

[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.06.031

含凹陷海底管道安全评价与屈曲机理研究现状

何璇¹, 钱峰², 叶皓¹, 颜孙挺¹, 金志江^{1*}

(1. 浙江大学 化工机械研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江玉泉环境工程有限公司, 浙江 湖州 313023)

摘要:凹陷是海底管道受到外部挤压或碰撞而产生的几何缺陷,是造成海底管道失效的主要原因之一。为了提供一定的海底管道设计、制造、安装及运行监测的参考依据,文中从安全评价方法与屈曲机理两方面总结了近年来国内外的研究进展,阐述了基于深度和应变模型的纯凹陷和含其它缺陷凹陷的评估方法,介绍了含凹陷海底管道在纯外压、纯弯矩和内压+弯矩载荷作用下的屈曲机理研究现状。在此基础上,提出目前研究还不够全面,并指出可以考虑基于应变、应力的双重准则和其他缺陷的具体影响,以及国内安全性评价准则建立的必要性;同时提出多种载荷作用下的屈曲机理研究是今后发展的趋势。

关键词:海底管道;凹陷;安全评估;屈曲分析

中图分类号:TE973.6 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2014)06-0120-06

Review of Assessment and Buckling Researches on Dented Subsea Pipelines

HE Xuan¹, QIAN Feng², YE Hao¹, YAN Sunting¹, JIN Zhijiang^{1*}

(1. Institute of Process Equipment, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Zhejiang Yuquan Environmental Engineering Co., Ltd., Huzhou, Zhejiang 313023, China)

Abstract: Dent, which is a geometric defect caused by the external extrusion or collision, is one of the main reasons of failure of subsea pipelines. In order to provide references for design, manufacture, installation and operational monitoring of subsea pipelines, this paper took a review of researches on both assessment and buckling of dented subsea pipelines from these years. Assessment methods on depth-based and strain-based models for plain dents and methods for defected dents were presented. Meanwhile, research status on dented subsea pipelines under pure external pressure, pure bending moment and internal pressure associated with bending was described. On this basis, this paper proposed the researches were not comprehensive in the present. Meanwhile, it pointed out that double norm based on both of strain and stress and detailed influences by other defects should be considered. And it is necessary to build our national assessment standard. Besides, buckling of dented subsea pipelines under associated external loads will be the trend in the future.

Key words: subsea pipeline; dent; assessment; buckling analysis

外部的损伤很大程度上影响了海底管道正常作业的能力和效率。在西欧和北美,海岸上和近海油气管道最常见的损伤和失效原因就是外部干扰和腐蚀^{[1]127}。

凹陷是海底管道几何缺陷最常见的形式之一。在管道运营周期的各个阶段都有可能形成凹陷,它是管壁受外部挤压或者碰撞(例如近海施工、海上落物冲击、船舶起抛锚作业、拖网捕鱼和海洋开发等等)而产

生径向位移形成的凹坑,是由于管壁永久塑性变形而使其横截面发生的总的变形^[2]。

凹陷将直接影响管道的局部应变、疲劳寿命以及剩余强度,给管道的安全运行带来潜在的危害^[3]。一旦在海底管道上发现凹陷或者局部变形,就需要对其结构完整性进行评估,预测该缺陷的危险性。国外学者和研究机构通过理论分析、实验研究和数值模拟的方法对含凹陷管道的力学特性进行了分析,主要包括

收稿日期:2014-05-08;修回日期:2014-07-04

基金项目:浙江省科技计划重大专项项目(2012C11002)

作者简介:何璇(1990),女,浙江衢州人,硕士研究生,主要研究方向为海底管道安全保障技术。E-mail:elenaxuan@zju.edu.cn

以下两方面:①针对含有凹陷的管道进行安全评估,目的是为了更好检测、监督管道的运行,并提出相应的应对措施和补救办法;②研究含凹陷海底管道在各种载荷作用下的屈曲现象。例如在外压作用下容易发生局部屈曲,压力足够高时将发生屈曲扩展^{[4]79}。据资料显示,北海 1/3 以上的海底管道遇到过屈曲失效的问题,每千米修复费用约 150 万美金^[5]。由此可见,研究其抵抗屈曲的能力、发展抗破坏准则并用于指导设计就显得尤为重要。

1 凹陷的评估

1.1 单纯凹陷的评估

单纯凹陷是指其所在位置不存在管壁厚度减薄(如沟槽和裂纹)和其他缺陷(如焊缝)的一种平滑凹陷^[6],如图 1 所示。单纯凹陷较其他类型最为简单,因此针对其研究的工作也较多,目前很多的评价方法多基于此类凹陷。

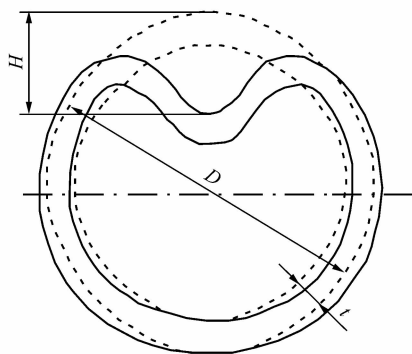


图 1 凹陷的几何形状

Figure 1 Dimensions of dent

1.1.1 基于凹陷深度的评估

凹陷的深度一般定义为管道直径方向上相对于原管径的最大减小量,即图 1 中所示的 H 。对于单纯凹陷而言,很多标准都是将凹陷深度作为主要指标建立基于深度的评估方法。美国机械工程师协会的 ASME B31.8 将临界深度定为外径的 6%^[7];澳大利亚国家标准 AS 2885.3(2001)^[8]也将临界深度规定为外径的 6%;美国石油协会的 API 579^[9]确定深度小于外径的 7% 即可视为安全,API PUBL 1156^[10]认为深度小于外径的 2% 时安全,在 2% ~ 6% 之间需要进行疲劳评估,而大于 6% 时则不安全;还有 API 1160(2001)^[11]认为管径大于 304.80 mm 时临界深度为外径的 2%,而管径小于 304.80 mm 时,临界深度为 6.35 mm;加拿大标准工业协会的 CSA Z662-03(2003)^[12]认为,当管径大于 101.60 mm 时,临界深度为外径的 6%,而当管径小于 101.60 mm 时,临界深度为 6.00 mm;PDAM^{[1]129}(由 16

个国际石油天然气公司资助的项目)则分别针对约束凹陷和非约束凹陷,定义临界深度为外径的 10% 和 7%;联邦法规 49 CFR 195 和 49 CFR 192 在评估时分得更细,针对不同的管径范围、凹陷所处的位置(管顶还是管底)、需要修复的及时程度(多长时间内进行修复以确保安全)确定临界深度,其范围在外径的 2% ~ 6%^[13]。从以上准则可以看出,基于深度的评价包括绝对深度 H 和相对深度 H/D ,不过仍以相对深度为主。

1.1.2 基于应变模型的评估

虽然基于凹陷深度的评估方法在工业标准中占有比较重要的地位,但是随着研究的深入,许多学者发现,仅仅靠凹陷的深度评估时经常高估或者低估凹陷的严重性。Ong 等人^[14]通过实验和有限元数值模拟研究了长凹陷和短凹陷的应力水平,发现长凹陷的最大应力大于短凹陷,由此可见,凹陷的长度对管道的应力集中也有很大的影响。因此,仅仅基于凹陷深度的评估是不完善的。

基于应变的评价方法是由 Rosenfeld 等^[15]提出的,其采用分段贝塞尔曲线差值方法,通过曲率计算得到凹陷处的环向弯曲应变、轴向弯曲应变和轴向薄膜应变。ASME B31.8 采纳了该思想,并提出了基于应变的评价规范,通过使用凹陷几何数据和总的等效应变,提供了相对简单的方程来预估周向弯曲应变、纵向弯曲应变以及纵向扩展应变^[16-18]。2005 年, Noronha 等人^[19]认为 ASME B31.8 高估了周向和纵向弯曲应变,并提出了校正方法。基于校正后的 ASME B31.8 的周向弯曲应变、纵向弯曲应变以及纵向扩展应变计算公式^{[20]824}为

$$\varepsilon_1 = \frac{t}{2} \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_1} \right), \varepsilon_2 = \frac{-t}{2R_2}, \varepsilon_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{H}{L} \right)^2 \quad (1)$$

可以得到管道总应变的计算式

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \sqrt{\varepsilon_x^2 - \varepsilon_x \varepsilon_y + \varepsilon_y^2} \quad (2)$$

其中: $\varepsilon_x = \pm \varepsilon_2 + \varepsilon_3$, $\varepsilon_y = \pm \varepsilon_1$ (正负号分别表示内外表面)。

则内表面总应变 ε_i 为

$$\varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon_1^2 - \varepsilon_1(\varepsilon_2 + \varepsilon_3) + (\varepsilon_2 + \varepsilon_3)^2} \quad (3)$$

外表面总应变 ε_o 为

$$\varepsilon_o = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_1(-\varepsilon_2 + \varepsilon_3) + (-\varepsilon_2 + \varepsilon_3)^2} \quad (4)$$

最后,总的等效应变 ε_{max} 定义为

$$\varepsilon_{\text{max}} = \max \{ \varepsilon_i, \varepsilon_o \} \quad (5)$$

式中: H 为凹陷深度; L 为凹陷长度; R_0 为初始管道内半径; R_1 为管道横截面曲率半径; R_2 为管道轴向面曲率

半径; t 为管壁厚度。

尽管 ASME B31.8 在基于应变的评估方法上有过一些修改和调整,但仍存在一些问题。

1) 没有明确解释管道总应变计算式是如何得到的, Backer^[16] 猜测可能来源于平面应变条件下等效应变公式 $\varepsilon_{\theta} = \frac{2}{3} \sqrt{e_1^2 - e_1 e_2 + e_2^2}$ 或者是类比于平面应力条

件下的 Von Mises 应力公式 $\sigma_{\theta} = \frac{2}{3} \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2}$ 。

式中: ε_{θ} 为平面应变条件下的等效应变; $e_1 = \varepsilon_1$, $e_2 = \varepsilon_2 + \varepsilon_3$; σ_1 和 σ_2 为主应力; σ_{θ} 为平面应力条件下的 Von Mises 应力。但是, Czyz 等人^{[21]45} 认为这样的类比没有具体的依据。因此, ASME B31.8 中等效应变计算方式的精确性有待进一步验证。

2) ASME B31.8 只考虑了纵向薄膜应变,而忽略了周向薄膜应变和剪切应变。对实际凹陷的有限元分析指出这两分量对于凹陷的应力分析有很大的作用^{[22]131}。

3) 虽然基于应变模型的评价方式更加精确,但是 ASME B31.8 中并没有基于等效应变定义明确的失效准则。

Lukasiewicz 等人^{[22]129} 和 Czyz 等人^{[21]38} 提出了另一种计算凹陷应变的方法,指出在管道中应变由两部分组成:纵向和周向,且每部分都可以进一步分为弯曲应变和薄膜应变。弯曲应变分量可以通过同轴高分辨率测径仪测得的 Z 方向上的管壁偏移量 w (见图 2) 进行计算。

可以得到,在管道的凹陷区域内外表面的最大当量应变为

$$\varepsilon_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{xm}^2 + \varepsilon_{xm} \varepsilon_{ym} + \varepsilon_{ym}^2} \quad (6)$$

或者^{[20]826}

$$\varepsilon_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{xm}^2 + \varepsilon_{xm} \varepsilon_{ym} + \varepsilon_{ym}^2 + \gamma_{xy}^2 / 2} \quad (7)$$

式中: ε_{xm} , ε_{ym} 分别为 x 、 y 方向管道的最大应变值; γ_{xy} 为 xy 平面的剪切应变。

式(6)和式(7)都是基于塑性应变理论^[23]得到的,处在塑性不可压的状态,即 $\varepsilon_{xm} + \varepsilon_{ym} + \varepsilon_{zm} = 0$ 。

上述方法考虑的应变更加全面,既考虑了纵向薄膜应变,也考虑了周向薄膜应变,同时还加入剪切应变分量,相比于 ASME B31.8 更加精确。但是,这种评估方法依赖于熟练的有限元应用技巧和判断,当涉及到大变形问题时计算比较复杂,与实际情况存在一定差距。

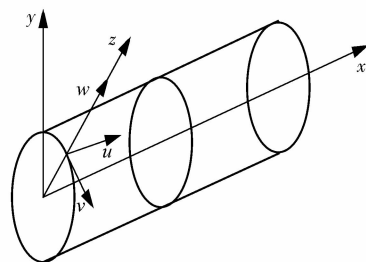


图 2 管道坐标系和偏移分量

Figure 2 Coordinate system of the pipe and displacement components

1.2 含其他缺陷的凹陷的评估

单纯凹陷结构简单,相关研究较多,但是海底管道在实际工作过程中由于环境复杂,产生的凹陷所在位置往往还伴有其他缺陷的存在。Hopkins 等人^[24]回顾了含凹陷管道的研究成果并强调含其他缺陷(裂纹或沟槽)的凹陷的危险性。Lancaster 和 Palmer^[25]发现局部凹陷中的最大应力处于凹陷的侧面并且指出在这些位置的沟槽将对管道产生极大的危害。因此,研究含其它缺陷的凹陷的安全评估技术具有很大的意义。

1.2.1 含沟槽凹陷的评估

沟槽是由于外物作用导致管道厚度局部减薄的一种缺陷。含沟槽凹陷的管道,不管是在爆破强度还是疲劳寿命方面都比只含单纯凹陷或只含沟槽的无凹陷管道要低。

爆破强度的评估,主要通过含沟槽凹陷管道的爆破试验得到的数据来进行预测,见诸报道的该类爆破测试就达两百多次^{[1]135},其中考虑了沟槽与凹陷产生的顺序,以及凹陷产生过程中内压的影响。British Gas^[26-27]、EPRG^[28]以及 Battelle^[29]提出了预估含沟槽凹陷管道爆破强度的经验关系式。British Gas^[30]建立了一个用于预估含沟槽凹陷管道爆破强度的半经验断裂模型,并被 EPRG 标准采用。相对于多种经验模型而言,半经验断裂模型的预估更加准确。但是,该断裂模型并不适用于高合金钢(等级高于 X65),同时它无法估计爆破强度的下界。另一方面,对于含沟槽凹陷的管道,目前还没有可靠实用的方法评估其疲劳寿命。由以上可知,对于含沟槽凹陷的管道评估还存在很大的局限性,因此这方面的研究还需进一步深入。

1.2.2 焊缝处凹陷的评估

焊缝处往往存在一定的应力集中,含凹陷的焊缝将大大降低管道的爆破强度和疲劳寿命。全尺寸爆破试验表明,在焊缝处存在凹陷的管道的最小爆破压力

仅仅是 SMYS(指定最小屈服强度)的 7% 左右^{[1]134},原因可能是焊缝存在裂纹等其他缺陷。因此一旦发现焊缝上存在凹陷,那么实际工程中就需要对其进行修理或者移除。目前还没有可靠的方法来评估含凹陷焊缝管道的爆破强度和疲劳寿命。

综上所述,凹陷与其他复杂缺陷的结合大大增加了海底管道的危险性。当这种情况发生时,最主要的是及时并准确地检测,再采取一定的补救措施。虽然没有办法预估其爆破强度和疲劳寿命,但是研究凹陷与其他缺陷组合的情况可以为工程师提供可靠的支持并确定维修紧迫与否。

2 含凹陷海底管道的屈曲研究

管道屈曲是指直管道结构发生一定弯曲变形并且刚度失去稳定的过程^[31]。由于管道薄壁、细长的结构特性,在其受力和变形条件稍有恶化的时候,极容易发生屈曲破坏。海底管道在安装和服役过程中经常受到多种组合载荷的作用,这将大大降低管道抵抗屈曲失效的能力。如果管道还存在一定的初始缺陷,那将进一步加速屈曲的发生。

目前,国内外针对不同受载下的完整管道屈曲问题研究相对较多,但对含凹陷海底管道的屈曲研究相对较少,针对的凹陷也大多经过简化。

2.1 外压作用下含凹陷海底管道的屈曲研究

在海底管道铺设过程中,为了减轻垂直段产生的拉力,管道内部通常是空的。同时,在海底管道作业过程中,也需要定期维护,此时管道内部也是空的。在这些情况下,外压对管道的稳定性有重要的影响。国外学者对外压作用下的管道屈曲进行了一定研究。

Park 等人^[32]指出外压作用下的屈曲研究对于管道的设计以及深海管道的运行有着重要的作用,并选取了 3 种不同的径厚比 D/t 为 18.9、24.2 和 33.6 及 2 种不同尺寸凹陷的管道试样进行试验和数值模拟。提出了通用抗屈曲曲线,用于预估不同椭圆度下的屈曲压力。该曲线仅适用于凹陷处椭圆度大于 0.5% 的管道。对于椭圆度小于 0.5% 的小尺寸凹陷,仅仅影响凹陷附近的几何尺寸而不会大幅度增加管道的局部椭圆度^{[4]86}。

含几何缺陷管道在外压作用下,极易发生屈曲扩展。例如管道扁平化就是典型的屈曲扩展造成的几何形态。Kyriakides^{[4]79}等人通过实验研究了 3 种类型的凹陷对屈曲扩展的影响,并指出根据凹陷最深处截面特征,屈曲扩展初始压力可以通过 Timoshenko 准则^[33]计算得到;在管道材料相同的情况下,屈曲扩展初始压

力主要受凹陷的长度以及椭圆度的影响;作者通过实验研究并建立圆环模型分析了管道的屈曲机理,得到了屈曲扩展初始压力 P_p 的经验计算式^[34]。

$$P_p = \sigma_0 \left[10.7 + 0.54 \left(\frac{E'}{\sigma_0} \right) \right] \left(\frac{t}{D} \right)^{2.25} \quad (8)$$

式中: σ_0 为屈服压力; E' 为双线性 σ - ε 曲线后屈服段的斜率; t 为管道厚度; D 为管道直径。

综合以上研究可以看出,对于含凹陷海底管道而言,影响其屈曲外压最主要的因素是径厚比、椭圆度以及管道的材料特性^[35-36]。但是,以上学者的研究仅仅限于单纯凹陷,结构比较简单。而实际情况中,凹陷常常还伴有其他缺陷如裂纹、凹槽等。另外,研究方法主要利用实验和数值模拟法,理论分析不足,尚需进一步完善。

2.2 弯矩作用下含凹陷海底管道的屈曲研究

海底管道在铺设和作业的过程中也会受到弯矩的作用。例如在 S 型铺管法中产生的垂弯段和海底管道的悬跨都将会产生弯矩作用。当管道存在一定的初始缺陷,极易发生屈曲失稳现象。

Iflefel 等人^{[37]769}通过数值模拟分析了含凹陷管道在弯矩作用下的屈曲失效机理,得出了弯矩与管道旋转角度的关系曲线。屈曲发生之后,随着旋转角度的增大,弯矩不断减小。结果表明,凹陷处于受拉面时的最大弯矩要比凹陷处于受压面时大。并且两种情况发生的屈曲现象和屈曲的位置都有所不同。

Blachut 等人^[38]制作了 5 个相同的管道试样,配以不同的矩形沟槽和相同的凹陷,通过实验分析其在弯矩作用下的屈曲现象,并与数值模拟结果进行比较。结果表明,在弯矩加载过程中,实验和模拟结果并不吻合,相对于实验而言,数值模拟低估了屈曲弯矩。另外,在 Blachut 等人的研究中,并没有明确指出矩形沟槽的尺寸和数量对管道屈曲具体有什么样的影响,因此这方面的研究还需要进一步完善。

从上述研究可以看出,弯矩作用下含凹陷海底管道的屈曲现象与凹陷所处的位置有很大的关系。相对于处于受拉面的凹陷,处于受压面的凹陷更容易导致管道的失稳,因此,两者的屈曲有所差别。由于以上两种情况屈曲发生的位置不同,因此可以为学者研究管道的止屈器提供一定的参考价值。

2.3 内压和弯矩共同作用下含凹陷海底管道的屈曲研究

海底管道承载着输送流体的功能,因而还存在内压的作用。研究表明,内压对于弯矩作用下含凹陷管

道的屈曲有正面影响,因此研究内压和弯矩共同作用的屈曲机理有一定的意义。

Iflefel 等人^{[37]761}通过建立有限元模型,并运用 ABAQUS 分析软件研究了含凹陷管道在弯矩和内压共同作用下抵抗外载的能力。结果表明,管道弯曲过程中,如果存在内压,则会减少弯曲屈服强度,但是会增加含凹陷管道承受弯矩的能力。这可能是因为内压的存在可以促使凹陷产生一定程度的回弹以减少凹陷截面处的变形。同时,当两种载荷共同作用时,两者施加的先后顺序不同,产生的结果也不同。但是,在 Von Mises 极限范围内,其不会发生屈曲现象。虽然在该情况下研究的不是屈曲失效,但是其结论可以为以后含凹陷海底管道在其他外载荷作用下的屈曲研究提供一定的启发和指导。

3 结语

含凹陷海底管道安全评价方法与屈曲机理是目前国内外学术和工程界研究的热点,但由于海底管道的作业环境非常复杂,未知因素难以预测,因此尚有许多问题需要进一步完善。

1) 对于单纯凹陷而言,基于深度和基于应变的评价标准都存在一定的缺陷,可以考虑基于两者的双重准则,以完善评估。

2) 对于含其他缺陷的凹陷而言,海底管道安全性评估还不完善,而实际的凹陷有时候会比较复杂,目前尚没有具体的评价方法,需要进一步深入研究。

3) 国外已形成了含凹陷管道的工业标准,并在不断的完善中,而国内对于这方面的研究相对较少,也没有统一准则。因此,加强含凹陷管道的安全评估方法研究并建立我国的工业标准具有很大的学术意义和工程应用价值。

4) 在含凹陷海底管道的屈曲机理研究上,大部分学者考虑的载荷都是单一的。但是,海底管道的受力比较复杂,而且经常是多种作用力同时存在。因此,复杂载荷同时作用下含凹陷海底管道屈曲机理研究需要进一步完善。

参考文献:

- [1] COSHAM A, HOPKINS P. The effect of dents in pipelines-guidance in the pipeline defect assessment manual[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2004, 81(2): 127-139.
- [2] 焦中良, 帅健. 含凹陷管道的完整性评价[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2011, 33(4): 157-164.
- [3] 杨琼, 帅健, 左尚志. 管道凹陷研究现状[J]. *油气储运*, 2009, 28(6): 10-15.
- [4] KYRIAKIDES S, BABCOCK C D, ELYADA D. Initiation of propagating buckles from local pipeline damages[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 1984, 106(1): 79-87.
- [5] 方娜, 陈国明, 朱红卫, 等. 海底管道泄漏事故统计分析[J]. *油气储运*, 2014(1): 99-103.
- [6] MACDONALD K A, COSHAM A, ALEXANDER C R, et al. Assessing mechanical damage in offshore pipelines-Two case studies[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2007, 14(8): 1667-1679.
- [7] 杨琼, 帅健. 凹陷管道的工程评定方法[J]. *石油学报*, 2010, 31(4): 649-653.
- [8] COMMITTEE ME-038. AS 2885. 3-2001 Pipelines-Gas and liquid petroleum Part 3: Operation and maintenance[S]. Sydney: Standards Australia, 2001.
- [9] TED L, ANDERSON, DAVID A, et al. API 579: a comprehensive fitness-for-service guide[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2000, 77(14/15): 953-963.
- [10] ALEXANDER C R, KIEFNER J F. Effects of smooth and rock dents on liquid petroleum pipelines[C]. Dallas: API Pipeline Conference, 1997.
- [11] American Petroleum Institute. API 1160-2001 Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines[S]. Washington: US-ANSI, 2001.
- [12] Canadian Standards Association. Commentary on CSA standard Z662-03, oil and gas pipeline systems[M]. Mississauga: Canadian Standards Association, 2003.
- [13] DAWSON S J, RUSSELL A, PATTERSON A. Emerging techniques for enhanced assessment and analysis of dents[C]. Calgary: International Pipeline Conference, 2006.
- [14] ONG L S, SOH A K, ONG J H. Experimental and finite element investigation of a local dent on a pressurized pipe[J]. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1992, 27(3): 177-185.
- [15] ROSENFELD M J, PORTER P C, COX J A. Strain estimation using Vetco deformation tool data[C]. Calgary: International Pipeline Conference, 1998: 389-397.
- [16] BAKER M. Integrity management program-dent study[Z]. Washington: Department of Transportation, 2004.
- [17] ROSENFELD M J. Proposed new guidelines for ASME B31. 8 on assessment of dents and mechanical damage[R]. Chicago: Gas Research Institute, 2001.
- [18] ROSENFELD M J, PEPPER J W, LEWIS K, et al. Basis of the new criteria in ASME B31. 8 for prioritization and repair of mechanical damage[C]//2002 4th International Pipeline Conference. Calgary: American Society of Mechanical Engineers, 2002: 647-658.
- [19] NORONHA D B, MARTINS R R, JACOB B P, et al. The use of B-splines in the assessment of strain levels associated with plain dents[C]. Rio de Janeiro, Brazil: Proceedings of RPC2005 Rio Pipeline Conference and Exposition, 2005.
- [20] MING G, MCNEALY R, KRISHNAMURTHY R, et al. Strain-based models for dent assessment: a review[C]//2008 7th International Pipeline Conference. Calgary: American Society of Mechanical Engineers, 2008: 823-830.
- [21] CZYZ J A, LUKASIEWICZ S A, SUN C, et al. Calculating dent

- strain[J]. Pipeline and Gas Technology,2008(2):38-45.
- [22] LUKASIEWICZ S A, CZYZ J A, SUN C, et al. Calculation of strains in dents based on high resolution in-line caliper survey[C]//2006 International Pipeline Conference. Calgary: American Society of Mechanical Engineers,2006:129-134.
- [23] DIETER G E, BACON D. Mechanical metallurgy[M]. New York: McGraw-Hill,1986.
- [24] HOPKINS P, JONES D G, CLYNE A. The significance of dents and defects in transmission pipelines[C]. London: Institution of Mechanical Engineers,1989.
- [25] LANCASTER E R, PALMER S C. Assessment of mechanically damaged pipes containing dents and gouges[J]. ASME Publications PVP,1993,261:61.
- [26] JONES D G. The significance of mechanical damage in pipelines[J]. 3R International,1982,21(7):347-354.
- [27] HOPKINS P, JONES D, CLYNE A. Recent studies of the significance of mechanical damage in pipelines[C]. San Francisco, USA: The American Gas Association and European Pipeline Research Group Research Seminar V:1983.
- [28] ROOVERS P, BOOD R, GALLI M, et al. EPRG methods for assessing the tolerance and resistance of pipelines to external damage[J]. Pipeline Technology,2000(2):405-425.
- [29] MAXEY W A. Outside force defect behavior[C]//Process of the 7th Symposium on Line Pipe Research. Arlington: American Gas Association,1986.
- [30] HOPKINS P. The application of fitness for purpose methods to defects detected in offshore transmission pipelines[C]. London: Conference on Welding and Weld Performance on the Process Industry,1992.
- [31] KYRIAKIDES S, CORONA E. Mechanics of offshore pipelines: volume 1 buckling and collapse[M]. Amsterdam:Elsevier,2007.
- [32] PARK T D, KYRIAKIDES S. On the collapse of dented cylinders under external pressure[J]. International Journal of Mechanical Sciences,1996,38(5):557-578.
- [33] TIMOSHENKO S P, GERE J M. Theory of elastic stability[M]. Mineola, New York: Dover Publications,2012.
- [34] KYRIAKIDES S, BABCOCK C D. Experimental determination of the propagation pressure of circular pipes[J]. Journal of Pressure Vessel Technology,1981,103(4):328-336.
- [35] YEH M K, KYRIAKIDES S. On the collapse of inelastic thick-walled tubes under external pressure[J]. Journal of Energy Resources Technology,1986,108(1):35-47.
- [36] YEH M K, KYRIAKIDES S. Collapse of deepwater pipelines[J]. Journal of Energy Resources Technology,1988,110(1):1-11.
- [37] IFLEFEL I B, MOFFAT D G, MISTRY J. The interaction of pressure and bending on a dented pipe[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping,2005,82(10):761-769.
- [38] BLACHUT J, IFLEFEL I B. Collapse of pipes with plain or gouged dents by bending moment[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping,2007,84(9):560-571.

专业注入内涵 专业成就品质

欢迎订阅食品开发,年费:60元

办刊宗旨:立足食品资讯,关注食品市场,探讨食品科技,倡导产业联盟,传播食品文化,追求生命和谐

刊物特色:标准十六开,每年六期(双月刊),每期100页,双月月末发行

主要版面:食事资讯、现代烘焙、乳品饮料、原配料、健康产业、包装检测、科技前沿、排行榜、分类信息、展会聚焦

发行渠道:食品生产企业、食品设备生产商、食品添加剂企业、经销商、代理商、政府相关部门、科研单位、各大协(学)会、领事馆商务处。全国各大食品展览会定点免费派发;读者俱乐部会员免费赠阅

咨询电话:021-56533893

E-mail: foodnews99@163.com

网址: http://www.cnfoodnews.com (中国食事传媒)

食品开发
FOOD DEVELOPMENT NEWS

信息量大 涉及面广 影响力强 读者群广

· 产品介绍 ·

西门子发布全新的分布式 I/O 产品—Simatic ET 200AL

西门子在“2014 中国国际工业博览会”现场展出了全新的分布式 I/O 产品——Simatic ET 200AL。该系列是 Simatic ET 200 分布式 I/O 产品家族的新成员,具有 IP65/67 高防护等级。结构紧凑,重量轻,体积小,适用于安装空间狭小和具有移动设备的场合。

Simatic ET 200AL 可以通过西门子统一的工程软件平台 TIA 博途(Portal)轻松快速地进行组态和调试;它与其他分布式 I/O 设备可通过 Profibus, Profinet 或 IO-Link 总线集成到自动化网络中。Simatic ET 200AL 具有电子短路防护功能,在线路中断或更换模块后可以自动启动。同时,它还具备 Profienergy 功能,在非生产期间按工艺要求协调关闭单个设备或整个生产单元达到节能的目的。另外,ET 200AL 的输出模块可按照故障安全相关的方式成组地地断执行器。

(路艳艳)