

# 高水压粉细砂地层泥水钢顶管泥浆套二次注浆压力影响分析

郭小雪<sup>1,2</sup>, 许剑波<sup>1,2</sup>, 邵智超<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中城乡生态环保工程有限公司, 湖北 武汉

<sup>2</sup>中国城乡控股集团有限公司, 湖北 武汉

<sup>3</sup>武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年2月16日; 录用日期: 2026年3月9日; 发布日期: 2026年3月18日

## 摘要

为研究高水压粉细砂地层泥浆套二次注浆对钢顶管的影响, 依托云南省某超前引排水顶管工程, 基于半球形扩散理论建立了泥浆套二次注浆浆液扩散模型与考虑二次注浆压力的管道受力模型, 通过数值模拟系统分析了钢管道在不同围压、不同注浆压力与注浆方式下管道变形与应力分布规律, 共得到以下结论: 1) 增大注浆压力与延长注浆时间均能提高浆液扩散效果, 起到更好的注浆作用, 但前者会显著提高管道压力, 建议工程中注浆时间控制在浆液初凝时间的50%~70%, 以兼顾注浆质量与施工冗余; 2) 考虑二次注浆压力时, 注浆孔附近变形与应力较大可能有局部失稳的风险, 当注浆压力较大时应进行附加结构验算, 并建议采取局部增厚或加劲肋等加强措施。3) 当顶管穿越不同富水地层时, 弱富水区管节在高注浆压力下的局部稳定性可能成为工程控制条件, 同时应尽量避免双侧长时间注浆。本研究成果可为后续类似工程提供参考。

## 关键词

高水压粉细砂, 钢顶管, 半球形扩散理论, 注浆压力, 数值模拟

# Pressure Effects of Secondary Annular Grouting on Slurry Shield Steel Pipe Jacking in High-Water-Pressure Silty Fine Sand Strata

Xiaoxue Guo<sup>1,2</sup>, Jianbo Xu<sup>1,2</sup>, Zhichao Shao<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Zhongchengxiang Ecological Environmental Protection Engineering Co., Ltd., Wuhan Hubei

<sup>2</sup>China Urban-Rural Holding Group Co., Ltd., Wuhan Hubei

<sup>3</sup>School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei

文章引用: 郭小雪, 许剑波, 邵智超. 高水压粉细砂地层泥水钢顶管泥浆套二次注浆压力影响分析[J]. 土木工程, 2026, 15(3): 120-131. DOI: 10.12677/hjce.2026.153060

## Abstract

To study the influence of secondary grouting of the slurry sleeve on steel pipe jacking in high water pressure silty sand strata, a slurry diffusion model and a pipe mechanical model considering secondary grouting pressure were established based on the hemispherical diffusion theory, relying on an advance drainage pipe jacking project in Yunnan Province. The deformation and stress distribution laws of steel pipes under different confining pressures, grouting pressures, and grouting methods were systematically analyzed through numerical simulation. The main conclusions are as follows: 1) Increasing both grouting pressure and duration can improve the slurry diffusion effect and enhance grouting performance. However, the former significantly increases pipe pressure. It is suggested that the grouting duration in engineering practice be controlled within 50% to 70% of the initial setting time of the slurry to balance grouting quality and construction redundancy; 2) When considering secondary grouting pressure, the deformation and stress near the grouting hole are relatively large, posing a risk of local instability. When the grouting pressure is high, supplementary structural verification should be performed, and reinforcement measures such as localized thickening or stiffening ribs are recommended. 3) When pipe jacking traverses different water-bearing strata, the local stability of pipe segments in weakly water-rich areas under high grouting pressure may become the engineering control condition. Meanwhile, prolonged simultaneous grouting on both sides should be avoided. The research results can provide a reference for similar future projects.

## Keywords

High-Water-Pressure Silty Fine Sand, Steel Pipe Jacking, Hemispherical Diffusion Theory, Grouting Pressure, Numerical Simulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

钢顶管技术作为一种非开挖地下管道施工方法,因其对地表干扰小、施工效率高、环境影响低等优势,近年来在市政工程、水利交通等领域得到广泛应用。在顶管工程,注浆是必不可少的一道工序,尤其是在长距离或高水压地层中,顶管所需顶力往往较大,常通过向地层中注入减阻泥浆的方式降低所需顶力、节约工程成本[1][2]。

然而在顶进过程中由于泥浆向地层中滤失或在动水条件下泥浆不断被侵蚀,为保证形成完整的泥浆套,在后续顶进中需进行补充注浆,这个过程一般称之为二次注浆或补充注浆[3]。高胜雷[4]、张鹏[5]、张云龙[6]、袁心[7]等学者依托不同工程的现场监测数据,发现了二次注浆对管道接触压力有显著影响,因此在设计中有必要考虑注浆压力的影响。王双等[8]、马险峰等[9]分别考虑了二次注浆对顶管顶力、地表沉降的影响,但未考虑均未考虑注浆压力对顶管管道的影响。赵光等[10]通过数值模拟方法研究了注浆荷载对大断面类矩形钢筋混凝土管节的结构变形与损伤机制,并提出了 0.6 MPa 作为注浆预警值,0.9 MPa 作为注浆压力控制指标,但未考虑注浆浆液扩散模型。

综上所述,目前关于顶管注浆压力影响的研究较少关注到注浆压力对顶管管道的影响,而在高水压

粉细砂地层中，泥浆套注浆压力往往较大，因此有必要开展高水压粉细砂地层中泥浆套二次注浆对钢顶管的影响分析研究。本文基于云南省某超前引排水顶管工程，提出了考虑二次注浆压力的顶管管道受力模型，并基于半球形扩散模型得到了二次注浆参数对管道压力的影响规律，最后通过数值模拟方法研究钢顶管在复杂荷载工况下的应力演化机制。本文研究成果可为后续类似工程提供参考。

## 2. 工程概况

云南省某超前引排水顶管工程为钢顶管工程，用于在深埋公路隧道内形成超前引排水导洞，进行隧道超前引排水。顶管埋深在 190~220 m 之间，全长约 200 m，依次穿越全风化花岗岩与新近系粉细砂岩地层，穿越长度分别为 80 m、120 m。全风化花岗岩地层为弱富水地层，地下水位较低，而新近系粉细砂岩地层为强富水地层，最高地下水位预计超过 100 m。不同地层围岩参数如下：全风化花岗岩天然重度 24.7 kN/m<sup>3</sup>，内摩擦角 35°，粘聚力 30 kPa。新近系粉细砂岩天然重度 18.8 kN/m<sup>3</sup>，内摩擦角 12.2°，粘聚力 20.8 kPa，渗透系数  $2.2 \times 10^{-6}$  m/s。

顶管工程单根管节长 2 m，一次顶进长度 4 m，管材选用 Q345B 钢顶管，管道外径 2.2 m，壁厚 30 mm，管节之间采用焊接方式连接。

## 3. 顶管受力模型

### 3.1. 受力模型

钢顶管在施工阶段的受力模型如图 1 所示，在环向方向上，顶管主要承受竖向土压力、侧向土压力、自重、地基反力与注浆压力。由于顶管泥浆套二次注浆往往发生于一次顶进到位后新管节焊接阶段，因此在分析二次注浆对顶管的影响时忽略顶管纵向力作用。

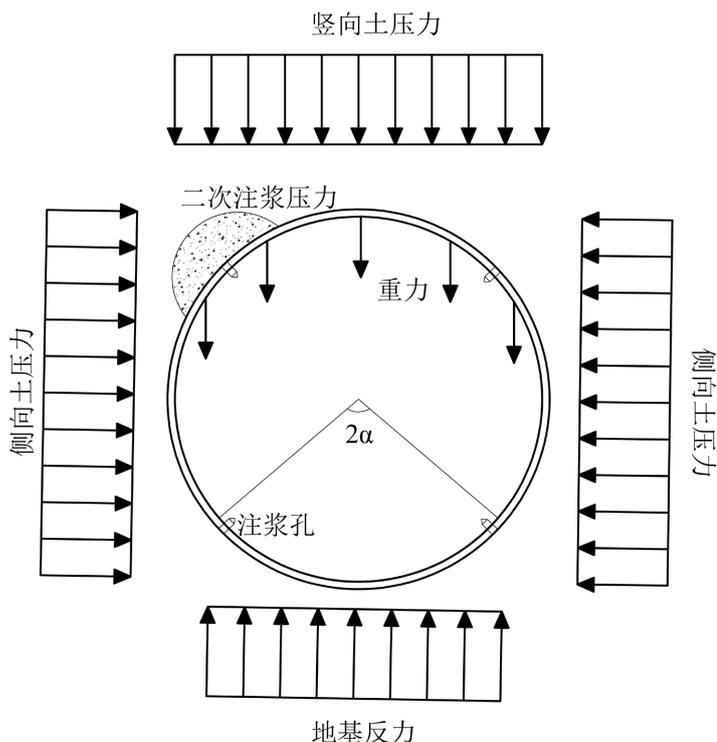


Figure 1. Mechanical model of the pipe section

图 1. 钢管节受力模型

参考中国《给排水工程管道结构设计规范》(T/CECS 246-2020)规定,深埋条件下钢顶管竖向土压力按照太沙基松动土压力计算,见式(1):

$$\sigma_v = \frac{\gamma_s B - 2c}{2K\mu} (1 - e^{-2K\mu H/B}) \quad (1)$$

式中,  $\sigma_v$  为竖向土压力(kPa);  $\gamma_s$  为土体重度(kN/m<sup>3</sup>);  $B$  为滑动土体宽度(m);  $c$  为土体粘聚力(kPa);  $K$  为剪切面内侧向土压力系数,  $K = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$ ;  $\mu$  为剪切平面中土体摩擦因数,  $\mu = \tan \varphi$ ;  $H$  为管道覆土高度(m)。

侧向土压力为管顶竖向土压力乘以侧向土压力系数,砂性土采用水土分算、粘性土采用水土合算,见式(2):

$$\sigma_h = K \left( \sigma_v + \frac{\gamma_s D}{2} \right) \quad (2)$$

式中,  $D$  为管道外径(m)。

钢顶管作为受力管采用 Spangler 计算模型,地基反力采用均布形式,通过竖直方向上受力平衡进行计算。

### 3.2. 二次注浆阶段浆液半球形扩散模型

为研究二次注浆对管道的影响,需对二次注浆阶段浆液扩散模式进行研究。在注浆过程中,管片与土体产生注浆压力主要发生在渗透注浆与压密注浆阶段,在砂性土地层,渗透扩散为浆液扩散的主要模式[11][12]。

为对研究问题进行简化,做出如下假设:1)注入浆液为宾汉姆流体,浆液不可压缩,忽略注入浆液黏度的时空效应;2)注浆压力恒定,且浆液在渗透范围内为层流;3)忽略注浆对土体挤压及浆液渗流导致的附加压力的影响;4)忽略管道的弧度效应,将管道外壁视为平面,如图2所示,浆液在渗透范围内,以注浆孔为球心,以半球形向四周扩散。

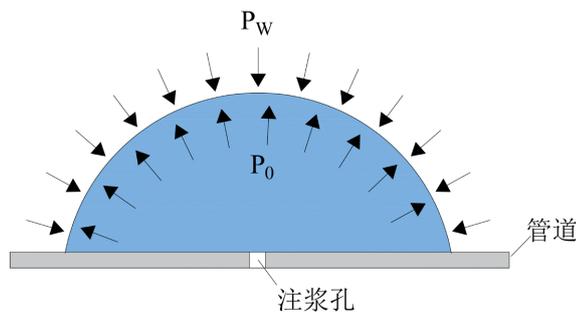


Figure 2. Hemispherical diffusion model  
图2. 半球形扩散模型

二次注浆时,  $p_0$  为注浆压力,  $p_w$  为注浆点处地下水压力,  $r_0$  为注浆孔半径, 经过  $t$  时间后浆液的扩散半径为  $r$ , 在扩散半径  $r$  范围内, 浆液为层流, 由达西定律可得:

$$v = -K_g \frac{dh}{dr} \quad (3)$$

式中,  $v$  为浆液扩散速度;  $K_g$  为浆液在地层中的渗透系数,  $K_g = \frac{K_w}{\beta}$ ,  $K_w$  为地层渗透系数,  $\beta$  为浆液雨

水的粘度比； $h$  为浆液压力水头高度。

当浆液呈半球形扩散时：

$$v = \frac{q}{2\pi r^2} \quad (4)$$

式中， $q$  为单位时间内的注浆量。

联立(3)和(4)，可得：

$$dh = -\frac{1}{K_g} \cdot \frac{q}{2\pi r^2} dr \quad (5)$$

同时  $dh = dP/\rho g$ ，将其代入(5)可得：

$$dP = -\frac{\rho g q}{K_g \cdot 2\pi r^2} dr \quad (6)$$

对上式积分，代入边界条件  $r = r_0$  时， $P = p_0$ ， $r = r$  时， $P = p_r$ ，因而有：

$$q = \frac{(p_r - p_0) \cdot 2\pi K_g}{\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0}\right) \rho g} \quad (7)$$

经过  $t$  时间的渗透注浆量为：

$$Q = qt = \frac{(p_r - p_0) \cdot 2\pi K_g t}{\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0}\right) \rho g} \quad (8)$$

当土体有效孔隙率为  $n$  时， $Q = \left(\frac{2}{3}\pi r^3 - \frac{2}{3}\pi r_0^3\right)n$ ， $Q$  为注浆量，可得注浆压力分布公式为：

$$p_r = p_0 + \frac{\rho g n (r^3 - r_0^3)}{3K_g t} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0}\right) \quad (9)$$

令  $p_0 - p_w = \Delta p$ ，可得到注浆扩散半径为：

$$r = \sqrt[3]{\frac{3\Delta p K_g t}{\rho g \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r}\right) n} + r_0^3} \quad (10)$$

对积分可得到注浆压力对管片产生的压力：

$$F_g = \int_{r_0}^r 2\pi r p_r dr = \pi p_0 (r^2 - r_0^2) + \frac{2\pi \rho g n}{K_g t} \left(\frac{r^4}{4} - \frac{r_0^4}{4} - \frac{r_0^3}{3}(r - r_0)\right) \quad (11)$$

### 3.3. 二次注浆压力影响实例分析

代入云南省某超前引排水顶管工程实际参数进行计算，注浆孔半径  $r_0 = 2.0$  cm，孔隙率  $n = 27.7\%$ ，粉细砂岩渗透系数  $K_w = 2.2 \times 10^{-6}$  m/s，浆液与水的粘度比  $\beta = 4.0$ ，浆液密度  $\rho = 1200$  kg/m<sup>3</sup>，当地下水压  $p_w = 0$  时由(10)和(11)可以求得各种注浆压力及注浆时间下浆液的扩散半径及浆液对管片产生的压力。

#### 1) 注浆压力的影响

以注浆时间  $t = 2$  h 为例，不同注浆压力下注浆扩散半径及对管道的压力如图 3 所示。

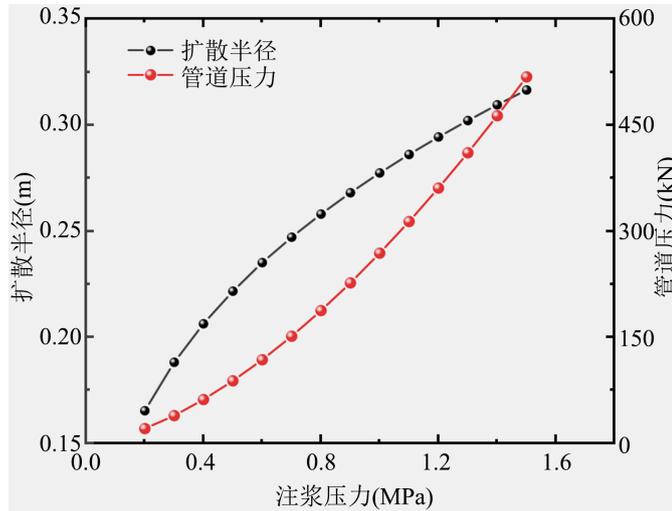


Figure 3. Diffusion radius and pipe pressure under different grouting pressures  
图 3. 不同注浆压力下扩散半径与管道压力

由图可见, 注浆扩散半径与对管道产生的压力均随注浆压力的增大而增大, 注浆压力从 0.2 MPa 增大至 1.5 MPa, 注浆扩散半径增加不到一倍, 但对管道产生的压力增加了超过二十倍, 因此单靠增加注浆压力来改善注浆效果应该慎重, 如果因为施工需要确实需要采用较大的注浆压力应该对管道因承受注浆而产生的附加压力结构进行验算。

## 2) 注浆时间的影响

以注浆压力为  $p_0 = 1.2$  MPa 为例, 不同注浆时间下扩散半径及对管道压力如图 4 所示。由图可见, 随注浆时间的增长, 浆液的扩散半径及对管道产生的压力均增大, 注浆时间从 0.5 h 增长至 3 h, 注浆扩散半径增长近一倍, 对管道压力增大接近三倍作用, 其对单位面积内管道压力影响不大, 因此可以通过适当延长注浆时间改善注浆效果。然而, 在工程实践中, 注浆时间的上限严格受限于浆液的初凝时间与流变特性, 以本工程宾汉姆流体浆液为例, 其胶凝时间通常在 4~6 小时左右, 考虑施工冗余度, 建议单次连续注浆时间不宜超过 3 小时, 以防止浆液在管路中凝固或造成注浆泵压力突变。

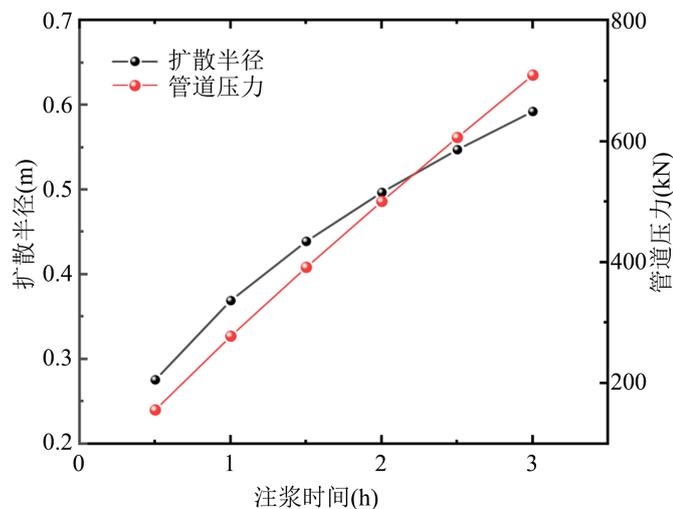


Figure 4. Diffusion radius and pipe pressure under different grouting times  
图 4. 不同注浆时间下扩散半径及管道压力

### 3) 注浆压力分布

沿用上述计算参数，以注浆压力  $p_0 = 1.2 \text{ MPa}$ 、注浆时间  $t = 2 \text{ h}$  为例，可以求得管道所受的注浆压力随浆液扩散半径的关系曲线如图 5 所示，浆液扩散半径为  $0.294 \text{ m}$ ，管道所受注浆压力在距离注浆孔  $0.1 \text{ m}$  范围内变化平缓，之后在距离注浆孔大于  $0.2 \text{ m}$  范围后骤减，这说明注浆孔附近为应力集中区。

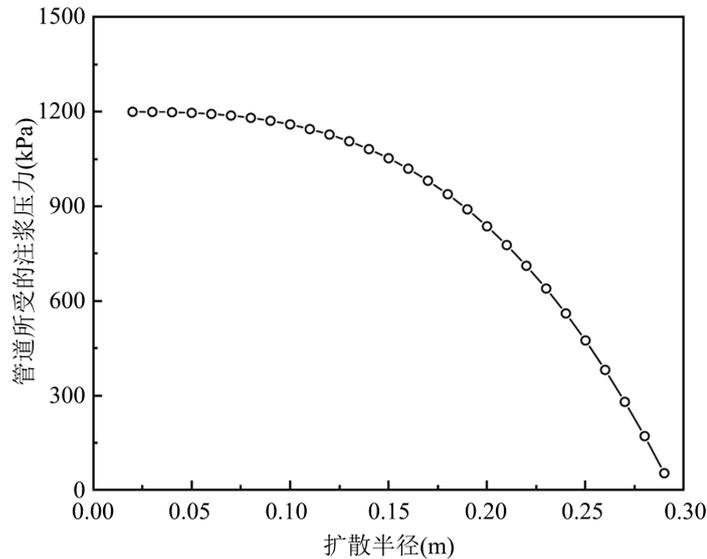


Figure 5. The relationship between grouting pressure on the pipe and diffusion radius  
图 5. 管道所受注浆压力与扩散半径的关系

## 4. 数值模型建立

为进一步研究高水压粉细砂地层二次注浆压力对管道应力演化机制，利用有限元软件 ABAQUS 建立荷载结构模型进行分析。

### 4.1. 模型建立

依据荷载 - 结构法计算原理，选取单根管节进行分析，管节长度  $2.0 \text{ m}$ ，管道外径  $2.20 \text{ m}$ ，管壁厚度为  $30 \text{ mm}$ 。全局种子密度为  $0.05 \text{ m}$ ，共建立 5683 个单元，网格划分如图 6 所示，单元类型为八节点六面体单元，管节环向施加只能受压不能受拉的土弹簧模拟地层抗力。

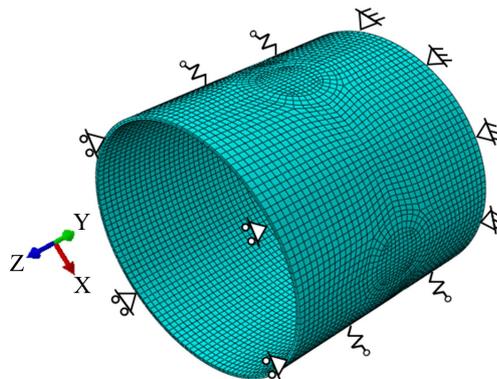


Figure 6. Finite element model  
图 6. 有限元模型

## 4.2. 材料参数与边界条件

钢管节采用弹塑性本构，重度  $\gamma = 78.5 \text{ kN/m}^3$ ，弹性模量  $E = 210 \text{ GPa}$ ，泊松比  $\mu = 0.28$ ，屈服应力为  $345 \text{ MPa}$ 。土弹簧刚度系数  $= kS$ ， $k$  为围岩弹性抗力系数，依据《公路隧道设计规范》中V级取  $100 \text{ MPa/s}$ ， $S$  为土弹簧对应土体面积。

约束顶进方向的轴向位移( $Z = 0$ )，同时约束两端平面内位移( $X = Y = 0$ )，荷载施加边界如图1所示，其中水土压力、重力为全管节布置，注浆压力依据注浆时间与注浆压力计算的管道压力取均值，仅在注浆孔附近浆液扩散半径内布置。

为验证有限元模型的准确性，将数值模拟结果与弹性地基圆环理论的 Schleicher 解析解进行了对比。该公式适用于 Winkler 地基上的圆环在轴对称荷载下的变形计算。其径向的变形量  $\Delta D$  的力学表达式为 [13]:

$$\Delta D = \frac{(P_v - P_h)R^4}{EI + 0.061k_s R^4} \quad (12)$$

式中， $P_v$  为竖向土压力， $P_h$  为侧向土压力， $R$  为管道半径， $EI$  为管道抗弯刚度， $k_s$  为地基抗力系数。

代入低围压下的参数进行计算  $P_v$  取  $131 \text{ kPa}$ ， $P_h$  取  $99 \text{ kPa}$ ，计算得到 Schleicher 解析解的管道最大径向变形为  $0.101 \text{ mm}$ ，有限元数值模拟得到位移应力云图如图7所示，最大径向变形为  $0.109 \text{ mm}$ ，与解析解误差小于  $10\%$ 有效验证了有限元模型的合理性。

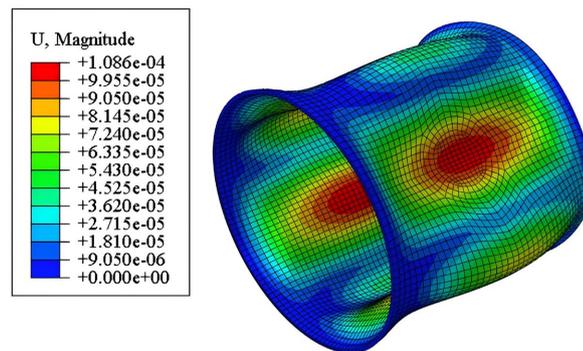


Figure 7. Nephogram of pipe displacement under low confining pressure (Unit: m)  
图 7. 低围压工况下管道位移云图(m)

## 5. 二次注浆对钢顶管影响分析

### 5.1. 注浆压力对管道的的影响

为研究在弱富水区低围压下与强富水区高围压下顶管二次注浆压力对管道的影响，分别取地下水位为  $0 \text{ m}$  与  $80 \text{ m}$  计算水土压力进行有限元分析。取注浆时间为  $3 \text{ h}$ ，注浆压力与地下水压力差( $\Delta p$ )分别设置为  $0.4 \text{ MPa}$ 、 $0.8 \text{ MPa}$ 、 $1.2 \text{ MPa}$ ，可以计算得到扩散半径与管道压力如表1所示。

Table 1. Diffusion radius and pipe pressure under different grouting pressures

表 1. 不同注浆压力下的扩散半径与管道压力

压力差	扩散半径/m	管道压力/kN	平均压力/kPa
0.40	0.24	78.63	452.83
0.80	0.29	240.54	884.01
1.20	0.34	464.28	1309.82

不同注浆压力下管道最大 MISES 应力变化如图 8 所示。由图可见, 随注浆压力增大管道最大 MISES 应力增大, 但由于本工程管道壁厚达 30 mm, 安全储备较高, 管道始终处于弹性范围内。值得注意的是, 由于注浆压力的作用, 低围压下注浆管道最大 MISES 应力增加接近 10 倍, 高围压下注浆管道最大 MISES 应力增加接近 2 倍, 故而在设计时考虑注浆压力是十分有必要的, 否则可能有局部失稳的风险。同时在本项管工程背景下, 由于顶管穿越不同富水性的地层, 当顶管机头进入强富水区时, 二次注浆压力上升, 富水区注浆压力差为 0.4 MPa 时, 弱富水区的注浆压力差为 1.2 MPa, 此时管道最大 MISES 应力出现在弱富水区, 控制条件应为处于弱富水区管节的局部稳定性。建议在工程设计中在注浆孔周边 300 mm 范围内采取局部加强措施如加焊 10 mm 厚的 Q345B 加强筋板, 以提高管道在极端注浆压力下的抗局部屈曲能力。

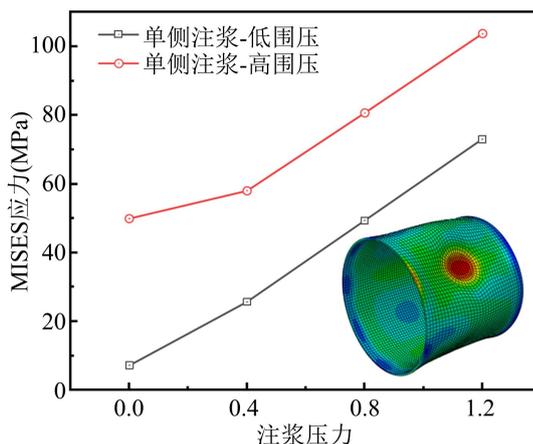


Figure 8. Variation of maximum MISES stress with grouting pressure during single-side grouting  
图 8. 单侧注浆时最大 MISES 应力随注浆压力变化

地下水位为 80 m、不考虑注浆压力时, 管道变形与 MISES 应力云图如图 9 所示, 地下水位为 80 m、注浆压力为 1.2 MPa 时, 管道变形与 MISES 应力云图如图 10 所示。以顶部为 0°, 以逆时针为正方向, 当只考虑水土压力时, 最大变形发生于 45°、135°、225°、325°位置处, 原因在于在该位置受到的水土压力合力最大, 最大变形为 0.6 mm; 最大 MISES 应力发生于水平位置(90°、270°), 最大 MISES 应力为 51.7 MPa。当注浆压力为 1.2 MPa, 最大变形与最大 MISES 应力均发生与注浆孔附近, 最大值分别为 2.0 mm、104.1 MPa。

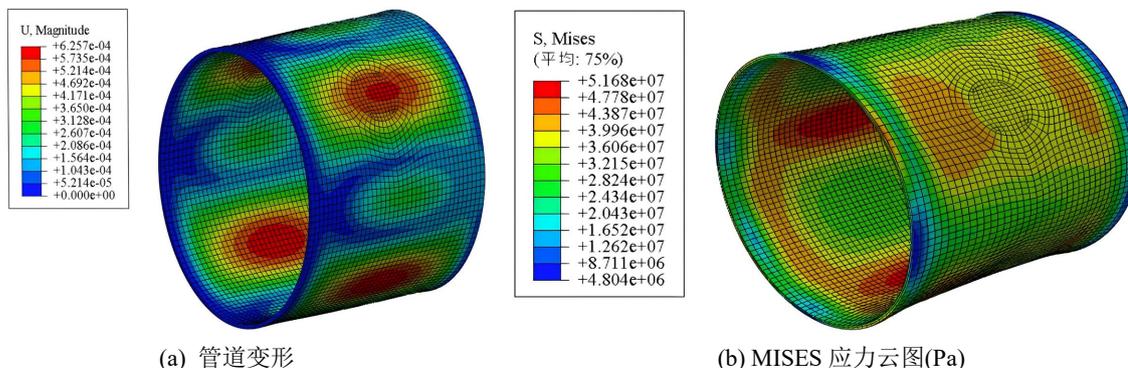


Figure 9. Pipe deformation and stress under soil and water pressure only (Deformation scaling factor = 100)  
图 9. 仅考虑水土压力时管道变形与应力(变形放大系数 = 100)

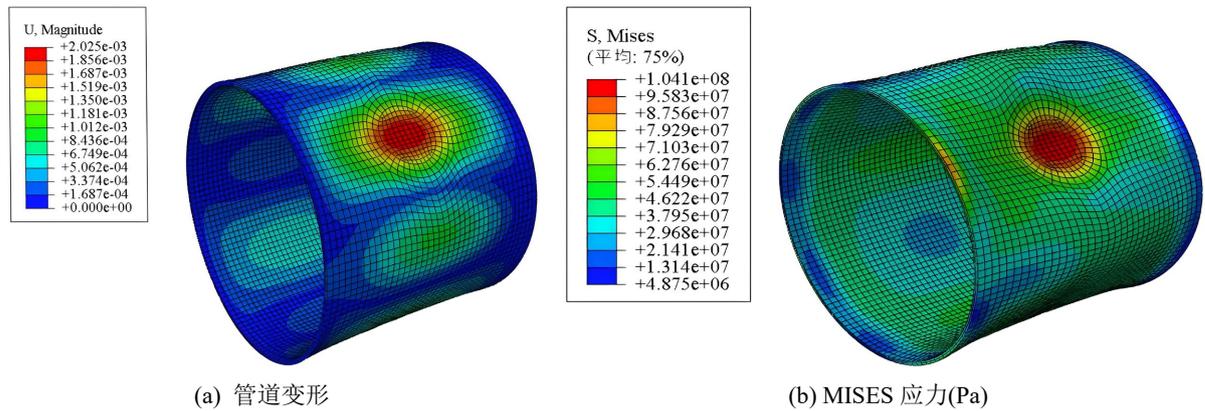


Figure 10. Pipe deformation and stress considering grouting pressure (Deformation scaling factor = 100)

图 10. 考虑注浆压力时管道变形与应力(变形放大系数 = 100)

## 5.2. 单侧与双侧注浆的影响

为进一步研究注浆方式对管道应力的影响, 分别设置单侧注浆与双侧注浆工况, 双侧注浆为左上、右上注浆孔同时注浆, 左右侧注浆压力相等。双侧注浆工况管道变形与 MISES 应力云图如图 11 所示, 最大 MISES 应力随注浆压力变化如图 12 所示。由图可见, 在本文设置工况下, 双侧注浆只影响管道变形与应力分布情况, 与单侧注浆相比管道最大 MISES 应力变化不大, 但可以预见的是, 随注浆时间的增长, 注浆扩散半径增大, 注浆压力影响范围扩大, 当两侧注浆影响范围重叠时势必会导致管道最大应力发生变化, 因此在进行二次注浆时应尽量避免双侧注浆的工况, 即使由于特殊情况需要双侧同时进行注浆也应该严格控制注浆压力与注浆时间, 避免由于二次注浆导致管道出现局部失稳, 影响正常施工。

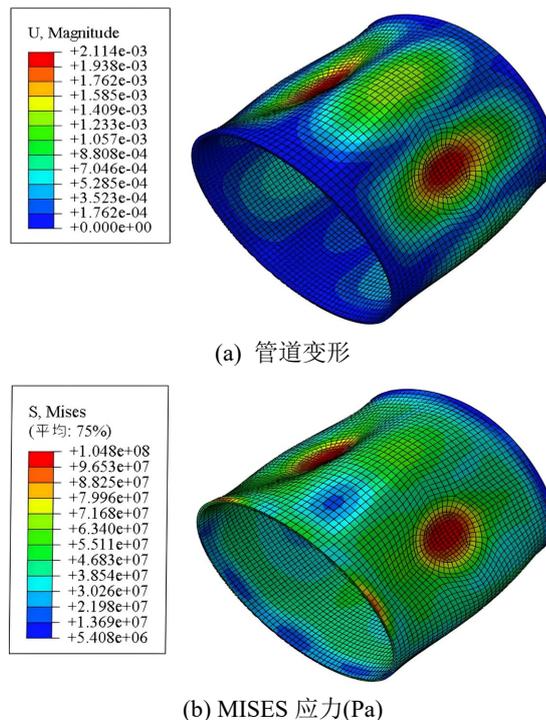


Figure 11. Pipe deformation and stress during bilateral grouting (Deformation scaling factor = 100)

图 11. 双侧注浆时管道变形与应力(变形放大系数 = 100)

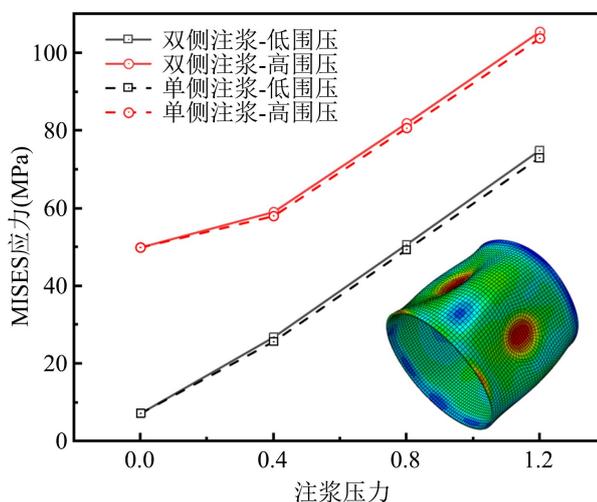


Figure 12. Variation of maximum MISES stress with grouting pressure during bilateral grouting  
图 12. 双侧注浆时最大 MISES 应力随注浆压力变化

## 6. 结论

为研究高水压粉细砂地层泥浆套二次注浆对钢顶管的影响, 本文基于云南省某超前引排水顶管工程, 通过理论分析得到了二次注浆参数对管道压力的影响规律, 并基于考虑二次注浆的管道受力模型, 采用数值模拟的方法分析了二次注浆压力对管道变形与应力的影响, 主要得到以下结论:

1) 在高水压粉细砂地层进行顶管泥浆套二次注浆时, 为保证形成良好的泥浆套, 可通过延长注浆时间的方式, 通过增加注浆压力的方式会导致注浆产生的管道压力大幅度上升。建议注浆时长控制在浆液初凝时间的 50%~70% 以内, 以确保浆液的流动性与扩散半径的稳定性。

2) 二次注浆影响管道变形与应力分布, 注浆孔附近有明显的应力集中, 有局部失稳的风险, 建议高水压地层下的钢顶管设计时应将二次注浆压力纳入考虑, 并在注浆孔周边实施局部结构加强措施。

3) 当顶管穿越地层富水性存在差异时, 顶管机头进入强富水区后, 高注浆压力下弱富水区管节二次注浆时管道局部稳定性可能成为设计控制条件。

## 参考文献

- [1] 冯锐, 张鹏, 苏树尧, 等. 大口径长距离钢顶管注浆减阻技术: 以黄浦江上游水源连通管工程为例[J]. 地质科技通报, 2020, 39(4): 174-180.
- [2] 张龙. 超大口径钢顶管关键技术研究[J]. 建筑施工, 2020, 42(1): 113-115.
- [3] 余彬泉, 等. 顶管施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [4] 高胜雷, 王凯丽, 刘赞, 等. 大直径空间 C 型曲线隧道顶管受力特性研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(3): 67-70+76.
- [5] 张鹏, 王翔宇, 曾聪, 等. 深埋曲线钢顶管受力特性现场监测试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1842-1848.
- [6] 张云龙, 张鹏, 马保松, 等. 砂层矩形顶管施工中管周压力时空分布规律及预测模型[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(6): 1171-1179.
- [7] 袁心, 马保松, 赵阳森, 等. 矩形顶管施工中管周压力的实测与分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(4): 1225-1233.
- [8] 王双, 夏才初, 葛金科. 考虑泥浆套不同形态的顶管管壁摩阻力计算公式[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 159-166+174.
- [9] 马险峰, 邹宇翔, 李向红, 等. 顶管注浆压力变化对地层沉降影响机理的离心模型试验[J]. 工程科学与技术,

---

2021, 53(5): 110-117.

- [10] 赵光, 马鹏. 大断面类矩形顶管注浆压力对管节损伤的影响分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2024, 41(1): 72-80+89.
- [11] 周彦伯. 不同扩散模式下盾构隧道壁后注浆规律研究[D]: [硕士学位论文]. 泉州: 华侨大学, 2019.
- [12] 叶飞, 朱合华, 何川. 盾构隧道壁后注浆扩散模式及对管片的压力分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1307-1312.
- [13] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 第3版. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.