

# 不拆保冷层的 LNG 管道最小剩余壁厚预测

孙玉江, 刘海超, 孟 强, 苑世宁

(中海油(天津)管道工程技术有限公司, 天津 300457)

**摘 要:**为了保证生产和生活的需要,需要在不拆保冷层的条件下对 LNG(液化天然气)管道剩余壁厚进行在役检测。以 LNG 保冷管道为例,分析了切向射线检测技术的基本原理,并用所开发的切向射线检测试验装置对一段 LNG 管道进行了检测试验,然后对其检测精度与千分尺测量结果进行了对比分析,最后对某条在役 LNG 管道进行了剩余壁厚检测,并结合 Gumbel 极值分布方法预测了整条 LNG 管道的最小剩余壁厚。试验结果表明,切向射线检测方法可以有效地对带保冷层 LNG 管道壁厚进行检测,可以预测整条 LNG 管道的最小剩余壁厚,且 LNG 管道的最小剩余壁厚符合 Gumbel 极值分布。

**关键词:**LNG 管道;切向射线检测技术;最小剩余壁厚;Gumbel 极值分布

**中图分类号:** TG115.28      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6656(2022)02-0022-05

## Prediction of minimum remaining wall thickness of LNG pipeline without dismantling the cold insulation layer

SUN Yujiang, LIU Haichao, MENG Qiang, YUAN Shining

(CNOOC (Tianjin) Pipeline Engineering Technology Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

**Abstract:** In order to ensure the needs of production and life, LNG (liquefied natural gas) pipelines need to be in-service inspected of the remaining wall thickness of the pipeline without removing the cold insulation layer. Taking the LNG cold preservation pipeline as an example, the article analyzes the basic principles of tangential ray detection technology, and uses the developed tangential ray detection test device to test a section of LNG pipeline, and then compares its detection accuracy with the micrometer measurement results. Following the analysis, the remaining wall thickness of an in-service LNG pipeline was tested and combined with the Gumbel extreme value distribution method to predict the minimum remaining wall thickness of the entire LNG pipeline. The test results show that the tangential ray detection method can be effectively applied to the wall thickness detection of LNG pipelines with cold insulation and can predict the minimum remaining wall of the entire LNG pipeline, and the minimum remaining wall thickness of the LNG pipeline conforms to the Gumbel extreme value distribution.

**Key words:** LNG pipeline; tangential ray detection technology; minimum residual wall thickness; Gumbel extreme value distribution

LNG 管道多采用 304 或 316 不锈钢材料制造,在管道制造、运输、生产以及运营过程中,易受到海边盐雾中氯化物等的影响,不锈钢外表面的富铬氧化物保护膜会遭到侵蚀,而且 LNG 介质在管道内的输送过程中可能会对管道弯头造成冲蚀,引发管

道孔蚀和应力腐蚀<sup>[1]</sup>,进而导致火灾、爆炸等严重事故<sup>[2]</sup>。管道完整性管理<sup>[3]</sup>以及特种设备安全技术规范中要求定期检测管道的剩余壁厚,以便于进行定量分析与评估<sup>[4]</sup>。由于生产和生活的需要,LNG 管道一般不允许停产,而且拆除 LNG 管道外保冷层会导致管道内 LNG 温度急剧上升,管道压力突然增大,进而引发 LNG 储罐的“间歇泉”事故<sup>[5]</sup>。因此,只可采取在线检测 LNG 管道壁厚的方法,而常规的接触式检测方法不适用于 LNG 管道的检测<sup>[6]</sup>。

**收稿日期:** 2021-07-06  
**作者简介:** 孙玉江(1988—),男,硕士,工程师,主要从事腐蚀与防护技术的研究工作  
**通信作者:** 孙玉江,26910996@qq.com

根据国际原子能机构官方资料,切向射线照相法可以在不拆除保温层的情况下检测 LNG 管道,相对于传统的 X 射线照相法,可以提高检测作业过程中的安全性、工作效率和检测精度。因此,笔者基于切向照相法,研究了一种切向射线扫描检测方案,并开发了相应的检测装置,实现了在带保冷层情况下的 LNG 管道剩余壁厚检测。

由于该方法仅适用于单点检测,难以覆盖整个 LNG 管道,按照管道完整性管理的要求,需要获取整条管道最薄点的剩余壁厚。根据前期研究成果可知<sup>[7-10]</sup>,油气管道局部腐蚀的最大腐蚀点深度符合 Gumbel 分布,因此,笔者结合 Gumbel 极值分布原理,对某条在役 LNG 管道进行了检测试验,预测整条 LNG 管道的最小剩余壁厚。

## 1 切向射线扫描检测技术基本原理

### 1.1 检测基本原理

切向射线扫描检测技术原理遵循射线检测方法的基本规律,即缺陷区域材料与管道材料的射线吸收率不同,导致射线在穿过缺陷时强度会发生突变。根据射线的这种特性,可利用切向射线扫描检测 LNG 管道剩余壁厚及分区,检测原理如图 1 所示。

图 1(a)中,由伽马射线源、探测器和控制机构模拟切向射线扫描检测样机,假设其对一段 LNG 管道

进行检测,该管道由铝皮、保冷层、管道组成且厚度均匀。 $P_1, P_8$  分别为铝皮外壁的两端点; $P_2, P_7$  分别为铝皮内壁和保冷层外壁接触的两端点; $P_3, P_6$  分别为保冷层内壁和管道外壁接触的上、下两个端点; $P_4, P_5$  分别为管道内壁上、下两端点; $D$  为管道的直径分割线。检测装置内射线源发出的射线经过准直器准直后由步进电机与晶体探测器同步,在 LNG 管道外侧沿扫描方向扫描 LNG 管道,晶体探测器接收到的射线信息经数据处理后以计数的形式表征射线强度的变化。检测时,如图 1(a)所示,在扫描至  $P_1, P_2$  之间时,沿扫描方向铝皮的切向厚度会逐渐增加,此时探测器接收到的射线强度也应逐渐减小。保冷层多为高分子聚合材料,通常情况下,这种材料的射线吸收率要低于金属的,因此,在  $P_2$  点时,射线经过的铝厚度最大,探测器接收到的射线强度最低,对应图 1(b)中的  $P'_2$  点;随后  $P_2, P_3$  之间射线强度会逐渐增加,至  $P_3$  点达到最高,对应图 1(b)中的  $P'_3$  点。由于 LNG 管道使用的是 316L 不锈钢材料,同理可知,在扫描  $P_3-P_4$  段时,穿过 LNG 管道的射线强度会逐渐降低,到  $P_4$  点时,接收到的射线强度最低,对应图 1(b)中的  $P'_4$ 。空气的射线吸收系数远低于 LNG 管道的射线吸收系数,因此,在  $P_4, D$  之间,穿过管道的射线强度逐渐增加。当检测至  $D$  线后,管道下半部分的检测数据规律与上半部分相反。根据上述分析可知,  $P'_1P'_2$  或  $P'_7P'_8$  对应的是保冷层外铝皮的厚度,  $P'_2P'_3$  或  $P'_6P'_7$  对应的是保冷层的厚度,  $P'_3P'_4$  或  $P'_5P'_6$  对应的是管道的剩余壁厚。

检测过程中,需要注意射线源是否可以穿透管道切向方向的最大壁厚,裸管切向方向最大壁厚如图 2 所示(图中  $L_{\max}$  为管道切向方向最大壁厚; $W$  为壁厚; $D$  为管道直径)。管道切向方向最大壁厚的计算公式可表示为

$$L_{\max} = 2W \sqrt{D/W - 1} \tag{1}$$

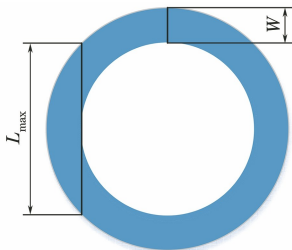


图 2 裸管切向方向最大壁厚示意

### 1.2 基于 Gumbel 极值分布的管道最小剩余壁厚预测方法

根据经验可知,管道腐蚀后的位置可以参考泊

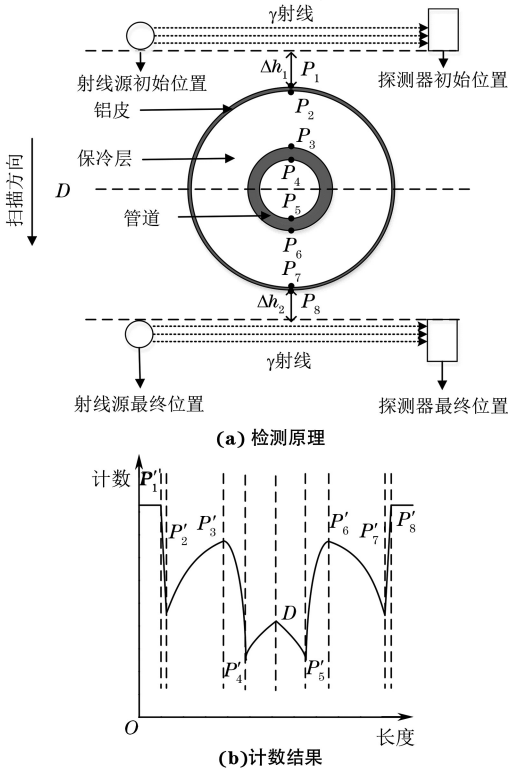


图 1 切向射线扫描检测技术原理示意图

松分布,管道的最小剩余壁厚满足 Gumbel 极值分布规律,其表达式为

$$F_1(y) = \exp \left[ - \exp \left( - \frac{x - \lambda}{\alpha} \right) \right] \quad (2)$$

式中: $F_1(y)$ 为最小剩余壁厚不超过  $x$  的概率; $x$  为最小剩余壁厚的随机变量, $x \in (0, \infty)$ ;  $\lambda$  为统计参量,其取值范围为  $-\infty$  到  $+\infty$ ;  $\alpha$  为统计变量,表示管道剩余壁厚的平均值; $y$  为变量代换, $y = (x - \lambda) / \alpha$ 。

假设将管道分为  $M$  个区,每个区检测到了多个剩余壁厚  $X$ ,该剩余壁厚数据随机抽取至同环境下管道上的最小剩余壁厚,设  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_M\}$ ,  $X_1, X_2, \dots, X_M$  为  $M$  个最小管道剩余壁厚按从大到小排列后的值,则第  $i$  个检测数据的统计概率为

$$F(y_i) = i / (M + 1), i = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

将  $y_i$  代入式(2)中可得到

$$F_1(y_i) = \exp(-e^{y_i}) \quad (4)$$

对(4)式两边取两次对数,得到

$$y_i = -\ln[-\ln F_1(y_i)] = \frac{x - \lambda}{\alpha} \quad (5)$$

此时,对  $N$  个测量值  $X_i$  与统计概率  $F_1(y)$  通过最小二乘法数据拟合,可知  $y$  与剩余壁厚  $X_i$  之间的关系,同时可求得统计参数  $\lambda$  和  $\alpha$ <sup>[11]</sup>。

由于切向射线检测方法难以检测整条 LNG 管道的剩余壁厚,所以,需要根据  $M$  个区域内的剩余壁厚来估算整条 LNG 管道的剩余壁厚。在估算过程中,需要引入回归周期  $T$ ,其表达式为

$$T = L / M \quad (6)$$

$T$  与统计概率  $F_1(y)$  关系为

$$T = \frac{1}{1 - F_1(y)} \quad (7)$$

将式(7)代入式(5),可得

$$y = -\ln[-\ln(1 - 1/T)] \quad (8)$$

由式(5)可知

$$x = \alpha y + \lambda \quad (9)$$

此时,可根据式(9)得出整条 LNG 管道最小剩余壁厚的预估值。

## 2 LNG 管道在线检测试验

### 2.1 试验目的

为了验证切向扫描检测方法可用于 LNG 管道的剩余壁厚检测,笔者利用 Cs-137 放射源进行了室内 LNG 管道的切向射线检测试验,并对该检测方

法能否满足误差小于 0.05 mm 的要求进行判断。

### 2.2 试验装置

根据 LNG 管道检测的需要,设计的 LNG 管道切向射线检测装置结构如图 3 所示,仪器由 5 部分组成:① 射线源机,内含有一枚 100 mCi 的 Cs-137 放射源和准直器;② 探测器,由 NaI 晶体、光电倍增管、分压电路和前置放大器等组成,用于接收射线并转化为计数形式以代表辐射强度;③ 传动机构,主要由步进电机、滚珠丝杠组成,用于控制射线源机和探测器的位置;④ 控制模块,由数据采集器、PLC(可编程逻辑控制器)组成,用于控制传动机构以及探测器数据输出的采集;⑤ 计算机与数据分析软件,主要用于储存数据以及处理检测数据。此外,试验中还用到了千分尺、激光位移传感器等。

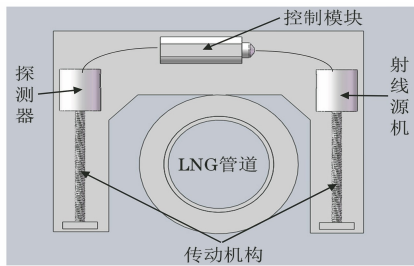


图 3 LNG 管道切向检测装置结构示意图

### 2.3 试验步骤

(1) 检测试验开始前,操作人员必须做好个人防护工作并随身携带个人剂量报警仪,检测过程中,人员应距离检测仪器 2 m 以上,如遇突发紧急情况,按应急预案执行。

(2) 选取一段 LNG 管道,在管道保冷层外表面标记若干检测点  $P_1, P_2, P_3, \dots$ ,使用千分尺测量保冷层的各点厚度  $D_1, D_2, D_3, \dots$ ,再测量保冷层与管道的总厚度  $B_1, B_2, B_3, \dots$ ,则各点的管道壁厚为  $B_1 - D_1, B_2 - D_2, B_3 - D_3, \dots$ 。每个点测量 5 次,取 5 次测量结果的平均值作为厚度的千分尺测量值。

(3) 将准直后的射线源和探测器与步进电机和传动机构相连,保证射线源和探测器可以同步沿 LNG 管道  $P_1$  点切向垂直方向移动(见图 3)。设定步进电机移动步长为 0.01 mm,每一步停留时间为 2 s。

(4) 完成  $P_1$  点扫描后,继续按照步骤(3)扫描  $P_2, P_3, \dots$ ,完成 LNG 管道的检测。

(5) 试验完毕,整理装置和管道,将射线源妥善放置。

(6) 保存并对比分析 LNG 管道的千分尺测量数据和切向射线检测试验数据。

2.4 试验结果

按照试验步骤,对所标记的 LNG 管道进行检测,LNG 管道切向射线检测结果如图 4 所示。

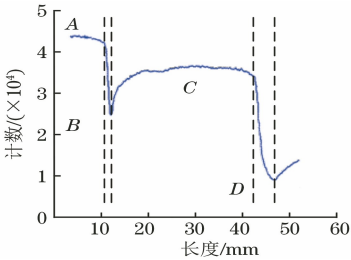


图 4 LNG 管道切向射线检测结果

由于保冷层管道的铝皮、保冷层、金属管道和空气的射线吸收系数不同,切向射线扫描至铝皮、保冷层和金属管道时,照射到探测器上的射线强度也不同,使得数据在各层边界处发生突变。图 4 中,A 点表示射线进入铝皮,B 点表示射线进入保冷层,C 点表示进入管道壁,D 点表示退出管道壁。可以明显看出,在 B 点和 D 点出现了两个波谷。通过软件分析计算得到该检测点处的管道壁厚为 10.11 mm,千分尺测量到的该点处壁厚为 10.05 mm。相对于千分尺测量结果,切向射线检测方法的误差为 0.06 mm。两种方法的 LNG 管道壁厚检测数据结果如表 1 所示。

表 1 两种方法的 LNG 管道壁厚检测数据结果  
mm

序号	切向射线检测数据	千分尺检测数据	检测误差
1	10.23	10.20	0.03
2	10.15	10.20	-0.05
3	9.98	9.95	0.03
4	10.28	10.33	-0.05
5	11.05	11.00	0.05
6	9.87	9.90	-0.03
7	9.96	10.01	-0.05
8	10.26	10.27	-0.01
9	10.12	10.13	-0.01
10	10.17	10.21	-0.04
11	9.86	9.92	-0.06
12	10.24	10.16	0.08
13	8.99	9.03	-0.04
14	9.45	9.46	-0.01
15	10.12	10.10	0.02
16	9.68	9.69	-0.01
17	10.33	10.39	-0.06
18	10.21	10.28	-0.07
19	9.86	9.89	-0.03
20	9.98	10.05	-0.07

从表 1 可以看出,相对于千分尺,切向射线检测方法对 LNG 管道壁厚的测量平均误差约为 0.04 mm,测量误差的方差为 0.04 mm,因此,该方法满足误差小于 0.05 mm 的检测精度需要。

3 应用实例

某条 LNG 站场管道于 2003 年建成投产运行,长度为 4518.68 m,材料为 0Cr18Ni9,管径为 159 mm,壁厚为 4.5 mm。对管道进行切向射线检测时,每隔 150 m 设一个检测区,共 30 个检测区,每个检测区随机检测 20 个点,30 个区域内的管道最小剩余壁厚结果如表 2 所示。

表 2 30 个区域内的管道最小剩余壁厚  
检测结果 mm

检测区域 标号	管道剩余 壁厚	检测区域 标号	管道剩余 壁厚
1	3.89	16	3.53
2	3.96	17	3.09
3	3.79	18	3.38
4	3.03	19	3.66
5	3.24	20	3.75
6	3.88	21	3.86
7	3.74	22	3.67
8	3.75	23	3.84
9	3.70	24	3.79
10	3.35	25	3.57
11	3.65	26	3.68
12	3.47	27	3.42
13	4.00	28	3.49
14	3.12	29	3.85
15	3.55	30	3.69

将这 30 个检测数据从大到小排列,并根据式(4)计算出各点的累计概率  $F(y_i)$ ,并利用式(5)计算出隐函数  $y$  的值,LNG 管道的切向射线检测最小剩余厚度分析结果如表 3 所示。

以表 3 中的最小剩余壁厚为横坐标,隐函数  $y$  为纵坐标绘制散点图,并绘制最小剩余壁厚概率分布趋势线,结果如图 5 所示。由图 5 可知检测出的最小剩余壁厚与隐函数  $y$  具有良好的线性关系,而且进一步证明了检测到的 LNG 管道最小剩余壁厚值服从 Gumbel 极值分布。经过最小二乘法计算,可得到  $\alpha=-0.229\ 7,\lambda=3.736\ 2$ ,根据式(9)得到该段 LNG 管道的最小剩余壁厚曲线公式为  $x=-0.229\ 7y+3.736\ 2$ ;根据式(6)可以得到回归周期  $T=225.934$ ;由式(8)可以得到  $y=5.418\ 026$ ,由此可知该 LNG

管道的最小剩余壁厚为 2.49 mm。

表 3 LNG 管道的切向射线检测最小剩余厚度  
分析结果

序号	腐蚀检测区 标号	最小剩余 壁厚/mm	累计概率	隐函数 y
1	13	4.00	0.03	-1.23
2	2	3.96	0.06	-1.01
3	1	3.89	0.10	-0.85
4	6	3.88	0.13	-0.72
5	21	3.86	0.16	-0.60
6	29	3.85	0.19	-0.50
7	23	3.84	0.23	-0.40
8	3	3.79	0.26	-0.30
9	24	3.79	0.29	-0.21
10	8	3.75	0.32	-0.12
11	20	3.75	0.35	-0.04
12	7	3.74	0.39	0.05
13	9	3.70	0.42	0.14
14	30	3.69	0.45	0.23
15	26	3.68	0.48	0.32
16	22	3.67	0.52	0.41
17	19	3.66	0.55	0.51
18	11	3.65	0.58	0.61
19	25	3.57	0.61	0.71
20	15	3.55	0.65	0.82
21	16	3.53	0.68	0.94
22	28	3.49	0.71	1.07
23	12	3.47	0.74	1.21
24	27	3.42	0.77	1.36
25	18	3.38	0.81	1.54
26	10	3.35	0.84	1.74
27	5	3.24	0.87	1.98
28	14	3.12	0.90	2.28
29	17	3.09	0.94	2.71
30	4	3.03	0.97	3.42

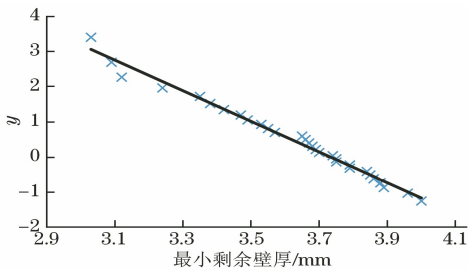


图 5 LNG 管道最小剩余壁厚概率分布趋势线

4 结语

通过研究切向射线扫描检测技术,研发了一套带保冷层的 LNG 管道剩余壁厚检测装置,并验证了该装置的检测精度。通过检测一条 LNG 管

道 30 个分区的剩余壁厚并结合 Gumbel 极值分布原理预测了整条 LNG 管道的最小剩余壁厚,得到了以下结论。

- (1) 通过对切向射线扫描检测技术的分析,获得了 LNG 管道壁厚切向射线检测数据的分布规律。
- (2) 切向射线扫描检测装置可实现带保冷层的 LNG 管道剩余壁厚检测,相对于千分尺,其检测精度误差为 0.04 mm,满足检测精度的要求。
- (3) LNG 管道剩余壁厚满足 Gumbel 极值分布,以此预测出该条 LNG 管道的最小剩余壁厚为 2.49 mm。
- (4) 虽然通过区域检测和计算得到了整条 LNG 管道的剩余壁厚,但预测结果仅为理论计算值,后续应就预测结果的准确性开展现场测试。

参考文献:

[1] 肖丽红,翟俊红,田德永. LNG 保冷不锈钢管道防腐措施[J]. 山东化工,2018,47(12):80-81.

[2] 祁云清,姚安林,黄亮亮,等. 五元联系数在 LNG 接收站失效可能性评价中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2014,24(12):130-136.

[3] 董绍华. 管道完整性技术与管理[M]. 北京:中国石化出版社,2007.

[4] 崔凯燕,王晓霖,杨文,等. 基于内检测评价的管道安全维修决策[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(2): 172-177.

[5] 王斌,霍广华,张鑫. LNG 管道间歇泉的发生与应对措施[J]. 石化技术,2019,26(5):369,360.

[6] 王晓博,高振,侯建国,等. LNG 接收站低温管道 DR 在线检测技术探讨[J]. 低温工程,2020(4):52-58,67.

[7] 罗文华,周祥,吴岚,等. 管道最大腐蚀坑深的极值统计方法及软件研制[J]. 油气储运, 2007, 26(8): 34-38,61,66-67.

[8] 王水勇,任爱. 利用 Gumbel 极值分布预测管道最大腐蚀深度[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2008, 20(5): 358-360.

[9] MELCHERS R E. Extreme value statistics and long-term marine pitting corrosion of steel [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2008, 23(4): 482-488.

[10] 周国强,王雪青,刘锐. 基于改进广义极值分布的核管道最大腐蚀深度预测[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(5):1926-1931.

[11] 张新生,西忠山,王金友,等. 基于改进 GEV 分布的腐蚀油气管道剩余寿命预测[J]. 油气储运, 2019, 38(6):635-641.