

Analysis of gas strata characteristics in Zhaotong area based on No.3 gas tunnel in Qiaojia, Yunnan province

Quan Qian

Yunnan Province 143 Coalfield Geological Exploration Team, Qujing, Yunnan, 655000, China

Abstract

Gas hazards in high-speed tunnels originate from combustible gases trapped in geological formations, posing multidimensional risks to tunnel engineering. Gas leaks may trigger explosions or fires, with the instantaneous release of massive energy capable of destroying tunnel structures, damaging equipment, and directly endangering lives during construction and operation. High-concentration gas can also cause personnel poisoning and suffocation, leading to mass casualty incidents. Moreover, gas exposure necessitates strict monitoring, ventilation, and explosion-proof measures during construction, significantly delaying project timelines and increasing costs. Long-term gas erosion may weaken tunnel lining stability and reduce structural durability, creating persistent safety risks for high-speed tunnels. Therefore, effective gas hazard prevention is crucial for ensuring the safety of high-speed tunnel construction and operation. This study examines gas-bearing strata characteristics in tunnel areas using the Qiaojia County Tunnel in Zhaotong, Yunnan Province as a case study, providing reference for similar projects.

Keywords

gas; tunnel; coal seam; shale; limestone

以云南巧家老店3号瓦斯隧道浅析昭通地区瓦斯地层特征

钱权

云南省一四三煤田地质勘探队, 中国·云南曲靖 655000

摘要

高速隧道中的瓦斯灾害源于地质构造中封存的可燃气体, 其对隧道工程具有多维度严重影响。瓦斯泄漏可能引发爆炸或燃烧, 瞬间释放的巨大能量会破坏隧道结构、损毁设备, 直接威胁施工及运营期间人员的生命安全; 高浓度瓦斯还会导致人员中毒窒息, 造成群死群伤事故。同时, 瓦斯的存​​在迫使施工过程需采取严格的检测、通风及防爆措施, 显著延缓施工进度、增加工程成本。此外, 长期瓦斯侵蚀可能削弱隧道衬砌结构的稳定性, 降低工程耐久性, 对高速隧道的安全运营构成持续隐患。因此, 有效防控瓦斯灾害是保障高速隧道建设与运营安全的关键环节。本文以云南昭通巧家县隧道为基础, 探讨隧道区域瓦斯地层特征, 为同类项目提供参​​考。

关键词

瓦斯; 隧道; 煤层; 页岩; 灰岩

1 引言

鲁甸至巧家高速公路位于云南省滇东北地区, 路线始于云南省昭通市鲁甸县, 接国高网 G7611 都匀至香格里拉高速公路, 止于云南省昭通市巧家县, 是连接昭通市昭阳区、鲁甸县和巧家县的最便捷通道, 是云南省滇东北地区构建综合交通运输网络主动融入和服务长江经济带国家发展战略的重要载体, 对推动项目沿线经济社会发展意义重大。瓦斯隧道作为各标段的重点工程, 正确的分析瓦斯地层特征, 科学的评价隧道瓦斯等级对隧道开挖具有重要意义。现以老店

3号隧道为例分析滇东北地区的瓦斯地层特征。

2 隧道瓦斯地层特征

根据已有资料和钻探隧道施工实时监测数据, 隧道区主要释放瓦斯地层为泥盆系中、上统 ($D_{2,3}$)、二叠系下统梁山组 (P_{1l})、二叠系下统栖霞组 (P_{1q}), 二叠系下统茅口组 (P_{1m})。次要释放瓦斯及可燃气体的地层为: 志留系中统大路寨组 (S_2d)、嘶风崖组 (S_2s), 奥陶系中上统大箐组 ($O_{2,3d}$)。根据隧道瓦斯气体来源将瓦斯地层分为以下几类, 瓦斯由这些地层的煤层或有机质页岩产生, 详述如下:

2.1 奥陶系中上统大箐组 (O_{2-3d})

岩性单元层代号 (15): 灰白、深灰色块状白云岩夹页岩。据区域资料, $O_{2,3d}$ 地层为滇东北次要生气源地层之一, 部分页岩含有有机碳 (TOC) 0.08~2%, 热成熟度高。瓦斯气体为页岩气, 主要由有机质页岩释放。由于封闭性较好,

【作者简介】钱权 (1984-), 男, 中国云南曲靖人, 本科, 工程师, 从事煤田地质、水文地质、工程地质和环境地质研究。

可形成局部富积，造成局部瓦斯含量较高。

2.2 志留系中统大路寨组 (S_{2d}) 嘶风崖组 (S_{2s})

大路寨组(S_{2d})，单元层代号(13)：灰绿、黄绿色页岩、砂质泥岩夹泥质白云岩或瘤状灰岩。次要生气源地层之一，瓦斯气体为页岩气，主要由含有有机质页岩、瘤状灰岩释放。由于封闭性较好，可形成局部富积，造成局部瓦斯含量较高。

嘶风崖组(S_{2s})，单元层代号(14)：紫红、灰绿色泥岩、页岩夹白云岩、砂岩，具底砾岩。次要生气源地层之一，瓦斯气体为页岩气，主要由含有有机质页岩释放。由于封闭性较好，可形成局部富积，造成局部瓦斯含量较高。

2.3 泥盆系中、上统 (D₂₋₃)

2.3.1 隧道区地层分布特征

泥盆系上统(D₃)：灰、深灰色白云岩、砂质白云岩夹角砾状白云岩、泥质白云岩，偶夹石膏岩，顶部为灰白、浅灰色灰岩。

泥盆系中统(D₂)：

曲靖组(D_{2q})：灰、灰黑色白云岩、泥质白云岩夹浅紫色白云质泥岩、灰色砂页岩、煤线。局部夹炭质灰岩、石英砂岩。

红崖坡组(D_{2h})：黄灰色泥质白云岩夹紫红、灰绿色泥岩、白云质砂岩。

缩头山组(D_{2s})：黄灰、黄褐色石英砂岩夹粉砂岩。

2.3.2 隧道区瓦斯特征

据区域资料，D₂₋₃地层为滇东北生气源地层之一，部分页岩、炭泥质灰岩有机碳含量(TOC)大于2%，热成熟度高。瓦斯气体为页岩气，主要由有机质页岩和炭质页岩释放，由于围岩较致密，封闭性较好，容易形成局部富积，造成局部瓦斯含量高。施工到该段时应加强瓦斯气体检测预警。

2.4 二叠系下统栖霞组 (P_{1q})、茅口组 (P_{1m})

2.4.1 隧道区地层分布特征

栖霞组：以深灰色灰岩、泥质灰岩为主，显缓波及透镜状层理。中部夹浅灰色白云质灰岩、白云岩、燧石结核灰岩。灰岩颜色变化明显，一般上、下部色深，中部色浅。厚143~208m，平均180m。

茅口组：主要出露于详查区北部，呈东西方向展布，为一套浅海相碳酸盐沉积，一般厚度约300m。岩性主要为浅灰色、灰褐色厚层状灰岩及白云质灰岩组成。下部岩性主要为深灰色、灰褐色厚层状、块状灰岩及白云质灰岩组成，间夹厚层状白云岩；中部主要为浅灰色、灰色巨厚层状、块状灰岩、生物碎屑灰岩及结晶灰岩；上部主要为深灰色中厚层状灰岩，间夹薄层状燧石及薄层状泥质灰岩条带，其顶部为厚约0.2m左右灰白色中厚层状泥岩，并间夹2~3层薄层状玄武质泥岩条带，特征明显，是划分玄武岩组(P_{2β})与茅口组(P_{1m})的明显标志。全组地层富含蜓类 Yabeinasp., Neomisellinasp., Verbeekinasp 瓣鳃类及珊瑚类化石，与上覆P_{2β}地层呈假整合接触。

2.4.2 隧道区瓦斯特征

根据以往地勘资料，栖霞组、茅口组主要以灰岩、泥质灰岩为主，夹有白云质灰岩，岩性致密，平均孔隙度较低，一般在1%以下，很少达到2-3%，渗透率平均为0.08x10⁻³um²，孔隙度极差，但裂隙较发育。其储集油气主要靠白云岩化作用、古岩溶作用、裂隙作用。因隧道区溶洞发育，导致天然气富集，大多以溶洞形式存在，没有规律性。对瓦斯具体位置无法准确判断。栖霞组、茅口组相对厚度较厚，有机碳含量(TOC)大于2%的优质烃源岩厚度>160m；热成熟度较高。其生气强度范围为(10-60)x108m³/Km²。是良好的生气层。施工到该段时应加强检测预警。

2.5 二叠系下统梁山组 (P_{1l})

2.5.1 隧道区地层分布特征

二叠系下统梁山组(P_{1l})：一般厚109.8m，属海陆交替相沉积。岩性主要由深灰、灰、灰白色薄至中厚层状细一粗晶石英砂岩夹粉砂质粘土岩、粉砂质泥岩、钙质粉砂岩、砂质灰岩、煤层及下部白云质灰岩、底砾岩等组成。在其中下部夹有0.48m的褐黄色细砾岩，角砾成分以灰岩、白云质灰岩为主，次为石英、燧石等；在该角砾岩之上有厚4.15m的灰色、浅灰色中厚层状白云质灰岩。下二叠统梁山组上部地层含可采煤层1层，编号为M₁，该M₁煤层全区较稳定，钻孔所获得M₁煤层结构为0.21(0.15)0.39m且厚度变化不大。煤层顶板有一套厚6.38m的黄褐色、灰白色中厚层状细~中粒石英砂岩，地表风化后垂直层面节理发育，地表反映为M₁煤层的直接顶板，该细一中粒石英砂岩地表往往形成小陡坎，地貌上极易识别。通过民窑地质编录，在M₁煤层与细一中粒石英砂岩之间有一层厚0~1.38m的黑灰色薄层状粉砂质泥岩，构成M₁煤层之伪顶。因煤层及炭质页岩层是良好的生气层，局部瓦斯含量高。施工到该段时应加强检测预警。

隧道区该段分布里程为：K37+945~K38+190m，

2.5.2 隧道区瓦斯特征

根据以往地勘资料，栖霞组、茅口组主要以灰岩、泥质灰岩为主，夹有白云质灰岩，岩性致密，平均孔隙度较低，一般在1%以下，很少达到2-3%，渗透率平均为0.08x10⁻³um²，孔隙度极差，但裂隙较发育。其储集油气主要靠白云岩化作用、古岩溶作用、裂隙作用。因隧道区溶洞发育，导致天然气富集，大多以溶洞形式存在，没有规律性。对瓦斯具体位置无法准确判断。栖霞组、茅口组相对厚度较厚，有机碳含量(TOC)大于2%的优质烃源岩厚度>160m；热成熟度较高。其生气强度范围为(10-60)*108m³/Km²。是良好的生气层。施工到该段时应加强检测预警。

2.6 M₁煤层煤尘爆炸性与煤的自燃倾向性

本次岩芯采有两件煤样送实验室进行煤尘爆炸性测试，试验结果表明M₁煤层无煤尘爆炸性危险。M₁煤层为自燃煤，自燃倾向性等级为II类。试验鉴定结果详见表2-6-1。

表 1 M₁ 煤层爆炸性、自燃倾向性检测成果表

送样编号	实验室编号	自燃倾向性		煤尘爆炸性		
		吸氧量 cm ³ /g·干煤	煤自燃倾向性等级	煤尘爆炸性试验 火焰长度 (mm)	抑制煤尘爆炸最低 岩粉比例 (%)	煤尘爆炸性鉴定结论
M ₁ -1	B150289	0.60	II 类	无	无	无煤尘爆炸性
M ₁ -2	B150290	0.59	II 类	无	无	无煤尘爆炸性

2.7 第五段泥盆系中、上统白云岩段 (D₃+ D_{2q})

单元层代号 (9、10) 上部岩性: 灰、深灰色白云岩、砂质白云岩夹角砾状白云岩、泥质白云岩, 偶夹石膏岩。下部岩性: 泥质白云岩夹浅紫色白云质泥岩、灰色砂页岩、煤线。局部夹炭质灰岩、石英砂岩。D_{2,3} 地层节理发育为滇东北生气源地层之一, 部分页岩、炭泥质灰岩有机碳含量 (TOC) 大于 2%, 热成熟度高。瓦斯气体为页岩气, 主要由有机质页岩和炭质页岩释放, 由于围岩较致密, 封闭性较好, 容易形成局部富集, 造成局部瓦斯含量高。据威信至镇雄高速扎西胜利隧道煤与瓦斯勘察成果汇总报告, 隧道在 (D_{2,3}) 白云岩段岩组措工时, 所作的瓦斯动态检测成果: 瓦斯最大绝对涌出量为 2.22m³/min, 最小绝对涌出量为 0.35m³/min。差别较大。据就高原则, 此白云岩岩组段 (D_{2,3}) 定为高瓦斯地层。施工段属高瓦斯工段。隧道区该段分布里程为: K38+190m~K39+011m, 隧道段长度 828m。该段施工时应加强瓦斯检测预警工作。

2.8 第六段泥盆系中统至志留系中统泥质白云岩夹砂泥段 (D_{2h}+ D_{2s}+S_{2d})

单元层代号 (11、12、13): 岩性上部黄灰色泥质白云岩夹紫红、灰绿色砂泥岩、白云质砂岩。下部黄灰、黄褐色石英砂岩夹粉砂岩。部分页岩、泥质白云岩含有少量有机碳 (TOC), 瓦斯气体为页岩气, 生气条件较差。据威信至镇雄高速扎西胜利隧道煤与瓦斯勘察成果汇总报告, 隧道在此段岩组措工时, 不定时瓦斯动态检测成果: 瓦斯绝对涌出量为 0.35m³/min~0.66 m³/min。此段岩组定为低瓦斯地层。施工段。隧道区该段分布里程为: K39+011m~K39+524m, 隧道段长度 508m。

2.9 第七段志留系中统至奥陶系中上统白云岩段 (S_{2s}+ O_{2-3d})

志留系中统嘶风崖组 (S_{2s}) 单元层代号 (14): 岩性紫红、灰绿色泥岩、页岩夹白云岩、砂岩, 具底砾岩。

奥陶系中上统大箐组 (O_{2,3d}), 单元层代号 (15、16): 岩性灰白、深灰色块状白云岩。

岩组内部分页岩、泥质白云岩含有一定的机碳 (TOC), 瓦斯气体为页岩气, 生气条件中等。据威信至镇雄高速扎西胜利隧道煤与瓦斯勘察成果汇总报告, 隧道在此段岩组措工时, 不定时瓦斯动态检测成果: 瓦斯最大相对涌出量为 2.45m³/t。瓦斯最大绝对涌出量为 2.22m³/min。据就高原则, 此段岩组定为高瓦斯地层。施工段。隧道区该段分布里程为: K39+524m~K40+743m, 隧道段长度 1219m。该段施工时应

加强瓦斯检测预警工作。

3 隧道瓦斯评价方法及瓦斯工区的划分

3.1 瓦斯突出的评价指标

根据《防治煤与瓦斯突出规定》(2009 年版) 第十一条规定以及《公路瓦斯隧道技术规程》3.0.5 (四川省地方行业推荐性标准 DB51/T2243-2016), 突出煤 (岩) 层评估和鉴定应首先根据实际发生的瓦斯动力现象进行。动力现象特征不明显或者没有动力现象时, 应根据实际测定的岩层最大瓦斯压力 P 、软分层的破坏类型、瓦斯放散初速度 ΔP 和煤的坚固性系数 f 等指标进行鉴定。全部指标均达到或超过表 4.1-1 所列临界值的, 确定为瓦斯突出煤 (岩) 层。

表 2 突出煤 (岩) 层鉴定的单项指标临界值

判定指标	煤的破坏类型	瓦斯放散初速度 ΔP	坚固性系数 f	瓦斯压力 $P(MPa)$
有突出危险的临界值及范围	III、IV、V	≥ 10	≤ 0.5	≥ 0.74

3.2 瓦斯地层的划分标准

3.2.1 瓦斯相对涌出量

瓦斯地层的主要生气层瓦斯最大相对涌出量大于 8m³/t, 为高瓦斯地层。瓦斯地层的主要生气层瓦斯最大相对涌出量 1-8m³/t 为瓦斯地层、瓦斯地层的主要生气层瓦斯最大相对涌出量小于 1m³/t 为微瓦斯地层。

3.2.2 瓦斯绝对涌出量

《公路瓦斯隧道技术规程》第 3.0.2 条: 瓦斯工区与瓦斯地层类别判定指标为隧道内绝对瓦斯涌出量, 并应符合表 4.1-2 规定”。瓦斯地层的主要生气层瓦斯最大绝对涌出量大于 1.5m³/min, 为高瓦斯地层。瓦斯地层的主要生气层瓦斯最大相对涌出量 0.5~1.5m³/min 为低瓦斯地层、瓦斯地层的主要生气层瓦斯最大绝对涌出量小于 0.5m³/min 为微瓦斯地层。

表 3 瓦斯地层或瓦斯工区绝对瓦斯涌出量判定指标

瓦斯地层或瓦斯工区类别	绝对瓦斯涌出量 $Q_{\text{绝}}$ (m ³ /min)
微瓦斯	$Q_{\text{绝}} < 0.5$
低瓦斯	$1.5 > Q_{\text{绝}} \geq 0.5$
高瓦斯	$Q_{\text{绝}} \geq 1.5$

根据收集的周边煤矿勘查资料, 矿井瓦斯最大相对涌出量为 6.57m³/t, 最大绝对涌出量为 0.47m³/min; 二氧化碳最大相对涌出量为 6.99m³/t, 最大绝对涌出量为 0.50m³/min。

表4 某煤矿开采煤层瓦斯基础参数测定综合成果表

序号	名称	参数
1	实测瓦斯压力 (MPa)	0.51
2	煤体坚固性系数 f	0.42
3	瓦斯放散初速度 Δp	7
4	煤的破坏类型	Ⅲ
5	吸附常数 $a(m^3/t)$	21.090
6	吸附常数 $b(MPa^{-1})$	0.609
7	孔隙率 (%)	23.73
8	真密度 (t/m^3)	2.12
9	视密度 (t/m^3)	1.61
10	分析基水分 /Mad(%)	6.77
11	分析基灰分 /Aad(%)	34.54
12	分析基挥发分 /Vad(%)	14.95
13	分析基固定碳 FCad(%)	43.74
14	钻孔瓦斯流量衰减系数 $\beta(d^{-1})$	0.057681
15	煤层透气性系数 $(m^2/MPa^2 \cdot d)$	0.477871
16	+1531.5m 水平瓦斯含量 (m^3/t)	1.64

4 结论与建议

老店3号隧道(设计起点: ZK33+255~K40+743, 设计终点: K40+743)划分为7个瓦斯地层段, 其中: 高瓦斯地层岩组3个、低瓦斯地层岩组2个、非瓦斯地层岩组2个。绝对瓦斯涌出量 $Q_{\text{绝}}$ 最大为 $2.73m^3/min$, 最小为0。按工段顺序里程从左至右具体如下:

- (1) 第一段: 第四系松散岩组 (Q_4^{al+pl}), 里程桩号: K33+251~K33+300m, 隧道段长度49m。属非瓦斯工段。
- (2) 第二段: 二迭系上统峨眉山玄武岩坚硬岩组 ($P_2\beta$), 里程桩号: K33+300m~K35+765m, 隧道段长度2460m。属非瓦斯工段。
- (3) 第三段: 二叠系下统二叠系下统栖霞茅口坚硬岩组 ($P1q+m$), 里程桩号: K35+766~K37+945m, 隧道段长度2178m。属高瓦斯工段。

(4) 第四段: 二叠系下统梁山组半坚硬岩组 ($P1l$), 里程为: K37+945~K38+190m, 隧道段长度245m。属低瓦斯工段。瓦斯地层内的煤层 (M_1) 按照《防治煤与瓦斯突出细则》第26条以及《铁路瓦斯隧道技术规范》4.1.4之规定, 勘察范围内初步判定不具备煤(岩)与瓦斯突出的动力条件。为非瓦斯突出煤层

(5) 第五段: 泥盆系中、上统白云岩段坚硬岩组 (D_3+D_2q), 里程为: K38+190m~K39+011m, 隧道段长度828m。该段属高瓦斯工段。

(6) 第六段: 泥盆系中统至志留系中统泥质白云岩夹砂泥段半坚硬岩组 ($D_2h+D_2s+S_2d$), 里程为: K39+011m~K39+524m, 隧道段长度508m。该段属低瓦斯工段。

(7) 第七段: 志留系中统至奥陶系中上统白云岩段坚硬岩组 ($S_2s+O_{2-3}d$), 里程为: K39+524m~K40+743m, 隧道段长度1219m。该段属高瓦斯工段。

(8) 老店3号隧道定为高瓦斯隧道。按高瓦斯工区进行设计及管理。

参考文献

- [1] 郭高峰,文和鹏.龙泉山红层区瓦斯隧道灾害特征分析[J]灾害学,2019,34(S1):193-195.
- [2] 张小林, 蔡建华, 廖烟开.成都地铁龙泉山隧道瓦斯赋存特征分析与预测评价[J]现代隧道技术,2019,56(03):25-30.
- [3] 云南省地质局区域地质调查队《鲁甸幅1:20万区域地质调查报告》1977年
- [4] 云南省地质局区域地质调查队《米易幅1:20万区域地质调查报告》1977年
- [5] 张攸江, 以云南某瓦斯隧道浅析滇东北地区瓦斯地层特征[J]基层建设, 2021, 第5期。
- [6] 《矿井瓦斯等级鉴定规范》(中华人民共和国安全生产行业标准AQ1025—2006)
- [7] 钱权.《老店3号隧道瓦斯地质勘察专项报告》2020年。