

玻璃钢压力管材卷制成型工艺中的张力优化设计

吴德会¹ 王晓红¹ 王四清² 李广进²

(1 九江学院,九江 332005)

(2 长江化工厂,九江 332006)

文 摘 在玻璃钢压力管材卷制成型工艺中,卷制张力的设计是保证产品质量的关键之一。本文分析了卷制过程中张力变化规律及影响因素,并由弹性理论给出了一组玻璃钢管的内张力分布公式。根据该组公式讨论一种神经网络结构对卷制张力进行优化。结果表明:通过该神经网络优化的卷制张力能使生产的管材每一层均处于等内张力状态。

关键词 玻璃钢,卷制成型,张力设计,神经网络

Tension Optimum Design in GFRP Pipes Coiling Molding Technologies

Wu Dehui¹ Wang Xiaohong¹ Wang Siqing² Li Guangjin²

(1 Jiujiang University, Jiujiang 332005)

(2 Changjiang Chemical Plant, Jiujiang 332006)

Abstract Within the field of glass fibre reinforced plastics (GFRP) pipes coiling molding, the design of coiling tension is one of the keys to guarantee the product quality. The changing pattern of the tension and the factors influencing the tension in the process of coiling molding are analyzed in this paper. And the formulas for the distributions of inner tension in GFRP pipes are given from the theory of elasticity. Based on these formulas an artificial neural network (ANN) structures is discussed used for optimizing the coiling tension. Numerical results show that the tension design optimized by this ANN can ensure the tensions in each coiling layer to obtain a respectable value.

Key words Glass fibre reinforced plastics, Coiling molding, Tension design, Artificial neural network

0 前言

在航空航天领域中大量使用玻璃钢管材制品。卷制工艺是缠绕工艺的一个重要分支,是树脂基复合管材制品的主要成型方法之一^[1]。该工艺是用玻璃纤维织物或异型毡浸渍树脂的预浸片在伸展的情况下卷缠在模芯上进行固化成型。由于卷制管材具有与一般缠绕工艺相当的强度,并且使用纤维织物代替纱线、纱带进行环向缠绕,因此该工艺成型速度可提高10~20倍,特别适合大批量的压力管材或厚壁管材生产^[1]。

卷制成型管材属于纤维增强复合材料层压结构,研究其在内压作用下的力学行为,是提高其爆破压力的关键^[2]。根据网格理论,复合材料基体树脂的拉伸强度及拉伸模量只是纤维的2%~5%,特别是当

管材发生内压爆破时,破源处的树脂开裂后,几乎起不到加强作用。因此在分析管材内压强度时,可忽略树脂的作用,将其看作是一个完全由玻璃纤维织物紧密卷缠而成的结构体。

实践与理论均证明,在管材内部施加压力时,产生的环向应力要大于轴向应力,因此,提高环向承载能力是提高管材强度的关键。很明显,对卷制过程中各层纤维织物的环向张力进行准确控制能有效提高压力管材制品承载能力^[3]。若卷制时张力控制不当,则内压产生的环向拉力不能均匀地作用于每层的环向纤维上,会产生逐层破裂现象,严重影响管材质量。由此看来,在实际工艺设计中,确定每层纤维织物卷制时的环向预应力以保证各层纤维处于等张力状态是至关重要的问题。

收稿日期:2005-12-19;修回日期:2006-02-22

作者简介:吴德会,1975年出生,博士,主要从事生产控制的研究

1 厚壁管材的内应力分布

一般缠绕工艺成型的管材通常属于薄壁管,由于薄壁管内、外径相差较小(壁厚/内径 < 0.1),因此在进行外层缠绕时对已缠好的内层影响不大,通常可采用恒张力缠绕^[4],文献[4]中对恒张力缠绕方法进行了较详细阐述。

玻璃钢卷制成型工艺可用于生产厚壁管,此时由于管内、外径相差较大,必须考虑到卷制外层纤维织物时对已卷完的各层产生的放松效应。为了便于分析这种影响,我们定义了三个作用力:一是外张力 $T_w(R)$,指卷制到半径为 R 时作用在最外层纤维织物上单位宽度的张力,它由卷制设备的张力控制器产生;二是内张力 $T(r, R)$,指卷制到半径为 R 时,处于内部半径 r 位置上那层纤维织物上单位宽度的张力;三是环向应力 $\sigma(r, R)$,它表示当卷制的外半径到达 R 时,其内部半径 r 处在环向上的应力值。

很明显,若纤维织物平均厚度为 h ,则有, $T(r, R) = \sigma(r, R) \cdot h$ 。并且,随着卷制过程的进行,外半径 R 逐渐增大,内张力 T 和内应力 σ 的分布也会相应变化。

由于卷制过程中一般采用钢模具,其刚度比纤维织物大得多,可假定模具在卷制过程中不变形。同时在卷制过程中实际作用在纤维上的张力一般是其弹性极限的 5% ~ 10%,所以本文采用弹性力学理论对卷制管材的内应力分布进行分析。

若刚性模芯的半径为 R_0 ,管材由 n 层纤维织物卷制而成,则卷制第 i 层时管材的半径可表示为 R_i , $R_i = R_0 + i \cdot h$,卷制管材的最大外径为 R_n 。

为使问题简化,根据弹性力学中的叠加原理对管材的内应力分布进行分析^[5],对于卷制完成的管材内部任意半径 r 处的内张力 $T(r, R_n)$ 是 $r \sim R_n$ 之间多层织物张力综合作用的结果。

外层纤维织物主要是通过卷制时对管体产生的压力影响到内部各处应力分布^[6]。如图 1 所示,设当前卷制管材半径已达到 R ,在最外层纤维织物对内产生的均匀压力为 P ,则由弹性力学原理可求得该压力 P 在筒内半径 r 处形成的环向应力影响 $\sigma'(r, R)$ 为:

$$\sigma'(r, R) = -\frac{P \cdot R^2}{R^2 + (1 - 2\gamma)R_0^2} \left[1 - \frac{(1 - 2\gamma)R_0^2}{r^2} \right] \quad (1)$$

式中, $R_0 \leq r \leq R$, γ 为纤维织物的泊松比。

很明显,在卷制过程中作用于管材外环的均匀压力 P 是由卷制外张力 $T_w(R)$ 产生的,即 $P = T_w(R)/R$,代入式(1)可得:

$$\sigma'(r, R) = \frac{T_w(R) \cdot R}{R^2 + \lambda} (1 - \lambda/r^2) \quad (2)$$

式中, $\lambda = (1 - 2\gamma)R_0^2$,用该式可求出当卷制半径到达 R 时,最外层纤维织物的张力对管体内部 r 处的内应力分布影响量。

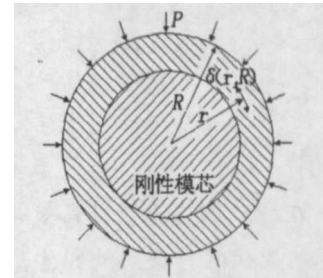


图 1 外层卷制的应力影响

Fig. 1 Effect of outer stress in coiling molding

由于纤维上的张力不超过其弹性极限,所以可应用弹性叠加原理。当卷制完成时,作用在半径 r 处的内应力分布 $\sigma(r, R_n)$ 可理解为半径 r 以外的 $(R_n - r)/h$ 层在 r 处产生环向应力影响量 $\sigma'(r, r+h)$, $\sigma'(r, r+2h)$, \dots , $\sigma'(r, R_n)$ 的综合作用。因此由式(2)可建立内应力分布公式:

$$\begin{aligned} \sigma(r, R_n) &= T_w(r)/h + \sigma'(r, r+h) + \\ &\sigma'(r, r+2h) + \dots + \sigma'(r, R_n) \\ &= T_w(r)/h + \sum_{i=1}^{(R_n-r)/h} \sigma'(r, r+i \cdot h) \quad (3) \end{aligned}$$

由于卷制过程中控制的对象是纤维织物的张力,可记 $T_{i,j} = T_n(R_i, R_j)$, $i < j$ 且 $i, j = 1, 2, \dots, n$,它表示卷制到第 j 层纤维织物时,管材内第 i 层织物上的内张力;记 $T_i = T_w(R_i)$,表示卷制第 i 层纤维织物时外张力。则由式(2)及式(3)求得已卷制完成的管材内各层纤维的内张力分布:

$$\begin{aligned} T_{i,n} &= T_n(R_i, R_n) = h \cdot \sigma(R_i, R_n) = T_w(R_i) + \\ &h \cdot \sum_{j=i+1}^n \sigma'(R_i, R_j) \\ &= T_i - h(1 - \lambda/R_i^2) \sum_{j=i+1}^n 5 \frac{R_j T_j}{R_j^2 + \lambda} \quad (4) \end{aligned}$$

当纤维织物的泊松比 γ ,模具半径 R_0 、管材的最大外径 R_n 及纤维织物的平均厚度 h 已知时,可根据在卷制过程中施加在每层纤维织物上的外张力 T_i ,利用式(4)计算出管材内各层纤维织物所承受的内张力。

2 卷制工艺的张力优化设计

由实际经验和对卷制纤维织物内部应力分析都可看出,在管材的卷制过程中,每新卷入一层纤维织物,都会对已卷好各层产生内压力,使前面各层的内张力下降。为使卷制管材环向拉伸能力达到最佳,必须使最终卷制的各层纤维织物处于等内张力状态。因此卷制时首层外张力必须最大,然后控制外张力随半径增大依次递减。

根据这一思路,解决张力优化设计的关键是找出当卷制半径不断变化(随卷制过程半径逐渐增大)时

宇航材料工艺 2007年 第2期

施加于纤维织物上的张力 $T_w(R)$ 的变化规律。用该张力进行卷制完成后,能使得管体内部各处的环向应力(或张力)均相等;当进行内压爆破时,各层环向纤维能同时均匀受力,有效提高纤维强度转化率。

式(4)已提供了一种根据卷制外张力 T_i 求取管材内张力 $T_{i,n}$ 分布的计算方法,但问题是如何设计一组张力 $T_i, i = 1, 2, \dots, n$, 使得最终的内张力分布 $T_{i,n}$ 符合理想的内张力设计要求(本文是内张力相等)。为此,提出了一种迭代优化方法,其优化原理如图2所示。

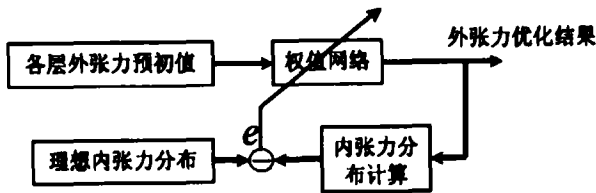


图2 卷制外张力优化原理

Fig. 2 Optimization principle of coiling tension

首先,确定一组卷制外张力作为优化的初值,初值确定的合理与否会直接影响优化速度,可设置为恒定值或根据实际经验进行设置。初值通过权值网络进行初步优化,生成外张力的初步优化结果。利用该结果计算出内张力分布并与理想的内张力分布进行比较得出偏差 e , 通过偏差 e 对权值网络进行调整,进一步修正优化^[7]。多次调整后可使偏差 $\|e\| \rightarrow 0$, 此时权值网络的输出即为所求的最优卷制张力。

根据卷制外张力的优化原理,设计出如图3所示的张力优化神经网络模型。

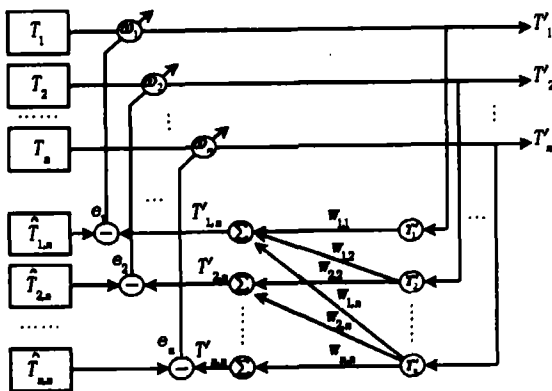


图3 基于神经网络的张力优化模型

Fig. 3 Optimization model of tension based on ANN

在该模型中, $T_i, i = 1, 2, \dots, n$, 表示卷制第 i 层纤维织物时所用的外张力初值, T'_i 表示第 i 层外张力的优化结果, $T'_{i,n}$ 表示在外张力 T'_i 作用下第 i 层织物的内张力值, $\hat{T}_{i,n}$ 表示卷制完成后,第 i 层织物的内张力的理想值。

$w_{i,j}, i \leq j$, 为层间张力影响因子,它表示在卷制第 j 层时对第 i 层织物内张力所带来的影响。则可根据式(4)确定张力影响因子:

宇航材料工艺 2007年 第2期

$$w_{i,j} = \begin{cases} 1 & i=j \\ -h(1-\lambda/R_i^2)[R_i/(R_j^2+\lambda)] & i < j \end{cases} \quad (5)$$

设神经网络的迭代次数为 k , 则内张力 $T'_{i,n}(k)$ 可表达为:

$$T'_{i,n}(k) = \sum_{j=i}^n w_{i,j} T'_j(k) \quad (6)$$

偏差表达式为:

$$e_i(k) = \hat{T}_{i,n} - T'_{i,n}(k) \quad (7)$$

权值调整为:

$$\omega_i(k+1) = \omega_i(k) + \alpha \cdot e_i(k) / T_i \quad (8)$$

式中, α 为一个控制稳定性和收敛速率的学习常量,即学习因子^[8]。

最后,定义迭代误差 $\|e\| = \max\{|e_i(k)|\}$, 并设定 $\|e\| < \varepsilon$ 作为迭代终止条件, ε 为一个相对较小的正实数。当神经网络训练结束后,网络输出 $T'_i, i = 1, 2, \dots, n$, 即为最优的卷制张力。

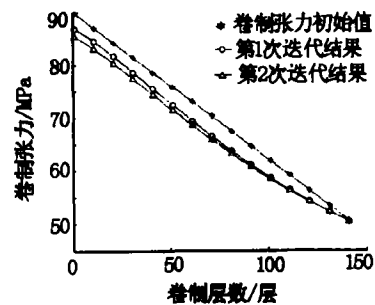
3 算例分析

算例1:以玻璃布为增强材料卷制某一高压管材,其主要参数为:管材内半径 $R_0 = 40$ mm, 卷制带层厚度为 $S = 50$ mm, 管材外半径 $R_n = 90$ mm, 选用玻璃布厚度 $h = 0.35$ mm, 其材料的泊松比 $\gamma = 0.36$, 要求卷制完成后管材内各层织物均处于 50 MPa 恒定内张力分布状态。

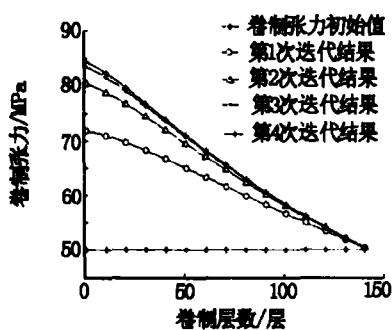
由管材带层厚度及织物厚度可以计算需卷制玻璃布约为 143 层。由此可建立如图3所示的神经网络结构对卷制过程中的外张力进行优化。网络中理想内张力 $T'_{i,143}, i = 1, 2, \dots, 143$, 均取 50, 迭代终止条件 $\varepsilon = 0.5$, 学习因子 α 取 0.8, 网络权值的初值 $\omega_i(0)$ 均取 1.0。

张力初值 T_i 的取值会直接影响网络收敛的迭代次数,用不同的张力初值进行了多次实验,网络经过若干次迭代后均可收敛到同一结果,只是迭代次数不同。图4给出了两种不同张力初值条件下的网络迭代过程。

如图4(a)所示,若所设初值与优化结果的趋势(内紧外松)相同,而呈线性变化,则网络迭代次数较少,仅为2次;反之如图4(b),经过4次迭代之后方达到网络收敛条件。



(a) 线性初值条件



(b) 恒定初值条件

图4 不同张力初值条件的网络迭代过程

Fig. 4 Iterative processes for tension with different initial condition

算例2:卷制某低压玻璃钢输油管道,其几何尺寸为:管道内半径 $R_0 = 55$ mm,卷制带层厚度为 $S = 5$ mm,平均每层厚度 $h = 0.35$ mm,设计卷制张力使得卷制完成后管材内部各层织物均处于 30 MPa 的等张力状态(材料的泊松比 γ 取 0.36)。

建立相应的神经网络结构对卷制过程中的外张力进行优化,由壁厚可知该管道属薄壁管材仅需卷制 14 层。根据卷制要求设置理想内张力 $T'_{i,14}$, $i = 1, 2, \dots, 14$, 均为 30, 迭代终止条件 $\varepsilon = 0.1$, 学习因子 α 取 0.8, 网络权值的初 $\omega_i(0)$ 均取 1.0, 张力预初值 $T_{i,14}$ 均设为 30。网络经过 3 次迭代后收敛,图 5 给出了该管材卷制张力优化结果。

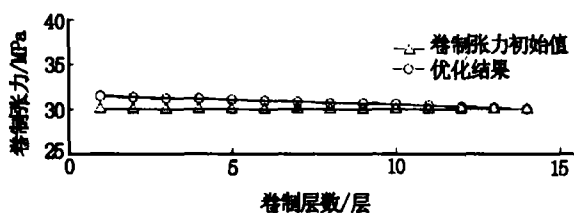


图5 薄壁管材卷制张力的优化结果

Fig. 5 Optimal solution of coiling tension for thin-wall pipe

从图 5 可见,对于本例的薄壁管材(壁厚/内径 < 0.1),优化结果的内、外层卷制外张力相差不大(不超过 2 MPa),若使用恒卷制张力近似本文优化结

果对该薄壁管材进行卷制,其内张力分布相差不会超过 10%。因此可以说通常对薄壁管材使用恒张力卷制与本文张力优化方法是一致的,是本文方法的一个近似特例。

4 结论

基于网络理论和弹性力学,分析了外层卷制对中层纤维织物内张力的影响;提出了一种卷制张力优化思路并为此设计出基于神经网络的张力优化模型。

该方法通过神经网络结构表达各层纤维织物之间的相互作用力,通过网络迭代实现对张力的优化,因此不但可进行等张力设计,还能适合其他特殊的中层张力要求。当管材较薄时,优化张力 T' 近似为一定值,因此可以说薄壁管材的恒张力卷制是本文方法的一个特例。所以较目前常用的解析求解方法,本文方法使用更灵活、适用更广泛,便于在计算机上实现。

参考文献

- 1 吴至龙, 高品松, 李杰. 卷制成型玻璃钢管材. 工程塑料应用, 1991; (2): 11 ~ 16
- 2 Mertiny P, Ellyin F. Influence of the filament winding tension on physical and mechanical properties of reinforced composites. Composites: Part A, 2002; 33(12): 1 615 ~ 1 622
- 3 Cohen D. Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength. Composites: Part A, 1997; 28(3): 1 035 ~ 1 047
- 4 王春香, 付云忠, 杨汝清等. 纤维缠绕过程中的张力分析. 复合材料学报, 2002; 19(6): 120 ~ 123
- 5 Timoshenko (徐芝纶译). 弹性理论. 北京: 高等教育出版社, 1990
- 6 杨娅君, 郭乙木. 纺织物带材收卷后的应力分布. 纺织学报, 2003; 24(6): 564 ~ 566
- 7 Prtra J C, Pal R N. A functional link artificial neural network for adaptive channel equalization. Signal Processing, 1995; 43(2): 181 ~ 195
- 8 Luo F L. Multiple-page-mapping back-propagation neural network for constant tension control. IEE Proceedings: Electric Power Applications, 1998; 145(3): 239 ~ 245

(编辑 任涛)