

文章编号:1674-2869(2008)03-0101-03

# 含缺陷埋地管道弯头极限载荷的有限元分析

魏化中<sup>1,2</sup>, 陈文霞<sup>2</sup>, 舒安庆<sup>1,2</sup>

(1. 武汉市压力容器压力管道安全工程研究中心, 湖北 武汉 430074;

2. 武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**应用有限元分析软件 ANSYS, 对含点蚀缺陷的弯头在内压载荷作用下进行有限元分析, 分析中考虑材料非线性和几何非线性, 得出了缺陷尺寸对塑性极限载荷的影响及变化规律, 得到了一些对含缺陷弯头的安全评定有参考价值的结论。

**关键词:**弯头; 点蚀; 塑性极限载荷

**中图分类号:**TE 88

**文献标识码:**A

## 0 引言

随着经济的快速发展, 城市燃气管网建设发展迅速, 各种管线纵横交错, 而这些管道长期埋于地下, 由于穿越地域广、地形复杂、土壤性质千差万别, 因而造成燃气管线大量地出现外壁腐蚀缺陷, 其中点蚀缺陷是最常见的管道腐蚀缺陷<sup>[1]</sup>。点蚀是在金属管道某些部位腐蚀成一些小而深的孔, 是一种极具破坏性的腐蚀形式, 严重时会发生穿孔, 造成巨大的经济损失。弯头是燃气管网中的重要管件, 具有改变传输介质流动方向的功能, 由于其几何形状和所受载荷复杂, 使之成为燃气管道系统中最容易失效的管件之一。从目前有关腐蚀管线的安全评定方法研究来看, 大多数都是针对直管的, 对弯头的研究相对较少。因此, 对含缺陷燃气管道弯头的安全评定方法研究是一项急需解决的重要问题, 而在安全评定中, 塑性极限载荷是一个必不可少的重要参量。笔者采用有限元软件对内拱外壁含点蚀缺陷弯头的塑性极限载荷进行分析和研究。

## 1 含缺陷弯头的有限元分析

### 1.1 有限元模型

有限元计算模型规格为  $\Phi 108 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ , 弯曲半径为:  $R=1.5 D_0$  的  $90^\circ$  弯头。管道腐蚀缺陷只对周围部分应力产生影响, 因此, 只需要对腐蚀缺陷管段进行分析, 有限元模型采用三维实体模型。带缺陷弯头相对于通过弯头轴线及缺陷中心的纵向平面对称, 可以取管子的  $1/2$  模型进行分析。为了避免管段端部效应的影响, 在弯头两端分

别接有长度大于 3 倍弯头直径的直管<sup>[2]</sup>, 如图 1 所示。

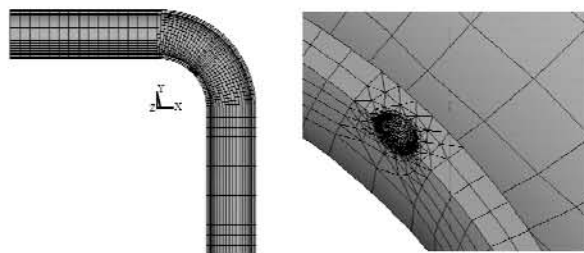


图1 含缺陷弯头网格划分

Fig. 1 Mesh of elbows with pitting corrosion

### 1.2 载荷及边界条件

由于内压是埋地管道的主要工作荷载, 在弹塑性有限元分析中, 根据腐蚀管道的具体情况, 仅考虑了管道内压, 其余的荷载情况, 相比之下都很小, 因此, 自重、土壤压力、静水压力等均忽略不计。

为了模拟封闭内压, 直接在弯头和直管内表面施加均匀分布的面力  $P_0$ , 并在弯头左端面施加等效轴力为

$$P_s = P_0 \times \frac{D_i^2}{D_0^2 - D_i^2}$$

式中:  $D_0$  为弯头外径,  $D_i$  为弯头内径。

对于边界条件, 由于对称性, 在结构对称面 ( $Z=0$  面) 上施加对称约束。另外, 弯头不能在水平方向上无限制地移动, 所以在弯头下端面施加  $x$  方向的点约束, 弯头不能上下移动, 因此, 将弯头下端面的节点沿  $y$  方向的位移全部约束。

### 1.3 材料特性

有限元分析中材料假定为理想弹塑性材料,

收稿日期: 2007-09-28

作者简介: 魏化中 (1955-), 男, 湖南永州人, 副教授, 研究方向: 管道安全技术。

不考虑材料的应变硬化效应,材料其余的力学性能为:弹性模量  $E = 2.1 \times 10^5$  MPa,泊松比  $\nu = 0.3$ ,  $\sigma_s = 320$  MPa.

#### 1.4 塑性极限载荷的确定

本文采用 JB4732-95<sup>[3]</sup> 提出的两倍弹性斜率法,根据载荷-应变图来确定弯头的塑性极限压力,如图 2 所示.这个准则目前被很多研究人员采用,经过实验验证,该准则具有较高的精确度<sup>[4,5]</sup>.载荷应变曲线中应变采用弯头中最大 Von-Mises 应变.

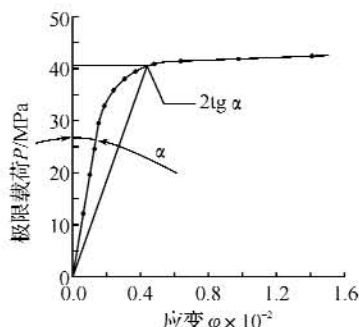


图 2 载荷-应变曲线

Fig. 2 The curve of load-strain

## 2 计算结果及分析

### 2.1 含缺陷弯头的失效模式分析

当缺陷深度较小时,屈服首先发生在缺陷底部,随着载荷的增加,内拱内壁开始屈服,然后塑性区沿内壁和减薄厚度方向扩展,表现为整体屈服失效;当缺陷深度较大时,随着载荷的增加,缺陷底部开始屈服,然后塑性区沿减薄厚度方向扩展,表现为局部屈服失效,如图 3 所示.

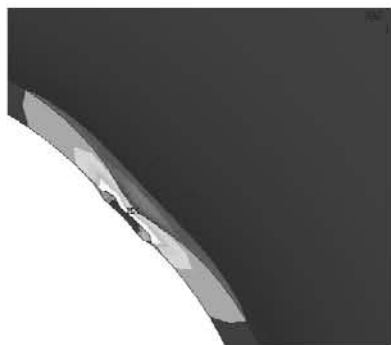


图 3 含缺陷弯头的变形

Fig. 3 Deform of elbows with pitting corrosion

### 2.2 含缺陷弯头的塑性极限载荷分析

根据腐蚀区应力状态的变化和两倍弹性斜率法失效准则,用有限元法预测的各种含缺陷弯头模型的塑性极限载荷计算结果如表 1 所示.图 4 和图 5 分别是弯头极限载荷随缺陷半径和深度的变化曲线.

表 1 含不同缺陷弯头塑性极限载荷

Table 1 Plastic limit load with different

geometrical parameter unitage of stress (MPa)

缺陷深度 $h/\text{mm}$	缺陷半径 $r/\text{mm}$				
	2	4	6	8	10
0	46.78	46.78	46.78	46.78	46.78
1	46.67	46.8	45.9	45.53	45.12
2	45.95	44.93	44.4	44.27	43.24
3	45.67	44.14	42.88	41.656	40.135
4	45.06	42.24	41.3	39.316	37.622
5	44.63	40.5	39.51	36.76	34.42
6	44.32	39.24	37.43	34.4	30.88

由表 1 可知:当缺陷深度为 0 mm 时,即无缺陷弯头在内压作用下的塑性极限载荷为 46.78 MPa.将无缺陷弯头参数代入郭茶秀公式<sup>[6]</sup>得  $P_0 = 46.96$  MPa,误差  $e_F = 0.4\%$ .有限元分析结果和公式计算结果很相近,证明有限元模型载荷和边界条件施加方式正确.

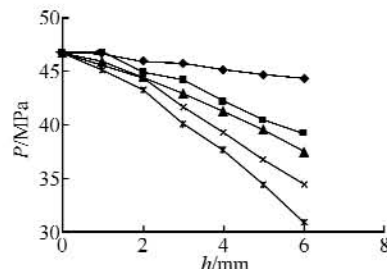


图 4 弯头极限载荷随缺陷深度的变化

Fig. 4 The change curve of limit load by the depth of defect

注:  $\bullet$   $r=2$   $\blacksquare$   $r=4$   $\blacktriangle$   $r=6$   $\star$   $r=8$   $\rightarrow$   $r=10$

图 4 表明,含缺陷弯头的塑性极限载荷随着缺陷深度的增大而减小.当缺陷深度较小时,弯头塑性极限载荷随缺陷半径的变化较小,如缺陷深度为 2 mm 时,缺陷半径从 2 mm 增大到 10 mm,其对应塑性极限载荷的变化值为 2.71 MPa,是无缺陷弯头塑性极限载荷的 5.8%,缺陷可忽略不计.当缺陷深度大于 2 mm,极限载荷随着深度的增加而减小,且减小趋势越来越明显.

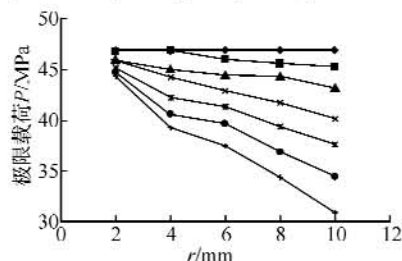


图 5 弯头极限载荷随缺陷半径的变化

Fig. 5 The change curve of limit load by the radius of defect

注:  $\bullet$   $h=0$   $\blacksquare$   $h=1$   $\blacktriangle$   $h=2$   $\star$   $h=3$   $\rightarrow$   $h=4$   $\blacklozenge$   $h=5$   $\leftarrow$   $h=6$

图 5 表明,含缺陷弯头的塑性极限载荷随着

缺陷半径的增大而减小。当缺陷半径较小时,弯头塑性极限载荷随缺陷深度变化较小,随着缺陷半径的增大,极限载荷随深度的变化越来越明显。当缺陷深度为6 mm,缺陷半径为2 mm时,其塑性极限载荷为44.32 MPa,随着缺陷半径增大到10 mm,其对应剩余壁厚的塑性极限载荷为30.88 MPa。

### 3 结 语

a. 当缺陷深度较小时,弯头的失效模式为整体失效;当缺陷深度较大时,含缺陷弯头的失效模式为局部失效。

b. 含点蚀缺陷弯头的塑性极限载荷随缺陷半径和深度的增大而减小,但当缺陷深度不大于

2 mm时,缺陷可忽略不计。

### 参考文献:

- [1] 林冠发,白真全,舒欣,等.模拟点蚀油气管线钢的拉伸性能.钢铁研究学报[J],2005,17(6):63-66.
- [2] 王岩.含局部减薄弯管塑性极限载荷工程计算方法研究[D].北京:北京化工大学,2003.
- [3] JB4732-95.钢制压力容器 分析设计标准[S].
- [4] 段志祥,沈士明.内压作用下局部减薄弯管塑性极限载荷分析与试验研究[J].压力容器,2005,22(05):1-3.
- [5] 段志祥,沈士明.外拱内壁局部减薄弯管极限内压有限元分析[J].核动力工程,2006,27(06):52-54.
- [6] 郭茶秀.复杂载荷下无缺陷弯管的塑性极限载荷[J].压力容器,2001,18(4):8-11.

## Analysis on the plastic limit load of gas pipe elbows with pitting corrosion

WEI Hua-zhong, CHEN Wen-xia, SHU An-qing

(1. Wuhan Research Center of Pressure Vessel and Pipeline Safety Engineering, Wuhan 430074, China; 2. School of Mechanical Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The pitting corrosion which is easy to form a hole on the gas pipe and bring to a lot of economic loss, is one of destructive local defect. In the paper, a computational method, FEM is adopted to calculate the collapse load of pressurized elbow with pitting corrosion, by taking the immense deformation effects and stress stiffening into consideration. The effect regulations of geometrical parameter on the plastic limit load were obtained and some referential conclusion to the secure assess of elbows with defect.

**Key words:** elbow; pitting corrosion; plastic limit load

本文编辑:陈晓苹