复 合 材 料 学 报　　第21 卷　第5 期　10 月　2004 年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA　　Vol. 21　No. 5　October　2004

文章编号: 1000-3851(2004) 05-0153-06

具有内衬的缠绕容器缠绕层等张力设计的迭代搜索

任明法, 郑长良, 陈浩然*
(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023)

摘　要:　基于本文作者已提出的模拟具有金属内衬缠绕容器缠绕过程的有限元策略或者其它一些简化的解析公式, 发展了一种确定具有内衬缠绕容器实现等张力状态的预拉张力过程的迭代方法。以典型钢带或碳纤维缠绕的圆筒压力容器为例进行了数值分析。结果表明: 采用本文中的方法可以通过可控的缠绕预拉张力工艺过程达到在缠绕工艺结束后实现压力容器等张力状态。

关键词:　等张力设计; 缠绕容器; 缠绕过程; 有限元
中图分类号:　TB 332; TB 330. 1　　**文献标识码:** A

ITERATIVE SEARCH FOR THE ISOTENSION DESIGN OF THE BAND WOUND VESSELS WITH LINER

REN Mingfa, ZHENG Changliang, CHEN Haoran*
(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract:　An iterative scheme to utilize the pretension process for the band wound vessels with a liner was proposed. Combined with the real-fictitious finite element analysis strategy developed by the authors or some simplified analytical equations, the typical cylinder vessels wound with steel band or carbon fiber were analyzed. Numerical results show that a pretension process can be obtained ensuring the tensions in each wound layer to get a respectable value and the provided iterative scheme gives a much suitable pretension process for the engineering practice.

Keywords:　isotension state; band wound vessel; winding process; finite element

以金属为内衬, 以钢带或纤维复合材料作为缠绕带的缠绕结构, 已广泛应用于高压容器、管道、导弹发射管、发动机机匣等工程领域。由于缠绕过程特别是缠绕张力对缠绕压力容器的性能有决定性的影响, 其缠绕过程的力学分析为许多研究者所关注[1~5]。Mertiny 和 Ellyin, 采用试验方法研究了缠绕预张力对玻璃纤维缠绕管的物理和力学性能的影响, 结果表明: 试验件的强度依赖于纤维张力的大小[1]。在文献[2] 中他们还研究了在缠绕过程中如缠绕张力可被操作者选择、监控和控制的主要参数和象纱带宽度不能被操作者控制的次要参数对纤维缠绕压力容器性能的影响。Cohen 应用实验设计方法(DOE) 确定了缠绕预张力是影响缠绕容器力学性能的最显著的制造参数之一, 高的缠绕张力可在纤维缠绕压力容器中形成高的纤维体积比, 而提高其容器的强度[4]。在文献[5] 中 Cohen 确定了在环向纤维体积比和纤维缠绕压力容器破坏强度之间的定量关系。这些研究表明: 控制缠绕张力对缠绕式压力容器承载能力极其重要。在实际工艺设计中, 如何确定每层纤维的缠绕张力以便获得设计的预应力和保证各层纤维处于等张力状态是至关重要的问题[7]。由于缠绕式压力容器的缠绕过程中的力学行为的精确模拟是一项非常复杂和困难的工作, 以往的研究往往都基于简化的模型, 建立了一些缠绕张力的解析计算公式[6~8], 但这些模型和方法都不能用于指导实际工程中具有内衬缠绕式压力容器缠绕工艺设计。本文作者曾根据具有内衬缠绕式压力容器的特点, 提出了一种虚 实结合、逐层实化的有限元方法, 模拟了其缠绕过程, 该方法具有普适性的优点。本文作者基于这一方法, 进一步发展了一种搜索等张力状态的迭代法, 能正确确定达到等张力状态所需的预张力, 以实现内衬缠绕容

收稿日期: 2003-08-05; 收修改稿日期:2003-12-30
基金项目: 国家863 项目"复合材料纤维缠绕容器"资助项目
通讯作者: 陈浩然, 教授, 博士生导师, 研究方向: 复合材料力学　E-mail: chenhr@dlut.edu.cn

器等张力状态的要求。

1　模拟缠绕过程的虚实结合、逐层实化的有限元分析策略

在缠绕工艺中缠绕张力是其中至关重要的参数，其原因是缠绕张力的大小和变化将对缠绕容器的最终性能具有很大的影响。为了模拟控制当前缠绕层的缠绕张力缠绕过程，作者提出了一种“温度参数法”为基础的虚实结合和逐层实化的有限元法[12]。

假设容器在缠绕过程中，由于缠绕预拉张力作用，在缠绕层内仅产生线应变，而剪切应变为零。这种应变可以看作是在容器内的初应变场。若已知缠绕预拉张力引起的初应变 $\{\varepsilon\}$，则可求得相应的初应变引起的等效节点载荷 $\{P_{\varepsilon_0}\}$；类似一般有限元法的分析过程，可得到缠绕预拉张力引起的节点位移 $\{a\}$ 和缠绕预应力 $\{\sigma\}$。其中 $\{\sigma\}$ 为：

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon) \qquad (1)$$

由虚位移原理的表达式可知：

$$\int_V (\delta\varepsilon^T \sigma - \delta u^T f)\,dV - \int_{S_\sigma} \delta u^T \bar{t}\,dS = 0 \qquad (2)$$

将式(1)代入式(2)，则可得到包含了由于缠绕预拉张力引起的初应变的虚位移原理泛函表达式：

$$\Pi_p(u) = \int_\Omega \frac{1}{2}\varepsilon^T D\varepsilon - \varepsilon^T D\varepsilon - u^T f\,d\Omega - \int_{\Gamma_\sigma} u^T \bar{t}\,d\Gamma \qquad (3)$$

将求解域 Ω 进行有限元离散，由 $\delta\Pi_p = 0$，得到有限元求解方程：

$$Ka = P \qquad (4)$$

其中：$P = P_f + P_T + P_{\varepsilon_0}$　　(5)

上式中前两项是体积载荷和表面载荷引起的载荷项，而最后一项是缠绕预拉张力应变引起的载荷项：

$$P_{\varepsilon_0} = \sum_e \int_{\Omega_e} B^T D\varepsilon\,d\Omega \qquad (6)$$

从以上各式可见，缠绕结构预拉张力问题和无缠绕张力载荷的应力分析问题相比，除增加一项以初应变形式出现的载荷项 P_{ε_0} 以外，其它完全相同。

为了模拟容器的缠绕过程，本文作者提出了一种“虚实结合和逐层实化”的有限元分析策略。其基本思想是：将相同缠绕层的单元划为同一类单元，每缠绕一层只将该层上的一类单元以初应变形式出现的载荷项 P_{ε_0} 施加该层缠绕前的容器上，而当前缠绕层的缠绕张力可采用“温度参数法”加以调控。关于这一方法的详细计算过程、有效性和计算精度，本文作者已在文[12]中详加介绍和讨论，故本文中将不再赘述。

2　等张力设计的迭代方法

由直观分析和数值计算都不难知道：在压力容器的缠绕过程中，当每新增一缠绕层，就会使前面已缠绕的各层的内张力降低。为了最终达到缠绕容器的等张力状态，缠绕张力必须首层最大，且随缠绕层的增加，缠绕张力应依次递减。根据这一原则，本文作者提出了一种如图1所示的迭代求解过程：首先以设计预定的各层等张力值为各层初始缠绕张力，即图1中的直线 AA’，但当按此等张力值为缠绕张力来缠绕容器，由于缠绕过程中张力松弛，在缠绕完毕后，其各缠绕层中的张力将与原设计预定的各层等张力值不再相同，假设以曲线 BB’表示。AB 两点的应力差是表示了后续的缠绕层使该缠绕层中原设计预定的等张力值降低的总和。为了达到等张力状态，就必须对该层的张力进行补偿。一个合理的补偿量就是 AB 两点的张力差，即在该缠绕层预拉张力值应为 C 点值，依次类推，可得到各层新的各层预拉张力值，即曲线 CC’，然后，重新再进行缠绕张力计算。应注意的是，在以后迭代过程中，都将以设计预定的各层等张力值 AA’为基准张力曲线，而其与当前缠绕过程中的残余张力的差可作为下一步缠绕过程的补偿量，且叠加到前一次缠绕过程中的预拉张力上。该迭代过程将进行至缠绕层的残余张力达到预期的应力曲线 AA’时才结束。

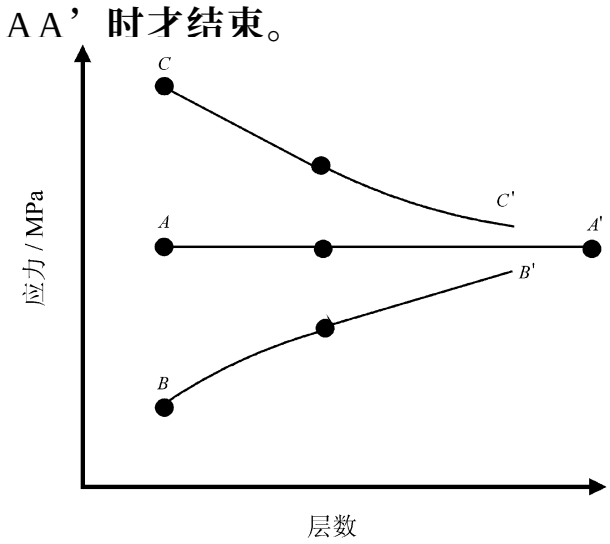

图1　迭代法示意图

Fig. 1　Illustration of the iterative method

为了清楚起见，下面给出这一过程的计算流程（参见图2）：

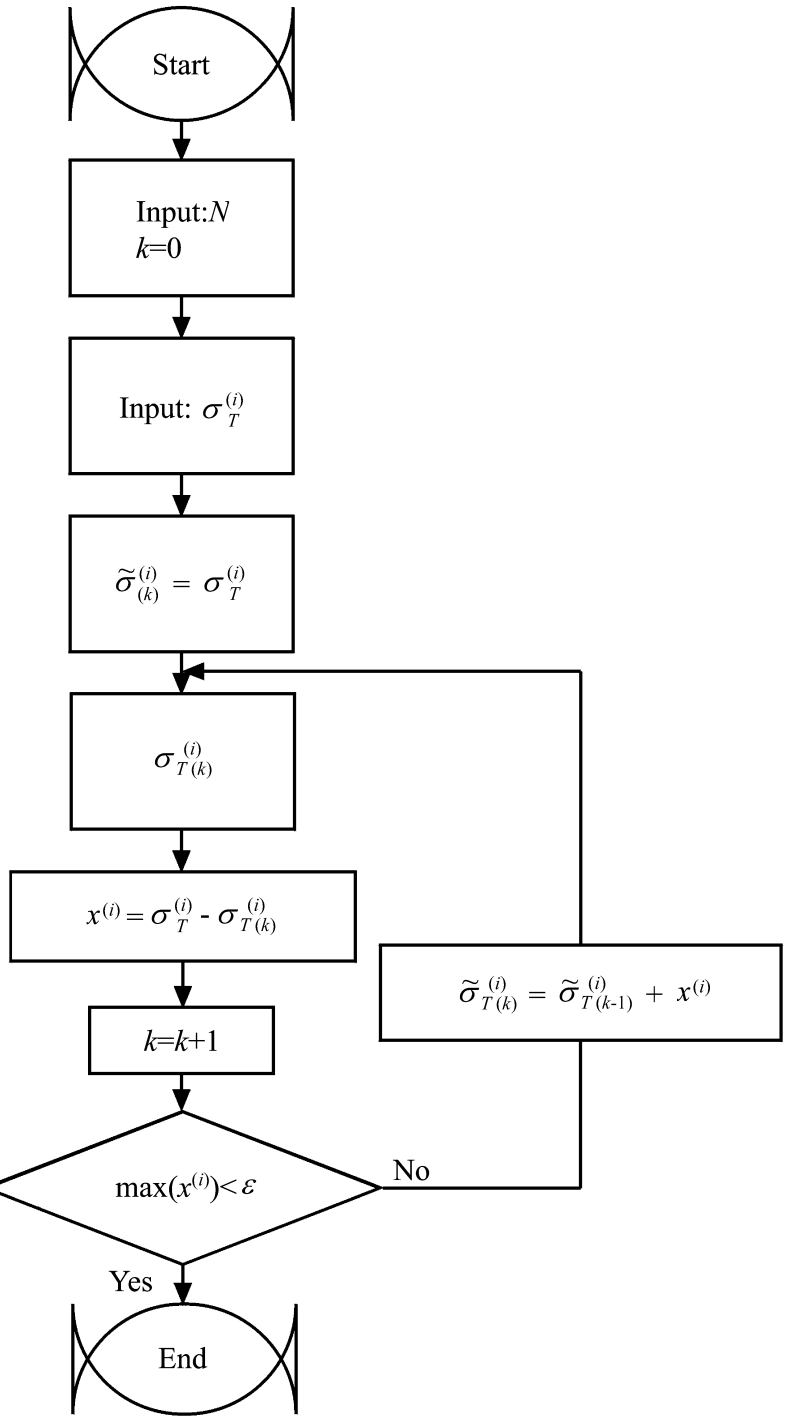

图2　等张力设计迭代法的程序框图

Fig. 2　Flow chart of iterative procedure for isotension method

考虑 N 层绕带的缠绕容器：

(1) 给定一个等张力预定值 $\sigma_T^{(i)}$，其中：$i = 1, 2, \cdots\cdots, N$；

(2) 每层的缠绕预拉张力为 $\tilde{\sigma}_{(1)}^{(i)} = \sigma_T^{(i)}$，计算后得到每层的环向应力为 $\sigma_{T(1)}^{(i)}$；

(3) 第一次对缠绕预拉张力进行迭代，每层的缠绕预拉张力应为 $\tilde{\sigma}_{(1)}^{(i)} = 2 \times \sigma_T^{(i)} - \sigma_{T(1)}^{(i)}$，计算后得到每层的环向应力 $\sigma_{T(2)}^{(i)}$；

(4) 第二次对缠绕预拉张力进行迭代，每层的缠绕预拉张力 $\tilde{\sigma}_{(2)}^{(i)} = \tilde{\sigma}_{(1)}^{(i)} + \sigma_T^{(i)} - \sigma_{T(2)}^{(i)}$，计算后得到每层的环向应力 $\sigma_{T(3)}^{(i)}$；

(5) 第 k 次对缠绕预拉张力进行迭代，每层的缠绕预拉张力应力：$\tilde{\sigma}_{(k)}^{(i)} = \tilde{\sigma}_{(k-1)}^{(i)} + \sigma_T^{(i)} - \sigma_{T(k)}^{(i)}$，计算后得到每层的环向应力 $\sigma_{T(k+1)}^{(i)}$；

(6) 直到 $\max\{\sigma_T^{(i)} - \sigma_{T(k+1)}^{(i)}\} = \varepsilon$ 为止，ε 是一个很小的数。

以上就是等张力设计迭代搜索的完整过程。在第二步中需要对容器缠绕过程进行应力分析，考虑普适性，这一分析过程采用适于缠绕过程分析的有限元方法进行，我们采用后一种方法。

3　算例讨论

算例1　考虑文[6]中以钢带为缠绕带的圆柱形容器，其参数为：容器内半径 $R_i = 250$ mm，内筒厚度 $S_n = 16$ mm，钢带规格为4 mm×80 mm，绕带层厚度 $S_d = 48$ mm，内筒外半径 $R_j = 266$ mm，绕带层外半径 $R_o = 314$ mm，内筒径比 $K_1 = 1.064$，绕带层径比 $K_2 = 1.180$，压力容器径比 $K = 1.256$，为方便起见，本文中取钢带缠绕角为0°。内筒和钢带的材料参数为：$E_0 = E_f = 2 \times 10^{11}$，$\nu = 0.3$，$\alpha = 1.2 \times 10^{-5}$。其容器横截面见图3。假定以105 MPa 作为等张力设计值。考虑其轴对称性，采用1024 个八结点轴对称块单元，由前面所述迭代方法结合本文作者提出的缠绕过程分析的有限元方法对其进行计算。经过5 次迭代后，缠绕层达到了预期的105 MPa 的等张力状态。每次迭代后缠绕预拉张力和在其缠绕张力缠绕完毕后的每层中环向应力计算结果见图4。

在文献[6]中给出了该问题的缠绕完毕第 k 层钢带的环向应力解析公式，其为：

$$\sigma_{d\theta} = (\sigma_0)_k \cos^2\alpha - \frac{r^2 - R_i^2}{2r^2}(\sigma_0)_k \cos^2\alpha \ln\frac{R_{k+1}^2 - R_i^2}{r^2 - R_i^2} + \sum_{m=k+1}^{M}(\sigma_0)_m \cos^2\alpha \ln\frac{R_{m+1}^2 - R_i^2}{R_m^2 - R_i^2} \qquad (7)$$

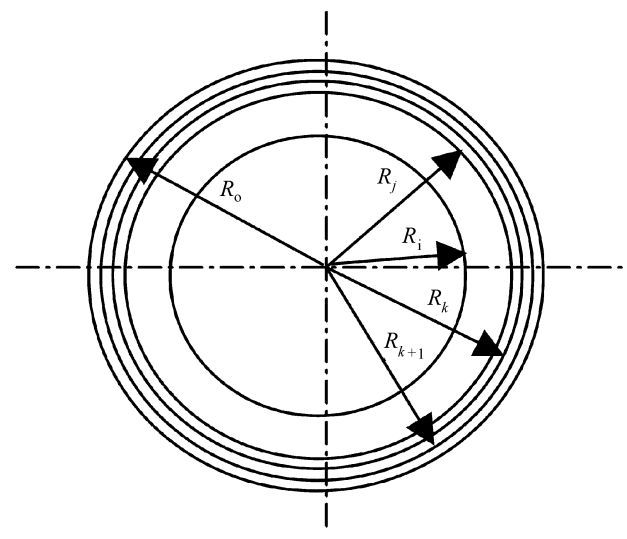

图3　容器横截面

Fig. 3　The cross section of the vessel

式中：$(\sigma_0)_k$ 为第k 层钢带的平均缠绕预拉应力。进行同样的迭代计算，经过7 次迭代后达到了预期的105 MPa 等张力状态。每次迭代的计算结果在图5 中绘出。

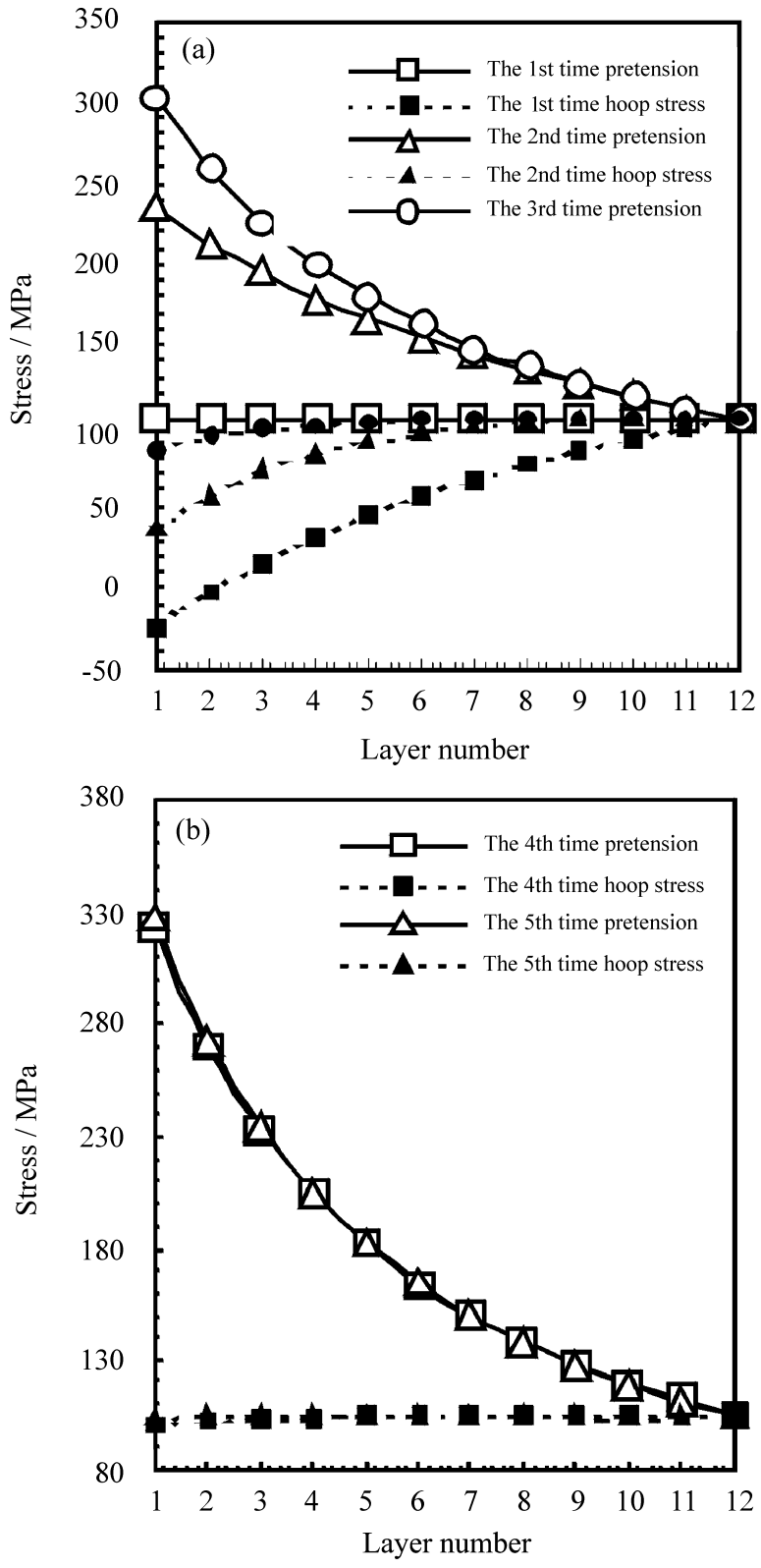

图4　有限元方法迭代的计算结果

Fig. 4　Iterative results using the finite element method

比较图4 和图5 发现，两种计算均可实现等张力设计，但两者所得的缠绕预拉张力的大小和梯度不同，具体数值见表1 和图6。其中 $\Delta\sigma$为：

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma(i) - \sigma_{文}(i)}{\sigma_{文}(i)} \times 100\% \qquad (8)$$

式中：$\sigma_{文}(i)$ 为文献计算结果；$\sigma(i)$ 为本文计算结果。可见利用有限元法给出较低的预拉张力设计，特别是对于前几层，降低的幅度还是相当可观的。显然，这更便于实际应用。

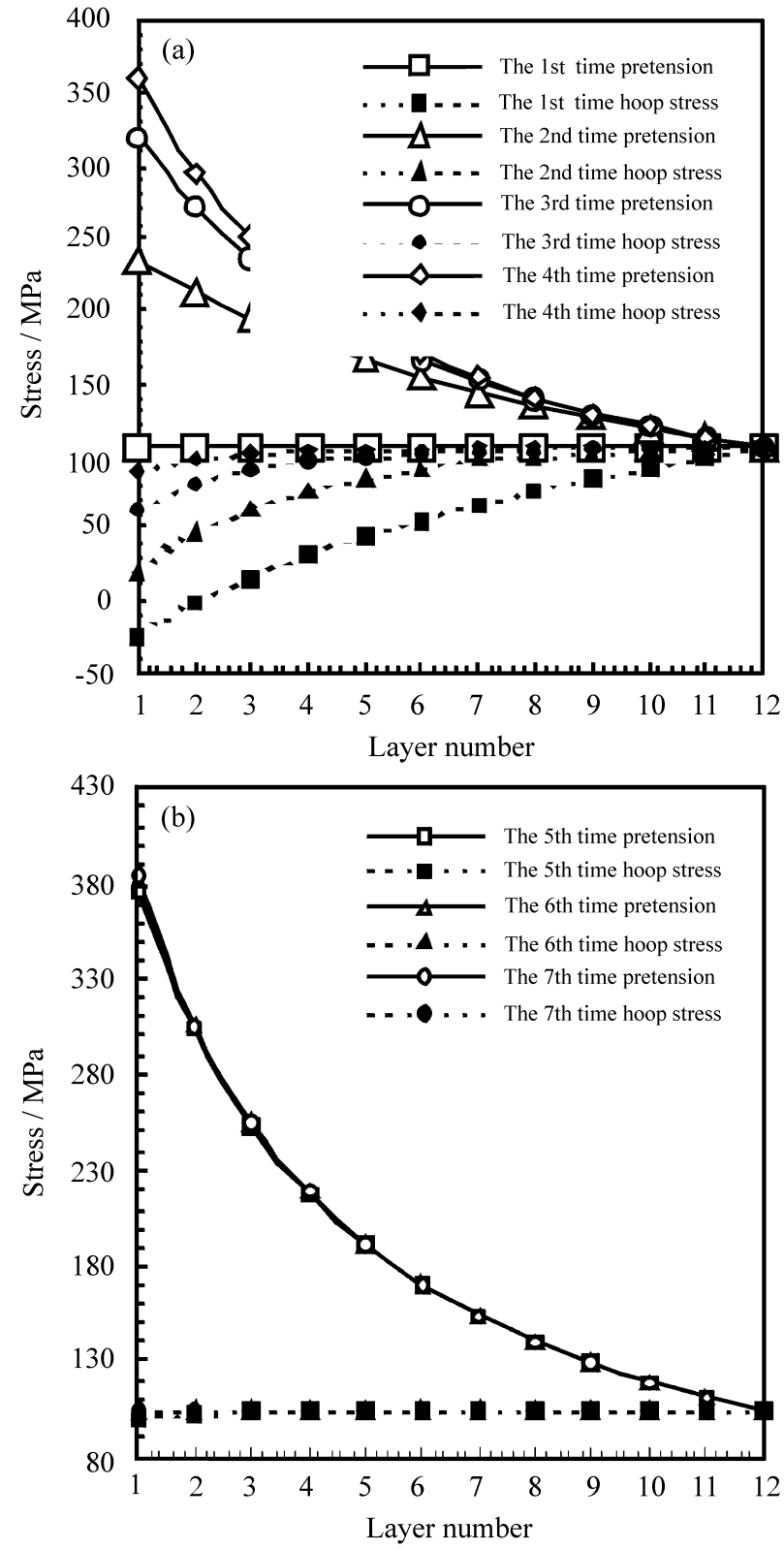

图5　公式（7）的迭代计算结果

Fig. 5　Iterative results using equation (7)

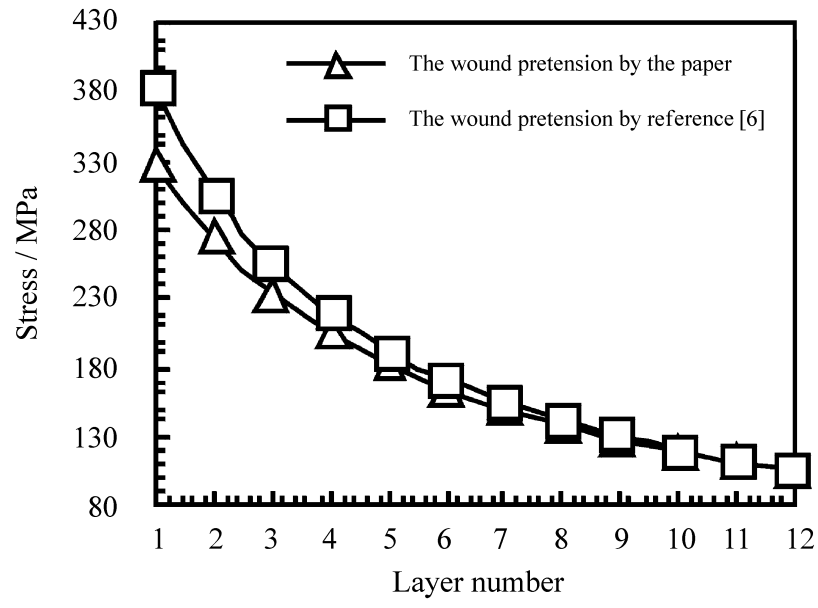

图6　公式（7）和本文预张力的比较

Fig. 6　Comparison of the pretension using FE and equation (7)

表1　等张力设计，文[6]　和本文缠绕预拉张力的比较(MPa)

Table 1　Isotension design, comparison of pretensions using FEM and equation (7)

层数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
文[6]	384	306.5	255.1	218.6	191.5	170.5	153.9	140.3	129.2	119.8	111.8	105
本文	327.3	273.5	234	205.2	182.3	164.3	149.4	137.9	127.6	118.4	111.4	105
$\Delta\sigma$	14.7	10.7	8.3	6.1	4.8	3.6	2.9	1.7	1.2	1.2	0.4	0

表2　等张力设计，文[7]　和本文缠绕预拉张力的比较(MPa)(式(9)～式(11))

Table 2　Isotension design, comparison of pretension using FEM and equations (9)～(11)

层数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
文[7]	4.87	3.63	2.90	2.41	2.07	1.81	1.61	1.45	1.32	1.21	1.11	1
本文	1.23	1.21	1.18	1.16	1.14	1.12	1.1	1.07	1.05	1.04	1.02	1
$\Delta\sigma$	75	67	59	52	45	38	32	26	20	14	8	0

算例2　文献[7]研究了以玻璃纤维为缠绕带的圆柱形金属薄壳内衬的缠绕张力公式。如果缠绕完毕后，筒体各层纤维处于等张力状态，各层纤维预拉张力为：

$$T_{0i} = T\frac{1+n\lambda}{(1+i\lambda)(1+(i-1)\lambda} \qquad (9)$$

$$\lambda = \frac{E_f h_f}{E_0 h_0} \qquad (10)$$

$$\sigma = -\frac{nT}{h_0 t} \qquad (11)$$

σ 为缠绕完毕之后金属内筒的应力；n 为总的纤维缠绕层数；h_0 为金属筒厚度；t 为缠绕纱束的纱片宽度；i 为已缠绕玻璃纤维层数；E_f 为玻璃纤维模量；E_0 为金属筒模量；h_f 为缠绕后每层玻璃纤维厚度。

在设计中若给出 σ，则可由式(11)、式(10)和式(9)确定等张力状态的缠绕预张力。

考虑一纤维缠绕压力容器，其几何尺寸：内径 $r = 135$ mm，内衬的厚度 $h_0 = 0.8$ mm，每层的厚度为 $h_f = 0.125$ mm，缠绕层共 $n = 12$ 层，$t = 6$ mm。$E_0 = 91.06$ MPa，$E_f = 231.4$ GPa，$E_2 = E_3 = 13.2$ GPa，$\mu_3 = 0.25$，$\mu_2 = \mu_3 = 0.28$，$G_{12} = G_{13} = 9.17$ GPa，$G_{23} = 5$ GPa。

假定以1 MPa 作为等张力设计值，采用了八结点轴对称块单元，进行如算例1同样计算，经过7次迭代得到了使纤维缠绕层中达到1 MPa 等张力状态的缠绕预拉张力，迭代过程的各步结果在图7中绘出。此时，内衬的环向应力为-1.89 MPa。

若将 $\sigma = -1.89$ MPa 代入式(11)，并利用式(9)和式(10)进行等张力设计，所得结果在图8和表2中给出。

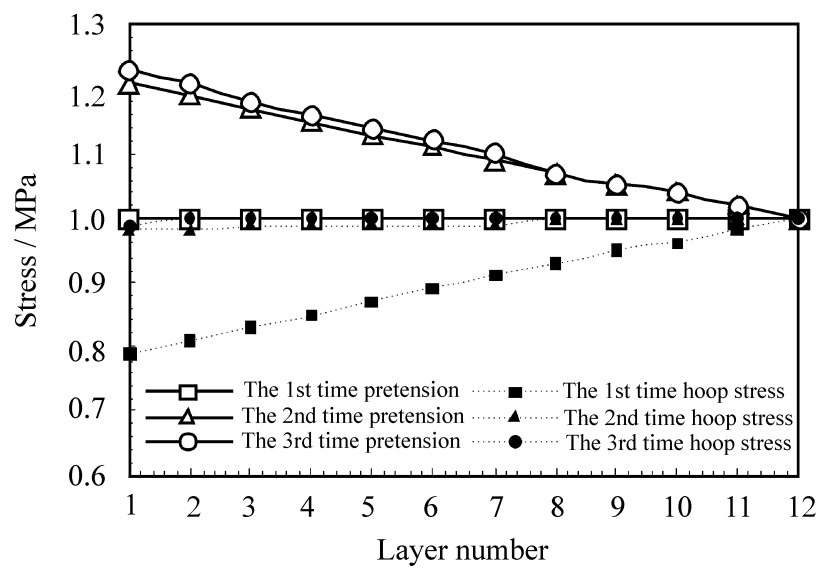

图7　有限元方法迭代计算结果

Fig. 7　Iterative results using FEM

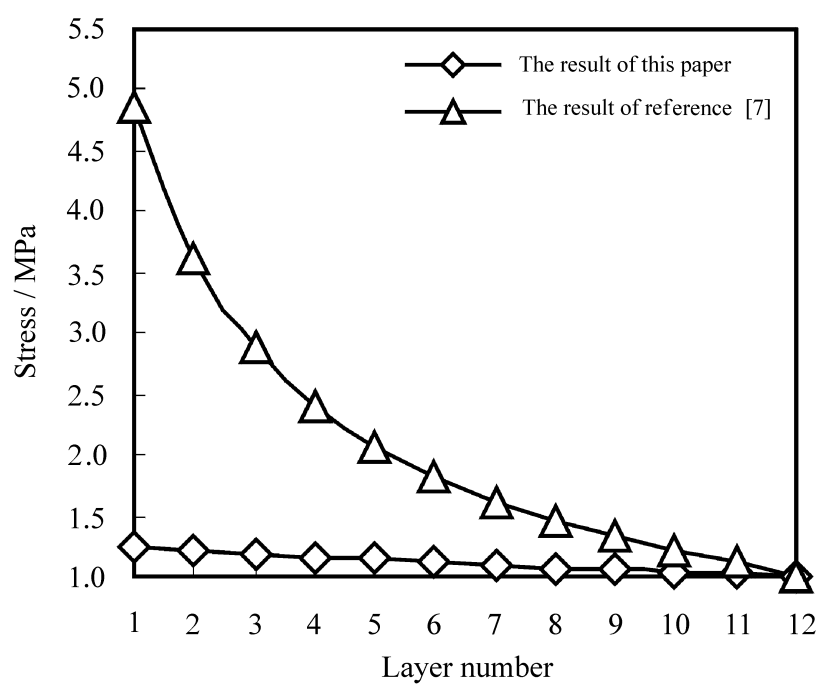

图8　文[7]和本文预张力的比较

Fig. 8　Comparasion of the pretension using FE and reference [7]

可见用以上公式进行等张力设计，在某种情况下会在首层内给出过高的预拉张力值，表明这套等张力设计公式存在着某种局限性：当 $\lambda = \frac{E_f h_f}{E_0 h_0}$ 较大时，由式(9) 计算的第一层预拉张力必定大大高于第二层预拉张力，将导致不合理的结果。而应用本文中的迭代算法结合缠绕过程有限元分析方法，给出更为合理、便于实际应用的等张力设计。

4 结　论

本文作者所提的等张力设计的迭代搜索法结合缠绕过程分析的有限元方法可以对钢带或纤维缠绕压力容器进行等张力设计。该方法较以往简化的解析方法更为合理，并易于实现。具有更广泛的适用性。

参考文献:

[1] ertiny P, Ellyin F. Influence of the filament winding tension on physical and mechanical properties of reinforced composites [J]. Composites: Part A, 2002, 33(12): 1615 - 1622.

[2] Mertiny P, Ellyin F. Selection of optimal processing parameters in filament winding [A]. In: Proceedings of 33 International SAMPE Technical Conference [C]. Seattle, 2001. 1084 - 1095.

[3] Banerjee A, Sun L, Mantell S C, et al. Model and experimental study of fiber motion in wet filament winding [J]. Composites: Part A, 1998, 29A(3): 251 - 263.

[4] Cohen D. Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength [J]. Composites: Part A, 1997, 28A(3): 1035 - 1047.

[5] Cohen David, Mantell Susan C, Zhao Liyang. The effect of fiber volume fraction on filament wound composite pressure vessel strength [J]. Composites: Part B, 2001, 32(5): 413 - 429.

[6] 朱国辉，郑津洋著. 新型绕带式压力容器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995. 20 - 80.

[7] 丁宝庚，杨福江. 缠绕张力公式研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2000, 6(11): 3 - 6.

[8] Calius E P, Springer G S. A model of filament wound thin cylinders [J]. Int J Compos Mater, 1990, 24(3): 1270 - 1298.

[9] 丁宝庚，杨福江，王　艳. 端部缠绕纤维张力状态分析的有限元[J]. 玻璃钢/复合材料, 2001, 3(5): 3 - 5.

[10] Keppner Evan A, Hahn H Thomas. Effect of radial stress relaxation on fibre stress in filament winding of thick composites [J]. Composites Manufacturing, 1995, 6(1): 67 - 77.

[11] 王勖成，邵　敏编著. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清化大学出版社, 1995. 365 - 395.

[12] 任明法，郑长良，陈浩然. 具有内衬的缠绕容器缠绕预拉张力工艺的研究[A]. 见: 袁明武，陈　璞编. 中国计算力学大会2003 论文集[C]. 北京, 2003. 1041 - 1046.