

土压平衡盾构非满舱气压辅助施工螺旋输送机 闭气能力分析

钟小春¹, 余明学², 竺维彬³, 米晋生⁴, 钟长平⁴, 黄威然⁴

(1. 河海大学土木与交通学院, 南京 210098; 2. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 南京 211102;

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

摘要: 针对压缩空气沿着螺旋输送机出口方向逃逸导致难以在压力舱内建立起稳定气压的问题, 基于 Geostudio Air/w 软件建立压缩空气在压力舱-螺旋输送机中的气-水-固耦合计算模型, 分析不同空气压力、渣土性质及盾构压力舱空舱高度下压缩空气对螺旋输送机出口处渗气率的影响。结果表明, 渣土渗水系数和舱内压缩空气压力是影响压力舱内压缩空气逃逸的 2 个主要原因, 渣土改良可以降低渣土渗水系数, 从而提高空气压力。当渣土渗水系数从 $6 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 逐渐降低至 $6 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 压力舱保压能力从 130 kPa 线性增长至 240 kPa; 当渣土渗水系数进一步降低且小于 $4 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 压力舱保压能力可以达到 300 kPa。螺旋输送机的内部构造可有效降低压缩空气的逃逸, 未考虑螺旋输送机结构内部特征时的渗气率是考虑时渗气率的 7 倍以上。

关键词: 土压平衡盾构; 气体逃逸; 击穿时间; 渗气率; 渗水系数

中图分类号: U25

文献标志码: A

Analysis on Air-tightness Capacity of Screw Conveyor Under Non-full Chamber Compressed-air Assisted Construction of Earth Pressure Balance Shield

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

(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: This study focuses on the issue of compressed air pressure escaping along the outlet direction of the

screw conveyor, which makes it difficult to establish a stable air pressure within the pressure chamber. A gas-water-solid coupling calculation model for compressed air in the pressure chamber-screw conveyor system is developed based on Geostudio Air/w. The effect of compressed air under different air pressures, conditioned soil properties, and empty chamber heights of the shield pressure chamber on the air leakage rate at the screw conveyor outlet is analyzed. The results indicate that the conditioned soil water permeability coefficient and compressed air pressure in the chamber are the two main factors affecting the escape of compressed air in the pressure chamber. Soil conditioning can reduce the water permeability coefficient of conditioned soil, thereby increasing the auxiliary air pressure. When the water permeability coefficient is gradually reduced from $6 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ to $6 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the pressure retention capacity increases linearly from 130 kPa to 240 kPa. When the water permeability coefficient is further reduced to less than $4 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the pressure retention capacity of the pressure chamber can reach 300 kPa. The internal structure of the screw conveyor can effectively reduce the escape of compressed air. The air leakage rate without considering the internal structural characteristics of the screw conveyor is seven times more than that when the structural characteristics are taken into account.

Keywords: earth pressure balance shield; gas escaping; piercing time; air leakage rate; water permeability coefficient

采用非满舱掘进时, 注入压力舱内的压缩空气会向地层和螺旋输送机 2 个方向逃逸。如果螺旋输

收稿日期: 2023-09-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52178387)

第一作者: 钟小春, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为土压平衡盾构施工及设计。E-mail: 58206947@qq.com



论文
拓展
介绍

送机排土、保压以及调压功能较差,压缩空气沿着螺旋输送机逃逸时,工程中就会出现先喷水喷泥、后喷气的现象,甚至诱发螺旋输送机出口喷涌的发生^[1-2]。喷涌的发生不仅影响正常施工排土和压力舱压力的控制,还会污染管线、淹没管片,严重时甚至会过多地将开挖面和管片四周的土、砂带出,造成地表沉降、塌陷、管片漏水等施工事故^[3]。因此,研究非满舱掘进时螺旋输送机的闭气能力,对提高施工安全性和效率是很有必要的。

对于螺旋输送机喷涌的相关原因,国内外学者认为主要与地下水和被切削下来土体的流动性、渗水系数、含水率等参数有关。这些参数会影响渣土的输送效率以及盾构机的掘进速度和稳定性^[4-5]。王默^[6]基于计算流体力学(CFD)方法建立了盾构螺旋输送机出渣过程中泥浆流动数值模型,并对不同工况下的喷涌现象进行了模拟和分析,为优化螺旋输送机设计提供了理论依据。陈彦超^[7]研究了螺旋输送机内双组份颗粒的运移规律,分析了螺旋转速、填充系数等因素对颗粒输送效率的影响,并利用离散元方法建立了数值模型以进行仿真验证。韩锋^[8]建立了水压力传递理论模型,通过改变水土参数分析了影响喷涌变量的因素及发生喷涌的机理。黄辉等^[9]以某盾构螺旋输送机喷涌案例为背景,系统阐述了富水砂层喷涌的原因,提出了一套针对螺旋输送机喷涌事故的险情处治方案。孙金鑫等^[10]在考虑非饱和土内的水、气渗透系数随饱和度变化的基础上,通过数值模拟和工程实例分析了开舱气压、泥膜厚度和泥膜干裂等因素对泥膜闭气能力的影响。Zhong等^[11]基于CFD方法模拟了土压平衡盾构隧道施工过程中渣土在满舱时螺旋输送机的动态特性,分析了渣土的速度和压力分布。Zhao等^[12]、Shao等^[13]基于离散元方法,分析了不同盾构机参数(如刀盘转速、螺旋输送机转速、推进速度等)对开挖面稳定性和土舱压力的影响。

已有研究主要集中于水压力作用下渣土在螺旋输送机内部的运移及喷涌上,而压力舱内压缩空气向螺旋输送机逃逸相关研究较少。若切削下来的渣土渗气性较好,则压力舱内压缩空气沿着螺旋输送机向外排出,当压力舱内压缩空气的渗气率大于空气机所能补充的进气量时,压力舱内开挖面的支护压力无法稳定,进一步诱发开挖面失稳。为此,探讨了不同性质改良渣土下的螺旋输送机闭气能力,以指导压气辅助施工下土压平衡盾构渣土改良。

1 压力舱-螺旋输送机数值模型建立

1.1 材料性质参数的确定

1.1.1 土-水特征曲线

土-水特征曲线能够解释非饱和土力学特性。根据滤纸与被测土之间水分达到平衡时含水率与吸力之间的关系,间接测出被测土样之间的基质吸力^[14-15]。中砂、细砂、粉土、粉质黏土、黏土和砂砾6种渣土的土-水特征曲线如图1所示。

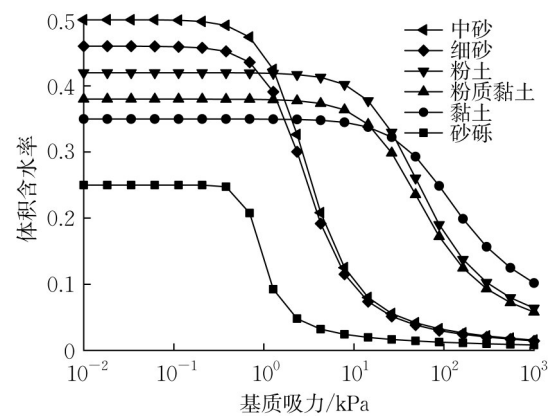


图1 渣土的土-水特征曲线

Fig.1 Water-soil characteristics curves of conditioned soil

1.1.2 渗水系数

土的渗气率不仅能描述非饱和土孔隙和结构特征,还能用于预测土的渗水系数 k_w ^[16]。根据Mualem中对非饱和土的经验计算模型^[17],得到了6种不同土体的渗水系数曲线,如图2所示。

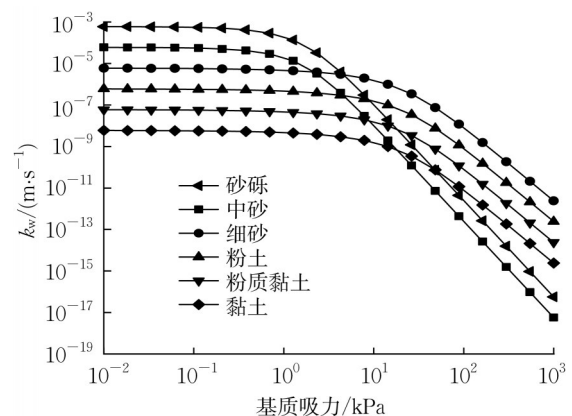


图2 渣土渗水系数曲线

Fig.2 Water permeability coefficient curves of conditioned soil

1.1.3 渗气系数

假设饱和土与干土孔隙结构保持不变,渗水系

数与动力黏滞系数呈反比。在绝对压力 101.3 kPa 及 20 °C 下,气体的动力黏滞系数为 $1.785 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,水的动力粘滞系数为 $1.009 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。根据 Brooks 和 Corey 提出的渗气系数 k_a 与饱和度的关系,绘制中砂、细砂、粉土、粉质黏土、黏土和砂砾 6 种渣土渗气系数与饱和度的关系曲线,如图 3 所示。渗气系数与饱和度的关系为:

$$\begin{cases} k_a = k_d(1 - S_e)^2(1 - S_e^{(2+\lambda)/\lambda}), & p_a - p_w > a_{ev} \\ k_a = 0, & p_a - p_w \leq a_{ev} \end{cases} \quad (1)$$

式中: k_d 为干土渗气系数; λ 为常数 2.3; p_a, p_w 分别为孔隙气压力、孔隙水压力; a_{ev} 为进气值; S_e 为有效饱和度, $S_e = 1/((1 + ah)^n)^m$,其中 α, m, n 为由 Van Genuchten 提出的 SWCC 公式参数,根据土-水特征曲线可知, $\alpha = 0.00429, n = 2.21302, m = 1 - 1/n = 0.54813$ 。

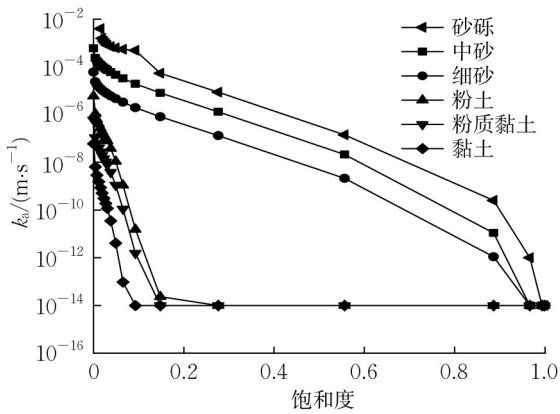


图3 渣土渗气系数曲线

Fig.3 Gas permeability coefficient curves of conditioned soil

1.2 数值模型建立

螺旋输送机具有排放渣土、保压调压、稳定开挖面和控制地表沉降或隆起的功能。以有中心轴的螺旋输送机为例,土压平衡盾构螺旋输送机构造如图 4 所示。螺旋输送机长度为 L ,螺距为 s ,螺机外套内缘至中心轴外缘的距离为 t ,中心轴直径为 D_1 ,外套筒内径为 D_2 。螺旋输送机排土断面实际上为矩形断面,将其沿螺旋输送机断面螺旋展开,得到长条形长方体(见图 5),其长度远大于螺旋输送机长度,计算式为

$$L_R = \left(\frac{L}{s}\right) \left\{ \left[\pi \left(\frac{D_1 + D_2}{2} \right)^2 + s^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (2)$$

式中: L 为螺旋输送机长度,取值 11.235 m; L_R 为螺

旋输送机展开后长度,取值 30.181 m。

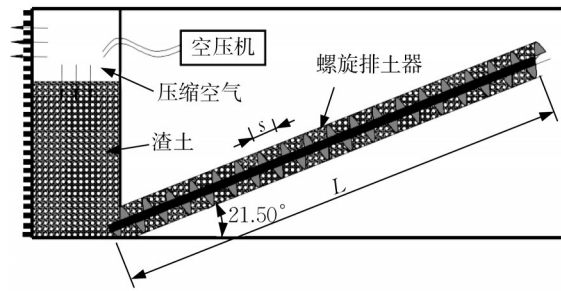


图4 土压平衡盾构螺旋输送机构造

Fig.4 Structure of screw conveyor of earth pressure balance shield

在 Geostudio 中建立二维压力舱-螺旋输送机模型。为了便于研究压缩空气沿排土路径向螺旋输送机出口处的逃逸情况,按照外周长等效原则将螺旋输送机内排土的螺旋断面等效为 257 mm × 1 000 mm 的矩形截面。根据出渣口高度保持不变的原则,螺旋输送机与隧道纵向的角度由 21.5° 变为 7.84°。等效后的排土截面可以采用如图 5 所示的矩形截面表示。

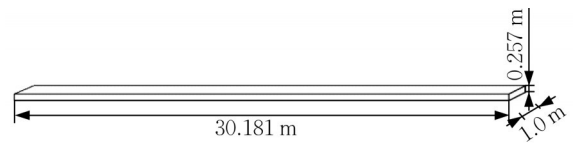


图5 等效后的排土截面

Fig.5 Equivalent drainage section

1.2.1 模型尺寸

压力舱-螺旋输送机计算模型尺寸如图 6 所示。盾构开挖直径为 6.0 m,压力舱宽度为 0.6 m,螺旋输送机断面展开后的矩形长度为 30.181 m;二维模型单元厚度为 1.0 m,模型全局单元尺寸为 0.05 m,全局共划分 4 987 个节点,4 220 个单元,由区域 1(渣土层)和区域 2(压力舱空舱)组成。

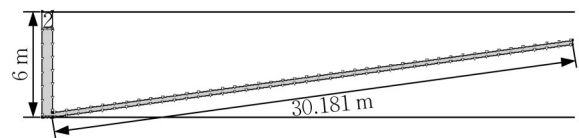


图6 土压平衡盾构螺旋输送机断面展开模型

Fig.6 Expanded screw conveyor model for earth pressure balance shield

1.2.2 边界条件

在压力舱空舱部分四周设置固定大小的气压边界值,在压力舱空舱部分与压力舱堆土界面上的总

水头设定为 0 m 的水力边界条件,螺旋输送机出口气压设定为 0 MPa。其他边界考虑不透水边界。

2 螺旋输送机出口处压缩空气逃逸过程计算分析

2.1 分析步骤

数值分析流程基本步骤如下:

(1) 设定压力舱-螺旋输送机以及填充其中的渣土材料。

(2) 在压力舱上半部空舱位置设置零水压,进行稳态渗流计算。

(3) 在压力舱上半部空舱位置设置某一空气压力,进行流固耦合的瞬态分析,持续时长 0.5 d,时间增量 300 s。计算工况见表 1,每种工况只考虑一种影响因素的变化。

表 1 计算工况

Tab.1 Calculation conditions

渣土类型	渗水系数/ ($m \cdot s^{-1}$)	压力舱空仓 高度/m	压缩空气压力/kPa
砂砾	6×10^{-4}	1,2,3,4	50,100,150,200,250,300
中砂	6×10^{-5}	1,2,3,4	50,100,150,200,250,300
细砂	6×10^{-6}	1,2,3,4	50,100,150,200,250,300
粉土	6×10^{-7}	1,2,3,4	50,100,150,200,250,300
粉质黏土	6×10^{-8}	1,2,3,4	50,100,150,200,250,300
黏土	6×10^{-9}	1,2,3,4	50,100,150,200,250,300

考虑正常盾构隧道每 1 h 掘进 1 环(环宽 1.5 m),土方的松土系数取 1.2。掘进 1 环所产生的渣土土方量为 $55.75 m^3$,压力舱满舱和螺旋输送机内总土方量为 $26.34 m^3$,所以土压平衡掘进时渣土在压力舱-螺旋输送机中的停留时长为: $60 / (55.75 / 26.34) = 28 \text{ min}$ 。下文以压缩空气渗透 28 min 分析渗气率,判断不同改良渣土下沿着螺旋输送机排土方向的闭气效果。

2.2 基本工况分析过程

选取掘进时渣土类型细砂(渗水系数 $6 \times 10^{-6} m \cdot s^{-1}$)、初始体积含水率 0.5、盾构压力舱空仓高度 1 m、压缩空气压力 100 kPa 为基本工况。不同时刻压力舱-螺旋输送机内压缩空气对渣土体积含水率影响的等值线如图 7 所示。

随着时间的推移,压缩空气将渣土中孔隙水逐渐排出,越靠近螺旋输送机出口处,渣土的体积含水率越低。螺旋输送机出口处渗气率随时间的变化如图 8 所示。对于渗水系数 $6 \times 10^{-6} m \cdot s^{-1}$ 的渣土,在压缩空气作用下,从 15 min 至 20 min 时,压力舱-螺

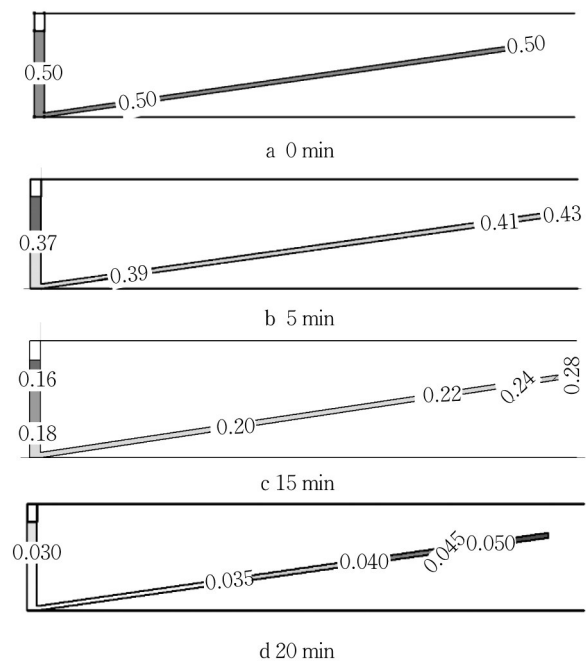


图 7 不同时刻细砂中体积含水率的等值线

Fig.7 Contour map of volumetric water content in fine sand at different times

旋输送机内的渣土体积含水率降低到 5% 以下,渗气率从 $0.194 m^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 增大到 $3.53 m^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 。由此可以判断,压缩空气已击穿压力舱-螺旋输送机内的渣土。

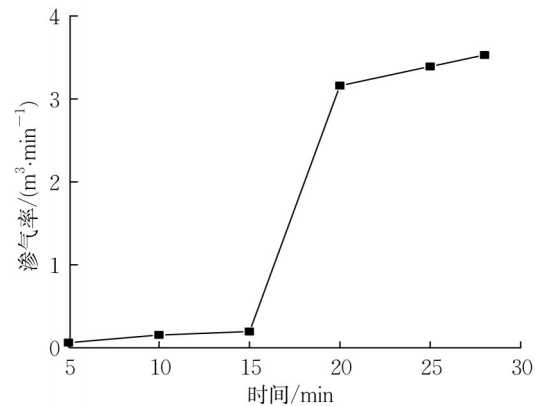


图 8 不同时刻的渗气率

Fig.8 Air leakage rate at different times

3 螺旋输送机出口处压缩空气逃逸量

盾构机通常配备 2 台空压机,考虑设备的富余量,将 1 台空压机的产气量作为气压辅助工法的补气量,即以渗气率 $4.8 m^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 作为螺旋输送机完全丧失闭气能力时的界限。

3.1 盾构压力舱空舱高度对渗气率的影响

如图9所示,压力舱空舱高度的增加对螺旋输送机出口处渗气率的影响较小,随着压力舱空舱高度的改变,相同渗水系数下渣土渗气率几乎是一条平缓的直线,即螺旋输送机出口处的渗气率基本没有变化。这可能是螺旋输送机排土的路径长度相比于压力舱内渣土高度相差较大,压缩空气的渗流路径较长,压力舱内渣土高度占整个渗流路径的百分比比较小。

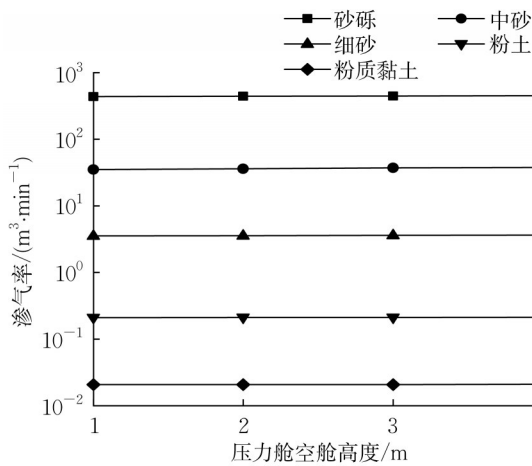


图9 不同压力舱空舱高度下螺旋输送机出口处的渗气率(舱内压缩空气气压为100 kPa)

Fig.9 Air leakage rate at the outlet of screw conveyor under different pressure chamber heights(The compressed air pressure inside the chamber is 100 kPa)

3.2 渣土渗水系数对渗气率的影响

在空舱高度3 m下,探究不同渣土的渗水系数对螺旋输送机出口处渗气率的影响,如图10所示。

随着渣土渗水系数的增大,渗气率几乎呈线性增长,渗水系数增大是导致压缩空气从螺旋输送机发生逃逸的主要原因。以压力舱内压缩空气压力100 kPa为例,当渣土渗水系数 $<8 \times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,螺旋输送机渗气率 $<4.8 \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$,此时螺旋输送机闭气能力较好;当渣土渗水系数 $\geq 8 \times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 且 $<2 \times 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,螺旋输送机渗气率接近 $4.8 \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$,此时可通过控制螺旋输送机出口阀门开口大小达到控制排土量的目的,同时应加强监控;当渣土渗水系数 $\geq 2 \times 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,螺旋输送机出口处渗气率 $>4.8 \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ 。为了减小螺旋输送机渗气率,应当对土舱内的渣土进行改良或降低土舱内空气压力,并适当降低盾构机的掘进速度,尽快降低渣土渗水系数。

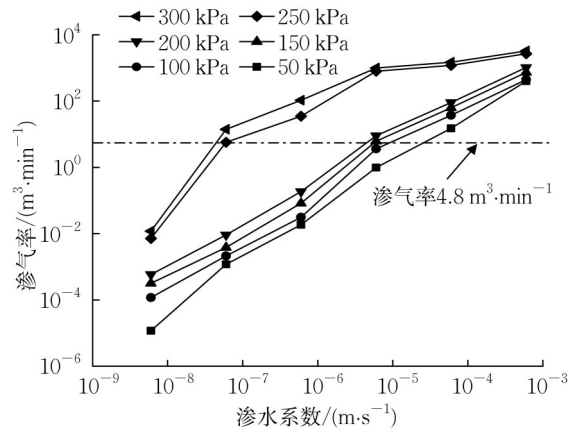


图10 不同渗水系数下螺旋输送机出口处的渗气率
Fig.10 Air leakage rate at the outlet of screw conveyor under different water permeability coefficients of conditioned soil

3.3 压缩空气压力对渣土击穿时间的影响

渗气率随渗水系数和舱内空气压力的改变有突然增大的情形,以压力舱-螺旋输送机内渣土体积含水率低于5%为压缩空气击穿渣土、形成空气逃逸通道的标准,在压力舱空舱高度3 m时,探讨不同压缩空气压力下击穿时间与渣土渗水系数的关系。

渣土渗水系数越大,压缩空气击穿渣土所需的时长越短,舱内压缩空气气压的提高也会减小压缩空气在压力舱-螺旋输送机内部形成通道所需要的击穿时间,如图11所示。

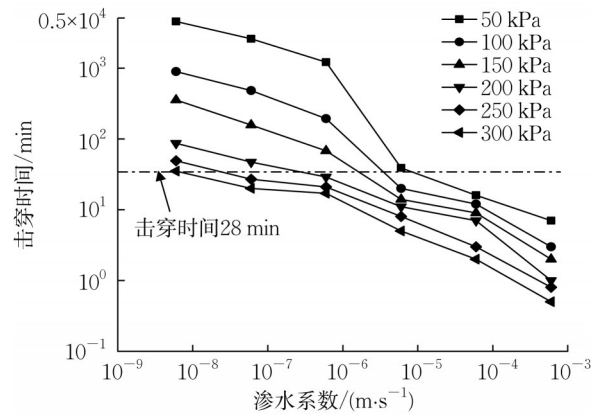


图11 击穿时间与渣土渗水系数之间的关系
Fig.11 Relationship between breakdown time and water permeability coefficient of conditioned soil

以渣土在压力舱-螺旋输送机内存在的时间28 min为标准,当渗水系数大于 $6 \times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 或舱内空气压力在250 kPa以上时,击穿时间均小于28 min;当舱内空气压力为300、250、200、150、100、50

kPa时,在 28 min 内压缩空气击穿渣土所对应的最小渗水系数为 2×10^{-8} 、 1×10^{-7} 、 1×10^{-6} 、 4×10^{-6} 、 8×10^{-6} 、 $2 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,即渗水系数小于 $2 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的渣土有较好的保压能力。

3.4 压缩空气压力对渗气率的影响

考虑到空舱高度对渗气率的影响较小,选取空舱高度 3 m,探讨不同渗水系数下舱内压缩空气压力与渗气率的关系,如图 12 所示。

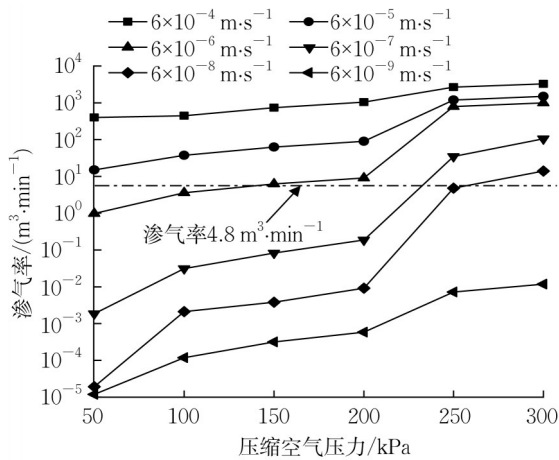


图 12 不同渗水系数下压缩空气压力与渗气率的关系

Fig.12 Relationship between compressed air pressure and air leakage rate under different water permeability coefficients

当渣土渗水系数小于 $6 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,在压缩空气压力 220 kPa 以内螺旋输送机具有良好的闭气能力;当渣土渗水系数增大到 $6 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,为了减少压缩空气逸量,舱内空气压力应控制在 130 kPa 以内;当渣土渗水系数大于 $6 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,压缩空气在渣土中的逃逸能力变强。为了防止渗气率过大,应该对渣土进行改良,降低渣土渗水系数。

当舱内压缩空气压力进一步增大超过 250 kPa 时,渗气率明显陡增,原因是空气压力增大,导致渣土饱和度和体积含水率降低,渣土渗水系数增大,特别对于渗水系数 $6 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $6 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的影响较为明显。结合图 11 中压缩空气对渣土的击穿时间,从 200 kPa 上升为 250 kPa 时,逃逸通道形成时间下降至 28 min 内,即 250 kPa 时压缩空气已击穿渣土内部,压缩空气在渣土内部形成逃逸通道。工程中应密切注意舱内压缩空气压力的变化以及是否形成了贯通的渗气通道。

3.5 螺旋输送机长度对渗气率的影响

螺旋输送机未展开工况考虑 0、7.500、11.235 m 3 种情况,展开后的螺旋输送机渣土排放长度考虑

0、7.500、11.235、15.000、22.500、30.000 m 6 种情况。以细砂渣土(渗水系数 $6 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)为例,选取空舱高度 1 m 探讨螺旋输送机长度对渗气率的影响,如图 13 所示。

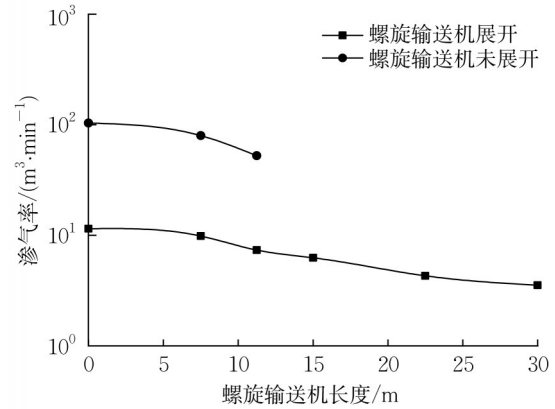


图 13 螺旋输送机长度对渗气率的影响(压缩空气压力 100 kPa)

Fig.13 Effect of screw conveyor length on air leakage rate (The compressed air pressure inside the chamber is 100 kPa)

可以看出,螺旋输送机未展开时的渗气率是展开时的 7 倍以上,由螺旋输送机截面积和长度的改变造成的。渗气率随螺旋输送机长度增长为一条下凹的曲线,这说明随着螺旋输送机长度的增加,压缩空气逸量减小,闭气能力增强。

4 气压辅助工法对压力舱-螺旋输送机的适应情况探讨

从以上螺旋输送机对压缩空气逸量的影响因素分析可以看出,舱内压缩空气压力和渣土渗水系数是影响渗气率变化的 2 个主要因素。在空舱高度 3 m 时,螺旋输送机渗气率与渣土渗水系数和舱内空气压力的关系如图 14 所示。

以 1 台空压机渗气率 $4.8 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 为判断螺旋输送机丧失闭气能力的标准,为了便于在工程中根据渣土的特性选取合适的舱内压缩空气压力,提取渗气率 $4.8 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 时舱内压缩空气压力与渗水系数之间的关系,如图 15 所示。

拟合渗气率 $4.8 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 时舱内压缩空气压力 y 与渗水系数 x 之间的关系:

$$y = 2.19e^{16}x^3 - 1.91e^7x + 530.23 \quad (3)$$

施工中可根据渣土渗水系数计算出可维持舱内压缩空气压力稳定的上限值。在渗水系数小于 $2 \times$

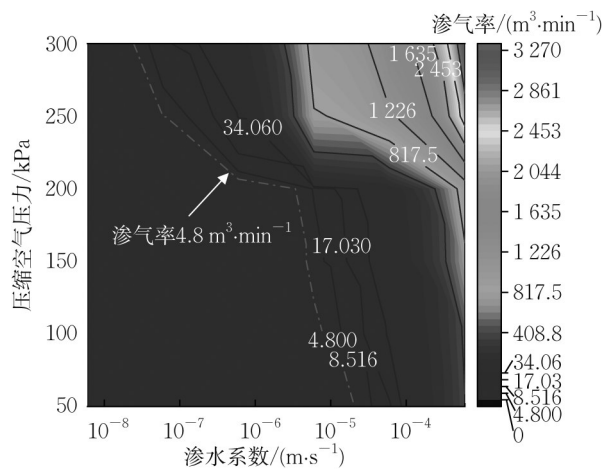


图14 渗气率与渗水系数和压缩空气压力的关系

Fig.14 Relationship between air leakage rate and water permeability coefficient and compressed air pressure

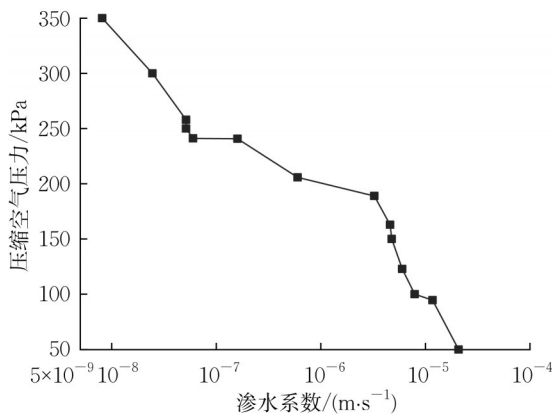


图15 渗气率 4.8 m³·min⁻¹时压缩空气压力与渗水系数的关系

Fig.15 Relationship between compressed air pressure and water permeability coefficient when the air leakage rate is 4.8 m³·min⁻¹

$10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,舱内压缩空气压力最大超过 250 kPa,压力舱内闭气能力强,此时 28 min 内压缩空气未击穿螺旋输送机内渣土,压力舱保压性能高,气压辅助工法有较好的适应性。在渗水系数小于 $6 \times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,随着渗水系数的增大,压力舱的保压能力逐渐降低,保压能力在渗水系数 $4 \times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时下降到 180 kPa。在渗水系数大于 $6 \times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,渗水系数的增大导致压缩空气击穿渣土通道所需的时间减少,压缩空气发生快速逃逸,压力舱对压缩空气的保压能力急剧降低,压力舱-螺旋输送机的保压能力差,此时气压辅助工法难以直接应用,应对掘进中的渣土进行改良,降低渣土渗水系数,加以评估后使用。

5 结论

(1) 降低渣土渗水系数,有利于采用气压辅助工法时压力舱内压缩空气压力的稳定。当渣土渗水系数大于 $6 \times 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,渗气率大于 $4.8 \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$,压力舱保压能力差;当渣土渗水系数小于 $2 \times 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,压力舱保压能力较好;当渣土渗水系数为 6×10^{-6} 、 6×10^{-7} 、 $6 \times 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,压力舱保压能力最大分别为 130、220、240 kPa。施工中应密切关注舱内压缩空气压力与渣土性质的变化。

(2) 降低渣土渗水系数,在采用气压辅助工法时有利于降低压缩空气击穿螺旋输送机的风险,有效防止喷发。当渗水系数大于 $6 \times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 或舱内压缩空气压力在 250 kPa 以上时,压缩空气击穿渣土时间均小于 28 min;当舱内压缩空气压力为 300、250、200、150、100、50 kPa 时,在 28 min 内舱内压缩空气击穿渣土所对应的最小渗水系数为 2×10^{-8} 、 1×10^{-7} 、 1×10^{-6} 、 4×10^{-6} 、 8×10^{-6} 、 $2 \times 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(3) 未考虑螺旋输送机结构内部特征时的渗气率是考虑时的 7 倍以上,螺旋输送机的结构特征及排土特性对渗气率有重要影响。为了更好地发挥螺旋输送机的保压性能,可将渣土改良到流塑状态,使渣土填充整个螺旋输送机内部的排土路径,让螺旋输送机对压缩空气的栓塞效应得以有效发挥。

(4) 压力舱空舱高度对螺旋输送机出口处渗气的发生有一定的影响,但不是特别明显。

作者贡献声明:

- 钟小春:论文框架指导,论文修改。
- 余明学:有限元模型建立,数据处理,论文撰写。
- 竺维彬:技术支持,现场施工指导。
- 米晋生:技术支持,论文校审。
- 钟长平:调研并参与论文的修改。
- 黄威然:国内外研究现状调研。

参考文献:

[1] 米仕鹏. 变螺距螺旋输送机的土塞承压研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(4): 119.
MI Shipeng. Research on soil plug pressure-bearing characteristics of screw conveyor with variable pitch [J]. Modern Tunnel Technology, 2020, 57(4): 119.

[2] 郭朝斌, 张可倪, 李采. 压缩空气含水层储能系统设计及可行性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(7): 1107.
GUO Chaobin, ZHANG Keni, LI Cai. Subsurface system design and feasibility analysis of compressed air energy storage in aquifers[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),

- 2016, 44(7): 1107.
- [3] 朱伟, 陈仁俊. 盾构隧道施工技术现状及展望(第2讲): 盾构隧道技术问题和施工管理[J]. 岩土工程界, 2001(12): 14.
ZHU Wei, CHEN Renjun. Present situation and prospect of shield tunnel construction technology (lecture 2): technical problems and construction management of shield tunnel [J]. Geotechnical Engineering World, 2001(12): 14.
- [4] 刘琦. 富水砂层地铁施工的土压平衡式盾构机喷涌控制技术[J]. 中国设备工程, 2019(8): 174.
LIU Qi. Spewing control technology of earth pressure balance shield machine for subway construction in water-rich sand layer [J]. China Equipment Engineering, 2019(8): 174.
- [5] 万泽恩. 富水无黏性地层盾构喷涌防治机理与渣土运移规律研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
WAN Zeen. Spewing prevention mechanism and soil migration for shield tunneling in water-rich cohesionless stratum [D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [6] 王默. 基于离散元的盾构螺旋输送机输送机理及其特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
WANG Mo. Study on conveying mechanism and characteristics of shield screw conveyor based on discrete element [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [7] 陈彦超. 基于DEM螺旋输送机内颗粒运移规律研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
CHEN Yanchao. Simulation study on movement characteristics of particle in screw conveyor based on DEM [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2018.
- [8] 韩锋. 含砾砂土地层中土压平衡盾构施工喷涌发生的主要原因分析及防治措施[J]. 福建建材, 2016(5): 84.
HAN Feng. Major cause analysis and prevention measures of gushing in earth pressure balance shield construction in gravelly sand stratum [J]. Fujian Building Materials, 2016(5): 84.
- [9] 黄辉, 汤勇茂, 曹赛赛. 富水砂层土压盾构螺旋输送机喷涌处治技术[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(4): 234.
HUANG Hui, TANG Yongmao, CAO Saisai. Treatment technology for water and sand gushing of the screw conveyor in the earth pressure balance shield machine in water-bearing sand strata [J]. Modern Tunnel Technology, 2022, 59(4): 234.
- [10] 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]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(2): 445.
- [11] ZHONG Jiazheng, WANG Shuhua, LIU Pengfei, *et al.* Investigation of the dynamic characteristics of muck during EPB shield tunnelling in a full chamber model using a CFD method [J]. KSCE Journal of Civil Engineering and Building Materials, 2022, 25(9): 4103.
- [12] ZHAO Dongping, WANG Luwei, ZHANG Baihao, *et al.* Study on launch tunnelling parameters of a shield tunnel buried in pebble soil with existing pipelines base on discrete continuous coupling numerical method [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 129: 104629.
- [13] SHAO Xiaokang, YANG Zhiyong, JIANG Yusheng, *et al.* Coupled FDM-DEM method for analyzing EPBS machine tunneling performance in boulders [J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(12): 04022239.
- [14] 张兴胜, 林先俊. 非饱和土基质吸力量测试研究及探讨[J]. 路基工程, 2011(2): 17.
ZHANG Xingsheng, LIN Xianjun. Study and discussion on measurement test of unsaturated soil matric suction [J]. Subgrade Engineering, 2011(2): 17.
- [15] WEN Tiande, SHAO Longtan, GUO Xiaoxia. Effect of hysteresis on hydraulic properties of soils under multiple drying and wetting cycles [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2021, 25(10): 1750.
- [16] 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 Jinyang, LI Xi'an, 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.
- [17] FANG S, SHEN P, QI X, *et al.* The distribution of Van Genuchten model parameters on soil-water characteristic curves in Chinese Loess Plateau and new predicting method on unsaturated permeability coefficient of loess [J]. PLOS One, 2023, 18(1): e0278307.