

文章编号:1005-0523(2018)05-0085-09

# 压气法盾构施工土仓供气量预测分析

刘训华<sup>1</sup>, 赵 昱<sup>2</sup>, 夏 杰<sup>2</sup>

(1.宏润建设集团股份有限公司,上海 200232;2.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

**摘要:**在花岗岩风化层中盾构施工时采用压气法可阻止地下水向隧道内渗流,提高掌子面的稳定性,但存在土仓气压稳定控制等问题,因此有必要对压气法盾构施工中空气注入量进行预测。以广州地铁某压气法施工隧道为背景,根据土仓气体超压向远方地层渗透而引起气-水运移和土体气相(液相)饱和度的变化特点,考虑非饱和土中空气和水的传导函数强非线性,利用TOUGH2软件建立了分层均质、各向同性土层的三维有限元模型进行渗流分析,揭示了压气法盾构施工过程中地层中的气-水运移基本规律。研究表明:超压气体在地层中形成非饱和区并逐步发展,直至与地表联通并形成漏斗状稳定渗流通道;并将模拟的空气损失量和现场实测分析数据进行对比,验证了模型的合理性;最后,通过改变土体固有渗气系数,得到土体固有渗透系数与渗气量呈指数关系,并建议了不同保气土层工况气体注入量。

**关键词:**盾构隧道;压气法;两相渗流;数值模拟

**中图分类号:**U45

**文献标志码:**A

压气法在隧道工程中的应用可以追溯到19世纪。在1828年英国泰晤士河隧道的修建中,Calladon便提出利用压缩空气抵挡地下水入侵开挖面的设想。1886年,英国南伦敦铁道隧道施工首次采用了压缩气体和盾构的联合工法,可称为气压平衡盾构,但不同于现代盾构,当时的盾构为敞开手掘式,地层自稳性较好,气压主要起到挡水的作用,与地下静水压力保持平衡,土压力由地层自身或机械支护维稳。该工法在之后英国的地铁隧道修建中扮演了重要的角色,但由于较高的气压环境不利于人体健康,逐渐被冷落。直到1978年,德国慕尼黑地铁工程在地下水位较低的施工环境中将压缩空气与新奥法相结合,实现了压气新奥法,使气压辅助工法得到了进一步的发展和广泛的应用<sup>[1]</sup>。国内于1966年在上海打浦路越江公路隧道工程中采用了网格挤压盾构掘进机施工,辅以气压稳定开挖面,在黄浦江底顺利掘进1322m。90年代后在广州多条地铁线路的施工中,压气法也扮演了重要的角色<sup>[2]</sup>。

在采用该方法时,土质、覆土厚度、地下水状况等都会对压气效果产生很大的影响。目前可以认为压气法存在两大问题:一是地层气密性的适用问题;一般认为,在砂砾、砂质地层中不宜采用,而在粉砂质与黏土地层中效果较好,二是关于气压量值如何确定的问题,目前也无统一标准,通常是取隧道断面某一点处的静水压力。赵运臣<sup>[3]</sup>和C. Anon<sup>[4]</sup>分别建议以隧底往上 $D/2$ 、 $D/3$ 处的静水压力为气压设定值,赵运臣同时强调还应该根据地层条件具体分析,区别对待。由于气压通常是取隧道断面某一点处的静水压力,导致了隧道上部总存在气压大于水压的超压区域。如图1所示。

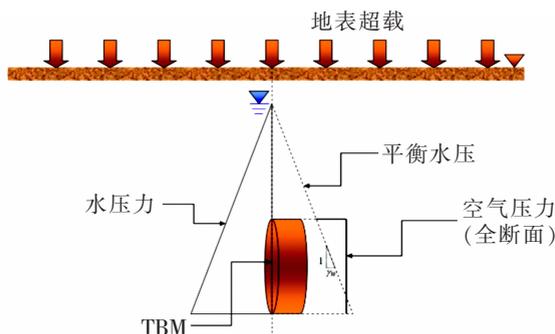


图1 压缩空气产生的超压分布

Fig.1 Additional air pressure induced by compressed air

收稿日期:2018-03-22

作者简介:刘训华(1973—),男,高级工程师,硕士,研究方向为城市轨道交通工程施工与管理。

超压气体会向开挖面前上方移动,造成气体损失和地层非饱和区的出现。与饱和土相比,非饱和土中孔隙未被液相完全充满,除了固体颗粒、孔隙水、孔隙气之外,其组份还包括液-气交界面上形成的收缩膜。收缩膜的存在产生了基质吸力,使非饱和土强度、渗流、变形等特性均与饱和土有较大差异,尤其是渗流特性对于土中气-液运移规律有显著影响。因此研究压气法隧道的渗流-变形问题不能完全按饱和土的渗流定律、本构方程等进行研究。

针对这一问题,国内外相关学者基于非饱和土理论,非饱和土的土水特征曲线和渗透系数特征曲线作为连续方程引入数值方法,对压气法施工中的气体损失和水气运移规律做了一定的研究。Peck James G<sup>[5]</sup>详细探讨了压缩空气法的一系列问题,分析了压缩空气作用下掌子面稳定性,建立基本的渗流方程,采用室内实验测试材料的渗透特性,并进行有限元程序的编制;Javadi<sup>[6]</sup>,刘辉采用水气二相渗流分析的有限元方法,考虑施工过程预测了压气新奥法气体由开挖面和衬砌的损失量和气流影响范围,并分别与实测数据和经验公式作了对比;Scheid<sup>[7]</sup>和 Chinkulkijniwat<sup>[8]</sup>等使用三维多孔介质多相渗流数值分析软件,对压气法新奥法隧道进行了水-气二相流数值模拟,得到了气体沿开挖面损失量值与土中气体饱和度分布规律。这些数值分析方面的有益探索对压气法隧道的施工具有较好的指导意义。

但这些研究多集中在压气新奥法隧道的气体损失分析,而压气法在盾构掘进方面的应用研究甚少,基本停留在工程类比和经验控制阶段,亟需对压气法盾构隧道气体控制进行定量理论研究。本文在总结施工现场经验的基础上,阐述了压气法盾构隧道的基本内涵,明确和辅助气压方法的不同,根据该模式施工在保持土仓压力稳定方面面临的问题,建立了水气两相渗流模型,预测了空气流量的设定。

## 1 压气法盾构掘进模式

### 1.1 基本内涵

压气法盾构隧道通过向土仓内注入压缩空气或泡沫来置换部分渣土,以气压和土压来稳定掌子面,同时防止地下水通过掌子面进入土仓,减少水土流失。因为泡沫的润滑和气压的减磨,这种模式下将充分减少了刀盘转动的扭矩,减小盾构推力,并可有效防止渣土固结形成泥饼,从而有效保证盾构掘进效率,如图2所示。

为降低施工风险,及时采取应对措施,气体与渣土交界面不应低于2#压力传感器,如图3所示。根据压力传感器控制土仓压力及渣土位置的具体控制方法如下:①若 $P_1=P_3<P_2$ ,则说明空仓率正常;②若 $P_1=P_2=P_3$ ,则说明空仓率增大,气土交界面下降,应结合刀盘扭矩和推力变化减慢螺旋输送机排土,减小进气量;③若 $P_1<P_3$ ,则说明空仓率减小,气土交界面上升,应结合刀盘扭矩和推力变化加快螺旋输送机排土,增加进气量;④若5道传感器量值普遍大于经验值和理论计算值,说明土仓压力整体偏大,应以缓慢降低气压为主,加快排土为辅;⑤若5道传感器量值普遍小于经验值和理论计算值,说明土仓压力整体偏小,应以减慢出土为主,增大进气压力为辅。采用上述控制方法,能避免压力判断失误,降低掌子面失稳风险;明确压力传感器量值与气渣界面的关系;使气渣界面更易判断,为土仓压力合理控制提供可靠依据。

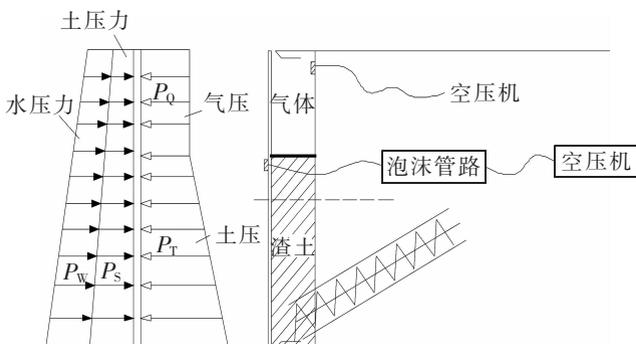


图2 气压稳定掌子面水压示意图

Fig.2 Air pressure to balance the water pressure induced by compressed air

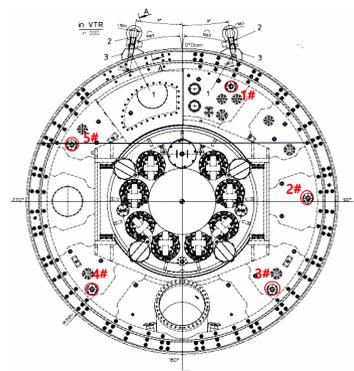


图3 基于传感器判断土仓内渣土位置示意图

Fig.3 The soil position based on the earth pressure sensor

### 1.2 压气法盾构隧道施工面临的问题

采用压气法盾构,关键技术要点之一是土仓气压保持。而目前气压保持以经验为主,缺乏相关的理论计算支撑,土层气密性和气压参数设定缺乏研究;对存在的气-液运移与地层变形规律尚不明确。为解决压气法盾构在不同地层条件下气压参数设定,需进一步在预测和设定合理的气体流量方面展开研究。

## 2 土仓供气量预测分析

在压气法盾构施工过程中,由于气压设定值大于地层中的静水压力,气体会从掘进面向前上方地层中渗透。气体的损失决定了空压机的供气设置,如果设置不当会影响正常掘进施工,严重时还会引发工程事故。因此,有必要对压气法盾构施工的气体损失进行评估。而数值方法可以充分考虑各种影响因素,最大程度地还原真实地层与隧道条件。因此,本文将运用三维多相流体渗流分析软件 Tough2 建立水气二相流数值模型;分析不同保气层条件下压气法盾构气-水运移规律;评估压气法盾构施工中的气体损失。

### 2.1 水气两相流模型的建立与求解

1) 平衡方程。对于一般的非饱和土渗流问题,孔隙中水相和气相的流动满足达西定律,且气相被看作是理想气体,满足理想气体定律。不考虑非饱和土中流体的扩散作用,考虑土体的源汇项,各组分的质量平衡方程为

$$\frac{\partial M^k}{\partial t} = -\text{div}(F^k) + q^k \tag{1}$$

$$M^k = \phi \sum_{\beta} X_{\beta}^k \phi S_{\beta} \rho_{\beta} \tag{2}$$

$$F^k = X_{\beta}^k \rho_{\beta} K \frac{K_{r\beta}(S_w)}{\mu_{\beta}} (\nabla \rho_{\beta} - \rho_{\beta} g) \tag{3}$$

式中: $M^k$  表示  $K$  组份的累计质量密度随时间的变化; $F^k$  为  $K$  组份的平流流量; $q^k$  为源汇项; $\phi$  为孔隙率; $S_{\beta}$  为  $\beta$  相饱和度; $\rho_{\beta}$  为  $\beta$  相密度; $X_{\beta}^k$  为  $K$  组占  $\beta$  相的质量百分数; $K$  为介质的绝对渗透率; $K_{r\beta}$  为  $\beta$  相的相对渗透率; $S_w$  是液相饱和度; $\mu_{\beta}$  为  $\beta$  相的动力粘度; $g$  为重力加速度。

2) 连续方程。水-气二相流数值模拟中,仅靠平衡方程不足以求解未知量,还需要借助非饱和土的两个重要的本构方程——土水特征曲线和渗透系数特征曲线<sup>[9]</sup>。土水特征曲线可以采用经典的 VG 模型表示。

图 4 是 VG 模型的典型曲线形式, $S_{ir}$  为残余水相饱和度, $S_{is}$  为饱和水相饱和度。将 VG 模型代入 Y. Mualem 所提出的相对渗透率-饱和度表达式可得到预测渗透系数特征曲线的 VG-M 模型,如图 5 所示。

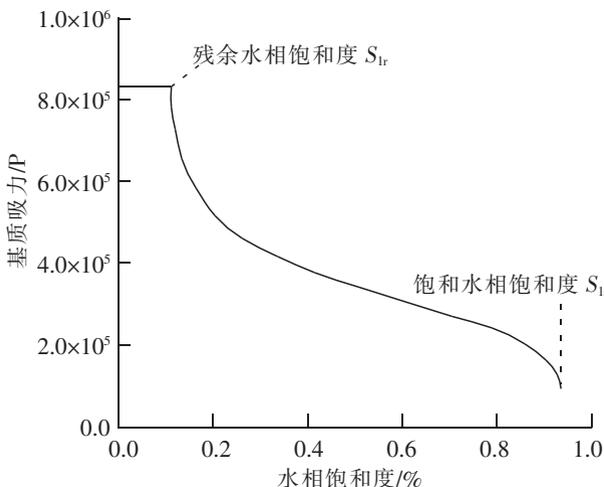


图 4 土水特征曲线

Fig.4 Curve of soil-water characteristics

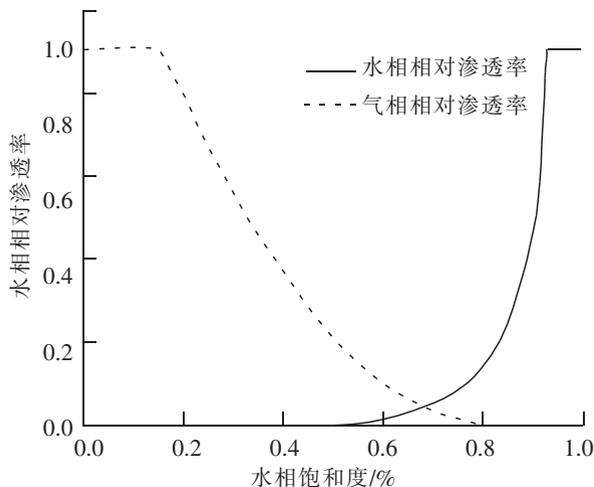


图 5 相对渗透率

Fig.5 The relationship between relative conductivities and saturation



数值模拟方案定为:改变保气层土性,主要以改变固有渗透率  $K$  (取  $10^{-15}, 10^{-13}, 10^{-11}$ , 分别表征黏土、粉土、砂土), 密度, 孔隙率等物理参数也相应改变。

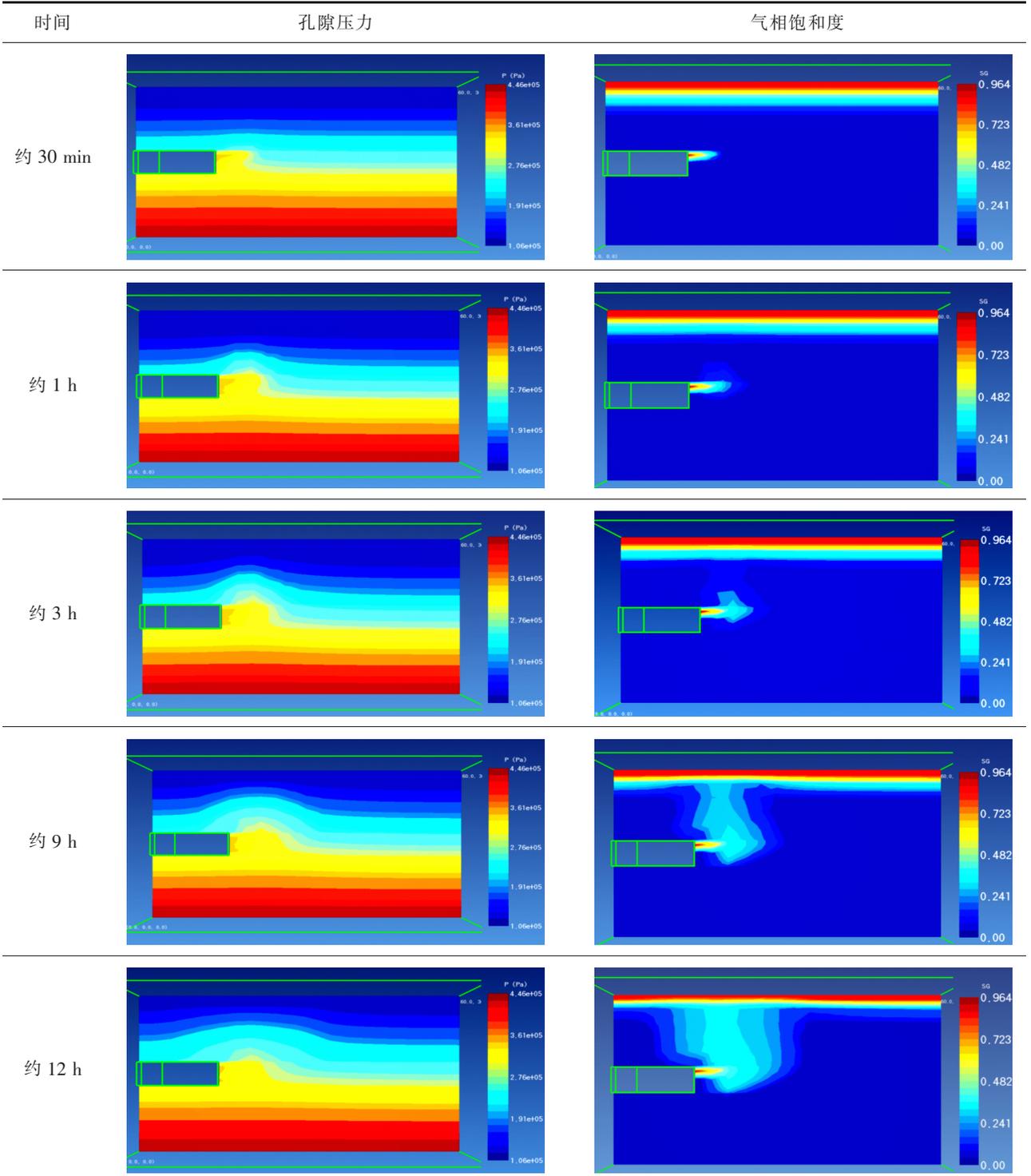
### 2.3 计算结果分析

#### 2.3.1 气液运移分布规律

如表 1 所示, 列举了保气层固有渗透率为  $10^{-13} \text{ m}^2$  时的压气法盾构典型的气-水运移变化特征图。

表 1 孔隙气压随时间变化

Tab.1 Distribution of air pressure and air saturation with the change of time



由表 1 可以总结以下水气运移规律:

1) 压气法盾构施工时,土仓气体会由于超压向远方地层渗透,引起气-水运移和土体气相(液相)饱和度的变化,在地层中形成非饱和区,且非饱和区域随时间逐步发展,直至与地表联通。

2) 当地表联通形成漏斗状稳定渗流通道后,气体主要影响范围在隧道掌子面的前上方,水平影响距离为 3 倍隧道直径,且地下水位线局部发生较为显著的变化。

3) 随着气体往地层中渗流,地层中土体的孔隙气压力逐渐增大,与气相饱和度发展一致,而且在气体与地表连通后,孔隙气压力有分布略微降低和扩散的趋势。

4) 不同渗透性质的保气层时,上述规律存在区别,主要体现在时间和范围的不同上,比如渗透性较好的保气层,地表连通所需时间较短,非饱和区相对较小。此处不一一列举。

### 2.3.2 气体损失与供气量分析

由于对土仓压缩空气采取了固定气压边界,所以可以对土仓中气体单元的气体流量进行统计,从而给现场施工提供供气量建议值。3 种保气层下的土仓进气量变化曲线如图 7~图 9 所示,图 7 为保气层固有渗透率  $10^{-11}$  时土仓一个单元的进气量,乘以气体所占据空间的单元数量,即可得到整个土仓的进气量。

随着气体渗流与地表连通,土仓气压会大幅降低,模型中采用固定气压边界,所以供气量逐渐提升至稳定。按照实际施工 1 天 7~8 环的进度,选择前 3 h 内的供气量平均值为施工建议值。故根据计算结果,建议采用表 2 所示的流量进行施工控制。值得说明的是,由于水气二相流数值模拟未考虑地层变形,实际施工中,尤其是在保气层为砂土时要时刻关注土仓气压变化,及时调整进气量和采取提高渣土高度等措施维持掘进面稳定。而且当固有渗透率达到  $10^{-11} \text{ m}^2$  时,进气量已高达 5 000 L/min,在这种情况下就要权衡是否能继续采取压气法或者考虑其他处理措施。

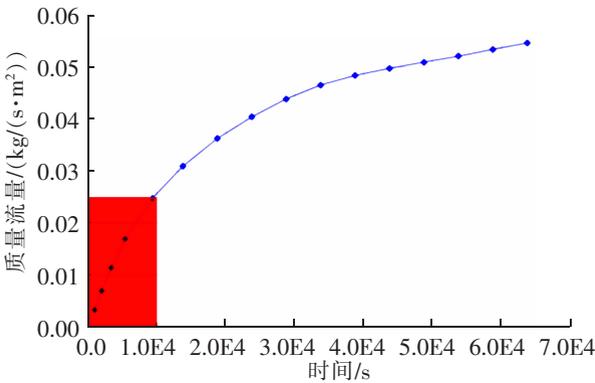


图 7  $K=10^{-11} \text{ m}^2$  时土仓单元气流量

Fig.7 Unit air quantity of flow at head chamber of shield machine when  $K=10^{-11} \text{ m}^2$

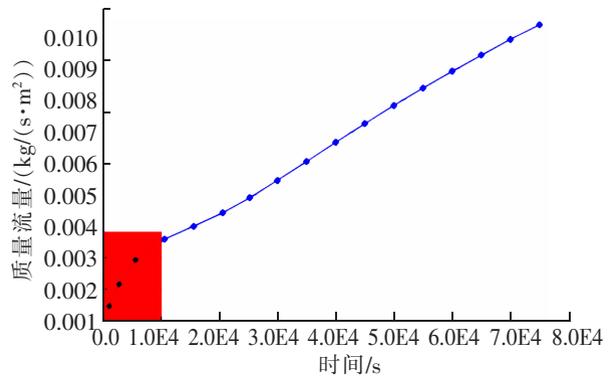


图 8  $K=10^{-13} \text{ m}^2$  时土仓单元气流量

Fig.8 Unit air quantity of flow at head chamber of shield machine when  $K=10^{-13} \text{ m}^2$

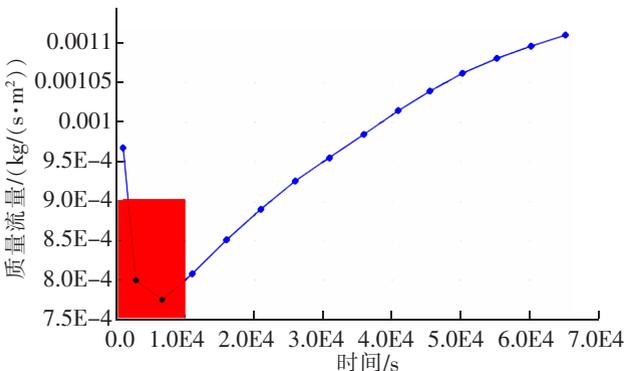


图 9  $K=10^{-15} \text{ m}^2$  时土仓单元气流量

Fig.9 Unit air quantity of flow at head chamber of shield machine when  $K=10^{-15} \text{ m}^2$

表 2 建议的施工供气量

Tab.2 Proposed gas supply during construction

保气层固有渗透率 $K/\text{m}^2$	建议供气量 $Q/(\text{L}/\text{min})$
$10^{-15}$	500
$10^{-13}$	1 500
$10^{-11}$	5 000

2.3.3 与实测数据对比分析与应用

根据某区间的盾构掘进参数,统计每环的空气总流量如图 10 所示。

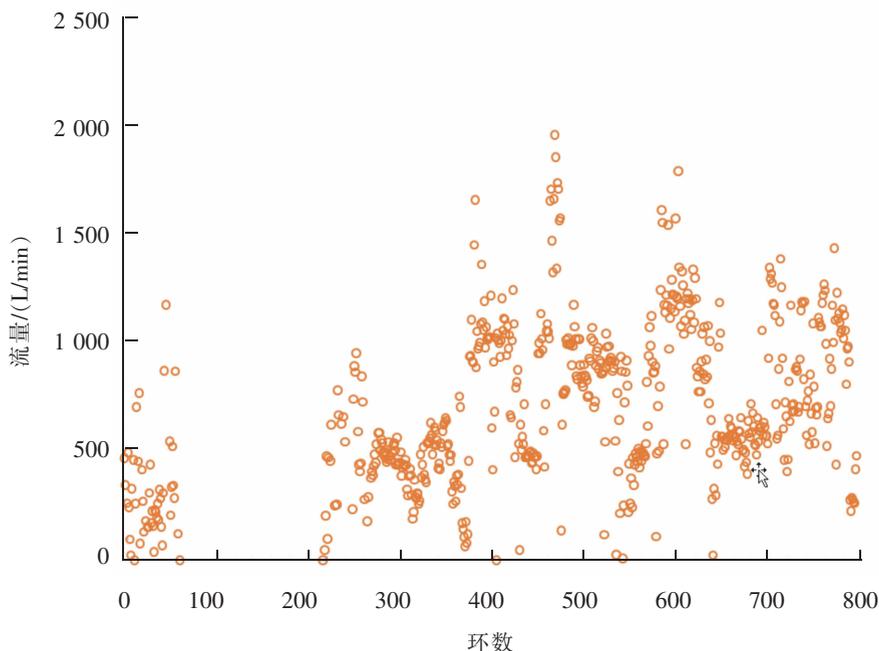


图 10 每环空气总流量  
Fig.10 Total air flow per ring

空气的总流量分布较离散,为 0~2 000 L/min,其中大部分掘进时空气消耗总流量为 400~1 000 L/min。

选取与数值计算模型类似的区段,发现数值计算结果与实际气体流量注入较为吻合。证明了上述计算结果较为可靠。

为了实际运用方便,可以按式(7)将土体固有渗透率  $K$  转化为渗透系数  $k$

$$k = \frac{\rho g}{\mu} K \tag{7}$$

式中: $\rho$  为流体密度,可按纯水取  $1.0 \text{ g/cm}^3$ ;  $g$  为重力加速度;  $\mu$  为流体的动力粘度,与流体种类和环境温度有关,实际施工中可按地层温度取值。若按  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  纯水取  $1.0 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$ 。结合本区间地勘中的渗透系数建议值,参照表 2 给出不同地层作为保气层时建议的供气量,见表 3。

为了进一步应用上述计算结果,将上述计算结果进一步拟合,在类似地层条件时不同土层的建议供气量可用式(8)表达

$$Q = 1\,045.2 e^{0.0007k} \tag{8}$$

式中: $k$  为保气层土体渗透系数,  $10^{-5} \text{ cm/s}$ ;  $Q$  为建议供气量,  $\text{L/min}$ 。

表 3 不同土层建议供气量汇总  
Tab.3 Proposed gas supply during construction in different soil

土层	渗透系数/( $\text{cm/s}$ )	建议供气量/( $\text{L/min}$ )
软塑状粉质粘土 4N-2	$1.16 \times 10^{-5}$	1 000
硬塑花岗岩残积层	$8.9 \times 10^{-4}$	1 300
中粗砂 3-2	$9.3 \times 10^{-3}$	2 000
砾石 3-3	$2.1 \times 10^{-2}$	5 000

### 3 结论

压气法盾构由于涉及到复杂的渗流变形问题,本文暂不考虑渗流变形的耦合作用,忽略土体的变形,采用水气二相流数值方法模拟了盾构施工所引起的地层中气水运移现象,并根据气体损失分析给出了针对实际施工的供气量建议值。可以得出以下主要结论:

1) 压气法盾构掘进考虑气压和土压的共同作用,同时根据土压力传感器量值明确气渣界面的关系,合理控制避免压力判断失误,降低掌子面失稳风险。该模式将土仓内的渣土置换成有一定压力的空气,减少了刀盘背面和搅拌棒与渣土的摩擦,能够一定程度上减少刀盘扭矩。

2) 压气法盾构施工时,土仓气体会由于超压向前方地层渗透,在地层中形成非饱和区且随时间逐步发展,土体的孔隙气压力逐渐增大,直至与地表联通,形成漏斗状渗流通道;且气体主要影响范围在隧道掌子面的前上方,水平影响距离为 $3D$ ;此时地下水位线局部发生较为显著的变化。

3) 将模拟的空气损失量和现场实测分析数据进行对比,验证了模型的合理性。在类似地层条件时不同土层的建议供气量可用公式 $Q=1\ 045.2 e^{0.0007k}$ 表达,即土体渗透系数与渗气量呈指数关系,建议软塑状粉质粘土( $k=1.16\times 10^{-5}$  cm/s)供气量为1 000 L/min,硬塑花岗岩残积层( $k=8.9\times 10^{-4}$  cm/s)供气量为1 300 L/min,中粗砂( $k=9.3\times 10^{-3}$  cm/s)供气量为2 000 L/min。当供气量超过2 000 L/min,由于量值较大不建议采用此模式掘进。

4) 目前关于压气法盾构气压控制的研究匮乏,且涉及渗流和变形耦合使问题变得复杂,以及盾构机土仓渣土的渗气特征尚不明确,而根据现场施工情况,螺旋输送机存在喷气的可能,但目前尚无渣土非饱和和渗透性的描述方法。因此后续计算可以考虑渗流和变形耦合作用,考虑螺旋输送机的喷气行为,建立更加完善的计算模型。

#### 参考文献:

- [1] 刘辉,李仲奎,廖宜,等. 压气新奥法隧道施工中的渗流分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(3):584-589.
- [2] 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):1-8.
- [3] 赵运臣. 压缩空气工法在盾构隧道中的应用及其进展简介[C]//周振国. 中国中铁隧道集团二〇〇七年水底隧道专题技术交流大会论文集,2007.
- [4] HOAD R S, GITTOES G P. Estimation of compressed air losses[C]//Proc Int Conf Engineering and Health in Compressed Air Work, Oxford, UK:Routledge Chapman and Hall Inc, 1992:452-457.
- [5] PECK JAMES G. Finite element modelling of blowouts in compressed air tunnels[D]. Durham:Durham University, 1990.
- [6] JAVADI A A, SNEE C P. The effect of air flow on the shear strength of soil in compressed-air[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001,38(6):1187-1200.
- [7] IHT SCHANZ. Unsaturated soils: numerical and theoretical approaches[M]. Heidelberg:Springer Berlin Heidelberg, 2005:289-304.
- [8] AVIRUT CHINKULKIJNIWAT, 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):105-129.
- [9] 彭尔兴,孙文博,章定文,等. 非饱和含砂细粒土的气体渗透特性研究[J]. 岩土力学,2016,37(5):1301-1306.

# Air Supply Quantity Prediction of Shield Tunnel Using the Compressed Air in Head Chamber

Liu Xunhua<sup>1</sup>, Zhao Yu<sup>2</sup>, Xia Jie<sup>2</sup>

(1. Hongrun Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200232, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Tunneling in completely weathered granite and its residual soil ground with compressed air can prevent seepage of groundwater into the tunnel and improve the stability of tunnel face. However, some problems exist such as the air pressure control in head chamber, and it is necessary to evaluate the rate of air loss with shield method using compressed air. In view of compressed air tunneling for a subway tunnel in Guangzhou, according to the characteristics of gas and soil movement in the soil and considering the strongly nonlinear of air and water conduction function in unsaturated soil, a three-dimensional finite element seepage model of layered homogeneity and isotropic soil was established by using TOUGH2 software. The basic rule of gas and water migration in the stratum with A-EPB shield method was revealed. The research results show that an unsaturated zone has been formed and this zone progressively develops with time until it connects with the surface and forms a funnel shaped steady seepage channel. The calculated air losses are within the range from the field data, which verifies the rationality of this model. Finally, an exponential relationship has been conducted between permeability coefficient of soil and quantity flow of air seepage, and the air injection quantity of different soil layers has been suggested.

**Key words:** shield tunnel; tunneling with compressed air; two-phase flow; numerical simulation