

压力容器和管道随机局部减薄的有限元分析

邢静忠¹, 柳春图²

(1 兰州理工大学理学院, 兰州 730050 2 中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘要: 按照压力容器和管道随机局部减薄后的厚度分布的随机性和各个部位的弹性模量的随机性, 将有限元模型中的单元厚度和材料弹性模量处理成指定的随机分布, 来模拟实际结构中的厚度和弹性模量的随机性。利用通用有限元软件对建立的受内压作用局部随机减薄的压力容器和管道的有限元模型的求解, 获得了该随机模型的 Mises 应力分布特征。通过对弹性模量, 减薄程度等随机量关于应力分布的敏感性分析, 为该类结构的可靠性评估提供了力学依据。本文方法适用于许多结构随机性的模拟, 也对确定性评定方法的一个补充和完善。

关键词: 压力容器; 管道; 随机; 局部减薄; 有限元

压力容器和管道在服役过程中, 由于介质腐蚀或者冲刷造成局部减薄是一种非常常见的损伤方式^[1], 同时, 机械损伤或者裂纹打磨修补也会造成局部的厚度减薄。出现减薄的部位往往成为萌生裂纹, 局部鼓胀的重点部位。当减薄的面积较小, 减薄量不大时, 一般不会影响强度。否则就需要对减薄后的压力容器和管道重新评定剩余强度。几十年前, 减薄研究就成为人们关注的问题。70年代初, 美国 Texas 运输公司和美国气体学会管线研究会就开始了这方面的研究^[2]。随后, 美国、加拿大、澳大利亚、德国、英国等都制定了管线局部减薄的确定性评定规范。同时, 国内在这些方面也开展了攻关研究, 国家“九五”重点科技攻关研究了减薄影响时应力集中情况^[3]。减薄后的压力容器和管道会发生两种形式的失效, 整体失效和局部失效。无论研究哪种形式的失效, 出现局部减薄后的应力分析是解决问题的第一步。为此, 不少学者利用解析方法, 实验方法和数值计算方法, 得到了含有凹坑的简化平板模型的解析解^[4], 光弹实验解^[5], 整体模型的数值解^[6-7], 为局部减薄后的壳体安全性分析提供了应力分布依据。

由于减薄部位和减薄程度具有一定的随机性, 开展压力容器和管道随机局部减薄的力学分析对于评估其受力状态和失效具有重要意义。赵建平^[8]利用随机有限元方法研究了含缺陷压力容器的缺陷评定。本文利用单元的厚度和弹性模量的随机分布, 建立含有局部随机减薄影响的压力容器和管道的有限元分析模型, 用通用有限元软件求解, 得到随机因素分布对应力分布的影响和对应力大小影响的敏感度。这对于定量地分析确定性模型计算结果与实际模型结果之间的差异具有很重要的意义。

1 随机变量和随机模型

假设受内压作用的等厚度的压力容器和管道出现随机局部减薄, 可随机抽取多个部位进行厚度测量, 然后拟合出厚度 t 服从的分布, 弹性模量 E 一般服从 $N(E_0, \sigma_E)$ 分布。对于随机减薄的压力容器和管道在随机内压作用下的有限元模型, 这里选择厚度分布, 弹性模量分布作为随机变量, 建立厚度和弹性模量按分布规律变化的, 由内压作用的随机有限元模型, 计算压力容器和管道内部 Mises 应力的分布, 以及峰值和出现概率。

1.1 随机变量的确定

当局部减薄随机地出现在压力容器和管道内部或者外部时, 其壁厚分布是以原始壁厚为最大值的截断型分布, 因大部分区域的壁厚接近原始壁厚。因此可以认为局部减薄后的壁厚 t 的分布是截断的高斯分布, 截断位置取在高斯分布的峰值位置, 即密度函数取为

基金项目: 国家科技部社会公益专项资金资助项目: 在用重要压力容器与管道安全诊断与爆炸监控
作者简介: 邢静忠 (1966.2), 男, 甘肃平凉人, 副教授, 博士生, 从事工程结构力学分析和可靠性研究
柳春图 (1935.2), 男, 北京人, 研究员, 博士生导师, 从事工程结构断裂和疲劳分析

$$f(x) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), (0 < x < \mu)$$

弹性模量 E 在实际材料中的分散性较小, 通常可以取为变异系数为 0.05 的高斯分布。

1.2 建立随机模型步骤

- 1) 生成各自服从的随机分布值, 确定厚度 t , 弹性模量 E 的随机样本值。
- 2) 在 t 和 E 的随机样本值中找出最小值和最大值, 将其所处的范围等分为 N 个区间。
- 3) 定义材料常数和单元实常数
- 4) 对每个数据求出对应于相应定义的材料编号 i_E 和实常数编号 i_t 。
- 5) 对所有定义的单元, 循环使用上面方法, 将它们的厚度和弹性模量置为指定的随机分布的参数值。

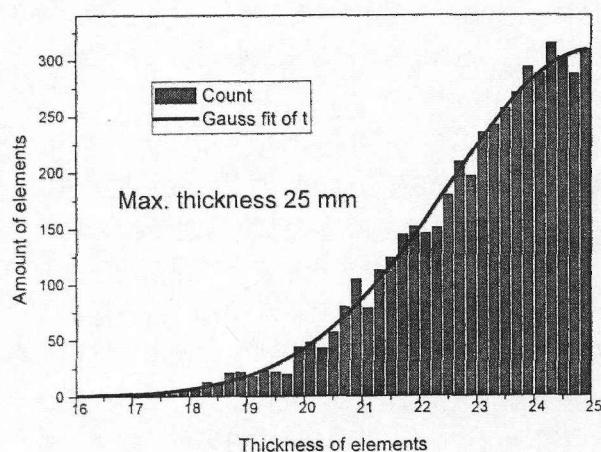


图 1 利用随机数生成半个高斯分布的单元厚度

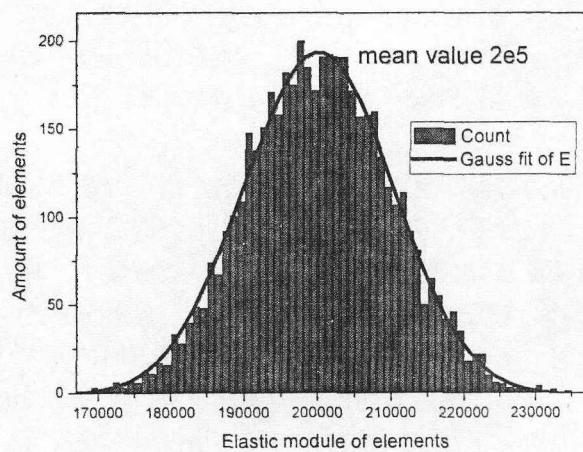


图 2 利用随机数生成正态分布的弹性模量

2 算例分析及结论

2.1 统计参数及算例基本数据

为了对比分析出现局部减薄的压力容器和管道内部的应力分布变化, 随机减薄后的壁厚分布参数取几组不同的值进行对比计算, 设壁厚分布服从变异系数分别取 0.025, 0.05, 0.1, 0.15 的正态分布。为了对照弹

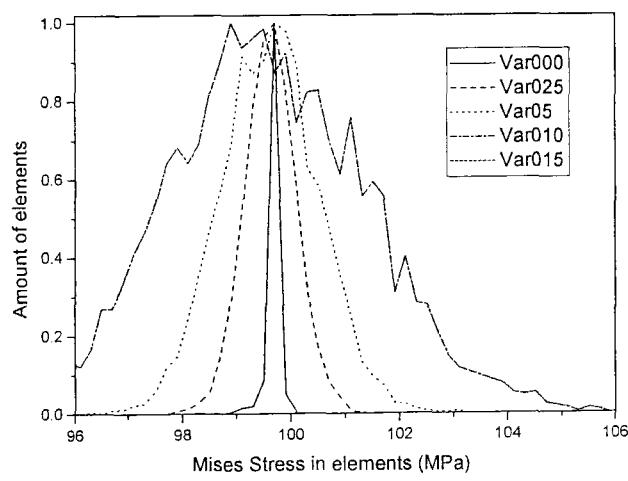


图 3 不同变异系数的弹性模量对 Mises 应力分布的影响

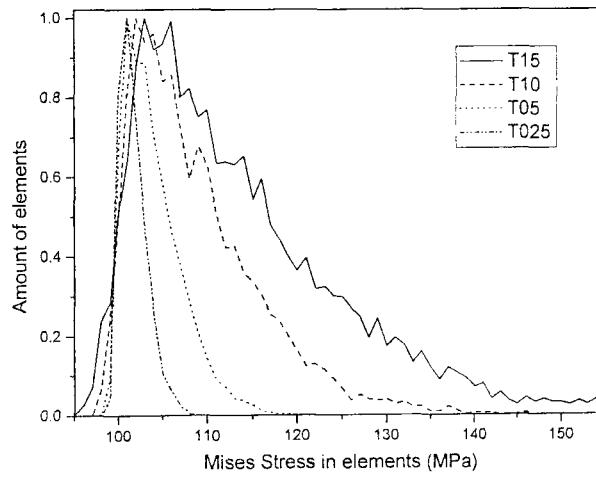


图 4 不同变异系数的厚度对 Mises 应力分布的影响

性模量随机波动对应力的影响, 设各个部位的弹性模量服从变异系数分别为 0.025, 0.05, 0.1, 0.15 的正态分布。利用随机数生成程序产生了服从各自分布的随机数如图 1 和图 2。为了比较减薄区域大小对应力分布

的影响，本文对比了不同的减薄区域的大小对应力分布的影响。

设壁厚 $t = 25\text{mm}$ ，直径 $D = 10\text{m}$ 的球罐，计算它在内压 $p = 0.1 \text{ MPa}$ 作用下，没有减薄影响和几种不同程度的减薄影响下应力分布的变化规律。计算中选取几种不同的弹性模量分布，对比弹性模量分布参数对应力的影响。为了减小计算量，计算模型选取了 $1/8$ 模型部分。

2.2 弹性模量和厚度随机性对应力分布的影响

图 3 给出了几种不同的变异系数的弹性模量时，球罐中的最大应力的概率分布。弹性模量的变异系数分别取 0, 2.5%, 5%, 10% 和 15% 几种情况，随着变异系数的增大，应力的分散性也在增大，但是分散性并不是非常明显，而且基本上是对称分布。图 4 给出的是不同变异系数的厚度时，球罐中的最大应力的概率分布。厚度的变异系数分别取 2.5%, 5%, 10% 和 15% 几种情况，随着变异系数的增大，应力的分散性也在增大，分散性非常明显。而且在较大的厚度变异系数情况下，概率分布明显不对称。最高应力已经达到 $150 - 160 \text{ MPa}$ 。而图 3 中的最大应力不到 110 MPa 。

图 5 给出了从应力的概率统计图中提取出的弹性模量方差和厚度方差与最大应力方差之间的关系。从这个图中可以很容易地看出，最大应力分布与基本随机变量之间的依赖关系。弹性模量随机性对应力分布

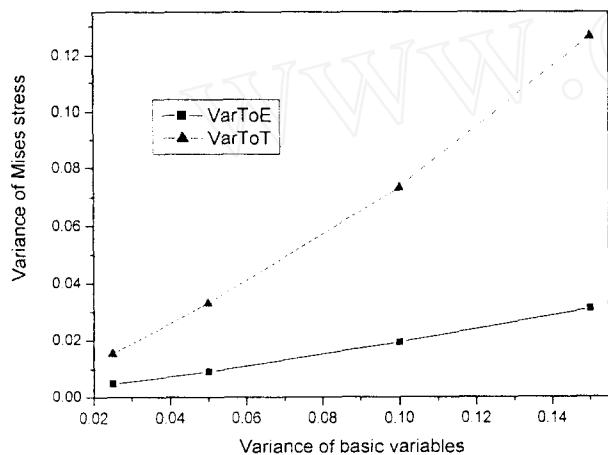


图 5 弹性模量和厚度的方差系数与应力分布方差系数的关系

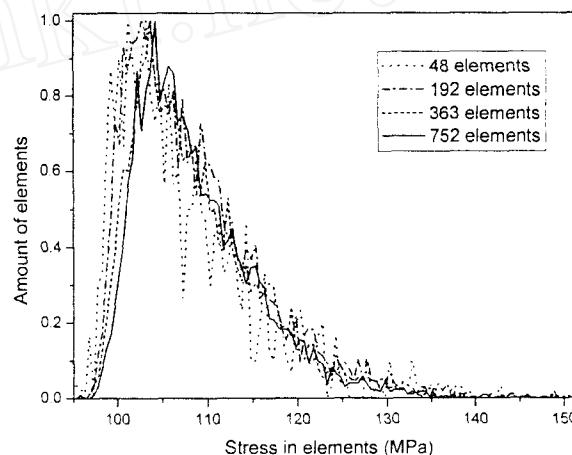


图 6 不同单元划分数目对应力分布的影响

的影响较小，而厚度随机性对应力分布的影响较大，方差关系不是线性关系。随着厚度分散性的增大，应力分散性增长更快。

2.3 单元大小对应力分布的影响

不同大小的单元可以表示不同大小的随机减薄状况，这里对比计算了几种不同大小的单元。图 6 是同一个球罐，采用不同大小的单元，最大应力的概率分布。可以看出，随着单元尺寸的增大，高应力分布的概率密度变小，均值附近的应力的概率密度上移。说明较小的减薄区域可以导致高应力的概率密度下降，较大面积的减薄，出现高应力区的概率在增大。

2.4 结论

- 1、本文方法可以模拟出现任意类型的随机局部减薄的压力容器和管道的有限元模型。
- 2、有限元计算结果统计分析表明：随机局部减薄的应力分布对减薄程度相关性较好，对弹性模量的变异性不敏感。

参考文献：

- [1] J. S. Mandke. Corrosion Causes Most Pipeline Failures in Gulf of Mexico[C]. Oil & Gas J. 1988(4):40~44.
- [2] J. F. Kiefner, and A. R. Duffy. Summary of Research to Determine the Strength of Corroded Areas in Line pipes[C]. NG-18 Paper No. 39. Battelle Columbus Laboratories, 1971.

- [3] 韩良浩. 局部减薄管道的极限载荷分析[M]. 华东理工大学博士论文, 1998.
- [4] R. A. Eubanks. Stress Concentration due to a Hemi-spherical Pit at a Free Surface[C]. Journal of Applied Mechanics Vol. 12, No. 1, 1954, 57~62.
- [5] M. Nisida and P. Kim. Stress Concentration Causes by the Present of a Spherical Cavity of a Spherical-surfaced Hollow[C]. Proc. 12th Material Congferences On Applied Mechanics. 1962, 69~74.
- [6] 周道祥, 徐佩珠. 压力容器凹坑应力的数值分析及工程算法[C]. 压力容器. Vol. 8, No. 5, 1991, 34~38.
- [7] 陈刚. 含凹坑缺陷压力容器极限与安定性数值分析[M]. 清华大学博士论文. 1994.
- [8] 赵建平. 随机有限元方法及其在压力容器缺陷评定中的应用[M]. 南京化工大学博士论文. 1997.
- [9] 王梓坤著. 概率论基础及其应用. 北京: 科学出版社[M]. 1976, 42~108.