输油管线螺旋焊口断裂失效的力学分析

王力霞1,韩在鹏2,韩冰冰3,马春阳1,王权鑫4

(1. 大庆石油学院 机械科学与工程学院,黑龙江 大庆 163318; 2. 大庆石油管理局 供水公司,黑龙江 大庆 163451; 3. 大庆油田技术培训中心,黑龙江 大庆 163255; 4. 大庆油田有限责任公司 第六采油厂,黑龙江 大庆 163314)

摘 要:分析了东北某输油管线螺旋焊口断裂失效的原因,计算了螺旋焊管及焊口应力、裂纹扩展速率和承载极限 压力.失效分析结果表明:起源于未熔合区的焊接缺陷作为先天性裂纹,在输油管线输油的过程中,由于管线输送原油的 压力波动而逐渐发生疲劳扩展,同时随着焊口部位剩余厚度的减少,当焊口承受的极限应力达到实际工作应力时管线将 沿焊口发生断裂.

关键 词:输油管线;螺旋焊管;断裂失效
 中图分类号:TE973 文献标识码:A 文章编号:1000-1891(2004)04-0058-03

0 引言

自 20 世纪 50 年代末,我国油气输送管道主要采用螺旋焊管.油气管线沿螺旋焊口发生的断裂事故 时有发生,如 1994 年 7 月,在长春输油站出站口附近管线的螺旋焊口突然发生断裂,漏油近 2.0×10³ t, 并导致全线停输原油.该管道于 1972 年底建成,自 1974 年投入使用,管线所用材料为 16 Mn,采用埋弧 焊自动焊接结构,输送大庆油田采出的原油,设计正常的工作压力为 4.02 MPa,事故发生时,出站运行压 力为 3.90 MPa,压力较平稳. 拟对该段管线发生的断裂事故进行力学分析,找出其失效原因.

1 管线概况

管线外径为 720 mm,壁厚为 8 mm,采用焊接结构. 螺旋焊缝采用埋弧自动焊,每段管线间用环焊缝 连接. 螺旋焊缝的螺旋间距为 1.360 m,螺旋线角度为 58.3°. 发生事故时管线沿着螺旋焊缝中间开裂,裂 纹长度为 1.480 m,裂纹最大宽度为 18 mm,裂纹两 **表 1** 管线在 20 a 运行过程中的压力波动

纹长度为 1.480 m,裂纹最大宽度为 18 mm,裂纹两 侧壁最大错边量(高差)为 10 mm.

管线在投产前经过 3 次打压实验(压力分别为 6.0,5.4,5.0 MPa). 设备在 20 a 运行过程中的压 力波动数据见表 1. 从表 1 可见,管线在运行过程中 承受不规则的循环波动应力作用,即在交变应力作 用下工作,并且应力波动范围较大.

取下管线开裂部分检测,裂纹经内焊缝一侧穿过外焊缝中心. 典型的断裂表面照片见图 1.其中 a 为未熔合区,b 为层状开裂区, c 为纵向纤维区,d 为剪切区.从图 1 可见,断口内焊缝处分布着 多处大小不一的未熔合区.层状开裂区、纵向纤维区和剪切区在 断口表面上由内壁向外壁依次分布,说明裂纹从焊缝内侧未熔合

	次数	压力波动/MPa (最小值~最大值)	压力幅度 Δp/ MPa
全线停输	40	0,20~4,02	3.82
单泵停输	90	2.20~4.02	1.82
甘产力产力油盐	4 320	3.02~4.02	1.00
具匕压力波动	21 600	3,52 - 4,02	0.50



区开始,向外焊缝扩展并连接,在最大未熔合区处首先贯穿整个焊缝,导致漏油及裂纹进一步沿焊缝失稳

收稿日期:2003-10-14; 审稿人: 刘巨保; 编辑: 任志平

作者简介:王力霞(1974-),女,讲师,硕士,主要从事金属材料工程方面的研究.

扩展,最终形成长度为 1.480 m 的裂纹.

管线材质的化学成分、机械性能、金相组织和焊接性能均符合相应标准,断裂不是由管线材质自身引起的. 而检查断口和焊缝的结果表明,断裂事故起源于焊接缺陷,主要是内焊缝焊偏和未熔合区的出现导致焊趾裂纹.

2 应力计算

2.1 螺旋焊管的应力

管壁工作应力分为径向应力 σ_1 和轴向应力 $\sigma_2^{[1]}$,见图 2.

$$\sigma_1 = pD/(2t) , \qquad (2)$$

$$\sigma_2 = \sigma_1/2$$
 ,

式中:p为工作压力;t为管线壁厚;D为管线外径.

作用在螺旋焊缝上的法向应力 σ_{α1}和切向应力 τ_α分别为

$$\sigma_{lpha 1} = \sigma_2 \sin^2 lpha + \sigma_1 \cos^2 lpha$$
 ,



式中:a 为焊缝与管子轴线方向的夹角,a=58.3°.

考虑应力集中和鼓胀因素的影响,垂直焊缝上的应力 σ。为

$$\sigma_a = K_* M \sigma_{a^{\dagger}}, \qquad (5)$$

(1)
 (2)

(3)

式中:K,为应力集中因数;M为鼓胀因数.

斜裂纹上承受当量应力 σ_{eq} ,由 Von Mises 准则^[2]有

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\left[0.5(\sigma_{x} - \sigma_{y})^{2} + (\sigma_{z} - \sigma_{y})^{2} + (\sigma_{x} - \sigma_{z})^{2}\right] + 3(\tau_{xy}^{2} + \tau_{yz}^{2} + \tau_{xz}^{2})},$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{a}^{2} + 3\tau_{a}^{2}}.$$
(6)

2.2 焊口的应力

检查断口,最大未熔合区的尺寸为159 mm(长度)×2.8 mm(深度),其它分布在断口表面上的全部未 熔合区的总和为220 mm(长度)×0.5 mm(深度).由于缺陷的尺寸较大,将其作为等效的穿透裂纹来处 理,等效裂纹的半裂纹长度(C_c)由等效面积法求得,

 $\tau_{\alpha} = \sigma_2 \sin \alpha \cos \alpha ,$

$$C_{\rm e} = ca/t , \qquad (7)$$

式中:a 为缺陷深度;c 为缺陷的半长度. 初始裂纹半长度 C_e=34.7 mm.

焊缝的错边和角变形引起应力集中,从断口附近未开裂焊缝处测得的错边量 h 和角变形量 w 都是分 别为 0.5 mm 和,则应力集中因数 K,为

$$K_t = 1 + 3(w+h)/(2t) = 1.19$$
.

裂纹沿焊缝方向的鼓胀因数 M 按斜裂纹计算,

$$M = [1 + 0.64(1 + 4\cos\alpha)C_e^2/(Dt)]^{0.5}, \qquad (8)$$

可求得 M 为 1.19. 由此得 $\sigma_a = MK_1\sigma_{a1} = 1.42\sigma_{a1}$,将式(3)代人式(5)可得

 $\sigma_{\alpha} = 1.42(\sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_2 \sin^2 \alpha) . \quad (9)$

由式(1),(2),(6),(9)可求各工作压力下 开裂区承受的应力分量 $\sigma_a \cdot \tau_a$ 与相应的当量应 力 σ_{eq} ,计算结果见表 2.

应力	压力						
	0,20	2.20	3.02	3, 52	4.02		
σ_1	9.0	99.0	135.9	158.2	180, 9		
σ_2	4.5	49.5	68.0	79.2	90.5		
σ_a	12.1	133.3	183.0	213.2	243.2		
t.	5.3	58.2	79.9	93.2	106.4		
$\sigma_{ m eq}$	15.2	167.1	229.4	267.4	305.1		

表 2 管线在不同工作压力下的应力值

3 裂纹扩展深度计算

管线在工作时,初始裂纹在压力波动引起

的交变应力作用下进一步扩展. 根据国产铁素体压力容器钢的裂纹扩展速率公式[3],并考虑非对称疲劳

• 55 •

MPa

$$\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}N} = 1.57 \times 10^{-11} \, \frac{1+R}{1-R} (\Delta K)^4 \,, \tag{10}$$

式中:a 为裂纹深度;N 为循环次数; ΔK 为应力强度因子幅度, $\Delta K = \Delta \sigma_{eq} \sqrt{\pi a}$;R 为应力比, $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$.

疲劳为累积损伤,在计算某一载荷波动(载荷块)对 疲劳裂纹扩展的贡献时,可不考虑其出现次序,只按其出 现的次数及在压力波动中占有的几率计算,由式(10)计 算不同压力波动下裂纹沿壁厚方向的扩展量,计算结果 见表 3. 同时,计算管线在 20 a 服役过程中,管道总裂纹 扩展量为 3.58 mm.

σ_{min}/MPa	$\sigma_{\rm max}/{ m MPa}$	R	N	$\Delta a/\mathrm{mm}$
267.4	305.1	0.88	21600	0.83
229.4	305.1	0.75	4320	1.21
167.4	305.1	0.55	90	0.41
15.2	305.1	0.05	40	1.13

表 3 在不同压力波动下的裂纹扩展计算结果

4 失效分析

断口表面附近的韧带呈塑性破坏,可根据 Kiefner^[4]公式计算断裂时的极限压力 pu 为

$$p_{u} = \frac{1 - a/t}{1 - a/(tM)} \frac{2\sigma_{t}t}{D} , \qquad (11)$$

式中: σ_i 为流变应力,通常 $\sigma_i = \sigma_s + 70$, σ_s 为管材的屈服强度,实际测量值为 375.8 MPa.

管线初运行时, a 为 2.80 mm, M 为 1.19, p_u 为 9.05 MPa, 大于打压试验最大压力(6.0 MPa), 打压时不会出现断裂. 工作压力 4.0 MPa 远远小于设计压力,运行初期未发生断裂.

管线运行 20 a 后,2.80 mm 深的未熔合缺陷在压力波动的作用下扩展到 3.58 mm,*a* 为 6.38 mm, 而 只有 1.62 mm 的管线剩余厚度承受工作压力.此时 C_e 为 70.30 mm,*M* 为 1.64、*p*_u 为 3.9 MPa,此时实 际工作压力为 3.9 MPa,已达到极限压力,故发生疲劳断裂.

5 结束语

管线断裂是焊接缺陷所致.螺旋焊缝的内焊缝焊偏,并且在坡口的一侧存在较大尺寸的未熔合区,焊 趾裂纹起源于未熔合区,并在使用过程中由于压力波动的作用进一步扩展,工作压力达到极限压力,导致 管线发生疲劳断裂失效.

参考文献:

- [1] 臧铁军. 螺旋焊管的特性[J]. 焊管,1995,18(1):6-7.
- [2] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社,1992.324-325.
- [3] 左贤彬,袁学剑. 螺旋焊管生产流程中的内应力状态[J]. 管道技术与设备,2001,(4):3-5.
- [4] 周道祥. 带裂纹管道静压爆破实验研究[J]. 安徽建筑工业学院学报,2002,10(3),4-5.

第28卷 2004年