, 宋 岩, 洪 峰, 戴春森. 中国东部无机成因的二氧化碳气藏及其特征[J]. 中国海上油气(地质), 1994, (4): 3-10.
DAI Jinxing, SONG Yan, HONG Feng, DAI Chunsen. Inorganic Cenetic Carbon Dioxide Gas Accumulations and Their Characteristics in Eastern Part of China[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1994, (4): 3-10.
[16] 魏永佩. 中国主要含气盆地天然气的运聚规律[J]. 地学前缘, 2001, (4): 275-276.
WEI Yongpei. Natural Gas Accumulation in Major Gas-bearing Basins in China[J]. Geological Frontiers, 2001, (4): 275-276.

(下转第 187 页)