

油气海底管道的风险评价*

赵建平**

(南京工业大学机械与动力工程学院)

赵建平:油气海底管道的风险评价,油气储运,2007,26(11) 5~8。

摘 要 从失效可能性分析和失效后果计算两个方面阐述了油气海底管道的风险评价。介绍了海底管道失效的主要形式和三种失效概率模型,给出了失效可能性等级划分的方法。从安全后果、经济后果和环境后果三个方面说明了海底管道失效后果的计算方法,并根据风险矩阵确定了油气海底管道的风险状况等级。

主题词 海底管道 失效概率 数学模型 风险评价

海底管道是海上油气集输的主要手段,是海洋石油的生命线。海底管道经受自重、管内介质、设计内压、外水压等工作载荷,以及风、浪、流、冰和地震等环境载荷的作用^[1]。因而,海底管道存在腐蚀失效、悬跨疲劳失效、第三方破坏等多种失效模式。

风险由两部分组成,一是危险事件发生的可能性或事故发生的概率或失效概率;二是危险发生后的后果严重程度和损失的程度。将两者量化值综合,称为风险指标^[2]。本研究以挪威 DNV 公司的 RP G101 评定方法为基础^[3],从海底管道的失效概率分析、失效后果分析和风险等级评价等三个方面,对海底管道风险评价的方法进行研究。

一、海底管道失效概率分析

1、海底管道的失效类型

管道失效往往依赖于管道材料、管道结构尺寸、管道周围的环境条件、操作条件以及相应的保护措施等。海底管道的失效一般可以分为外部损伤、内部损伤和机械损伤等形式。

外部损伤与外部环境和保护条件有关。外部损伤是计算不同材料暴露在海水中环境中的失效概率。所有涂层和保温层都要评价其保护性能。保温层可能会使盐水保持并在材料表面浓缩,因此会加快腐蚀或开裂。海水也会在管道支座和卡箍等位置积

聚,加快未保温管道的腐蚀速率。外部损伤的计算要考虑材料的类型、使用条件,包括温度、压力、涂层条件、保温层的耐水性能、损伤速率等因素。

内部损伤主要计算由于腐蚀介质造成的材料的损伤,包括均匀腐蚀、局部腐蚀和应力腐蚀开裂等失效形式。内部损伤的计算主要考虑材料类型、潜在的腐蚀物、使用条件、应力腐蚀的类型、损伤速率等。例如,CO₂ 造成的均匀腐蚀和局部腐蚀、H₂S 的应力腐蚀开裂、磨损腐蚀、微生物腐蚀等。

机械损伤是由于管道振动、流体流动作用、悬跨引起的管道振动等原因造成的,可能导致疲劳裂纹扩展和断裂。对于管道系统,损伤常常发生在特定的位置,像焊接接头、分支管、支架等,在这些地方有较高的应力集中系数和较强的约束,可能会增加结构的局部应力。

2、失效概率模型

研究失效概率模型的目的是确定管道会发生何种形式的退化机制,评估每种相关退化机制下的当前失效概率,评估损伤的发展,从而得到与时间相关的失效概率。常见的有以下三种失效概率模型(见图 1^[2])。

(1)速率模型

速率模型假定损伤的增量是时间的函数,随着时间的变化,损伤将积累,当损伤速率相对较低时,通常允许在失效前进行大量检验。这种模型通常由

* 中国石油化工股份有限公司科技开发项目(305023)。

** 210009,江苏省南京市新模范马路 5 号;电话:(025)83587289。

检验来控制,检测的结果可以用于修正速率模型,以便更好地描述实际情况。损伤的结果是构件产生局部或全面壁厚减薄。例如,金属大气腐蚀量与时间的关系,ASTM认为满足 $W=at^b$ 的速率模型(W 为腐蚀量, t 为时间, a 、 b 为常数)^[4]。

随着壁厚减薄,失效概率将随着时间增长,也依赖于材料的载荷条件,其控制参数包括损伤速率、壁厚、损伤尺寸、材料特性、操作压力等。另外,每一种损伤机制也受到诸如温度、pH值等参数的控制。

(2)敏感模型

敏感模型的失效概率值与操作条件有关,如果给定的条件值是时间的常数,则失效概率仍保持为时间的常数,在服役一段时间后损伤快速发展。这意味着损伤的开始和发展无法用检验来确定,但是可以对关键工艺参数(操作条件的偏离或变化)进行监控。

(3)无关模型

构件预期不会产生明显损伤现象,这个模型设定失效为一个固定的失效概率值,忽略时间的影响,失效概率通常为一较低的水平,例如 10^{-5} ,检验对于这个模型不起作用。

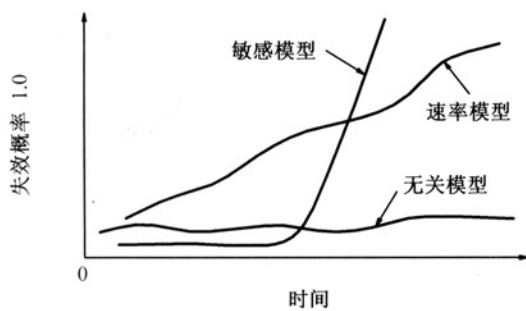


图1 失效概率模型示意图

3、失效可能性等级划分

定量失效概率数值范围是0~1,对于某一特定的管段,往往得到一个具体的失效概率计算值,为了进行等级划分,DNV-RP-G101推荐采用表1的方法进行失效可能性等级划分^[3]。在表1中,一个小的管道样本空间是指20~50个考察对象,而一个大

的管道样本空间是指200~500个考察对象。

表1 失效概率等级划分^[3]

等级	年失效概率		描述
	定性	定量	
1	>10 ⁻²	很高	在小的管道样本空间中,每年发生一次或一次以上的失效
2	10 ⁻³ ~10 ⁻²	高	在大的管道样本空间中,每年发生一次或一次以上的失效
3	10 ⁻⁴ ~10 ⁻³	中等	在小的管道样本空间中,每年发生一次或一次因超出设计寿命造成的失效
4	10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁴	低	在大的管道样本空间中,每年发生一次或一次因超出设计寿命造成的失效
5	<10 ⁻⁵	很低	几乎没有发生过失效

二、海底管道失效后果分析

失效后果是因失效事件一旦发生所产生的后果,包括安全后果、经济后果以及环境后果等。

1、失效后果评价应考虑的因素

(1)安全后果考虑失效对人员的伤亡,以工作人员的潜在生命损失PLL(potential loss of life)来表示,是指由于燃烧、爆炸或毒物释放造成的周围生命的损失。

(2)经济后果是设备维修材料费、人工费和因结构破坏造成的构件失效和停产损失的总和,经济后果一般以货币形式表示。

(3)环境后果要考虑油、气和化学物泄漏对环境的影响,以释放到环境中的污染物的质量或体积表示,或者以清理污染的费用来表示,包括罚金和赔偿款等项目。

表2和表3列举了点火泄漏和非点火泄漏失效后果评价应考虑的因素。

表2 点火泄漏失效后果评价应考虑的因素^[3]

安全后果	经济后果	环境后果
(1)燃烧对人员的伤害	(1)设备或结构的破坏及修理	(1)毒性气体泄放
(2)直接冲击波对人员的伤害(飞溅物、落物)	(2)设备或结构的更换	(2)烟气
(3)在逃跑和疏散过程中的伤害	(3)生产中断	
	(4)对公司声誉的破坏或股价影响	

表 3 非点火泄漏失效后果评价应考虑的因素

安全后果	经济后果	环境后果
(1) 毒气释放 (2) 窒息性气体泄放 (3) 高压流体对人员的冲击	(1) 中断生产 (2) 修理	碳氢化合物泄漏到海洋中

2、失效后果事件树

有的泄漏将导致火灾和爆炸,例如点火泄漏;有的则不会引起火灾或爆炸,例如非点火泄漏。泄漏后要建立一个描述事件顺序的事件树,用于计算末端事件出现的概率。图 2 为海底管道泄漏的典型事件树,事件树中的末端事件表述列入表 4。事件 2 和事件 3 与点火事件有关,事件 1 是非点火事件,表中 P_{ign} 是点火概率, P_{ESC} 是爆炸概率。

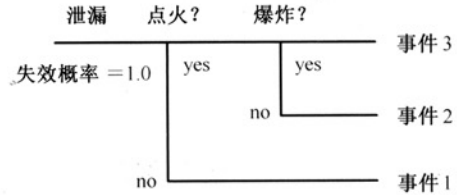


图 2 典型事件树

表 4 末端事件的描述

末端事件编号	描述	出现概率
事件 1	有泄漏,既没有点火,也没有爆炸	$P_1 = 1 - P_{ign}$
事件 2	有泄漏,泄漏出的气体被点火,并产生爆炸	$P_2 = P_{ign} \times (1 - P_{ESC})$
事件 3	有泄漏,泄漏出的气体被点火,并产生爆炸,爆炸冲击波超出防爆墙的设计能力,导致对周围模块的破坏	$P_3 = P_{ign} \times P_{ESC}$

3、点火概率 P_{ign} 计算

对于一个给定的泄漏事件,点火概率与泄漏速率、燃烧种类、点火源、泄漏孔径、浓度系数 P_V 、连续点火源系数 P_c 、随机点火源系数 P_d 等有关。对于给定泄漏事件的点火概率, P_{ign} 按式(1)计算:

$$P_{ign} = P_V (P_c + P_d - P_c P_d) \quad (1)$$

(1) 浓度系数 P_V 的计算

浓度系数 P_V 可按式(2)进行计算:

$$P_V = \frac{C}{LEL} \quad (2)$$

如果 $P_V = C > LEL$, 则 $P_V = 1.0$ 。

式(2)中的 LEL 是气体的最低爆炸极限,其中甲烷为 5%,丙烷为 2%; C 为气体的浓度,它是时间(以秒为单位)、物质泄漏率和通风率的函数。

(2) 点火系数 P_c 的计算

P_c 主要考虑可燃物与热的表面或其它连续的可能的点火源的接触问题:

$$P_c = 1 - (1 - Q_1 \times Area) \times (1 - Q_2 \times HotWorkingHours) \times (1 - (Q_{3A} \times Pumps + Q_{3B} \times Compressors + Q_{3C} \times Generators)) \times (1 - Q_4 \times Area) \quad (3)$$

式(3)中 $Q_1 \sim Q_4$ 为常数,见表 5。

(3) 点火系数 P_d 的计算

P_d 考虑的是可燃物与点火源靠近的设备的接

触问题,是随机点火源参数:

$$P_d = 1 - (1 - R_1 \times Area) \times (1 - (R_{3A} \times Pumps + R_{3B} \times Compressors + R_{3C} \times Generators)) \times (1 - (R_{4A} + R_{4B} \times Area)) \quad (4)$$

式(4)中的常数 $R_1 \sim R_4$ 见表 5。

表 5 计算 P_c 、 P_d 用到的常数

常数	油	气	常数	油	气
Q_1	5.7×10^{-5}	3.3×10^{-6}	R_1	3.5×10^{-4}	2.0×10^{-5}
Q_2	5.7×10^{-5}	5.7×10^{-5}	R_{3A}	2.0×10^{-3}	7.6×10^{-5}
Q_{3A}	4.4×10^{-3}	6.5×10^{-5}	R_{3B}	1.6×10^{-2}	1.6×10^{-3}
Q_{3B}	1.5×10^{-2}	1.5×10^{-3}	R_{3C}	3.7×10^{-2}	3.7×10^{-3}
Q_{3C}	3.5×10^{-2}	3.5×10^{-3}	R_{4A}	9.0×10^{-5}	5.0×10^{-6}
Q_4	6.7×10^{-4}	2.0×10^{-5}	R_{4B}	3.5×10^{-4}	1.7×10^{-5}

4、爆炸概率 P_{ESC} 计算

如果点火后出现爆炸事件,将引起火灾和冲击波,导致相关设备或管道的破坏,甚至包括那些被防爆墙隔离的设备。爆炸概率 P_{ESC} 的计算式为:

$$P_{ESC} = A \cdot e^B \cdot \frac{p}{p_0} \quad (5)$$

式中 p —— 冲击波产生的超压;

p_0 —— 防爆墙冲击设计压力。

表 6 给出了 A 、 B 常数,它们是气体泄漏的

函数。

表 6 P_{esc} 计算中用到的常数

物质泄漏速率 (kg/s)	A	B
<1	0.540 3	-38.193
0.1~10	0.917 4	-4.554 4
>10	1.053 8	-2.649 4

5、 失效后果计算

每一末端事件的发生概率乘以末端事件(图 2 中的事件 1、事件 2、事件 3)的后果,得到末端事件的失效后果的贡献,所有事件和孔径尺寸下的失效概率之和就是该损伤机制导致泄漏的总的失效后果,见表 7 和式(6)。 P_1 、 P_2 、 P_3 分别表示事件 1、事件 2、事件 3 的发生概率, S 、 B 、 E 分别表示安全、经济和环境后果。所以,总的失效后果为:

$$COF = (P_1 \times S_1) + (P_1 \times B_2) + (P_1 \times E_1) + (P_2 \times S_2) + (P_2 \times B_2) + (P_2 \times E_2) + (P_3 \times S_3) + (P_3 \times B_3) + (P_3 \times E_3) \quad (6)$$

表 7 总的失效后果计算⁽²⁾

出现概率	后果类型		
	安全	经济	环境
P_3	S_3	B_3	E_3
P_2	S_2	B_2	E_2
P_1	S_1	B_1	E_1

出现概率	后果贡献		
	安全	经济	环境
P_3	$P_3 \times S_3$	$P_3 \times B_3$	$P_3 \times E_3$
P_2	$P_2 \times S_2$	$P_2 \times B_2$	$P_2 \times E_2$
P_1	$P_1 \times S_1$	$P_1 \times B_1$	$P_1 \times E_1$

三、海底管道风险等级评价

风险的最方便的表达方式是矩阵,它可以明确表示两个因素的相对贡献,图 3 为 DNV RP-G101 推荐的一个 5×5 的矩阵。矩阵的纵坐标为失效概率,横坐标为失效后果。该风险矩阵将海底管道风险分为四个等级,I 级为低风险区、II 级为中等风险区、III 级为中高风险区、IV 级为高风险区。对于低风险区,一般认为无需采取措施,能继续使用,可以适当延长检验周期;对于中等风险区,一般认为可以继续使用,但要加强检测或监测,安排适度的检(维)

修计划,检验周期的确定以到下一检验期风险状况保持中等风险为原则;对于中高风险区,必须分析风险产生的原因,缩短检验周期;对引起中高风险的主要位置进行监控,防止事故发生;在检验过程中要注意选择有限的检验方法,应选择高度有效的检验;对于高风险区,应立即停运,进行维修管理,消除引起高风险的因素,将风险控制在中等或中等以下风险等级。

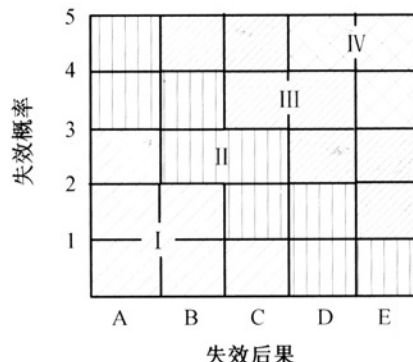


图 3 海底管道风险评价用矩阵

四、结束语

油气长输管道风险评价的主要目的,是最大限度地减少事故发生率和尽可能地延长管道的使用寿命,合理地分配有限的管道维护费用。由于海底管道服役环境复杂、恶劣,因此,保证海底管道的安全平稳运行是首先考虑的问题。运用风险评价的理念和基于风险的检验策略对海底管道进行失效概率分析和失效后果评价,能够为油气海底管道的完整性管理提供有力的技术支持。

参 考 文 献

1. 赵荣飏:石油管道工业发展战略前景研究,管道技术与设备,1994(2)。
2. 戴树和:风险分析技术(一)——风险分析的原理和方法,压力容器,2002,19(2)。
3. DNV RP-G101: Risk based inspection of offshore topside static mechanical equipments, Det Norske Veritas, 2002.
4. 严大凡 翁永基等:油气长输管道风险评价与完整性管理,化学工业出版社(北京),2005。

(收稿日期:2006-08-24)

编辑:刘春阳