# 高压天然气管线站场关键位置壁厚影响因素 及监测研究

## 许 钊\*,李 晖,崔世界,袁建伟,赵 兴,穆建圣

河北省天然气有限责任公司,河北 石家庄

收稿日期: 2024年5月17日; 录用日期: 2024年6月18日; 发布日期: 2024年6月29日

## 摘要

近年来,天然气管道的安全平稳运行成为整个社会关注的焦点问题。长输天然气管道大多为大口径、高 压力管道,故其安运行全显得尤其关键。在高压天然气管输行业中,关键位置(弯头和三通)的壁厚由于 气体的长期冲蚀会减薄,继而产生严重后果。故其壁厚监测是一项重点工作,但关键位置的影响因素、 检测范围及监测的周期在行业内均没有相关的标准。为了研究上述内容,笔者应用Fluent仿真软件建立 模型,然后结合现场数据进行模型修正模型,利用模型对关键位置的影响因素逐一进行分析,并选取较 重要的影响因素;对不同管径、曲径比的检测位置受力区域进行研究并总结规律,并以此为依据确定检 测范围及监测周期。以上研究成果可给现场运行人员日常工作提供参考,继而保证长输天然气管道安全 平稳运行。

#### 关键词

长输天然气,影响因素,检测位置,监测周期,受力区域

## The Study on Influencing Factors and Monitoring of Wall Thickness at Key Locations of High-Pressure Natural Gas Pipeline Station

#### Zhao Xu\*, Hui Li, Shijie Cui, Jianwei Yuan, Xing Zhao, Jiansheng Mu

Hebei Natural Gas Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei

Received: May 17<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jun. 18<sup>th</sup>, 2024; published: Jun. 29<sup>th</sup>, 2024 \*通讯作者。

**文章引用:** 许钊, 李晖, 崔世界, 袁建伟, 赵兴, 穆建圣. 高压天然气管线站场关键位置壁厚影响因素及监测研究[J]. 石油天然气学报, 2024, 46(2): 218-230. DOI: 10.12677/jogt.2024.462028

#### Abstract

In recent years, the safe and stable operation of natural gas pipelines has become the focus of the whole society. Most long-distance natural gas pipelines are large-diameter and high-pressure pipelines, so their safe operation is particularly critical. In the high-pressure natural gas transmission industry, the wall thickness of key positions (elbows and tees) will be reduced due to the long-term erosion of gas, which will lead to serious consequences. Therefore, its wall thickness monitoring is a key work, but there are no relevant standards in the industry for the influencing factors, detection scope and monitoring period of key positions. In order to study the above contents, the author uses Fluent simulation software to build a model, and then combines the field data to modify the model. The model is used to analyze the influencing factors of key positions one by one, and select the more important influencing factors; the stress area of different pipe diameters and curvature ratios is studied and summarized, and the detection range and monitoring period are determined based on this. The above research results can provide reference for the daily work of field operators, and then ensure the safe and stable operation of long-distance natural gas pipelines.

## **Keywords**

Long-Distance Natural Gas, Influencing Factors, Detection Position, Monitoring Period, Stressed Area

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u> [cc] ① Open Access

## 1. 引言

管道壁厚检测常见于油气田集输管道和含水量较多的天然气管道。对于长输天然气管道,由于其输送的天然气大多经过净化,且在每个站场均有过滤分离器进行除水,故国内外很少有人对其壁厚进行研究,关于其壁厚检测也缺少相关的标准。长输天然气管道大多为大口径、高压力管道,一旦泄漏就会产 生严重后果。故很有必要对长输天然气站场关键位置的壁厚展开相关研究。

纵观相关参考文献,研究主要集中在管道的弯头处。杨德成等研究固体颗粒对下弯管的冲蚀规律及 最大冲蚀位置,结果表明:颗粒速度和冲蚀速率呈指数关系;管径增大会减小弯管的冲蚀速率,二者呈 现指数关系;颗粒直径基本不影响最大冲蚀位置[1];宋晓琴等依据现场实际工况对输气管道中 90°弯头 冲蚀磨损失效问题进行研究,结果表明:集输压力越大,弯头冲蚀磨损程度减轻;重力会影响弯头冲蚀 磨损程度以及磨损区域;集输管径越小,颗粒直径越大时,冲蚀磨损越严重[2];季楚凌等对光滑内壁及 横槽、纵槽和凹坑 3 种仿生内壁弯管的冲蚀磨损进行模拟研究。结果表明:在相同条件下,采用仿生表 面可以显著提高弯管的耐磨性,且不同表面形态加厚弯管的耐磨性能由大到小依次为横槽形、纵槽形、 凹坑形、光滑形[3];郑云萍等利用 Fluent 模拟各项影响因素与弯管冲蚀位置和冲蚀程度的关系,得出了 气体对弯管内壁大面积冲蚀,金属屑在此区域内再局部冲蚀的结论;根据不同角度弯头冲蚀情况不同在 保护部位与效力上提出了"定侧面,大面积,有侧重"的防护思路[4];户林深入研究高温高压高固含率 流体输送管道壁厚磨损规律及其在线监测。利用 Fluent 软件对不同管径和弯径比的弯管进行模拟,结果 表明,弯径比不同,弯管的磨损区域与磨损量有较大差异;同一管径时,随着弯径比增大,最大磨损量 减小[5]。黄坤等为了提高天然气输送管道 90°弯管的耐磨性能,提出了 1 种三段弯曲式弯管,通过对弯 管弯曲段进行三段式改进来减小弯管中二次流的大小,优化弯管内的流场,改善弯管的冲蚀磨损状况[6]; 黄勇等研究反循环钻进中水龙头弯管磨损失效问题,结果表明: 气固两相流经过弯管时,岩屑与壁面在 弯管 30°,90°和 150°转角位置存在碰撞集中区,对应形成 3 个壁面磨损区,其中 30°转角位置磨损最严重, 形成刺漏点[7];梁光川等通过 FLUENT 软件,采用有限体积法建立数学模型,针对不同流速的情况,分 析压力,速度等流动参数的变化情况,直观形象地分析了流场对弯头冲蚀造成的影响,验证了弯头处较 易腐蚀的部位,为研究流体力学因素对管道冲蚀的影响提供了依据[8];曾涌捷等利用计算流体动力学 (CFD)对天然气管道弯头的冲蚀失效机理进行了研究,分析了弯头的速度场和压力场,得出了弯头大弧面 处为危险面的结论.提出了避免和减缓弯头冲蚀失效的预防措施[9]。

笔者应用 Fluent 仿真软件[10]-[14]建立模型,然后利用压力感应器收集现场数据进行模型修正。利 用模型对关键位置的影响因素逐一进行分析,并选取较重要的影响因素;对不同管径、曲径比的检测位 置受力区域进行研究并总结规律,并以此为依据确定检测范围及监测周期。以上研究成果可给现场运行 人员日常工作提供参考,继而保证长输天然气管道安全平稳运行。

## 2. 相关研究过程介绍

(1) 模型介绍

在高压天然气站场,直管段的管壁受力较小,不是研究重点。而三通和弯头这两个改变气流方向的 位置受力较大,故其是研究重点。



Figure 1. Schematic diagram of elbow structure 图 1. 弯头结构示意图



Figure 2. Schematic diagram of tee structure 图 2. 三通结构示意图

本文利用 Ansys Workbench 软件[15]-[17]的 Desgin Modeler 模块[18] [19]进行几何模型的绘制,绘出的弯头模型以及三通模型,见图 1 和图 2。

通过 Ansys Workbench 软件的 Mesh 模块利用 Proximity and Curvature 尺寸函数将两类仿真模型进行 网格划分,并且在边界处设置膨胀层,控制好网格的平均质量。

模拟过程中,入口和出口边界条件均设置为压力入口和压力出口,流体的相关边界条件根据具体工况的参数进行设置,气相材料选用甲烷,标况下甲烷密度为 $\rho = 0.714 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 1.087 \times 10^{-5} \text{ kg/(m·s)}$ 。以现场测试数据反馈模型,砂粒粒径为 0.4 mm 接近实际数据。古本研究采用该砂粒粒径。

(2) 影响因素研究

1) 流体流速对于冲蚀的影响规律

在建立好的冲蚀仿真模型中,设置砂粒质量流量设为1×10<sup>-3</sup> kg/s,并将模型入口处的流体流速分别 设置为5 m/s、7 m/s、9 m/s、11 m/s、13 m/s,得到结果见图 3。

可以看出,冲蚀最严重点即监测点的最大冲蚀速率随着流体流速的增加而增大。在流速较小时,最 大冲蚀速率增加较慢,在流速较大时,最大冲蚀速率迅速增大,近似呈现指数型增长。



Figure 3. Fluid flow rate and maximum erosion rate curve 图 3. 流体流速与最大冲蚀速率曲线



**Figure 4.** Pipeline diameter and maximum erosion rate curve 图 4. 管道管径与最大冲蚀速率曲线

在建立好的冲蚀仿真模型中,质量流量设为0.02 kg/s,入口流体流速设为9 m/s 将几何模型的弯头直

<sup>2)</sup> 管径对于冲蚀的影响规律

径依次设为150mm、200mm、250mm、300mm、400mm、500mm、900mm,模型其他参数均保持不变,模拟计算后得到的结果与最大冲蚀速率的关系见图4。

由该图可知,随着管道管径的增加,冲蚀速率迅速减小,而当管径由 150 mm 增加到 400 mm 时,冲 蚀速率由 1.825×10<sup>-5</sup> kg/m<sup>2</sup>·s 减小到 4.511×10<sup>-6</sup> kg/m<sup>2</sup>·s,变化幅度很大,而管径超过 400 mm 时,冲蚀 速率处于比较低的水平,随着管径继续增大,冲蚀速率下降非常缓慢。

3) 砂粒质量流量对于冲蚀的影响规律

在建立好的仿真冲蚀模型中,保持入口速度9m/s不变,砂粒质量流量逐次设置为0.02kg/s、0.04kg/s、0.06kg/s、0.08kg/s、0.1kg/s,其他参数保持不变,分别对不同尺寸的管道模型进行数值模拟,所得结果最大冲蚀速率与砂粒质量流量之间的关系见如图5。

砂粒的质量流量与冲蚀速率的关系如图所示,可以知道随着砂粒的质量流量增加,冲蚀速率也呈线 性增长,这是因为随着砂粒流量的增加,单位时间里砂含量增大,与管壁碰撞的数目增多,导致管壁的 磨损量增加。并且还可得出随着管径的增大,冲蚀速率随砂粒流量增加的递增速度逐渐降低,所以在管 径较小时,砂粒流量对于冲蚀速率的影响尤为明显。



**Figure 5.** Sand mass flow rate and maximum erosion rate curve 图 5. 砂粒质量流量与最大冲蚀速率曲线



**Figure 6.** Model and maximum erosion rate curve for different bend guides 图 6. 不同弯管导向的模型与最大冲蚀速率曲线

4) 弯管导向对于冲蚀的影响规律

在建立弯管仿真模型时,根据某站场的弯头实际安装方式,建立了弯管导向为水平入口、垂直向上入口、垂直向下入口的仿真模型,其中第一组模型为水平入口、垂直向下出口;第二组模型为垂直向下入口、水平出口;第三组模型为水平入口、垂直向上出口;第四组模型为垂直向上入口、水平出口;第 五组模型入口出口均为水平。其他参数设置保持不变,进行仿真模拟后得到结果见图6和图7。

图 6 展示了弯管的出入口导向对于冲蚀速率的影响,可以发现冲蚀速率的变化并不大,在垂直向下入口、水平出口的情况下弯管的冲蚀速率最大,在垂直向上入口、水平出口的条件下弯管冲蚀速率最小,这是由于重力加速度的作用增大或减小了砂粒的入射速度。



(c)

**Figure 7.** Erosion rate under different bend guides. (a) Erosion of elbows at horizontal inlet and vertical downward outlet; (b) Elbow erosion at vertical downward inlet and horizontal outlet; (c) Elbow erosion at horizontal inlet and outlet **图 7.** 不同弯管导向下的冲蚀速率。(a) 水平入口、垂直向下出口的弯头冲蚀情况; (b) 垂直向下入口、水平出口的弯头冲蚀情况; (c) 水平入口、水平出口的弯头冲蚀情况

由图 7(a)~(c)可以得出,弯管导向对于冲蚀形貌的影响不明显,弯头上最大冲蚀点均出现在弯头出口处。

5) 弯径比对于冲蚀的影响规律

建立冲蚀仿真模型时,保持入口速度9m/s不变,改变几何模型的弯径比(R/D)分别为1.5、2、3、4、5、6、7,其余边界条件设置依旧保持不变,在分别进行数值模拟后得到结果见图8。

图 8 给出了弯头的弯径比对于冲蚀速率的影响规律,冲蚀速率随着弯径比的增加而增大,且冲蚀速 率减小速度会随着弯径比增大而减慢。







**Figure 9.** Curve of bending angle and maximum erosion rate 图 9. 弯曲角度与最大冲蚀速率曲线

6) 弯曲度对于冲蚀的影响规律

根据实际情况建立了弯曲角度依次为90°、120°、135°的弯头仿真模型,保持粒径0.4 mm、流体流速9 m/s、弯径比1.5 等其他参数条件不变,进行数值模拟后可得结果见图9 和图10。

图 9 和图 10 给出了弯管弯曲速度对于冲蚀速率的影响关系,从图中曲线可知,从 90°弯头开始随着弯曲角度增大,最大冲蚀速率随之减小。

综上所述,管径较小(400以下)时,流速、管径、砂粒流量和弯曲度主要影响因素;管径较大(400以上)时,流速和弯曲度主要影响因素。



Figure 10. Elbow erosion at 90°, 120°, and 135° bending angles 图 10.90°、120°、135°弯曲角度的弯头冲蚀情况

## 3. 关键位置受力区域规律研究

## 3.1. 弯管应力环向检测结果

将振弦式应变仪安装在站场弯管上对表面应力进项检测,在 90°的压缩机出口弯头进项检测时,设置 了 13 个点位沿外拱面轴向 10°~70°每间隔 5°设置一个应力检测点,用来检测振动以计算应力结果;对于 120°的汇管入口弯头,沿外拱面轴向 20°~70°每间隔 5°设置检测点,共 11 个;而对于 135°的空冷器出口 弯头,沿外拱面轴向 20°~80°每间隔 5°设置检测点,共 13 个。每个点检测 10 分钟,间隔 10 秒检测一次, 每个点所读取振动频率模数的平均值如表 2 所示,经过计算后的结果见图 11。

可以看出站场弯管应力在轴向不同角度上的分布规律,可以得出 90°弯头表面应力集中于 30°到 60°; 对于 120°弯头表面应力集中于 40°到 70°;对于 135°弯头,表面应力变化不大,主要集中为 35°至 65°(以 天然气进口为准)。



Figure 11. Axial stress detection results of elbows at different angles 图 11. 各角度弯头轴向应力检测结果

### 3.2. 弯管应力轴向检测结果

以 90°、120°、135°弯头上与水平方向夹角 45°的位置为基准,沿管道环向检测弯管的表面应力,将 振弦式应变仪安装在距离中轴线 20~120 mm 的距离范围内,每个检测点间距为 20 mm,每种弯头共 6 个 点位,同样每点每间隔 10 秒记录一次读数并检测 10 分钟,所得振动频率模数的平均值,经过计算后得 到的应力值见图 12。



**图** 12. 各角度弯头环向应力检测结果

可以得出站场弯管的表面应力在环向上的分布情况,从中轴线到管道两侧,均呈现先增大后减小的 趋势,这与流体的冲击与颗粒的冲蚀有一定的关系,其结果有助于本文研究站场管道的检测范围与监测 点。

## 3.3. 对比分析结论

以水平入口、垂直向下出口的 1.5 倍弯径比的 90°弯头为例,本研究将某站场应力检测结果对冲蚀仿 真模型的数值模拟结果进行范围对比分析,可以得出冲蚀速率或应力随弯管水平夹角 α 角度变化的曲线 见下图 13。

由图 13 可知仿真模型进行数值模拟后的计算结果,随着水平夹角α的增大,冲蚀速率先快速增大后 较为缓慢的减小,冲蚀严重的区域集中在弯头 20°~50°区间。但从某输气站场的应力检测结果来看,弯管 振动时表面应力主要集中于 30°~60°,我们结合检测结果对弯头仿真模型的模拟计算结果进行修正,并分 析冲蚀范围见图 14。



Figure 13. Erosion rate and detection stress change curve of 90° elbow 图 13. 90°弯头冲蚀速率和检测应力变化曲线



Figure 14. Correction of erosion range 图 14 冲蚀范围修正

综合上述的研究情况,我们可以得出天然气站场弯头的冲蚀范围为20°~60°区间,而冲蚀速率最大的 点也就是冲蚀最严重区域集中于40°~60°区间(以天然气进口为准),对于站场弯管的壁厚监测可以主要集 中于这个区域。



Figure 15. 120° Elbow erosion rate and detection stress change curve 图 15. 120° 弯头冲蚀速率和检测应力变化曲线



Figure 16. Elbow erosion rate and detection stress change curve at 135° 图 16. 135° 弯头冲蚀速率和检测应力变化曲线

对于站场中 120°和 135°的天然气管道弯头,结合仿真模型与某站场检测结果,可以得到以下的弯头 角度与冲蚀速率曲线,见图 15 和图 16。

由图 15 可知,对于站场的 120°弯头的冲蚀情况,壁厚监测范围可以集中至 30°~65°区间(以天然气进口为准),由图 16 可知,对于站场的 135°弯头的冲蚀情况,壁厚监测范围能够集中至 25°~70°区间(以天然气进口为准)。

## 4. 结论及建议

(1) 关键位置检测范围

基于以上研究结果,得出弯头、三通的检测范围如下。

1) 弯头检测范围建议

(a) 针对弯头外拱面,轴向范围以来气方向切线的切点与中心点连线为基准(0°)。90°弯头为35°~65°; 120°弯头为25°~70°;135°弯头为25°~75°。取出以上角度处的圆弧划线,径向方向以外拱面中线为准左右 各取22°划线(见图17),上述两划线的交际处即为检测范围(监测点位置);

日常每次监测时,如管径大于 600 mm,建议在区域内选择 4 个位置进行检测(至少两个点在中轴线上);如管径小于 300 mm,建议在区域内选择 1 个位置进行检测(中轴线上);其余建议在区域内选择 2~3 个位置进行检测(至少一个点在中轴线上)。





Figure 17. Monitoring scope division 图 17. 监测范围划分

(b) 负压区主要针对过滤分离器前 120°、135°弯头。区域为进气端中轴线经弯头反射到出气端地面作为中心,参考(1)中所取面积(径向轴向各取一半),检测点对应减少1个。

2) 三通检测范围建议





(a) 如图 18, 如果气流从 B 点进入, 从 C 点输出。建议监测点选取 E 区域; E 区域的选取标准是: 靠近 E 的直径为 D<sub>2</sub> 的半圆弧,与 E 到 C 距离 D<sub>2</sub>组成的区域。该区域需有两个监测点;

(b) 如图 18, 如果气流从 C 点进入, 从 B 点输出。建议选取 D<sub>2</sub>大小正对应的圆环进行取点监测。 如 A 点封闭, 气流向 B 点流动,则建议适当将 D<sub>2</sub>大小圆环适当向 B 平移后进行取点监测。

(2) 检测周期确定

根据 Q/SY 93-2007 天然气管道检验规范,天然气管道的一般检验为每年一次,投入使用后首次在半年以内进行,而涵盖管壁腐蚀检验的专业检验因根据管道实际安全情况确定。

对弯头的管径、压力和年带压时间分配系数,将其乘积设定建议检测周期,见下表1和表2。

#### Table 1. Coefficients of various influencing factors

表 1.	谷影响因素的糸致	
------	----------	--

尺寸	系数	压力	系数	带压时间	系数
≤400 mm	1	<4 MPa	1	<50 d	1
≤600 mm	2	<6 MPa	2	<200 d	2
>600 mm	3	≥6 MPa	3	≥200 d	3

#### Table 2. Monitoring cycle check table

表 2. 监测周期查表

系数乘积	1, 2, 3	4, 6, 8	9, 12	18, 27
建议周期	4年一次	3年一次	2年一次	1年一次

#### 参考文献

[1] 杨德成,朱宏武. 天然气携砂气固两相流在弯管处冲蚀磨损分析[J]. 石油机械, 2019, 47(10): 125-132.

[2] 宋晓琴, 刘玲, 骆宋洋, 等. 天然气集输管道 90°弯头冲蚀磨损规律研究[J]. 润滑与密封, 2018, 43(8): 62-68.

[3] 季楚凌. 弯管仿生耐磨方法数值模拟[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2016, 47(10): 3582-3589.

- [4] 郑云萍, 王欢欢, 易昊林, 等. 天然气管道弯头冲蚀与防护仿真研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(8): 427-430.
- [5] 付林. 油煤浆输送管道弯头部位冲击磨损预测与壁厚监测[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2009.
- [6] 黄坤, 邓平, 李岳鹏, 等. 气固两相流 90°弯管抗冲蚀结构优化[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(8): 94-100.
- [7] 黄勇, 殷琨, 朱丽红, 等. 反循环钻进中水龙头弯管磨损数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(5): 2053-2059.
- [8] 梁光川, 聂畅, 刘奇, 等. 基于 FLUENT 的输油管道弯头冲蚀分析[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(9): 822-824, 830.
- [9] 曾涌捷. 天然气管道弯头冲蚀失效机理研究[J]. 石油和化工设备, 2011, 14(2): 44-46.

[10] 袁少朋, 郭红, 石明辉. 基于 FLUENT 的径向滑动轴承紊流润滑特性研究[J]. 润滑与密封, 2022, 47(9): 56-62.

- [11] 董庆伟, 刘理想, 李阁强. 双圆弧斜齿齿轮泵泄漏研究及最佳间隙设计[J]. 流体机械, 2022, 50(3): 60-65, 87.
- [12] 陈作炳, 唐仁洪, 梅文辉, 等. 带气腔结构的平面静压气体轴承特性分析[J]. 机械设计, 2022, 39(1): 59-64.
- [13] 王超,于光临,甘新海,等. 直流式旋风分离器参数优化仿真与试验[J]. 液压与气动, 2022, 46(12): 129-134.
- [14] 陈松, 张波, 黄金, 等. 考虑挤压和壁面滑移作用的磁流变液流动分析[J]. 机械设计与制造, 2022(6): 100-103.
- [15] 兰夏燕, 万舟, 李进, 等. ANSYS Workbench 软件中两种螺栓连接仿真方法的研究[J]. 机械制造, 2017, 55(6): 59-61, 65.
- [16] 谢志江, 孙玉, 李诚, 等. 基于 ANSYS Workbench 的搬运机械手结构优化设计[J]. 机械与电子, 2010(1): 65-67.
- [17] 文怀兴, 崔康. 基于 ANSYS Workbench 的高速电主轴静动态性能分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012(12): 49-52.

[18]	Shi, J., Zhang, W., Guo, S., et al. (2022) Numerical Modelling of Blasting Dust Concentration and Particle Size Dis-
	tribution during Tunnel Construction by Drilling and Blasting. <i>Metals</i> , <b>12</b> , Article 547.
	https://doi.org/10.3390/met12040547

[19] 曲泉铀,何宏舟,张军,等. 浮摆式波能发电装置浮体系统的数值模拟[J]. 水力发电学报,2014,33(5):221-227.