

土压盾构非满舱掘进时压缩空气与地层适应性分析

钟小春¹, 余明学², 竺维彬³, 米晋生⁴, 钟长平⁴, 黄威然⁴, 祝思然⁴

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏 南京 210036;

3. 广州地铁集团有限公司, 广东 广州 510220; 4. 广州轨道交通建设监理有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 针对气压辅助工法应用越来越多工程实践, 基于 Geostudio Air/w 建立的气-水-固耦合数值计算模型, 探讨了不同盾构隧道顶部埋深、上覆闭气层厚度、地层性质以及盾构压力舱空舱高度对开挖面渗气量的影响。结果表明: 分析广州地铁 21 号线某区间土压盾构气压辅助工法的应用案例, 压缩空气渗气量控制在 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 内, 在开挖面建立稳定的支护压力, 确保盾构掘进达到微扰动控制水平; 闭气能力强的粉质黏土和黏土地层土压盾构掘进时, 通过向压力舱注入少量压缩空气可以更好的保持开挖面支护压力的稳定; 渗透系数较大、地质分布不均的砂卵石、上软下硬地层, 难以进行满舱掘进时, 可根据隧道埋深和上覆闭气层厚度来选择合适的空舱高度, 确保压缩空气逸流量小于产气量; 土压盾构穿越渗透性地层, 上覆闭气层厚度在 10.0 m 以上、或埋深大于 28.0 m 时, 压缩空气逸流量较少, 也不易发生压缩空气逸漏冒顶。

关键词: 土压盾构; 压力舱; 数值模拟; 渗气量; 开挖面稳定

中图分类号: U25

文献标志码: A

Adaptability Analysis of Compressed Air and Stratum in Non-full Chamber Excavation of Earth Pressure Shield

ZHONG Xiaochun¹, YU Mingxue², ZHU Weibin³, MI Jinsheng⁴, ZHONG Changping⁴, HUANG Weiran⁴, ZHU Siran⁴

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 3. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou 510220, China; 4. Guangzhou Rail Transit Construction Engineering Consulting Co., Ltd., Guangzhou 510010, China)

Abstract: Aiming at increasing engineering practice of compressed-air-assisted method, based on the numerical calculation model of air-water-solid coupling established by Geostudio Air/w, the influence of different shield tunnel top buried depth, thickness of overlying airtightness layer,

stratum property and pressure chamber height on the seepage volume of excavation face was discussed. The results show that: The application case of compressed-air-assisted method in a section of Guangzhou Metro Line 21 is analyzed. The seepage gas volume is controlled within $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. A stable support pressure is established on the excavation surface to ensure that the shield tunneling reaches the micro-disturbance control level. When the earth pressure shield tunneling in silty clay and clay stratum with high airtightness ability, appropriate compressed air can be injected into the pressure chamber to better maintain the stability of the support pressure of the excavation face; To ensure the seepage volume is less than the gas production. When it is difficult to carry out full-cabin excavation in sandy cobble, upper soft and lower hard stratum with large permeability coefficient and unequal geological distribution, the appropriate empty chamber height can be selected according to the buried depth and the thickness of the overlying airtightness layer. When the earth pressure shield crossing permeable stratum and the thickness of the overlying airtightness layer exceeding 10.0m, or the buried depth exceeding 28.0m, compressed air escape amount is less, and it is not easy to occur roof fall under compressed air.

Keywords: earth press balance shield; pressure chamber; numerical simulation; seepage gas volume; excavation face stability

上软下硬或砂质泥岩等地层盾构掘进易同时发生结泥饼和喷涌等问题。1996 年, 广州地铁一号线, 针对埋深大、裂隙水发育的岩石地层以及富水、气密性好的复合地层, 为解决常规土压模式导致盾构负荷大, 同步注浆质量差, 刀具磨损加快等问题, 广州地铁一号线首次尝试应用辅助气压平衡的盾构掘进技术。竺维彬等^[1]在广州地铁不断实践探索中, 针对气密性较好的地层提出采用辅助气压掘进的模式: 即开挖舱下部为

收稿日期: 2022-09-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52178387, 51678217)

第一作者: 钟小春, 副教授, 工学博士。主要研究方向为盾构技术。E-mail: 58206947@qq.com



论文
拓展
介绍

切削后的渣土,上部注入压缩空气或膨润土来维持开挖面的平衡^[2],随后盾构掘进状况得到很大的改善。可见,向开挖舱中注入压缩空气对盾构掘进施工,较好地控制了隧道开挖引起的地表沉降问题,稳定开挖面平衡有重要意义^[3-4]。

目前,国内外对于盾构辅助气压工法大多依据施工经验,缺乏理论支撑。杨志勇等^[5]改进Krabbe公式并考虑渗漏系数、舱内压强、温度、地层变化等影响因素,提出了一种新的空气损失量 Q 的半经验半理论计算方法;张伯阳等^[6]以南京纬三路过江通道工程为背景,通过带压开舱的工程实例,重点介绍了带压开舱过程中气压稳定的影响因素以及其适用范围和优缺点。宋蕴璞等^[7]通过建立大型泥水平衡盾构气泡舱的气压弹簧数学模型,确定了对开挖面平衡控制起关键作用的气泡舱的初始泥水液位、压缩空气的初始体积、初始压力等参数的确定原则。马卉等^[8]通过室内闭气试验装置及理论计算方法测定了衡盾泥材料在带压开舱过程的保压效果,验证了开舱过程中空压机配备的合理性。张治国等^[9]考虑盾构施工时的气压效应与无气压效应的两种工况,研究成果为复杂工况下的盾构开挖变形提供依据。Ye等^[10]对为测定衡盾泥材料在带压开舱过程的保压效果,通过室内设计的一种步进式注气试验装置,对上海饱和黏土进行逐级注气试验,得出了气体流量的演变规律。Lee^[11]通过分析考虑渗流力影响的开挖面支护压力得出,平衡渗流力是开挖面支护压力的重要组成部分;刘峰等^[12]依托广州地铁12号线,总结了气压辅助工法的优缺点。以往的研究主要为探究采取带压开舱时压缩空气损失的影响因素,少有考虑非满舱施工中压缩空气逃逸及对开挖面稳定性的影响^[13]。

关于辅助气压平衡的盾构技术,因其成本低,在面对一些特殊地层开挖面支护压力建立较为困难时具有广泛的应用前景。但是压缩空气适用不当会产生极其严重的后果,南京纬三路过江隧道中因气体使用不当造成江底覆盖层砂土流失形成大面积冲刷坑^[14]。由于气体逃逸机理及气-水-固多相耦合数值计算相当复杂,施工时大多是依靠工程经验,缺乏一定的理论支撑。面临强透水地层时,常常因为保压能力不好,气体逃逸,而导致发生严重的冒顶事故,对于气体的适应范围、如何逃逸及逃逸速率的机理都缺乏一定理论基础和总结。为此,基于在Geostudio Air/w中建立的气-水-固耦合数值计算模型,分析不同盾构隧道顶部埋深、上覆闭气层厚度、地层性质及盾构压力舱空舱高度对开挖面渗气量的影响,并结合广州地铁21号线某盾构区间,探讨气压辅助工法与地层适应性的影响关系,为特殊地

层隧道施工提供技术支撑。

1 非满舱条件下压缩空气辅助工法数值模型建立

1.1 材料性质参数的确定

由于非满舱状态掘进时地层逸气难以判别,采用Geostudio Air/w建模。需要输入的材料性质为:土水特征曲线SWCC、水气渗透系数曲线。本次数值模拟中包括砂土地层、粉土地层、粉质黏土地层和黏土地层四种地层。

1.1.1 土水特征曲线SWCC

按照《ASTM D5298-10 滤纸法测土体吸力标准试验方法》的规范方法,采用Whatman No. 42无灰定量滤纸,测量地层在不同体积含水率下的基质吸力,得出不同的基质吸力点,进而得到砂土层、粉土层、粉质黏土层和黏土层4种地层的土水特征曲线^[15],如图1所示。

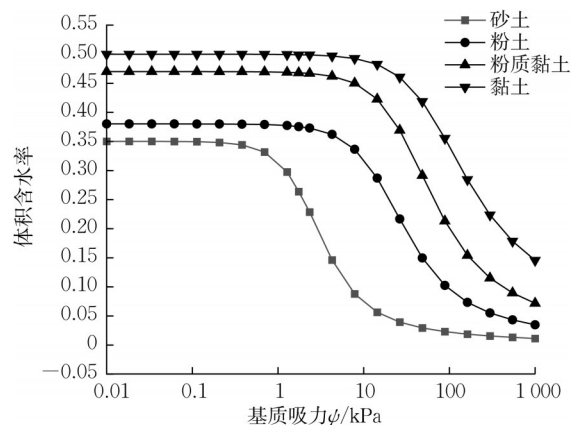


图1 地层土水特征曲线

Fig.1 Water-soil characteristic curve of stratum

1.1.2 水的渗透系数 k_w

非饱和土中水的渗透系数不是常数,孔隙中空气的存在,将会堵塞孔隙水的渗流路径,导致水渗流路径变长,渗透系数降低。在已知SWCC的情况下,测量地层在饱和状态下的渗透系数;可根据式(1)推导出不同基质吸力下地层的非饱和渗透系数 k_w ^[16],如图2所示。

$$k_w = k_s \frac{\{1 - (\alpha h^{n-1})[1 + (\alpha h)^n]^m\}^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{\frac{m}{2}}} \quad (1)$$

式中: k_w 为渗透系数, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; k_s 为饱和渗透系数, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; α 、 m 、 n 为Van Genuchten提出的SWCC公式中的参数,根据图2所示的地层水土特征曲线可知 $\alpha=0.00429$, $n=2.21302$, $m=1-1/n=0.54813$; h 为压力水头, cm 。

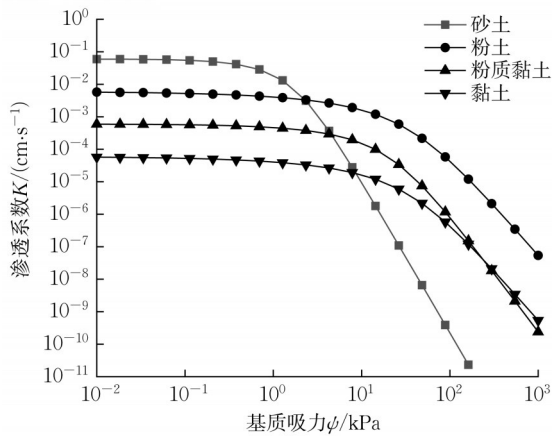


图2 地层的渗透系数 k_w

Fig.2 Permeability coefficient k_w of stratum

1.1.3 气的渗透系数 k_a

假设饱和土与干土孔隙结构保持不变,则流体渗透系数与动力黏滞系数呈反比。在绝对压力 101.3kPa 及 20℃ 的温度下,气体的动力黏滞系数为 $1.785 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$,水的动力黏滞系数为 $1.009 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。采用 Brooks 和 Corey 提出的气体渗透系数与饱和度的关系式(2)^[17],推导出地层的气渗透系数如图 3 所示。

$$\begin{cases} k_a = k_d (1 - S_e)^2 (1 - S_e^{\frac{2+\lambda}{\lambda}}) & u_a - u_w > a_{ev} \\ k_a = 0 & u_a - u_w \leq a_{ev} \end{cases} \quad (2)$$

式中: k_d 为干土中气体的渗透系数; k_a 为气体渗透系数; λ 为常数 2.3; u_a 、 u_w 为孔隙气压力、孔隙水压力; a_{ev} 为进气值; S_e 为有效饱和度, $S_e = 1 / [(1 + ah)^n]^m$ 。

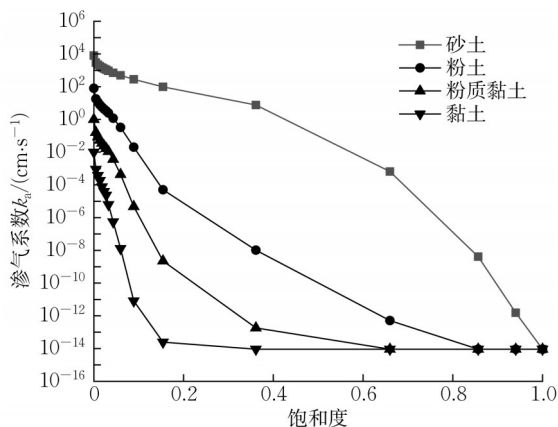


图3 地层渗气系数 k_a

Fig.3 Gas permeability coefficient k_a

1.2 数值模型建立

1.2.1 模型尺寸

为分析压缩空气作用时气体逃逸的影响因素,取模型的尺寸为 $100 \text{m} \times 30 \text{m}$,隧道直径 $D=6.0 \text{m}$,压力舱空舱高度分别取 $D/6(1 \text{m})$, $D/3(2 \text{m})$, $D/2(3 \text{m})$, $2D/$

$3(4 \text{m})$,隧道顶部埋深 H 分别为 6.0m 、 9.0m 、 12.0m 和 15.0m ,即埋深比 $H/D=1.0$ 、 1.5 、 2.0 、 2.5 进行分析。模型的全局单元尺寸为 0.5m ,采用四边形单元,单元数为 10 800,网格节点数为 11 161,见图 4 所示的数值计算模型。

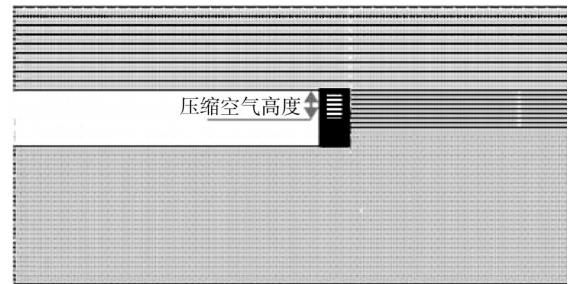


图4 数值计算模型图

Fig.4 Numerical calculation model

1.2.2 边界条件

地下水位位于地表以下 1.0m ,且为零气压边界,允许气体从地层上表面逃逸。模型左、右地层边界设置总水头为 29.0m 的水压边界。在压力舱空舱部分设置零水压和某一恒定压缩空气压力。

1.3 计算工况

数值分析的基本流程主要分为 3 步:

(1)绘制并划分盾构掘进地层、上覆闭气层区域。定义各种地层,如黏土地层、粉质黏土地层、粉土地层和砂土地层,上覆土采用粉质黏土地层(为闭气层)。按照 1.2.2 节设定边界条件。

(2)新建不考虑空气影响的渗流稳态分析,确保地层处于饱和状态。

(3)在(2)稳态分析下,建立一个新的考虑压缩空气影响的稳态分析,计算工况见表 1。

表 1 计算工况

Tab.1 Calculation conditions

隧道埋深/m	压缩空气舱内高度/m	上覆土闭气层厚度/m	压缩空气压力/kPa
6	1、2、3、4	3、4、5、6、6.5、7、7.5、8.0	100
9	1、2、3、4	3、4、5、6、7、8、9、9.5、10、10.5、11	100
12	1、2、3、4	3、5、7、9、11、12、12.5、13、13.5、14	100
15、18、21、24、27	1、2、3、4	3、5、7、9、11、13、14、15、15.5、16、16.5、17	100

表 1 中包含了隧道埋深、盾构穿越地层、上覆土闭气层厚度、压缩空气高度和上覆土闭气层厚度和压缩空气压力,每种工况都是只考虑一种影响因素的变化,建立了近 200 种工况。埋深为隧道开挖断面的顶部至

自然地面的垂直距离。如果上覆土为黏土地层或粉质黏土地层具有较低渗透性和良好的闭气能力,可认为上覆土闭气层;如果上覆土为粉土层或砂土层且其渗透系数小于 $3 \times 10^{-4} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$,此时渗气系数小于 $1 \times 10^{-5} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、粉土地层饱和度大于0.4时,砂土地层饱和度大于0.8时,此时认为该土层闭气能力良好,据此判断为上覆闭气层厚度^[18-19]。在中浅埋盾构隧道工程中,为了避免冒顶事故发生,压力舱内压缩空气压力一般不高,工程实践中大多采用100 kPa。

2 基本工况的计算分析过程

以隧道顶部距地表埋深9.0 m、上覆闭气层厚度7.0 m、盾构压力舱空舱高度1.0 m、隧道直径为6.0 m为基本工况,盾构穿越的地层为砂土地层。从图5中可以看出,采用局部空舱高度1.0 m掘进时,地下水发生了向开挖面集中渗透,开挖面位置水位下降明显,下降幅度达到6~7 m,在不考虑压缩空气影响情况下,开挖面的渗水量达到 $0.0116 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,开挖面处极易发生渗透破坏,过多地下水进入压力舱内,也极易诱发螺旋排土器持续发生喷涌,这严重影响了土压盾构掘进的效率。如图6所示,在压力舱施加100 kPa压缩空气后,压力水头除开挖面附近外没有明显下降,开挖面渗水量为 $0.0000164 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,仅为原来的1/1 000,基本上封住了地下水往压力舱渗透。地层中压缩空气流动基本在压力舱空舱附近1.0 m以内,由压缩空气建立的开挖面支护压力基本可以平衡地层中的土水压力,每分钟整个地层的渗气量为 0.872m^3 ,施工时每台空压机每分钟产气量为 1.267m^3 ,空压机可以满足盾构施工正常施工要求。

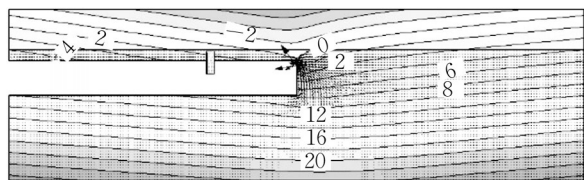


图5 不考虑压缩空气作用下地层中压力水头等值线云图
Fig.5 The Contour nephogram of water pressure head in stratum without considering compressed air

3 气压辅助工法影响因素分析与地层适应性讨论

3.1 渗气量的影响因素分析

3.1.1 盾构隧道埋深对渗气量的影响

在保持盾构上覆土闭气层厚度5.0 m,穿越地层为

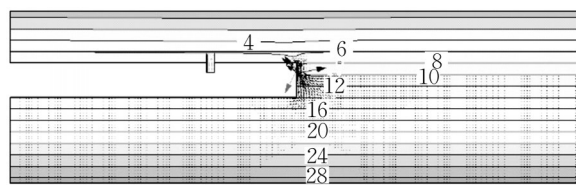


图6 压缩空气作用下地层中压力水头等值线云图

Fig.6 The Contour nephogram of water pressure head in stratum considering the effect of compressed air

砂土地层时,探讨隧道埋深从6m增加至28.0m时渗气量的变化规律,如图7所示。随着隧道埋深增加,渗气量呈下降趋势。在上覆土闭气层厚度保持不变的情况下,隧道掘进所处的砂土地层厚度增大,也意味着气体逃逸路径变长、压缩空气逃逸能力减弱、渗气量减小。

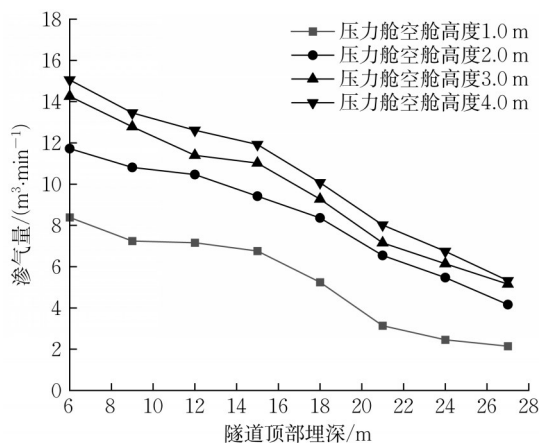


图7 不同隧道顶部埋深下开挖面的渗气量

Fig.7 Seepage gas volume of excavation face under different tunnel top burial depths

3.1.2 盾构上覆闭气层厚度对渗气量的影响

在保持隧道埋深12.0 m时,不同压力舱空舱高度下上覆闭气层厚度对隧道渗气量的影响如图8所示。

当上覆闭气层厚度小于4.0 m时,渗气量都在 $10 \text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 以上,渗气量大,不同压力舱高度下渗气量差别也大;在上覆闭气层厚度在6.0 m以上时,渗气量逐渐减小,渗气量小于 $10 \text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$,不同压力舱高度下渗气量相差较小;当上覆闭气层厚度10 m以上时,渗气量非常小可忽略不计。渗气量随上覆闭气层厚度的增加而显著降低,显然盾构上覆闭气层厚度是辅助工法应用时考量的重要因素。

3.1.3 地层水渗透系数对渗气量的影响

在隧道埋深12.0 m、压力舱空舱高度为1.0 m的情况下,探讨盾构穿越的地层分别为砂土层、粉土层、粉质黏土层和黏土层时渗气量的变化规律。从图9中,可以看出,土层的渗透性对土压盾构开挖面压缩空气

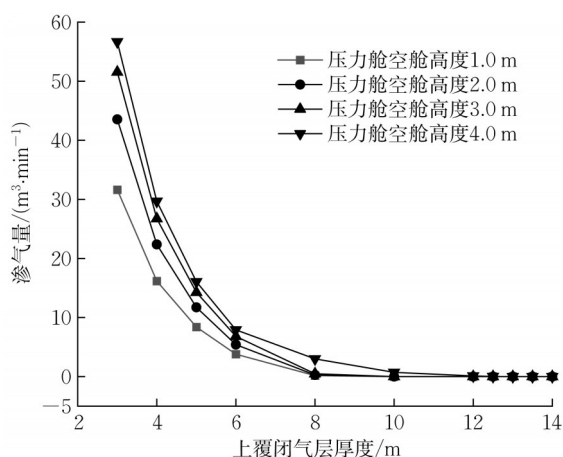


图8 不同上覆闭气层厚度下开挖面的渗气量

Fig.8 Seepage gas volume of excavation face under different thickness of overlying airtightness layer

逃逸影响非常大,土层的水渗透系数越小,渗气量越小,粉质黏土的渗气量相对小,对于水渗透系数更小的黏土,渗气量基本为0。对于水渗透系数较大的砂土和粉土,渗气量较大,因此施工中面对水渗透系数大的砂土和粉土,要及时观察舱内气压值,避免因气体过多逃逸而导致开挖面失稳。

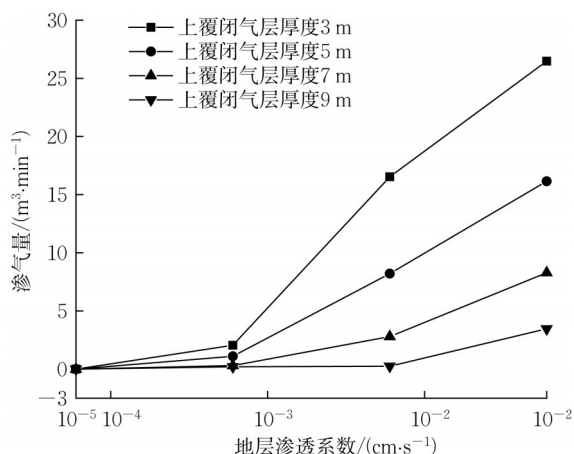


图9 盾构穿越不同地层下开挖面的渗气量

Fig.9 Seepage gas volume of shield tunneling through excavation faces under different stratum

3.1.4 盾构压力舱空舱高度对渗气量的影响

在隧道埋深12.0 m、地层为砂土的情况下,探讨压力舱空舱高度增加时渗气量的变化规律。如图10所示,随着空舱高度增加渗气量呈线性上升趋势。当上覆闭气层厚度较大时渗气量随空舱高度变化不明显,比如上覆闭气层厚度为10.0 m时,渗气量在 $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 以下且随着空舱高度变化较小;对于上覆闭气层厚度小的地层,如闭气层厚度小于6 m时渗气量随压力

舱空舱高度的增加幅度较快。原因是盾构压力舱空舱高度增大了压缩空气逃逸的面积,有利于压缩空气扩散,所以施工中为了控制压缩空气发生逃逸,应尽量减少压力舱空舱的高度,加强压力舱内渣土改良以防止闭塞发生。

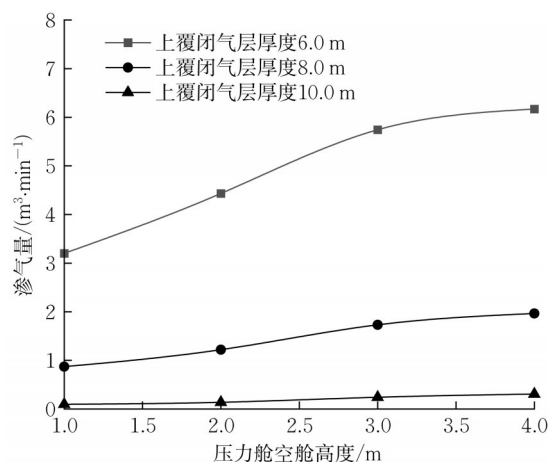


图10 不同压力舱空舱高度下开挖面的渗气量

Fig.10 Seepage gas volume of excavation face under different pressure chamber height

3.2 气压辅助工法与地层适应性讨论

盾构进行气压辅助施工时,一般选用两台空压机,每台空压机每分钟产气量为 1.267 m^3 。为提高施工安全性,取一台空压机的产气量作为控制标准,另一台作为备用,探讨适应渗气量小于 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 的情形。

在上覆闭气层厚度为6.0 m不变情况下,探讨盾构半舱(空舱高度3 m)掘进时渗气量与隧道埋深、穿越砂土地层水渗透系数的关系,如图11所示。提取图中渗气量 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 的等值线,得到了此时的隧道埋深与穿越砂土地层渗透系数之间的关系曲线,如图12所示。线性拟合该等值线得到式(3),在图中拟合直线左上方渗气量小于 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$,该区域为气压辅助工法安全应用范围;右下方渗气量大于 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 。

$$y = -4.16(\log_{10}^x)^2 - 4.52\log_{10}^x + 28.96 \quad (3)$$

式中: y 为隧道埋深; x 为地层渗透系数。

在隧道埋深为12.0 m不变的情况下,探讨盾构半舱掘进时渗气量与上覆闭气层厚度、穿越砂土地层水渗透系数的关系,如图13所示。提取图中渗气量 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 的等值线,得到了此时隧道上覆闭气层厚度与穿越地层渗透系数之间的关系曲线,如图14所示。线性拟合该等直线可得到式(4),在图中拟合直线左上方渗气量小于 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$,该区域为气压辅助工法安全应用范围;右下方渗气量大于 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 。

$$z = -0.72(\log_{10}^x)^2 + 11.88 \quad (4)$$

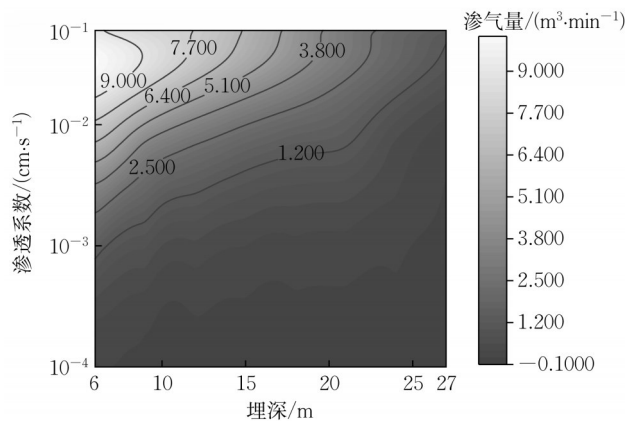


图11 渗气量与隧道埋深、地层渗透系数的关系

Fig.11 Relationship between seepage gas volume and tunnel burial depth and permeability coefficient of stratum

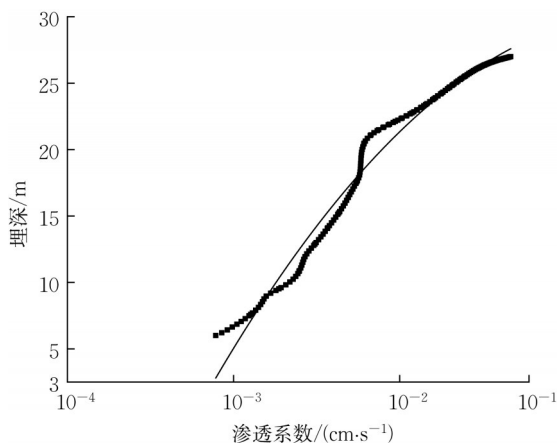


图12 渗气量为 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 时埋深与渗透系数之间的关系
Fig.12 Relationship between burial depth and permeability coefficients when seepage gas volume is $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$

式中: z 为上覆闭气层厚度; x 为地层渗透系数。

实际工程应用中,可根据施工现场给出实际埋深、上覆闭气层厚度、地层渗透系数下渗气量的等值线图,依据产气量判别气压辅助工法合理的范围,以确保盾构气压辅助工法的安全有效。具体讨论如下:

(1)气压辅助工法掘进时,施工中若闭气层厚度小于 8.0 m ,或隧道埋深小于 12.0 m 时,地层闭气能力相对较差、渗气量较大,施工时应适当降低压力舱空舱高度,减小压缩空气逃逸的面积,防止气体逃逸量过多导致开挖面失稳及坍塌。

(2)砂土地层中,若埋深大于 28.0 m ,或当隧道埋深在 $12.0 \text{ m} \sim 28.0 \text{ m}$ 之间,上覆闭气层厚度在 10.0 m 以上时,地层闭气能力良好,压缩空气难逃逸,渗气量在 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 之内,气压辅助工法适用。

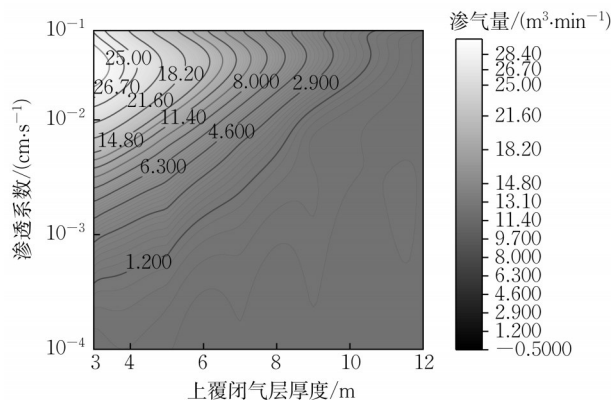


图13 渗气量与上覆闭气层厚度、地层渗透系数的关系

Fig.13 Relationship between gas permeability and the thickness of overlying airtightness layer and stratum permeability coefficient

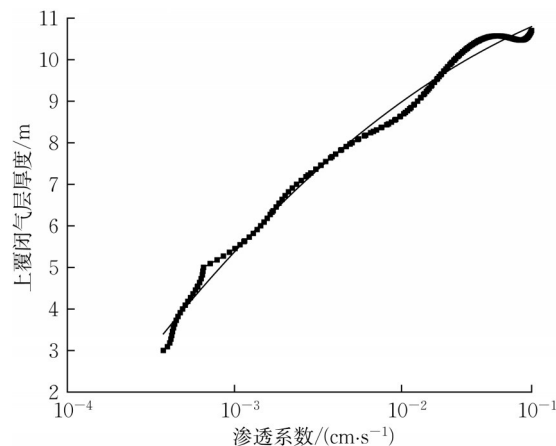


图14 渗气量为 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 时上覆闭气层厚度与渗透系数之间的关系

Fig.14 The relationship between the thickness of overlying airtightness layer and the permeability coefficient when seepage gas volume is $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$

(3)对于渗透系数略低的粉土地层,隧道埋深超过 18.0 m 时,或上覆闭气层厚度在 8.0 m 以上时,渗气量在 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 以内,渗气量较小。若粉土地层埋深小于 18.0 m ,且上覆闭气层厚度在 8.0 m 以下时,压缩空气逃逸能力较强,施工中应尽量减小压力舱空舱高度,来满足气压辅助工法的要求。

4 工程应用

如图15为广州地铁21号线某盾构区间盾构穿越地质纵剖面图,隧道掘进时上部土层以粉质黏土层为主,下部多以中粗砂层为主,由于隧道上覆土埋深范围仅为 $6 \sim 8 \text{ m}$,对开挖面支护压力的控制要求较高,否则极易

因开挖面支护压力波动引起超挖、地层扰动沉降影响广汕一级公路交通,项目部决定采用在压力舱顶部空间施

加少量压缩空气以最大限度稳定开挖面支护压力,以谨慎对待浅覆土可能存在的气体外溢的冒顶现象。

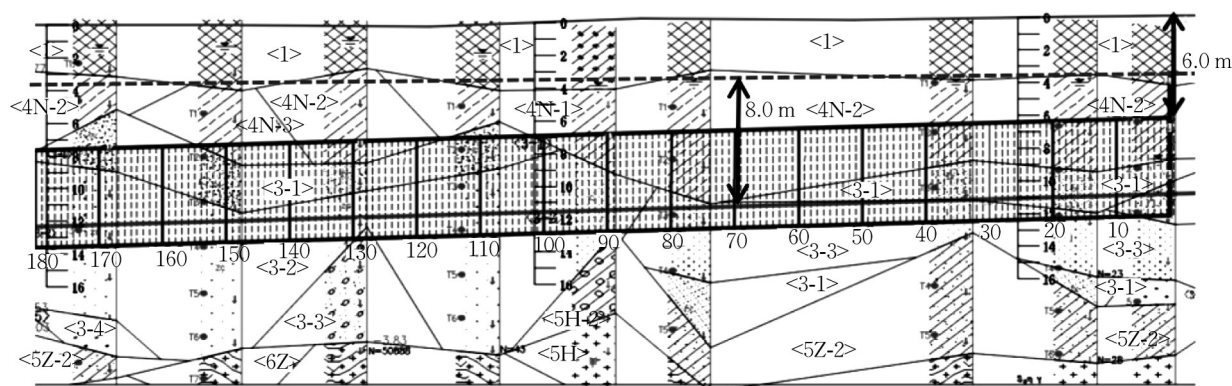
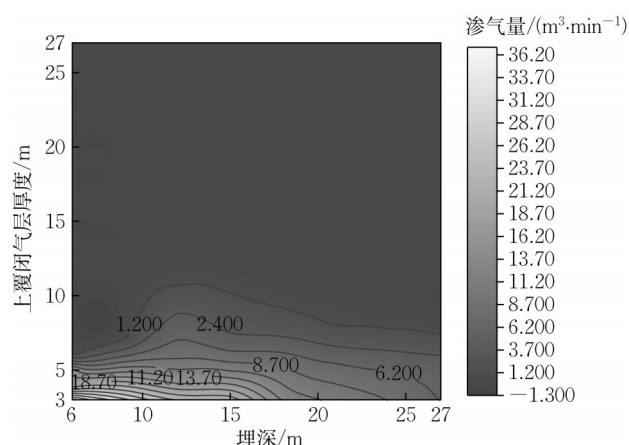


图15 广州地铁21号线某区间盾构穿越地质纵剖面

Fig.15 Geological profile of shield tunneling in an interval of Guangzhou metro line 21



竺维彬:提供技术支持和现场施工指导;
米晋生:盾构掘进技术支持,论文校审;
钟长平:调研及参与论文的修改;
黄威然:协助完成论文内容;
祝思然:参与论文的修改。

参考文献:

- [1] 竺维彬, 钟长平, 黄威然, 等. 盾构掘进辅助气压平衡的关键技术研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(1): 1.
ZHU Weibin, ZHONG Changping, HUANG Weiran, *et al.* Key technologies for the auxiliary air pressure balance mode for shield tunneling[J]. Modern Tunnel Technology, 2017, 54(1): 1.
- [2] CHINKULKIJNIWAT A, HORPIBULSUK S, SEMPRICH S. Modeling of coupled mechanical-Hydrological processes in compressed-air-assisted tunneling in unconsolidated sediments[J]. Transport in Porous Media, 2015, 108(1): 105.
- [3] 袁帅, 冯德旺. 考虑渗透系数各向异性的盾构隧道开挖面稳定性数值极限分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(12): 1717.
YUAN Shuai, FENG Dewang. Computational limit analysis of shield tunnel excavation face with a consideration of permeability anisotropy[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(12): 1717.
- [4] 武军, 廖少明, 时振昊. 考虑土拱效应的盾构隧道开挖面稳定性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(2): 213.
WU Jun, LIAO Shaoming, SHI Zhenhao. Workface stability of shield tunnel considering arching effect[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(2): 213.
- [5] 杨志勇, 杨星, 漆伟强, 等. 盾构舱内空气损失计算及影响因素分析[J]. 隧道建设, 2020, 40(8): 1147.
YANG Zhiyong, YANG Xing, QI Weiqiang, *et al.* Calculation and influencing factors of air loss in shield chamber[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(8): 1147.
- [6] 张伯阳, 赵小鹏, 张亚果, 等. 泥水盾构饱和和法带压开舱风险控制技术[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(4): 55.
ZHANG Boyang, ZHAO Xiaopeng, ZHANG Yaguo, *et al.* Risk control for saturated hyperbaric intervention in slurry shield tunneling[J]. Modern Tunnel Technology, 2015, 52(4): 55.
- [7] 宋蕴璞, 徐宝福. 大型泥水平衡盾构气泡舱初始参数的设计[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(8): 1221.
SONG Yunpu, XU Baofu. Initial parameters for bubble cabin of large diameter slurry shield[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2010, 38(8): 1221.
- [8] 马卉, 祝思然. 衡盾泥在带压开舱时的闭气保压效果研究[J]. 隧道建设, 2018, 38(S1): 15.
MA Hui, ZHU Siran. Study of air-tightness of filter cake of paste HDN[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(S1): 15.
- [9] 张治国, 白乔木, 赵其华, 等. 考虑气压效应的浅埋隧道开挖影响解析解答[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 650.
ZHANG Zhiguo, BAI Zhushu, ZHAO Qihua, *et al.* Closed-form solution of excavation effects induced by shallow tunnel considering air pressure[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 650.
- [10] YE W M, XU L, YE B, *et al.* Experimental investigation on gas migration in saturated Shanghai soft clay[J]. Engineering Geology, 2017, 222: 20.
- [11] LEE I M, NAM S W. The study of seepage forces acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(1): 31.
- [12] 刘峰, 李豆, 李腾飞. 气压辅助推进工法在土压平衡盾构施工中的应用研究[J]. 建筑机械, 2022(7): 113.
LIU Feng, LI Dou, LI Tengfei. Application of air pressure assisted propulsion method in earth pressure balance shield construction[J]. Construction Machinery, 2022(7): 113.
- [13] 日本土木协会. 盾构标准规范(盾构篇)及解说[M]. 朱伟, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Japan Civil Engineering Association. Shield standard specification (shield section) and explanation[M]. Translated by ZHU Wei, Beijing: China Architecture Publishing Industry, 2011.
- [14] 闫世虎, 袁士彬, 李家前. 南京纬三路过江通道冲刷坑抢险工程监测技术[J]. 中国港湾建设, 2013(4): 42.
YAN Shihu, YUAN Shibin, LI Jiaqian. Technology to monitor works to emergently remedy scour pits in cross-river tunnel at weisan road in Nanjing[J]. China Harbor Construction, 2013(4): 42.
- [15] 孙金鑫, 钟小春, 孙鹤明, 等. 砂卵石地层盾构带压开舱泥膜闭气能力研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(2): 445.
SUN Jinxin, ZHONG Xiaochun, SUN Heming, *et al.* Study on airtightness of filter cake during hyperbaric intervention in shield under sandy gravel stratum[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(2): 445.
- [16] NOMOTO T, LMAMURA S, HAGIWARA T, *et al.* Shield tunnel construction in centrifuge[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(4): 289.
- [17] 姚燕明, 杨龙才, 刘建国. 地铁车站施工对地面沉降影响的试验分析[J]. 城市轨道交通研究, 2002, 5(1): 70.
YAO Yanming, YANG Longcai, LIU Jianguo. Experimental analysis of the influence of subway station construction on land subsidence[J]. Urban Rail Transit Research, 2002, 5(1): 70.
- [18] 刘锦阳, 李喜安, 简涛, 等. 马兰黄土渗气率与饱和渗透系数的关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(6): 154.
LIU Jingyang, LI Xian, JIAN Tao, *et al.* A study of the relationship between gas permeability and saturated coefficient of permeability of the Malan loess[J]. Hydrogeological Engineering Geology, 2017, 44(6): 154.
- [19] 王勇, 孔令伟, 郭爱国, 等. 杭州地铁储气砂土的渗气性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 815.
WANG Yong, KONG Lingwei, GUO Aiguo, *et al.* Experimental research on gas permeability of shallow gassy sand in Hangzhou metro project[J]. Geotechnical Mechanics, 2009, 30(3): 815.