

# 外压力容器加强圈的设计要点

许 龙\* 郭冰亮

杭州杭氧低温容器有限公司 浙江 杭州 310000

**摘要:** 稳定性校核是外压力容器设计中至关重要的一环,对容器的安全起着决定性作用,加强圈设计更是稳定性校核的重中之重。通过合理设计加强圈,保证容器的刚性,直接决定容器是否稳定和安全。本文经过对外压力容器加强圈的作用和图解法计算的详细分析,并结合多年的实际经验,总结出了目前非常适用于外压力容器加强圈设计的重要理论。

**关键词:** 外压力容器、加强圈设计要点、稳定性校核、图解法计算

**引言:** 外压力容器在实际运行过程中外部压力高于内部压力,很容易发生未达到屈服强度就失稳的现象。因此,容器在设计过程中不仅要满足自身强度要求,也要满足其稳定性要求。通常采用增加筒体有效壁厚或设置加强圈的方式满足容器的稳定性要求,结合经济性和实用性两方面考虑,对外压力容器而言,设置加强圈的方式更为适用。

## 1 加强圈的作用

外压力容器广泛用于空分、航天、石油化工等多种领域,比如常见的真空容器、夹套容器、减压精馏塔等。纵观容器外形,外压力容器通常是圆筒形,由于生产制造等原因,容器表面存在凹凸不平之处,在外部压应力作用下,很可能导致容器局部圆筒垮塌、圆环截面突变等失稳现象的发生,从而引起整个圆筒的受压损坏。加强圈的设置,正是为了保证圆筒具有足够的刚性来抵抗外压,防止失稳失效。常规外压设计理论中,加强圈必须时刻对圆筒起加强作用,当筒体外压计算长度和筒体有效厚度已定的情况下,加强圈本身的计算并不会影响外压圆筒的设计,此时只需选取具有足够惯性矩截面的加强圈、调整加强圈间距即可。压力容器规范GB/T 150也是先进行外筒稳定性校核,再进行加强圈设计。

## 2 外压力容器图解法计算

外压圆筒设计可采用解析法和图解法进行计算<sup>[2]</sup>。解析法根据长圆筒或短圆筒的公式计算外压许用应力,由于公式相对复杂、计算步骤烦琐,工程设计中热衷于采用图解法来确定许用外压。外压力容器设计图解法是将解析法的外压计算公式经过归纳总结,用两张图表达出来,分别是外压应变系数A曲线图和与材料有关的外压应力系数B曲线图。相关计算符号含义如下:

A—外压计算应变系数;

$A_s$ —加强圈的横截面积,  $\text{mm}^2$ ;

B—外压计算应力系数, MPa;

C—厚度附加量, mm;

$D_o$ —圆筒外直径, mm;

$D_s$ —加强圈中性轴直径, mm;

$E_t$ —设计温度下壳体或刚性圈的弹性模量, MPa;

I—刚性圈与筒体组合段所需惯性矩,  $\text{mm}^4$ ;

$I_s$ —刚性圈与筒体组合段截面实际惯性矩,  $\text{mm}^4$ ;

L—外筒计算长度;

$L_s$ —刚性圈中心线到相邻两侧刚性圈中心线间距的平均值mm;

$p_c$ —计算外压力, MPa;

\*通讯作者:许龙:1990.7;汉,男,浙江杭州人;就职于杭州杭氧低温容器有限公司;毕业于兰州理工大学;本科学历;中级工程师;研究方向:真空贮槽设计员,外容器的设计与开发;邮箱: xul0ng@126.com。

[p]—许用外压力, MPa;

$\delta_n$ —圆筒名义厚度, mm;

$\delta_e$ —圆筒有效厚度, mm;

$[\sigma]^t$ —外压壳体在设计温度下的许用应力, MPa;

$R_{eL}^t (R_{p0.2}^t)$ —外压壳在设计温度下的屈服强度, Mpa<sup>[1]</sup>。

## 2.1 外压圆筒稳定性校核

### 2.1.1 确定计算长度

计算长度确定原则可按GB/T 150.3中规定进行。取两个加强圈之间的中心最近距离作为计算长度, 一般是按照圆筒外径( $D_o$ )和有效壁厚( $\delta_e$ )比值的大小进行分类设计的。

### 2.1.2 当 $D_o/\delta_e \geq 20$ 时的设计

#### 2.1.2.1 确定外压应变系数A

a. 根据 $L/D_o$ 和 $D_o/\delta_e$ 的计算值, 查GB/T150.3中的外压应变系数A曲线图, 得到外压应变系数A值;

b. 若 $L/D_o > 50$ , 按 $L/D_o = 50$ 查外压应变系数A曲线图取值; 若 $L/D_o < 0.05$ , 按 $L/D_o = 0.05$ 查外压应变系数A曲线图取值。

#### 2.1.2.2 确定外压应力系数B

a. 按圆筒材料, 从GB/T150.3中的外压应力系数B曲线图选用表, 确定对应的外压应力系数B曲线图;

b. 根据外压应力系数B曲线图, 若查得A值超出图中的设计温度曲线得最大值, 则取对应温度曲线右端点的纵坐标值为B值;

c. 根据外压应力系数B曲线图, 若查得A值小于外压应力系数B曲线图中设计温度曲线的最小值, 计算B值:  $B = 2AE^{1/3}$

#### 2.1.2.3 确定许用外压力[p]

$$[p] = B / (D_o/\delta_e)$$

按公式求解得到的[p]应大于或等于 $p_c$ , 否则须调整设计参数, 重复上述计算直至满足要求<sup>[1]</sup>。

### 2.1.3 当 $D_o/\delta_e < 20$ 时的设计

#### 2.1.3.1 确定外压应变系数A

a. 对 $D_o/\delta_e \geq 4.0$ 的圆筒, 用与 $D_o/\delta_e \geq 20$ 相同的方法的到系数A值;

b. 对 $D_o/\delta_e < 4.0$ 的圆筒, 计算系数A值:  $A = 1.1/(D_o/\delta_e)^2$ ,

当系数 $A > 0.1$ 时, 取 $A = 0.1$

#### 2.1.3.2 确定外压应力系数B

用与 $D_o/\delta_e \geq 20$ 相同的方法的到系数B值。

#### 2.1.3.3 确定许用外压力[p]

$$\text{计算[p]值: } [p] = \min\{(2.25/(D_o/\delta_e)-0.0625)B, 2\sigma_o[1-1/(D_o/\delta_e)]/(D_o/\delta_e)\}$$

其中:  $\sigma_o = \min(2[\sigma]^t, 0.9R_{eL}^t \text{ 或 } 0.9R_{p0.2}^t)$

按公式求解得到的许用外压[p]应大于或等于 $p_c$ , 否则须调整设计参数, 重复上述计算直到满足设计要求<sup>[1]</sup>。

注意: 圆筒的圆度误差与外压允许临界压力息息相关, 外压容器制造时一般将圆度误差控制在直径的千分之五以内, 保证容器具有足够的圆度。容器除了考虑外压应力, 如果还承受其它附加外载荷作用, 应把这些载荷组合叠加起来校核。

## 2.2 加强圈的计算

### 2.2.1 惯性矩的计算

选则合适的加强圈材料和截面尺寸, 计算加强圈截面积 $A_s$ 、加强圈与圆筒有效组合截面的惯性矩 $I_s$ , 圆筒有效段系指在加强圈中心线两侧宽度各为 $0.55\sqrt{D_o\delta_e}$ 的壳体<sup>[1]</sup>。若有效段相重叠, 则该圆筒的有效宽度中相重叠部分每侧按一半计算<sup>[1]</sup>。

### 2.2.2 确定外压应力系数B

计算B值： $B = p_c D_o / (\delta_c + (A_s / L_s))$

### 2.2.3 确定外压应变系数A

- 按圆筒材料，查GB/T 150.3中的外压应力系数B曲线图选用表确定对应的外压应力系数B曲线图，由B值查取A值<sup>[1]</sup>。
- 根据外压应力系数B曲线图，若查得B值超出设计温度曲线得最大值，则取对应温度曲线右端点的横坐标值为A值；
- 若B值小于外压应力系数B曲线图中设计温度曲线的最小值，计算 $A = 3B/2E'$ 。

### 2.2.4 确定所需的惯性矩I

计算I值： $I = D_o^2 L_s (\delta_c + A_s / L_s) A / 10.9$

$I_s$ 应该大于或等于I，否则选用较大惯性矩的加强圈，重复上述步骤，直到 $I_s$ 大于且接近I为止<sup>[1]</sup>。

为了简便计算，保证计算结果的准确性，计算惯性矩时，可采取查机械设计手册、借助用SW6软件、编制Excel计算小程序或开发其他计算程序软件的方法。可以省去大量计算，节省时间，事半功倍。

## 3 加强圈的设置

### 3.1 加强圈的设置要求

a. 加强圈不论是内加强圈，还是外加强圈，均应整圈固定在圆筒壁上。外加强圈受拉应力，用材多，相对惯性矩较大；内加强圈受压应力，尺寸紧凑，更不容易失稳。从受力上、设备运输尺寸、美观度等方面考虑，内置加强圈是更好的选择。

b. 加强圈的相关焊接要求符合GB/T 150.3标准规定。

### 3.2 加强圈位置确定

加强圈的位置除了满足规范要求外，还应兼顾材料成本，加强圈个数不宜过多，满足计算要求即可。在工程设计中，通常外压圆筒直径 $D_o$ 和圆筒长度H先已确定好，然后根据强度计算和刚性要求确定好最小壁厚 $\delta_c$ 。此时若要提高许用外压力，根据短圆筒许用外压公式： $[p] = 0.863E'(\delta_c/D_o)^{2.5}/(L/D_o)$ ，就需要减小计算长度L。

关于加强圈个数n的确定，可根据设计经验先设定计算长度L，再试算求解许用外压 $[p]$ ，验证是否满足要求。当然，为简便计算，也可先设定计算长度 $L = H/(n+1)$ ，带入圆筒许用外压公式，反推计算出n<sup>[3]</sup>。由此可以避免反复试算验证的过程。

加强圈设定好计算长度L后，加强圈应该避开筒体环缝，避免后期照光拍片阴影问题。另外，为防止支座、其他支撑处以及设备运输中过大的局部外压引起局部失稳，加强圈应优先设置在吊耳，支座支撑处，使其可与筒体共同承受载荷。

## 4 加强圈的材料选择

选用加强圈材质时，应关注其弹性模量、泊松比和与筒体的可焊接，一般可直接选取标准型钢。此外，加强圈作为外压容器的受压件，其材料的选用还应考虑到容器的低温或高温工况。比如真空贮槽的外筒处于温度低于-20℃以下的环境时，使用普通的Q235类材料型钢制作加强圈将存在低温脆裂风险。此时，加强圈应选则与主体相同或相近的材料。

## 5 加强圈的截面确定

加强圈设计时，实际上加强圈与筒体组合截面惯性矩必须试算至大于计算所需最小惯性矩，其截面形状有矩形、T形、角钢、槽钢、工字钢等多种形状，为节省材料，应选择惯性矩大和简单的截面。在确定加强圈时，结合制造、安装、使用等多方面的情况综合考虑，尽可能选择薄而高的截面以获得较大的惯性矩截面。以真空贮槽外筒加强圈设置为例，由于其夹层空间有限，为方便内筒套装，其加强圈不宜设置过高，更多时候选择的是反置角钢而不是矩形钢。在外压圆筒滚轮架处，常用到槽钢形截面，因为槽钢接触面大，受力均匀，可以有效避免滚轮架跑偏后可能带来的风险。

结语：外压容器的设计，通过合理设置加强圈提高外压许用值的方法安全可靠，相对于提高容器有效壁厚的设计方法，加强圈的设计方式能够节省约三分之一的材料成本，从而获得巨大的经济效益。经过多年的研究，图解法计算

的反复试算验证,通过借助软件等应用程序来进行,可有效缩短计算的时间成本。本文对外压容器加强圈设计要点进行了详细分析,希望设计人员根据实际情况,选择合适的加强圈截面和位置,优化加强圈设计。

**参考文献:**

- [1]GB/T 150.1~150.4-2011压力容器[S].国家质量监督检验检疫总局
- [2]闫雪莲.浅谈外压圆筒及其加强圈的设计[J].应用能源技术,2010,(5).
- [3]王际强.外压圆筒加强圈设计[J].压力容器第22卷第10期2005