

# 带有异形切向接管的压力容器的稳定性分析

文华斌<sup>1,2</sup>, 付磊<sup>1,2</sup>, 杨海粟<sup>1</sup>, 刘琰<sup>1</sup>

(1. 四川理工学院机械工程学院, 四川 自贡 643000; 2. 过程装备与控制工程四川省高校重点实验室, 四川 自贡 643000)

**摘要:**为满足某工艺要求,对切向斜接管结构进行了修改设计——沿斜接管轴向一定角度切割斜管,并用直面板补足缺口。此设计使得斜接管与筒体连接复杂,连接区域几何非连续性非常严重。确定压力容器的临界载荷及其相应的失稳模态,是压力容器分析设计的重要组成部分。采用非线性屈服分析方法,对这一带有异形切向接管的圆柱形压力容器在外压状态下的稳定性进行了分析。计算结果可为容器的安全使用提供保障,也可为同类设计提供借鉴。

**关键词:**压力容器;切向接管;非线性屈服;稳定性

**中图分类号:**X933.4

**文献标志码:**A

## 引言

压力容器在核工业、石油化工、化学、制药、化学等工业应用十分广泛。为满足一定操作工艺的要求,容器壳体上不可避免要开孔及连接接管。开孔-接管结构势必造成结构几何非连续性,引起复杂的变形。在众多接管形式中,切向开孔接管形式对容器壳体产生的影响最大,即使较小的切向开孔接管也会造成大开孔结构<sup>[1-3]</sup>。稳定性分析是压力容器设计的重要组成部分。通过稳定性分析确定容器的临界载荷及相应的失稳模态,可为容器的安全使用提供保障,也可为进一步提高容器稳定性提出正确的改进意见。

本文旨在对一异形的切向接管结构设计进行分析,该切向接管结构如图 1 所示。该接管特别之处在于:沿轴向一定角度切割斜管,并用直面板补足缺口。此设计使得斜接管与筒体连接复杂,连接区域几何非连续性非常严重。该切向接管结构为异形结构,稳定性计算没有相关经验公式可参照,故本文采用有限元法对此设计的稳定性进行分析,以确定其临界载荷及相应的失稳模态,为该容器确定安全使用的荷载范围,也为该容器进

一步提高稳定性设计提供参考依据。

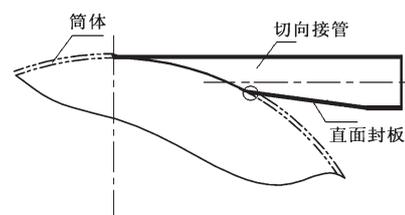


图 1 改进的切向接管结构示意图

## 1 压力容器稳定性分析

有限元分析软件 ANSYS 提供了两种稳定性分析技术,即特征值屈服分析和非线性屈服分析。非线性屈服分析比特征值屈服分析更加精确,建议在分析实际工程结构时使用<sup>[4,6]</sup>,该方法用一种逐渐增加载荷的非线性静力分析技术来求得使结构开始变得不稳定时的临界载荷。采用非线性技术,计算模型中就可以考虑结构缺陷、材料塑性、间隙、大变形及其他非线性特征。本文采用 ANSYS 提供的非线性屈服分析技术研究切向接管结构对容器稳定性的影响,主要考虑结构的几何非线性和材料非线性。

收稿日期:2013-04-17

基金项目:过程装备与控制工程四川省高校重点实验室项目(GKYJ201101)

作者简介:文华斌(1978-),男,四川简阳人,讲师,硕士,主要从事工程力学方面的研究,(E-mail)sichuanwhb@sina.com

### 1.1 非线性问题的有限元理论基础

对于各种非线性问题,虚功原理都是成立的。根据虚功原理有<sup>[7]</sup>:

$$d\{\delta\}^T \{\psi\} = \int d\{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dv - d\{\delta\} \{F_1\} = 0 \quad (1)$$

式中,  $\{\psi\}$  为内力和外力矢量的总和,  $\{F_1\}$  为所有载荷列阵,  $d\{\delta\}$  为虚位移,  $d\{\varepsilon\}$  为虚应变。位移和应变之间关于应变增量形式的关系为:

$$d\{\varepsilon\} = [B]d\{\delta\} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),并消去  $d\{\delta\}^T$ , 得到非线性问题的一般平衡方程:

$$\{\psi(\{\delta\})\} = \int [B] \{\sigma\} dv - \{F_1\} = 0 \quad (3)$$

在式(3)中,考虑几何非线性时,应变和位移的关系是非线性的,矩阵  $[B]$  是  $\{\delta\}$  的函数,可将矩阵  $[B]$  写成:

$$[B] = [B_0] + [B_L(\{\delta\})] \quad (4)$$

式(4)中,  $[B_0]$  为线性应变分析的矩阵项;  $[B_L]$  取决于  $\{\delta\}$ , 由非线性变形引起。

当考虑材料非线性时,应力  $\{\sigma\}$  与应变  $\{\varepsilon\}$  为非线性关系,则应力  $\{\sigma\}$  与位移  $\{\delta\}$  也是非线性关系。采用割线刚度法,则材料的应力应变关系可表示为:

$$\{\sigma\} = [D(\{\varepsilon\})] \{\varepsilon\} \quad (5)$$

应力与位移的关系为:

$$\{\sigma\} = [D(\{\delta\})][B] \{\delta\} \quad (6)$$

对于式(3)的求解,可采用迭代方法,如 Newton - Raphson 方法、弧长法等。

### 1.2 材料非线性屈服准则

屈服准则规定材料开始塑性变形的应力状态,ANSYS 提供了 Von. mises、Hill 等屈服准则。本文采用 Von. mises 屈服准则。

Von. mises 屈服准则也称为八面体剪应力或变形能准则,该准则中考虑了三个主应力对屈服应力状态的影响,屈服条件可写为

$$\sigma_e - \sigma_y = 0 \quad (7)$$

式(7)中,  $\sigma_e$  为等效应力;  $\sigma_y$  为屈服应力。  $\sigma_e$  的计算公式为:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (8)$$

或

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]} \quad (9)$$

式(8)中,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  为主应力;式(9)中的  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、

$\sigma_z$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yz}$  和  $\tau_{xz}$  为应力分量。

## 2 有限元模型

### 2.1 几何模型

带有切向接管的直筒段结构如图 2 所示,直筒段长 3.45 m,筒体直径为 3 m,壁厚为 19 mm;斜接管距离上端 1.35 m,斜接管长为 1.644 m,直径为 0.33 m,壁厚 10 mm,直面板厚 10 mm。斜接管结构如图 3 所示。

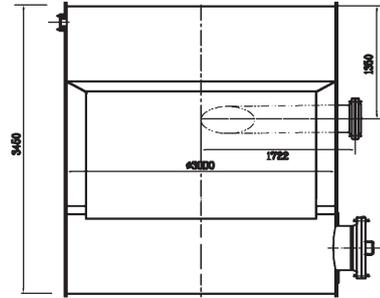


图 2 带有切向接管的直筒段结构示意图(单位: mm)

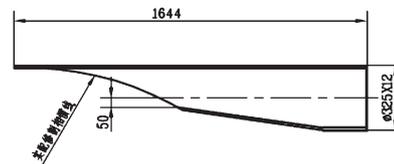


图 3 切向接管结构示意图(单位: mm)

对于斜接管对筒体稳定性的影响分析,需考虑筒体的直径、壁厚、筒体长度及斜接管区域的几何特征,截取筒体段作为容器稳定性分析的几何模型,且忽略筒体上的其他附属部件,所建立的几何模型如图 4 所示。

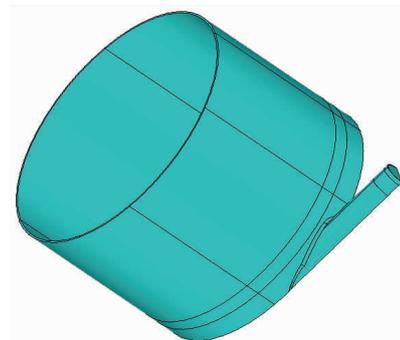


图 4 筒体稳定性分析的几何模型

### 2.2 材料主要力学性能

该压力容器及斜接管均采用 S31603。S31603 在设计温度下的主要力学性能见表 1。

### 2.3 有限元模型离散

根据计算任务和计算特点,采用 45 号实体单元

进行结构离散。为反映出斜接管连接区域的几何特征,特在该区域进行网格细分。稳定性分析模型的离散图如图5所示,共划分单元数23 791个,节点数13 195个。

表1 材料的主要力学性能

材料	屈服极限/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
S31603	180	1.869E6	0.3



图5 稳定性分析模型的离散

#### 2.4 边界及载荷处理

稳定性分析是对容器在外压状态下的失稳进行分析。位移边界为:中间面上施加对称约束,在远离接管连接区域的位置约束几个点在X、Z方向的位移;筒体端部由于受到封头、锥形筒体等约束而加强,则认为筒体端部保持为圆形截面形状<sup>[4]</sup>。实现筒体端部约束的源程序为:

```
.....
nselect,s,loc,z,z0,! 选择端部节点,z0为端部节点的z坐标。
wprota,,90! 调整工作平面与筒轴向垂直。
CSWPLA,11,1,1,1,! 建立局部柱坐标,11号。
csys,11! 激活11号局部坐标。
nrotat,all! 将节点坐标转换到11号坐标下。
d,all,uy! 约束环向位移。
.....
```

约束情况如图6所示。在外表面施加压力,在筒体端面施加轴向平衡面载荷 $p_c$ ,按公式(10)计算:

$$p_c = \frac{pD^2}{(D+2t)^2 - D^2} \quad (10)$$

式(10)中, $p$ 为容器外压, $D$ 为筒体内直径, $t$ 为筒体壁厚。

#### 3 计算结果及分析

考虑材料非线性,材料模型选择双线性等向强化模型,屈服极限为180 MPa,切线模量为0。计算过程中考

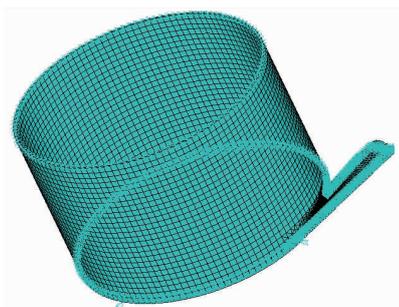


图6 稳定性分析边界条件示意图

虑几何非线性,计算采用弧长法。求解设置的源程序为

```
.....
/solu
antype,static! 设定静力分析类型
outres,all,all! 输出控制
nlgeom,on! 打开大位移选项
nsubst,20! 设置求解子步数
arclen,on,5! 选择弧长法
solve
.....
```

压力容器失稳发生在容器中间段,位移最大节点的径向位移随载荷变化的曲线如图7所示。

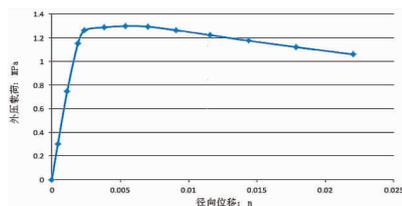


图7 载荷-位移曲线

由图7可知,随着载荷的逐渐增加,开始阶段,容器呈线性变形;当外荷载增加到1.26 MPa时,容器变形开始进入非线性阶段,微小外荷载的增加,即引起很大的变形;当外荷载增加到1.299 MPa时,荷载-位移曲线呈下降趋势变化,即容器失稳破坏。由此,可取1.26 MPa为容器的临界荷载。当外荷载达到1.299 MPa时,容器的失稳模态如图8所示。由图可知,容器失稳位置发生在与斜接管成180度位置处。

#### 4 结束语

采用非线性屈服分析方法对这一带有异形切向接管的圆柱形压力容器在外压状态下的稳定性进行了分析,获得了该容器的临界外压值,为容器的安全使用确定了使用范围。此接管设计的稳定性研究结果,也可为同类容器的设计提供借鉴。

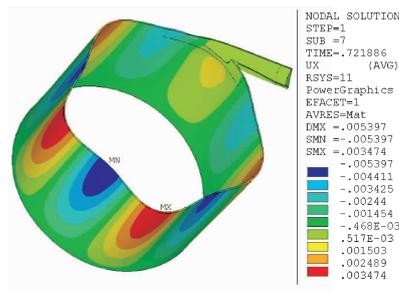


图 8 筒体屈曲模态

## 参考文献:

- [1] 李会强,淡勇,王丽,等.容器壳体切向接管区域应力数值计算和强度分析[J].石油化工设备,2011,40(2):39-42.
- [2] 王定标,魏新利,向飒,等.压力容器切向开孔接管区的应力分析设计[J].石油机械,2006,34(4):5-7.
- [3] 王定标,魏新利,向飒,等.压力容器与切向接管结构应力三维有限元分析及强度评定[J].湖南工程学院学报:自然科学版,2005,15(4):29-33.
- [4] 余伟伟,高炳军.ANSYS 在机械与化工装备中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [5] 淡勇,朱哲.外压力容器设计方法及数值计算[J].西安石油大学学报:自然科学版,2011,26(3):82-85.
- [6] 朱幽幽,冯咬齐,向树红.KM5A 真空容器屈曲稳定有限元分析[J].航天器环境工程,2004,21(3):23-28.
- [7] 谢贻权,何福保.弹性和塑性力学中的有限元法[M].北京:机械工业出版社,1981.

## Stability Analysis for the Pressure Vessel with Special Tangential Nozzle

WEN Hua-bin<sup>1,2</sup>, FU Lei<sup>1,2</sup>, YANG Hai-li<sup>1</sup>, LIU Yan<sup>1</sup>

- (1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China;  
2. Sichuan Provincial Key Lab of Process Equipment and Control Engineering, Zigong 643000, China)

**Abstract:** For the technical requirements, tangential nozzle structure is modified that tangential nozzle is cutted at an angle along the axis of the tangential nozzle, and the notch is filled up with a plate. The joint structure between nozzle and vessel will be very complex in this design, so the noncontinuity of the geometrical shape of the joint structure is very serious. Solving the critical load and the corresponding buckling modal of the vessel is an important part of analysis and design. The stability of a pressure vessel with special tangential nozzle is analyzed using nonlinear yield analysis method under the external pressure. The result can provide security for pressure vessel use and guidance for other similar design.

**Key words:** pressure vessel; tangential nozzle; nonlinear yield analysis; stability