

环向裂纹缺陷在长输管道安全运行中的分析

朱建林（临沂市应急管理局，山东 临沂 276000）

摘要：在役长输管道产生缺陷的原因有很多，并且存在的缺陷种类也有很多，因此严格保证管道的安全、准确计算管道使用寿命成为研究重点。我国大多数压力管道都由韧性较好的中低强度的钢材料制成，失效模式通常为塑性破坏失效。因此，需要精确地计算不同缺陷压力管道的塑性极限载荷，并制定出一种适合工程上使用的安全评定方法。

关键词：压力管道；环向裂纹；疲劳寿命；失效概率

石油行业已经成为国家全面发展的重要支柱，因此对于石油的运输问题已经成为近几年研究的重点课题。对于石油天然气等流体介质的输送问题，最合理、最经济且最安全的输送工具就是管道，管道对国民经济的发展有着不可替代的作用，被称为生命线，对我国的生存发展起着“血管”的作用。因此，保证在役压力管道的安全性，就是保障国家的稳定发展、人民的生命健康及安全。

1 环向裂纹缺陷管道的疲劳寿命

分析影响塑性极限载荷的四个重要因素裂纹环向长度、裂纹深度、轴向长度和管径，得出裂纹环向长度和深度对环向裂纹管道的塑性极限载荷影响较大，因此选取裂纹环向长度和裂纹深度作为影响疲劳使用寿命的因素^[1]。

1.1 X100 管线钢的发展

现在工业工程中，对油气管道的材料选择至关重要，使用管径大、设计和运行高压高钢级管材。高钢级管材设计及生产尽量减小了管道的厚度和重量，缩短焊接过程，节省材料，减少管道生产及设计的费用，比如每提高一个钢级可降低成本的 7%。20 世纪五六十年代管道操作压力为 6.3MPa，七八十年代大约 10MPa，90 年代是 14MPa。现在管道设计和操作压力高达 15~20MPa。目前，针对高级管线钢裂纹扩展速率和寿命关系进行分析及计算也成为了重要研究课题^[2]。由于 X100 管线钢的冲击性能对国内的生产仍存在问题，因此还没有对 X100 管线钢进铺设管道，但已收 ISO3183 和 API5L 标准中。

1.2 X100 管线钢的组织与材料性能

X100 管线钢的显微组织由粒状贝氏体、铁素体和马氏体构成，通过 KIP 技术（通过调整钢包内渣中的超低硫含量）、板坯轻压技术、控制轧制技术和连续在线控制冷却技术（TMCP）^[3]。2010 年宝鸡钢管公司

成功研发外径 1219mm，厚度 15.3mm 的 X100 级管线钢，设计力学性能及显微组织成分如表 1 和 2 所示：

表 1 X100 管线钢的力学性能

E	σ_s	σ_b	A Kv	μ	A(%)	n	α
210	843	877	265	0.3	20	20	0.95

表 2 X100 管线钢的组织成分

C	Mn	Si	P	S	Mo	Nb	Ti	Cr
0.069	1.90	0.22	0.007	0.002	0.28	0.045	0.01	0.01

1.3 X100 管线钢 S-N 循环疲劳设计曲线

管线钢母体材料 S-N 循环疲劳交变应力幅值，见表 3 所示：

表 3 温度低于 375℃ 的碳钢、

低合金钢和高强度钢的交变应力幅值（MPa）

σ_b	循环次数					
	1×10^1	2×10^1	3.5×10^1	5×10^1	1×10^2	2×10^2
$793 \leq \sigma_b \leq 896$	2894.8	2205.6	2165.5	1585.3	1206.1	930.5

2 环向裂纹尺寸对管道疲劳寿命影响

对管道外径为 1219mm，厚度为 15.3mm 的 X100 级管线钢，内表面含有宽度为 2mm，初始裂纹深度 $a_0=1.53\text{mm}$ ，环向角度 $2\theta=72^\circ$ 的裂纹缺陷。设计压力为 12MPa，弯矩为 100kN/m，应用 ANSYS 软件分析得到应力最大值位于裂纹其中一个顶端处，最大应力点处于节点 9409 处，对应的上主应力分别为 $\sigma_1=632.78\text{MPa}$ ， $\sigma_2=171.12\text{MPa}$ ， $\sigma_3=29.52\text{MPa}$ ，其中最小值位于管道施加弯矩节点 195 处或裂纹的另一个尖端处。

含环向裂纹缺陷的压力管道中的裂纹主要是浅长型裂纹，扩展方向主要为径向方向扩展，而环向改变很小。取不同环向裂纹长度和不同裂纹深度的裂纹管道，对其交变应力幅和疲劳使用寿命进行计算与分析。管道内表面上出现裂纹，使得管道内部的局部应力增大^[4]。含环向裂纹缺陷的应力管道在

不同缺陷尺寸的状况下, 根据拟合得到的 S-N 曲线可得如下表不同裂纹尺寸求得相应的交变应力幅和疲劳循环次数结果如表 4 所示:

表 4 不同缺陷尺寸管道的疲劳寿命

2θ	B (深度)	S (应力幅)	N (10 ⁴)
36°	1.53	315.94	2.003
	3.06	346.25	1.38
	6.12	360.2	1.172
	9	366.31	1.095
	1.53	316.75	1.983
72°	3.06	349.94	1.319
	6.12	363	1.136
	9	384.74	0.895
	1.53	323	1.831
108°	3.06	356.24	1.227
	6.12	365.77	1.101
	9	398.48	0.775
	1.53	332.31	1.629
144°	3.06	355.68	1.234
	6.12	366.78	1.088
	9	399.56	0.766
180°	1.53	313.16	2.077
	3.06	342.06	1.448
	6.12	364.91	1.113
	9	378.74	0.954
	1.53	307.37	2.248
216°	3.06	342.01	1.45
	6.12	361.6	1.153
	9	370.56	1.044
	1.53	301.03	2.441
270°	3.06	340.89	1.469
	6.12	360.93	1.163
	9	382.06	1.123
	1.53	259.14	4.978
360°	3.06	247.59	4.617
	6.12	236.16	4.124
	9	215.57	3.768

应用 ANSYS 分析得到环向表面裂纹缺陷的压力管道的最大等效应力集中在裂纹尖端。当管道的缺陷是整周环向裂纹时, 最大等效应力集中在管道固定约束面上, 可以认为最大等效应力点与选定施加弯矩的节点 11486 在一条直线上, 该直线并与 Z 轴

平行, 裂纹尖端的最大等效应力决定了裂纹缺陷管道的疲劳使用寿命, 裂纹的长度也影响管道的疲劳寿命。

由图 1 可知, 由于不同因素的影响, 环向裂纹缺陷压力管道的使用寿命同时受到不同程度的影响。在深度一定的条件下, 当 $2\theta < 180^\circ$ 时, 随着环向角的逐渐增大, 相对疲劳循环次数 N 小幅度地呈下降趋势, 当 $180^\circ \leq 2\theta \leq 270^\circ$ 时, 随着环向角度的增大, 相应的疲劳循环次数小幅度地呈上升趋势。当 $2\theta > 270^\circ$ 时, 随着环向角度的增大, 裂纹管道的疲劳循环次数上升趋势明显增加^[5]。当整周裂纹时, 深度较小时, 最大等效应力值相对于任何长度的环向裂纹长度应力值都小。当压力不变, 增加弯矩时, 交变应力幅减小, 则相对疲劳循环次数逐渐变大。同时, 裂纹深度也影响管道的疲劳寿命。

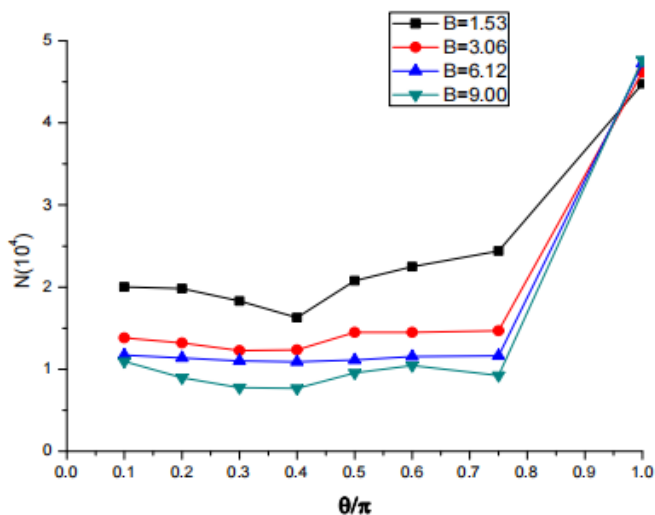


图 1 裂纹长度对疲劳循环次数的影响规律

当裂纹长度不变时, 增加裂纹深度值, 出现疲劳寿命平缓减少的现象, 直至管道失效。应用 ANSYS Workbench 疲劳分析模块, 输入拟合得到 S-N 曲线数据, 在受内压和弯矩组合载荷循环下得到裂纹管道的疲劳使用寿命。

含裂纹缺陷压力管道的裂纹扩展速率与裂纹深度有关, 裂纹深度增加时, da/dN 值也伴着大幅度地加快。当深度达到壁厚的 0.2 倍后, 裂纹扩展速率没有明显变化。当深度达到壁厚的 0.4 倍时, da/dN 值显著加快。因此, 裂纹深度是影响裂纹管道的裂纹扩展快慢至关重要的一个因素。

裂纹长度增加时, 裂纹的扩展速率 da/dN 值也随之有所改变。裂纹深度为定值时, 当环向角度 2θ 共 180° 时, 随着环向角度逐渐增加, 扩展速率 da/dN 值也随着加快。当环向角度 $2\theta > 180^\circ$ 时, 随着裂纹环向角度逐渐增大, 扩展速率 da/dN 值随着逐渐减慢。因此, 裂纹环向长度也是影响管道裂纹扩展快慢的重要因素。

3 环向裂纹缺陷压力管道的失效概率与可靠性

根据分析影响疲劳寿命的两个重要因素裂纹环向长度和裂纹深度, 得出裂纹深度对环向裂纹管道的疲劳寿命影响最大, 因此本章只选取裂纹深度作为影响失效概率值的因素。近几年, 随着计算机模拟技术逐渐发展, 应用计算机数值模拟方法可对缺陷管道模拟足够多循环次数, 如 $10^2 \sim 10^5$ 次。应用 ANSYS 的概率设计功能对在役裂纹管道进行可靠度分析, 应用蒙特卡罗 (Monte-Carlo) 法解决随机变量与结构状态的概率关系。对于 X100 管线钢, 对管道外径为 1219mm, 厚度为 15.3mm 的 X100 级管线钢, 内表面含有宽度为 2mm, 初始裂纹深度 $a_0=9.3\text{mm}$, 环向角度 $2\theta=180^\circ$ 的裂纹缺陷。

表 5 裂纹缺陷管道的随机变量参数

随机变量	分布类型	均值	变异系数
内压 (MPa)	正态分布	12	0.1
弯矩 (kN/m)	正态分布	100	0.1
轴向长度 (mm)	正态分布	2	0.1
裂纹长度 (mm)	正态分布	765	0.1
裂纹深度 (mm)	正态分布	6.12	0.1
屈服强度 (MPa)	对数正态分布	843	0.07
抗拉强度 (MPa)	对数正态分布	877	0.07

应用 ANSYS 对在役缺陷管道进行可靠度分析, 在 P+M 组合载荷作用下有效的结合有限元法和蒙特卡罗法计算管道的失效概率。结果表明, 在置信度为 95% 的情形下, $Z < 0$ 的概率平均值为 1.00%, 因此, 管道的可靠度为 99.00%。 Z 在区间 130~260 之间, 分布空间都是 $Z > 0$ 的状态。因此, 满足极限状态函数 $Z > 0$, 管道是安全的。

表 6 不同模拟次数的可靠度

模拟次数	a=3.06	a=6.35	可靠度 (%) a=9.04	a=10.56
200	99.472	99.246	99.005	98.326
500	99.475	99.381	99.146	98.364

1000	99.584	99.439	99.233	98.406
2000	99.623	99.586	99.265	98.561
5000	99.757	99.706	99.382	98.717

当裂纹深度一定时, 模拟次数越多, 可靠性越精确, 应用 Workbench 进行使用寿命模拟分析, 速度很快。随着裂纹深度的增加, 管道的可靠度逐渐下降。应用 ANSYS 的概率设计功能对在役裂纹管道进行可靠度分析, 选取多组服从正态分布的随机变量分析在役缺陷管道的可靠度, 应用蒙特卡罗 (Monte-Carlo) 法分析管道的可靠度。工程中, 影响参数有很多, 比如地下管道存在温度, 外压作用。而且服从的分布类型也很复杂, 比如标准正态分布, 对数正态分布等。因此, 考虑的因素越多, 管道的可靠度会越精确, 安全性越高, 可以减少事故的发生。

4 结束语

通过对环向表面裂纹压力管道疲劳寿命分析及裂纹扩展速率的分析, 得出结论:

- ①当裂纹是浅长形表面裂纹时, 通过 ANSYS 模拟分析发现最大应力集中处不在裂纹处, 而是集中在在固定约束端, 同时浅长表面裂纹处的应力相对减小, 裂纹扩展速率会减慢, 疲劳使用寿命会增大;
- ②当裂纹为深短形表面裂纹时, 通过 ANSYS 模拟分析发现最大应力集中在裂纹尖端处, 随着裂纹深度增加, 裂纹扩展速率会随之加快, 疲劳使用寿命随之减小;
- ③根据不同裂纹长度和深度对应的疲劳寿命可知, 裂纹深度对管道的寿命影响度比裂纹环向长度要大, 因此使用的管道含有裂纹缺陷时, 应侧重于裂纹深度的测量与分析。

参考文献:

- [1] 邹航宇. 输油管道清管作业标准化管理与探讨 [J]. 石油石化节能, 2021, 11(08): 23-25+4.
- [2] 张新生, 张琪. 基于改进 RFFS 和 GSA-SVR 的长输油管道腐蚀深度预测研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(06): 1598-1610.
- [3] 吴忠. 在役输油管道剩余寿命的预测 [J]. 江西化工, 2019(01): 98-101.
- [4] 刘小多. 次声波检测技术在长输油管道的应用研究 [D]. 抚顺: 辽宁石油化工大学, 2020.
- [5] 梁钰, 井发璇. 长距离输油管道大落差方案研究 [J]. 云南化工, 2018, 45(09): 169-170.