

凹陷管道的工程评定方法

帅健 杨琼 朱洪武

中国石油大学（北京）机电工程学院，北京 102249

摘要：提出了用三次样条插值计算凹陷轴向和环向轮廓曲线的方法，用此方法可以根据凹陷检测数据计算应变，采用基于应变的准则评价管道凹陷。研究表明，计算结果与有限元数值结果在应变小于9%时吻合较好，可以满足工程评定要求，并根据计算结果，建议在根据管道变形检测数据计算应变时，凹陷的计算长度取1/2凹陷深度对应的长度。对不同深度的管道凹陷的评价结果表明，只考虑深度的评价是不合适的，建议结合基于应变和基于深度的两种标准评价是否需要修理或移除管道凹陷。

关键词：管道凹陷；轮廓线；三次样条；插值；凹陷长度；应变

凹陷是由于管道与其他物体的物理接触、不恰当的安装或地层位移等所导致的变形，是管道上一类常见缺陷。国外对某管道进行内检测，7022 km管道发现了9851个凹陷^[1]，国内也在某管线的内检测中发现了上百处凹陷。由于由凹陷引发的管道事故越来越多，对凹陷管道的强度及评价方法的研究日益受到重视，国外已在凹陷管道的失效机理和评价方法方面做了大量研究^[2]。

工程中管道凹陷通过变形检测器检出，是否可以接受以最大深度作为简单判据，深度大于6%名义管径的凹陷需要修理或移除。但随着油气管线的钢级不断增高，钢的韧性越来越好，再用基于深度的方法是不准确的。ASME B31.8（2007）提出了基于应变的评估方法^[3]，该方法认为当凹陷区的最大应变达到6%时，需修理或移除凹陷管道，6%是取自3%和12%之间的值（3%是ASME B31.4和ASME B31.8中允许的弯曲应变极限，12%是管材应变极限，在这个应变极限时变形处的开裂可能性增加）。

由于应变计算要求精确描述凹陷轮廓，需要使用插值或拟合的数学方法，根据离散的检测数据，给出凹陷曲面的函数描述。国外学者Rosenfeld M.J.等^[4]用分段三次Bessel插值方法，再用密切圆方法估计曲率半径，Dauro S.J.等^[5]利用四阶B-样条曲线分段插值方法，这两种方法插值过程较复杂，计算比较费时。另外，Dawson S.J.等^[1]提出了使用多项式方程，用最小二乘法拟合凹陷轮廓，这种方法也要求在凹陷附近有较多的测量数据，进行拟合。本文提出用三次样条插值方法，拟合凹陷轮廓，并进行应变计算，便于工程应用。

1 应变计算

最大应变分量发生在凹陷最深处，ASME B31.8推荐方法中给出凹陷最深处的环向弯曲应变 ε_{xb} 、轴向弯曲应变 ε_{yb} 、轴向薄膜应变 ε_{ym} ，计算公式如下：

$$\varepsilon_{xb} = \varepsilon_1 = \frac{t}{2} \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_1} \right) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{yb} = \varepsilon_2 = \frac{-t}{2R_2} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ym} = \varepsilon_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{d}{L} \right)^2 \quad (3)$$

式中： t 为管壁厚，m； R_0 为管道内径，m； R_1 为管道横截面曲率半径，m； R_2 为管道轴向面曲率半径，m； L 为凹陷长度，m； d 为凹陷深度，m。

式（1）、式（2）中的 R_1 、 R_2 由曲率方程

$$k = \frac{1}{R} = \frac{\frac{d^2 y}{d^2 x}}{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

直接得出。

管道环向和轴向凹陷曲线如图1、2所示。管道环向凹陷曲线有两种情况，如果凹陷只是导致管道扁平，则 R_1 的值是正的，如果凹陷导致管道管壁曲线翻转即再凹进去，则 R_1 的值是负的。

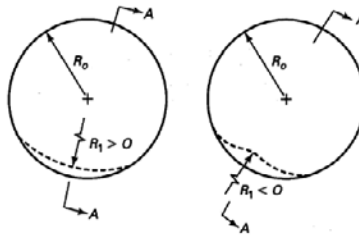


图1 无凹角与有凹角管道截面

Fig 1 Circumferential non-reentrant versus reentrant dents

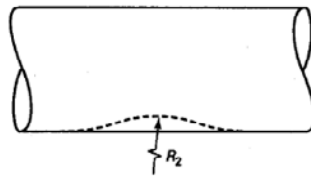


图2 轴向凹陷曲线

Fig 2 Longitudinal dent profile

管道内外表面的合成应变可以表示为：

$$\varepsilon_i = \left[\varepsilon_1^2 - \varepsilon_1 (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) + (\varepsilon_2 + \varepsilon_3)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\varepsilon_o = \left[\varepsilon_1^2 + \varepsilon_1 (\varepsilon_3 - \varepsilon_2) + (\varepsilon_3 - \varepsilon_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

其中 ε_i 、 ε_o 分别为管道内、外表面的应变。评价凹陷时，取内外表面应变值中的较大者

$$\varepsilon_{\max} = \text{Max} \{ \varepsilon_i, \varepsilon_o \} \quad (7)$$

即使用式(7)中的 ε_{\max} 进行评价。

2 三次样条插值

对凹陷轮廓插值需要的一系列检测数据,内检测工具中的变形检测器可以检测管道上的凹陷,这种检测器装有传感器在管道中通过获得一系列检测数据。变形检测器得到的是一个矩形表格数据文件,横向表示沿管道环向位置,竖向表示管道里程定位,检测数据为偏离原来位置的值。传感器通道数不同,得到检测数据量也不同,通常有16、32、64通道的传感器,通道数越多,得到的数据越多,检测的结果越精确。通过这些数据对凹陷轮廓插值,得到二阶导数连续的分段函数。

将管道上的凹陷区间 $[a,b]$ 分为 n 个小区间,节点由小到大排列为

$$a = x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1} < x_n = b$$

在每个节点处 $S(x_i)=y_i$, $S(x)$ 在整体上二阶连续, $S_i(x)$ 在每个小区间上都是三次多项式,在 $[x_i, x_{i+1}]$ 上,三次样条函数表示为^[6]

$$S_i(x) = a_i(x-x_i)^3 + b_i(x-x_i)^2 + c_i(x-x_i) + d_i \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (8)$$

其中 a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 是四个待定系数,通过边界条件得出。

第一类边界条件:

$$S'(x_0) = f'(x_0), \quad S'(x_n) = f'(x_n)$$

第三类边界条件为:

$$S(x_0) = S(x_n), \quad S'(x_0+0) = S'(x_n-0), \quad S''(x_0+0) = S''(x_n-0)$$

分别对凹陷的轴向和环向轮廓进行插值,由于凹陷只改变管壁局部曲率,在边界处可认为管壁曲率没有改变,即两端点处一阶导数为零,因此采用第一类边界条件进行插值。对环向插值时,由于得到的检测数据是角度和偏离量,对环向凹陷轮廓插值时并不是直接对凹陷轮廓进行插值,而是将封闭曲线展开,两端点为原封闭曲线的重合点,因此这两端点处的函数值,一阶导数和二阶导数都相等,符合第三类边界条件,即周期边界条件。

得到环向和轴向凹陷轮廓样条函数后,由式(4)计算曲率。由于对环向插值时直接对检测数据进行插值,即将封闭曲线从 -180° 到 180° 展开,将两个端点定义成周期边界,因此得出的插值函数是角度和偏离量的关系式,由式(4)计算曲率时需要结合下式

$$dx = \pi r \times d\theta / 180 \quad (11)$$

求出的曲率再叠加上变形前的管道的曲率即为封闭曲线的曲率,再根据ASME B31.8(2007)计算出应变。

3 凹陷的计算长度

由式(3),凹陷处的轴向薄膜应变和凹陷长度密切相关。关于凹陷长度,Adam James Rinehart^[7]定义凹陷的长度为管道轴向上曲率没有显著改变的最近两点的直线距离。Dauro B. Noronha Jr^[8]定义凹陷的长度为凹陷两边形状没有改变的两个最近的横截面的距离。这种定义方法给出了凹陷长度的确定方法,但实际检测中在凹陷很远处都存在微小变形,按照这个方法得出的长度有时是凹陷深度的几十倍,用于ASME B31.8(2007)应变公式中会导致薄膜应变的值非常小,使得计算不准确,失去计算的意义。]建议取凹陷深度的一半为对应的长度为凹陷长度^[8]。

为比较凹陷计算长度对计算薄膜应变的影响,分别取长度分别为凹陷深度为 d 时对应的长度 L , $d/2$ 时对应的长度 L_1 , $3d/8$ 时对应的长度 L_2 , $d/4$ 时对应的长度 L_3 ,如图3所示。计算结果列于表1,同时表1还列出了所研究管道的详细数据。从表1可以看出,取不同的计算长度,所得到的薄膜应变是不同的。

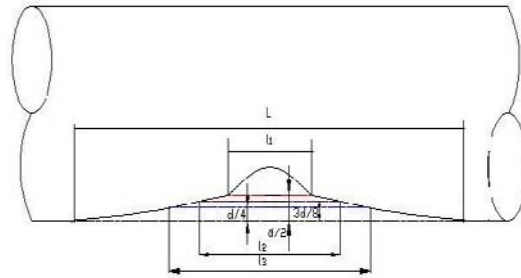


图3 凹陷长度图 Fig 3 Dent length

表1 管道轴向薄膜应变计算数据

Table 1 Calculated data of pipelines longitudinal membrane strain

钢级	屈服强度/MPa	外径/mm	壁厚/mm	d/D	$\varepsilon_{ym(d)}$	$\varepsilon_{ym(d/4)}$	$\varepsilon_{ym(3d/8)}$	$\varepsilon_{ym(d/2)}$	$\varepsilon_{ym(FEA)}$
16Mn	350	720	8	4.5%	0.000258	0.010957	0.017398	0.023772	0.021203
				6%	0.000334	0.016487	0.026088	0.035886	0.038339
				9%	0.000523	0.028657	0.047269	0.068067	0.08823
X60	440	660	9	3%	0.000087	0.004589	0.005929	0.007293	0.000121
				6%	0.00023	0.013387	0.018816	0.01921	0.008015
				8%	0.000512	0.014439	0.035544	0.048311	0.019152
				5%	0.000207	0.006423	0.018661	0.025351	0.007093
				8%	0.000359	0.004584	0.041111	0.053451	0.111388
				435	660	8	5%	0.000207	0.006423
X70	555	1016	14.6	4%	0.000402	0.013719	0.01796	0.022757	0.030299
				6%	0.000574	0.016711	0.023395	0.031442	0.040376
X80	635	1219	22	4%	0.000321	0.008696	0.014101	0.0206	0.022282
				7%	0.000681	0.017654	0.029222	0.04298	0.052499
				4%	0.000353	0.009885	0.015001	0.022373	0.024305
				6%	0.000594	0.030802	0.041326	0.05625	0.091963

4 与有限元结果的对比

对不同凹陷长度的情况进行有限元模拟,将ASME B31.8(2007)提出的轴向薄膜应变公式计算结果和有限元结果进行比较,以便选取合适的计算长度。由于凹陷简化模型是规则的,只取管道的1/4进行有限元建模,分析采用Ansys有限元软件中的八节点壳单元(shell93)。为了模拟管道凹陷的成型过程,采用静态分析,将分析过程分为四个步骤:施加内压、施加外部载荷、卸载外部载荷、卸内压。在加载区域,等分划分网格。其余网格,在环向和轴向设置最小网格和最大网格比,然后根据程序自动生成。管道采用弹塑性材料模型,根据拉伸试验得出应力-应变曲线。计算的应变值列于表1,比较结果如图4所示。

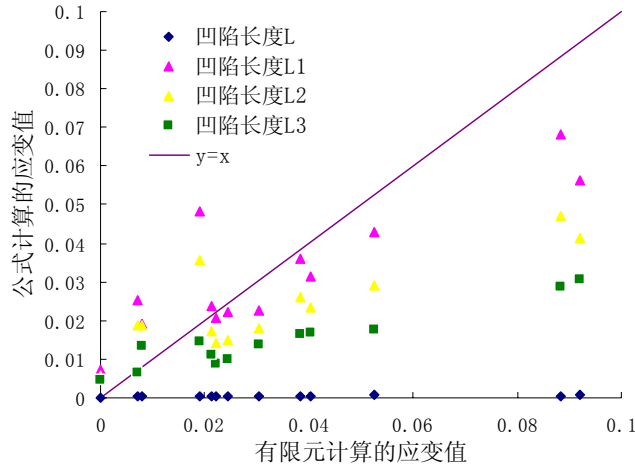


图4 轴向薄膜应变的比较

Fig 4 Comparison of longitudinal membrane strain

从图中可以看出凹陷长度 L_1 算的结果与有限元结果较为吻合,即取凹陷深度为 $d/2$ 时对应的长度为凹陷计算长度。

有限元分析方法还可以验证三次样条插值法的适用性,本文验证时,从有限元分析结果中读取凹陷环向曲线和轴向曲线上的点用于三次样条插值原始数据,比较有限元分析和插值方法计算的应变值。算例的管道参数如表1,分别计算了不同钢级不同径厚比的凹陷管道,并且施加不同的外载,得到不同深度的凹陷。图5为应变计算结果的对比,结果表明凹陷应变越大,插值方法误差也越大。应变在9%以内的凹陷管道,插值方法和有限元方法吻合较好。

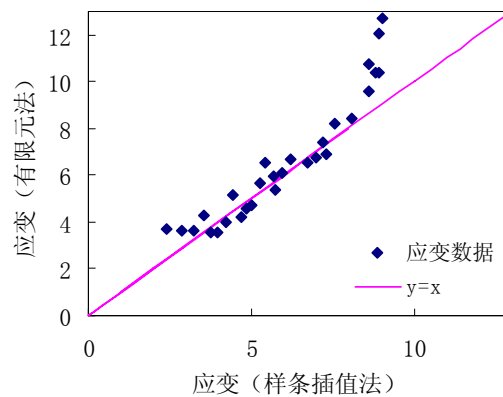


图5 有限元结果和插值结果的对比

Fig 5 Comparison between simulated and interpolated results

5 应用

以下为凹陷管道评定的实例,数据取自某管道的变形检测数据,该管道外径720mm、壁厚8mm。根据检测数据用上述方法插值分别得到轴向和环向凹陷轮廓如图6中(a)、(b)、(c),分别是凹陷深度与直径之比为5%、8%、6%的凹陷轴向和环向插值曲线图,应变计算结果分别是7.23%、4.7%、5.66%。图中轴向曲线的横

坐标为管道的轴向长度，纵坐标为凹陷纵截面管道距管道轴向的距离。环向曲线图的坐标是以管道横截面中心为原点，建立的直角坐标系。更多对比结果如表2，其中的凹陷2、凹陷6、凹陷9分别对应图6中的 (a)、(b)、(c)。表2中凹陷深度管径比通过内检测数据得到，应变是通过三次样条插值法求得。

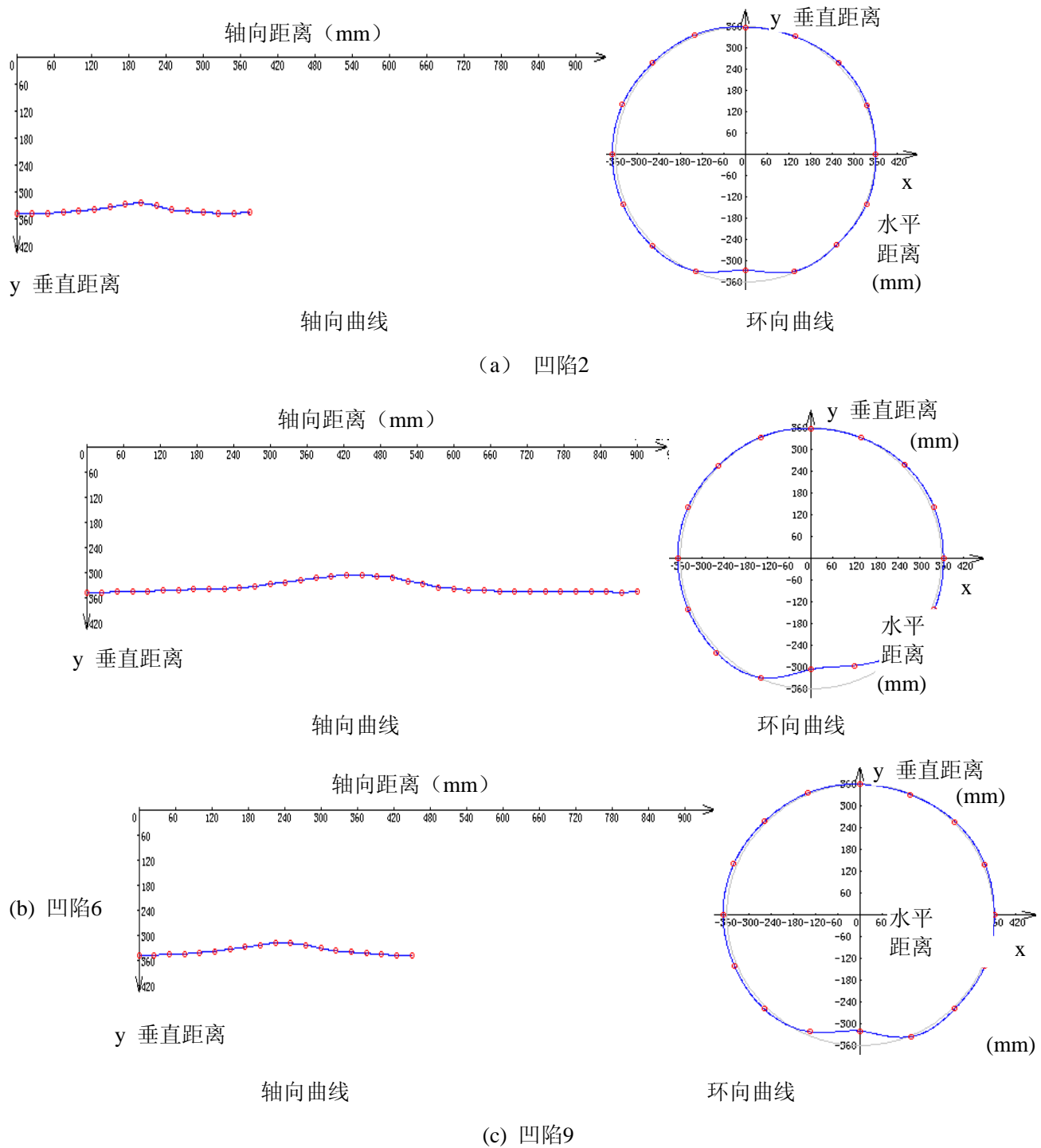


图6 凹陷轴向和环向轮廓曲线

Fig6 Longitudinal and circumferential dent profile

表2 两种评定方法的比较
Table 2 Comparison of two methods

凹陷编号	凹陷深度管径比/%	应变
1	5%	7.47%
2	5%	7.23%
3	5%	5.4%
4	5%	3.6%
5	8%	5%
6	8%	4.7%
7	7%	7.8%
8	7%	5.2%
9	6%	5.66%

根据不同的评价方法，即基于深度的评价方法规定凹陷深度不大于6%，基于应变的评价方法规定凹陷区应变不大于6%，从图7和表2中可以看出，只考虑深度的评价是不合适的。对于凹陷最深处及其附近曲率变化较小的凹陷，即使深度超出6%，但应变并不一定大；相反，对于凹陷最深处及其附近曲率变化较大的凹陷，即使深度不超出6%，但应变却可能很大。因此在评价时，建议结合两种评价标准考虑是否需要修理或移除。

6 结论

(1) 用三次样条曲线分段插值方法计算管道凹陷的环向和轴向轮廓曲线，对环向凹陷轮廓插值时采用第三类边界条件，对轴向凹陷轮廓插值时采用第一类边界条件。用此方法可以根据管道的变形检测数据得到凹陷轮廓曲线函数，再根据ASME B31.8 (2007) 提供的方法计算应变。

(2) 计算表明，通过三次样条插值计算得到的应变结果和有限元结果在应变小于9%时吻合较好，由于凹陷区容许应变为6%，因而上述方法不失为一种简便、有效的管道凹陷工程评定方法。

(3) 由于ASME B31.8 (2007) 没有给出凹陷长度的具体确定方法，本文用有限元数值模拟凹陷过程，根据取不同长度的凹陷的计算结果比较，建议在计算应变时，凹陷长度取凹陷深度1/2时对应的长度，便于在评价凹陷时，处理检测数据。

(4) 对不同深度的管道凹陷的评价结果表明，只考虑深度的评价是不合适的。对于凹陷最深处附近曲率较小的凹陷，即使深度超出6%，但应变并不一定大；相反，对于凹陷最深处曲率大的凹陷，即使深度不超出6%，但应变却可能很大。因此在评价时，建议结合基于应变和基于深度的两种评价标准考虑是否需要修理或移除管道凹陷。

参 考 文 献

- [1] Dawson S J, Russell A, Patterson A. Emerging techniques for enhanced assessment and analysis of dents[J], Journal of Pipeline Engineering, 2008, 7(3): 189-204
- [2] 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.
Yang Qiong, Shuai Jian, Zuo Shangzhi. The Research Actuality of Pipelines with Dents[J], Oil & Gas Storage and Transportation, 2009, 28(6): 10-15
- [3] ASME B31.8 -2007, Gas. Transmission and Distribution Piping Systems [S].
- [4] Rosenfeld M J, Porter P C, Cox J A. Strain Estimation Using Vetco Deformation Tool Data: ASME International

Pipeline Conference, Calgary, Canada, June 7-June 11, 1998[C]. New York, NY, United States: American Society of Mechanical Engineers: 1999

[5] 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: Rio Pipeline Conference & Exposition, Rio de Janeiro, 2005[C]. Rio de Janeiro: Rio Pipeline Conference & Exposition, 2005.

[6] 文世鹏, 张明. 应用数值分析[M].3 版. 北京: 石油工业出版社, 2005: 175-180.

Wen Shipeng, Zhang Ming. Applied numerical analysis[M]. Third Edition. Beijing: Petroleum industry Press, 2005: 175-180.

[7] Rinehart A J. Effects of localized geometric imperfections on the stress behavior of pressurized cylindrical shells[D]. Texas: Texas A&M university, 2003.

[8] Noronha D B, Martins R R, Jacob B P, et al. Some remarks on the strain based assessment of pipeline dents: 2008 ASME International Pipeline Conference, Calgary, Canada, September 29-October 3, 2008[C]. New York, NY, United States: American Society of Mechanical Engineers: 2009.