

综 述

油气管道的风险分析(续一)

潘家华*

(中国石油天然气总公司)

潘家华. 油气管道的风险分析(续一). 油气储运, 1995, 14(4): 1~7

摘 要 对引起管道事故的腐蚀、设计和操作三方面因素进行了分析评分。腐蚀破坏是管道中最常见的破坏, 腐蚀主要指内腐蚀和外腐蚀, 内腐蚀风险的大小与介质腐蚀性强弱及防腐措施有关, 其风险分数占腐蚀总分数的 30%, 外腐蚀是管道腐蚀的主要因素, 与阴极保护、外涂层质量、土壤腐蚀性、使用年限、有无金属埋设物、电流干扰及应力腐蚀等因素有关, 分别对这些因素进行分析评分; 原始设计与风险状况有密切的关系, 设计时为简化计算所选用的设计系数与实际情况有差异, 这直接影响了风险状况, 设计因素主要包括钢管的安全因素、系统安全因素、疲劳因素、水击可能性、水压试验状况、土壤移动状况几个方面, 并对其进行评分; 风险的一个重要方面来自人的误操作, 据美国统计, 人的误操作所造成的灾害占灾害总数的 62%, 管道的误操作主要指设计、施工、运营、维护四个方面的误操作, 要减少误操作, 首先要提高人的群体素质, 其次要加强第三方监督。

主题词 腐蚀 设计 操作 评分 风险分析

关于腐蚀方面破坏因素的评定

腐蚀破坏是管道最常见的破坏因素。对于埋地管道而言, 腐蚀来自两个方面, 即内腐蚀和外腐蚀, 进行风险评定时应从这两个方面进行。

1. 内腐蚀 (非可变因素 0~15 分)

内腐蚀的风险大小与介质腐蚀性的强弱及内防腐措施有关。内腐蚀总分数为 0~30 分, 占腐蚀因素总分数的 30%。

(1) 介质腐蚀(非可变因素 0~15 分)

在天然气中如含有 H_2S 、 H_2CO_3 及在原

油中含有 S 成份均会造成腐蚀风险, 在此处只概略的加以分类, 编制规范时可做更详细的工作。

强腐蚀	0 分
中等腐蚀	5 分
只在特别情况下出现腐蚀	10 分
无腐蚀	15 分

“只在特别情况下出现腐蚀”是指一般情况下介质腐蚀性轻微, 但在所输介质中含有严重腐蚀物如 S、 CO_2 、盐水等时, 则会出现腐蚀。例如天然气进入管道之前均要将 S、 CO_2 、 H_2O 等脱除, 并使之符合标准, 但当设备损坏而管道又无实时监测设备时, 则属该种情况。

* 102849, 河北省廊坊市金光道 44 号; 电话: (0316)2075311。

(2) 内保护层及其它措施(可变因素 0~15分)

主要包括三个方面即加设内涂层、注入缓蚀剂、清管。管道输送天然气时有时要喷涂内涂层,如 FBE(Fusion Bonded Epoxy)等,其目的主要是减小介质流动时的摩阻,但也可起到防止内腐蚀的作用。

清管除可减少摩阻外,亦可排除杂物,有利于减少内腐蚀。

缓蚀剂是针对介质特性而注入的一种化学药剂,如除氧剂和消除微生物腐蚀的药剂,评估者必须了解清楚其有效性。

评分办法如下:

无	0分
有内涂层	8分
注入缓蚀剂	6分
清管	4分
其总和不大于	15分

2. 外腐蚀

外腐蚀占腐蚀因素总分的 70%,即外腐蚀是管道腐蚀破坏的主要因素。外腐蚀与阴极保护的状况、涂层是否优良等诸多因素有关,现分述如下。

(1) 阴极保护(可变因素 0~20分)

阴极保护的优劣取决于两个因素,即①保护电压、保护长度是否符合设计和规范要求;②要经常检查以确保阴极保护正常运行。其评分办法如下。

①阴极保护是否符合设计及规范要求

优	10分
良	6分
中	3分
无	0分

②检查是否经常

检查时间间隔为 6 个月	10分
检查时间间隔 6 个月~1 年	6分
检查时间间隔 1~2 年	3分
检查时间间隔 2 年以上	0分

(2)管道外涂层(不可变因素 0~30分)

涂层的可靠性决定于涂层的种类及产品质量、施工水平、检验及质保体系的状况、以及检查出的缺陷是否能及时、可靠的修补。

①涂层的种类及质量(0~10分) 涂层常用的有石油沥青、煤焦油磁漆、聚乙烯(简称 PE)、环氧粉末喷涂(简称 FBE)、三层结构(指底涂层为 FBE,中间有胶带,外部为 PE)、聚乙烯冷缠胶带(简称 Tape)等,每种防腐性能有一定差异,而同一品种不同厂家的产品以及不同时期的产品也有差异,故难以做明确的划分,现仅做如下建议。

三层结构	8~10分
PE	6~8分
FBE	6~8分
煤焦油磁漆	4~6分
Tape	4~6分
石油沥青	2~4分

②涂层的施工质量(0~8分) 参考国外做法,施工质量按优、良、中、劣分为四等

优	8分
良	5分
中	3分
劣	0分

③涂层检验(0~8分) 已建立质保体系,并已取得 ISO 9000 认证者可认为“优”;已建立质保体系,但尚未取得 ISO-9000 认证者可认为是“良”;未建立质保体系,但仍设有检验人员并有一定手段者,可认为“中”;无专人检验,有漏检者为“劣”。其评分办法

优	8分
良	5分
中	3分
劣	0分

④缺陷的修补(0~5分) 发现有缺陷能及时记录并正确修补者,可认为“优”;无正式记录却能及时修补,这种无严格规章制度者可认为“良”;无记录、能修补但不认真者为

“中”:可能有漏补者为“劣”。

优 5分
良 3分
中 1分
劣 0分

(3) 土壤腐蚀性(非可变因素 0~4分)

土壤的腐蚀性按土壤的电阻率考虑
低电阻率者(小于 $500 \Omega \cdot \text{cm}$) 0分
中等电阻率者($500 \sim 10\,000 \Omega \cdot \text{cm}$)
2分

高电阻率者(大于 $10\,000 \Omega \cdot \text{cm}$) 4分

(4) 使用年限(非可变因素 0~3分)

0~5年 3分
5~10年 2分
10~20年 1分
20年以上 0分

以上是参考国外文献,20年以上取0分,不是20年以后就到了寿命的极限,而是表明使用年限上对减少风险无优势。

(5) 其它金属埋设物(非可变因素 0~4分)

在管道的附近(150 m以内)有其它埋设的金属物时,可能会造成对阴极保护的干扰,即在150 m以内的埋设金属物均对管道不利。

评分与整个评估线路长度内非金属物的数量有关,具体评分方法如下:

无其它金属埋设物 4分
其它金属埋设物 1~10个 2分
其它金属埋设物 11~25个 1分
其它金属埋设物 >25个 0分

(6) 电流干扰(非可变因素 0~4分)

在管道附近有高压交流电线时,会在管道附近产生磁场或电场,并在管道内形成电流,当电流离开管道时会损害涂层或管材。

评分方法如下:

在管道两侧各150 m范围内,无高压线者 4分

该范围内有高压线,且有保护措施者
2分

该范围内有高压线,又无防护措施者
0分

(7) 应力腐蚀(非可变因素 0~5分)

在有拉应力、腐蚀环境、缺陷的情况下,三者具备则存在应力腐蚀断裂的危险,称为SCC (Stress Corrosion Cracking)

是否会真正产生断裂,还与材料的夏氏冲击值有关,在这方面有诸多论述,简要了解可参阅文献[4]。具体评分如下(见表4)。

表4 应力腐蚀的评分

腐蚀环境	压力值占 MAOP(最大允许操作压力)百分数			
	0~21%	21%~50%	51%~75%	>75%
强	3分	2分	1分	1分
中	4分	3分	2分	1分
弱	4分	4分	2分	2分
无	5分	5分	3分	3分

表4中“腐蚀环境”指介质腐蚀状况与土壤腐蚀状况的综合考虑。如介质腐蚀性及土壤腐蚀性均强,则腐蚀环境为“强”;二者中有一者为强,则腐蚀环境可按“中”考虑;二者均为弱,可按“弱”考虑,由评定者酌情而定。

综上所述,腐蚀原因破坏因素风险分数总计最高为100分,内、外腐蚀最高分别为30分和70分。分数越高说明腐蚀破坏的概率越小,分数越低则说明腐蚀破坏的概率高。

“应力腐蚀”在管道内、外均会产生,此处暂放在外腐蚀范围,为简化,不单独评分。

关于设计方面破坏因素的评定

原始设计与管道的风险状况有密切关系。设计时为简化计算,不得不采取一些简化模型来选取一些系数,这些与实际状况的差异都会直接影响风险状况。设计因素可分解

为下述几个方面。

1. 钢管安全因素(非可变因素 0~25 分)

钢管厚度的计算值与实际选用值会有一些差异,原因有①计算值必须向上圆整,按规范(如 API 52)取标准厚度;②有时从经济上考虑,大于计算厚度的库存积压的较厚钢管被采用。若 $X = \text{钢管实际厚度} / \text{钢管计算厚度}$ 根据 X 的数值,建议按表 5 的方法评分,除表 5 方法外,亦可按下式计算得分:

$$(X - 1) \times 20 = \text{钢管安全因素得分}$$

表 5 钢管安全因素评分

比值 X	评 分
1.00~1.10	2 分
1.11~1.20	5 分
1.21~1.40	9 分
1.41~1.60	12 分
1.61~1.80	16 分
>1.81	20 分

2. 系统安全因素(非可变因素 0~20 分)

设计计算壁厚时所有采用的压力称之为最大允许操作压力,如前所述,用 MAOP 表示。但管道现实的实际操作压力一般小于 MACP 其原因有:

(1)油气田有一个成长过程,目前尚未达到预定的最大生产量,实际输量小于设计输量,故实际操作压力小于 MAOP;

(2)油气田已到后期,生产量逐年下降,故实际输量小于设计输量,从而实际操作压力小于 MAOP;

(3)原设计输量估计偏高,故实际操作压力永远不可能达到 MAOP。

MACP 与实际压力之差值越大,对安全越有利,出现事故的概率越小。

$$y = \text{MAOP} / P \geq 1 \quad (1)$$

式中 P —实际操作压力。

系统安全因素的评分可根据系统安全因素 y 值确定,请见表 6。

表 6 系统安全因素评分

y	评 分
2.0	20 分
1.75~1.99	16 分
1.50~1.74	12 分
1.25~1.49	8 分
1.10~1.24	5 分
1.00~1.10	0 分

除表 6 外,可按下式计算得分

$$(y - 1) \times 20 = \text{系统安全因素得分} \quad (2)$$

3. 疲劳因素(可变因素 0~15 分)

管道内压的波动及外负荷引起的应力变化,如车辆在埋地管道上方的行驶等均可能因应力的交变及伴随循环次数的增长,造成管道内缺陷性的疲劳裂纹扩展。当裂纹扩展至某一临界值时,造成管道的疲劳断裂,形成事故。

油气管道中缺陷的疲劳扩展与应力交变的形态、缺陷的形状、材料的韧性等多种因素有关,此处不多做论述,可参见文献[4](为简化评分方法并参考国外文献)。

现评分方法仅依靠两个因素,即应力变化的幅度和交变循环的次数。

从正常的操作压力 P 增加至峰位 P_K ,再降至 P ,称为一个循环。 $(P_K - P)$ 为变化幅度

$$Z = (P_K - P) / P \quad (3)$$

式中 Z —疲劳因素。

若管道受到一种以上的疲劳因素的影响,则按表 7 求出各种情况下的得分,然后取低值。例如有一条气管道每两周做一次压缩机的切换,切换时,另一台压缩机启动,其压力波动为 1.4 MPa,与此同时,在埋地的输气管道上方有车辆通过,车辆引起管道的外压力为 $3.5 \times 10^4 \text{ Pa}$,车辆每天通过约 100 次,

该段管道已运行 4 年,其操作压力为 6.9 MPa,对该管道评分时,第一种情况,在运行 4 年后其循环次数为

$$2 \text{ 次/周} \times 52 \text{ 周/年} \times 4 \text{ 年} = 416 \text{ 次}$$

其 Z 值为:

$$Z = \frac{(6.9 + 1.4) - 6.9}{6.9} = 0.20$$

查表 7,可近似取 12.5 分

第二种情况,在运行 4 年后其循环次数为

$$100 \text{ 次/天} \times 365 \text{ 天/年} \times 4 \text{ 年} = 146 \text{ 000 次}$$

$$Z = \frac{(6.9 + 0.035) - 6.9}{6.9} = 0.05$$

查表 7,可近似取分为 7 分

因取低值,故该情况疲劳因素评分为 7 分。

疲劳因素的评分见表 7。

表 7 疲劳因素评分

Z	循环次数				
	<10 ³	10 ³ ~10 ⁴	10 ⁴ ~10 ⁵	10 ⁵ ~10 ⁶	>10 ⁶
1.00	7	5	3	1	0
0.90	9	6	4	2	1
0.75	10	7	5	3	2
0.50	11	8	6	4	3
0.25	12	9	7	5	4
0.10	13	10	8	6	5
0.05	14	11	9	7	6

4. 水击可能性(可变因素 0~10 分)

启停泵时及迅速开闭阀门均可能引起水击。水击值与介质的密度和弹性、流动速度、流动停止的速率等诸多因素有关,水击发生后,水击压力会向上流方向传递,与出站压力叠加,有时会对管道造成威胁。

为防止水击超压破坏,有时装设泄压阀或采取超前保护等措施。

水击可能性的评分按高、低、无三档评定。其中:

高可能性 0 分

低可能性 5 分

无可能性 10 分

高可能性指有产生水击可能,但又无水击保护措施者;低可能性指有产生水击可能,也有水击保护措施者;无可能性指无产生水击可能或虽然可能产生水击,但水击压力低微,如开式流程输送原油。

5. 水压试验状况(可变因素 0~25 分)

一般认为适当的提高水压试验压力,可以排除更多存在于焊缝和母材中的缺陷,从而增加管道的安全性。国内通常取试验压力为 1.25 MAOP,对输油管道取许用压力为 0.72 σ_s (规定的最小屈服值),试压时取 0.9 σ_s 。评分方法见表 8。

表 8 水压试验状况评分

H 值	评分
$H < 1.10$	0
$1.11 < H < 1.25$	5
$1.26 < H < 1.40$	10
$H > 1.40$	15

注 $H = \frac{\text{试验压力}}{\text{最大允许操作压力}}$

也按下式对水压试验进行评分

$$\text{水压试验状况得分} = 30(H - 1) \quad (4)$$

如风险评估时间与试压时期间隔较短,对安全有利,也就是风险较小,故可加分。

$$\text{试压间隔加分} = 10 - A \quad (A \text{ 为试压与评估间隔的年数}) \quad (5)$$

如间隔为 10 年,则加分为零,如超过 10 年仍取零,不出现负值。举例,一条管道最大允许操作压力为 6.9 MPa,试验压力为 9.66 MPa,评估时与投产试压间隔为 6 年,其评分情况是

$$H = \frac{9.66}{6.9} = 1.4$$

按式(4)计算

$$\begin{aligned} \text{水压试验状况得分} &= 30 \times (1.4 - 1) \\ &= 12 \text{ 分} \end{aligned}$$

按式(5)计算

试压间隔加分 = 10 - 6 = 4 分

故总计为 12 + 4 = 16 分

6. 土壤移动状况(非可变因素 0~5 分)

在管道埋设处土壤的移动,会造成管道中应力的增加,从而带来危险。

土壤移动大致有以下几种状况:

(1)滑坡见图 2。

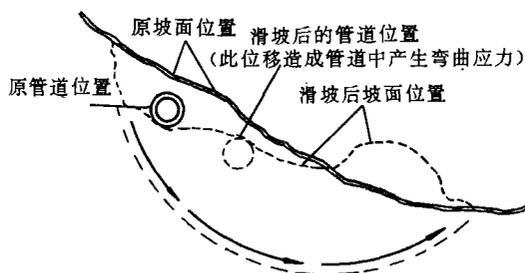


图 2 滑坡造成管道位移示意图

由图 2 看出,由于滑坡使管道位移到一个新的位置,管壁中产生了附加应力,转移可能是突然发生的,也可能是缓慢进行的,二者所产生的后果是近似的。

(2)管道处于不稳定的土壤中,土壤温度的变化及水份的变化均可能造成土壤的上凸及下陷,并给管道带来威胁。

(3)管道埋在冰冻线以上,冬季土壤结冰或形成冰柱,土壤膨胀,对管道形成威胁。

管道的刚性越大,对土壤位移就越敏感。地震以及活动断层的错动对管道的影在此处不做论述,对穿过活动断层及高地震区的管段需单独进行评估。

土壤移动状况评分可按表 9 进行。

表中“高”指管道所经地段土壤移动经常,且移动量大,对于刚性很大的管道亦划归这一类(如铸铁管等);“中”指管道所经地段土壤有移动,但不经常或管道埋深较大,土壤移动对管道影响较小;“低”指管道所经地段

土壤有移动,但至今从未发生;“无”指所经地段不可能发生土壤移动。

表 9 土壤移动状况评分

土壤移动可能性	评 分
高	0 分
中	2 分
低	4 分
无	5 分

关于操作方面破坏因素的评定

风险的一个重要方面是来自人的误操作,根据美国统计,在所有的灾害中,由于人的误操作所造成的灾害占 62%,而其余的 38%为天灾。

如何减少“误操作”,从工程技术上讲,可能要从两个方面入手。首先要提高人的群体素质,即提高管理水平、技术水平以及群体的道德水平,如敬业精神、合作精神、刻苦钻研的精神等。其次是加强第三方监督,人总会犯错误,有时人或一个群体难以纠正、发现自身的错误,第三方监督显然是必要的。所谓“第三方”是指业主、承包者以外的一方。

操作因素可分解为以下四个因素评分。

1. 设计误操作因素(可变因素 0~30 分)

可根据设计质量,分为优、良、中、差四个等级评分,“优”表明误操作少,即出现设计失误的风险低,“差”表明误操作多,而出现设计失误的风险高。这里所指的失误是指在安全方面的失误,如对引起事故的因素考虑不周、消防措施不得力,材料选择不当等,具体评分方法如下:

优	30 分
良	20 分
中	10 分
差	0 分

“优”指设计一方有充分的进行该项设计的经验,并有优秀的第三方进行监督者;“良”指设计一方有充分的进行该项设计的经验,虽有第三方监督,但不得力者,或有优秀的第三方监督,但设计一方经验较欠缺者;“中”指设计一方有充分的进行该项设计的经验,但无第三方监督者;“差”指设计一方无经验,又无第三方监督者。

2. 施工误操作因素(可变因素 0~20分)

施工误操作包括未按设计规定的技术要求进行的操作,即焊缝有超过规定值的缺陷,涂层质量不佳以及下沟回填时将涂层损伤,甚至将钢管本身造成损伤等。施工也按优、良、中、差四个等级评分,评分方法如下:

优	20分
良	12分
中	6分
差	0分

“优”指施工一方有充分的进行该项施工的经验,并有优秀的第三方监督者;“良”指施工一方有充分的进行该项施工的经验,虽有第三方监督,但不得力,或有优秀的第三方监督,但施工一方经验欠缺者;“中”指施工一方有充分的进行该项施工的经验,但无第三方监督者;“差”指施工一方无经验又无第三方监督者。

应特别指出以上所指的“经验”指管理技术诸方面成功的经验,而不单纯指设计、施工过多少管道。如已建立质保体系并已取得ISO 9000认证者应按有充分的经验考虑。

3. 运营误操作因素(可变因素 0~35分)

操作规程不完善,工人不熟练,遇到非常情况处理不当,安全系统操作失灵,机械工人维修不善,电信、电力工人误操作等均可造成

事故。运营因素按优、良、中、差四个等级评分,即

优	35分
良	25分
中	10分
差	0分

“优”指规章制度完善,工人经过严格培训,持证上岗,且在风险评估前无严重操作失误而造成事故者;“良”指规章制度基本完善,主要岗位工人经过专门培训者;“中”指规章制度不够完善或虽完善而未严格执行,工人基本上未经过培训者;“差”指无规章制度或有章不循,工人未经培训者。

4. 维护误操作因素(可变因素 0~15分)

维护指对设备、仪表的维护。维护不当亦会造成严重后果,维护按以下三方面评分:

文件检查	0~2分
计划检查	0~3分
规程检查	0~10分

对重要仪器设备的维护检查必须记录在案,并应有专门档案,文件齐全者取2分,无文字记录者为0分;对重要的仪器设备必须定期维护、按计划进行,执行较好者为3分,无计划者为0分;规程检查指对重要的仪器设备必须有完善的检查项目、维护方法,以便指导维护工人或操作者的实践,优良者取10分,不够完善者取5分,无规程者为0分。

(未完待续)

参 考 文 献

- 潘家华. 油气管道断裂力学分析. 北京:石油工业出版社,1989

(收稿日期:1995-03-22)

编辑:张彦敏