

矩形顶管隧道邻近刚性管线施工安全距离研究*

Research on Construction Safety Distance of Rectangular Pipe Jacking Tunnel Adjacent to Rigid Pipeline

丁启峰¹, 李文江¹, 孙源¹, 李乾²

1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;
2. 国网河北省电力有限公司 石家庄供电分公司, 河北 石家庄 050000)

摘要: 针对顶管隧道邻近刚性管线施工安全距离问题, 借助有限差分程序和梁—弹簧模型, 采用两阶段法, 对净空 2.6 m × 2.4 m 矩形顶管电缆隧道在软黏土地层施工时土体变位特征进行研究, 分析顶管平行下穿地下刚性管线时管—隧净距、管材和管径对刚性管线最大拉应力的影响, 并根据服务年限对管线强度控制标准进行了修正, 确定顶管下穿管线的安全施工距离。结果表明: 管线最大变形曲率与最大拉应力随着顶管与管线间距的增大呈指数性衰减; 同种材质下, 管线管径越大, 施工扰动导致的最大拉应力越大; 管—隧净距及管线管径一定时, 钢管的最大拉应力最大, 球磨铸铁管其次, 灰口铸铁管最小。

关键词: 矩形顶管; 刚性管线; 平行下穿; 两阶段法; 变形特征; 安全距离

中图分类号: U455.47 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 02-0064-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.012

DING Qifeng¹, LI Wenjiang¹, SUN Yuan¹, LI Qian²

- (1. College of Civil Engineering, Shijiazhuang TieDao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. Shijiazhuang Power Supply Branch, Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Aiming at the construction safety distance problem of pipe jacking tunnel adjacent to rigid pipeline, with the help of finite difference program and beam-spring model, using two-stage method, the soil change of a rectangular pipe jacking cable tunnel with a clearance of 2.6 m × 2.4 m in soft clay ground is analyzed, bit characteristics were studied. The influence of the pipe-tunnel clear distance, pipe material and pipe diameter on the maximum tensile stress of the rigid pipeline was analyzed when the pipe jacking was parallel to the underground rigid pipeline. The safe construction distance of the pipeline under the pipe. It proved that: The maximum deformation curvature and the maximum tensile stress of the pipeline decay exponentially with the increase of the distance between the jacking pipe and the pipeline; Under the same material, the larger the diameter of the pipeline, the greater the maximum tensile stress caused by the construction disturbance. The greater the stress; when the clear distance between the pipe and the tunnel and the diameter of the pipeline are constant, the maximum tensile stress of the steel pipe is the largest, followed by the ductile iron pipe, and the gray cast iron pipe is the smallest.

* 基金项目: 国家电网河北电力公司科技项目 (KJ2020-003)。

作者简介: 丁启峰 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 隧道工程稳定性研究。

通信作者: 李文江 (1970—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 隧道工程稳定性理论, 地下工程环境控制及新技术方面研究。

收稿日期: 2023-09-15

Keywords: rectangular pipe jacking; rigid pipeline; parallel downward penetration; two-stage method; deformation characteristics; protection distance

0 引言

在城市地下空间开发过程中, 地下结构施作中的附加问题日益突出, 顶管法施工过程不可避免地扰动周围土体, 管线周边地层在扰动影响下向着隧道侧发生位移, 刚性管线由于与土体刚度呈现差异而产生不一致的位移变形, 进而使得管线产生附加应力, 在附加应力作用下, 管线易发生弯曲受拉和纵向挤压, 在外部扰动较为强烈时, 附加应力超过材料允许强度值, 刚管极有可能出现受拉破坏、横断面开裂及屈曲破坏, 严重影响管线的正常使用。

国内外学者通过理论解析、模型试验和数值模拟等方法对管线受隧道施工扰动影响问题做了大量研究工作。理论解析法^[1-4]通常假定土体符合 Winkler 弹性地基梁模型, 并在已有弹性力学解的基础上, 推导出地下管线在隧道施工影响下的力学表达式, 进而反映管线经受扰动后的力学特征。数值模拟法^[5-8]借助 FLAC、PLAXIS 3D 等大型软件对实际施工工况仿真分析, 通过模拟得出的数据, 可定性反映不同因素, 如管径、净距、埋深等对管线扰动的影响。黄晓康等^[9]依托室内模型试验, 在盾构施工条件下, 对所处两种不同典型地层下管线的沉降、弯曲应变及地层损失规律分别做了探讨。实测法^[10-11]依托实际工程背景, 通过对顶管隧道施工过程中周边地层及管线位移变化的动态量测, 揭示顶管施工对周边土体和邻近管线的扰动规律。

关于地下管线受外界扰动影响下变形特征分析方法有两种, 整体法和两阶段法^[12]。对于刚性管线, 若采用整体法分析, 管土接触面的力学参数无法准确给出, 这对实际模拟结果影响较大。两阶段法由于原理简单, 对线弹性材料应用成熟, 在地下管线受扰动影响研究^[13-15]中多次被使用。针对管线安全施工距离问题, 目前同行研究者着重对管线变形控制标准及其安全性评估进行研究, 而对管线安全保护距离的论述研究较少, 且目前顶管施工的相关规范在对施工过程中与地下管线的安全距离等方面未有明确规定。

本文借助有限差分法, 研究净空 2.6 m × 2.4 m 矩形顶管电缆隧道施工时管线位置处地层的变形特征。运用两阶段法, 基于梁—弹簧模型, 探究顶管隧道平行下穿刚性管线时, 管—隧净距、管材及管径对管线拉应力影响规律, 并依据考虑了服务年限的管线强度控制标准, 确定地下刚性管线安全施工距离。研究成果对矩形顶管邻近地下管线安全施工问题具有一定的指导意义。

1 刚性管线强度控制标准与两阶段法

1.1 刚性管线强度限值

管线安全评判准则常用变形判别法 (柔性管线) 和应力判别法 (刚性管线)。随着服务年限的增加, 埋管受外部环境的影响而产生不同程度的腐蚀, 其物理力学性能发生改变。常见的管道腐蚀模型有幂函数模型、二阶段模型及线函数模型等, 国内外评价腐蚀缺陷管道剩余强度也有 ASME B31G、DNV-RP-F101 等准则。文章采用管道幂函数腐蚀模型, 通过 ASME B31G-2009^[16] 剩余强度评价准则计算刚管剩余强度。

幂函数模型:

$$d = KT^n \quad (1)$$

ASME B31G-2009 剩余强度模型:

$$S_F = S_{\text{flow}} \left[\frac{1 - 0.85(d/t)}{1 - 0.85(d/tM)} \right] \quad (2)$$

其中,
$$\begin{cases} M = \sqrt{1 + 0.6275z - 0.003375z^2} & z \leq 50 \\ M = 0.032z + 3.3 & z > 50 \end{cases}$$

式中: d 为管道腐蚀坑深度, mm; K 、 n 为常数, 对于钢管^[17]可取 $K = 0.5$ 、 $n = 1.0$, 铸铁管^[18]取 $K = 2$ 、 $n = 0.3$; T 为管线管龄, 年; S_F 为估计失效力, MPa; S_{flow} 为管材流变应力, MPa; t 为管道公称壁厚, mm; D 为管道外径, mm; L 为腐蚀缺陷轴向投影长度, mm, 取腐蚀坑深度的 100 倍; M 为鼓胀系数; z 为腐蚀缺陷当量长度, $z = L^2/Dt$ 。

选取钢管、灰口铸铁管和球磨铸铁管三种管材, 考虑新建、5 年、10 年和 15 年四种服役年限, 将管线参数代入式 (1)、式 (2) 中可确定考虑管线服务年限的强度限值标准, 见表 1。

岩土力学

表 1 考虑不同服务年限的地下刚性管线强度限值

Table 1 Strength limits of underground rigid pipelines considering different service years

管材	内径 /mm	外径 /mm	公称壁厚 /mm	拉伸强度限值/MPa			
				新建	5 年	10 年	15 年
钢管 (Q235)	500	530	18.0	340	317	277	220
	1000	1020	15.0	340	316	267	216
	2000	2020	15.0	340	322	276	224
灰口铸铁管	500	528	18.0	140	126	121	117
	1000	1041	28.0	140	134	131	129
球磨铸铁管	500	532	9.0	420	318	287	266
	1000	1048	13.5	420	366	346	332
	2600	2702	27.9	420	408	401	396

1.2 两阶段法

对顶管隧道邻近施工对刚性管线扰动影响的研究可分为两个阶段：第一阶段，采用数值方法提取矩形顶管隧道施工引起的土体位移；第二阶段，将土体位移做为位移荷载施加在梁—弹簧模型上，计算管线变形曲率和拉应力。梁—弹簧计算模型如图 1 所示。

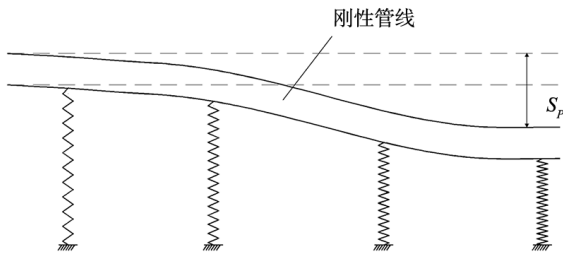


图 1 梁—弹簧模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of beam-spring model

通过计算模型建立管线位移方程^[8]，设刚性管线竖向位移为 S_p ，则有：

$$\frac{d^4 S_p}{dx^4} + 4\lambda S_p = \frac{q}{E_p I_p} \quad (3)$$

根据刚性管线弹性本构关系得出拉应力：

$$\sigma_p = E_p \varepsilon_x = \frac{E_p D}{2} \frac{\partial^2 S_p}{\partial x^2} = \frac{E_p D}{2} k_p \quad (4)$$

式中： $\lambda = \sqrt[4]{K/4E_p I_p}$ ， K 为地基基床系数； E_p 为刚性管线弹性模量； I_p 为刚性管线截面惯性矩； k_p 为刚性管线变形曲率； q 为作用于刚性管线上的覆土压力； D 为刚性管线外径； σ_p 为管线拉应力。

根据地下刚性管线变形最大曲率、管径和弹性模量，通过式 (4) 即可求出埋地刚性管线最大拉应力。

2 矩形顶管施工数值模型

2.1 模型的建立

考虑模型边界尺寸效应，模型水平单侧取顶管隧道 8~10 倍净宽，顶管隧道底部到模型下边界取 4~5 倍隧道净高，开挖纵向长度取 60 m。模型大小 ($x \times y \times z$) 为 74 m × 30.5 m × 60 m，共 289680 个单元，节点 304920 个。计算模型如图 2 所示。

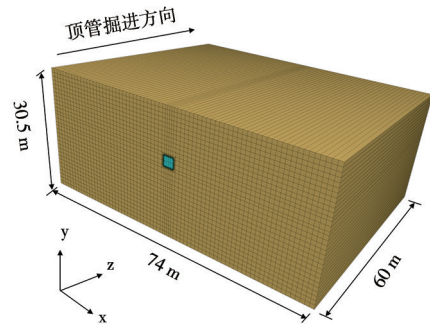


图 2 计算模型

Fig. 2 Calculation model

矩形顶管电缆隧道净空 2.6 m × 2.4 m，隧道埋深 10.8 m，壁厚 30 cm，管节长 2.5 m，触变泥浆层厚 2 cm。计算模型在顶端面为自由面，四周为法向约束，模型底面为固定约束。其中矩形顶管隧道与顶管机壳体采用 shell 单元，土体和触变泥浆层采用实体单元模拟。

2.2 本构模型及参数

(1) 软黏土采用摩尔—库仑本构模型，触变泥浆层、钢筋混凝土管片与顶管机壳体采用线弹性本构。数值计算中材料物理力学参数见表 2。

表 2 不同材料物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of different materials

材料	重度 /($kN \cdot m^{-3}$)	模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^\circ$)
软黏土	17.0	8	0.30	16	18
触变泥浆	13.2	4	0.32		
钢筋混凝土管片	25.0	3.55×10^4	0.20		
顶管机壳体	78.5	2.10×10^5	0.20		

注：表中模量、土体及触变泥浆为变形模量，钢筋混凝土管及顶管机壳体为弹性模量。

(2) 根据工程注浆经验，注浆压力选择为静止土压力的 1.1 倍；掌子面土仓压力考虑为梯形荷载，在 10.8 m 埋深下，矩形顶管隧道掘进过程中掌子面顶部压力值取 117.3 kPa，中部 133.7 kPa，掌子面

底部取 150.1 kPa；矩形顶管隧道每次掘进 2.5 m，采用 5% 应力释放来模拟地层损失。

3 模拟结果分析

3.1 顶管隧道施工下管线的变形特征

3.1.1 顶管隧道上部地层变形特征

新建矩形顶管隧道对上方管线扰动主要体现在管线的竖向变形，以顶管隧道施工过程中为扰动变形最不利情形，提取顶管上方 0.3、1.3、2.3、3.3、4.3 m 假定管线位置处及地表处土体竖向变形。图 3 为 2.6 m × 2.4 m 尺寸矩形顶管隧道施工时，其上方不同位置处的土体竖向变形曲线。

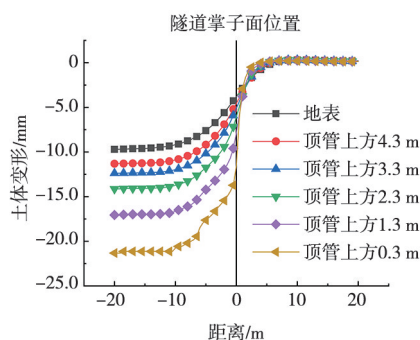


图 3 顶管上方土体竖向变形曲线

Fig. 3 Vertical deformation curve of the soil above the jacking pipe

由图 3 可知，矩形顶管隧道施工对上方不同位置处土体扰动变形规律基本一致；矩形顶管隧道尺寸一定的条件下，上方土体层位越远，土体扰动变形越小；顶管隧道掌子面前方扰动影响范围约 5 m，在后方 10 m 位置处地层沉降趋于平稳；隧道掘进至模型中间时，地表最大沉降量可达 9.8 mm。

3.1.2 刚性管线在扰动影响下变形曲率特征

基于两阶段法，对矩形顶管上部不同位置处地层的竖向变形值进行二阶求导，得出在顶管平行下穿施工扰动影响下，管线变形曲率与距掌子面距离之间的关系曲线，如图 4、图 5 所示。对刚性管线在扰动影响下变形曲率规律的研究，以确定管线拉应力最不利位置和最大拉应力值。

通过图 4 及图 5 得知，不同间距刚性管线在扰动影响下的沿线变形曲率规律基本一致；距顶管隧道施工掌子面距离越远，管线在扰动影响下变形曲率越小，在顶管掌子面前后 2.5 m 范围内，变形曲率数值相近但符号相反，且有较大的增长幅度，与顶管间距 0.3 m 的刚性管线曲率特征最为突出，在管线纵

向上呈现多个曲率峰值，最大变形曲率可达 6.66‰，可见顶管下穿施工对其扰动影响强烈；管线最大变形曲率出现在距顶管掌子面前后 2.5 m 范围段内；随着管—隧上下间距增大，管线最大变形曲率呈指数性衰减；新建矩形顶管与刚性管线净距达到 3.3 m (约 1.27 倍顶管隧道净宽)，施工扰动对既有管线最大变形曲率影响变小。

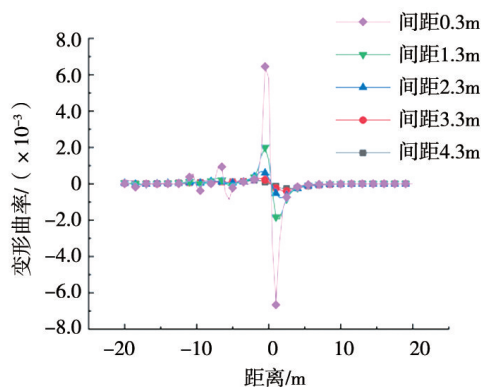


图 4 管线变形曲率与距掌子距离之间的关系曲线

Fig. 4 The relationship curve between the pipeline deformation curvature and the distance from the shaft

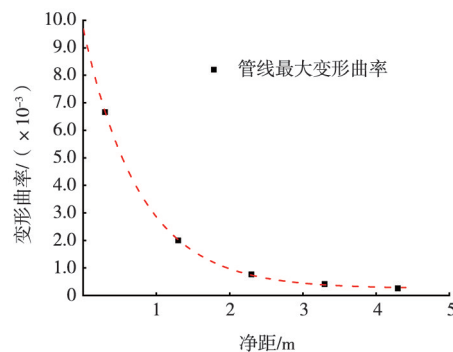


图 5 管线最大变形曲率与上下净距间的关系曲线

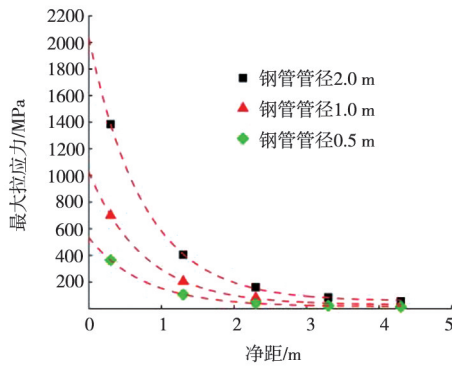
Fig. 5 The relationship curve between the maximum deformation curvature of the pipeline and the upper and lower clear distance

3.2 刚性管线最大拉应力的敏感性分析

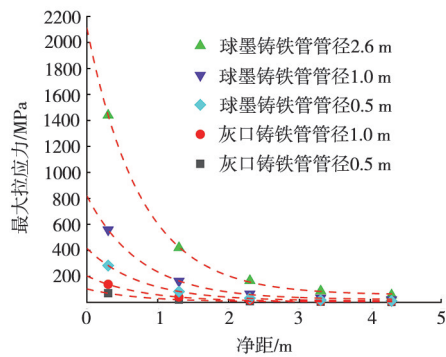
除去施工因素，主要从管—隧净距、管径和管材三个因素对管线最大拉应力进行敏感性分析，得出刚性管线最大拉应力与影响因素之间的关系曲线，见图 6。基于梁—弹簧模型，在管线最大变形曲率及管线管径、管材弹模 (钢管 2.06×10^5 MPa、灰口铸铁管 0.4×10^5 MPa、球磨铸铁管 1.6×10^5 MPa) 已知情况下，将参数代入式 (4) 得到管线最大拉应力值，见表 3。

由图 6 及表 3 可知，三种不同管材刚性管线的最

岩土力学



(a) 钢管



(b) 铸铁管

图 6 管—隧不同净距与不同管材最大拉应力关系曲线

Fig. 6 The relationship curve of different clear distances between pipes and tunnels and maximum tensile stress of different pipes

表 3 上下平行不同净距下管线最大拉应力表

Table 3 Maximum tensile stress table of pipelines with different clear distances in parallel up and down

管材管径	最大拉应力/MPa				
	0.3 m	1.3 m	2.3 m	3.3 m	4.3 m
钢管管径 0.5 m	363.42	106.17	42.13	22.01	14.20
钢管管径 1.0 m	699.41	204.32	81.08	42.37	27.34
钢管管径 2.0 m	1385.10	404.64	160.57	83.90	54.14
灰口铸铁管管径 0.5 m	70.30	20.54	8.15	4.26	2.75
灰口铸铁管管径 1.0 m	138.60	40.49	16.07	8.40	5.42
球墨铸铁管管径 0.5 m	283.33	82.77	32.85	17.16	11.07
球墨铸铁管管径 1.0 m	558.14	163.05	64.70	33.81	21.82
球墨铸铁管管径 2.6 m	1439.02	420.39	166.82	87.17	56.25

大拉应力与上下净距之间的关系曲线特征基本一致；随着矩形顶管隧道与地下刚性管线净距增大，管线最大拉应力呈非线性减小；矩形顶管隧道尺寸一定时，钢管的管径越大，隧道施工导致的管线最大拉应力越大；矩形顶管隧道尺寸一定时，灰口铸铁管、球磨铸铁管的拉应力值与其各自管径大小成正相关关系；在管—隧上下净距一定、管线管径一定

的情况下，钢管的最大拉应力最大，球墨铸铁管其次，灰口铸铁管最小。

4 模拟结果分析

矩形顶管隧道施工过程中，掌子面压力、注浆压力、机头掘进速度等都会影响施工效果，且最终体现在地表沉降上。一般矩形顶管电缆隧道施工地表沉降控制在 30 mm 以内，模拟以地表沉降约 10 mm 的施工效果为例。

若顶管尺寸为 2.6 m × 2.4 m，顶管埋深 10.8 m，地表沉降约 10 mm 时，根据图 6 最大拉应力与管—隧净距之间的拟合关系曲线，结合刚性管线强度控制标准，可确定该尺寸下矩形顶管隧道临近不同服务年限的地下刚性管线安全施工距离（见表 4），管线服务年限与安全施工距离之间的关系曲线如图 7 所示（由于灰口铸铁管与球墨铸铁管内径 0.5 m 工况无法确定是其最小安全距离，图中未展示此工况），刚性管线安全保护范围见表 5，表 4、表 5 空间位置均为上下平行。

表 4 矩形顶管施工安全距离

Table 4 rectangular pipe jacking construction safety distance /m

管线服务年限	钢管			灰口铸铁管		球墨铸铁管		
	2.0 m	1.0 m	0.5 m	1.0 m	0.5 m	2.6 m	1.0 m	0.5 m
新建	1.47	0.88	0.36	0.30	安全	1.32	0.53	安全
5	1.52	0.94	0.41	0.33	安全	1.34	0.64	安全
10	1.66	1.09	0.52	0.35	安全	1.35	0.69	安全
15	1.87	1.27	0.70	0.37	安全	1.36	0.72	0.35

表 5 顶管隧道施工刚性管线安全保护范围

Table 5 Safety protection range of underground rigid pipeline under construction of pipe jacking tunnel

服务年限	钢管	灰口铸铁管	球墨铸铁管
新建	(0.7~0.9)D	(0.3~0.4)D	(0.5~0.6)D
5	(0.8~1.0)D	(0.3~0.4)D	(0.5~0.6)D
10	(1.0~1.1)D	(0.4~0.5)D	(0.5~0.7)D
15	(1.0~1.4)D	(0.4~0.5)D	(0.6~0.7)D

注：D 指地下管线外径。

由图 7 可知：地下刚性管线的安全保护距离随着管线服务年限的增加呈增大趋势。相较于铸铁管，埋地钢管抗腐蚀能力较差，强度限值受服役年限影响较大，因此钢管安全保护距离受年限影响明显，且随着服务年限增长呈非线性增加；铸铁管的安全保护距离受年限影响不明显，基本呈线性增加，其原因可能是铸铁管抗腐蚀能力较强。同一材质，地下管线尺寸越大，所需的安全保护距离越大。

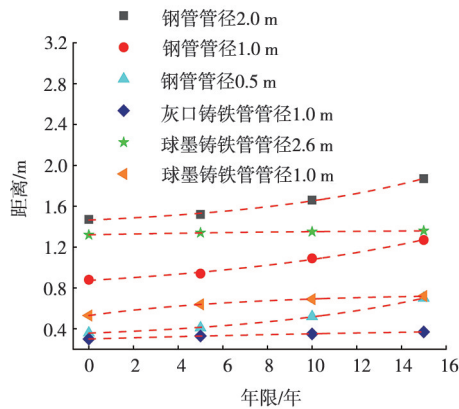


图7 管线服务年限与安全施工距离间的关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between pipeline service years and safe construction distance

5 结论

采用有限差分法，研究了 $2.6\text{ m} \times 2.4\text{ m}$ 的矩形顶管电缆隧道以上下平行的空间位置关系邻近管线施工对地下刚性管线变形及拉应力的影响，并确定了管线安全施工距离。通过对比分析，得出以下结论：

(1) 距施工掌子面距离越远，管线受扰动变形曲率越小；(2) 顶管隧道掌子面前后两侧 2.5 m 范围内，管线变形曲率异号且有较大的增长幅度，管线出现反弯点，最大变形曲率出现在靠近掌子面处；管线最大变形曲率随着管—隧间距的增大呈指数性衰减。

(2) 矩形顶管隧道尺寸一定时，同一材质的刚性管线管径越大，其最大拉应力越大；刚管最大拉应力随着管—隧间距的增大而呈非线性减小；管线与隧道净距一定、管线管径一定时，钢管的最大拉应力最大，球磨铸铁管其次，灰口铸铁管最小。

(3) 同种材质下，管线安全施工距离与管线尺寸、服务年限成正相关关系；钢管安全施工距离受年限影响明显，且随着服务年限增长呈非线性增加；铸铁管的安全施工距离受年限影响变化不明显，随服务年限增长基本呈线性增加。

参 考 文 献

[1] 魏纲, 吴华君, 陈春来. 顶管施工中土体损失引起的沉降预测 [J]. 岩土力学, 2007, 28 (2): 359-363.
 [2] ATTEWELL P. B., FARMER I. W. Ground settlement above shield driven tunnels in clay [Z]: Elsevier BV: 61.

[3] 王涛. 盾构隧道施工的环境效应影响研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
 [4] 魏纲, 朱奎. 顶管施工引起邻近地下管线附加荷载的分析 [J]. 岩土力学与工程学报, 2007 (增刊 1): 2724-2729.
 [5] 张治成, 林思, 王金昌, 等. 矩形管廊顶管施工对邻近管线的影 响研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42 (增刊 2): 244-249.
 [6] 张俊诚. 顶管施工对相邻平行管线的影响研究 [J]. 现代城市轨道交通, 2020 (9): 45-50.
 [7] 林晓庆, 廖建三. 大直径顶管施工对邻近垂直交叉地下管线的影 响分析 [J]. 广州建筑, 2011, 39 (5): 35-38.
 [8] 林晓庆. 矩形顶管施工对邻近地下管线的影 响分析 [D]. 广州: 广州大学, 2012.
 [9] 黄晓康, 汪维东, 朱大勇, 等. 地铁盾构施工对地下管线影 响的模型试验研究 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2018, 41 (6): 805-811.
 [10] 代志勇. 城市地下工程顶管法施工对既有构筑物影 响的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
 [11] 温锁林. 大断面矩形顶管施工对环境影 响研究 [J]. 中国市政工程, 2011 (5): 37-39, 89-90.
 [12] 黄茂松, 张宏博, 陆荣欣. 浅埋隧道施工对建筑物桩基的影 响分析 [J]. 岩土力学, 2006 (8): 1379-1383.
 [13] 吴勇. 矩形顶管施工的环境效应研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
 [14] 彭文丹. 盾构施工对 LNG 管线的影 响及施工优化控制研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
 [15] 张陈蓉, 蔡建鹏, 黄茂松. 基坑开挖对邻近地理管线的影 响分析 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32 (增刊 2): 154-157.
 [16] The american society of mechanical engineers. Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines; ASME B31G-2009 [S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2009.
 [17] V. Kucera, E. Mattsson. Atmospheric corrosion [M]. 1987.
 [18] R. SADIQ, B. RAJANI, Y. KLEINER. Probabilistic risk analysis of corrosion associated failures in cast iron water mains [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2004, 86 (1): 1-10.