

●试验与研究

某输油管线螺旋焊管焊缝断裂原因分析

王力霞¹, 胡岩鹏², 张艳秋³, 尹成先⁴

(1 大庆石油学院 机械科学与工程学院, 黑龙江 大庆 163318;

2 中国石油华北销售冀中分公司, 河北 任丘 062552;

3 中国石化西部新区勘探指挥部, 乌鲁木齐 830011;

4 中国石油天然气集团公司管材研究所, 西安 710065)

摘 要: 对某输油管线螺旋焊管焊缝进行了应力分析、裂纹扩展速率计算以及承载极限能力的计算, 结果表明: 在输油过程中, 起源于未熔合区的焊接缺陷作为先天性裂纹, 由于管线输送压力波动而逐渐疲劳扩展, 同时随着焊缝部位剩余厚度的减少, 当焊缝承受的工作压力达到极限压力时, 管线会沿焊缝断裂。

关键词: 输油管线; 螺旋焊管; 焊接缺陷; 断裂

中图分类号: TG441.7 文献标志码: A 文章编号: 1001-3938(2008)01-0033-03

0 引 言

2000 年, 东北某输油管线螺旋焊管的焊缝突然发生断裂, 导致全线停输。该管线建造于 1978 年底, 1980 年投入使用, 材料为 16Mn, 采用螺旋埋弧焊接钢管, 输送大庆油田的原油, 设计工作压力为 4.02 MPa。事故发生时, 出站运行压力为 3.90 MPa, 压力较平稳。笔者通过对这段管线的断裂失效进行力学分析, 找出其失效原因。

1 管线基本情况

管线采用螺旋埋弧自动焊焊接钢管, 钢管对接为环焊缝焊接。管径 720 mm, 壁厚 8 mm, 螺旋焊缝的螺距为 1 360 mm, 螺旋线角度为 58.3°。钢管沿螺旋焊缝中间开裂, 裂纹长 1 480 mm, 裂纹最大宽度 18 mm, 裂纹两侧壁的最大错边量 (高差) 10 mm。

管线经过 3 次打压试验 (压力分别为 6.0 MPa, 5.4 MPa, 5.0 MPa) 之后投入使用。正常工作压力为 4.02 MPa。管线在 20 年运行过程中的压力波动见表 1。从表 1 可以看出, 管线在运行中承受不规则的循环波动压力作用, 即在交变压力下工作, 并且压力波动范围较大。

表 1 管线在 20 年运行过程中的压力波动

运行状态	次数 / 次	压力 / MPa		压力波动 Δp / MPa
		最小值	最大值	
全线停输	40	0.20	4.02	3.82
单泵停输	90	2.20	4.02	1.82
其它压力波动	4 320	3.02	4.02	1.00
	21 600	3.52	4.02	0.50

观察开裂部分, 发现裂纹经内焊缝一侧穿过外焊缝中心。典型的断口表面照片见图 1, 图中 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 可以看出, 断口内焊缝处分布着多个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区开始向外焊缝扩展, 在最大未熔合区处首先贯穿整个焊缝, 造成漏油及裂纹进一步沿焊缝扩展, 形成 1 480 mm 长的断裂裂纹。

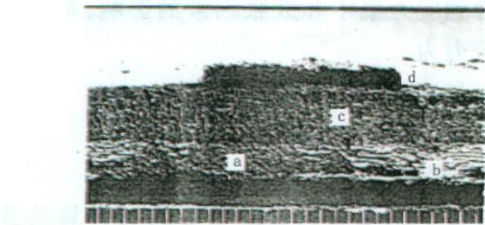


图 1 典型断口表面特征

经检测,管线材质的化学成分、力学性能、金相组织和焊接接头性能符合相应标准,断裂不是由于管材本身引起的。对断口和焊缝检查的结果表明,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 管线钢管的应力计算

2.1 应力分析

管壁工作应力分为径向应力 σ_1 和轴向应力 σ_2 ^[1],如图 2 所示。

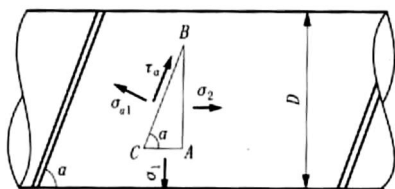


图 2 管线钢管受力分析

$$\sigma_1 = pD/2t, \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \sigma_1/2, \quad (2)$$

式中: p —工作压力,MPa;

t —钢管壁厚,mm;

D —钢管外径,mm。

分析作用在螺旋焊缝上的法向应力 σ_{a1} 和切向应力 τ_a 。在图 2 的直角三角形 ABC 中,法向力平衡条件为

$$\sigma_{a1}BC = \sigma_2AB \sin\alpha + \sigma_1AC \cos\alpha,$$

由 $AC = BC \cos\alpha$, $AB = BC \sin\alpha$,得

$$\sigma_{a1} = \sigma_2 \sin^2\alpha + \sigma_1 \cos^2\alpha. \quad (3)$$

切向应力 τ_a 平衡条件为

$$\tau_aBC = \sigma_1AC \sin\alpha - \sigma_2AB \cos\alpha,$$

所以 $\tau_a = \sigma_1 \sin\alpha \cos\alpha - \sigma_2 \sin\alpha \cos\alpha$, 即有

$$\tau_a = \sigma_2 \sin\alpha \cos\alpha, \quad (4)$$

式中: α —焊缝与钢管轴线方向夹角,为 58.3° 。

考虑到应力集中和鼓胀因素的影响,垂直焊缝上的应力为

$$\sigma_a = K_t M \sigma_{a1}, \quad (5)$$

式中: K_t —应力集中因数;

M —鼓胀因数。

斜裂纹上承受着当量应力 σ_{eq} ,其计算公式为 Von Mises 准则^[2],即

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_a^2 + 3\tau_a^2}. \quad (6)$$

2.2 应力计算

由断口检查可知,最大未熔合区的尺寸为 159 mm (长度) $\times$ 2.8 mm (深度),其它分布在断口表面上的全部未熔合区总和相当于 220 mm (长度) $\times$ 0.5 mm (深度) 的未熔合区。由于缺陷的尺寸较大,将其作为一个等效的穿透裂纹来处理,等效裂纹的裂纹半长度 (C_e) 由等效面积法求得,

$$C_e = ca/t, \quad (7)$$

式中: a —缺陷深度,mm;

c —缺陷的半长度,mm;

t —钢管壁厚,mm。

则初始裂纹半长度

$$C_e = \frac{159/2 \times 2.8 + 220/2 \times 0.5}{8} = 34.7 \text{ mm}。$$

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 和角变量 w 均为 0.5 mm,则应力集中因数 K_t 为

$$K_t = 1 + \frac{3(w+h)}{2t} = 1.19。$$

裂纹沿焊缝方向,鼓胀因数 M 按斜裂纹计算,

$$M = [1 + 0.32(1 + 4\cos\alpha)\frac{2C_e^2}{Dt}]^{1/2}. \quad (8)$$

将已知数据代入 (8) 式,可求得 $M = 1.19$ 。

将 K_t, M 和 (3) 式代入 (5) 式有

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

由公式 (1)、(2)、(3)、(4)、(6)、(9) 可以求出各工作压力下开裂区承受的应力分量 σ_a, τ_a 和相应的当量应力 σ_{eq} ,结果见表 2。

表 2 管线在不同工作压力下的应力值 MPa

压力	应力				
	σ_1	σ_2	σ_a	τ_a	σ_{eq}
0.2	9.0	4.5	12.1	5.3	15.2
2.2	99.0	49.5	133.3	58.2	167.1
3.02	135.9	68.0	183.0	79.9	229.4
3.52	158.2	79.2	213.2	93.2	267.4
4.02	180.9	90.5	243.2	106.4	305.1

3 焊接钢管裂纹扩展深度计算

管线在工作时,初始裂纹在压力波动所造成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],并考虑到非

对称疲劳应力对平均应力的影响,得

$$\frac{da}{dN} = 1.57 \times 10^{-11} \frac{1+R}{1-R} (\Delta K)^4, \quad (10)$$

式中: a —裂纹深度;

N —循环次数;

ΔK —应力强度因子幅度, $\Delta K = \Delta \sigma_{eq} \sqrt{\pi a}$

(其中 $\Delta \sigma_{eq}$ 为相应当量应力变化值);

R —应力比, $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ 。

由于疲劳为累积损伤,在计算某一载荷波动(载荷块)对疲劳裂纹扩展的贡献时,可不考虑其出现的先后,而只按其出现的次数及在压力波动中占有的几率进行计算,依据(10)式求得各个压力波动下裂纹沿壁厚方向的扩展量 Δa ,结果见表 3。同时计算出在 20 年服役过程中,管道总裂纹扩展量为 3.58 mm。

表 3 在压力波动下的裂纹扩展

$\sigma_{min} / \text{MPa}$	$\sigma_{max} / \text{MPa}$	R	$N / \text{次}$	$\Delta a / \text{mm}$
267.4	305.1	0.88	21 600	0.83
229.4	305.1	0.75	4 320	1.21
167.4	305.1	0.55	90	0.41
15.2	305.1	0.05	40	1.13
				$\Sigma \Delta a = 3.58$

4 管线钢管失效原因分析

由于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 p_u 为

$$p_u = \frac{1 - a/t}{1 - a/(tm)} \cdot \frac{2\sigma_f t}{D}, \quad (11)$$

式中, σ_f 为流变应力,通常 $\sigma_f = \sigma_s + 70 \text{ MPa}$,这里 σ_s 为管材屈服强度,经实际测量为 375.8 MPa。

管线初运行时,裂纹深度 a 为 2.8 mm,鼓胀因数 M 为 1.19,由公式(11)计算断裂的极限压力 p_u 为 9.05 MPa,大于打压试验压力(6.0 MPa),因此打压时不会出现断裂。而工作压力

4.02 MPa 远远小于设计时的压力,故运行初期未发生断裂。

管线运行 20 年后,2.8 mm 深的未熔合缺陷在压力波动的情况下扩展为 3.58 mm,裂纹总深度 a 为 6.38 mm,只有 1.62 mm 厚度承受工作压力。此时等效裂纹半长度 C_e 为 70.3 mm,鼓胀因数 M 为 1.64。由公式(11)计算断裂的极限压力 p_u 为 3.90 MPa,此时实际工作压力为 3.90 MPa,已达到极限压力,故发生突然疲劳断裂。

5 结 论

通过对螺旋焊管断口检查和应力分析,以及裂纹扩展计算和极限压力计算,结果表明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进一步扩展,最后工作压力达到即时极限压力而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] FROST N E, MARSH K J, POOK L P. Metal Fatigue [M]. Oxford: Oxford Engineering Science Series, 1974.
- [3] 陈国理.压力容器及化工设备[M].广州:华南理工大学出版社,1995:335-339.
- [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.

作者简介:王力霞(1974-),女,讲师,硕士,主要研究方向为金属腐蚀与防护、材料失效分析。

收稿日期:2007-07-03

修改稿收稿日期:2007-08-17

编辑:谢淑霞

国家进一步上调部分钢铁的出口关税

国务院宣布自 2008 年 1 月 1 日起提高部分钢铁的出口关税。国务院关税税则委员会公布《2008 年关税实施方案》,规定从 2008 年 1 月 1 日起将提高部分钢铁产品的出口关税,其中钢坯等初级产品的出口税率从现行的 15% 提高至 25%,线材和棒材从 10% 增至 15%,铬锰系不锈钢从 5% 上调至 10%,而热轧、型材等其他产品则维持 5% 和 10% 的税率不变。此项调整已在市场预期当中,符合国家进一步控制高能耗、低附加值的产品出口的政策导向,而附加值较高的冷轧板、硅钢等仍享受 5% 的出口退税。

(摘自金融界网站,2007 年 12 月 28 日)

Testing & Research of Welding Wire Used for Coil Tubing

B I Zong-yue, ZHANG Jin-gang

Abstract D: 1001-3938 (2008) 01-0026-EA

Abstract: Coil tubing is a kind of special tubular used for workover operation, well-logging and drilling in oil-gas field, through analyses and research of raw material and welding joint, this article proposes composition range of welding wire used for coil tubing in combining with welding process and usage property, and welding wire used for coil tubing which meet property requirements have been trial produced by means of lab testing

Key words: coil tubing; high strength low-alloy steel (HSLA); welding wire; weld; anti-corrosion

Study on Welding Process of 00Cr22Ni5Mo3N Duplex Stainless Steel

ZHAO Hai-hong, Q I Li-chun

Abstract D: 1001-3938 (2008) 01-0029-EA

Abstract: Toughness-plasticity and corrosion resistance of weld seam and heat affect zone (HAZ) is primary considerations in welding 00Cr22Ni5Mo3N duplex stainless steel. This article analyzes and researches phase proportion and corrosion resistance of weld joint under the welding process of gas tungsten-arc welding (GTAW), and provides guidance to field welding of 00Cr22Ni5Mo3N.

Key words: duplex stainless steel; gas tungsten-arc welding (GTAW); phase proportion

Fracture Analysis on Weld Seam of SSAW Pipe of Certain Oil Pipeline

WANG Li-xia, HU Yan-peng, ZHANG Yan-qiu, Y N Cheng-xian

Abstract D: 1001-3938 (2008) 01-0033-EA

Abstract: Aiming at SSAW pipe of certain oil pipeline, stress analysis and calculation of crack propagation rate and limited-loading ability of weld seam are carried out, and all results prove that welding defect originated from non-fusion zone is congenital defect during oil transmission, due to gradual fatigue crack growth will occur with variation of transmitting pressure, the pipeline would fracture along weld seam with reduction of residual wall-thickness on weld seam while operating pressure reach limit pressure.

Key words: oil transmission pipeline; spiral welded pipe; welding defect; crack

Risk Assessment of Oil-gas Pipeline

L U Ying, L U Chang-ling, ZHOU Wei

Abstract D: 1001-3938 (2008) 01-0036-EA

Abstract: Risk assessment technology of pipeline is a kind of management technology with high economic value. Risk of pipeline can be evaluated by means of risk assessment, and effective approach to reduce risk of pipeline and cost of pipeline can be found. This article briefly introduces content and method of risk assessment, and emphasize W. K. Muhlbauer risk assessment scoring system of pipeline, and also describes in detail modeling chart of risk assessment and 4 factor to cause accident, as well as put forward classification stand of risk grade and give proposal to reduce risk of pipeline.

Key words: oil-gas pipeline; risk assessment; scoring system; modeling chart; factor

Current Inspection Situation & Research Progress of Girth Welding Seam of Oil & Gas Transmission Pipeline

LUO Hua-quan, JU Xin-ming, LU Zheng, WANG Shu-ren

Abstract D: 1001-3938 (2008) 01-0040-EA

Abstract: Radiograph and ultrasonic are commonly used for inspecting girth welding seam of oil & gas pipeline. This article introduces current situation and development trend of radiographic and ultrasonic inspection in domestic and abroad, analyze advantage and disadvantage of the two inspection methods, namely, radiograph inspection is effective to detect volumetric type defect (porosity, slag), and ultrasonic inspection mainly detect planar and three-dimensional type defect, and sensitivity of ultrasonic inspection is higher than that of radiograph inspection. It also puts forward suggestions about the domestic development of girth welding seam of oil and gas pipeline.

Key words: oil & gas transmission pipeline; circumferential weld seam; ultrasonic inspection; radiographic inspection

Developing & Application of Central Air Purification System of Welded Pipe Mill

TANG Jun, ZHANG Kai-bin, L I Bin, ZHANG Ya-ping

Abstract D: 1001-3938 (2008) 01-0045-EA

Abstract: Aiming at actual condition that welded pipe mill have greater pollution resource, complex and serious pollution caused by metal welding and cutting, a kind of new central air purification system is developed, and all usage results proves that the new system have high work efficiency, obvious de-dust effect, and stable work condition.

Key words: welded pipe; de-dust; air purification system

Research on Corrosion Evaluation Technology of Petroleum Pipeline

XU Hai-jun

Abstract D: 1001-3938 (2008) 01-0047-EA

Abstract: It is possible for any anti-corrosion action to become invalid, corrosion can not be avoided. In order to find early and exactly the areas, time and damage condition of pipeline occurring corrosion, this article provides theory basis to pipeline operation, maintenance, replacing scheme, and also gives guidance to anti-corrosion action through theoretic technology of corrosion evaluation technology of pipeline and engineering instances.