

# 含腐蚀缺陷弯管爆破压力分析<sup>1)</sup>

王慧杰 陈占锋<sup>2)</sup>

(杭州电子科技大学机械工程学院, 杭州 310018)

**摘要** 弯管是管道系统的关键部分, 容易受到腐蚀。现有的理论方法对腐蚀缺陷进行了过度简化, 难以准确预测含腐蚀缺陷弯管的爆破压力。为了解决这一问题, 本文首先建立有限元模型进行含腐蚀缺陷弯管爆破压力有限元分析。然后, 基于 Goodall 方程和有限元分析结果, 提出新的含腐蚀缺陷弯管爆破压力的预测方程。最后, 通过有限元分析和实验, 对该预测方程的准确性进行验证。

**关键词** 腐蚀缺陷, 弯管, 爆破压力

中图分类号: O344.5 文献标识码: A doi: [10.6052/1000-0879-22-679](https://doi.org/10.6052/1000-0879-22-679)

## BURST PRESSURE ANALYSIS OF ELBOW WITH CORROSION DEFECT<sup>1)</sup>

WANG Huijie CHEN Zhanfeng<sup>2)</sup>

(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract** Elbow is a key part of the pipeline system, and it is easy to be corroded. Existing theoretical methods overly simplify corrosion defect, making it difficult to accurately predict the burst pressure of elbow containing corrosion defect. In order to solve this problem, a finite element model is established to conduct finite element analysis of the explosion pressure of elbow with corrosion defect. Then, based on the Goodall equation and finite element analysis results, a new prediction equation for the burst pressure of elbow with corrosion defect is proposed. Finally, the accuracy of the prediction equation is verified by finite element analysis and experiments.

**Keywords** corrosion defect, elbow, burst pressure

管道运输具有运量大, 占地小, 建设成本低等优点<sup>[1]</sup>, 被广泛应用于油气资源的长距离运输。中国油气管道的铺设覆盖范围较广<sup>[2]</sup>, 在服役过程中油气管道需承受较高的内压, 因此准确评估其爆破压力至关重要<sup>[3]</sup>。由于运输介质中不可避免地混有杂质, 这些杂质会对管道系统的弯管部分造成严重的冲刷腐蚀, 弯管已成为油气管道中最容易被腐蚀的结构之一。陈元达等<sup>[4]</sup>通过计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 分析得到弯管冲刷腐蚀区域, 如图 1 所示。

由于弯管曲率的存在, 在承受内压时弯管的受力状态不同于直管<sup>[5]</sup>。在内压作用下, 直管管壁的环向和轴向应力均匀分布且相等, 而弯管的应力分布并不均匀, 弯管中内拱部分的环向应力要大于外拱部分<sup>[6]</sup>。因此, 前人所提出的以直管为研究对象的爆破压力研究成果<sup>[7]</sup>并不适用于弯管。

弯管是管道系统的重要组成部分, 有必要对含腐蚀缺陷弯管的爆破压力进行研究。1978 年, Goodall<sup>[8]</sup>提出一个计算薄壁弯管爆破压力的表达式。然而, 由于缺乏试验验证, Miller<sup>[9]</sup>认为应

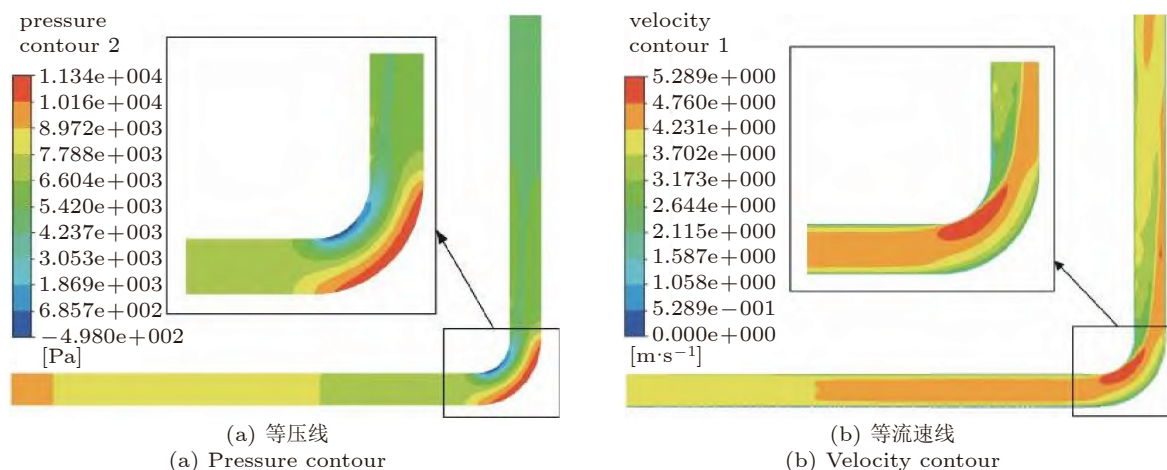
2022-12-13 收到第 1 稿, 2023-03-22 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金项目 (51805127) 和中国博士后基金项目 (2021M693504) 资助。

2) 陈占锋, 博士, 讲师, 研究方向为油气储运、结构完整性。E-mail: [czf@hdu.edu.cn](mailto:czf@hdu.edu.cn)

引用格式: 王慧杰, 陈占锋. 含腐蚀缺陷弯管爆破压力分析. 力学与实践, 2023, 45(4): 860-865

Wang Huijie, Chen Zhanfeng. Burst pressure analysis of elbow with corrosion defect. *Mechanics in Engineering*, 2023, 45(4): 860-865

图 1 弯管轴向截面流场分布云图<sup>[4]</sup>Fig. 1 Flow field distribution in axial section of the elbow<sup>[4]</sup>

该谨慎使用 Goodall 公式。Duan 等<sup>[10]</sup>通过对有限元分析结果的拟合, 提出外拱局部减薄弯管塑性极限压力的经验公式, 并通过试验进行了验证, 该公式的计算结果与 Goodall 公式的计算结果较为接近。马景槐等<sup>[11]</sup>对内压作用下弯管的塑性极限载荷进行了分析, 推导出在内压作用下钢制弯管的塑性极限载荷计算式。Kim 等<sup>[12]</sup>研究了弯管在内压和弯矩作用下的爆破压力, 对局部减薄弯管进行了 8 次爆破试验, 分析了弯曲载荷对局部减薄弯管爆破压力的影响。丁宁等<sup>[13]</sup>将弯管的腐蚀缺陷简化为体积型缺陷, 采用有限元方法进行研究, 得到了含腐蚀缺陷弯管的塑性极限内压计算公式。

综上所述, 目前已有许多学者对腐蚀弯管的爆破压力进行了研究。然而, 现有的研究对弯管腐蚀缺陷的几何形状做了过度简化, 不能较为准确地预测含腐蚀缺陷弯管的爆破压力。为此, 本文建立内压作用下腐蚀弯管的有限元模型, 探讨腐蚀缺陷的几何尺寸参数对弯管爆破压力的影响, 并研究含腐蚀缺陷弯管的爆破压力。

## 1 有限元分析

### 1.1 有限元模型

本文以弯曲角度为 90°的弯管作为研究对象开展有限元分析, 并根据弯管实际的材料性能和几何尺寸建立有限元模型。弯管的材料是符合 ASTM A234 WPB 的碳钢, 几何尺寸与机械性能为: 外径  $D = 72 \text{ mm}$ , 壁厚  $t = 7 \text{ mm}$ , 弯管弯

曲半径  $R = 94.6 \text{ mm}$ , 屈服强度  $\sigma_y = 275.2 \text{ MPa}$ , 极限抗拉强度  $\sigma_u = 449.2 \text{ MPa}$ <sup>[14]</sup>。

根据 Lee 等<sup>[15]</sup>对弯管腐蚀机理的研究, 发现弯管内部的外弧处较其他部位更容易受到冲刷腐蚀, 造成弯管局部减薄, 进而影响管道剩余强度。因此, 本文中的有限元模型在完整管道的基础上引入腐蚀缺陷, 腐蚀缺陷位于弯管内部的外弧中段处, 如图 2 所示。考虑到管道的材料非线性和几何非线性<sup>[16]</sup>, 在有限元软件 ABAQUS 上进行有限元建模和分析, 选择实体缩减积分单元 C3D8R 作为有限元模型的单元, 该单元类型计算速度较快, 且计算结果准确。

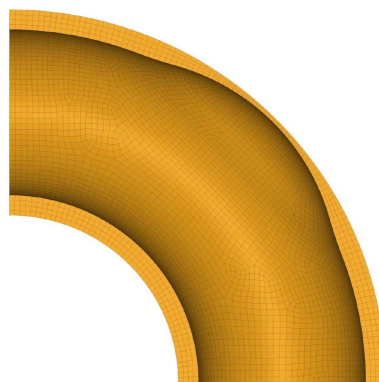


图 2 含腐蚀缺陷弯管有限元模型

Fig. 2 Finite element model of elbow with corrosion defect

根据弯管在实际工况下的受力特点, 在弯管两端面设置若干参考点, 施加位移约束。对弯管内壁施加均布载荷, 模拟内压载荷作用, 图 3 为腐蚀弯管的边界条件。

有限元模型中, 接近实际工况下弯管内部腐

蚀缺陷的几何形状，将缺陷横截面和纵截面的边缘形状都拟定为更加平滑的圆形，几何形状如图 4 所示， $\alpha$  是腐蚀缺陷宽度对应的圆周半角， $d$  是腐蚀缺陷的腐蚀深度， $\beta$  是腐蚀缺陷长度对应的圆周半角， $t$  为管道壁厚， $D$  为管道直径， $R$  为弯管弯曲半径。相比于前人研究工作中将腐蚀缺陷简化为长方体，本文的腐蚀缺陷更接近真实腐蚀缺陷。

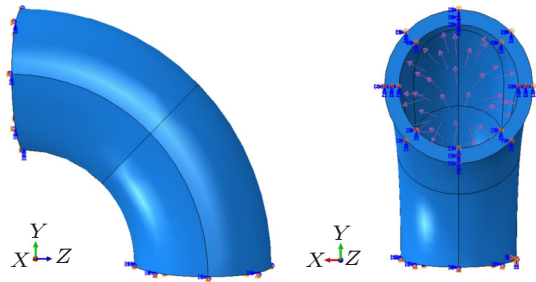


图 3 腐蚀弯管有限元模型的边界条件

Fig. 3 Boundary conditions of finite element model of corroded elbow

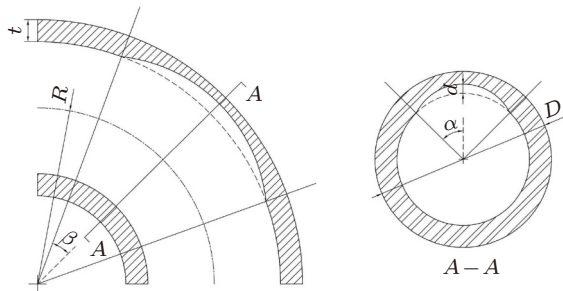


图 4 腐蚀弯管的几何形状

Fig. 4 Geometry of corroded elbow

为了确定腐蚀缺陷的几何尺寸对弯管爆破压力的影响，建立 36 个腐蚀弯管有限元模型，腐蚀缺陷的几何尺寸如表 1 所示。其中， $\alpha$  由  $40^\circ$  变化到  $62^\circ$ ， $d$  由 3.8 mm 变化到 6 mm， $\beta$  由  $21^\circ$  变化到  $43^\circ$ 。通过 ABAQUS 进行有限元分析，在轴向弯管内壁面施加的载荷由零逐渐增大，直到弯管失效破坏，得到该腐蚀弯管对应的爆破压力值。

1.2 有限元计算

基于 von Mises 准则，对在内压作用下含腐蚀缺陷弯管的应力分布进行有限元分析。在腐蚀弯管的应力达到爆破强度时，等效应力云图如图 5 所示。腐蚀弯管的爆破发生在局部减薄处(图中红色区域)，也就是腐蚀缺陷所在位置。该位置首先达到弯管的强度极限，进而发生失效。

表 1 有限元模型中腐蚀缺陷的几何尺寸

Table 1 Geometric parameters of corrosion defect in the finite element model

| 序号 | $\alpha/(^\circ)$ | $d/\text{mm}$ | $\beta/(^\circ)$ |
|----|-------------------|---------------|------------------|
| 1  | 62                | 5.5           | 40               |
| 2  | 60                | 5.5           | 40               |
| 3  | 58                | 5.5           | 40               |
| 4  | 56                | 5.5           | 40               |
| 5  | 54                | 5.5           | 40               |
| 6  | 52                | 5.5           | 40               |
| 7  | 50                | 5.5           | 40               |
| 8  | 48                | 5.5           | 40               |
| 9  | 46                | 5.5           | 40               |
| 10 | 44                | 5.5           | 40               |
| 11 | 42                | 5.5           | 40               |
| 12 | 40                | 5.5           | 40               |
| 13 | 52                | 6.0           | 40               |
| 14 | 52                | 5.8           | 40               |
| 15 | 52                | 5.6           | 40               |
| 16 | 52                | 5.4           | 40               |
| 17 | 52                | 5.2           | 40               |
| 18 | 52                | 5.0           | 40               |
| 19 | 52                | 4.8           | 40               |
| 20 | 52                | 4.6           | 40               |
| 21 | 52                | 4.4           | 40               |
| 22 | 52                | 4.2           | 40               |
| 23 | 52                | 4.0           | 40               |
| 24 | 52                | 3.8           | 40               |
| 25 | 52                | 5.5           | 43               |
| 26 | 52                | 5.5           | 41               |
| 27 | 52                | 5.5           | 39               |
| 28 | 52                | 5.5           | 37               |
| 29 | 52                | 5.5           | 35               |
| 30 | 52                | 5.5           | 33               |
| 31 | 52                | 5.5           | 31               |
| 32 | 52                | 5.5           | 29               |
| 33 | 52                | 5.5           | 27               |
| 34 | 52                | 5.5           | 25               |
| 35 | 52                | 5.5           | 23               |
| 36 | 52                | 5.5           | 21               |

通过有限元法得到 36 组不同腐蚀程度弯管的爆破压力，进而对弯管的腐蚀缺陷几何参数与爆破压力的关系进行研究，结果如图 6 所示。由图 6 可以看出，腐蚀深度对弯管的爆破压力影响最大，

当腐蚀深度减小时，弯管的爆破压力明显提高， $d$  改变时爆破压力敏感性较稳定。随着腐蚀长度的减小，弯管的爆破压力也会有所提高，当  $\beta$  大于  $29^\circ$  时，爆破压力敏感性较弱。腐蚀宽度对弯管爆破压力的影响程度最小， $\alpha$  改变时爆破压力敏感性不明显。因此，为了提高弯管的爆破压力，可以在易发生腐蚀的区域（即弯管的外弧处）增大壁厚，增加管道的强度，延长管道的寿命。

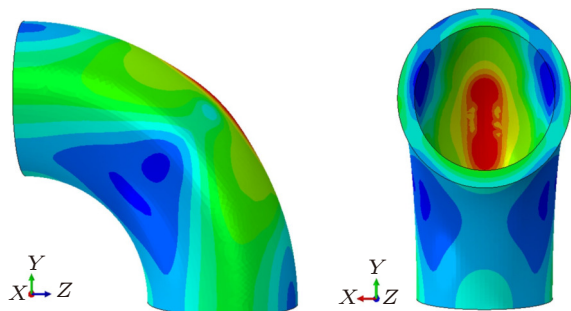


图 5 内压作用下腐蚀弯管的应力云图

Fig. 5 Stress nephogram of corroded elbow under internal pressure

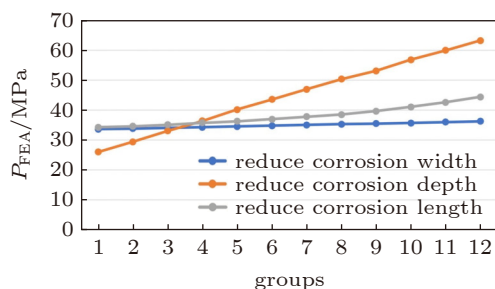


图 6 弯管腐蚀缺陷的几何参数与爆破压力  $P_{FEA}$  的关系

Fig. 6 Relationship between geometrical parameters of corrosion defects of elbow and burst pressure  $P_{FEA}$

## 2 爆破压力预测

### 2.1 改进的 Goodall 方程

对于无缺陷等壁厚弯管，Goodall<sup>[17]</sup> 基于 Tresca 准则提出爆破压力预测方程

$$P_G = \frac{\sigma_f t}{r} \cdot \frac{1 - r/R}{1 - r/(2R)} \quad (1)$$

式中， $\sigma_f$  代表流动应力，可以由屈服强度  $\sigma_y$  和极限抗拉强度  $\sigma_u$  得到

$$\sigma_f = (\sigma_y + \sigma_u)/2 \quad (2)$$

由于 Goodall 方程的计算结果过于保守<sup>[18]</sup>，许多学者对 Goodall 方程进行了修正。Kim 等<sup>[19]</sup>

认为 Goodall 方程基于 Tresca 准则提出，该方程计算结果与实验结果相比偏低，如果基于 von Mises 准则对该方程加以修正，计算结果会更加准确。因此，Kim 等<sup>[19]</sup> 经过研究分析，在 Goodall 方程前乘上系数  $2/\sqrt{3}$ ，提出修正的 Goodall 方程

$$P_o = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sigma_f t}{r} \cdot \frac{1 - r/R}{1 - r/(2R)} \quad (3)$$

对于带有腐蚀缺陷的弯管，需要进一步修正 Goodall 方程。本文将 Goodall 方程与腐蚀缺陷的几何参数进行关联，进而得到带有腐蚀缺陷弯管的爆破压力。在有限元分析中，分别对  $\alpha$ ， $d$  和  $\beta$  这 3 个腐蚀缺陷的几何参数与弯管爆破压力进行多元非线性回归分析，得到含腐蚀缺陷弯管的爆破压力预测方程为

$$P_T = [1.11 \cdot (1 - x^{0.14} \cdot y^2 \cdot z^{0.5})] \cdot P_o = [1.11 \cdot (1 - x^{0.14} \cdot y^2 \cdot z^{0.5})] \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sigma_f t}{r} \cdot \frac{1 - r/R}{1 - r/(2R)} \quad (4)$$

式中， $x = \alpha/90^\circ$ ，表示弯管在宽度上的腐蚀程度； $y = d/t$ ，表示弯管在深度上的腐蚀程度； $z = \beta/45^\circ$ ，表示弯管在长度上的腐蚀程度。

### 2.2 有限元法验证

为了验证本文提出的爆破压力预测方程（4）的准确性，建立 12 组具有不同腐蚀缺陷尺寸（包括不同的  $\alpha$ ， $d$  和  $\beta$ ）的弯管有限元模型，具体参数如表 2 所示。

表 2 弯管腐蚀缺陷的几何尺寸

Table 2 Geometric parameters of corrosion defect of elbow

| Serial number | $\alpha/(^\circ)$ | $d/\text{mm}$ | $\beta/(^\circ)$ |
|---------------|-------------------|---------------|------------------|
| 1             | 62                | 6.0           | 43               |
| 2             | 60                | 5.8           | 41               |
| 3             | 58                | 5.6           | 39               |
| 4             | 56                | 5.4           | 37               |
| 5             | 54                | 5.2           | 35               |
| 6             | 52                | 5.0           | 33               |
| 7             | 50                | 4.8           | 31               |
| 8             | 48                | 4.6           | 29               |
| 9             | 46                | 4.4           | 27               |
| 10            | 44                | 4.2           | 25               |
| 11            | 42                | 4.0           | 23               |
| 12            | 40                | 3.8           | 21               |



通过对表2中12组数据进行有限元分析,得到爆破压力值。然后,将腐蚀弯管的爆破压力有限元分析结果( $P_{FEA}$ )与通过式(4)的预测结果

( $P_T$ )进行比较,比较结果如图7所示。计算结果显示,式(4)的预测结果最大误差小于8%,平均误差小于5%,计算精度可满足工程要求。

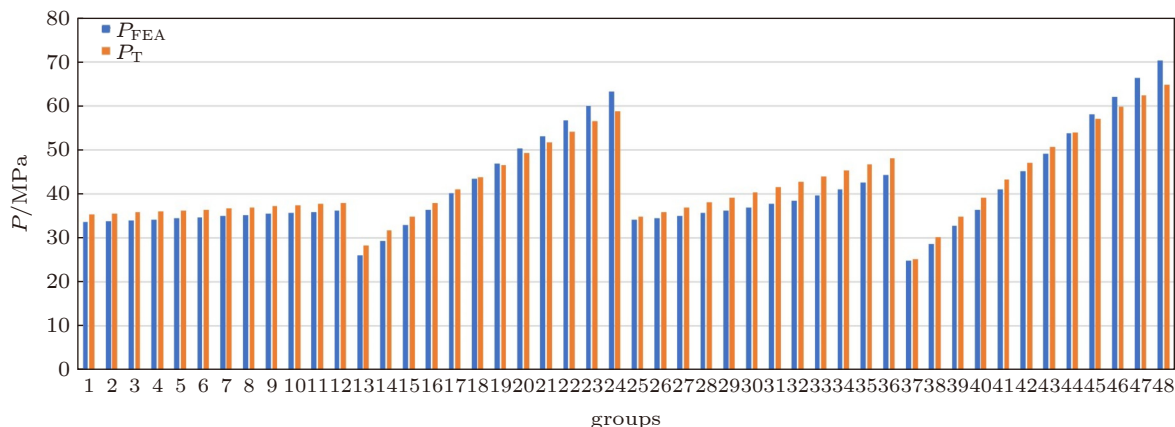


图7 爆破压力仿真结果( $P_{FEA}$ )与预测结果( $P_T$ )的比较

Fig. 7 Comparisons of simulation results ( $P_{FEA}$ ) and prediction results ( $P_T$ ) of burst pressure

## 2.3 实验验证

由于实验条件有限,在开展本文研究时,笔者难以进行实验验证。在已有的研究工作中,能用来验证式(4)的实验数据也很少。查阅文献发现, Kim等<sup>[12]</sup>对局部减薄弯管进行了试验研究,并得到8组试验结果。其中,仅有一组试验样本为外弧处有局部减薄缺陷的90°弯管,能够用来验证式(4)的准确性。将 Kim等<sup>[12]</sup>提供的弯管缺陷几何尺寸:  $\alpha = 51.3^\circ$ ,  $d = 5.5 \text{ mm}$ ,  $\beta = 39.9^\circ$ ,代入式(4)计算弯管的爆破压力,腐蚀弯管爆破压力的试验结果为36.8 MPa,式(4)预测结果为36.6 MPa。与试验结果相比,式(4)预测弯管爆破压力的误差为0.54%,精度较高。综合有限元验证和实验验证的结果可以看出,本文提出的含腐蚀缺陷弯管的爆破压力预测方程具有较高的准确性。

## 3 结论

本文对含腐蚀缺陷弯管的爆破问题开展了研究,建立了含腐蚀缺陷弯管的有限元模型,分析了含腐蚀缺陷弯管爆破压力的影响因素,提出了含腐蚀缺陷弯管的爆破压力方程。研究结果表明:

(1) 腐蚀缺陷的深度对弯管的爆破压力影响最大,腐蚀缺陷的长度影响次之,而腐蚀缺陷的宽度影响最小,可以对弯管易发生冲刷腐蚀的位置

进行加厚处理来延长弯管的使用寿命;(2)与有限元分析结果相比,预测方程爆破压力的最大误差小于8%,平均误差小于5%;与实验数据相比,预测方程爆破压力的误差为0.54%。综上所述,本文提出的方程能够较为准确地预测含腐蚀缺陷弯管的爆破压力,对含缺陷弯管的安全评估具有一定的指导意义。

## 参考文献

- 仇文杰, 李国敏, 熊海燕等. 氢在钢管壁内的扩散及氢腐蚀实验研究. *力学与实践*, 2022, 44(4): 776-785  
Qiu Wenjie, Li Guomin, Xiong Haiyan, et al. Experimental study on hydrogen diffusion and hydrogen corrosion in steel pipe. *Mechanics in Engineering*, 2022, 44(4): 776-785 (in Chinese)
- 滕振超, 刘凯琪, 滕云超等. 基于热流固多场耦合的埋地输油管道地震响应. *东北石油大学学报*, 2021, 45(3): 99-110, 10-11  
Teng Zhenchao, Liu Kaiqi, Teng Yunchao, et al. Seismic response of buried oil pipeline based on heat fluid-solid multi-fields coupling. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2021, 45(3): 99-110, 10-11 (in Chinese)
- Bhardwaj U, Teixeira AP, Soares CG. Uncertainty quantification of burst pressure models of corroded pipelines. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2020, 188: 104208
- 陈元达, 叶晓浩, 胡政等. 弯管液固两相流动冲刷磨损的数值预测. *失效分析与预防*, 2022, 17(3): 169-176  
Chen Yuanda, Ye Xiaohao, Hu Zheng, et al. Numerical prediction of erosion wears in elbow for liquid-solid flow. *Failure Analysis and Prevention*, 2022, 17(3): 169-176 (in Chinese)

- Chinese)
- 5 Nykyforchyn H, Zvirko O, Tsyrlunyk O, et al. Analysis and mechanical properties characterization of operated gas main elbow with hydrogen assisted large-scale delamination. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 82: 364-377
- 6 Wang Q, Zhou W. A new burst pressure model for thin-walled pipe elbows containing metal-loss corrosion defects. *Engineering Structures*, 2019, 200: 109720
- 7 Amaya-Gómez R, Sánchez-Silva M, Bastidas-Arteaga E, et al. Reliability assessments of corroded pipelines based on internal pressure—a review. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 98: 190-214
- 8 Goodall IW. Large deformations in plastically deforming curved tubes subjected to in-plane bending, research division report RD/B/N4312. England: Central Electricity Generating Board, 1978
- 9 Miller AG. Review of limit loads of structures containing defects. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1988, 32(1-4): 197-327
- 10 Duan ZX, Shen SM. Analysis and experiments on the plastic limit pressure of elbows. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2006, 83(10): 707-713
- 11 马景槐, 朱福先. 内压作用下弯管的塑性极限载荷分析. *力学与实践*, 2012, 34(5): 48-51  
Ma Jinghuai, Zhu Fuxian. Plastic limit load analysis of elbows under the internal pressure. *Mechanics in Engineering*, 2012, 34(5): 48-51 (in Chinese)
- 12 Kim JW, Yoon MS, Park CY. The effect of load-controlled bending load on the failure pressure of wall-thinned pipe elbows. *Nuclear Engineering and Design*, 2013, 265: 174-183
- 13 丁宁, 吴瑶晗, 刘慧等. 基于有限元的含缺陷弯管塑性极限载荷分析. *石化技术*, 2020, 27(11): 109-110  
Ding Ning, Wu Yaohan, Liu Hui, et al. Plastic limit load analysis of defected elbow based on FE. *Petrochemical Industry Technology*, 2020, 27(11): 109-110 (in Chinese)
- 14 Kim JW, Lee SH, Park CY. Experimental evaluation of the effect of local wall thinning on the failure pressure of elbows. *Nuclear engineering and Design*, 2009, 239(12): 2737-2746
- 15 Lee GH, Pouraria H, Seo JK, et al. Burst strength behaviour of an aging subsea gas pipeline elbow in different external and internal corrosion-damaged positions. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2015, 7(3): 435-451
- 16 Liu W, Guo Q, Qiao C, et al. Strain design method of buried pipeline crossing fault. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 105: 659-671
- 17 Goodall IW. Lower bound limit analysis of curved tubes loaded by combined internal pressure and in-plane bending moment, research division report RD/B/N4360. England: Central Electricity Generating Board, 1978
- 18 Shuai Y, Zhang X, Huang H, et al. Development of an empirical model to predict the burst pressure of corroded elbows of pipelines by finite element modelling. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2022, 195: 104602
- 19 Kim YJ, Kim J, Ahn J, et al. Effects of local wall thinning on plastic limit loads of elbows using geometrically linear FE limit analyses. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(8): 2225-2245

(责任编辑: 胡 漫)