

大直径隧道掘进泥水盾构机泥浆管路流动特性分析^①

徐梁¹, 王海涛², 孙九春², 贾浩¹, 宿向辉¹, 奚晓广²

(1.浙江理工大学 流体传输系统技术国家地方联合工程实验室, 浙江 杭州 310018; 2.腾达建设集团股份有限公司, 上海 200122)

摘要: 为研究大直径泥水盾构机泥浆管路的流量、压力分布,采用 Simcenter Flomaster 软件对泥水盾构机泥浆管路进行仿真计算,建立一维泥水盾构机泥浆管路模型,并通过改变阀门开度、流体密度及泵的转速,记录管路流量及压力分布情况,从而得到最佳流量分配。模拟计算结果表明:阀门开度、流体密度和泵的转速对泥浆管路系统流量、压力分布具有一定影响;阀门开度增大时,管路流量增加,泵两端压力差减少;流体由清水变为泥浆时,管路流量增加,泵两端压力差增加;泵转速降低时,管路流量减少,泵两端压力差减少;排浆泵转速过低时,可通过增大排浆泵转速或串联 1 台泵来保证排浆管路正常工作。

关键词: 隧道施工; 刀盘结泥饼; 管道堵塞; 大直径隧道; 泥水盾构机; 管道输送; 泥浆管路; 流动特性; 阀门开度; 泵输送; 管路系统

中图分类号: U455

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2024.06.004

文章编号: 0253-6099(2024)06-0016-07

Analysis of Flow Characteristics of Slurry Pipeline of Large-Diameter Tunneling Shield

XU Liang¹, WANG Haitao², SUN Jiuchun², JIA Hao¹, SU Xianghui¹, XI Xiaoguang²

(1. National and Local Joint Laboratory of Fluid Transfer Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China; 2. Tengda Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200122, China)

Abstract: To study the distribution of flow and pressure in the slurry pipeline of large-diameter slurry shield, Simcenter Flomaster was used to simulate the slurry pipe for calculation, and a one-dimensional model was established for the slurry pipe of large-diameter slurry shield. The distribution of flow and pressure in the pipeline under different working conditions by changing the valve opening degree, fluid density and rotating rate of pump were recorded, so as to obtain the optimal flow distribution. The calculation results show that valve opening degree, fluid density and rotating rate of pump all have a certain influence on the distribution of flow and pressure in the slurry pipeline system. By increasing valve opening degree, the flow rate in the pipeline increases and the pressure difference between two ends of the pump is reduced; as the fluid is changed from clear water to slurry, the flow rate in the pipeline increases and the pressure difference between two ends of the pump decreases; as the pump rotates at a lower rate, both the flow rate and the pressure difference are reduced. If the rotating rate of discharging pump is too low, the discharging pipe can be kept operating normally by increasing the rotating rate of the discharging pump or adding another pump in series.

Key words: tunnel construction; cutting head clogging; clogging of pipe; large diameter tunnel; slurry shield; pipeline transportation; slurry pipeline; flow characteristics; valve opening degree; pump transportation; pipeline system

近年来,大直径隧道工程越来越多,在含水量高的复杂地层中,常常选用泥水盾构机进行掘进施工^[1-2]。在穿越复杂地层过程中,受土质、施工等因素影响,渣土颗粒聚集并大量黏附于泥水盾构机刀

盘中心表面,形成泥饼。部分大颗粒以及从刀盘上被冲刷下来的土块也会在破碎机、泥浆门和格栅区域不断堆积,堵塞管路^[3-5]。因此,需要对刀盘、泥浆门和格栅区域进行冲刷,防止颗粒堆积导致结泥和

① 收稿日期: 2024-05-30

基金项目: 浙江省重点研发计划(2022C01168)

作者简介: 徐梁(1998—),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事固液两相流方面的研究。E-mail: m15895226845@163.com

通信作者: 贾浩(1988—),男,山西太原人,博士,副教授,主要从事固液两相流的方面研究。E-mail: jiahao@zstu.edu.cn

堵塞。

许多学者^[6-11]对泥水盾构机结泥、堵塞问题进行了相关研究,但这些研究大多从地层、冲刷系统等方面着手,而针对泥水盾构机泥浆管路的研究较少。泥浆管路系统的正常运行对泥水盾构机的安全高效掘进至关重要^[12]。为了解决泥水盾构机结泥和堵塞的问题,除了需要考虑冲刷系统的设计和优化,还需要对泥浆管路系统中的各个参数进行调整,在确保冲刷系统性能的情况下,保证各管路的流动特性满足冲刷系统的需要。因此,本文采用流体仿真软件 Simcenter Flomater 2021.1 对泥水盾构机泥浆管路流量及节点压力进行研究。与三维计算侧重于研究部件的性能不同,一维管路计算侧重于管路整体的研究,可充分计算和分析含有泵、阀及各种节流部件的复杂管路系统的流动特性。通过分析泥水盾构机泥浆管路的流量和压力随外界条件的变化规律,为合理分配盾构机各冲刷管路压力、流量,缓解堵塞问题提供参考。

1 泥水盾构机泥浆管路系统搭建

以某管廊及道路提升工程为背景,采用仿真软件 Simcenter Flomater 2021.1 对泥水盾构机泥浆管路开展流动特性研究。

大直径泥水盾构机模型如图 1 所示,泥水盾构机主要由刀盘、泥水舱、破碎机、气压舱、泥浆管路、推进液压缸和管片拼装机等组成。其中泥浆管路系统简图及舱体内部冲刷系统分别如图 2 和图 3 所示。泥浆管路的主要工作流程为:进浆泵将稀浆从泥浆池输送到泥水舱,在泥水舱内,由进浆泵输入的稀浆起到稳定开挖面的作用,同时稀浆可以对仓体内部的被动搅拌棒、刀盘中心、泥浆门、破碎机和格栅等区域进行冲刷。之后,用于冲刷的稀浆与刀盘切削产生的渣土在泥水舱内混合,经排浆泵输送至泥水处理设备对混合液中的渣土进行沉淀和处理,去除杂质的混合液重新变回稀浆并重新进入泥浆池进行循环利用。

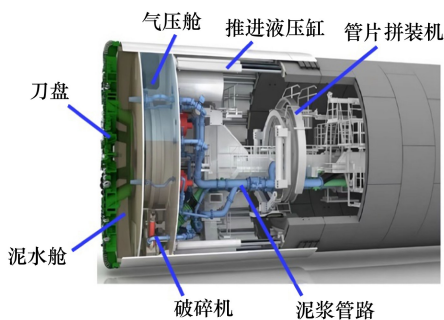


图 1 大直径泥水盾构机模型

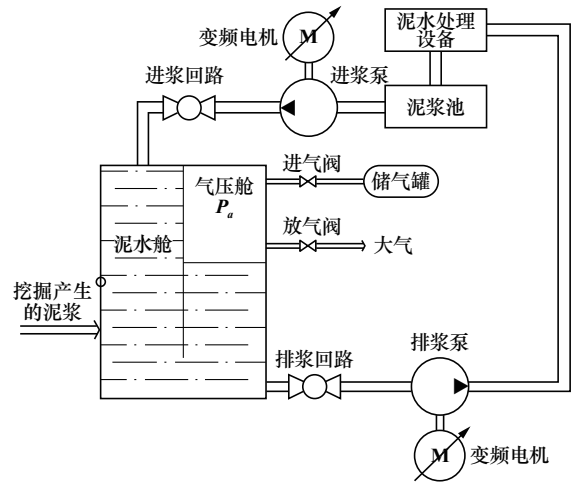


图 2 泥浆管路系统简图

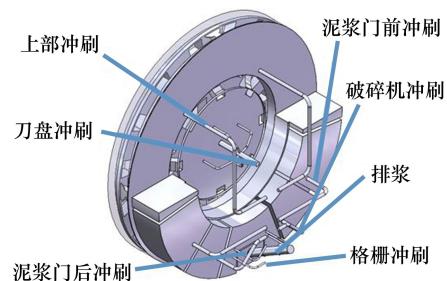


图 3 舱体内部冲刷系统

在模型的建立过程中,需要对系统进行一定的假设与简化:

- 1) 管路密封,不存在流体泄漏。
- 2) 忽略系统元件的热交换。
- 3) 忽略弯头和过渡接头的压力损失。
- 4) 通过压力边界代替泥水舱及气压舱内的压力,将现场测得的压力值赋予于仿真模型中的压力边界作为边界条件。

搭建的泥水盾构机泥浆管路仿真模型如图 4 所示,主要由泵、管路、阀门等部件组成。管路系统中主要包含 4 台泵,1 台主进浆泵 P1.1,1 台主排浆泵 P2.1,1 台处于刀盘冲刷管路的中继增压泵 P0.1 和 1 台处于泥浆门冲刷管路的中继增压泵 P0.2。稀浆从泥浆池经主进浆泵 P1.1 输送到泥水舱的各个区域,对泥水舱中的上部被动搅拌棒、刀盘中心、破碎机、泥浆门和格栅等泥浆颗粒容易堆积的区域进行冲刷。

泵 P2.1 和泵 P0.2 的参数分别与泵 P1.1 和泵 P0.1 的参数相同,为了说明,只列举泵 P1.1 及泵 P0.1 的选型参数,详见表 1。

模型最左端为压力边界,根据开挖掌子面的压力分布,边界压力值范围为 0.23~0.37 MPa。

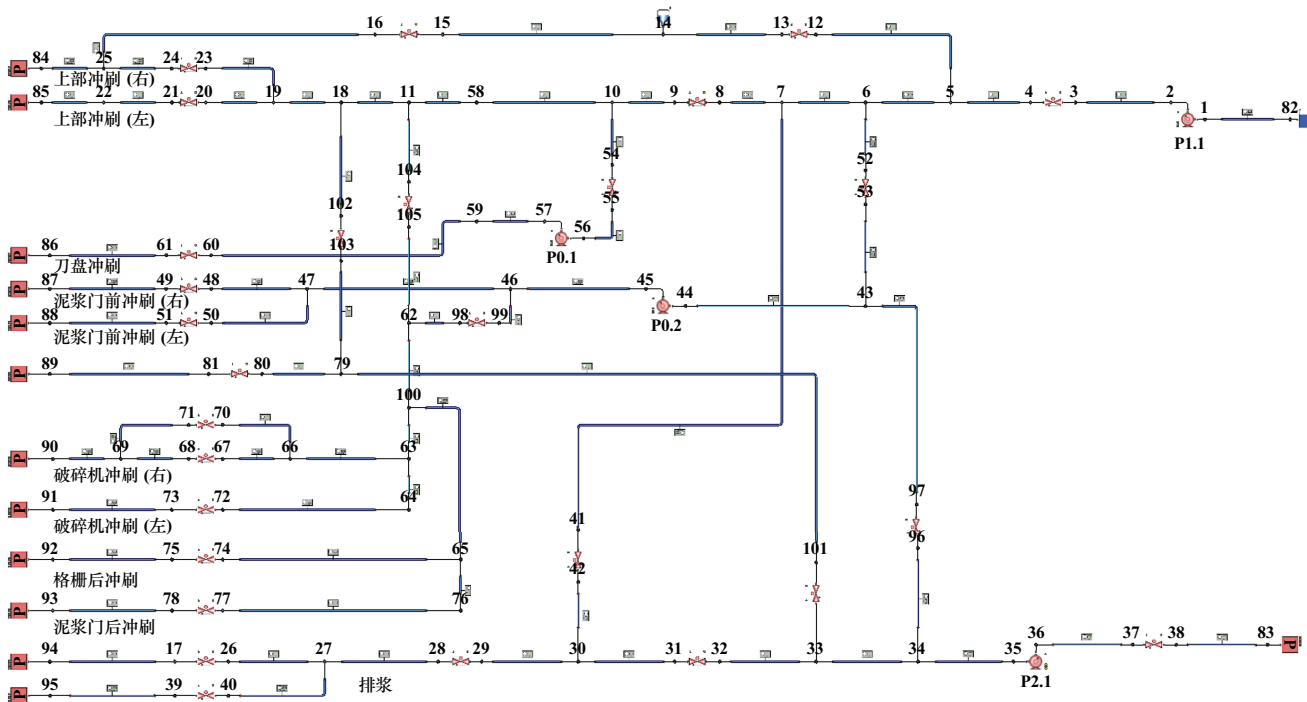


图4 泥浆管路仿真模型

表1 泵选型参数

泵型号	额定流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	额定扬程/ m	额定转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	额定功率/ kW
P1.1	3 000	65	643	919
P0.1	1 000	55	805	235

2 仿真分析

2.1 管路特性分析

本管路4台泵的工作点为泵特性曲线与管路特性曲线的交点,泵持续运行,当管路流量达到工作点流量时达到能量平衡,泵工作稳定。

2.1.1 管路特性曲线

管路特性曲线计算公式为:

$$H_c = \frac{P_B - P_A}{\rho g} + H_t + \varphi q_v^2 \quad (1)$$

式中: H_c 为管路装置扬程; $\frac{P_B - P_A}{\rho g}$ 为吸入容器与输出容器间的静压水头差,m; H_t 为液体被提升的总几何高度,m; φ 为管路总损失系数; q_v 为管路总体积流量, m^3/h 。

由式(1)可知,对于特定的泵装置,管路特性曲线为一条开度一定且开口向上的二次抛物线,抛物线的最低点为 $\frac{P_B - P_A}{\rho g} + H_t$ 。

2.1.2 离心泵的工作原理

离心泵叶轮内缘和外缘的压力差公式为:

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho g} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} \quad (2)$$

式中: u_1 和 u_2 分别为叶轮进口和出口处的圆周速度; p_1 和 p_2 分别为叶轮进口和出口处流体的压力。

由式(2)可知,离心泵通过离心力使叶轮外缘压力增加,且叶轮外缘压力随着叶轮半径及转速提高而增大。

2.2 仿真计算结果

2.2.1 仿真计算与实际工况对比

通过实时监测获得盾构机泥浆管路中各冲刷管路流量和边界压力等数据,仿真计算得到的管路流量和节点压力分布分别如图5和图6所示。从流量分布来看,刀盘冲刷管路相对其他支路流量较大,因为刀盘中心更容易结泥;从压力分布来看,泥浆泵后端的压力比前端压力高,说明泥浆泵在管路中起着增压的作用,泥浆泵通过增大管路两端的压力差,进而增大管路流量。

各管路流量分布如表2所示。计算结果与现场测量数据基本一致,误差均值约2%,说明模拟计算可行。模拟计算时,需对阀门开度进行适当调节,使管路系统达到较好的流量配比,从而更大程度地发挥冲刷系统的冲刷性能,解决盾构机结泥和滞排的问题。如果流量分配不合理,导致某一冲刷管路的冲刷流量过小,容易造成对应位置土块堆积黏附,影响盾构机的正常工作。

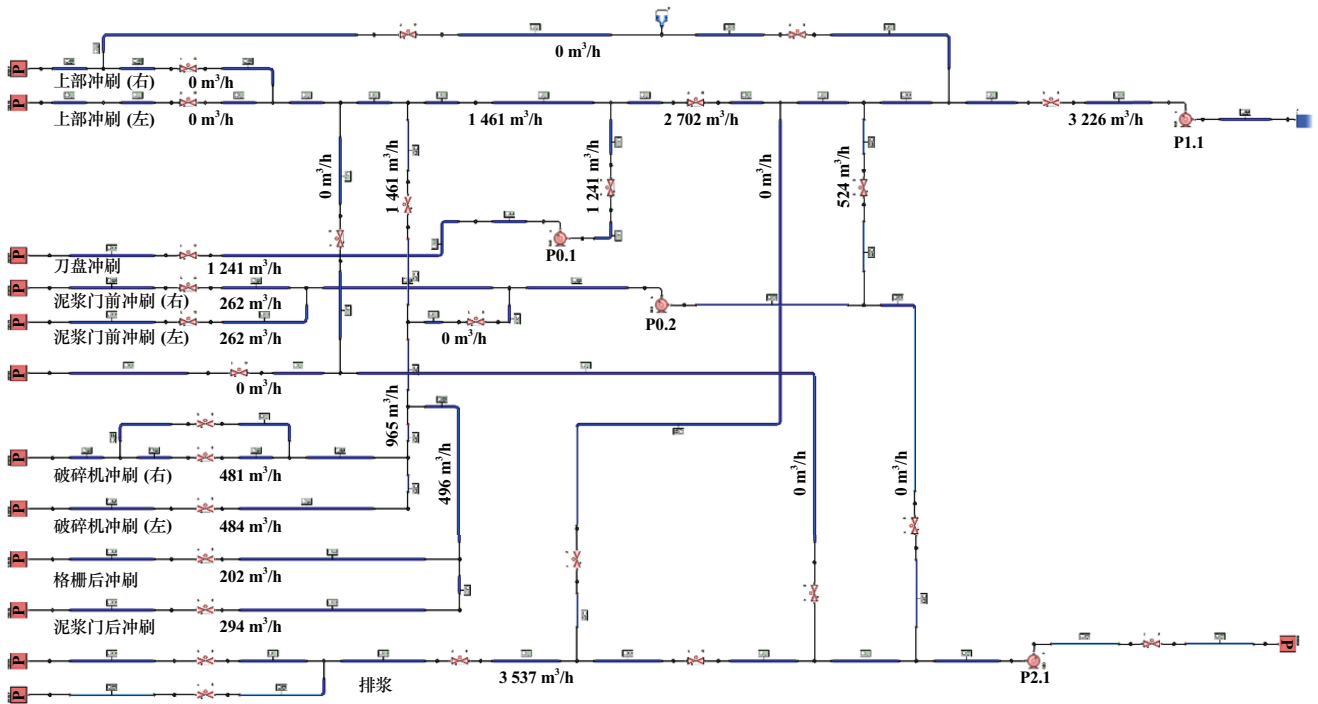


图 5 泥浆管路流量分布

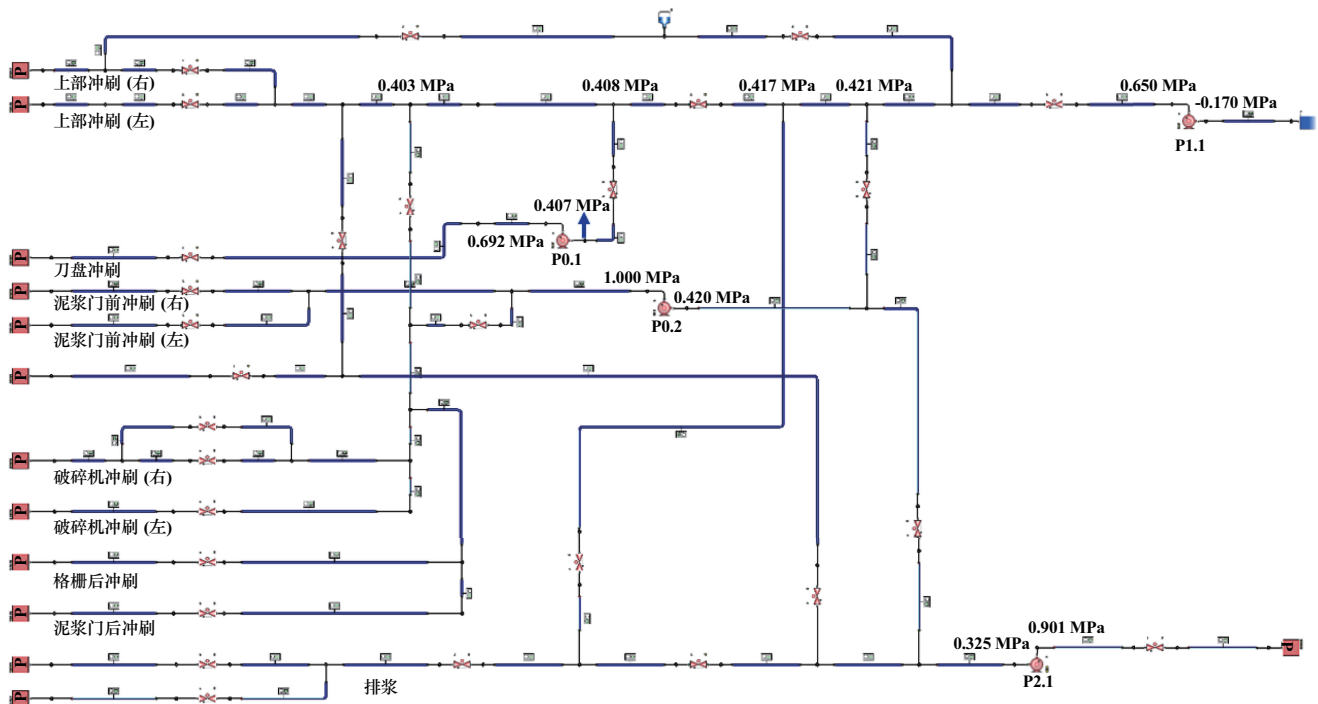


图 6 泥浆管路节点压力分布

2.2.2 阀门开度对管路系统的影响

分别增大泥浆门冲刷和减小破碎机冲刷管路处的阀门开度,得到泥浆管路中流量和节点压力分布如表 3~6 所示。

当泥浆门后冲刷管路处阀门开度由 0.70 增大到 0.72 时,泥浆门后冲刷管路流量由 294 m³/h 增加到

311 m³/h,增加了 5.78%;泥浆门后冲刷管路对应节点 11 处的压力由 0.403 MPa 减小到 0.402 MPa。当破碎机冲刷右管路处阀门开度由 0.64 减小到 0.60 时,破碎机冲刷右管路流量由 496 m³/h 减小到 451 m³/h,减小了 9.07%;破碎机冲刷管路对应节点 11 处的压力由 0.400 MPa 增加到 0.403 MPa。因此,在并联管路系统

表2 管路流量分布

冲刷位置	计算流量/(m ³ ·h ⁻¹)		实际流量/(m ³ ·h ⁻¹)	
	流量	流量和	流量	流量和
上部	0	0	0	0
刀盘	1 241	1 241	1 200	1 200
泥浆门前(右)	262	524	250	500
泥浆门前(左)	262		250	
破碎机(右)	484	1 461	480	1 460
破碎机(左)	481		480	
格栅后	202		200	
泥浆门后	294		300	
排浆	3 537	3 537	3 000	3 000

表3 泥浆门后冲刷管路阀门开度增大(0.70→0.72)时管路流量变化

冲刷位置	初始流量/(m ³ ·h ⁻¹)		开度增大后流量/(m ³ ·h ⁻¹)	
	流量	流量和	流量	流量和
上部	0	0	0	0
刀盘	1 241	1 241	1 240	1 240
泥浆门前(右)	262	524	262	524
泥浆门前(左)	262		262	
破碎机(右)	484	1 461	476	1 465
破碎机(左)	481		479	
格栅后	202		199	
泥浆门后	294		311	
排浆	3 537	3 537	3 537	3 537

表4 泥浆门后冲刷管路阀门开度增大(0.70→0.72)时节点压力变化

管路位置	节点序号	初始节点压力值/MPa	开度增大后节点压力值/MPa
主进浆	82	0.029	0.029
	2	0.652	0.651
刀盘冲刷	10	0.408	0.408
	56	0.406	0.406
	57	0.692	0.691
泥浆门前冲刷	6	0.421	0.420
	44	0.420	0.419
	45	1.000	1.000
下部冲刷	11	0.403	0.402
	100	0.402	0.400
排浆	95	0.330	0.330
	35	0.325	0.325
	36	0.901	0.901

中,增大某一管路阀门的开度,对应管路流量增加,其他并联管路流量减小,总管路流量增加,节点压力减小。

2.2.3 流体密度对管网系统的影响

当管道内流体由清水变为泥浆时,流体密度增大,此时泥浆管路中流量和节点压力分布分别如表7和表8所示。

当流体为清水时,主进浆泵P1.1进、出口的压力分别

表5 破碎机冲刷右管路处阀门开度减小(0.64→0.60)时管路流量变化

冲刷位置	初始流量/(m ³ ·h ⁻¹)		开度减小后流量/(m ³ ·h ⁻¹)	
	流量	流量和	流量	流量和
上部	0	0	0	0
刀盘	1 237	1 237	1 241	1 241
泥浆门前(右)	262	524	262	524
泥浆门前(左)	262		262	
破碎机(右)	496	1 473	451	1 462
破碎机(左)	500		516	
格栅后	195		201	
泥浆门后	282		294	
排浆	3 537	3 537	3 537	3 537

表6 破碎机冲刷右管路处阀门开度减小(0.64→0.60)时节点压力变化

管路位置	节点序号	初始节点压力值/MPa	开度减小后节点压力值/MPa
主进浆	82	0.029	0.029
	2	0.650	0.652
刀盘冲刷	10	0.406	0.408
	56	0.404	0.406
	57	0.689	0.692
泥浆门前冲刷	6	0.419	0.421
	44	0.418	0.420
	45	0.998	1.000
下部冲刷	11	0.400	0.403
	100	0.399	0.402
排浆	95	0.330	0.330
	35	0.325	0.325
	36	0.901	0.901

表7 流体密度变化时管路流量变化

冲刷位置	清水时流量/(m ³ ·h ⁻¹)		泥浆时流量/(m ³ ·h ⁻¹)	
	流量	流量和	流量	流量和
上部	0	0	0	0
刀盘	1 241	1 241	1 225	1 225
泥浆门前(右)	262	524	264	528
泥浆门前(左)	262		264	
破碎机(右)	484	1 461	476	1 469
破碎机(左)	481		481	
格栅后	202		205	
泥浆门后	294		307	
排浆	3 537	3 537	4 189	4 189

为0.029 MPa和0.652 MPa,压力差为0.623 MPa;当流体为泥浆时,主进浆泵P1.1进、出口的压力分别为0.036 MPa和0.816 MPa,压力差为0.780 MPa,比原来增加了25%。由式(2)可知,叶轮进、出口圆周速度相同时,泵进、出口压力差与流体密度有关;叶轮进、出口速度一定时,流体密度越大,进、出口压力差也越大。排浆管路中,当流体从清水变为泥浆时,流体密度从1 000 kg/m³

表8 流体密度变化时节点压力变化

管路位置	节点序号	清水时节点压力值/MPa	泥浆时节点压力值/MPa
主进浆	82	0.029	0.036
	2	0.652	0.816
刀盘冲刷	10	0.408	0.429
	56	0.406	0.426
	57	0.692	0.784
泥浆门前冲刷	6	0.421	0.453
	44	0.420	0.451
	45	1.000	1.176
下部冲刷	11	0.403	0.418
	100	0.402	0.416
排浆	95	0.330	0.330
	35	0.325	0.320
	36	0.901	0.902

表11 主进浆泵 P1.1 转速降低时节点压力变化

管路位置	节点序号	初始节点压力值/MPa	转速降低后节点压力值/MPa
主进浆	82	0.036	0.036
	2	0.816	0.647
刀盘冲刷	10	0.429	0.387
	56	0.426	0.385
	57	0.784	0.746
泥浆门前冲刷	6	0.453	0.403
	44	0.451	0.401
	45	0.118	1.129
下部冲刷	11	0.418	0.382
	100	0.416	0.381
排浆	95	0.330	0.330
	35	0.320	0.320
	36	0.902	0.902

表12 增压泵 P0.1 转速降低时节点压力变化

管路位置	节点序号	初始节点压力值/MPa	转速降低后节点压力值/MPa
主进浆	82	0.036	0.036
	2	0.647	0.652
刀盘冲刷	10	0.387	0.396
	56	0.385	0.394
	57	0.746	0.754
泥浆门前冲刷	6	0.403	0.414
	44	0.401	0.413
	45	1.129	0.650
下部冲刷	11	0.382	0.390
	100	0.381	0.389
排浆	95	0.330	0.330
	35	0.320	0.320
	36	0.902	0.902

增大到 1 250 kg/m³, 管路流量从 3 537 m³/h 增大到 4 189 m³/h, 排浆泵 P2.1 两端节点压力差由 0.576 MPa 增大到 0.582 MPa, 增加了 1.04%。由式(1)可知, 当 $P_B - P_A$ 为定值时, $\frac{P_B - P_A}{\rho g}$ 值减小, 管路特性曲线下移, 而泵的特性曲线不变, 所以管路特性曲线与泵特性曲线交点右移, 泵工作点右移, 管路流量增大, 泵的扬程减小。

2.2.4 泵转速对管网系统的影响

主进浆泵 P1.1 转速由 643 r/min 降低到 600 r/min, 增压泵 P0.1 转速由 797 r/min 降低到 600 r/min 时, 得到泥浆管路中流量和节点压力分布如表 9~12 所示。

表9 主进浆泵 P1.1 转速降低时管路流量变化

冲刷位置	初始流量/(m ³ ·h ⁻¹)		转速降低后流量/(m ³ ·h ⁻¹)	
	流量	流量和	流量	流量和
上部	0	0	0	0
刀盘	1 225	1 225	1 178	1 178
泥浆门前(右)	264	528	256	512
泥浆门前(左)	264		256	
破碎机(右)	476	1 469	317	918
破碎机(左)	481		320	
格栅后	205		128	
泥浆门后	307		153	
排浆	4 189	4 189	4 189	4 189

表10 增压泵 P0.1 转速降低时管路流量变化

冲刷位置	初始流量/(m ³ ·h ⁻¹)		转速降低后流量/(m ³ ·h ⁻¹)	
	流量	流量和	流量	流量和
上部	0	0	0	0
刀盘	1 178	1 178	1 188	1 188
泥浆门前(右)	256	512	159	318
泥浆门前(左)	256		159	
破碎机(右)	317	918	357	1 063
破碎机(左)	320		361	
格栅后	128		148	
泥浆门后	153		197	
排浆	4 189	4 189	4 189	4 189

主进浆泵 P1.1 转速降低时, 总管路流量从 3 222 m³/h 减小到 2 608 m³/h, 减小了 19.06%。其中, 中心冲刷管路流量从 1 225 m³/h 减小到 1 178 m³/h, 减小了 3.84%; 泥浆门冲刷管路流量从 528 m³/h 减小到 512 m³/h, 减小了 3.03%; 下部冲刷管路流量从 1 469 m³/h 减小到 918 m³/h, 减小了 37.51%。主进浆泵 P1.1 两端节点的压力差由 0.780 MPa 减小到 0.611 MPa, 压力差降低了 21.67%。由此说明, 主进浆泵 P1.1 转速降低时, 总管路流量减小, 支路流量也相应减小, 泵的扬程减小。

增压泵 P0.1 转速降低时, 泥浆门冲刷管路流量从 512 m³/h 减小到 318 m³/h, 减小了 37.89%; 中心冲刷管路流量从 1 178 m³/h 增大到 1 188 m³/h, 增加了 0.85%; 下部冲刷管路流量从 918 m³/h 增大到 1 063 m³/h, 增加了 15.80%; 总管路流量从 2 608 m³/h 减小到 2 569 m³/h, 减小了 1.50%。泥浆门前冲刷处泵两端节点的压力差由 0.728 MPa 减小到 0.237 MPa, 压力差降低了 67.45%。由此说明, 支路处泵的转速降低, 泵的扬程减小, 与其

并联的其余管路流量会增大,但总管路流量减小。

排浆泵 P2.1 转速从 643 r/min 降低到 600 r/min 时,排浆管路流量和节点压力分布分别如表 13 和表 14 所示。

表 13 排浆泵 P2.1 转速降低时管路流量变化

冲刷位置	初始流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)		转速降低后流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	
	流量	流量和	流量	流量和
上部	0	0	0	0
刀盘	1 188	1 188	1 188	1 188
泥浆门前(右)	159	318	159	318
泥浆门前(左)	159		159	
破碎机(右)	357	1 063	357	1 063
破碎机(左)	361		361	
格栅后	148		148	
泥浆门后	197		197	
排浆	4 189	4 189		

表 14 排浆泵 P2.1 转速降低时节点压力变化

管路位置	节点序号	初始节点压力值/MPa	转速降低后节点压力值/MPa
主进浆	82	0.036	0.036
	2	0.652	0.652
	10	0.396	0.396
刀盘冲刷	56	0.394	0.394
	57	0.754	0.754
	6	0.414	0.414
泥浆门前冲刷	44	0.413	0.413
	45	0.650	0.650
	下部冲刷	11	0.390
100		0.389	0.389
95		0.330	
排浆	35	0.320	
	36	0.902	

排浆泵 P2.1 转速降低时,泵的扬程减小,泵无法将流体泵送到指定边界,排浆管路无法正常工作。为了使排浆管路正常工作,可以采取增大排浆泵转速,或者在排浆管路上再串联 1 台增压泵来提高排浆管路扬程。

3 结论

1) 在泥水盾构机泥浆管路中,可以通过调节阀门开度和泵的转速来调整管网系统中的流量分配,使流量分配更加合理。阀门开度从 0.70 调到 0.72 时,泥浆门冲刷管路流量增加了 5.78%;主进浆泵 P1.1 转速从 643 r/min 降低到 600 r/min 时,泥浆门冲刷管路流量减少了 37.51%。根据相对流量变化率来看,调节阀门

开度对管网流量分布的影响更加明显。

2) 调整泥浆泵转速时,下部冲刷管路流量变化幅度分别为 37.51% 和 15.80%,相对其他冲刷管路流量变化幅度较大,说明下部冲刷受泵转速影响较大。

3) 当稀浆进入泥水舱,会与挖掘产生的泥浆混合,此时流体密度增加。当流体进入排浆管路时,管路流量会增大,可能会造成堵塞。此时,应减小泵的转速,防止堵塞情况发生。

4) 排浆泵转速过低,会导致扬程不够,排浆管路无法正常工作,可考虑增大排浆泵转速或串联 1 台泵,使排浆管路能够正常工作。

参考文献:

- [1] 严金秀. 中国隧道工程技术发展 40 年[J]. 隧道建设(中英文), 2019,39(4):537-544.
- [2] 蒋树屏,林志,王少飞. 2018 年中国公路隧道发展[J]. 隧道建设(中英文), 2019,39(7):1217-1220.
- [3] 洪开荣. 我国隧道及地下工程发展现状与展望[J]. 隧道建设, 2015,35(2):95-107.
- [4] KOYAMA Y. Present status and technology of shield tunneling method in Japan[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 18(2/3):145-159.
- [5] 王皖. 大直径泥水平衡盾构刀盘防结泥措施研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2018.
- [6] 王明胜. 南昌地铁泥水盾构穿越赣江浅覆盖透水层施工关键技术研究[J]. 隧道建设, 2015,35(11):1222-1228.
- [7] 田辉,傅鹤林,张洪亮,等. 盾构掘进中泥饼的防治措施及效果评价研究[J]. 企业技术开发, 2017,36(11):29-34.
- [8] 杨益,李兴高. 盾构刀盘结泥饼问题研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2020,16(增刊 2):1030-1038.
- [9] 廖兆锦,马怀祥,李东升. 超大直径泥水盾构环流冲刷系统改造分析[J]. 桥隧施工与机械, 2015,11(3):84-86.
- [10] YI Y, LI X G, LI H Y, et al. Assessing clogging potential and optimizing driving parameter of slurry shield tunneling in clay stratum assisted with CFD-DEM modeling[J]. Underground Space, 2024(14): 197-218.
- [11] GUO Y D, LI X G, JIN D L, et al. Assessment on the reverse circulation performance of slurry shield pipeline system assisted with CFD-DEM modeling under sandy cobble stratum[J]. Powder Technology, 2023,425:118573.
- [12] YAN D, XIA Y M, WU D, et al. Numerical investigation of pipeline transport characteristics of slurry shield under gravel stratum[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018,71:223-230.

引用本文: 徐梁,王海涛,孙九春,等. 大直径隧道掘进泥水盾构机泥浆管路流动特性分析[J]. 矿冶工程, 2024,44(6):16-22.