

文章编号: 1006—2106(2010)09—0078—04

# 浅层气对杭州地铁施工的影响模式分析\*

郭爱国<sup>1\*</sup> 沈林冲<sup>2</sup> 张金荣<sup>2</sup> 秦建设<sup>2</sup> 黄先锋<sup>2</sup> 王勇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2. 杭州市地铁集团有限责任公司, 杭州 310020)

**摘要:** 研究目的: 针对杭州地铁1号线在部分区段地面以下15~30 m的土层中存在浅层气, 会对地铁站、隧道盾构施工造成影响。在综合考虑浅层气和含气土层特性的基础上, 就浅层气对地铁构筑物施工影响模式进行分析, 提出应采取的防治措施, 保证施工安全。

**研究结论:** 地下土层中浅层气的存在, 施工中如果无控释放会造成土层扰动破坏, 气压较高时会造成槽壁坍塌或孔壁失稳、基坑底板隆起, 如果采取的应急措施不当, 将危及设备和人身安全; 土压平衡盾构会对刀盘摩阻力、出土和压力平衡产生影响, 泥水平衡盾构会对局部稳定产生影响; 盾构穿越含气土层时还存在安全问题。施工中采取有控释放措施, 避免浅层气造成的危害。

**关键词:** 地铁; 盾构; 浅层气; 防治措施

**中图分类号:** U231+.3 **文献标识码:** A

## Analysis of Influence Mode of Shallow Gas on Construction of Hangzhou Metro

GUO Ai-guo, SHEN Lin-chong, ZHANG Jin-rong, QIN Jian-she, Huang Xian-feng, WANG Yong

(1. Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Hangzhou Metro Group Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang 310020, China)

**Abstract:** Research purposes: The shallow gas existed in the soil stratum from depth of 15m to 30m under some section of Line 1 of Hangzhou metro might have influences on the constructions of the metro stations and shield tunnels. Based on consideration to the characteristics of shallow gas and gassy soil, the influence mode of shallow gas on the construction of underground structures was analyzed and the corresponding measures were presented to prevent the disasters during the construction.

**Research conclusions:** During the construction, the uncontrolled release of shallow gas would seriously disturb the soil layer. The destabilization of the trench wall or hole wall and the upheaving of foundation ditch might happen because of the high gas pressure. Moreover, there was the hidden peril of safety accident when shielding was conducted across the gas soil layer. So, the measures like controlled release of the shallow gas had to be taken during the construction to prevent the disasters caused by the shallow gas.

**Key words:** metro; shielding; shallow gas; preventive measure

杭州地铁1号线南起萧山湘湖站, 向北至钱塘江边的滨江站, 下穿钱塘江至江北岸的富春路站, 经城站

火车站、湖滨站、凤起路站、武林广场、文化广场向东至火车东站, 经七堡车辆基地、在九堡客运中心分别向

\* 收稿日期: 2010-06-01

基金项目: 杭州地铁资助项目(212008 YH120301)

\*\* 作者简介: 郭爱国, 1969年出生, 男, 副研究员。

东、北延伸为下沙线、临平线。1号线全长 61.42 km 共设 37 座车站,其中一、二期线路总长 47.97 km。

地铁 1 号线工程,在地质初勘及详勘过程中发现,地面以下 15~30 m 左右存在高压的浅层气,并多次发生触探孔气体喷发并燃烧的现象,使勘探作业受阻,危及周边建筑及人员的安全,并且是工程建设中无法回避的问题。

目前,国内外对海域中含气土的工程性状及其对工程的影响研究已取得一定的进展;陆域中含气土的研究主要集中在含气垃圾土和污染土。但诸如杭州地铁所遇的含浅层天然气的工程性质及其对地铁构筑物施工影响的研究,可借鉴的经验和研究成果不多。因此,综合考虑含气土层的工程特性,对杭州地铁浅层气对地铁构筑物施工的影响模式进行研究,采取有针对性的防范措施具有十分重要的参考价值。

## 1 地铁沿线浅层气的分布特点

浅层气分布资料揭示,地铁 1 号线沿线遇到的浅层气主要储存在淤泥质粉质粘土夹粉细砂及下伏的中砂土层中,含气层顶板距离地面在以下 20~30 m 处,气压大,最大可达 0.405 MPa,局部气量充沛,空间分布不均匀。淤泥质粉质粘土是浅层气的气源层也是封盖层,其内部也含浅层气,但只是以零星的气泡状分布。因此,粘土层不像砂层一样将浅层气大规模聚集成藏。淤泥质粉质粘土本身所含的浅层气不会对工程产生明显的影响,淤泥质粉质粘土夹粉细砂层和中砂土层中的高压浅层气会对地铁施工造成明显的影响。

## 2 浅层气对地铁施工的影响

### 2.1 浅层气无控释放导致土层的剧烈扰动

在含气的地层区段,当揭穿淤泥质粉质粘土(盖层)达到淤泥质粉质粘土夹粉细砂层时,开始有气体出现,而达到细砂或中砂层时,一般都会出现强烈的井喷,并将泥砂喷出 10 m 左右,有些孔可持续喷发几小时,甚至数天,喷出物中含有较多的砂土及少量贝壳。在如此大的气压力作用下,一旦气体在无控制条件下释放,含气层气压力将急剧下降,必然会导致水~气分界面向喷气口推进,快速的气流对土层产生强烈的冲刷作用,从而引起大范围浅气层和上覆土层的剧烈扰动,带走大量的土颗粒及水,引起流砂及上覆粘土土层结构强度的破坏,产生地表沉降。因此,气体急剧释放与气体缓慢释放相比,明显加大了对含气层与上覆软土层工程性质的恶化,是浅层气造成灾害的重要方面。

高压浅层气释放在无控制或控制不当条件下,不仅大范围剧烈扰动含气砂层,同时严重扰动上覆软土层,也会对下卧持力层有不同程度的扰动。对地铁站而言,高压浅层气释放不当,会造成地基砂土层和软土层的剧烈扰动,引起附加沉降和差异沉降,如果沉降量超过设计控制值,对地铁站结构十分不利。对盾构区间的隧道而言,若浅层气释放不当,隧道也会产生附加沉降和差异沉降,造成隧道裂缝或断裂。而且,对盾构施工的盾构机盾头的稳定性也会构成威胁。

### 2.2 浅层气对地铁站及基坑开挖底板稳定性的影响

地铁 1 号线的地下土层中含有的高压浅层气,埋藏深度不一,所含压力不等。施工中若遇到的气源丰富且压力大,如施工方法不当,很容易造成槽壁坍塌或孔壁失稳。致使含气土层的上覆荷载减小,应力状态发生变化。应力状态的改变,一方面使土体的抗变形能力降低,另一方面使土体的孔隙气压力与外部压力失衡。当压力梯度大于土层的抗渗透变形能力时,必将发生土体的渗透破坏,严重时会造成含气土层的大范围扰动,使其强度急剧降低,严重影响正常施工。

在基坑开挖过程中,含气土层的应力状态变化也是以卸荷的方式出现,其卸荷程度虽较地下连续墙或钻孔咬合桩施工时小,但其卸荷范围大得多,引起的地层变化范围也相应扩大。当基坑开挖深度较深时,可造成基坑底板土体大面积破坏,危害施工设备和人身安全。更严重的是,当浅层气突然大量涌出时,基坑底部由于通风不畅,涌出的浅层气无法迅速稀释,其浓度迅速上升,当达到 5%~15% 的爆炸极限时,遇到明火,将发生剧烈的爆炸,后果不堪设想。

### 2.3 浅层气对盾构施工的影响

地铁 1 号线区间隧道确定采用盾构法施工,是采用土压平衡盾构还是采用泥水平衡盾构,所面临的浅层气危害形式是不同的。

#### 2.3.1 土压平衡盾构

采用土压平衡盾构,土料应具有良好的流动性,内摩擦角要小以及渗透性差。当盾构穿越含浅层气的地层时,由于浅层气含量大,气压高,土体处于非饱和状态,这将增加施工难度,严重时会引起工程事故。浅层气对土压平衡盾构施工的影响主要表现在以下几方面。

##### 2.3.1.1 对刀盘摩阻力的影响

土压平衡盾构掘进时,为了维持压力仓与工作面的压力平衡,必然要挤压前方土体,使土体变形,当刀盘对土体进行切削时,阻力增大。由于含高压浅层气砂土摩擦力大,如果掘进速度过快,土体应变增大,一方面会增加千斤顶推力,另一方面会使刀盘摩阻力迅

速增大。另外,由于摩阻力导致刀盘及千斤顶推力波动较大,对前方土体扰动过多,故地面沉降大,不容易控制。

### 2.3.1.2 对出土和压力平衡的影响

土压平衡盾构将刀盘切削的土充满盾构头部的整个密封舱,并保持一定压力来维持开挖面的土压力平衡。在含气砂层中,砂土含水量低,气压力高,土颗粒之间存在界面张力的拉紧作用,使得土体的流动性相对较差,造成盾构掘进中刀盘及主轴承扭矩、千斤顶顶推力增大,施工进度较慢;同时导致刀盘、主轴承的过度磨损。另外,砂性土流塑性差,螺旋出土器出土困难,工作面易形成“干饼”。土孔隙中的浅层气密度低,土体受到刀盘切削后,气体比水更容易与土颗粒分离,聚集于上部,而下部的砂土沉淀流动性差,加之受到挤压,形成砂饼的几率更大,不利于出土。气土分离后,气体位于上部,砂土位于下部,气体容易压缩,在千斤顶推力作用下,上部受到的阻力小,下部阻力大,易使工作面失去平衡,对盾构掘进方向控制不利。

### 2.3.1.3 浅层气进入隧道对安全构成威胁

盾构法施工,浅层气可能进入隧道内。另外,土压平衡盾构在水头很高时,螺旋输送机盾体内的搅拌机难以起到封水的作用,螺旋机内的螺旋土柱可能失稳。一般水头大于 50 m 也即水压大于 500 kPa 就会发生这样的危险,而含气层的气压力有时可能高达 500 kPa。所以,在含高压浅层气土体施工中存在上述面对的危险。

### 2.3.1.4 对隧道通风和防火的影响

隧道在穿越含气土层时,即使气体压力不高,浅层气也会随受切削土体从螺旋输送机进入隧道。浅层气密度小,往往汇聚在隧道顶部形成层状,加之浅层气无色无味,容易被人忽略,当浅层气含量达到 1% 时就可遇火燃烧,达到 5% 时可遇火爆炸。所以,隧道内部通风设施必须保证安全。

## 2.3.2 泥水平衡盾构

泥水平衡盾构虽然具有土层适应范围广和 underwater 作业的优点,但在穿越含气土层时也会面临如下问题。

### 2.3.2.1 局部稳定受影响

在泥水盾构进入含气土层时,一方面打破了土层中原有的气水平衡状态,造成气体向压力低处运移,另一方面会改变土层的原有结构和固、液、气三相的比例及空间分布。施工中土层中的浅层气就会进入与切削面直接接触的泥水中。由于气体的密度小,容易在切削面的上部聚集,造成上部切削面成膜困难,对局部切削面稳定十分不利。

### 2.3.2.2 浅层气排出困难

由于泥水盾构送泥水的输送管处在泥水舱的上部,而排泥水的管道位于泥水舱的下部,如果气体量较大,刀盘的搅动不足会将气体与泥水混合在一起,当泥水舱内的气体量增大到一定程度时,不但造成泥水的流动性变差,而且影响切削面的稳定,对正常掘进造成不利影响,需要采取辅助措施才能保证盾构的正常推进。

### 2.3.2.3 泥水压力使地层开裂

当泥水压力较高,且上覆土层较薄时,在开挖面上可能会出现泥水压裂地层的现象。压力泥水将沿开裂面涌出地表,在水底施工时,会造成泥水舱内与外界水联通,切削面上的压力难以控制,从而影响切削面的稳定。如果土层中的浅层气压力、气量较大时,可能沿开裂面溢出,气体的迅速溢出形成渗透破坏而造成土层的大范围扰动,严重影响隧道的安全。

## 2.3.3 2种盾构面临的共同问题

### 2.3.3.1 对隧道管片外注浆的影响

影响盾构施工注浆有 2 个主要因素,即注浆压力和注浆量。浅层气压力高,增大了注浆压力,同时,含气土层孔隙比较大,且基本被浅层气充满,处于饱和土状态。饱和土中注浆,浆液与水混合,如注浆得当可使浆液分布比较均匀,有利于浆液作用的发挥。在含气层中注浆,浆液在孔隙中会比较离散,影响注浆效果,还会向远处扩散,无疑增加了注浆量,这给注浆带来困难。

### 2.3.3.2 浅层气释放对隧道衬砌内力和盾头稳定的影响

浅层气控制性释放后土体有体积压缩,这时隧道下方的土体与隧道暂时不接触,隧道失去下部土体抗力,上部土压力成为附加荷载,这个附加荷载会对隧道衬砌内力和变形产生影响,严重时会造成隧道轴线偏移或断裂。另外,盾构与隧道管片之间是相对独立的,没有很好的约束作用。当浅层气释放时,盾构的位移比较大。如果浅层气无控释放时,含气层土体受到剧烈扰动,浅层气迅速进入隧道后,土层被淘空,这个过程是非常迅速的。特别是盾尾部分漏气时,盾构非常危险,在附加荷载作用下,与管片没有足够的连接刚度,盾构机头部产生大位移在所难免。

## 3 结论

高压浅层气的存在对杭州地铁建设的影响是多方面的,主要表现在以下几个方面。

(1) 浅层气无控释放会导致土层的剧烈扰动,引

起附加沉降和差异沉降,当沉降量超过设计控制值时,对地铁站结构十分不利,而且对盾构施工的盾构机盾头的稳定性会构成威胁。

(2)当浅层气的气源丰富、压力较大时,如果施工方法不当,会造成槽壁坍塌或孔壁失稳。当基坑开挖深度较深时,会出现基坑底板突出,如果采取的应急措施不当,可能造成基坑底板土体大面积破坏,危及设备和人身安全。

(3)土压平衡盾构会对刀盘摩阻力、出土和压力平衡产生影响;泥水平衡盾构会对局部稳定产生影响,气体排出困难,使地层开裂。

(4)对遇到的浅层气,应采取通风措施来控制作业场所浅层气的浓度在 1%以下。

## 参考文献:

- [ 1 ] 唐益群,刘冰洋,赵书凯,等.高压沼气对浅部砂质粉土工程性质的影响[ J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004(10): 1316—1319  
Tang Yiqun, Liu Bingyang, Zhao Shukai, etc. Research on Influence of High— Pressure Marsh Gas On Sandy Silt Engineering[ J]. Journal of Tongji University ( Natural Science), 2004(32): 1316—1319
- [ 2 ] 陈卫. 长江沿岸某区浅层天然气特征及其对工程建设的影响[ J]. 桂林工学院学报, 2006(4): 181—183  
Chen Wei. Character and Effect on the Engineering Construction of Shallow Layer Natural Gas in an Area of Yangtse River Coastwise[ J]. Journal of Guilin University of Technology 2006(4): 181—183
- [ 3 ] 吕少伟,唐益群,叶为民. 浅层沼气赋集层中土的工程性质浅析[ J]. 上海地质, 1998(7): 50—55  
Lv Shaowei, Tang Yiqun, Ye Weimin. Analysis of the Engineering Properties of Soils in Shallow Stratum Storing Marsh Gas[ J]. Shanghai Geology 1998(7): 50—55
- [ 4 ] 冯铭璋,季军. 上海地区浅层气地质灾害评估[ J]. 上海地质, 2006(4): 44—47  
Feng Mingzhang, Ji Jun. The Geological Hazard Evaluation by Shallow Layered Natural Gas in Shanghai Region[ J]. Shanghai Geology 2006(4): 44—47
- [ 5 ] 孙明,高兴. 地铁车站建筑工程中的风险及其防范措施[ J]. 铁道工程学报, 2007(10): 97—100  
Sun Ming, Gao Xing. Risk and Preventing Countermeasures of Subway Construction Design and Engineering during the Process of Construction[ J]. Journal of Railway Engineering Society 2007(10): 97—100
- [ 6 ] 桂林. 广州轨道交通五号线盾构施工关键技术[ J]. 铁道工程学报, 2007(11): 76—82  
Gui Lin. Key Construction Technologies in Shield Tunneling of Guangzhou Metro Line 5[ J]. Journal of Railway Engineering Society 2007(11): 76—82
- [ 7 ] 马振海,于春华. 地铁主体结构变形监测的必要性分析[ J]. 铁道工程学报, 2008(8): 93—95  
Ma Zhenhai, Yu Chunhua. Analysis of Necessity of the Primary Structural Transmutation Observation in Subways[ J]. Journal of Railway Engineering Society 2007(8): 93—95
- [ 3 ] 徐中华,王卫东,王建华. 逆作法深基坑对周边保护建筑影响的实测分析[ J]. 土木工程学报, 2009(10): 88—96  
Xu Zhonghua, Wang Weidong, Wang Jianhua. Responses of Heritage Buildings to an Adjacent Deep Excavation Using Top— down Method[ J]. China Civil Engineering Journal 2009(10): 88—96
- [ 4 ] 李俊,张小平. 某基坑位移、沉降和内力实测结果及预警值讨论[ J]. 岩土力学, 2008(4): 1045—1052  
Li Jun, Zhang Xiaoping. Discussion on Monitoring Results of Displacements, Settlements and Inner Forces of a Foundation Pit and Early— warning Value[ J]. Rock and Soil Mechanics 2008(4): 1045—1052
- [ 5 ] 郑刚,刁钰,吴宏伟,等. 超深开挖对单桩的竖向荷载传递及沉降的影响机理有限元分析[ J]. 岩土工程学报, 2009(6): 837—845  
Zheng Gang, Diao Yuyu, Wu Hongwei, etc. Finite Element Analysis on Mechanism of Effect of Extra— deep Excavation on Vertical Load Transfer and Settlement of a Single Pile[ J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2009(6): 837—845
- [ 6 ] 郑刚,颜志雄,雷华阳,等. 基坑开挖对临近桩基影响的实测及有限元数值模拟分析[ J]. 岩土工程学报, 2007(5): 638—643  
Zheng Gang, Yan Zhixiong, Lei Huayang, etc. Field Observation and Finite Element Numerical Simulation Analysis of Effect on Adjacent Piles Due to Excavation[ J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2007(5): 638—643

(上接第 77 页)