

地铁隧道内有害渗漏气体的通风排除

北京城建设计研究总院有限责任公司 孟 鑫[☆] 刘 磊

摘要 分析了有害气体的组成,给出了有害气体渗气量的计算方法,研究了列车活塞风对有害气体分布的影响以及如何应用通风系统排除渗入隧道内的有害气体,确保地铁安全运营。

关键词 有害气体 地铁隧道 通风系统 运营安全

Elimination of harmful leakage gas by ventilation in underground railway tunnels

By Meng Xin[★] and Liu Lei

Abstract Analyses the constituents of the harmful gas, gives the calculation methods for the leakage rate of harmful gases, and studies the effect of train piston air on the distribution of the harmful gas and the way to remove it in the tunnels to guarantee underground railway safety operation.

Keywords harmful gas, underground railway tunnel, ventilation system, operation safety

① ★ Beijing Urban Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing, China



孟 鑫

主要设计项目

- 广州地铁2号线琶洲站
- 南京地铁1号线新街口站
- 北京地铁5号线灯市口站
- 北京地铁8号线森林公园站
- 上海地铁7号线浦江南浦站
- 杭州地铁1号线

表 1 滨康路站地下有害气体组成					%
孔号	气样号	CH ₄	N ₂	CO ₂	
C1	1#	94.14	4.2	1.59	
C2	2#	93.91	4.4	1.54	
C3	3#	92.73	5.7	1.47	
C4	4#	95.90	2.75	1.34	
C5	5#	93.16	5.1	1.71	
C6	6#	93.87	4.5	1.57	
C7	7#	94.05	3.9	1.87	
C8	8#	92.60	6.3	0.97	
C9	9#	90.36	7.83	2.09	
C10	10#	92.73	6.1	1.09	

0 引言

我国东部沿海和长江中下游地区的地铁工程建设中,曾多次遇到过埋深较浅、含有害气体的地层。因有害气体的释放而引起隧道内发生爆炸或火灾,从而造成重大人员伤亡和财产损失的情况多有发生。

对于穿越储气层的地铁隧道,在设计、施工和运营过程中,如何减少有害气体对工程的危害以及对工程后期运营的不利影响,是类似工程需要解决的重要问题。本文以杭州地铁1号线工程典型含气地段为例进行分析。

1 有害气体的组成

根据浙江省地矿勘察院提供的对杭州地铁1号线沿线典型含气地段的地下有害气体取样和组分测试结果,以滨康路站为例,有害气体组成如表1所示。

由表1可以看出,甲烷(CH₄)体积分数大于90%,另含有少量氮气、二氧化碳,其他烃类含量甚微,不含硫化氢等有毒或能腐蚀金属的成分。

根据调研及从我国石油天然气勘察部门收集的有关资料,从总体上来看,杭州及杭州湾地区浅层天然气气藏分布广,属常压气藏,气藏原始压力为0.12~0.46 MPa,气藏埋深浅,一般为15~30 m,厚度不等。

2 地铁运营期内有害气体的渗气量估算

2.1 根据 TB 10120—2002 J 160—2002《铁路

①☆ 孟鑫,男,1976年9月生,大学,高级工程师
100037 北京市西城区阜成门北大街5号北京城建设计研究总院有限责任公司第五设计所
(010) 88336689
E-mail: Mengxin@buedri.com
收稿日期:2011-03-29

瓦斯隧道技术规范》相关规定和条文计算

由于 GB 50157—2003《地铁设计规范》对地铁内渗入的甲烷气体没有相应规定,故参考 TB 10120—2002 J 160—2002《铁路瓦斯隧道技术规范》^[1]的相关规定和条文进行计算。这些规定主要包括:

第 4.4.1 条 瓦斯隧道在运营中,瓦斯浓度在任何时间、任何地点都不得大于 0.5%。

第 4.4.3 条 隧道运营期间瓦斯检测断面的位置,应根据施工期间的瓦斯涌出情况确定……

第 4.4.9 条 瓦斯隧道运营期间宜采用定时通风;当隧道内瓦斯浓度达到 0.4%时,必须启动风机进行通风,保证隧道内瓦斯浓度不大于 0.5%。当瓦斯浓度降到 0.3%以下时,可停止通风。

第 10.2.1 条 瓦斯隧道竣工验收时,应达到瓦斯设防标准;在内拱顶以下 25 cm 处的空气中瓦斯浓度不得大于 0.5%。在有运营通风条件下,通风后应达到以上标准。

2.2 混凝土隧道的渗气系数数量级分别为 10^{-10} cm/s 和 10^{-11} cm/s 时渗入隧道内的有害气体量计算

渗气系数与有害气体渗入量成正比,是直接体现有害气体渗透能力的关键参数,经查阅相关资料可知,对于土建隧道,其渗气系数数量级分别为 10^{-10} cm/s 和 10^{-11} cm/s。

渗气系数取 1.13×10^{-10} cm/s 时,对隧道全部被埋入压力气藏(工况 1)、1/2 被埋入压力气藏(工况 2)和 1/3 被埋入压力气藏(工况 3)三种情况,利用有限元分析软件进行渗气量仿真计算,计算结果如表 2 所示。

表 2 渗气系数为 1.13×10^{-10} cm/s 时渗气量的数值仿真计算结果

气藏绝对压力/kPa	工况 1 计算结果/(L/m)	工况 2 计算结果/(L/m)	工况 3 计算结果/(L/m)
100	0	0	0
200	1.211	2.397	4.764
300	3.123	6.189	12.279
400	5.566	11.041	22.120
500	8.380	16.631	33.432

由表 2 可以计算出,不同隧道埋入深度、3 h 不通风工况、全断面体积下隧道内甲烷体积分数均小于浓度限值 0.5%;内拱 50 cm 以下空间甲烷体积分数在大部分计算工况下均超过限值。

渗气系数取 1.13×10^{-11} cm/s 时,对隧道全部被埋入压力气藏(工况 4)、1/2 被埋入压力气藏(工

况 5)和 1/3 被埋入压力气藏(工况 6)三种情况,利用有限元分析软件进行渗气量仿真计算,计算结果如表 3 所示。

表 3 渗气系数为 1.13×10^{-11} cm/s 时渗气量的数值仿真计算结果

气藏绝对压力/kPa	工况 4 计算结果/(L/m)	工况 5 计算结果/(L/m)	工况 6 计算结果/(L/m)
100	0	0	0
200	0.121	0.240	0.477
300	0.312	0.618	1.235
400	0.557	1.104	2.212
500	0.838	1.664	3.343

由表 3 可以计算出,当混凝土渗气系数达到 1.13×10^{-11} cm/s 时,除气藏绝对压力达到 400 kPa 及以上,在 3 h 不通风条件下,隧道内拱 50 cm 以下空间甲烷体积分数出现超标外,其余工况下渗入隧道的甲烷体积分数均小于 0.5%的限值。

2.3 计算结果分析

不同工况下隧道 3 h 的甲烷渗入量与隧道外气藏压力呈非线性关系,随着气藏压力的增大,甲烷渗入量快速增加。当渗气系数数量级为 10^{-10} cm/s 时,隧道 3 h 不通风条件下,按照全断面体积计算的渗入甲烷体积分数均小于 0.5%的限值;而按照隧道内拱 50 cm 以下空间计算的渗入甲烷浓度在气藏绝对压力达 200 kPa 及以上时,出现超限问题。而当渗气系数数量级为 10^{-11} cm/s 时,大部分工况下渗入甲烷的体积分数均小于 0.5%^①。

建议对隧道盾构管片的加工、生产质量、管片自身的防水和防渗气量加强控制,加工时应明确管片的防水和防渗气指标,渗气系数数量级要小于 10^{-11} cm/s。管片的自防渗性能和管片间的密封材料的质量是隧道防渗漏、控制进入隧道内有害气体浓度的最关键因素。

3 列车活塞风对有害气体分布影响的理论分析和数值模拟计算

选择杭州地铁 1 号线含有害气体、地层压力较高的湘胡站—滨康路站区间作为分析对象,研究有害气体在隧道内的分布特性及地铁列车活塞风对其分布的影响。

由于有害气体的浓度很小,分子量不大,故采用被动气体运输方程计算其分布,误差很小并可大大减少计算量。

① 杭州地铁含有害气体土层特性与灾害防治技术研究报告.武汉:中科院武汉岩土力学研究所,2009

3.1 有害气体分布特性理论分析

根据 TB 10120—2002 J 160—2002《铁路瓦斯隧道技术规范》的规定,以有害气体体积分数在任何情况下都不超过 0.5%作为满足运营要求的必要条件^[1]。

3.2 有害气体分布特性的数值模拟分析

3.2.1 一维模拟分析采用 STESS3.0 软件,以水力网络流动不稳定过程算法和长期不稳定传热的特征值为基础,解决长期预测的模拟计算发散问题。湘湖站—滨康路站区最不利条件为隧道贯穿含气地层,含气地层分布长度约 150 m,气层压力约 0.4 MPa。最不利的情况为渗入隧道内的有害气体都聚集在 150 m 长的隧道顶部范围内。此时,在无列车运行静态条件下隧道顶部渗入气体平均体积分数为 0.67%/h。达到警戒浓度 0.5%的时间为 45 min。该区间换气次数大于 0.7 h⁻¹即可满足要求。杭州地铁 1 号线地下车站站台层采用屏蔽门通风空调系统,区间隧道采用活塞通风系统,车站两端采用活塞风道,笔者分别计算了该区间在开启和关闭排热风机工况下,发车对数从 3 对到 30 对时,活塞风对区间的换气量的影响,部分模拟结果见图 1~3,图中数字为活塞换气量(m³/s),“—”号表示风向与箭头风向相反^[2]。

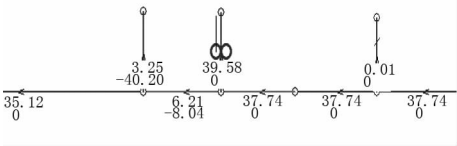


图 1 开启排热风机、10 对列车运行时活塞换气量模拟结果

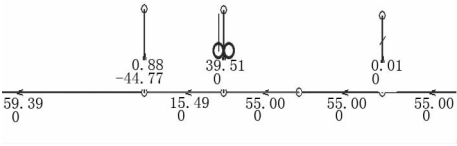


图 2 开启排热风机、20 对列车运行时活塞换气量模拟结果

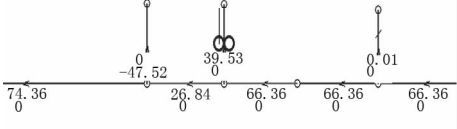


图 3 开启排热风机、30 对列车运行时活塞换气量模拟结果

湘湖站—滨康路站下行区间列车活塞风换气

次数见表 4。

表 4 湘湖站—滨康路站下行区间列车活塞风换气次数				
发车对数	开式系统新风量/(m ³ /s)	开式系统换气次数/h ⁻¹	闭式系统新风量/(m ³ /s)	闭式系统换气次数/h ⁻¹
3	17.98	1.4	9.34	0.7
6	20.08	1.6	10.29	0.8
8	26.75	2.1	12.83	1.0
10	32.16	2.6	15.01	1.2
15	40.06	3.2	18.61	1.5
20	44.77	3.6	21.11	1.7
24	45.87	3.7	18.32	1.5
30	47.52	3.8	12.31	1.0

由表 4 可知,在开启和关闭排热风机的所有工况下,湘湖站—滨康路站下行区间初、近、远期列车运行产生活塞风的换气次数均大于理论计算所得的最小换气次数 0.7 h⁻¹。得出结论:在地铁正常运营时段,该区间依靠活塞风的通风换气作用可以保证区间内有害气体浓度不超标。

3.2.2 采用 CFD 场模拟软件模拟有害气体分布,建立了湘湖站—滨康路站区间模型,其中滨康路站开启出站端活塞风道。采用非定常(瞬态)模拟,模拟时间 250 s,按照最不利工况,即关闭排热风机模式进行模拟计算。250 s 时有害气体纵剖面浓度分布云图见图 4。

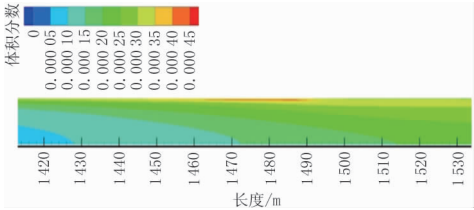


图 4 250 s 时有害气体纵剖面浓度分布云图

得出结论为:有害气体的浓度在没有活塞风时最高,随着列车驶过有害气体区域,其浓度迅速降至最小值,随着列车的远去,有害气体浓度逐渐增大,有害气体浓度随列车活塞风周期性变化。模拟结果表明活塞风对排除有害气体的作用非常明显,前述理论计算和一维模拟得到的计算结果都偏保守,为安全值。

4 隧道内有害气体的排除

4.1 地铁隧道通风系统分为利用列车运行产生的活塞风进行通风换气的活塞通风系统与利用隧道端部设置的隧道风机进行通风的机械通风系统。

由第 3 章模拟计算结果可知,在地铁正常运营时段,对于在隧道端部设置的活塞风道通风系统而言,依靠活塞风对区间隧道通风换气,可保证有害气体的浓度不超标。

4.2 在列车停运时段、非正常运营时段(列车阻塞、晚点等工况)或区间端部未设置活塞风道等情况下,由于区间没有列车运行形成的活塞风的通风换气作用或活塞换气作用不足以有效降低有害气体的浓度,则需要开启机械通风系统,根据区间有害气体浓度的情况,定时对区间进行机械通风。

以第3章中计算的杭州地铁1号线湘湖站—滨康路车站区间为例,其通风模式可为湘湖站两端的4台隧道风机并联对区间送风,滨康路车站两端的4台隧道风机并联对区间排风,等有害气体浓度降低后可停止机械通风。定时通风时间间隔应根据监测区有害气体浓度来确定,但不宜超过45 min。

图5为典型车站隧道通风系统原理图(以滨康路站为例)。表5为湘湖站—滨康路车站区间有害气体浓度

体浓度超标后通风系统运营模式表。

经模拟计算可知,在最不利工况,即上、下行区间隧道内有害气体浓度同时超标时,对两个区间同时进行机械通风,只需要约10 min即可将有害气体浓度降低到安全范围内。

5 结论及建议

5.1 建议对隧道盾构管片的加工、生产质量、管片自身的防水和防渗气量加强控制,管片加工时应明确防水和防渗气指标,渗气系数数量级要小于 10^{-11} cm/s。

5.2 在地铁正常运营时段,对于区间两端设置活塞风道的情况,不需对区间进行机械通风,仅依靠列车运行形成的活塞风换气即可满足安全要求;在列车停运时段、非正常运营时段或区间端部未设置活塞风道等情况下,需要实时监测隧道内有害气体的浓度,定期对区间进行机械通风。

5.3 建议在含有害气体地层的地铁隧道内部设置长期监测有害气体浓度的监测系统,一旦发现有害气体浓度超标,应立即报警、停运列车及联动通风等系统,有效降低其浓度从而保证运营的安全^[3]。

参考文献:

[1] 中华人民共和国铁道部. TB 10120—2002 J 160—2002 铁路瓦斯隧道技术规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2002

[2] 北京城建设计研究总院. GB 50157—2003 地铁设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2003

[3] 国家煤矿安全局,中国矿业大学,阳泉煤业(集团)有限责任公司,等. AQ 1029—2007 煤矿安全监控系统及检测仪器使用管理规范[S]. 北京:煤炭工业出版社,2007

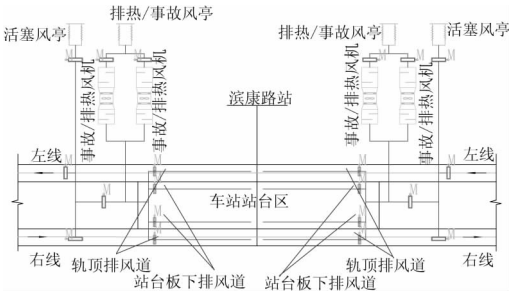


图5 典型车站的隧道通风系统原理图(以滨康路站为例)

表5 湘湖站—滨康路车站区间有害气体浓度超标后的通风系统运营模式

	湘湖站	滨康路站
运营模式	4台隧道风机并联运行	4台隧道风机并联运行
上行区间浓度超标	对上行区间送风	对上行区间排风
下行区间浓度超标	对下行区间送风	对下行区间排风
上、下行区间浓度同时超标	同时对上、下行区间送风	同时对上、下行区间排风