

深埋长隧道有害气体发生的地质条件初探

任光明¹, 赵志祥¹, 聂德新¹, 符文熹²

(1 成都理工学院工程地质研究所, 四川 成都 610059 2 浙江大学建工学院土木工程系, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 有害气体是深埋长隧道的主要地质灾害现象之一。本文在现场调查及查阅国内外文献资料基础上, 探讨了有害气体发生的地质条件, 为有害气体地质灾害的预测提供了依据。

关键词: 深埋长隧道; 有害气体; 地质条件

中图分类号: P55; P56 **文献标识码:** A

深埋长隧道以其延伸长、埋深大, 穿越的地质条件复杂, 在施工过程中常遇到一系列特殊的地质灾害问题, 如岩爆、有害气体、高压涌水、高地温等^[1, 12]。其中有害气体作为深埋长隧道地质灾害问题之一, 也越来越多地受到人们的关注。有害气体不仅对人体的健康有危害, 而且因突然喷出、燃烧或爆炸等, 急剧恶化隧道施工条件, 造成灾难性破坏。如阿尔帕—谢万引水隧洞^[3]长 48.3km, 曾发生 6 次大规模的喷发。仅其中一次喷发后, 一昼夜逸出瓦斯 15 万 m³、喷发物达 4370 吨, 持续 5 个月逸出量达 150 万 m³, 且由于喷发时的气体动力现象, 将岩石抛出工作面达 150m, 引起的空气冲击波在距喷发点 4km 以远能收集并记录下来; 各次喷发还形成许多大型空穴, 空穴容积最大超过 2500m³, 大大超出顶板设计轮廓线; 意大利的 Appenine 隧道长 18.518km, 曾发生 4 次瓦斯爆炸, 停工达 7 个月。我国的贵昆线岩脚寨隧道、成昆线沙木拉达隧道、达成线炮台山隧道、内昆线天星场至仙水段、南昆线的家竹箐隧道等都出现大量的瓦斯喷发或爆炸, 造成严重的经济损失, 仅岩脚寨隧道因施工时瓦斯失控发生爆炸 70 余人遇难, 炮台山隧道的瓦斯爆炸也死亡 13 人。因此, 加强对深埋长隧道有害气体的特征、形成条件的研究, 对深埋长隧道的工程建设以及对施工者的健康和安、选择合适的施工机械设备具有重要的现实意义及经济价值。

1 有害气体的基本特征

地下有害气体主要有沼气(甲烷 CH₄)、二氧化

碳(CO₂)、硫化氢(H₂S)、缺氧空气以及施工爆破中产生的一氧化碳(CO)、氮氧化物及二氧化硫(SO₂)、粉尘等^[4]。它们具有显著的空间分布、易燃易爆性以及对人体健康危害等特征。

1.1 分布特征

地下有害气体中, 因各有害气体比重的差异, 在隧道中具有明显的空间分布特征。比重最轻的为甲烷(CH₄), 仅 0.55, 常富集在隧洞顶板附近。若隧道中有集中甲烷气源时, 甲烷可在隧道顶部发生层状聚。其次为一氧化碳(CO), 比重为 0.967, 比空气略轻, 常分布于隧道中上部位; 而硫化氢(H₂S)、二氧化碳(CO₂)、二氧化硫(SO₂)的比重分布分别为 1.19, 1.53, 2.3, 比重较大, 通常富集于隧道的中下部及底板附近。针对上述隧道主要有害气体的空间分布特点, 在施工中可以有目的地对隧道有害气体的类型来布置通风、排气管道。

1.2 易燃易爆性

地下有害气体中, 易燃易爆的气体主要有甲烷(CH₄)、一氧化碳(CO)、硫化氢(H₂S)等。这些气体在隧道空气中的含量达到一定范围, 在有火源引发条件下有可能发生爆炸。甲烷在空气中的含量达到 5%~15% 范围内将发生爆炸, 尤其当其含量为 8% 时最易爆炸, 含量达 9.5% 时爆炸力最强, 而当甲烷在空气中的含量大于 15% 时, 则它既不会爆炸, 也不会燃烧; 硫化氢在隧道空气中含量达 4.3%~45.5% 时, 为其爆炸界限; 一氧化碳的爆炸界限为含

收稿日期: 2001-07-05。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40072090)。

作者简介: 任光明(1964—), 男(汉族), 四川西充人, 副教授, 博士生, 主要从事工程地质与岩土工程方面的教学与科研工作。已经发表论文近 30 篇。

量 12.5%~75.0%。显然,在上述三种易燃易爆的气体中,甲烷的爆炸界限最小,其次分别为硫化氢与一氧化碳,因此,可通过对隧道各气体含量的实时监测结果,对隧道有害气体的易燃易爆的灾害进行预测预报。

1.3 对人体健康的危害性

隧道有害气体中,对人体健康有危害的气体主要有一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO、NO₂)、硫化氢(H₂S)二氧化硫(SO₂)、二氧化碳(CO₂)等。它们将直

接影响施工者的健康,甚至威胁施工人员的生命安全。如隧道中二氧化碳含量达1%~2%,人体有不舒服感;含量达3%~4%,将导致人体血压上升、头疼;含量达6%,呼吸困难;含量达7%,数分钟可导致死亡。有害气体对人体健康的影响可通过中毒指数来评价。中毒指数是有害气体浓度(单位为ppm)与暴露时间(单位为:小时)的积。研究表明,不同有害气体,对人体健康危害的中毒指数界限是不同的^[4](表1)。

表1 主要有害气体对人体健康的影响
Table 1 The influence caused by mostly harmful gases for people

气体名称	中毒指数 (n×10 ⁻⁶)	对人体的影响	气体名称	中毒指数 (ppm)	对人体的影响
一氧化碳 (CO)	<300	无作用	硫化氢(H ₂ S)	100~150	数小时后有轻微症状
	<900	头疼、呕吐		600	30分钟内有生命危险
	<1200	生命危险		700	数分钟内可窒息死亡
二氧化氮 (NO ₂)	5	很强的臭气	二氧化硫 (SO ₂)	6~12	对鼻、喉有刺激
	50	1分钟时引起呼吸不畅		20	对眼睛有刺激
	100~150	30~60分钟肺水肿		50~100	可承受30~60分钟
	>200	瞬间暴露有生命危险		400~500	有生命危险

根据表1的主要有害气体对人体的影响,在施工中应加强隧道的通风,并对有害气体类型、浓度进行实时监测、预报,切实保障施工人员的身体健康。

2 有害气体发生的地质条件

通过现场调查及收集国内外部分深埋长大隧道有害气体发生的地层岩性、地质构造等地质条件的结果如表2。

由表2可见,地下有害气体的成分、浓度、涌出方式不仅与隧道所处的岩石性质、组成岩石的矿物成分有关外,还与其地质构造特征密切相关。爆炸性的气体主要在含煤层、沥清质岩层、含油层等特殊岩石中分布;有毒气体常存在于新出现的火山作用源处和剧烈的地壳断裂活动处;在年轻的活动地槽带的断裂构造部位,常含二氧化碳气体;在含有机物的地下水中常溢出硫化氢,而甲烷的析出量很少。

2.1 地层岩性条件

隧道所处的地层岩性条件是决定有无有害气体灾害、有害气体成分及浓度的基础。如甲烷常伴生于有机粘土、油页岩、煤层、含碳及沥清质页岩、泥灰岩等岩类中,且集中分布于石油、天然气、煤炭、褐煤分布地区及富含有机物的泥炭层、腐植土等地区。通过对国内外大量文献及现场调查结果综合分析表

明,有害气体在岩性主要分布于半坚硬岩及富含有机质等特殊成分的岩石类如含煤地层、煤层类,砂岩、粉砂岩、泥岩类,白云岩、灰岩、泥灰岩类,碳质页岩、含沥青质岩类,以及富含有机质的淤泥、腐土层、粘土层等类型,而坚硬岩一般无有害气体灾害现象发育,这为深埋长隧道工程地质勘察中对有害气体灾害之超前地质预测提供了参考依据。

2.2 地质构造条件

有害气体形成的地层岩性条件具备后,能否造成危害还取决于一定的富集、储存条件。如煤在煤化过程中,每吨煤可产生1300m³的各种气体,而这些气体中的甲烷仅有部分能保持在煤层内,大多数气体则流失到大气中或溶解于循环的地下水中而被转移。在有利的地质条件下被保存下来的甲烷将转移到煤层周围高孔隙率的沉积岩层内适当部位富集。因此,决定有害气体储存的主要因素是地质构造及覆盖层厚度岩性等因素。

最适合有害气体储集的是背斜构造(或穹窿构造),有害气体常分布于成层的盖、底板之间(图1)。背斜构造中,它不仅对有害气体有顶部封堵,而且也提供了侧向封堵,因而核部常大量富集有害气体,翼部气体含量较少;而向斜构造其核部地带有有害气体含量较翼部少,若一翼出露地表,倾角陡者比倾角缓

者气体含量少。如美国长 10.3km, 最大埋深 650m 的特科洛特引水隧洞, 在其进口段, 由一小向斜和一大背斜构造组成, 在其小向斜的南翼或大背斜的北翼地段有少量的甲烷及硫化氢溢出, 而在靠近大背斜核部地带聚集的大量气体曾产生爆炸而使几名工作人员受伤。

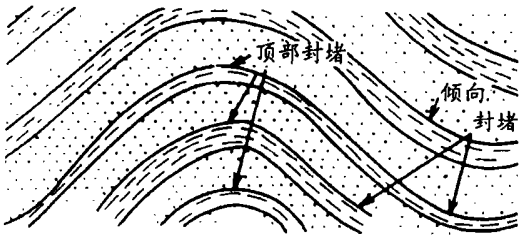


图 1 背斜构造
Fig 1 Anticline structure

除背斜构造外, 岩体中的断裂带尤其是深部岩体断裂带、节理裂隙密集带、活动火山活动源处或剧烈的地表活动区, 也常成为有害气体运移和富集场所, 但有害气体能否富集主要取决于在断裂带上发育的覆盖层厚度与岩性条件。已有研究表明^[9], 对渗透率低 10m/s ~ 3m/s, 厚度大于 3m 的泥质岩即可成为中低压气体有效盖层下限(王少昌, 1987), 而能够作为有害气体的盖层的岩性较广如岩盐、泥页岩、泥灰岩、灰岩、火成岩等。因此, 对深埋长大隧道, 因埋深大延伸长, 往往具有良好的储存封闭条件, 有利于地下有害气体的储存富集。当具备上述的岩性及构造条件时, 隧道施工时应作好有害气体灾害的预报及防治工作。

表 2 国内外部分深埋长隧道有害气体发生的地质条件
Table 2 The geological conditions of harmful gases formed in some deep-lying long tunnels at home and abroad

国 家	隧 道 名 称	地 质 条 件	有 害 气 体 特 征
中国	华蓥山隧道	岩性为灰岩、白云岩、泥岩、页岩及含煤地层	经勘察表明在煤层中甲烷的涌出量最大达 17.86m ³ /min, 压力 1.87MPa, 在井口灰岩段可能有 H ₂ S 涌出, 涌出量达 0.045~0.067m ³ /min
	云台山隧道	煤系地层	大量瓦斯, 气体压力 0.32MPa, 瓦斯含量 4.42m ³ /t
	岩脚寨隧道	含煤地层	瓦斯压力达 0.406MPa
	引黄入晋输水隧洞	穿越石炭系太原组、侏罗系大同组含煤地层	有害气体主要为 N ₂ 、CO ₂ 、CH ₄ 等
	沙木拉达隧道	白垩统红色砂岩、泥岩	突出大量瓦斯
	家竹箐隧道	二叠系上统煤系地层, 洞内长近 1000m 煤层多达 26 层, 最厚达 16m	大量瓦斯, 含量达 34.5m ³ /t, 瓦斯压力高达 15.58MPa
	黄家阱隧道	岩性主要为砂岩、灰质砾岩、泥灰岩	施工中有 CO ₂ 气体涌出
	长梁山隧道	隧道长 12.78km, 洞身下覆约 1km 为煤系地层、岩体中断裂、节理裂隙发育	勘探结果表明, 隧道存在超级瓦斯灾害现象
	炮台山隧道	隧道通过区主要为侏罗系的红色地层, 但其下伏存在二叠系煤系地层, 岩体中节理裂隙发育	施工中出现大量瓦斯, 曾发生爆炸, 死亡 13 人
前苏联	中梁山隧道	隧道通过地段有丰富的龙潭组煤系地层	施工曾发生过严重的瓦斯突出
	阿尔帕—谢万隧洞	岩性为玄武岩、安山玄武岩、安山玢岩和辉绿玢岩, 在构造断裂带具辉长岩, 闪长岩侵入体	在断层带以巨大压力喷出 CO ₂ , 气体涌出量 150 万 m ³ , 抛出的岩石达 1500t, 距离 150m
	泽连丘克期基引水隧洞	岩性为粉砂岩、泥板岩、砂岩, 断层及节理裂隙发育	主要有害气体成分为甲烷。主要是下覆岩浆岩, 生物岩类中的气体沿不连续的构造断层带、裂隙渗入, 且具有夏季涌出量大, 冬季没有瓦斯涌出的现象
意大利	卡波卡那隧道	岩性为变质千枚岩、沉积砾岩、粉砂石英碎屑岩; 接触带为铬华岩带。该有害气体是与远处爱奥尼亚群岛的火山作用有关	主要为 CO ₂ (98.07%, 体积计), 其余还有 CH ₄ (0.61%)、H ₂ S (0.08%), NO ₂ (24%); 压力达 2MPa, 涌出量最大达 5000~6000 l/min, 沿铬华岩带涌出
奥地利—南斯拉夫	卡拉万克山隧道	岩性为白云岩、解砾岩、页岩、泥灰岩、灰岩等组成	在南斯拉夫境内出现瓦斯涌出
英国—法国	英法海峡隧道	隧道长 50km, 主要位于白垩统的含煤地层及泥灰岩中	隧道中出现的有害气体为甲烷
美国	特科洛特隧道	隧道主要处于一大背斜的南翼, 在其核部发育断层, 岩性为砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩组成	主要成分是甲烷和硫化氢, 洞内引起两次爆炸事故; 隧道涌水中也含有大量 H ₂ S
	洛杉矶地铁隧道	发育于 San Pedro 的更早更新统的细砂、中砂、偶夹粉砂岩中, 其中有一层柏油砂岩层	主要成分为 H ₂ S (大于 10 000ppm) 和 CH ₄ (体积容量大于 90%)
日本	新宇津隧道	岩性为第三纪的泥岩、凝灰岩堆积物	有害气体主要成分为甲烷, 其次为硫化氢、氨气, 且主要位于黑色泥岩及少量粘土化凝灰岩中

3 结 语

地下有害气体灾害是深埋长大隧道主要地质灾害现象之一。通过上述研究可以得到如下认识:

1. 地下有害气体灾害的发生与其所处的岩性条件密切相关。有害气体发生在半坚硬岩及富含有机质等特殊成分的岩石类如含煤地层及煤层类, 砂岩、粉砂岩、泥岩类, 白云岩、灰岩、泥灰岩类, 油页岩、碳质页岩及含沥青的地层类, 以及富含有机质的淤泥、泥灰岩、腐土层、粘土层等类型, 而坚硬岩类一般无有害气体的灾害现象发育。

2. 背斜构造是有害气体最有利的富集场所; 断裂带尤其是深部岩体断裂带、节理裂隙密集带、强烈地壳活动区等也是地下有害气体运移、富集的地带。

3. 地下有害气体的富集必须有一定厚度的覆盖层封闭条件。

4. 根据有害气体发育的地质条件, 在隧道工程

地质勘察中可通过隧道沿线地质测绘、钻探、坑深同时结合地球物理勘探、遥感解译等工作, 对隧道沿线可能出现的有害气体灾害进行超前地质预测, 以便为工程设计、施工组织提供依据, 这无疑对深埋长大隧道的工程实践具有重要的现实意义和指导意义。

参考文献:

- [1] 陈成宗, 王石春. 隧道地质灾害与防治对策[J]. 隧道及地下工程, Vol. 12, No. 3 1991, 1~5.
- [2] 黄润秋, 王贤能, 等. 深埋长隧道工程开挖的主要地质灾害问题研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1997, (1): 50~68.
- [3] Николлин В.И. 阿尔帕-谢万隧洞掘进中火成岩和瓦斯喷发[J]. 隧道译丛, 1983 (3): 39~43
- [4] 左滕久. 地下施工的作业环境(2)[J]. 隧道译丛, 1991, (10): 59~63.
- [5] K. S. Lane. 特科洛特隧道的教训. 隧道译丛[J]. 1980, (1): 66~69.
- [6] 王少昌等. 陕甘宁盆地上古生界泥质岩封盖能力研究[J]. 石油学报, 1987 (2): 25~32.

A Simple Discussion on the Formation Conditions of Harmful Gases in Deep Lying Long Tunnel

REN Guang-ming¹, ZHAO Zhi-xiang¹ and NIE De-xing¹ and FU Wen-xi²

(1. Institute of Engineering Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059;

2. Zhejiang University, Hangzhou 310027 China)

Abstract: Hazard caused by harmful gases is one of the main geological hazards of deep-lying long tunnels. On the basis of in-situ investigation and literatures at home and abroad, the geological conditions under which the harmful gases hazard may arise are discussed in the paper. It provides an important basis for the prediction of harmful gases in deep-lying long tunnels.

Key words: deep-lying long tunnel; harmful gases; geological condition