

文章编号: 1671-6612 (2026) 01-122-09

# 热水管道与滑动支吊架间摩擦特性研究

刘增雨<sup>1</sup> 金 晖<sup>1</sup> 宋 星<sup>1</sup> 杨成青<sup>1</sup> 潘雅芬<sup>1</sup> 杜 涛<sup>2</sup>

(1. 中建三局集团有限公司 武汉 430075; 2. 长安大学建筑工程学院 西安 710061)

**【摘要】** 在热水管网中, 管道热膨胀对其安全性和可靠性具有重要影响。当管道发生热位移时, 其与支吊架之间产生摩擦, 而且二者之间的摩擦系数并不是一个定值。当接触面从静摩擦向动摩擦阶段转变时, 会经历一个高摩擦阶段(摩擦系数大于动摩擦系数), 导致支吊架所受的应力增大。研究通过管道与滑动支座接触面的摩擦实验发现: 新制管道与支座接触面的最大静摩擦系数达 0.53, 动摩擦系数为 0.48; 对管道与支座接触面进行表面打磨后, 最大静摩擦系数降为 0.35, 动摩擦系数降为 0.3。对于不同接触面, 最大静摩擦系数普遍大于动摩擦系数。利用 ABAQUS 研究了不同管道温度条件下处于高摩擦阶段管段长度的变化, 并分析了管径与补偿器轴向刚度对管道热位移量的影响, 结果表明: 管道温度、摩擦系数、管径以及补偿器轴向刚度均可改变管道热位移量, 进而影响处于高摩擦段管道长度。最后, 利用某机场航站楼实际供暖管道对研究结果进行了模拟验证。

**【关键词】** 摩擦系数; 高摩擦段; 管道温度; 补偿器轴向刚度

中图分类号 TU8 文献标志码 A

## Numerical Study on Friction Characteristics of Thermal Pipelines

Liu Zengyu<sup>1</sup> Jin Hui<sup>1</sup> Song Xing<sup>1</sup> Yang Chengqing<sup>1</sup> Pan Yafen<sup>1</sup> Du Tao<sup>2</sup>

(1. China Construction Third Engineering Bureau Group Co., Ltd, Wuhan, 430075;

2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an, 710061)

**【Abstract】** In thermal pipeline networks, thermal expansion of the pipeline significantly impacts its safety and reliability. When the pipeline undergoes thermal displacement, friction occurs between the pipeline and its supports, and the friction coefficient between them may not remain constant. As the friction transitions from static to kinetic, the system experiences a high-friction phase, during which the friction coefficient exceeds the kinetic friction coefficient, leading to an increase in stress on the supports. In this study, friction experiments on the contact surface between the pipeline and sliding supports revealed that the maximum static friction coefficient for a newly manufactured pipeline reached 0.53, while the kinetic friction coefficient was 0.48. After surface polishing of the pipeline-support contact area, the maximum static friction coefficient decreased to 0.35, and the kinetic friction coefficient decreased to 0.3. Subsequently, using ABAQUS, the study investigated the variation in the length of pipeline sections in the high-friction phase under different friction coefficients and pipeline temperature conditions. Additionally, the effects of pipe diameter and compensator axial stiffness on pipeline thermal displacement were analyzed. The results indicated that pipeline temperature, friction coefficient, pipe diameter, and compensator axial stiffness all influence the pipeline's thermal displacement, thereby affecting the length of the pipeline section in the high-friction phase. Finally, the research findings were validated through numerical simulations based on the actual heating pipeline system of an airport terminal.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号: 300102284102)

作者简介: 刘增雨(1987.07-), 男, 本科, 高级工程师, E-mail: 535471711@qq.com

通讯作者: 杜涛(1990.03-), 男, 博士, 副教授, E-mail: chddt@foxmail.com

收稿日期: 2025-07-03

【Keywords】 Friction coefficient; High-friction segment; Pipeline temperature; Axial stiffness of the compensator

## 0 引言

在水热、锅炉、蒸汽供应、供水及火力发电等生产过程中,广泛存在复杂的管道系统。支吊架作为管道系统的重要组成部分,其合理布置对管道系统的整体布局和运行稳定性具有至关重要的作用<sup>[1-6]</sup>,包括承载管道荷载、减小管道振动以及控制管道系统的变形,从而确保管道系统安全稳定的运行<sup>[7-11]</sup>。固定支架与滑动支架是支吊架系统的重要组成部分。其中,固定支架用于直接支撑并限制管道运动,防止管道与支承结构之间发生任何方向的相对位移,同时承受由管道荷载在各方向上产生的作用力。为了提高管道系统的灵活性和适应性,在两个固定支架之间通常布置多个滑动支架。由于管道受热胀冷缩影响会产生二次应力,导致管道发生热位移,并与滑动支架产生相对滑动,从而在滑动支架上引发摩擦力。在摩擦力作用下,部分管道荷载通过滑动支架得以传递,从而影响管道系统的受力状态<sup>[12-16]</sup>。当摩擦力过大时可能会导致支吊架系统破坏以及管道倒塌,造成人员伤亡与经济损失<sup>[17-26]</sup>。

关于摩擦定律,学者们已进行了广泛研究。1699年,Amontons通过实验提出了两条经典摩擦定律:(1)摩擦力 $F_f$ 与法向荷载 $P$ 成正比,即 $F_f = \mu P$ ,式中摩擦系数 $\mu$ 被定义为摩擦力 $F_f$ 与荷载 $P$ 的比值;(2)摩擦系数与接触面积无关。在此基础上,1781年Coulomb<sup>[27]</sup>结合前人的研究成果,并通过进一步实验,提出了另外两条摩擦定律:(1)摩擦系数与滑动速度无关;(2)最大静摩擦系数大于动摩擦系数。此外,Sahin等人<sup>[28]</sup>在干摩擦条件下对金属材料进行了摩擦实验,研究发现,大多数金属接触表面的摩擦系数随着工作表面粗糙度的增加而减小,这表明表面微观形貌对摩擦行为具有重要影响。

在供热管道系统中,管道通常采用碳素钢、低合金钢与耐热塑料<sup>[29]</sup>等材料,以满足其承载能力和耐久性要求。滑动支架的形式多种多样,常见类型包括滑托式滑动支架、滚轮式滑动支架、四氟乙烯滑动支架、球面滑动支架以及木托滑动支架等。根据库仑(Coulomb)摩擦定律,当摩擦作用发生时,最大静摩擦力大于动摩擦力,即最大静摩擦系数通

常高于动摩擦系数。在对钢材接触面摩擦系数的研究中,俞春辉<sup>[30]</sup>指出钢与钢之间的摩擦系数通常在0.15~0.2之间,而陈贇等人<sup>[31]</sup>研究认为,钢支架在钢垫板上滑动时的摩擦系数大于0.3。此外,谢仕芳等人<sup>[32]</sup>通过采用45钢与DC53钢组成摩擦副,对其摩擦学行为进行了研究。结果表明,摩擦系数可分为两个阶段:初始阶段,摩擦系数随滑动距离的增加而急剧上升(静摩擦阶段);随后,摩擦系数趋于稳定(动摩擦阶段)。在施加不同荷载条件的实验中,摩擦系数基本相近,均约为0.6。基于前人的研究可发现,对于钢-钢接触的摩擦系数尚无较为统一的认知,尤其是针对热力管道与滑动支架之间的摩擦特性研究仍然较为有限。在管道发生热膨胀时,两个固定支架之间的各个滑动支架所受的摩擦力并不完全相同。靠近固定支架的滑动支架与管道之间几乎无相对位移,因此该区域主要承受静摩擦力。而随着管道远离固定支架,管道与滑动支架间的相对位移逐渐增大,相应的滑动支架则主要受到动摩擦力的作用。根据Coulomb的摩擦定律,最大静摩擦系数大于动摩擦系数。当摩擦状态从最大静摩擦向动摩擦过渡时,会经历一个高摩擦阶段,此阶段的摩擦系数高于动摩擦阶段。在管道热膨胀过程中,部分管道与滑动支架处于该高摩擦阶段,尤其当管道直径较大、自重较大时,相应滑动支架所受摩擦力显著增加,从而导致生根处承受较大的剪应力。因此,确定高摩擦阶段在整个管道系统中的分布范围,对于优化支吊架设计、降低管道系统受力风险具有重要的工程意义。

补偿器作为管道系统中的关键工程设备,通过拉伸和压缩作用有效降低管道与支架结构的应力,从而确保管道的长期稳定运行。在供热管道中,轴向型波纹管补偿器被广泛应用,其中轴向刚度是影响其补偿性能的核心参数。因此,在本研究中,以管道与滑托式滑动支架之间的摩擦(即钢材之间的摩擦)为研究对象。通过钢-钢摩擦实验,分别测定新制钢构件与打磨后钢构件的最大静摩擦系数和动摩擦系数。随后,利用数值模拟方法,分析摩擦系数和管道温度对高摩擦阶段管道长度的影响,以及管径(公称直径DN)与补偿器轴向刚度对管道热位移量的作用机制。最后,结合工程案例进行

模拟验证,以评估研究结果的工程适用性,并为热力管道系统的优化设计提供参考。

### 1 摩擦力的确定

本研究通过构建一套实验装置,对钢管与管托之间的摩擦系数进行了实验测定。实验采用尺寸为 6m×0.8m 的钢制试验台,如图 1 所示,并在其上放置 DN150 镀锌钢管,确保其与管托形成标准接触。在试验台的一侧安装水平电动推杆,以匀速缓慢推动钢管在管托上滑动,电动推杆最小移动速度为 0.02mm/s,调节精度 0.01mm/s。在钢管上安装测力计实时监测水平推力,以测定摩擦力的变化。测力计测量误差优于 1%F.S,采样率最高达 1000 次/s。实验结果如图 2 所示。根据图 2 的结果,在静摩擦阶段,随着水平推力的增加,静摩擦系数由零逐渐增大,直至达到最大静摩擦系数,随后系统进入高摩擦阶段,在此阶段摩擦系数高于动摩擦系数。最终,当摩擦状态从静摩擦过渡至动摩擦时,摩擦系数趋于稳定。

实验结果表明:在新制管托上,最大静摩擦系数达到 0.53;当钢管位移量达到 20mm 后,摩擦系数趋于稳定,进入动摩擦阶段,此时摩擦系数为 0.48。对钢管与管托表面进行打磨处理后再次进行摩擦实验,摩擦系数明显降低,最大静摩擦系数降至 0.35,动摩擦系数降至 0.3。本实验结果提供了新制钢构件与打磨后钢构件的最大静摩擦系数及滑动摩擦系数,为支吊架系统摩擦特性的研究及热力管道设计优化提供了实验依据。

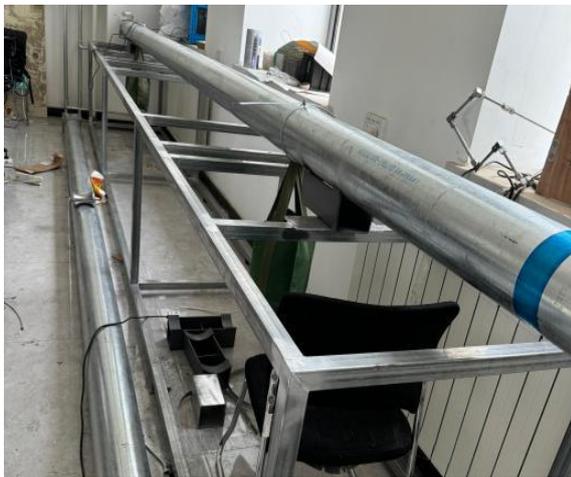


图 1 试验台布置

Fig.1 Experimental apparatus arrangement

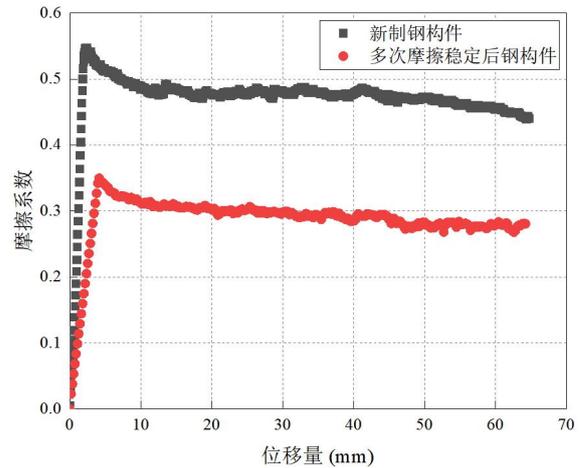


图 2 钢管-管托摩擦系数

Fig.2 Friction coefficient between steel pipe and pipe support

### 2 数值模拟

在本研究中,基于 ABAQUS 建立了管道-支吊架的有限元模型,以模拟不同工况下管道的热位移特性。为保证有限元模型的可计算性,作如下简化假设:管道及支吊架均视为均匀各向同性线弹性材料,弹性模量为 206GPa;泊松比为 0.3。管道布置了供水管道与回水管道,长度均为 300m;回水管道温度比供水管道温度低 10℃;固定支架设于管道左侧,补偿器设与距离固定支架 250m 处,滑动支架在固定支架与补偿器之间均匀布置。将实验测得的管道与支架管托的静-动摩擦系数应用于滑动支架与管道之间的摩擦接触关系。变量参数范围:管径范围为 DN150~DN600;根据 GB/T 12777-2019 《金属波纹管膨胀节》中力学可行性和系统安全性要求,中小型热水管网(以 DN450 管道为例)所配套的金属波纹补偿器轴向刚度一般在 300N/mm 至 800N/mm 之间,本研究取 150N/mm~750N/mm 作为试验参数范围。为了更准确地反映管道在不同温度及不同管径条件下的热位移变化,模型模拟了不同供热工况下,管道从常温(10℃)升温至不同温度过程中的热膨胀行为。具体工况设定如表 1 所示。忽略摩擦热、流体-结构耦合、自重挠度等局部几何不规则对热膨胀的微观影响。该模型可用于分析不同温度梯度、摩擦特性、补偿器刚度及管径变化对管道热位移及支吊架受力状态的影响,为供热管道系统的优化设计提供理论支撑。

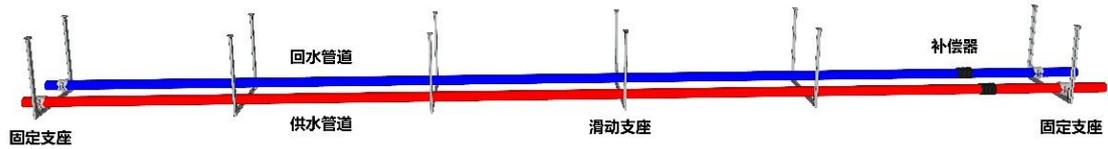


图 3 模拟结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of the simulation model

表 1 模拟工况表

Table 1 Simulation conditions

工况	供水管道温度 $T_{max}/^{\circ}\text{C}$	管径/mm	补偿器轴向刚度 $k(\text{N}/\text{mm})$	最大静摩擦-动摩擦系数
1	40	DN350	350	0.53-0.48
2	50	DN350	350	0.53-0.48
3	65	DN350	350	0.53-0.48
4	70	DN350	350	0.53-0.48
5	80	DN350	350	0.53-0.48
6	95	DN350	350	0.53-0.48
7	130	DN350	350	0.53-0.48
8	200	DN350	350	0.53-0.48
9	250	DN350	350	0.53-0.48
10	40	DN350	350	0.35-0.3
11	50	DN350	350	0.35-0.3
12	65	DN350	350	0.35-0.3
13	70	DN350	350	0.35-0.3
14	80	DN350	350	0.35-0.3
15	95	DN350	350	0.35-0.3
16	130	DN350	350	0.35-0.3
17	200	DN350	350	0.35-0.3
18	250	DN350	350	0.35-0.3
19	130	DN150	350	0.53-0.48
20	130	DN250	350	0.53-0.48
21	130	DN300	350	0.53-0.48
23	130	DN400	350	0.53-0.48
24	130	DN450	350	0.53-0.48
25	130	DN500	350	0.53-0.48
26	130	DN600	350	0.53-0.48
27	130	DN450	150	0.53-0.48
28	130	DN450	350	0.53-0.48
29	130	DN450	550	0.53-0.48
30	130	DN450	750	0.53-0.48

### 3 结果分析

#### 3.1 温度对摩擦特性的影响

图 4 显示了 DN350 供水管道在不同温度

(40℃、70℃、130℃、250℃) 条件下, 各位置处新制管道与滑动支架的摩擦系数随位移量的变化情况。当供水管道温度为 40℃ 时, 距离固定支架

247.5m 处 (即  $x=247.5m$ ) 的管道最大位移量为 0.08m。结合摩擦实验结果, 可将固定支架与补偿器之间的管段根据摩擦特性划分为三个阶段: (1) 静摩擦阶段 (固定支架至 8.5m 处): 此段管道与滑动支架之间未发生相对滑动, 摩擦力处于静摩擦状态。(2) 高摩擦阶段 (18m~171m 处): 此段管道与滑动支架间的摩擦力高于动摩擦阶段, 处于

最大静摩擦向动摩擦过渡的高摩擦区。(3) 动摩擦阶段 (171m~补偿器处): 此段管道进入稳定滑动状态, 摩擦系数趋于稳定, 表现出动摩擦特性。进一步分析表明, 管道系统中的高摩擦段长度随管道温度升高逐渐缩短, 而管道最大位移量随管道温度升高显著增加。具体数据如表 2 所示。

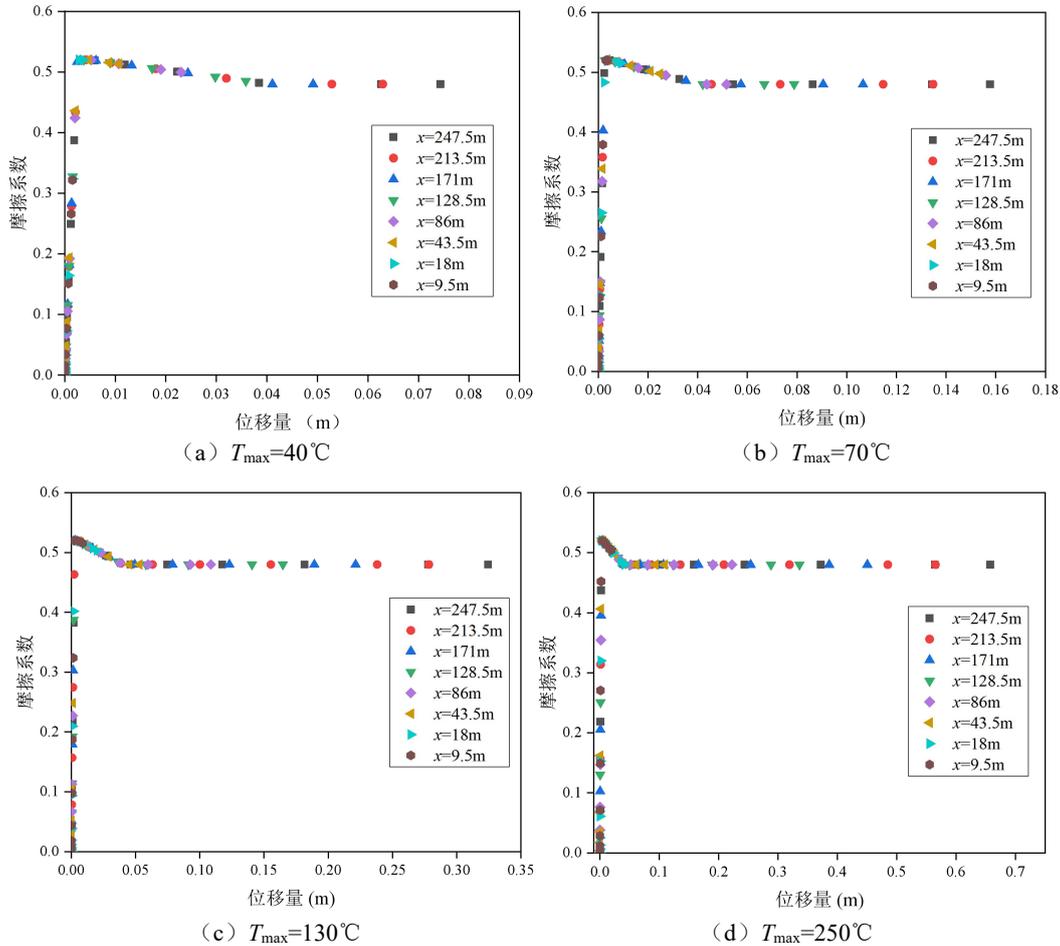


图 4 DN350 管道不同温度时不同管段位置处摩擦系数随位移的变化

Fig.4 Friction coefficient versus displacement at different sections of a DN350 pipeline under different temperatures

表 2 管道温度对高摩擦段影响

Table 2 Effect of pipe temperature on high-friction sections

管道温度 $T_{max}/^{\circ}C$	高摩擦段长度/m	管道最大位移量/m
40	153	0.08
70	71	0.163
130	34	0.334
250	10	0.684

从表 2 结果可见, 管道温度越高, 高摩擦阶段的管道长度越短; 管道温度越低, 高摩擦阶段的管

道长度越长, 导致更多的滑动支架处于高摩擦段。

图 5 进一步展示了高摩擦段占比  $\sigma$  (高摩擦段长度与管道总长度的比例) 随管道温度的变化关系。结果表明: 当管道温度低于  $95^{\circ}C$ , 高摩擦段占比超过 10%, 且温度对其影响较大。例如, 当管道温度为  $40^{\circ}C$  时, 高摩擦段占比高达 52.3%, 即超过一半的滑动支架处于高摩擦阶段。当管道温度超过  $95^{\circ}C$ , 温度对高摩擦段占比的影响逐渐减弱。当管道温度超过  $200^{\circ}C$ , 高摩擦段占比降至 5% 以下, 此时温度变化对高摩擦段的影响趋于稳定。最

终, 通过拟合分析得到高摩擦段占比随管道温度变化的数学模型, 具体拟合曲线如下:  $\sigma=149.5e^{(-0.037T_{max})}+4.1$ 。结果表明, 管道温度对高摩擦段长度及滑动支架受力状态具有显著影响, 在低温供热系统中应重点关注滑动支架的高摩擦问题, 以优化支吊架设计, 减少热膨胀对管道系统的影响。

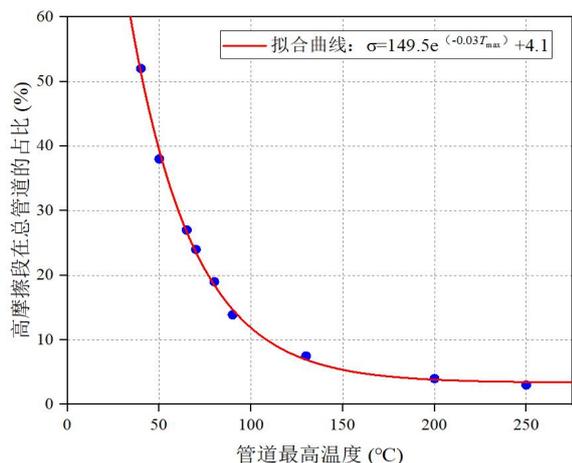


图 5 DN350 不同管道温度时高摩擦段长度在总管道的占比

Fig.5 Percentage of high-friction segment length along the DN350 pipeline at different temperatures

### 3.2 摩擦系数的影响

在工程实践中, 管道系统的钢构件最初均为新制钢构件, 其表面粗糙度较大, 导致摩擦系数较高。然而, 实验表明, 经过打磨处理后, 钢构件表面粗糙度降低, 相应的摩擦系数减小。图 6 显示了新制钢构件与打磨后钢构件在不同供水管道温度条件下的高摩擦段占比, 实验结果表明, 随着管道温度的增加, 高摩擦段占比逐渐减小。这一现象的主要原因在于, 高摩擦段占比与管道的热位移量直接相关。根据实验数据: 管道热位移量在 2.5mm~20mm 时, 管道处于高摩擦阶段。当管道温度升高时, 管道的热膨胀位移增加, 使得高摩擦段占比减小。换言之, 高摩擦段的长度由管道温度及热膨胀行为决定, 温度越高, 热位移量越大, 管道更容易进入动摩擦阶段, 从而减少高摩擦段占比。图 6 进一步表明: 打磨后的钢构件在所有温度条件下的高摩擦段占比均小于新制钢构件。当管道与支架间的摩擦系数降低时, 高摩擦段占比相应减少。这一现象可归因于以下机制:

(1) 摩擦系数降低→管道与支架间摩擦力减

少→摩擦力对热位移的限制减弱→管道热位移量增加。

(2) 管道热位移量增加→管道更快进入动摩擦阶段→高摩擦段占比减少。随着管道-滑动支架间的静-动摩擦系数减小, 高摩擦段占比逐渐降低。由于新制钢构件的摩擦系数高于打磨后钢构件, 结果显示新制钢构件的高摩擦段占比始终大于打磨后钢构件。因此, 在热力管道系统设计中, 合理控制管道-滑动支架间的摩擦特性, 特别是通过打磨处理降低摩擦系数, 不仅能提高支吊架系统的稳定性, 还能优化管道热膨胀位移, 减少高摩擦段支架的数量, 提高整体结构性能。

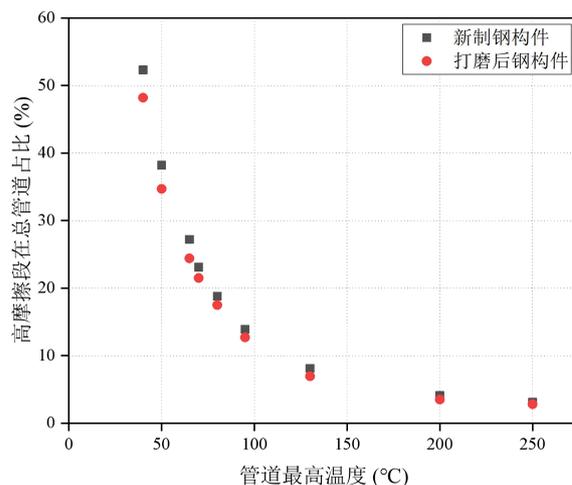


图 6 不同摩擦系数时高摩擦段长度在总管道的占比

Fig.6 Percentage of high-friction segment length in the total pipeline for different friction coefficients

### 3.3 管径与补偿器影响

图 7 展示了供水管道温度为 130℃ 时, 管径 DN150 至 DN600 (工况 19~工况 26) 范围内的管道最大位移量变化趋势。研究表明, 管径越大, 管道的最大位移量越大。这一现象可从热膨胀的物理特性解释: 管道属于各向同性固体, 受热后会在轴向和径向发生膨胀。对于各向同性材料, 体积膨胀系数是线性膨胀系数的 3 倍。管道径向长度远小于管道轴向长度, 在受热膨胀过程中, 轴向热膨胀占主导。因此, 随着管径增加, 管道的最大热位移量也相应增加。图 8 显示了不同管径管道在相同支吊架位置的摩擦系数随位移量的变化。实验与模拟分析结果表明: 管径增大时, 管道最大热位移量随之增大。基于无量纲分析, 得到了管道最大热位移量随管径变化的拟合曲线:  $\varepsilon=0.0021DN+9.9$ 。由于

管道最大热位移量与高摩擦段长度呈反比，因此：管径越大，处于高摩擦阶段的管道长度越小。管径越小，高摩擦段长度越大，即更多滑动支架处于高摩擦段。

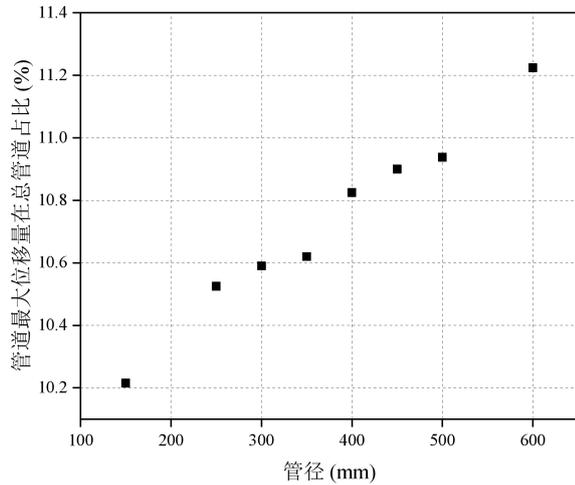


图 7 管道最大位移量随管径的变化

Fig.7 Maximum pipeline displacement versus pipe diameter

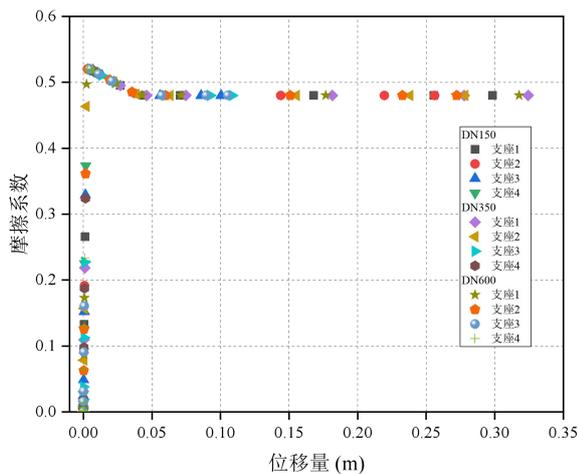


图 8 不同管径管道的摩擦系数

Fig.8 Friction coefficient versus pipe diameter

图 9 显示了 DN450 供水管道（130℃）在不同补偿器轴向刚度下的最大位移量变化趋势。研究表明：补偿器的轴向刚度与无量纲管道最大位移量呈线性反比，即：轴向刚度越大，管道最大位移量越小。轴向刚度越小，管道最大位移量越大。进一步结合管道位移量与高摩擦段长度的反比关系，可得：补偿器轴向刚度越大，高摩擦段长度越小。补偿器轴向刚度越小，高摩擦段长度越大。

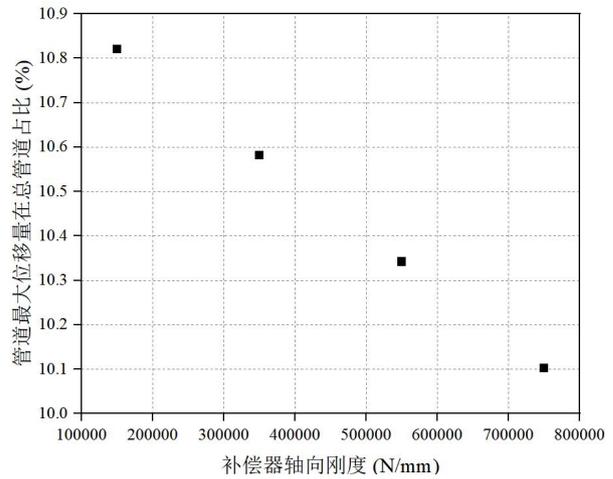


图 9 管道最大位移量随轴向刚度的变化

Fig.9 Maximum pipeline displacement versus axial stiffness

### 3.4 工程案例析

本项目以某机场航站楼供热管道系统为背景，模拟了管道系统中两根固定支架间的管道应力分布，此段由 3 根供水管道和 4 根回水管道组成，总长度 45m，支吊架系统包括 10 组支吊架。管道布局及支吊架配置如下：固定支架左右两侧各 1 根，即图 10 中用于约束管道的整体位移。滑动支架：固定支架之间设置 8 组滑动支架，即图 10 中滑动支架（一）至（八）允许管道发生热膨胀位移；管道管径（从大到小）：DN500、DN300、DN250、DN200；支吊架类型：2 组双拼固定支架、2 组双拼门型滑动支架、6 组普通滑动支架；供热工况：供水管道温度：60℃，回水管道温度：50℃。在研究过程中，对支吊架结构受力情况进行分析，并对支座部分进行简化，假设其完全固定。同时，将实验得到的新制钢构件与打磨后钢构件的摩擦系数作为实际工程中的摩擦参数，进一步探讨摩擦系数对支吊架受力状态及系统安全性的影响。图 10 展示了管道发生热位移后，支吊架结构的应力分布，结果表明：在单个支吊架结构中，生根处所受的应力最大。因此，在实际工程中需要对支吊架根部进行额外加固，以提高整体结构稳定性。固定支架采用双拼结构时，未出现应力过大的情况，结构稳定性更优。滑动支架（一）与（二）在新制钢构件摩擦系数较大时，所受应力也较大，作为对比，双拼门型滑动支架（三）与（六）所受应力较小，因此建议对普通滑动支架进行加固设计。此外，图 10

中(a)图与(b)图比较可以发现:新制钢构件(较大摩擦系数)情况下,滑动支架的应力显著大于打磨后钢构件的情况。说明摩擦系数较大时,普通滑动支架承受更高的应力,应进行额外补强。图 11 进一步分析了滑动支架(三)的摩擦系数随管道热

位移变化的关系:新制钢构件(摩擦系数 0.508):滑动支架(三)处于高摩擦段。该支架承受较大摩擦力,可能影响其长期稳定性。打磨后钢构件(摩擦系数 0.3):滑动支架(三)处于动摩擦阶段,摩擦系数恒定在 0.3。受力更加均匀,系统更稳定。

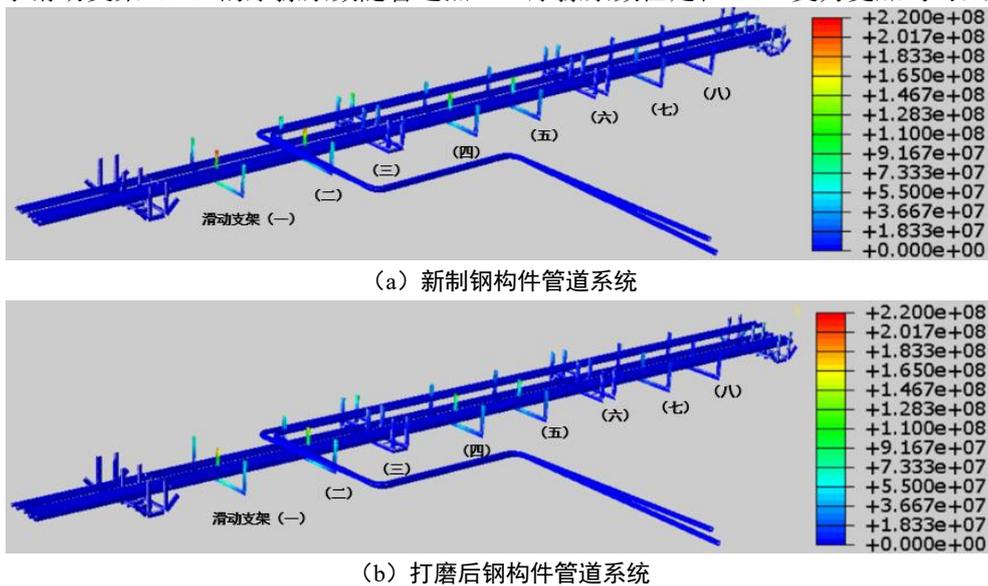


图 10 管道系统应力云图

Fig.10 Stress contour plot of the pipeline system under thermal loading

基于工程模拟有以下优化建议: (1) 通过打磨处理降低管道与滑动支架的摩擦系数以减少滑动支架高摩擦段的数量; (2) 对支吊架生根部位受力最大, 建议加强固定支架及滑动支架根部结构, 避免局部结构疲劳或损坏; (3) 双拼固定支架比普通固定支架更稳定, 在低温环境下, 建议采用双拼固定支架以减少应力集中。

#### 4 结论

(1) 当管道与滑动支架发生摩擦时, 在静摩擦阶段向动摩擦阶段转变时, 会经历高摩擦阶段, 该阶段的摩擦系数高于动摩擦系数。管道热位移量与高摩擦段的管道长度呈反比, 即: 管道热位移量越大, 高摩擦段长度反而越小。管道温度直接影响热位移量, 进而影响高摩擦段占管段总长度的比值。本文提出了管道温度对高摩擦段占比的预测模型, 可用于优化管道设计, 减少高摩擦区域, 提高管道系统的稳定性。

(2) 新制钢构件的摩擦系数较大, 而打磨后钢构件的摩擦系数较小。当摩擦系数较大时, 滑动支架对管道的摩擦力增大, 抑制管道热位移, 使管道热膨胀受限。管道热位移量减小, 导致高摩擦段占比增大。提前打磨钢构件可降低管道与滑动支架之间的摩擦系数, 减少处于高摩擦段的滑动支架数量, 从而降低滑动支架的应力, 提高系统安全性。

(3) 相较于管道温度变化, 管径与补偿器轴向刚度对管道热位移量的影响较小。管径与补偿器轴向刚度是影响高摩擦段占比的次要因素。管径增大, 管道最大热位移量增大, 但对高摩擦段占比的

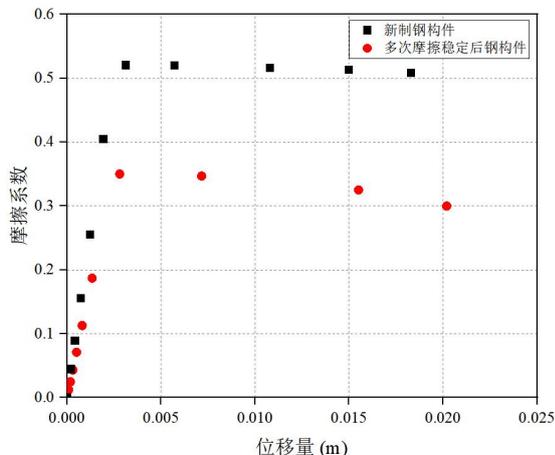


图 11 左三支架摩擦系数随位移的变化

Fig.11 Friction coefficient change with displacement at left support No.3

影响相对较弱。轴向刚度越大,管道热位移量越小,高摩擦段占比相应增大,但影响程度不及管道温度变化显著。

### 参考文献:

- [1] 袁洋.大型空调水管在不同支吊架上的有限元仿真分析[J].建筑施工,2022,44(1):185-187.
- [2] DL/T 5366-2014,火力发电厂汽管道应力计算技术规定[S].北京:中国电力出版社,2014.
- [3] 郑明宇,周坤,胡永胜.GB/T44557-2024《制冷系统及热泵挠性管道元件和非金属管件要求和分类》的解读[J].制冷与空调,2025,25(5):6-10,107.
- [4] 王耀南.中央空调水系统水锤效应对管道固定支架的影响及破坏分析[J].制冷与空调,2020,20(11):74-77.
- [5] 左宜.悬臂式铝合金支吊架受力性能研究[D].西安:西安建筑科技大学,2020.
- [6] 侯和涛,Rebecca Fikre EDO,程天顺,等.不同连接节点的重型管道支吊架承载性能研究[J].建筑结构,2024,54(20):76-83.
- [7] 孙彬,张雪芳,张晋峰,等.装配式支吊架抗震性能试验研究[J].振动、测试与诊断,2022,42(4):797-804,831.
- [8] GB/T 12444-2006,金属材料磨损试验方法试环-试块滑动磨损试验[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [9] GB/T 17116.1-2018,管道支吊架第1部分:技术规范[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [10] 吴水平.长距离输送管道管径的优化[J].山东化工,2020,49(16):147-149.
- [11] 孙颖,吕超.基于有限元的输气管道热应力及影响因素分析[J].西华大学学报,2018,37(2):19-22.
- [12] 李丹丹,任继来,刘永旭.某660MW电厂主蒸汽及再热蒸汽管道管径选择分析[J].吉林电力,2022,50(1):37-41.
- [13] 石祥文,孙中元,丁鑫,等.某高参数主蒸汽管道膨胀异常原因分析[J].化工设备与管道,2025,62(3):53-61.
- [14] 汤志平,金昊鹏,朱晋清.空调室外机电机支架振动破裂优化分析[J].制冷与空调,2022,22(5):28-32.
- [15] 杨木和,周鹏,王健.200m以上超高层建筑空调系统设计现状概述[J].制冷与空调,2023,23(10):1-6.
- [16] 宋炜.基于AutoPIPE的热力管道优化设计[J].区域供热,2024,(1):41-45.
- [17] 常向东,彭玉兴,朱真才,等.重载传动钢丝绳摩擦磨损演化机理及服役性能退化特性研究[J].摩擦学学报,2023,43(12):1393-1405.
- [18] 王友君,穆广友,李元开,等.有轨电车空调系统单模块送风管道优化设计[J].制冷与空调,2022,22(10):29-32.
- [19] 陈瑞武,朱占,沈宝林.涡旋压缩机支架焊点开裂的失效分析[J].制冷与空调,2022,22(12):60-63.
- [20] 李波,黄杰,杨韬,等.20Cr13不锈钢高温微动摩擦磨损特性研究[J].摩擦学学报,2024,44(4):494-508.
- [21] 李亚东,鄂宏伟,刘煜,等.退火工艺对无间隙原子钢组织与摩擦特性的影响[J].理化检验(物理分册),2024,60(10):37-41.
- [22] 苗庆伟,王淮,常娅娜,等.PE-RTII直埋供热管道热膨胀的分析[J].煤气与热力,2020,40(8):6.
- [23] 安慧,安付立,韩光辉,等.发电机组管道支吊架常见问题分析及处理[J].热力发电,2012,41(11):80-82.
- [24] 胡晏明.超高强度钢B1500HS热冲压成形过程中摩擦特性研究[D].镇江:江苏大学,2020.
- [25] 尹存宏.板条马氏体钢摩擦磨损特性及磨损—疲劳行为研究[D].贵阳:贵州大学,2019.
- [26] 林国樑.选区激光熔化成形不锈钢材料性能及摩擦特性研究[D].杭州:浙江大学,2019.
- [27] Dowson D. History of tribology [M]. Longman, London, 1979.
- [28] SAHIN M, CETINARSLAN C S. Effect of surface roughness on friction coefficients during upsetting processes for different materials[J]. Materials & design, 2007,28(2):633-640.
- [29] 文卓,李岩,冯继蓓,等.T/CECS 904-2021 供热管网预制保温塑料管道工程技术规程解读[J].暖通空调,2022,52(3):48-52.
- [30] 俞春辉.给排水水平单管柔性抗震支吊架设计及性能研究[D].南京:东南大学,2022.
- [31] 陈贇,朱璇.管廊内热力和空调管道支架研究[J].工程建设与设计,2020(1):159-161.
- [32] 谢仕芳,张林伟,王武荣.45钢与DC53钢的干滑动摩擦学行为[J].材料热处理学报.2015,36(6):222-227.