

基于数值模拟的球墨铸铁顶管顶进过程力学响应研究

李楚虎 殷少飞 张新

湖北省水利水电规划勘测设计院有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i2.8736

[摘要] 为精准把控供水排水、引调水工程岩层环境下球墨铸铁顶管顶进过程的力学响应特征，规避管体应力集中、接口失效等安全隐患，以 550MPa 级球墨铸铁顶管为研究对象，联合 ANSYS 数值模拟与工程实测手段，建立顶管-围岩耦合力学模型，系统探究顶进推力、围岩等级、注浆参数对管体应力分布、位移变形及接口力学特性的影响机制。模拟过程采用 Drucker-Prager 准则定义岩层本构关系，通过调整顶进速率、注浆压力等变量，获取不同工况下顶管力学响应数据，明确关键参数的优化区间。研究表明：在单轴抗压强度 30-50MPa 的岩层中，将顶进推力控制在 2500-3000kN、注浆压力调节至 0.3-0.5MPa 时，管体最大主应力不超过 400MPa，径向变形量 $\leq 2\text{mm}$ ，接口剪切应力降低 22%；数值模拟结果与工程实测值的相对误差 $\leq 8\%$ ，验证了所建模型的可靠性。该研究成果可为供水排水、引调水工程岩层穿越段顶管施工参数的优化提供可靠技术支持。

[关键词] 供水排水工程；引调水工程；球墨铸铁顶管；数值模拟；顶进过程；力学响应

Research on Mechanical Response of Ductile Iron Pipe Jacking Process Based on Numerical Simulation by

Li Chuhu Yin Shaofei Zhang Xin

Hubei Provincial Water Resources and Hydropower Planning Survey and Design Institute Co., Ltd.

[Abstract] To accurately control the mechanical response characteristics of ductile iron pipe jacking in rock formations for water supply, drainage, and water diversion projects, and to avoid potential safety hazards such as stress concentration and joint failure, this study focuses on 550MPa-grade ductile iron pipes. By integrating ANSYS numerical simulation with engineering field measurements, a coupled pipe-rock mechanical model was established to systematically investigate the influence mechanisms of jacking thrust, rock grade, and grouting parameters on pipe stress distribution, displacement deformation, and joint mechanical properties. The simulation process adopted the Drucker-Prager criterion to define rock constitutive relationships. Through adjusting variables such as jacking rate and grouting pressure, mechanical response data under different operating conditions were obtained, and the optimal ranges for key parameters were identified. The results demonstrate that in rock formations with uniaxial compressive strength of 30-50MPa, when the jacking thrust is controlled within 2500-3000kN and grouting pressure adjusted to 0.3-0.5MPa, the maximum principal stress of the pipe does not exceed 400MPa, radial deformation is $\leq 2\text{mm}$, and joint shear stress decreases by 22%. The relative error between numerical simulation results and engineering field measurements is $\leq 8\%$, validating the reliability of the established model. This research provides reliable technical support for optimizing construction parameters of ductile iron pipe jacking in rock-cut sections of water supply, drainage, and water diversion projects.

[Key words] Water supply and drainage engineering; Water diversion and transfer engineering; Ductile iron pipe jacking; Numerical simulation; Jacking process; Mechanical response

引言

在供水排水、引调水地下管网及输水干线工程建设中，顶

管施工法因对地表交通、周边构筑物扰动较小，已成为岩层区
域管线穿越施工的核心技术手段。球墨铸铁顶管凭借优良的力

学性能与抗腐蚀特点，被广泛应用于中风化砂岩、灰岩等岩层的供水排水、引调水工程输水干线建设^[1]。但在顶进施工过程中，管体需承受顶进推力、围岩挤压力、瞬时冲击载荷等复杂力学作用，易出现局部应力集中、接口变形渗漏等问题，尤其在复杂岩层环境中，不合理的施工参数可能导致管体破损，进而影响输水安全与工程整体稳定性^[2]。

一、数值模拟模型构建与参数设定

1.1 模型构建原则与范围

结合供水排水及引调水工程顶管施工的实际情况，构建三维顶管-围岩耦合数值模型，遵循“简化合理、精准适配”的核心原则，忽略岩层微小裂隙、管体表面微小缺陷等次要因素，重点模拟管体、接口、围岩及注浆层之间的力学相互作用。模型选取典型岩层顶管断面，顶管管径1200mm、壁厚100mm，长度选取10m（包含3节顶管及2个接口）；围岩模型范围设定为6m×6m×15m（长×宽×高），确保顶进过程中围岩边界效应对力学响应的影响不超过5%，满足模拟精度要求^[3]。

模型网格划分选用Solid185单元，其中管体、接口及注浆层采用加密处理，网格尺寸限定在50-80mm范围内，围岩采用渐变网格，边界区域网格尺寸放大至150-200mm，兼顾模拟精度与计算效率。网格划分完成后，总单元数约为8.2万个，节点数约为12.5万个，经网格独立性验证，该网格密度下的计算结果稳定，无明显波动。

1.2 材料本构与参数设定

管体材料采用550MPa级球墨铸铁，选用线弹性本构模型，结合试验数据设定相关参数：弹性模量190GPa，泊松比0.28，密度7300kg/m³，抗拉强度550MPa，屈服强度400MPa^[4]。接口采用T型柔性接口，考虑到橡胶密封件的缓冲特性，选用Mooney-Rivlin超弹性本构模型，弹性模量8MPa，泊松比0.45，剪切模量2.5MPa，模拟接口的变形适应性与密封性能，适配输水工程的防渗漏需求。

围岩选取供水排水及引调水工程中常见的中风化砂岩，采用Drucker-Prager准则描述其塑性力学特性，相关参数设定如下：单轴抗压强度45MPa，弹性模量30GPa，泊松比0.25，内摩擦角35°，黏聚力2.8MPa，密度2600kg/m³。注浆层采用水泥-水玻璃双液浆，设定为弹性体，弹性模量8GPa，泊松比0.3，密度2300kg/m³，厚度取80mm，贴合实际输水工程注浆层的厚度范围^[5]。

1.3 边界条件与载荷施加

边界条件设定如下：围岩模型底部采用固定约束，四周施加水平约束，顶部施加等效上覆岩层压力（按埋深10m计算，压力值为260kPa）；顶管管体两端施加轴向约束，接口处设置接触约束，摩擦系数取0.15（贴合橡胶密封件与管体的实际摩擦特性）。载荷施加模拟实际顶进过程，在顶管前端施加均布

顶进推力，取值范围为2000-3500kN（覆盖供水排水及引调水工程岩层顶管的常用推力区间）；同时在围岩与管体的接触面上施加均布摩阻力，摩擦系数按0.3-0.4设定，模拟岩屑填充间隙产生的摩擦效应^[6]。

二、顶进过程力学响应数值模拟分析

2.1 管体应力分布规律

模拟结果显示，顶管顶进过程中，管体应力分布呈现明显的区域性特征：顶管前端迎土面出现最大压应力，后端接口附近存在应力集中现象，侧面应力分布相对均匀。当顶进推力为2800kN时，管体最大主应力为385MPa，位于前端法兰与管体的连接处，该数值小于550MPa级球墨铸铁的屈服强度，处于安全运行区间；若将顶进推力提升至3500kN，最大主应力将增至520MPa，接近屈服极限，易引发管体塑性变形，威胁输水安全。

围岩强度对管体应力分布的影响较为显著：在单轴抗压强度30MPa的软质岩层中，管体应力分布较为均匀，最大应力为320MPa；而在抗压强度50MPa的硬质岩层中，由于岩层凸起的挤压作用，管体局部应力增至410MPa，应力集中系数提升15%。这一结果表明，在硬质岩层施工中需严格控制顶进推力，避免局部应力超限导致管体破损渗漏。

2.2 管体位移变形特性

顶进过程中，管体位移主要表现为轴向压缩变形与径向收敛变形，且位移量随顶进推力的增大、围岩强度的降低而呈现递增趋势。当顶进推力为2500kN、注浆压力为0.4MPa时，管体轴向最大压缩变形为1.2mm，径向最大收敛变形为0.8mm，均满足供水排水及引调水顶管施工规范要求（≤5mm）。注浆压力对位移控制具有显著效果，当注浆压力从0.3MPa提高至0.5MPa时，径向变形量下降30%，这是由于注浆层可形成刚性支护壳，有效约束围岩的挤压变形，避免管体变形影响输水断面。

接口位移是变形控制的关键环节，模拟结果显示，接口最大转角变形为0.8°，轴向位移为0.3mm，均小于改进型T型接口的允许限值（±3°、0.5mm）。接口位移主要源于顶进推力的不均匀传递，通过优化顶推法兰结构，可使接口位移量进一步降低18%，提升接口的稳定性与防渗漏能力。

2.3 接口力学响应规律

接口力学响应主要体现在剪切应力与密封压力的变化，顶进初期接口剪切应力快速上升，待顶进过程趋于稳定后逐渐平缓。当顶进推力为2800kN时，接口最大剪切应力为18MPa，密封压力稳定在0.35MPa，密封性能良好，可满足输水工程的防渗漏需求；若顶进速率过快（超过5cm/min），接口剪切应力将骤增至22MPa，密封压力波动幅度达20%，易造成密封件磨损渗漏，引发输水安全隐患。

围岩不均匀性会加剧接口力学响应的波动,在断层破碎带区域的模拟中,接口剪切应力波动幅度达30%,需采取分段注浆、分级顶进等针对性措施,降低围岩不均匀性对接口的影响,确保接口力学响应稳定,保障输水工程质量。

三、工程实测验证与参数优化

3.1 工程概况与实测方案

选取某城市供水主干管岩层顶管工程作为验证对象,该工程是城市供水管网升级改造的重点项目,需穿越1200米中风化砂岩层,岩层单轴抗压强度为42-48MPa,局部夹杂薄层泥质条带,地质构造相对稳定,顶管埋深10-12m,穿越区域临近城市主干道,对施工扰动及管线精度控制有着极高要求。工程选用与本文数值模拟参数完全匹配的550MPa级球墨铸铁顶管,管径1200mm、壁厚100mm,配套改进型T型柔性接口,采用大功率滚刀式顶管机施工,兼顾破岩效率与施工稳定性,适配供水工程连续输水的需求。

实测方案针对性布设监测系统,沿顶管轴线每20米布设1组应变片式传感器与激光位移监测点,在接口关键受力部位安装高精度压力变送器,监测设备采样频率设定为1次/分钟,实时采集管体应力、径向及轴向位移、接口密封压力等核心数据,同步记录施工参数,形成完整数据集,与数值模拟结果进行逐点对比验证。

3.2 模拟与实测结果对比

工程实测数据表明,在顶进推力稳定控制在2800kN、注浆压力维持在0.4MPa的优化工况下,管体最大主应力实测值为372MPa,径向最大收敛变形为0.75mm,接口最大剪切应力为17.2MPa,与数值模拟得出的对应结果(385MPa、0.8mm、18MPa)相比,相对误差分别为3.4%、6.7%、4.4%,均控制在8%以内,充分验证了本文构建的顶管-围岩耦合数值模型的可靠性与准确性^[7]。

实测过程中发现,局部硬质岩层凸起处的管体应力值略高于模拟计算值,差值最大约为18MPa,经分析主要是由于数值模拟中对岩层凸起形态进行了平滑简化,未能完全还原实际岩层表面的不规则性,后续可通过细化网格划分、精准复刻岩层凸起形态,进一步提升模型模拟精度,缩小理论与实测偏差,更好地服务于供水排水及引调水工程施工。

3.3 施工参数优化建议

基于数值模拟与工程实测数据的耦合分析,结合供水排水及引调水工程岩层顶管施工的安全性、高效性及防渗漏双重需求,提出针对性的施工参数优化方案,确保管体力学响应处于安全区间。顶进参数方面,将顶进推力控制在2500-3000kN,该区间可实现施工效率与管体应力的平衡,避免因推力不足导致顶进停滞,或因推力超限引发管体塑性变形;顶进速率稳定在3-5cm/min,防止速率过快加剧接口剪切应力波动,保障接

口密封性能。

注浆参数采用分级调控策略,软质岩层(单轴抗压强度30-40MPa)的注浆压力取0.3-0.4MPa,兼顾支护效果与围岩扰动;硬质岩层(40-50MPa)将注浆压力提升至0.4-0.5MPa,增强注浆层密实度以约束围岩挤压,注浆量按1.2倍理论间隙体积控制,预留冗余量弥补岩层裂隙损耗,提升支护稳定性。断层破碎带采用“小推力、慢顶进、加密注浆”的专项策略,顶进推力降至2000-2500kN,注浆频率提升50%,通过高频注浆填充破碎岩块间隙,降低围岩不均匀性影响,有效控制管体应力与位移变形,避免接口渗漏^[8]。

结论

本文基于ANSYS软件构建顶管-围岩耦合数值模型,系统分析了顶进推力、围岩强度、注浆参数等因素对球墨铸铁顶管顶进过程力学响应的影响规律,结合供水工程实测数据验证了模型的有效性,得出以下结论:数值模拟能够精准预测管体应力分布、位移变形及接口力学特性,与实测值的相对误差 $\leq 8\%$,为力学响应分析提供了高效便捷的手段;顶进推力与围岩强度是影响管体应力的核心因素,注浆参数对位移变形的控制效果显著;优化后的施工参数可将管体应力控制在安全区间,使接口稳定性提升22%,满足供水排水及引调水工程岩层顶管施工要求。

该研究成果弥补了传统实测方法的不足,为供水排水及引调水工程岩层顶管施工参数优化提供了坚实的理论支撑。未来可结合BIM技术与数值模拟相融合的方式,实现顶进全过程力学响应的实时预测与动态调控,进一步提升施工智能化水平,保障输水工程安全稳定运行。

[参考文献]

- [1]张宏远. 引调水工程非开挖顶管技术应用与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
- [2]李海峰, 王丽娟. 球墨铸铁顶管在供水工程岩石地层中的力学性能研究[J]. 水利水电技术, 2022, 53(7): 132-138.
- [3]刘建国, 陈明辉. 基于ANSYS的供水管道顶管-围岩耦合模型构建与分析[J]. 给水排水, 2023, 49(4): 143-147.
- [4]赵军, 李丽. 550MPa级球墨铸铁的力学性能及在输水管道中的应用[J]. 铸造技术, 2022, 43(9): 789-793.
- [5]孙晓辉, 周建强. 供水工程顶管注浆材料性能及参数优化研究[J]. 地下工程与隧道, 2024, (2): 45-49.
- [6]吴刚, 张晓燕. 岩层顶管施工摩阻力影响因素及计算方法优化[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(3): 168-173.
- [7]郑文忠, 刘芳. 供水工程顶管施工监测技术及数值模拟验证[J]. 施工技术, 2022, 51(S2): 987-990.
- [8]冯俊, 赵亮. 球墨铸铁顶管穿越岩层断层破碎带施工技术[J]. 岩土工程技术, 2023, 37(5): 321-326.