

文章编号: 1000-8241(2015)05-0488-05

# 管道焊缝缺陷的定量安全评定与容限尺寸

高喆慧 帅健 张思弘

中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249

**摘要:** 目前, 焊缝缺陷已经成为影响老管道运行的重大安全隐患。某一老龄管道环焊缝、螺旋焊缝存在错边及明显的表面缺陷, 对其母材和焊缝分别进行拉伸和断裂韧性试验, 基于试验数据, 结合管道的基本参数和运行情况, 采用失效评定图(FAD)技术对环焊缝、螺旋焊缝缺陷进行了一级和二级评定, 定量分析管道缺陷处的安全裕度, 通过迭代计算得到了焊缝处的容许表面裂纹尺寸, 并对环焊缝、螺旋焊缝裂纹容限尺寸进行了定量研究。研究结果表明: 一级评定会低估管道的承载能力, 计算得到的裂纹容限尺寸小于二级; 管道在 4 MPa 运行压力下, 螺旋焊缝缺陷处安全裕度很小, 危险性高于环焊缝缺陷, 焊缝处的裂纹容限尺寸小于环焊缝; 相比于裂纹长度, 裂纹深度对评估结果的影响更大。通过研究, 为管道缺陷验收提供了依据, 为焊缝评价的科学化、合理化提供了参考。(图 8, 表 3, 参 11)

**关键词:** 管道; 焊缝缺陷; 裂纹; FAD; 定量安全评定; 裂纹容限尺寸

中图分类号: TE88

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2015.05.006

## Quantitative safety assessment and tolerance size of pipeline weld defects

GAO Zhehui, SHUAI Jian, ZHANG Sihong

College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249

**Abstract:** Weld defects can be classified as major potential safety hazards that may negatively impact operation of aged pipelines. And for instance, in an old pipeline, the defects, misalignment and evident surface in its girth weld and spiral weld seams are found. Tensile and fracture toughness tests have been performed for parent materials and weld seams of the pipeline, respectively. Based on these test data and with consideration to basic parameters and operation of these pipelines, FAD has been deployed to perform Class I and Class II assessments of girth weld and spiral weld defects. In this way, safety margin around defected pipes can be analyzed quantitatively. Through iteration, sizes of allowable surface cracks can be determined. Furthermore, quantitative studies have been performed over crack tolerance sizes of girth weld and spiral welding lines. Relevant research results show that Class I assessments may underestimate bearing capacity of the pipeline, whereas the crack tolerance size determined through calculation is lower than those determined through Class II assessments; under the operating pressure of 4 MPa, spiral weld defects of the pipeline displayed minor safety margin with hazards higher than those of girth weld defects, whereas crack tolerance size around welding lines is lower than that of girth weld; compared with crack length, crack depth displayed even higher impacts to assessment results. Relevant researches may provide solid criterions for acceptance of pipeline defects. In addition, these researches may provide valuable references to rational and scientific assessments of weld seams. (8 Figures, 3 Tables, 11 References)

**Key words:** crack, weld seam, FAD, crack tolerance size

当前, 管道老龄化已成为世界性问题<sup>[1]</sup>。我国老龄管道多数位于东部地区, 大多服役超过 20 年。由于当时焊接技术水平较低、焊接工艺落后等原因, 早期建成投产的管道存在大量的焊缝裂纹类缺陷, 随着管道的长期运行, 焊缝中最初的小缺陷不断扩展变大, 给管

道的安全运行带来极大的隐患。因此, 对焊缝处缺陷进行安全评定, 确定管道的剩余强度和缺陷容限尺寸, 对老管道的安全运行具有重要的意义。

以某老龄输油管道为例, 采用失效评定图(FAD)技术对管道环焊缝和螺旋焊缝表面裂纹缺陷进行了安

全评定,定量分析了管道缺陷处的安全裕度,并结合评定方法,通过迭代给出了最大运行压力下焊缝缺陷容限尺寸,为该管道缺陷验收提供了依据,也为管道的安全运行和维护提供了理论指导。

## 1 FAD 评定方法及标准

对于管道焊缝中裂纹类缺陷,目前国际上主要采用 FAD 技术<sup>[2]</sup>进行评定。FAD 是在横坐标为载荷比  $S_r$  或  $L_r$ (含缺陷结构承受载荷与屈服载荷之比)、纵坐标为韧性比  $K_r$ (结构承载时缺陷处的应力强度因子与材料断裂韧性之比)的坐标系内构建的函数,其与塑性失稳界线  $L_{rmax}$  一起划分出安全及不安全区域。通过判断评定点的坐标是否落入安全区域,可判断出构件是否失效。

BS 7910-2005<sup>[3]</sup>、API 1104-2007<sup>[4]</sup>和 R/H/R6-2001<sup>[5]</sup>是国际主流的 3 种基于 FAD 技术的评价标准和方法,其中 BS 7910-2005 吸收了 PD 6493-1994<sup>[6]</sup>中的断裂力学分析方法和 R6-2001 评定方法中的双判据理论,适用于大部分构件和结构的缺陷评价,代表了 FAD 技术的最新发展。BS 7910-2005 将缺陷的断裂力学评估分为 3 个等级<sup>[3]</sup>;第一、二级评估应用最广泛,第三级评估适合于稳定撕裂的延性材料,需要计算缺陷结构的 J 积分,对于常用的焊接结构用钢一般不采用。在此参考 BS 7910-2005 方法,对管道安全裕度、焊缝表面容许裂纹尺寸进行定量研究。

### 1.1 一级评定

一级评定曲线与坐标轴围成一个矩形(图 1)。当计算得到的载荷比  $S_r < 0.8$ ,断裂比  $K_r < 1/\sqrt{2}$  时,可认定缺陷是可以接受的。评定方法中包含了一个取值为 2 的安全因子,当计算得到的评定点坐标落在矩形之内时,缺陷可接受,反之,缺陷是危险的。

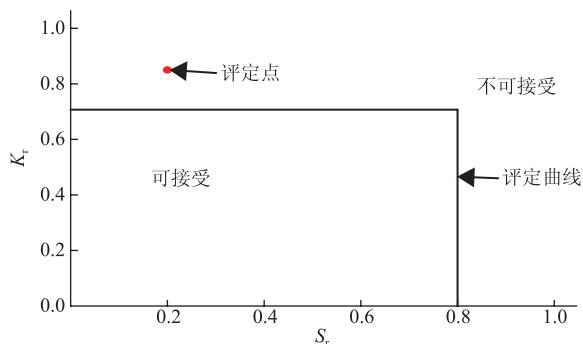


图 1 一级失效评定结果

### 1.2 二级评定

在二级评定中,通用评价曲线在工程中最为常用,其由一条曲线和截断线组成(图 2)。描述该曲线的方程如下:

$$\text{当 } L_r \leq L_{rmax} \text{ 时, } K_r = (1 - 0.14 L_r^2) [0.3 + 0.7 \exp(-0.65 L_r^6)] \quad (1)$$

$$\text{当 } L_r > L_{rmax} \text{ 时, } K_r = 0 \quad (2)$$

$$L_{rmax} \text{ 为截断线坐标,有: } L_{rmax} = \frac{\sigma_Y + \sigma_u}{2 \sigma_Y} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_Y$  为管材屈服强度,MPa;  $\sigma_u$  为管材的抗拉强度,MPa。

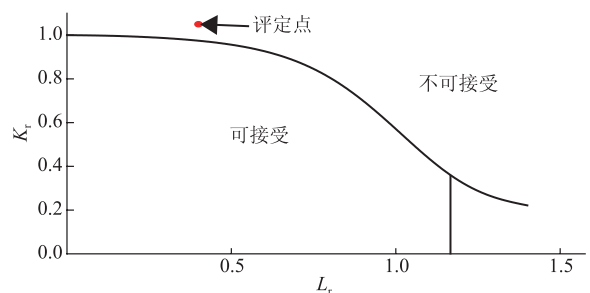


图 2 二级失效评定结果

如果评定点位于评定曲线和坐标轴组成的范围内,则可认定缺陷是可以接受的,否则缺陷不可接受。同时,为了防止局部的塑性破坏,截断线的取舍点采用平均值方法。

## 2 评定参数

### 2.1 管材缺陷参数

某输油管道始建于 70 年代末,管径 377 mm,管材为 16 Mn 钢管,壁厚 7 mm(穿跨越段为 8 mm),管道额定运行压力 4.0 MPa。现场调查发现,管道环焊缝、螺旋焊缝处均存在错边、裂纹缺陷。对存在明显焊接错边的焊缝管段取样,并对焊缝进行切割和打磨,在环焊缝和螺旋焊缝处各选 4 处最明显的缺陷(表 1)。

表 1 焊缝缺陷参数

缺陷位置	缺陷编号	焊缝宽/mm	焊缝错边量/mm	缺陷参数	
				深度/mm	长度/mm
环焊缝	H <sub>1</sub>	6	2.0	2.7	119
	H <sub>2</sub>	6	2.0	3.0	112
	H <sub>3</sub>	6	2.0	2.2	97
	H <sub>4</sub>	6	2.0	3.5	95
螺旋焊缝	Z <sub>1</sub>	6	1.8	3.1	75
	Z <sub>2</sub>	6	1.8	1.9	72
	Z <sub>3</sub>	6	1.8	3.3	103
	Z <sub>4</sub>	6	1.8	2.8	90

## 2.2 管材性能参数

现场收集管道试样,分别从管道母材和焊缝位置取样测定焊缝和母材的强度,并进行管材的夏比冲击(CVN)测试(表2)。

表2 管材力学性能

试样	屈服极限 /MPa	抗拉强度 /MPa	冲击功 /J	延伸率 %	截面收缩率 %
母材	381	529	87	33.1	21.3
环焊缝	424	574	90	14.4	20.2
螺旋焊缝	452	590	29	12.1	18.8

## 3 评定计算

### 3.1 载荷比

一级评定时,含缺陷结构承受载荷与材料屈服强度之比用  $S_r$  表示:

$$S_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_f} \quad (4)$$

二级评定时,用  $L_r$  表示:

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_Y} \quad (5)$$

$$\sigma_f = \frac{\sigma_Y + \sigma_u}{2} \quad (6)$$

式中:  $\sigma_{ref}$  为参考应力, MPa;  $\sigma_f$  为流动应力, MPa, 其最大值不应超过材料的 1.2 倍屈服极限。

### 3.2 断裂比

一级评定时:

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} \quad (7)$$

式中:  $K_I$  为应力强度因子, MPa  $\sqrt{m}$ ;  $K_{mat}$  为材料的断裂韧性, MPa  $\sqrt{m}$ 。二级评定时,引入了修正因子  $\rho$ , 以使  $K_r$  更加准确,计算公式如下:

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} + \rho \quad (8)$$

$$K_{mat} = \left[ (12\sqrt{C_V} - 20) \left( \frac{25}{B} \right)^{0.25} \right] + 20 \quad (9)$$

式中:  $\rho$  为修正因子;  $C_V$  为标准试件夏比冲击功的值, J;  $B$  为试件厚度, mm。

### 3.3 错边应力放大因子

焊缝处错边缺陷的存在会引起应力集中<sup>[7]</sup>, 因此在评定时还需引入错边应力放大因子  $k_m$ , 依据 BS 7910-2005, 其计算表达式为:

$$k_m = 1 + \frac{6e}{B_1(1-\nu^2)} \left( \frac{1}{1 + \left( \frac{B_2}{B_1} \right)^n} \right) \quad (10)$$

式中:  $e$  为管道的错边量, mm;  $B_1$ 、 $B_2$  分别为两块对接钢板的厚度, mm;  $\nu$  为泊松比, 取 0.3;  $n$  为常数, 环焊缝缺陷  $n$  取 1.5, 螺旋焊缝  $n$  取 0.6。

### 3.4 残余应力

焊缝处存在的残余应力<sup>[8]</sup>会对缺陷评定带来较大影响, 根据 BS 7910-2005 的规定:

$$Q_m = \sigma'_Y \quad (11)$$

或:

$$Q_m = \left( 1.4 - \frac{\sigma_{ref}}{\sigma'_f} \right) \sigma'_Y \quad (12)$$

式中:  $\sigma'_Y$  为室温下管材的屈服强度, MPa;  $\sigma'_f$  为室温下管材的流动强度, MPa。

考虑到管道安全性,  $Q_m$  应取式(11)、式(12)计算值中的较小值。

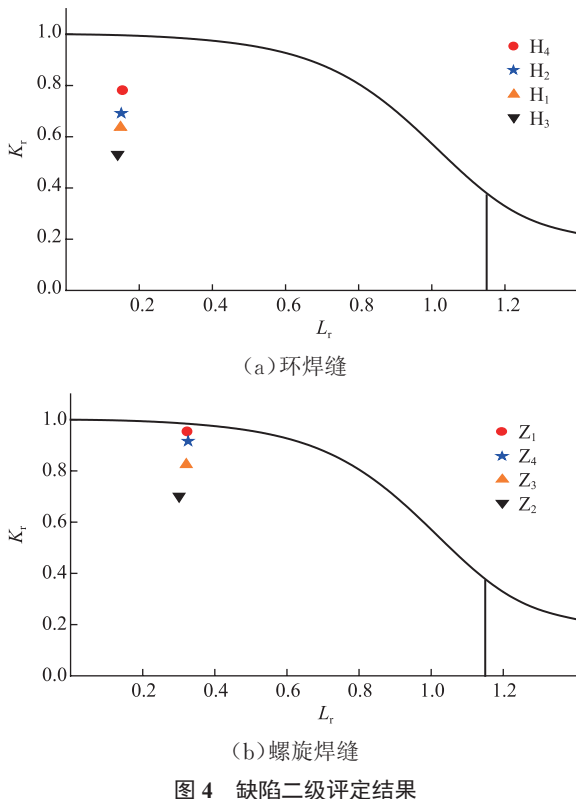
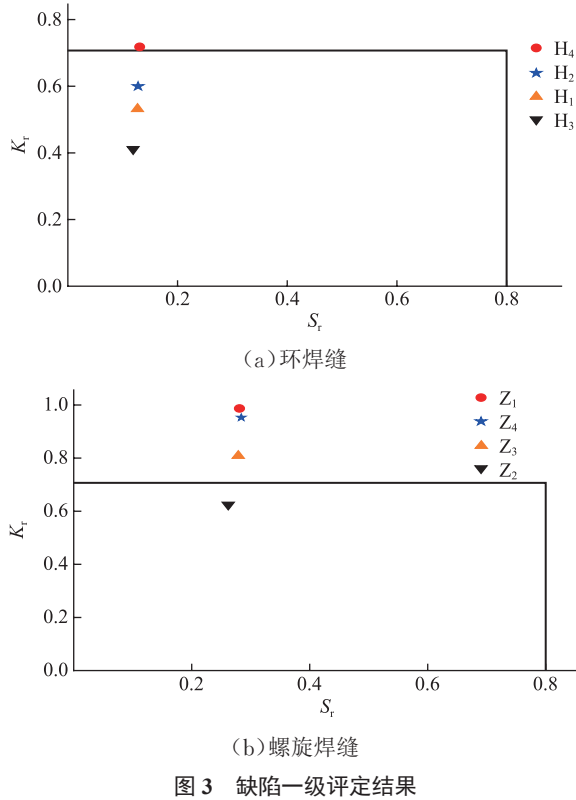
## 4 结果分析

### 4.1 缺陷失效风险分析

依据试验结果和管材缺陷参数,用 FAD 评价方法分别对环焊缝和螺旋焊缝缺陷在工作压力 4.0 MPa 下进行一级和二级评定,计算评定点坐标(表3)。由评定点在一级与二级失效评定曲线中的位置情况(图3、图4)可知,一级评定时,环焊缝缺陷 H4 和螺旋焊缝缺陷 Z<sub>1</sub>、Z<sub>4</sub>、Z<sub>3</sub> 的评定点坐标位于评定曲线外侧,缺陷处于不可接受范围内;二级评定时,焊缝缺陷评定点坐标均位于评定曲线内侧,对于环焊缝缺陷, H<sub>4</sub> 缺陷距离评定曲线最近,失效风险最高; H<sub>3</sub> 缺陷距离评定曲线最远,失效风险最低;对于螺旋焊缝缺陷, Z<sub>1</sub> 缺陷评定点坐标几乎落到了评定曲线上,濒临失效, Z<sub>2</sub> 缺陷距离评定曲线最远,失效风险最低。

表3 失效评定点坐标

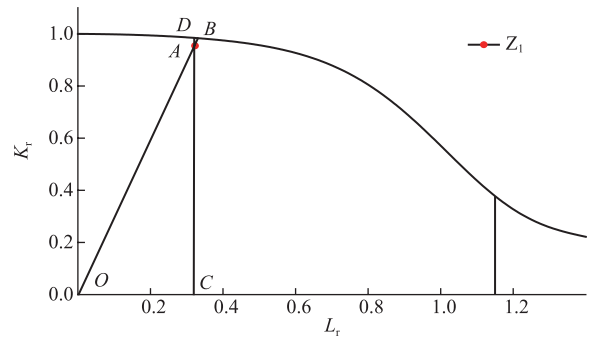
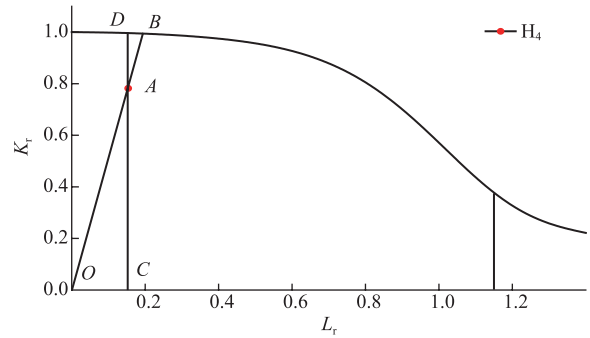
编号	一级评定		二级评定	
	$S_r$	$K_r$	$L_r$	$K_r$
H <sub>1</sub>	0.127	0.532	0.149	0.637
H <sub>2</sub>	0.128	0.600	0.151	0.692
H <sub>3</sub>	0.119	0.411	0.141	0.531
H <sub>4</sub>	0.131	0.718	0.154	0.782
Z <sub>1</sub>	0.281	0.987	0.323	0.954
Z <sub>2</sub>	0.262	0.623	0.301	0.701
Z <sub>3</sub>	0.279	0.808	0.321	0.825
Z <sub>4</sub>	0.284	0.953	0.326	0.926



对比缺陷的尺寸可知, H<sub>3</sub> 和 Z<sub>2</sub> 缺陷裂纹深度最小, H<sub>4</sub> 和 Z<sub>1</sub> 缺陷裂纹深度最大, 相比于裂纹长度, 裂纹深度对评定结果影响较大; 综合比较一级与二级评定结果可知, 一级评定更加保守, 会低估管道的承载能力。

### 4.2 安全裕度分析

根据缺陷失效风险分析, H<sub>4</sub> 和 Z<sub>1</sub> 分别为环焊缝和螺旋焊缝最危险的缺陷, 将两者评定点坐标分别绘制到二级失效评定曲线图中, 分析管道缺陷处的安全裕度(图5、图6)<sup>[9]</sup>。



对于 H<sub>4</sub> 缺陷, 一次应力安全裕度 F<sub>p</sub> 与断裂韧性安全裕度 F<sub>k</sub> 分别为:

$$F_p = \frac{OB}{OA} = 1.28; F_k = \frac{CD}{CA} = 1.27$$

对于 Z<sub>1</sub> 缺陷, 有:

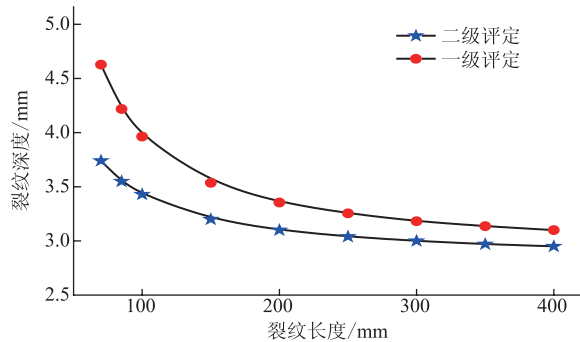
$$F_p = \frac{OB}{OA} = 1.04; F_k = \frac{CD}{CA} = 1.11$$

显然, 管道运行压力为 4 MPa 时, 环焊缝缺陷处仍然具有一定的安全裕度, 而螺旋焊缝缺陷已经接近失效, 螺旋焊缝缺陷的危险性大于环焊缝缺陷。

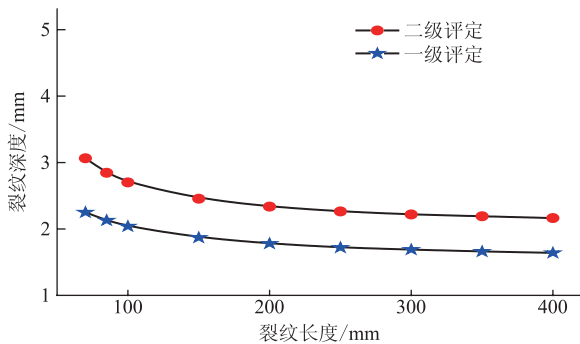
### 4.3 裂纹容限尺寸分析

通过逆向迭代<sup>[10]</sup>的方法, 编写程序计算焊缝处允许的表面裂纹尺寸。给定初始裂纹尺寸, 以微小的尺寸增量进行迭代, 在程序运行的每一步中, 都结合 FAD 评定方法计算评定点坐标, 当坐标点位于评定曲线之内时, 程序继续运行, 当评定点恰好位于评定曲线上时, 计算停止, 此时即可得到焊缝处允许的表面裂纹尺寸<sup>[11]</sup>。

通过多次迭代,得到管道焊缝处允许裂纹尺寸(图7)。对比环焊缝和螺旋焊缝裂纹容限尺寸(图8)可知,二级评定得到的裂纹容限尺寸大于一级评定,螺旋焊缝裂纹容限尺寸小于环焊缝。

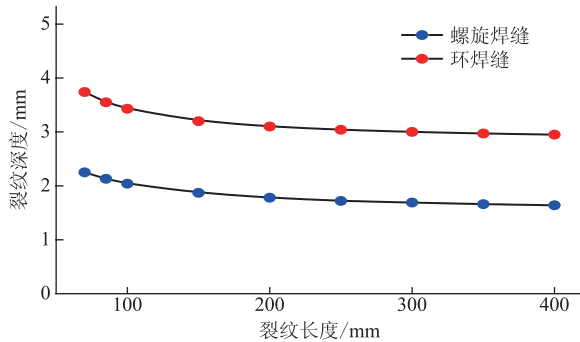


(a) 环焊缝

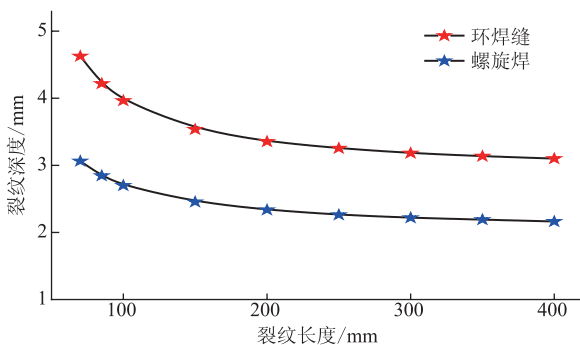


(b) 螺旋焊缝

图7 管道焊缝裂纹容限尺寸



(a) 一级评定



(b) 二级评定

图8 管道焊缝裂纹容限尺寸比较

## 5 结论

(1) 一级评定会低估管道的承载能力,评价结果过于保守,相比于裂纹长度,裂纹深度对评定结果影响更大。

(2) 管道运行压力为4 MPa时,环焊缝缺陷仍然具有相当大的安全裕度,而螺旋焊缝缺陷已经接近失效,螺旋焊缝缺陷的危险性大于环焊缝缺陷。

(3) 结合FAD方法迭代计算,可以得到管道焊缝处允许的表面裂纹尺寸,为管道缺陷验收提供依据;螺旋焊缝裂纹容限尺寸小于环焊缝,二级评定得到的裂纹容限尺寸大于一级评定,随着裂纹长度的增大,二级评定与一级评定的裂纹容限尺寸差距越来越小。

## 参考文献:

- [1] 王珂,罗金恒,董保胜,等.我国在役油气老管道运行现状[J]. 焊管,2009,32(12):61-65.
- [2] SHIH C F, KUMAR V, GERMAN M D. Studies on the failure assessment diagram using the estimation method and J-controlled crack growth approach[C]. West Conshohocken: Elastic-plastic Fracture: Second Symposium, Volume 2 - Fracture Resistance Curves and Engineering Applications, 1983.
- [3] British Standards Institution. BS 7910-2005 Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures[S]. London: The Authority of the Standards Policy and Strategy Committee, 2005.
- [4] American Petroleum Institute. API 1104-2007 Welding of pipelines and related facilities[S]. Washington DC: API, 2007.
- [5] Ainsworth R A. R6-2001 Assessment of the integrity of structure containing defect[S]. London: British Energy Generation Ltd, 2001.
- [6] British Standards Institution. PD 6539-1994 Guide to methods for the assessment of the influence of crack growth on the significance of defects in components operating at high temperatures[S]. London: the Authority of the Standards Policy and Strategy Committee, 1994.
- [7] 李伟,郑伟.对钢质管道对口错边量规定的认识[J].石油工程建设,2009,35(5):75-77.

(下转第496页)

达到气化界限时,密度急剧减小又会引起压力和温度的迅速降低。

(2)在CO<sub>2</sub>管道设计中,推荐以最高环境温度为设计参数。

(3)沿程温度-压力变化曲线可直观反映相态变化情况。各输送方式下的相态变化规律具有一定的相似性。各输送方式下均可能产生气化问题,相对地,密相输送更稳定。采用何种输送方式视具体管道而定,关键在于合理设定入口压力和温度。

(4)给出了管道入口压力、温度可行区间的计算方法,利用该方法可回归出一条可行区域曲线,在该曲线以上区域,管道运行过程中不会发生气化,可为CO<sub>2</sub>管道设计提供参考。

参考文献:

[1] 叶健,杨精伟. 液态二氧化碳输送管道的设计要点[J]. 油气田地面工程, 2010, 29(4): 37-38.  
 [2] 吴瑕. 二氧化碳的管道输送工艺[J]. 油气田地面工程, 2010, 29(9): 52-53.  
 [3] 王玉晶,林海波. CO<sub>2</sub>驱油地面工程技术研究[J]. 石油规划设计, 2008, 19(2): 30-31.

(上接第 492 页)

[8] 汪建华,陆皓. 焊接残余应力形成机制与消除原理若干问题的讨论[J]. 焊接学报, 2002, 23(3): 75-79.  
 [9] 杜志明,范军政. 安全裕度研究与应用进展[J]. 中国安全科学学报, 2005, 14(6): 6-10.  
 [10] 孙经先,刘立山. 非线性算子方程的迭代求解及其应用[J]. 数学物理学报, 1993, 13(3): 141-145.  
 [11] 王雅芬,李荣光,冯少广,等. CFRP 修复城市燃气管道焊缝缺陷的可行性[J]. 油气储运, 2012, 31(9): 674-677.

(收稿日期:2014-05-29; 修回日期:2015-03-01; 编辑:潘红丽)

[4] 喻西崇,李志军,潘鑫鑫,等. CO<sub>2</sub>超临界态输送技术研究[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 83-86.  
 [5] 张春威,柳亨. 二氧化碳管道密相输送工艺适用性分析[J]. 内蒙古石油化工, 2013(4): 51-52.  
 [6] 张早校,冯霄. 二氧化碳输送过程的优化[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(3): 274-277.  
 [7] 张东. 二氧化碳液化及输送技术[J]. 广东化工, 2012, 39(4): 23-25.  
 [8] 刘建武. 二氧化碳输送管道工程设计的关键问题[J]. 油气储运, 2014, 33(4): 369-373.  
 (收稿日期:2014-04-04; 修回日期:2015-03-02; 编辑:潘红丽)



**作者简介:** 鲁岑,助理工程师,1986年生,2011年硕士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业,现主要从事油气田地面工程设计与研究工作。

LU Cen, MS.D, assistant engineer, born in 1986, graduated from China University of Petroleum (Beijing), oil & gas storage and transportation engineering, in 2011, engaged in the design and research of surface engineering in oil-gas fields.  
 Tel: 13851901047, Email: lucen\_ren@163.com



**作者简介:** 高喆慧,在读硕士生,1989年生,2011年毕业于中国石油大学(华东)工程力学专业,现主要从事管道的剩余强度评价、失效分析和完整性管理等工作。

GAO Zhehui, reading master, born in 1989, graduated from China University of Petroleum (Huadong), engineering mechanics, in 2011, engaged in the research of residual strength assessment, failure analysis and integrity management of pipelines.

Tel: 13810679473, Email: gaoahu302@163.com