

工艺研究

不等极孔纤维缠绕球形压力容器的结构与性能

姜广祥 费春东 蒋喜志

(哈尔滨玻璃钢研究所, 150036)

摘要 本文概要介绍了不等极孔纤维缠绕球形压力容器的结构形式、受力状态及纤维铺层设计方法,提出了纤维强度发挥系数与在球体位置关系的函数概念,通过改变特征点的强度发挥系数,可以方便地进行球形容器的结构优化设计。

关键词 复合材料 球形压力容器 结构设计

Structure Design and Performance in Filament Wound Spherical Pressure Vessel with Polar Openings of Different Sizes

Jiang Guangxiang Fei Chundong Jiang Xizhi

(Harbin FRP Institute, 150036)

ABSTRACT The structural form, load-bearing state and design method for layer lay-up of FW spherical pressure vessel with polar openings of different sizes were introduced. The function concept of the relationship between conversion coefficients of fiber strength with fiber position in the spheroid was suggested. By changing the conversion coefficient of fiber strength at special points, optimal structural design for spherical vessel was conveniently conducted.

KEYWORDS Composite Spherical pressure vessel Structure design

1 不等极孔球形压力容器的结构形式

球形压力容器的结构主要由增强结构层、防渗漏内衬层和进出气的接头三部分组成。从几何形状上讲,球形压力容器还可以根据接头数量的多少与大小分为双接头等极孔球形容器、单接头球形容器、双接头不等极孔球形容器以及多接头球形容器等多种结构形式。根据球形容器的平面缠绕原理,进行球形容器纤维缠绕时,纤维应落在过球心的最大圆上,当纤维的落纱点偏离最大圆时,缠绕的纤维就可能会滑动,也就是所谓的不稳定缠绕,因此,为了能使缠绕顺利进行,一般都采用稳定的缠绕形式,即采用双接头等极孔结构形式,常见的球形容器一般是这种结构。但是,在实际应用中,根据容器的不同用途,也会要求制造不等极孔双接头、单接头或多接头等球形容器。在缠绕过程中,由于纤维与球体表面之间存在一定的摩擦力,使缠绕的纤维可以适当地偏离球体的最大圆,因此,工艺上也就可以实现不等极孔双接头球形容器或单接头球形容器的缠绕,如图1所示。

在进行球形容器的结构设计时,两个接头极孔相差的大小主要是由缠绕工艺和材料的种类等因素来决定,当纤维的落纱平面与球体最大圆平面的夹角 β 小于10度角时,一般不会滑线。如果采取一些特殊的防

滑线措施,夹角 β 可以适当增大,就可以缠绕极孔相差较大或单极孔的压力容器。在实际应用中也会需要多接头结构的球形容器,在进行这类容器的结构设计时,位于轴线以外的接头,其极孔直径越大对缠绕工艺影响也越大,因此应尽量选择小直径的接头。如图2所示。

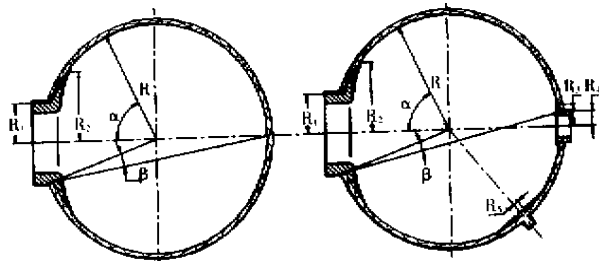


图1 球形容器接头分布情况

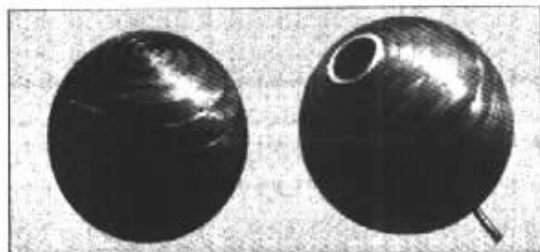


图2 非轴线布置双接头不等极孔球形容器

2 不等极孔球形壳体的受力分析

参照文献[1]介绍的等极孔球形壳体的受力分析方法,可以绘制出不等极孔球形壳体的受力模型,如图3所示。

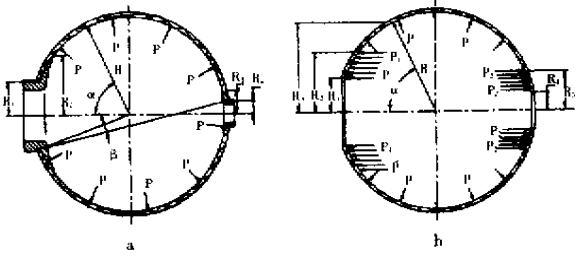


图3 不等开口球形容器受力模型

$$P_1 = \frac{P \cdot R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad (1)$$

$$P_2 = \frac{P \cdot R_4^2}{R_3^2 - R_4^2} \quad (2)$$

以球体的赤道线为准将壳体分为两个半球体,参照文献[1]可以得到球壳任何一点 R_x 处的张力分布,球壳的径向张力:

$$N_{(x)} = \frac{P \cdot R_x}{2} \left(1 - \frac{R_1^2}{R_x^2} \right) + N_{(x)} \quad (3)$$

$$N'_{(x)} = \frac{P \cdot R_x}{2} \left(1 - \frac{R_4^2}{R_x^2} \right) + N'_{(x)} \quad (4)$$

其中 $N_{(x)}$ 和 $N'_{(x)}$ 是分别由 P_1 和 P_2 分别引起的径向张力,

$$N_{(x)} = N_{(x-1)} \cdot \frac{R_{x-1}^2}{R_x^2} + \frac{R \cdot P_1 (R_x^2 - R_{x-1}^2)}{2 \cdot R_x^2} \quad (5)$$

$$N'_{(x)} = N'_{(x-1)} \cdot \frac{R_{x-1}^2}{R_x^2} + \frac{R \cdot P_2 (R_x^2 - R_{x-1}^2)}{2 \cdot R_x^2} \quad (6)$$

球壳的纬向张力:

$$N_{(x)} = \frac{P \cdot R_x}{2} \left(1 - \frac{R_1^2}{R_x^2} \right) \quad (7)$$

$$N'_{(x)} = \frac{P \cdot R_x}{2} \left(1 - \frac{R_4^2}{R_x^2} \right) \quad (8)$$

根据公式1~8可以绘制出的壳体张力分布示意图(图4),从图上可以看出,从球体两端分别计算的

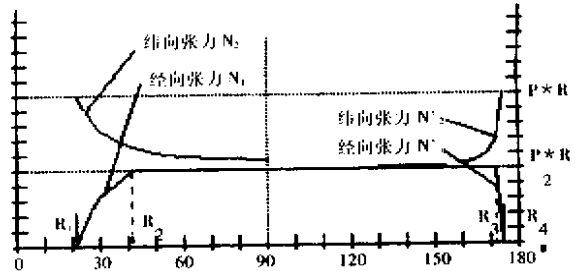


图4 不等极孔球形容器的张力分布示意图

向张力在赤道处是相等的,但是,从球体两端分别计算的纬向张力 N_2 和 N'_2 在赤道圆处存在突变,而实际上在球体赤道附近的应力应是连续变化的,不应存在纬

向张力的突变。若以赤道线为基点向两侧分别进行纬向张力的加权平均,即:

$$\bar{N}_{(x)} = \frac{1}{2} \left[N_{(x)} + \frac{N_{(x)} (\alpha_{90} - \alpha_x) + N'_{(x)90} (\alpha_x - \alpha_{R1})}{\alpha_{90} - \alpha_{R1}} \right] \quad (9)$$

$$\bar{N}'_{(x)} = \frac{1}{2} \left[N'_{(x)} + \frac{N'_{(x)} (\alpha_x - \alpha_{90}) + N_{(x)90} (\alpha_{R4} - \alpha_x)}{\alpha_{R4} - \alpha_x} \right] \quad (10)$$

根据公式9和公式10可以得到加权平均后的张力分布图(图5)。

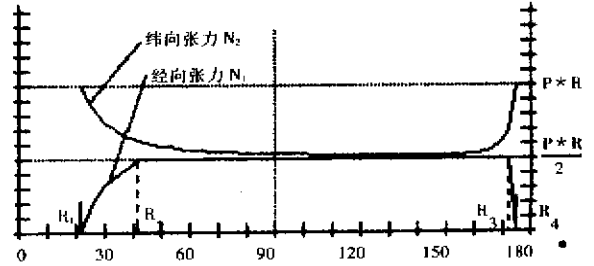


图5 不等极孔球形容器的加权张力示意图

将单极孔球形容器以赤道线为基准分为两部分,一端看作是等极孔球形容器的一半,另一端为完整球形的一半,分别采用等极孔球体和完整球体的受力分析方法,并将纬向张力进行加权平均,即:

$$\bar{N}_{(x)} = \frac{1}{2} \left[N_{(x)} + \frac{N_{(x)} (\alpha_{90} - \alpha_x) + \frac{P \cdot R (\alpha_x - \alpha_{R1})}{\alpha_{90} - \alpha_{R1}}}{\alpha_{90} - \alpha_{R1}} \right] \quad (11)$$

$$\bar{N}'_{(x)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \cdot R}{2} + \frac{P \cdot R (\alpha_x - \alpha_{90})}{\alpha_{180} - \alpha_{90}} + \frac{N_{(x)90} (\alpha_x - \alpha_{90})}{\alpha_{180} - \alpha_{90}} \right] \quad (12)$$

根据上述公式还可以得到单极孔球形容器的张力分布图,如图6所示。

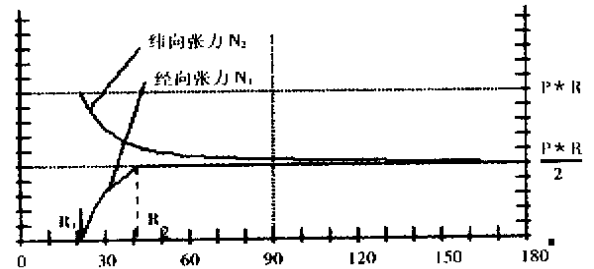


图6 单极孔球形容器张力分布图

3 不等极孔球形压力容器的结构铺层设计与计算

图7为不等极孔球形容器的纤维轨迹图,通过前面的介绍我们已经知道,在球体最大圆以外进行缠绕时,因受纤维滑线的限制,不等极孔的偏差角 β 很小。当进行不等极孔或单极孔球形容器纤维缠绕时,为了分析的方便,仍然可以借用前面介绍的球壳张力分析方法,将不等极孔的球形容器从赤道线分开,分别看作是一个完整的等极孔球体,并用上述方法分别计算出

每一缠绕层的纤维抗力,将每一层的纤维抗力以赤道线为基准分别向两端进行加权平均,并分别用两极孔处的纤维强度发挥系数和赤道线位置的纤维强度发挥系数加以修正。

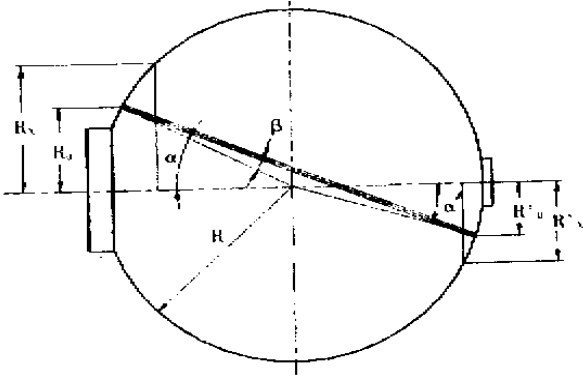


图 7 不等极孔壳体纤维轨迹图

根据文献(1)介绍的方法可以得到大极孔端球体表面上任意一点纤维的抗力为:

$$T_{l(x)} = 2 \frac{M}{W} \cdot F \cdot f(x) \cdot R \cdot \frac{R}{R_x} \cdot \sqrt{1 - \frac{R_0^2}{R^2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{R_0^2}{R_x^2}} \quad (13)$$

$$T_{\chi(x)} = 2 \frac{M}{W} \cdot F \cdot f(x) \cdot R \cdot \frac{R_0^2}{R_x^2} \cdot \sqrt{1 - \frac{R_0^2}{R^2}} \div \sqrt{1 - \frac{R_0^2}{R_x^2}} \quad (14)$$

当 $R_x = R_0$ 时 纬向抗力为:

$$T_{\chi(x)} = 2 \frac{M}{W} \cdot F \cdot f(x) \cdot R \cdot \sqrt{1 - \frac{R_0^2}{R^2}} \div \sqrt{2R_0 \cdot W_0} \quad (15)$$

其中: F ——每束纤维的抗力; M ——缠绕时的纱团数; W ——纤维在赤道线上垂直纤维方向的前进量; W_0 ——纤维展纱宽度; $f(x)$ ——纤维强度发挥系数的位置函数;

$$f(x) = f_1 - (f_1 - f_2) \cdot \left[\sin^{-1} \left(\frac{R_x}{R} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{R_1}{R} \right) \right] \div \left(\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \left(\frac{R_1}{R} \right) \right) \quad (16)$$

式中 f_1 ——为纤维在极孔处的强度发挥系数
 f_2 ——为纤维在赤道处的强度发挥系数

小极孔端球体表面上任意一点纤维的抗力为:

$$T'_{l(x)} = 2 \frac{M}{W} \cdot F \cdot f(x) \cdot R \cdot \frac{R}{R'_x} \cdot \sqrt{1 - \frac{R_0^2}{R^2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{R_0^2}{R_x^2}} \quad (17)$$

$$T'_{\chi(x)} = 2 \frac{M}{W} \cdot F \cdot f(x) \cdot R \cdot \frac{R_0^2}{R_x^3} \cdot \sqrt{1 - \frac{R_0^2}{R^2}} \div \sqrt{1 - \frac{R_0^2}{R_x^2}} \quad (18)$$

当 $R_x = R'_0$ 时 纬向抗力为:

$$T'_{\chi(x)} = 2 \frac{M}{W} \cdot F \cdot f(x) \cdot R \cdot \sqrt{1 - \frac{R_0^2}{R^2}} \div \sqrt{2R'_0 \cdot W_0} \quad (19)$$

$$f(x) = f_3 - (f_3 - f_2) \cdot \left[\sin^{-1} \left(\frac{R_x}{R} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{R_3}{R} \right) \right] \div \left(\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \left(\frac{R_3}{R} \right) \right) \quad (20)$$

其中 f_3 ——为纤维在小极孔端的强度发挥系数
以赤道线为基点向两侧分别进行加权平均,即大、

小口端的经、纬向抗力分别为:

$$\bar{T}_{l(x)} = \frac{1}{2} \left[T'_{l(x)} + \frac{T_{l(x)} (\alpha_{90} - \alpha_x) + T'_{l(90)} (\alpha_x - \alpha_{R1})}{\alpha_{90} - \alpha_{R1}} \right] \quad (21)$$

$$\bar{T}'_{l(x)} = \frac{1}{2} \left[T'_{l(x)} + \frac{T'_{l(x)} (\alpha_x - \alpha_{90}) + T_{l(90)} (\alpha_{R4} - \alpha_x)}{\alpha_{R4} - \alpha_x} \right] \quad (22)$$

$$\bar{T}_{\chi(x)} = \frac{1}{2} \left[T_{\chi(x)} + \frac{T_{\chi(x)} (\alpha_{90} - \alpha_x) + T'_{\chi(90)} (\alpha_x - \alpha_{R1})}{\alpha_{90} - \alpha_{R1}} \right] \quad (23)$$

$$\bar{T}'_{\chi(x)} = \frac{1}{2} \left[T'_{\chi(x)} + \frac{T'_{\chi(x)} (\alpha_x - \alpha_{90}) + T_{\chi(90)} (\alpha_{R4} - \alpha_x)}{\alpha_{R4} - \alpha_x} \right] \quad (24)$$

当使用计算机程序进行计算时,可以将赤道线两端的经线距离分别以计算步长 S 和 S' 划分出 n 和 n' 个计算点,如果一端从第 m 点起,纬向抗力低于该点的纬向张力,或者经向抗力等于该点的经向张力,则以该点作为该端新的包络圈等待缠绕,若该端的经向抗力小于该点的径向张力,则应以该点的前一点为新的包络圈,同样方法可以确定另一端第 m' 点为新的包络圈,两端包络圈确定后即可进行该层次的铺层设计。假设在此之前已经扩孔缠绕了 i 次,则第 $i+1$ 次扩孔缠绕的层数 k 则由第 m 点或第 m' 点纤维的总抗力刚好满足下式求得:

$$\sum_{j=1}^i \bar{T}_{l(x)} \geq N_{l(m)} \quad (25)$$

$$\sum_{j=1}^i \bar{T}_{\chi(m)} + 2 \cdot k \cdot \frac{M}{W} \cdot F \cdot f(m) \cdot R \cdot \sqrt{1 - \frac{R_m^2}{R^2}} \div \sqrt{2R_m \cdot W_0} \geq N_{\chi(m)} \quad (26)$$

或:

$$\sum_{j=1}^i \bar{T}'_{l(m')} \geq N'_{l(m')} \quad (27)$$

$$\sum_{j=1}^i \bar{T}_{\chi(m)} + 2 \cdot k \cdot \frac{M}{W} \cdot F \cdot f(m) \cdot R \cdot \sqrt{1 - \frac{R_m^2}{R^2}} \div \sqrt{2R_m \cdot W_0} \geq N_{\chi(m)} \quad (28)$$

第 $i+1$ 次扩孔缠绕后,第 $m+1$ 点到第 $m'-1$ 点之间的各向纤维抗力为:

$$\sum_{j=1}^{i+1} T_{l(x)} = \sum_{j=1}^i T_{l(x)} + k \cdot \bar{T}_{l(x)} \quad (29)$$

$$\sum_{j=1}^{i+1} T_{\chi(x)} = \sum_{j=1}^i T_{\chi(x)} + k \cdot \bar{T}_{\chi(x)} \quad (30)$$

或:

$$\sum_{j=1}^{i+1} T'_{l(x)} = \sum_{j=1}^i T'_{l(x)} + k \cdot \bar{T}'_{l(x)} \quad (31)$$

$$\sum_{j=1}^{i+1} T'_{\chi(x)} = \sum_{j=1}^i T'_{\chi(x)} + k \cdot \bar{T}'_{\chi(x)} \quad (32)$$

利用上述方法可以得到比较理想的铺层设计结果,通过合理地调整三个纤维强度发挥系数,不仅可以达到比较准确的设计爆破压力,而且可以达到较高的结构效率。图 8 为不等极孔球形压力容器的纤维抗力分布图。

利用上述方法也可以对单极孔球形容器进行结构铺层设计,图 9 为单极孔球形容器的纤维张力分布图。

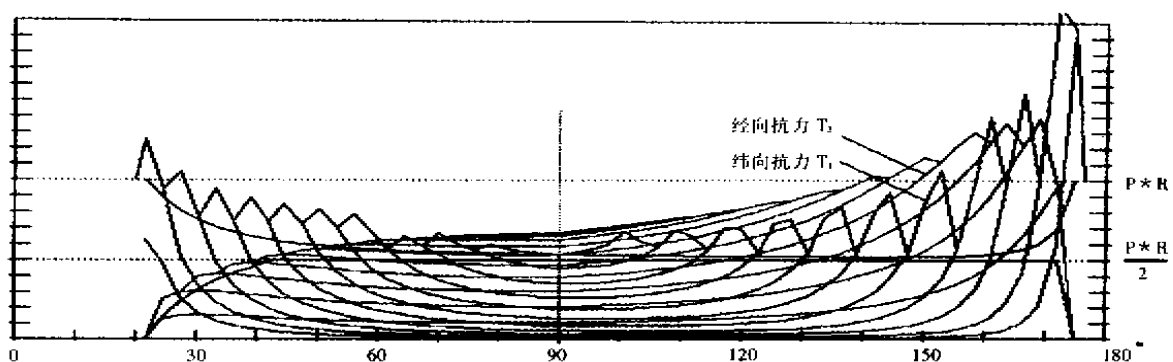


图8 不等极孔球形容器的纤维张力分布图

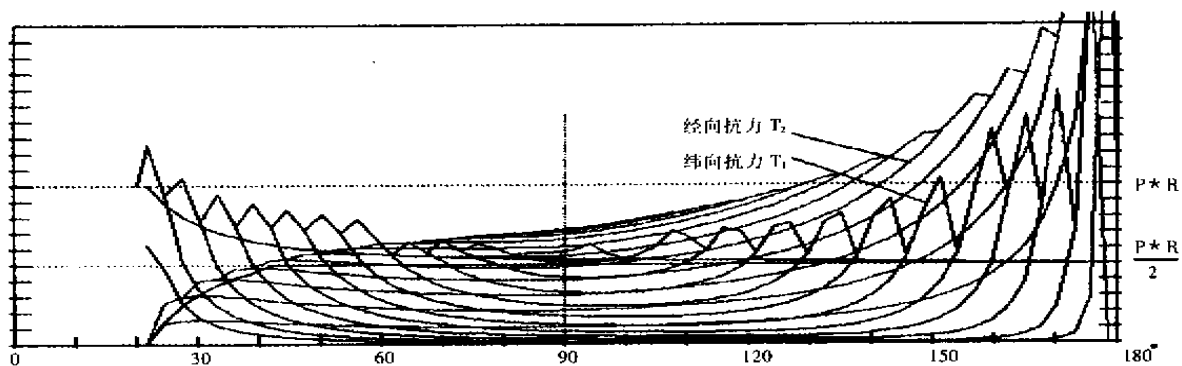


图9 单极孔球形容器的纤维张力分布图

4 不等极孔球形压力容器的性能

根据以上的分析与计算方法,可以对各种不等极孔球形压力容器进行结构设计。在球形压力容器研究中,先后研制过多种规格的不等极孔和单极孔球形容器,其性能指标达到较高水平。表1为部分不等极孔球形容器的性能数据。图10为一铝内衬碳纤维复合材料球形容器的水压爆破前后的状态。根据容器的爆破形式,通过调整特征点的纤维强度发挥系数和各项工艺参数的调整,即可以达到球形容器的结构优化设计。

表1 部分不等极孔球形容器性能数据

	1	2	3	4
极孔形式	大开口单极孔	小开口单极孔	不同轴不等极孔	单极孔
容器内径 mm	560	72	156	200
极孔直径 mm	276	10	64	30
容积 L	85	0.19	2.0	4.0
增强纤维	玻璃纤维	芳纶纤维	芳纶纤维	碳纤维
内衬材料	橡胶	不锈钢	橡胶	铝合金
爆破压力 MPa	9.8	200	25	72
FRP PV/W km	11.6	29.3	26.9	28.8



图10 单极孔球形容器的爆破形式

参 考 文 献

- 姜广祥. 纤维缠绕球形压力容器的结构与性能. 纤维复合材料, 1989 (3) 万方数据
- 《玻璃钢结构设计》. 上海玻璃钢研究所
- 刘锡礼, 王秉权. 复合材料力学基础. 中国建筑工业出版社, 1984
- Lewis G. Filament - Wound Spherical Pressure Vessels: A State - of - the - Art Review. Journal of Composite Technology Research, 1987 (2)