

# 成品油管道局部屈曲案例分析

武旭, 帅健\*

中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249

\* 通信作者, sjclass@126.com, shuaij@cup.edu.cn

收稿日期: 2016-11-15

国家科技支撑计划项目(2015BAK16B02)资助

**摘要** 管道屈曲是油气管道的多种失效方式之一, 包括管道的局部屈曲和整体屈曲。埋地管道屈曲变形较为复杂, 主要影响因素包括内外压力、弯矩、管道的轴端力等。管道受其结构特性影响, 在受力和变形条件稍有恶化时就容易发生屈曲破坏。本文针对某局部屈曲破坏成品油管道进行全面的分析和研究。通过开展管材的拉伸、夏比冲击、断裂力学试验, 得到管材的常规力学性能参数。利用有限元模拟的方法, 建立屈曲管道模型, 分析不同载荷下管道受力变形特点及影响因素, 研究造成管道屈曲变形的主要原因。结果表明: 在一定条件下, 材料的冲击功随试验温度增加而增大; 管道局部屈曲失稳是受轴向压力、弯矩和内压的联合作用所致, 其中轴向载荷过大是造成管道屈曲失稳的主要原因; 减少内压和增加壁厚可以增强管道抵抗变形的能力。

**关键词** 成品油管道; 屈曲变形; 轴向载荷; 有限元分析; 材料试验; 滑坡

## 0 引言

油气管道有多种失效方式, 主要包括屈服强度失效、稳定性失效、疲劳失效以及断裂失效。其中稳定性失效即为管道屈曲, 包括管道的局部屈曲和整体屈曲<sup>[1]</sup>。能够导致管道屈曲的主要载荷有内外压力、弯矩、管道的轴端力等。管道由于其壁薄而细长的结构特性决定了其在受力和变形条件稍有恶化时就容易产生屈曲破坏<sup>[2]</sup>, 由此造成的各方面损失巨大且难以修复。屈曲是结构丧失承载能力的一种形式, 也就是结构丧失了保证其原有平衡状态的一种能力。管道的屈曲破坏可能发生在管道的安装期间, 也可能发生在运行运行期间。各种工作环境下的管道都比较容易发生屈曲破坏, 特别是在施工安装期间以及敷设期间<sup>[3-5]</sup>。

轴向力引发的屈曲响应实际上是管道离开初始位置, 发生了大挠度的几何变形, 整个过程类似于梁在轴向荷载达到临界值时发生的欧拉屈曲。另外据其发

生的方向不同管道屈曲又被分为侧向屈曲和垂向屈曲。管道容易在局部出现屈曲现象, 这种情况下的屈曲叫做壳屈曲<sup>[6-7]</sup>。

滑坡是威胁我国油气长输管道安全的主要地质灾害类型之一<sup>[8-10]</sup>, 可能导致管道局部屈曲破坏<sup>[11]</sup>, 造成严重的社会影响和巨大的经济损失<sup>[12]</sup>。本文针对某纵向滑坡导致局部屈曲的管道, 进行管材性能测试, 用有限元模拟的方法, 对管道受力、影响因素及屈曲原因进行分析, 提出相应的措施与建议, 为防止管道屈曲失稳的再次发生, 降低运营风险提供一定的参考。

## 1 管道宏观检测

2015年, 某管道由于山体滑坡导致管道发生局部屈曲故障, 发生故障的管道直径475 mm, 壁厚7.1 mm, 钢管为X60螺旋焊管, 采用3层PE外防腐,

引用格式: 武旭, 帅健. 成品油管道局部屈曲案例分析. 石油科学通报, 2016, 03: 450-458

WU Xu, SHUAI Jian. Local buckling analysis of a product pipeline. Petroleum Science Bulletin, 2016, 03: 450-458. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.041

设计压力 10 MPa。管道泄漏的原因为管壁皱褶, 由于皱褶处严重塑性变形, 导致管壁出现裂纹而泄漏。发生泄漏的管道敷设在一条山坡上, 泄漏点到山顶的距离长约 80 m, 斜坡角度约 30°~45°。山坡一侧临近公路隧道, 泄漏点上方设置有多道挡土墙。地表无明显滑坡迹象, 但由于沿山坡敷设, 加之建管和公路隧道施工扰动等原因, 存在管沟土层蠕动下滑的可能。

如图 1 所示, 皱褶发生在管道环焊缝附近, 近环焊缝处形成一环向“挤压型”带状鼓起。皱褶处的上部 2 点钟顺时针至 6 点钟位置扁平, 下部 6 点钟顺时针至 2 点钟位置带鼓起, 鼓起基本上是沿着管道的圆周方向, 皱褶高约 7 cm, 宽约 20 cm。由于皱褶不是沿环向均匀变形, 管道在此处发生了弯曲, 测得外弧弯曲角约 10°, 内弧弯曲角约 16°, 屈曲部位内外弧弯曲角如图 2 所示。



图 1 管道皱褶形貌

Fig. 1 Corrugation of the pipeline

## 2 材料试验

参考 GB/T 229-2007《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》、GB/T 228.1-2010《金属材料拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》、GB/T 21143-2007《金属材料准静态断裂韧度的统一试验方法》等标准, 进行管材的拉伸试验、夏比冲击试验和断裂力学试验, 得到管材的常规力学性能、夏比冲击功和断裂韧性, 为后续的模拟计算提供较为真实的材料参数。结果表明管材的理化性能基本符合相关规定。

### (1) 拉伸试验

分别对管道轴向、环向共 2 组试件进行了测试, 所得管材力学性能参数见表 1, 相应的应力-应变曲线如图 3 和图 4 所示。

### (2) 夏比冲击试验

冲击试件取自发生屈曲管道管材, 试验在室温到 -60 °C 之间进行, 测试计算得到平均冲击功, 结果见表 2。冲击试件的断口如图 5 所示。绘制冲击功随温度变化曲线图, 见图 6, 可知冲击功与试验温度成

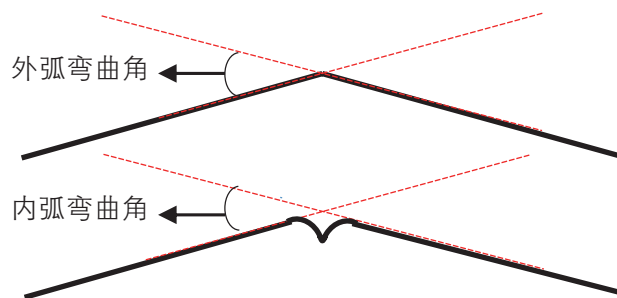


图 2 管道的弯曲角度

Fig. 2 Bending angle of the pipeline

表 1 试件基本力学性能参数

Table 1 Basic mechanical performance parameters of specimens

试件	编号	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	断后伸长率 /%	截面收缩率 /%
轴向	1	469.23	538.02	28.25	69.03
	2	470.88	539.49	28.68	71.28
	3	480.26	551.99	33.97	69.06
	4	470.88	539.49	32.13	65.77
	5	466.10	536.36	32.60	69.66
环向	1	484.52	531.47	28.87	66.60
	2	464.63	541.14	29.22	66.69
	3	461.50	538.02	29.27	71.18
	4	462.54	538.20	30.43	68.79
	5	455.25	533.23	24.58	67.61

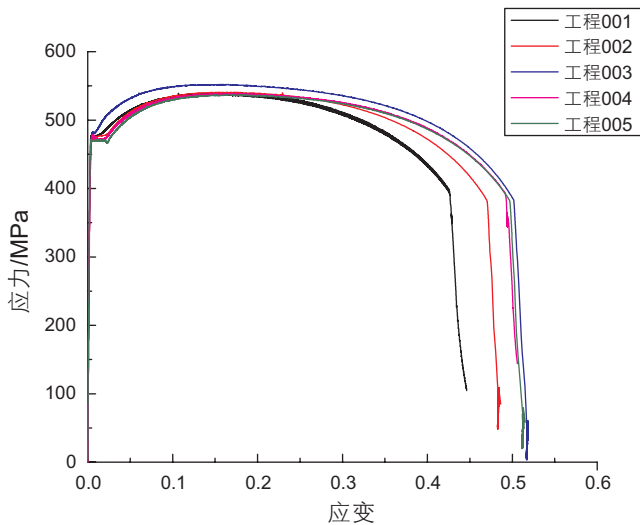


图3 轴向试件应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of axial specimens

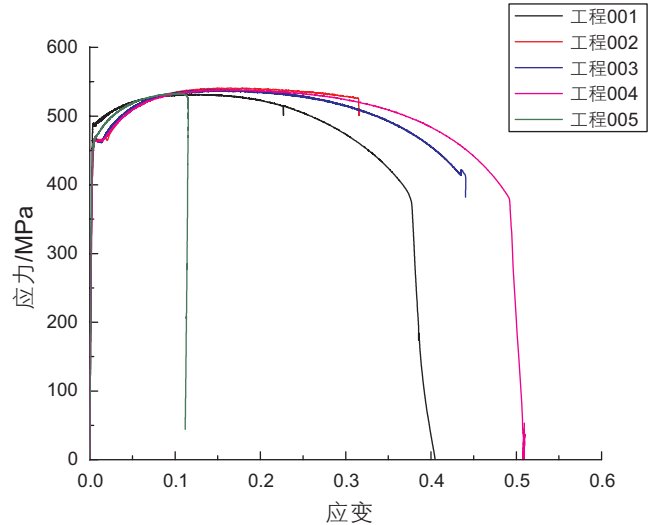


图4 环向试件应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of circumferential specimens



图5 试件断口

Fig. 5 The sectional view of specimen

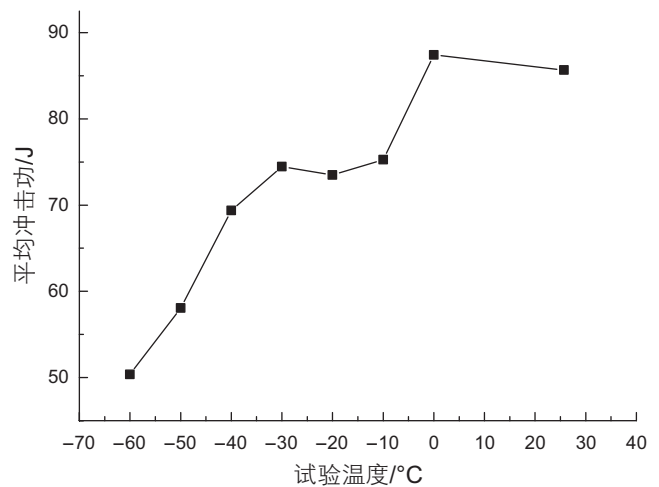


图6 试件冲击功-温度曲线

Fig. 6 Impact energy-temperature curves of specimens

正比例关系,即冲击功基本随试验温度的增加而增大。

### (3) 断裂试验

本次试验母材轴向取样5个、环向取样4个。试验过程中载荷裂纹嘴张开位移曲线如图7和图8所示,数据汇总见表3。

## 3 有限元模拟

### 3.1 管道模型建立

根据以上测试分析数据建立成品油管道有限元模型,对屈曲管段进行模拟分析,通过几何检测和材料试验得到屈曲管段的几何参数及材料参数见表4

和表5。

使用有限元模拟软件ANSYS,将屈曲管段分为3个部分,每部分长度为0.35 m,管段全长1.05 m。第一部分管壁厚度7.5 mm,第二和第三部分管壁厚度7.1 mm。钢材性能参数:弹性模量200 GPa,泊松比0.3,屈服极限490 MPa,强度极限595 MPa,管道内部压力8 MPa。将钢管一端固定(模拟钢管在此处夯实牢固),另一端加载。用48节点壳单元划分网格,管段第二、三部分加密,第一部分略微稀疏,总单元数量1728,管道模型如图9所示。

计算结果如图10所示。可见,管体在受到沿管体轴向的位移载荷后发生屈曲变形,并且在进入后屈曲

表 2 冲击功测试结果

Table 2 Test results of impact energy

试验温度/°C	缺口类型	平均冲击功/J
室温 25.7	V	85.66
0	V	87.42
-10	V	75.26
-20	V	73.50
-30	V	74.45
-40	V	69.39
-50	V	58.08
-60	V	50.38

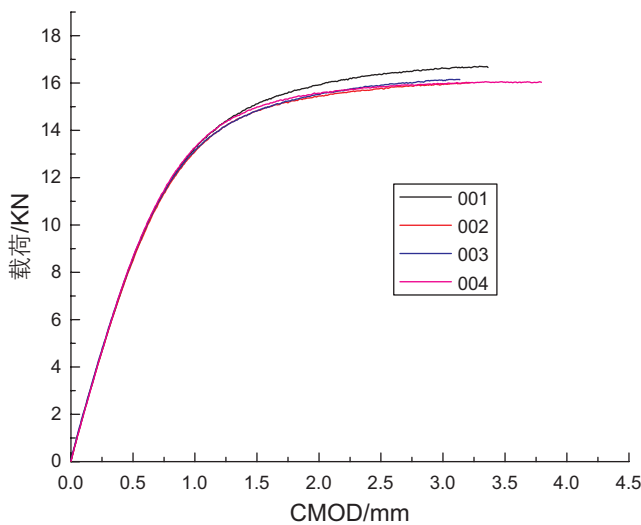


图 8 环向试样载荷裂纹嘴位移曲线

Fig. 8 Load-CMOD curves of circumferential specimens

表 4 实验管道几何尺寸

Table 4 Geometry of the experimental pipeline

材料	直径/mm	壁厚/mm	径厚比	内压/MPa
X60	475	7.1	67	8

变形阶段，屈曲褶皱顶部的应力便能达到材料的最大强度极限，因而此处成为管体破坏的薄弱环节，容易出现破裂。

图 11 为有限元软件模拟出的管体活动端第一个节点的载荷位移曲线图。通过对管体移动端部的受力—

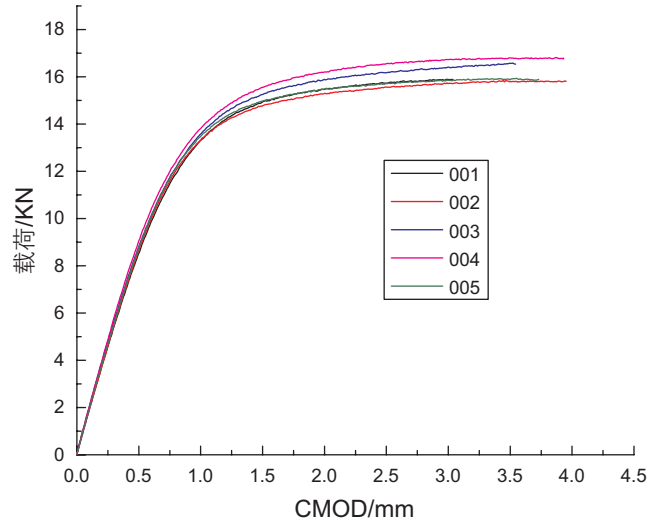


图 7 轴向试样载荷裂纹嘴张开位移曲线

Fig. 7 Load-CMOD curves of axial specimens

表 3 裂纹尖端张开位移测试结果

Table 3 Test results of CTOD

试件	B/mm	$a_0BN/mm$	W/mm	$a_0/mm$	$\delta_m/mm$
环向	6.03	5.28	60.17	31.02	0.6164
	6.04	5.41	60.10	31.79	0.5825
	6.04	5.23	60.04	30.55	0.5802
	6.06	5.46	60.04	32.30	0.6117
	6.03	5.44	60.09	31.23	0.5393
	6.02	5.38	60.16	31.25	0.6370
轴向	6.02	5.52	60.09	31.72	0.6482
	6.06	5.38	60.11	31.25	0.7475
	6.09	5.43	60.15	31.10	0.6716

表 5 材料参数

Table 5 Material parameters

材料	屈服强度/MPa	弹性模量/MPa	硬度指数
X60	490	$2.0 \times 10^5$	22

位移计算结果的分析，可以明显看到，初始阶段其端部沿轴向的载荷随管段位移的增大快速上升，载荷强度达到顶点后，随管端位移的增大，载荷位移曲线随之下降。这是由于管体发生结构屈曲，造成其轴向的承载能力下降所致，管体随即进入后屈曲变形。

管段活动端一周节点发生临界屈曲时所受载荷如图12所示。通过计算,可获得在内压8 MPa,中间段管壁厚度7.1 mm条件下,管体发生屈曲的临界外载荷约为 $2.551 \times 10^6$  N。可以注意到,管体在整体轴向变形过程中,薄弱环节的屈服强度扰动,引起了管体变形的不均匀。管体仅仅是在材料的最小屈服强度处发生了结构坍塌,就使得管体外形结构破坏,瞬间失去抵抗轴向变形的能力。

### 3.2 影响因素分析

#### 3.2.1 内压影响

应用上述模型计算管道在不同内压条件下的变形情况,以此分析内压对管道屈曲变形的影响。在管壁厚度等其他参数不变的条件下,改变管道内压,

利用ANSYS对管段进行模拟分析,得到内压分别为10、9、8和7 MPa时管道屈曲的模型计算结果,不同内压条件下,管段活动端初始节点的临界载荷见表6。临界载荷与管道内压关系如图13所示。不同内压下,节点载荷位移曲线和一周节点所受载荷分别如图14和图15所示。可知,在相同条件下,管道发生屈曲变形的临界载荷随管道内压的减小而增大,也就是说,在一定范围内管道内压越小,管道抵抗变形的能力越强。故可采用减小内压的方法增强管道抵抗变形的能力。

#### 3.2.2 壁厚影响

壁厚也是影响管道屈曲的重要因素。在管道内压等其他参数不变的条件下,改变管壁厚度,利用ANSYS对管段进行模拟分析,得到管壁厚度分别为

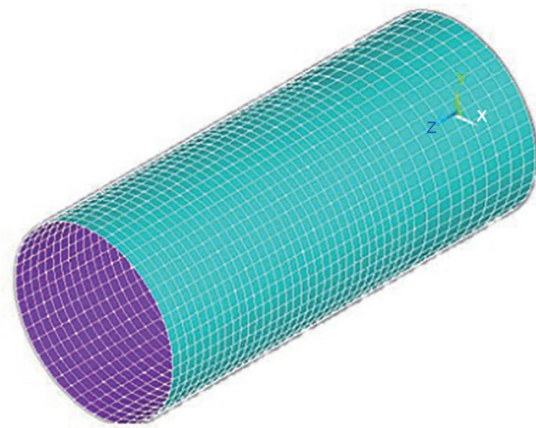


图9 管道单元划分  
Fig. 9 Element division of the pipeline

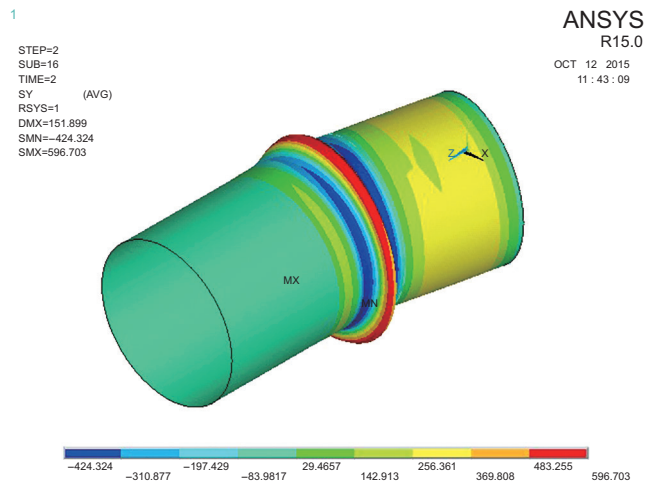


图10 工作内压条件下模型计算结果  
Fig. 10 Calculation results of the model under the working internal pressure

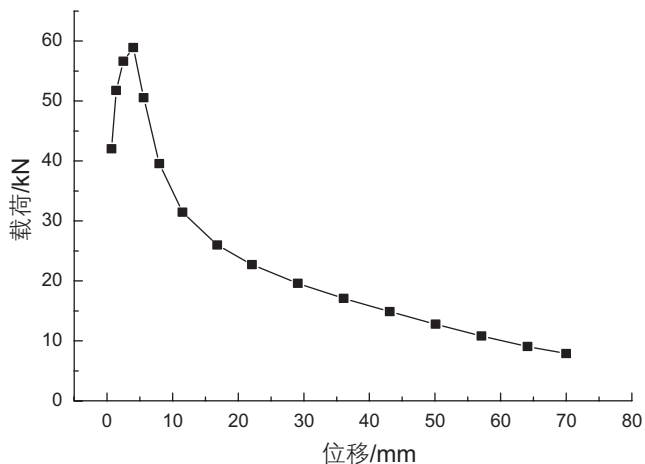


图11 节点1的载荷位移曲线  
Fig. 11 Load-displacement curve of node 1

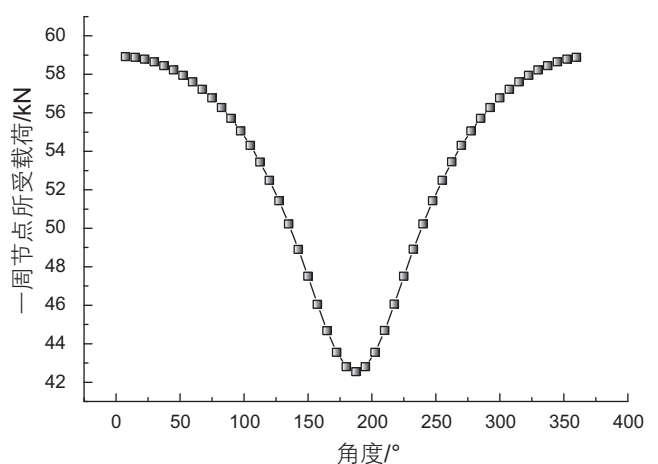


图12 端部圆周节点载荷分布  
Fig. 12 Load-angle curve of the end circumferential nodes

7.5、7.4、7.3、7.2、7.1 mm时管段屈曲模型计算结果，不同壁厚条件下，管段活动端初始节点的临界载荷见表7。临界载荷与管道壁厚关系如图16所示。不同管壁厚度条件下，节点载荷位移曲线和一周节点所受载荷分别如图17和图18所示。可知，在相同条件

下，管道临界载荷随管壁厚度的增大而增大，也就是说，在一定范围内管道壁厚越厚，管道抵抗变形的能力越强。故可采用增加管道壁厚的方法增强管道抵抗变形的能力。

表6 不同内压所对应的节点临界载荷

Table 6 Critical load of the nodes in different internal pressure

内压/MPa	节点临界载荷/N
10	46 072.9
9	52 925.8
8	58 918.4
7	64 305.5

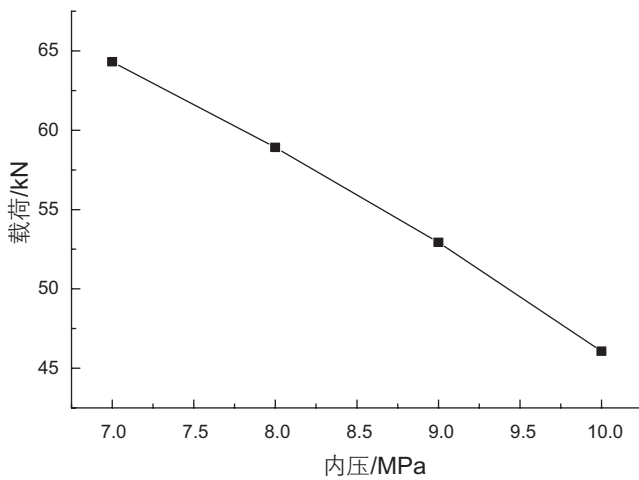


图13 临界载荷与管道内压关系图

Fig. 13 Relationship between critical load and internal pressure of pipeline

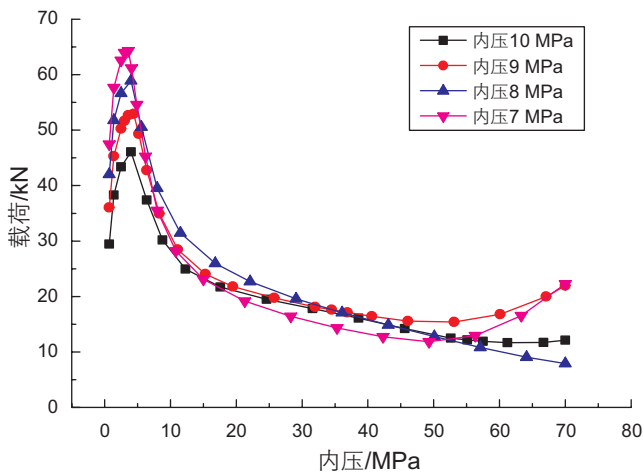


图14 不同内压下节点载荷位移曲线

Fig. 14 Load-displacement curve of nodes under different internal pressure

## 4 原因分析

综合上述管材性能测试及有限元模拟分析，可以确定该段管道泄漏的原因为壳体屈曲而出现皱褶，管道屈曲的原因是此处管道受力、焊缝、敷设位置以及降水等多种因素的复杂作用所致。

### 4.1 管道受力情况

根据宏观检测结果，钢管发生明显的弯曲变形和屈曲变形，且局部变形严重，严重变形截面右侧因受拉而扁平，左侧因受压而屈曲，故钢管上明显有弯矩作用。

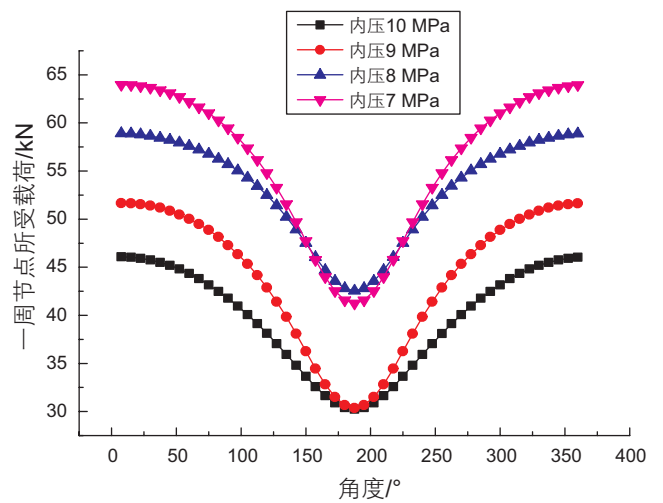


图15 不同内压下端部圆周节点载荷分布

Fig. 15 Load-Angle curves of the end circumferential nodes under different internal pressures

表7 不同管壁厚度所对应的节点临界载荷

Table 7 Critical load of the nodes with different pipe thickness

管壁厚度/mm	节点临界载荷/N
7.5	63 764.8
7.4	62 752.9
7.3	60 948.7
7.2	60 145.0
7.1	58 918.4

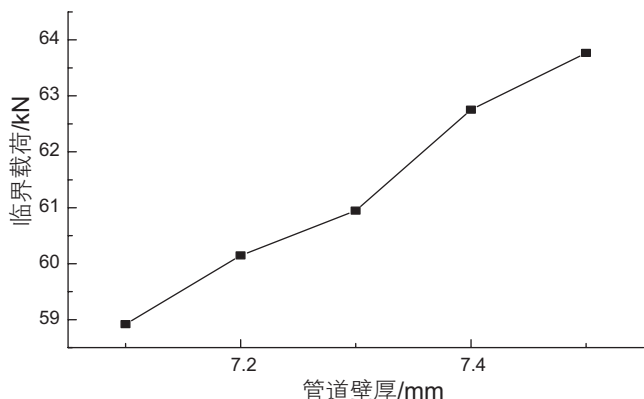


图 16 临界载荷与管道壁厚关系图

Fig. 16 Relationship between critical load and pipe wall thickness

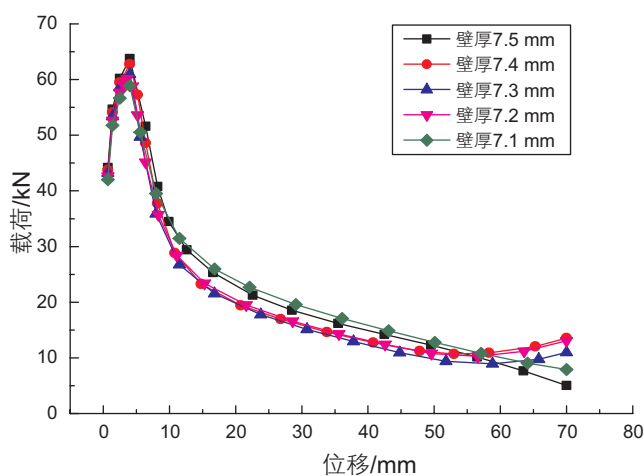


图 17 不同管壁厚度下节点载荷位移曲线

Fig. 17 Load-displacement curve of nodes under different pipe thickness

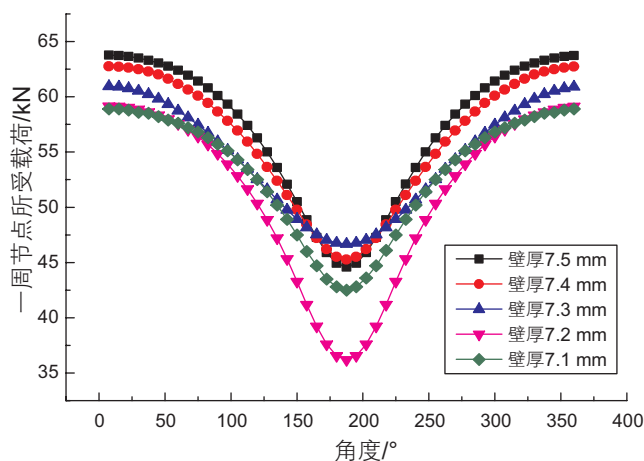


图 18 不同壁厚下一周节点所受载荷

Fig. 18 Load of the end circumferential nodes under different wall thickness

该段管道处于斜坡位置,且受高速公路隧道弃渣及设计的影响,管道易受到两种典型载荷作用:垂直于钢管的侧向载荷和平行于钢管的轴向载荷。这两种典型载荷及内压的共同作用可能造成管体屈曲变形。

(1)侧向力:在正常服役工况下,位于管沟内的钢管,其左、右及下方被土壤所束缚,在这3个方向不具备产生局部大变形的条件。而该屈曲管段失稳弯曲角度达 $35^\circ$ ,且弯曲方向朝左侧,说明了管体在屈曲时受到侧向力的作用。

(2)轴向压力:该钢管局部产生了严重的屈曲变形,表明其承受过较大的纵向压缩载荷作用,在该载荷作用下,管道局部发生了严重塑性变形。从屈曲形态及模拟分析结果看,轴向压力应是此次管道屈曲的主要原因。

## 4.2 环焊缝

屈曲部位非常接近管道环焊缝,尽管根据管道的力学性能测试,其材质基本符合要求,发生屈曲并非管道制管及材质问题,但根据金属磁记忆检测试验,管道环焊缝处残余应力分布不均,特别是螺旋焊缝与环焊缝交界区域存在一定程度的集中,表明焊缝处存在一定程度的几何缺陷或材质缺陷,屈曲与此处环焊缝的缺陷有关。

## 4.3 敷设位置

管道敷设于斜坡上,管道自重、土壤摩擦力均可能对管道施加较大的纵向载荷。此纵向载荷如果大到一定程度,可以导致管道发生屈曲。

尽管从现场情况看,管道敷设处并未发生明显滑坡,但敷设管道时的开沟,维修管道的多次开挖,以及附近公路隧道施工等多种因素造成了扰动,存在管沟内的土壤蠕动下滑的可能性,因此,不能排除土壤蠕动下滑导致管道屈曲的可能性。

## 4.4 降雨及挡土墙

管道屈曲发生地雨量较为丰富,降雨对管沟内的土壤下滑有一定的促进作用。

挡土墙能防止管沟内的土壤蠕动下滑。管道发生屈曲部位的上方也修筑了多道挡土墙,但挡土墙非管道建设时期所加,而是后来新增的,其深度较浅,不一定能起到防止土壤下滑的作用。

## 5 结论与建议

### 5.1 结论

(1)宏观检测以及有限元模拟表明,管道皱褶符合轴向压力、弯矩和内压联合作用所致管道屈曲失稳的特征,其中轴向载荷过大是造成管道屈曲失稳的主要原因。

(2)管道发生屈曲失稳现象与管道的敷设位置、焊缝缺陷、降雨和挡土墙失效均密切相关。

(3)增加管道壁厚、降低管道内压,可显著提高管道抵抗屈曲失稳的能力。

(4)在一定条件下,材料的冲击功随试验温度增加而增大。

### 5.2 建议

(1)适当增加管道壁厚是防止管道屈曲的有效措施。

(2)浅埋管道,减小管道的纵向摩擦力。

(3)合理设置挡土墙,并确保挡土墙的深度足够并具有稳定性,以起到防止土壤下滑的作用。

(4)鉴于沿大斜坡敷设的管道均存在轴向失稳的可能性,不排除管网在其它地方也发生了管道屈曲,宜尽早开展管道内检测,排查管道发生屈曲失稳的隐患。

## 参考文献

- [1] 帅健. 管线力学[M]. 北京:科学出版社,2009:1-7. [SHUAI J. Pipeline mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2009: 1-7]
- [2] 帅健,于桂杰. 管道及储罐强度设计[M]. 北京:石油工业出版社,2010:121-131. [SHUAI J, YU G J. Strength design of pipeline and tank[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 121-131.]
- [3] 王鹏,王峰会. 内压和侧压作用下管道的屈曲分析[J]. 石油矿场机械,2008,37(8):18-21. [WHANG P, WANG F H. Analysis of buckling pipelines due to internal pressure and lateral pressure[J]. Oil Field Equipment, 2008, 37(8): 18-21.]
- [4] 蔡克,杨锋平,罗金恒. 天然气管道的屈曲变形模拟[J]. 油气储运,2013,32(4):402-405. [CAI K, YANG L F, LUO J P. Simulation on buckling deformation of natural gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(4): 402-405]
- [5] 黄呈帅,吉玲康,刘迎来,等. 某天然气输送管纵向屈曲破坏失效分析[J]. 焊管,2012,35(9):62-68. [HUANG C S, JI L K, LIU Y L, et al. Analysis on the axial buckling deformation of gas pipeline[J]. Welded Pipe and Tube, 2012, 35(9): 62-68.]
- [6] ZHU J B, ATTAND M M, KELLERMANN C D. In-plane nonlinear localised lateral buckling of straight pipelines[J]. Engineering Structures, 2015, 103: 37-52.
- [7] 金忠礼. 大口径高强度管道局部屈曲研究[D]. 北京:中国石油大学(北京),2015. [JIN Z L. Local buckling study of large diameter and high strength pipeline[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2015.]
- [8] WANG Y Z, ZHOU L C. Spatial distribution and mechanism of geological hazards along the oil pipeline planned in western China[J]. Engineering Geology 1999, 15(3): 195-201.
- [9] 郝建斌,刘健平,荆宏远,等. 横穿状态下滑坡对管道推力的计算[J]. 石油学报,2012,33(6):1093-1097. [HAO J B, LIU J P, JING H Y, et al. A calculation of landslide thrust force to transverse pipelines[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(6): 1093-1097.]
- [10] BRAUN J, MAJOR G, WEST D O, et al. Geologic hazards evaluation boosts risk-management program for Western U.S. pipeline[J]. Oil & Gas Journal, 1998, 96(9): 73-79.
- [11] ZHOU Z L, MURRAY D W. Analysis of postbuckling behavior of line pipe subjected to combined loads[J]. International Journal of Solids and Structures, 1995, 32(20): 3015-3036.
- [12] SAVIGNY K W, PORTER M, LEIR M. Geohazard risk management for the onshore pipeline industry: Exploration & production: oil & gas review 2005: Issue2[G/OL]. [2011-10-12]. <http://www.bgcengineering.com/en/geohazard-risk-management-onshore-pipeline-industry>.



## Local buckling analysis of a product pipeline

WU Xu, SHUAI Jian

*China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China*

**Abstract** Pipeline buckling is one of the failure modes of oil and gas pipelines, including local buckling and global buckling. The buckling and deformation of buried pipelines are complicated. The factors include the internal and external pressures, bending moment, axial force and so on. The pipeline is affected by its structural characteristics, and is prone to buckling when the stress and deformation conditions are slightly worse than its design tolerance. A comprehensive analysis and study of a local buckling failure of a refined oil pipeline was conducted. This was carried out by tensile testing, Charpy impact and pipe fracture mechanical tests to get the parameters of the conventional mechanical properties of the pipe. A finite element simulation method was used and a buckling pipe model was established to analyze the stress and deformation of the pipeline under different loads and influencing factors. The results show that under some conditions, the impact of the material tends to increase with an increase of the test temperature. The local buckling failure of a pipeline is caused by the combined effect of axial stress, bending moment and internal pressure. The axial load is mainly caused by the instability of pipeline buckling to reduce the internal pressure. Increasing the wall thickness can enhance the ability to resist deformation. The corresponding measures and suggestions for pipeline maintenance are put forward to reduce the risk to pipeline operation.

**Keywords** product pipelines; buckling deformation; axial load; finite element analysis; material test; landslide

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.041

(编辑 马桂霞)