

# 基于 BS7910 标准的 X70 钢环焊缝超声相控阵 检出埋藏缺陷的安全评定

李明<sup>1,2</sup>, 成志强<sup>1,2</sup>, 王成<sup>3</sup>, 柳葆生<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学力学与工程学院, 成都 610031; 2. 应用力学与结构安全四川省重点实验室, 成都 610031;  
3. 中国石油西部管道塔里木输油气分公司, 新疆 塔里木 841000)

**摘要:**为降低建设成本,长输管线通常采用高等级管线钢。对于服役约 9 年的 X70 钢管道的一道环焊缝,采用超声相控阵检测,检出 5 处埋藏裂纹缺陷。基于“合于使用”的原则,采用 BS 7910:2005 标准中的 2B 级评定方法进行安全评价。评定结果表明,5 处埋藏裂纹缺陷均在标准允许范围内,管道可以安全运行。另外,为探索埋藏缺陷承载安全的表征方法,在缺陷对应的管道外表面贴应变花,以测量缺陷管体外表面的应变。应变测试结果表明,该方法能够表征缺陷尺度与承载能力的关系。

**关键词:**X70 钢管道;环焊缝;埋藏缺陷;BS 7910;超声相控阵测试;应变测试

**中图分类号:**TE8

**文献标志码:**A

## 引言

油气管道是由一节节独立管段环向焊接延长而成,但由于野外焊接环境恶劣,不可避免地存在不同程度的环焊缝缺陷,在腐蚀性介质、压力波动、土层沉降等服役环境与力学条件下,缺陷可能缓慢扩展,进而引起管体局部或大范围破坏。而实际情况下又不可能对所有含缺陷的压力管道都进行更换或返修,所以必须及时对含缺陷压力管道进行安全评定,以防止出现事故<sup>[1]</sup>。目前环焊缝缺陷的评价过程是,应用漏磁内检测技术发现环焊缝异常后,对于现场开挖暴露的环焊缝,采用超声相控阵等无损检测方法,对环焊缝缺陷的严重程度进行评级。超声相控阵虽能检出缺陷的长度、高度和埋藏深度,却不能仅凭此确定其严重程度,这给缺陷评价带来了一定的问题。

1980 年英国标准协会首次起草了 BSI PD 6493《焊接缺陷验收标准若干方法指南》<sup>[2]</sup>,后经过两次修订,现

已被 BS 7910:2005《金属结构裂纹验收评定的方法指南》<sup>[3]</sup>取代。本文采用 BS 7910:2005 标准,对从现场截取的 X70 钢检出埋藏缺陷进行安全评价,为相关工程技术人员开展含埋藏裂纹缺陷管线的的安全评定工作提供参考。

## 1 BS 7910:2005 评定方法简介

在 BS 7910 标准中,共有 3 个评定级别,评定级别越高,其结果的保守程度越低,但同时对于评定对象的材料以及结构的相应数据的准确性和完备性要求也就越高。这里采用其中的 2B 级评价方法进行安全评定。评定采用一条由曲线方程和截断线组成的失效评定线,即断裂比  $K_r$  与载荷比  $L_r$  的关系曲线,得到典型的失效评定图(FAD),如图 1 所示。如果评定点落在由坐标轴和评定线围成的区域内,则缺陷是可接受的,反之则不行。根据构件材料的应力-应变曲线,可取应力与屈服强度的比值及其比值对应的应变值作为评定曲线绘制的基础

收稿日期:2016-03-31

作者简介:李明(1990-),男,湖北孝感人,博士生,主要从事结构安全评估方面的研究,(E-mail)mingl20160101@hotmail.com;

成志强(1969-),男,四川成都人,教授,博士,主要从事结构安全评估方面的研究,(E-mail)zqcheng@netease.com

数据,然后分别代入评定曲线方程进行评定曲线的绘制。FAD图的边界线,即断裂比 $K_r$ 与载荷比 $L_r$ 的关系曲线方程如下:

$$L_{rmax} = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2\sigma_y} \quad (1)$$

若 $L_r \leq L_{rmax}$ ,

$$K_r = \left( \frac{E\varepsilon_{ref}}{L_r\sigma_y} + \frac{L_r^3\sigma_y}{2E\varepsilon_{ref}} \right)^{-0.5} \quad (2)$$

若 $L_r > L_{rmax}$ ,

$$K_r = 0 \quad (3)$$

其中, $\sigma_y$ 为屈服强度, $\sigma_u$ 为抗拉强度, $E$ 为弹性模量, $\varepsilon_{ref}$ 为真应变。

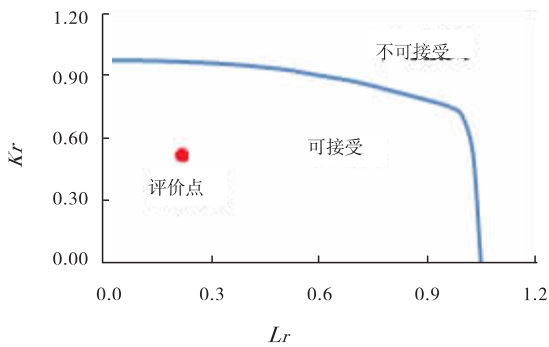


图1 2B级失效评定图

## 2 检出管道环焊缝缺陷

在管道施工中出现较多的焊接缺陷包括:裂纹、气孔、夹渣、未熔合、未焊透和形状缺陷6种,其中形状缺陷包括咬边、错边、焊缝成型不良等<sup>[4]</sup>。在断裂分析中,这些焊接缺陷均可当成平面缺陷处理。平面缺陷用其外接矩形的高度和长度来表示。其中单独的埋藏型缺陷的尺寸如图2所示, $2a$ 为裂纹深度, $2c$ 为裂纹长度, $B$ 为管道壁厚, $p$ 为裂纹距离管壁最近的距离。实际检测通常会对缺陷形状进行规整化处理,超声相控阵检测出的缺陷形貌如图3所示,两图从不同角度展现检测管段中含有的同一缺陷情况。

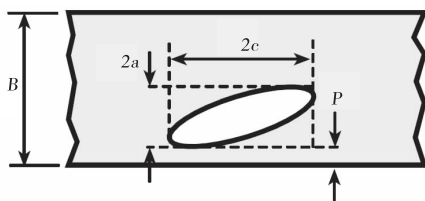


图2 埋藏型裂纹的简化模型

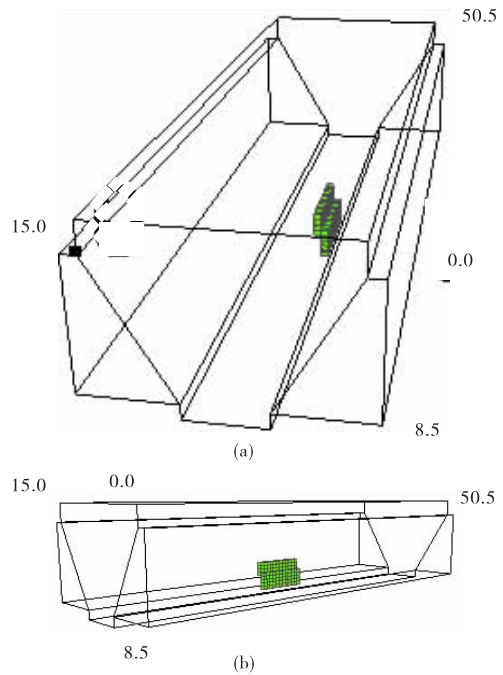


图3 超声相控阵检出缺陷形貌

## 3 评定方法与结果

### 3.1 X70 钢材性能参数

#### 3.1.1 屈服强度和抗拉强度

X70 管线钢焊接接头焊缝和母材的拉伸试验结果见表1。

表1 焊缝和母材的拉伸试样结果

材料	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
母材	574.00	636.00
焊缝	572.11	573.14

#### 3.1.2 检出缺陷尺寸

对含有环焊缝的缺陷管道( $\varphi 813 \text{ mm } 8.8 \text{ mm}$ )进行超声相控阵检测,检出的5个缺陷分别记为U1、U2、U3、U4、U5,具体表征尺寸数值见表2。

表2 埋藏缺陷表征尺寸

缺陷编号	缺陷长度 2c/mm	缺陷高度 2a/mm	管道外径 D/mm	管道壁厚 B/mm	裂纹距离管道外表面最小距离 P1/mm
U1	5	3.0	813	8.8	0.80
U2	6	2.5	813	8.8	0.85
U3	14	3.6	813	8.8	0.20
U4	32	3.5	813	8.8	0.45
U5	23	3.2	813	8.8	0.80

### 3.2 总应力当量

总当量拉伸应力

$$\sigma_s = \sigma_{s1} + \sigma_{s2} + \sigma_{s3}, \quad (4)$$

式中,  $\sigma_{\Sigma 1}$ —一次薄膜应力引起的当量拉伸应力;  $\sigma_{\Sigma 2}$ —面外弯曲应力引起的当量拉伸应力;  $\sigma_{\Sigma 3}$ —焊接残余应力引起的当量拉伸应力。分别表示为:

$$\sigma_{\Sigma 1} = K_t p_m \quad (5)$$

$$\sigma_{\Sigma 2} = X_b p_b \quad (6)$$

$$\sigma_{\Sigma 3} = X_r Q \quad (7)$$

式中,  $K_t$ —焊接形状引起的应力集中系数;  $p_m$ —一次薄膜应力, MPa;  $X_b$ —弯曲应力折合系数;  $p_b$ —弯曲应力, MPa;  $X_r$ —焊接残余应力折合系数;  $Q$ —缺陷部位热应力的最大值和焊接残余应力的最大值的代数和, MPa。

在  $K_t$  近似取为 1; 薄膜应力  $p_m = PD/2t = 277.16$  MPa, 其中  $P$  取最大工作压力 6 MPa; 由于压力管道属于薄壁管, 弯曲应力  $p_b$  很小, 这里就不考虑弯曲应力的影响; 管道焊缝上的焊接残余应力在壁厚方向上相差不大, 基本认为是均匀分布, 取  $X_r = 1.3$ <sup>[5]</sup>;  $Q$  通常取管线钢母材或焊缝二者之间室温下较低的屈服强度值。

### 3.3 断裂比 $K_r$ 与载荷比 $L_r$

#### 3.3.1 断裂比 $K_r$ 的计算方法

$$K_r = K_t / K_{mat} \quad (8)$$

式中,  $K_t$  为应力强度因子,  $K_{mat}$  为断裂韧性。

$$K_t = (Y_\sigma) \sqrt{\pi a} \quad (9)$$

其中:  $Y_\sigma = M f_w M_m \sigma_{max}$ ;  $M$  为膨胀修正因子, 无量纲;  $f_w$  为有限宽度修正因子, 无量纲;  $M_m$  为应力强度放大因子, 无量纲;  $\sigma_{max}$  为拉伸强度, MPa。参数的具体计算方法如下:

表 3 环焊缝处各种缺陷的断裂比及相关参数

缺陷编号	修正系数 $M_2$	修正系数 $M_3$	修正系数 $\Phi$	修正应力 $Y_\sigma$ / MPa	应力强度因子 $K_t$ / (N/mm <sup>3/2</sup> )	断裂韧性 $K_{mat}$ / (N/mm <sup>3/2</sup> )	断裂比 $K_r$
U1	0.0870	0.7603	1.2768	408.3622	886.4743	9069.0281	0.0977
U2	0.1319	0.6759	1.1599	447.4814	886.7577	9069.0281	0.0978
U3	0.2080	0.3087	1.0750	503.2891	1196.8196	9069.0281	0.1320
U4	0.3421	0.1081	1.0188	553.4674	1297.7350	9069.0281	0.1431
U5	0.3088	0.1682	1.0279	533.0614	1195.1218	9069.0281	0.1318

#### 3.3.2 载荷比 $L_r$ 的计算方法

$$L_r = \sigma_{ref} / \sigma_y \quad (19)$$

其中,  $\sigma_{ref}$  为参考应力,  $\sigma_y$  为屈服强度;

$$\sigma_{ref} = \frac{P_b + 3P_m \alpha'' + \left\{ (P_b + 3P_m \alpha'')^2 + 9P_m^2 \left[ (1 - \alpha'')^2 + 4 \left( \frac{P_m \alpha''}{B} \right) \right] \right\}^{0.5}}{3 \left[ (1 - \alpha'')^2 + 4 \left( \frac{P_m \alpha''}{B} \right) \right]} \quad (20)$$

$$\alpha'' = (2a/B) / [1 + (B/C)] \text{ for } W \geq 2(c + B)$$

$$\alpha'' = (4a/B)(c/W) \text{ for } W < 2(c + B) \quad (21)$$

$$M = 1$$

$$f_w = \left\{ \sec \left[ \frac{\left( \frac{\pi \cdot c}{W} \right)}{\left( \frac{a}{B} \right)^{0.5}} \right] \right\}^{0.5} \quad (10)$$

$$M_m = \{ M_1 + M_2(2a/B)^2 + M_3(2a/B)^4 \} g f_\theta / \Phi \quad (11)$$

式中:

$$M_1 = 1, \text{ for } 0 \leq a/2c \leq 0.5$$

$$M_1 = (c/a)^{0.5}, \text{ or } 0.5 < a/2c \leq 1.0 \quad (12)$$

$$M_2 = 0.05 / [0.11 + (a/c)^{1.5}] \quad (13)$$

$$M_3 = 0.29 / [0.23 + (a/c)^{1.5}] \quad (14)$$

$$g = 1 - \left[ \frac{(2a/B)^4 [2.6 - (4a/B)]^{0.5}}{1 + 4(a/c)} \right] |\cos \theta| \quad (15)$$

$$f_\theta = [(a/c)^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta]^{0.25} \text{ for } 0 \leq a/2c \leq 0.5$$

$$f_\theta = [(c/a)^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta]^{0.25} \text{ for } 0.5 < a/2c \leq 1.0 \quad (16)$$

$$\Phi = [1 + 1.464(a/c)^{1.65}]^{0.5} \text{ for } 0 \leq a/2c \leq 0.5$$

$$\Phi = [1 + 1.464(c/a)^{1.65}]^{0.5} \text{ for } 0.5 < a/2c \leq 1.0 \quad (17)$$

其中:  $M_1$  为第一个修正系数,  $M_2$  为第二个修正系数,  $M_3$  为第三个修正系数;  $\Phi$  为第二类完整椭圆积分。

$$K_{mat} = \frac{27 \sqrt{C_v} - 45}{B^{0.25}} + 20 \quad (18)$$

其中,  $C_v$  为试样夏比冲击功, 由实验<sup>[6]</sup>测出  $C_v = 349.14$  J。

运用公式(8)~(18)计算得出相关参数见表3。

由公式(19)~(21)计算可得载荷比及相关参数, 具体数值见表4。

表 4 环焊缝处各种缺陷的载荷比及相关参数

缺陷编号	有缺陷屈服强度 $\sigma_s$ / MPa	参考应力 $\sigma_{ref}$ / MPa	载荷比 $L_r$
U1	563.39	209.4288	0.3717
U2	563.39	207.9207	0.3691
U3	563.39	269.0186	0.4775
U4	563.39	305.3428	0.5420
U5	563.39	261.9612	0.4650

### 3.4 评定结果

将计算所得到的  $K_r$  值和  $L_r$  值所组成的评定点 ( $L_r$ ,

$K_r$ ) 绘制在 2B 级的 FAD 评定图中,如图 4 所示,5 个评定点均位于安全区域内,可见在最大工作压力 6 MPa 工作时,缺陷仍十分安全。

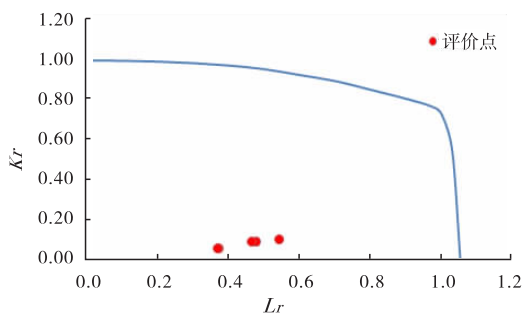


图 4 2B 级评定 FAD 结果图

#### 4 埋藏缺陷的表面应变表征

为了进一步研究埋藏缺陷的安全性,分析埋藏缺陷的外部应变表征,在检出缺陷对应管道的外表面处贴应变花。具体做法如下:分别在缺陷长轴两端对应的管道外壁贴一个应变花,采集管道内压为 6 MPa 时的应变数据(表 5)。由于环向应力远大于轴向应力,表 5 仅列出缺陷外部“两端”的环向应力,即“环向应力 1”和“环向应力 2”。表 5 中,缺陷深度  $h$  表示缺陷中心到管道外表面的距离。管壁壁厚 8.8 mm。

表 5 缺陷对应外管壁处的应力数据

缺陷编号	缺陷长度 $2c/\text{mm}$	缺陷高度 $2a/\text{mm}$	缺陷深度 $h/\text{mm}$	环向应力 1/MPa	环向应力 2/MPa
U1	5	3.0	6.5	216.15	214.58
U2	6	2.5	2.1	281.32	280.19
U3	14	3.6	6.8	359.48	299.30
U4	32	3.5	6.8	335.12	334.64
U5	23	3.2	6.4	272.13	230.42

由表 5 可知不同尺寸缺陷对应的应力数据是有差异的,说明用外表面应变表征埋藏缺陷的应力状况具有可行性。进一步观察发现,U3 缺陷外部“两端”的环向应力测试值并不相近,一端应力为 359.48 MPa,另一端则为 299.30 MPa,这是由缺陷本身几何形状复杂,缺陷类型的差异等原因导致的。因此,采用缺陷外部“两端”的环向应力表征缺陷承载能力时,应取两者中的较大值。比较 U3、U4 缺陷,两者的埋藏深度相同,U4 缺陷的长度 32 mm 是 U3 缺陷长度 14 mm 的两倍以上,但 U3 缺陷的高度 3.6 mm 略高于 U4 缺陷的高度 3.5 mm,U3 缺陷的最大环向应力 359.48 MPa 却略高于 U4 缺陷的 335.12 MPa,说明缺陷自身的高度对其外表面的应力影响最大。通常缺陷距外表面越近,承压时外表面的应力越大,但比较 U3、U5 缺陷可知,U5 缺陷顶面距外表

面 4.8 mm,比 U3 缺陷的 5 mm 略近,U5 的缺陷长度 23 mm 则明显大于 U3 的 14 mm,但 U5 的最大应力 272.13 MPa 则远小于 U3 的 359.48 MPa,这也是由于 U3 缺陷的自身高度 3.6 mm 大于 U5 的 3.2 mm 的缘故,这再次印证了缺陷自身高度是影响其外表面应力的关键几何因素。

从表 2 和表 5 中的数据还可以看出,U3 缺陷底面距内表面的距离仅为 0.2 mm,缺陷顶面距外表面的距离为 5 mm。在 6 MPa 作用下,缺陷对应外表面最大的环向应力达到 359.48 MPa,由于缺陷内缘的应力梯度通常较大,可推断缺陷周围及内表面已经屈服,可见 BS 7910 评价标准的普遍适用性,以及对缺陷类型的差异评价还有待深入研究。

#### 5 结论

(1) 采用 BS 7910:2005 标准对 X70 管线钢中的 5 处埋藏裂纹缺陷进行二级安全评定,缺陷均在标准允许的范围,满足“合于使用”要求,管线可以正常运行。

(2) 通过试验发现,埋藏缺陷的外部应变具有表征缺陷承载能力的可能性。

(3) 缺陷自身高度是影响其外表面应力水平的关键几何因素,可推断出它也是影响缺陷应力状态的关键因素。

#### 参考文献:

- [1] 王泽恒,吴在盛,赵伟,等.压力管道失效评定规范及安全评定概况研究[J].焊管,2013,36(5):19-23.
- [2] PD 6493-1980,Guidance on some methods for the derivation of acceptability levels for defects in fusion welding joints[S].
- [3] BS 7910-2005,Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures[S].
- [4] 张新斌,蒋晓东,施哲雄.基于 BS 7910 的含焊接缺陷管道的评定方法[J].北京石油化工学院学报,2005,13(2):37-41.
- [5] 王泽恒,马国光,王艳华,等.基于 BS 7910 标准含埋藏裂纹缺陷 X80 长输管线的二级安全评定[J].焊管,2013,36(4):61-65.
- [6] 周瑰云.太钢 X70 高级别管线钢的开发[J].铸造设备与工艺,2009,12(6):22-24.

- [7] 王炳英,霍立兴,张玉凤,等.基于 BS 7910 含缺陷 X80 钢焊接管道的安全评定[J].机械强度,2012,34(4):621-624.
- [8] 王泽恒,刘峰,王艳华,等.含埋藏裂纹缺陷 X80 长输管线的安全评定[J].焊管,2012,35(1):25-28.
- [9] 张世涛.X80 管线钢管环焊缝二级安全评定研究[J].焊管,2011,34(3):24-28.

## Safety Assessment for Girth Weld of X70 Pipeline with Embedded Crack Based on BS7910 Standard

*LI Ming<sup>1,2</sup>, CHENG Zhiqiang<sup>1,2</sup>, WANG Cheng<sup>3</sup>, LIU Baosheng<sup>1,2</sup>*

- (1. School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;  
2. Applied Mechanics and Structure Safety Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610031, China;  
3. Tarim Oil-gas Transmitting Branch, Western Pipeline, CNPC, Tarim 841000, China)

**Abstract:** For the sake of construction cost-saving, high grade steels are generally used in long-distance transportation pipeline. For the girth weld with embedded defects in a pipe segment cut in in-situ after the operation of 9 years, 5 defects are inspected by ultrasonic phased array testing. Based on the principle of conformity for use, the defects are assessed by BS 7910:2005 standard of 2B level. Evaluation results show that 5 crack defects are within the allowable range, pipeline can run safely. At the same time, to investigate the surface features of load capability of embedded defects, strain rosettes are placed on the outside surface of defects. The strain test results show that, the method can reveal the relation between defect sizes and its load capability.

**Key words:** X70 pipeline; girth weld; embedded defects; BS 7910; ultrasonic phased array testing; strain test