

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.12.013

碳纤维等级对迫击炮复合身管多目标优化设计的影响^{*}李博¹,熊超¹,邓辉咏¹,殷军辉¹,高建勋²,李泽斌²

(1. 陆军工程大学,石家庄 050003; 2. 河北太行机械工业有限公司,石家庄 050003)

摘要: 将高性能碳纤维用作迫击炮身管外部增强层,可大大降低身管质量。在湿法缠绕工艺中,针对缠绕张力对金属内衬的强化效应,基于正交各向异性材料的厚壁圆筒理论和基于小变形假设的弹性叠加理论,提出了适用于多角度分层缠绕的内衬预应力离散叠加算法。针对复合身管中受内压的薄壁内衬碳纤维缠绕圆筒典型结构,以复合身管质量和抗弯刚度为优化目标,提出了基于多岛遗传算法的复合身管多目标优化设计方法。通过不同材料搭配方案的 Pareto 解集对比表明, M46 方案相比 T300 和 T700 方案质量更轻、刚度更高,其中 Ni_2 / M46 方案优化效果最好,说明高模量碳纤维更具轻量化优势,并通过有限元仿真和水压试验验证了优化结果的有效性。

关键词: 复合身管; 内衬预应力; 缠绕张力; 多岛遗传算法; 抗弯刚度

中图分类号: TB322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)12-0064-06

Influence of Carbon Fiber Types on Multi-Objective Optimum Design of Mortar Composite Barrel

Li Bo¹, Xiong Chao¹, Deng Huiyong¹, Yin Junhui¹, Gao Jianxun², Li Zebin²

(1. Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China; 2. Hebei Taihang Machinery Industries Co., Ltd., Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The application of high performance carbon fiber as the mortar barrel external enhancement layers can greatly reduce the mass of barrel made by pure metal. During the wet-winding process of composite barrel, the winding tension of carbon fiber will enhance the metal liner performance greatly with an internal loading pressure. A discrete superposition algorithm of liner prestress, which coated by a multi-angle layered winding carbon fiber layers, was proposed, based on thick-cylinder theory with the orthotropic mechanics and elastic superposition theory with the small deformation assumption. For the typical structure of filament winding cylinder with thin wall liner in composite barrel, a multi-objective optimization design method was proposed. The optimization targets are the strength and bending stiffness of composite barrel. The Pareto solution sets of different materials collocation schemes show that the M46 schemes are more light and rigid than T300 and T700 schemes, indicating that carbon fibers with high modulus has more lightweight advantages, and the Ni_2 / M46 scheme is more light and rigid than all other schemes. The validity of the optimization results is verified by the finite element simulation and the hydraulic pressure test.

Keywords: composite barrel; liner prestress; winding tension; multi-island genetic algorithm; flexural stiffness

将高性能碳纤维缠绕制品应用于火炮身管、发射筒、导弹外壳等结构,可大大降低装备整质量,是军事装备轻量化的热门研究领域之一^[1-3]。

在复合身管制造工艺中,缠绕机在纤维束施加一定张力,使之层层缠绕于金属内衬上,并使内衬产生有益的预应力。在传统的纤维缠绕制品中,纤维层剩余应力的分布对缠绕制品的性能至关重要,因此纤维层剩余应力分布的准确计算和缠绕张力的精确控制一直是研究热点。刘成旭等^[4]认为已缠绕张力引起的芯模径向变形对剩余张力分布的影响不可忽略,并将纤维层简化为各向同性材料,推导了具有柔性芯模的等剩余应力算法。康超等^[5]基于纤维层的各向异性属性推导了剩余张力计算公式,并给出了等剩余张力计算公式。

为确保复合身管同时具有较高的强度和抗弯刚度,纤维层一般由环向层、纵向层和螺旋层等特定功能层组成^[6]。而对于多种角度缠绕而成的复合圆筒,精确计算其抗弯刚度相当困难^[7]。文献[8]通过忽略拉弯耦合效应,得到了基于三维等效模量的抗弯刚度公式。文献[9]考虑不同角度缠绕层之间的相互影响,推导出非经典复合材料弯曲梁理论,得到了任意铺层下的复合圆筒抗弯刚度计算方法,且理论与试验吻合较好。

文献[4]和文献[5]中只研究了单一缠绕角下剩余应力的分布,笔者通过合理的假设,将剩余应力

^{*} 军队重点攻关项目(ZS2015070132A12002)

联系人:熊超,博士,副教授,主要从事装备轻量化技术研究

收稿日期:2017-10-07

计算方法推广到多角度分层缠绕的情况中。通过纳入纤维缠绕张力对内衬的强化效应,基于多岛遗传算法提出了复合身管强度和抗弯刚度的优化设计方法。分别以 Ni_2 炮钢、TC11 钛合金为内衬材料,采用三种不同等级的碳纤维 (T300, T700, M46) 增强 E51 环氧树脂为纤维层,即以 E51/T300, E51/T700 和 E51/M46 为纤维层,着重研究了不同内衬材料和碳纤维等级对内衬预应力和复合身管轻量化效能的影响。

1 理论计算

1.1 复合身管缠绕模型

复合身管缠绕模型如图 1 所示。如图 1,复合身管模型由外向内分别为碳纤维缠绕层、薄壁内衬。内衬预应力计算和内压应力计算基于以下假设:(1) 缠绕后的每层纤维皆为正交各向异性的均匀介质,且为标准的圆柱筒形;(2) 各纤维层之间连接紧密,忽略纤维摩擦力,缠绕张力引起的径向力均匀分布,且忽略轴向和切向作用;(3) 内衬为标准圆柱,纤维层径向压力在其外表面均匀分布;(4) 假设所有变形均在弹性极限之内,变形均为小变形,可应用弹性叠加原理。

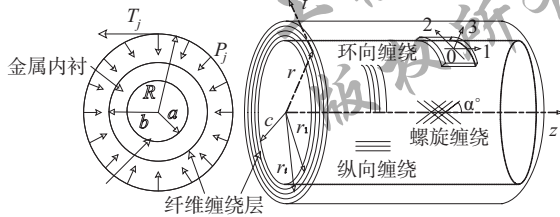


图 1 柱坐标系下复合身管模型

1.2 内衬预应力和纤维层剩余应力计算

内衬预应力和纤维层剩余应力计算采用离散叠加法,由假设 (2) 可知复合圆筒应力状态退化为 r - t 二维平面应力状态。由假设 (3) 可知内衬受均匀外压,应用厚壁圆筒理论可得其径向位移 U_{ir} 、径向应力 σ_{ir} 和环向应力 σ_{it} 表达式为:

$$\begin{cases} U_{ir} = \frac{1}{E_L} \left[-(1 + V_L) \right] \frac{A_L}{r} + 2(1 - V_L) C_L r \\ \sigma_{ir} = \frac{A_L}{r^2} + 2C_L \\ \sigma_{it} = -\frac{A_m}{r^2} + 2C_L \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中:下角标 i 为第 i 层纤维张力对内衬的作用, E_L , V_L 为内衬材料拉伸弹性模量和泊松比, A_L , C_L 为待定系数, r 为身管半径。

纤维层从当前缠绕层 i 层向内取第 j 层,已知第

j 层缠绕角为 α_j 。由文献 [4] 可知,其径向位移 U_{ijr} 、径向应力 σ_{ijr} 和环向应力 σ_{ijt} 表达式为:

$$\begin{cases} U_{ijr} = C_{ij1} r^{\beta_j} + C_{ij2} r^{-\beta_j} \\ \sigma_{ijr} = C_{ij1} \frac{\beta_j \bar{S}_{j22} - \bar{S}_{j23}}{\bar{S}_{j22} \bar{S}_{j33} - \bar{S}_{j23}^2} r^{\beta_j-1} - C_{ij2} \frac{\beta_j \bar{S}_{j22} + \bar{S}_{j23}}{\bar{S}_{j22} \bar{S}_{j33} - \bar{S}_{j23}^2} r^{-\beta_j-1} \\ \sigma_{ijt} = C_{ij1} \frac{\bar{S}_{j22} - \beta_j \bar{S}_{j23}}{\bar{S}_{j22} \bar{S}_{j33} - \bar{S}_{j23}^2} r^{\beta_j-1} + C_{ij2} \frac{\bar{S}_{j22} + \beta_j \bar{S}_{j23}}{\bar{S}_{j22} \bar{S}_{j33} - \bar{S}_{j23}^2} r^{-\beta_j-1} \end{cases} \quad (2)$$

式 (2) 中,下角标 ij 表示第 i 层缠绕张力对第 j 层的作用, C_{ij1} , C_{ij2} 为待定系数, $\beta_j = \sqrt{\bar{S}_{j23}/\bar{S}_{j22}}$, $\bar{S}_{j23}$, $\bar{S}_{j33}$, $\bar{S}_{j22}$ 为第 j 层纤维的偏轴柔度系数。

纤维层缠绕完毕后,由假设 (4) 可知内衬环向预应力 $\sigma_{Lt}^{(n)}$, $\sigma_{Lr}^{(n)}$ 和纤维层环向剩余应力 $\sigma_{jt}^{(n)}$, $\sigma_{jr}^{(n)}$ 为所有缠绕张力作用之和,即:

$$\begin{cases} \sigma_{Lt}^{(n)} = \sum_{j=1}^n \sigma_{jLt} \\ \sigma_{Lr}^{(n)} = \sum_{j=1}^n \sigma_{jLr} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \sigma_{jt}^{(n)} = \sum_{i=j+1}^n \sigma_{ijt} + \frac{T \sin \alpha_i}{t_0 B_0} \\ \sigma_{jr}^{(n)} = \sum_{i=j+1}^n \sigma_{ijr} + \frac{T \sin \alpha_i}{t_0 r_i} \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) 中, T 为缠绕张力, t_0 , B_0 分别为缠绕带厚度和宽度。

1.3 内衬和纤维层实际应力计算

迫击炮身管为典型的滑膛炮,其主要承受火药燃气的内压力,轴向力忽略不计。若忽略不同角度缠绕层泊松比不耦合的影响,则受轴对称内压下的应力状态可简化为平面应力状态,内衬和纤维层位移函数和应力函数仍可用式 (1) 和式 (2)。内衬和纤维层实际应力为水压应力 $\sigma^{(n)}$ 和缠绕张力的剩余应力 $\sigma^{(n)}$ 之和,即:

$$\sigma = \sigma^{(n)} + \sigma^{(P)} \quad (5)$$

1.4 抗弯刚度计算

复合圆筒纤维层具有多种缠绕角度,选用基于三维等效模量的抗弯刚度计算方法,则单层纤维的轴向等效模量为 $E_z^{[7]}$:

$$E_z = \frac{A_{11} A_{22} - A_{12}^2}{A_{22} t_0} \quad (6)$$

其中 A_{11} , A_{12} , A_{22} 为纤维层刚度参数^[10]。

则复合圆筒的抗弯刚度 k 为内衬抗弯刚度和各层纤维抗弯刚度的总和:

$$k = \sum_{j=1}^n \frac{E_{jz} \pi (r_j^4 - r_{j-1}^4)}{4} + \frac{E_L \pi (b^4 - a^4)}{4} \quad (7)$$

其中, E_{jz} 为第 j 层纤维轴向等效模量, r_j , r_{j-1} 为

第 j 层纤维内外半径, a 和 b 为分别内衬内外半径。

2 内衬材料和碳纤维等级选取

身管内衬材料选用具有代表性的炮钢 35CrMnNi₂MoVA(简称 Ni₂ 钢)和 TC11 高强度钛合金。Ni₂ 钢屈服强度高、抗断裂韧性强、高温性能好;TC11 钛合金屈服强度较高,密度小,比强度和比模量高,具体材料参数见表 1。

表 1 内衬材料参数

材料	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/GPa	ν	σ_b/MPa
TC11	4 480	123	0.33	900
Ni ₂	7 780	209.6	0.29	1 226

注: ρ , E , ν , σ_b 分别为密度、弹性模量、泊松比和屈服强度。

选取 T300, T700, M46 三种等级碳纤维用作复合身管增强层,对比分析纤维拉伸弹性模量和强度对复合身管优化设计的影响,其中 M46 的拉伸弹性模量高达 436 GPa,而 T300, T700 的拉伸弹性模量只有 230 GPa, T700 拉伸强度最高, T300 拉伸强度最低,其具体力学性能参数见表 2、表 3。

表 2 单向碳纤维复合材料参数

项目	T700/E51	T300/E51	M46/E51
E_1/GPa	147	150	270
$E_2=E_3/\text{GPa}$	9.8	10.1	12.7
$\nu_{12}=\nu_{13}$	0.29	0.28	0.29
ν_{23}	0.3	0.3	0.3
$G_{12}=G_{13}/\text{GPa}$	6.1	5.9	6.3
G_{23}/GPa	4.8	4.95	5.2
$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 544	1 580	1 532

注: E_1 , E_2 , E_3 , ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} , G_{12} , G_{13} , G_{23} 分别为材料三方向的弹性模量、泊松比和剪切模量。

表 3 单向碳纤维复合材料强度参数

材料	X_t/MPa	X_c/MPa	$Y_t=Z_t/\text{MPa}$	$Y_c=Z_c/\text{MPa}$	S/MPa
T700/E51	2 430	1 475	69	220	121
T300/E51	1 777	1 160	68	210	112
M46/E51	1 912	1 278	70	257	120

注: X_t , X_c , Y_t , Y_c , Z_t , Z_c 分别为材料三方向拉伸压缩强度, S 为剪切强度。

分别将两种内衬材料与三种等级碳纤维进行组合,共有六种方案。复合身管纤维层由内向外分别为螺旋层、纵向层和环向层组成^[6]。

3 基于多岛遗传算法的优化方法

多岛遗传算法改进于传统的遗传算法,该算法将全部种群划分为相互隔离的“岛屿”,各个种群独立进化,并周期性地在各个“岛屿”之间进行迁移操作,有效克服了传统遗传算法易于陷入局部最优解(早熟)的缺陷,同时其并行计算方式大大提高了计算效率,非常适用于解决复杂的多目标非线性优化问题^[12]。

3.1 优化目标

较之传统金属身管,复合材料身管拥有强度高、重量轻、刚度高的优势,以复合身管的质量 m 和抗弯刚度 k 为优化目标。复合身管质量可由单位长度截面质量 m 来表示。

3.2 内衬失稳系数和强度安全系数

金属内衬采用第四强度理论,身管强度设计通常采用安全系数的方法,因此给定内衬安全系数为 f_2 ,则内衬实际应力与安全系数的乘积应小于屈服强度。

3.3 纤维层强度比

在纤维复合材料强度设计中,常采用 Tsai-Wu 强度比 R 来表示设计的安全裕量^[13-14]:

$$R = \frac{\sigma_{ia}}{\sigma_i} = -\frac{B}{2A} + \sqrt{\left(\frac{B}{2A}\right)^2 + \frac{1}{A}} \quad (8)$$

式(8)中: σ_{ia} 为应力分量 σ_i 对应的极限应力分量, A , B 分别为强度计算参量^[14]。当 $R > 1$ 时,说明实际应力值小于极限应力值,纤维层是安全可靠的,有安全裕量;当 $R=1$ 时,实际应力值刚好等于极限应力值,材料发生破坏失效;实际情况中, $R < 1$ 是不存在的,当 $R=1$ 时结构已经发生破坏,但可以检验设计强度是否达标。显然纤维层强度比应由强度比最低的一层决定。

3.4 优化函数和优化参数设置

优化变量有:螺旋层数 n_1 、纵向层 n_2 、环向层数 n_3 都为离散整数变量;内衬厚度 t 、纤维缠绕张力 T 为连续变量。给定内衬防失稳安全系数不小于 1.1,内衬强度安全系数不小于 1.4,纤维层强度比不小于 2。在纤维缠绕工艺中,为保证缠绕质量,缠绕张力取 10~60 N。按照实际机械加工能力,内衬厚度不可能无限薄,取内衬最薄厚度为 0.5 mm。

则完整的优化函数为:

$$\text{Min} : F_1(X)=M ; \text{Max} : F_2(X)=K$$

$$\text{式中: } (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)^T = (n_1, n_2, n_3, t, T)^T,$$

$$M = \frac{m(x)}{m_0}, K = \frac{k(x)}{k_0}$$

从属于 $f(x) \geq 1.4$, $R(x) \geq 2$, $1 \leq n_1, 1 \leq n_2$, $1 \leq n_3, 0.0005 \leq t, 10 \leq T \leq 60$,

其中, F_1 为质量优化函数, F_2 为刚度优化函数, f 为内衬安全系数, M 为复合身管与原金属身管质量比, m 为复合身管与原金属身管质量, m_0 为原金属身管质量, K 为复合身管与原金属身管刚度比, k_0 为原金属身管弯曲刚度。

多岛遗传算法的参数选择见表4。

表4 多岛遗传算法参数选择

参数	数值
进化代数	50
岛屿个数	10
岛屿上的个体数	10
迁移间隔	5
交叉概率	0.9
变异概率	0.03
迁移概率	0.4

4 优化算例及分析

图2、图3分别为炮钢方案和钛合金方案优化结果分布图。

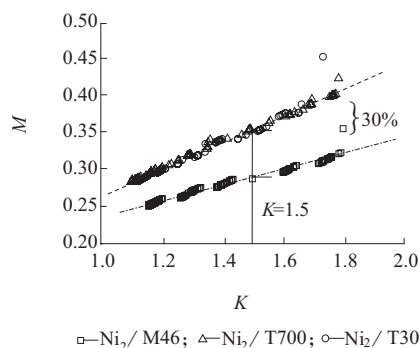


图2 以Ni₂炮钢为内衬的 Pareto 解集

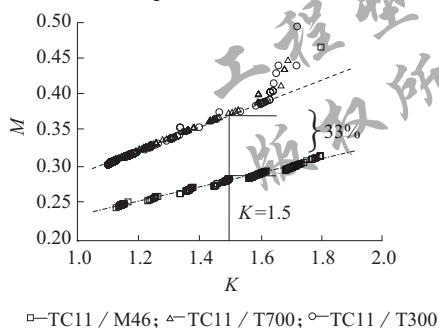


图3 以TC11为内衬的 Pareto 解集

内衬材料有Ni₂炮钢和钛合金两种,纤维层材料有E51/T300, E51/T700和E51/M46三种,则共6种方案。已知最高膛压60 MPa,将6种方案代入优化过程,得到各个方案的 Pareto 最优解集,图2和图3分别为Ni₂和TC11为内衬材料时的最优解集。

图2和图3中,M46方案的 Pareto 解集均分布在T700和T300方案的 Pareto 解集下方,当刚度系数 $K=1.5$ 时,M46方案较之T700和T300方案,Ni₂内衬和TC11内衬方案的重量要分别小30%和

33%,说明相比T700和T300方案,M46方案具有更大的减重优势和刚度优势。T700方案和T300方案的 Pareto 解集分布基本重合,T700比T300强度高的优势并不明显。因此,当复合材料身管对强度和刚度都有较高要求时,就T300,T700和M46三种等级的碳纤维而言,碳纤维高模量的属性比高强度的属性更有利于减重。

图4为T700方案优化结果分布,为TC11/T700和Ni₂/T700的 Pareto 解集对比。图5为M46方案优化结果分布图,为TC11/M46,Ni₂/M46方案的 Pareto 解集对比。由图5可知,Ni₂/T700方案的 Pareto 解集均分布在TC11/T700方案上方,当刚度系数为 $K=1.5$ 时,Ni₂/T700方案比TC11/T700方案重量轻19%。Ni₂/T700方案明显优于TC11/T700方案,因为TC11的弹性模量比Ni₂低很多,需要更多的纤维层弥补抗弯刚度的不足,当纤维层为T700时,TC11密度低的优势不足以抵消纤维层增多的质量,减重效果反而不如Ni₂方案。

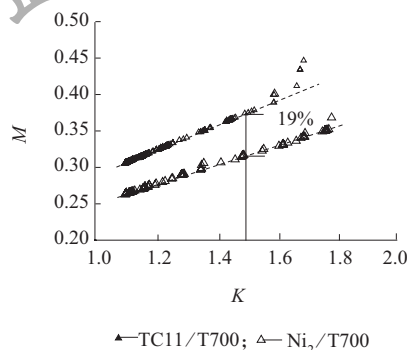


图4 TC11/T700和Ni₂/T700的 Pareto 解集对比

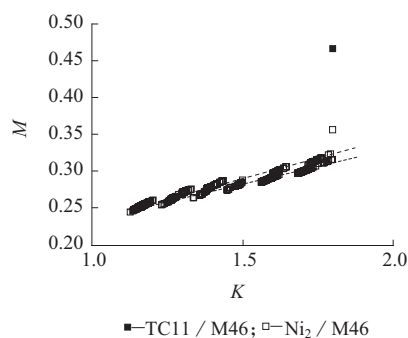


图5 TC11/M46和Ni₂/M46的 Pareto 解集对比

由图5可知,TC11/M46,Ni₂/M46两种方案的 Pareto 解集基本重合,Ni₂/M46方案稍稍好于

表5 各个变量优化结果

螺旋层数 n_1	环向层数 n_2	环向层数 n_3	内衬厚度 t/mm	缠绕张力 T/N	刚度比 K	质量比 M	纤维层强度比 R	内衬强度比 f_2
4	12	9	1.65	20.5	1.3	0.35	2.13	1.84

TC11 / M46 方案,因此再次证明了 Ni_2 炮钢比 TC11 钛合金更适合做内衬。同时发现,相比于 T700 做外部增强层, M46 做增强层使 TC11 方案与 Ni_2 方案的差距缩小。通过上述比较可知, Ni_2 / M46 方案的优化效果最好,在满足一定强度和抗弯刚度要求时,减重效果最优。

5 有限元仿真及试验

为验证理论计算和优化结果的有效性,分别通过 Abaqus 有限元仿真进行抗弯刚度验证,和复合圆筒水压试验进行强度验证。选取抗弯刚度比 $K=1.3$ 时的优化方案,各个优化变量如表 5 所示。

5.1 抗弯刚度有限元仿真

在 Abaqus 中为复合身管和原金属身管建立三维有限元模型,全长 1.4 m。为模拟纯弯曲受力状态,在身管两端面的圆心建立参考点,令参考点与端面进行耦合,在两端面的参考点施加等量反向的力矩,并在身管中面施加平面约束,使身管受力状态接近于纯弯曲状态。

图 6 为复合身管轴向应变分布图,选用复合身管和金属身管中面内膛的顶点作为应变测量点,对于小变形下、纯弯曲情况下有如下的公式^[7]:

$$\varepsilon_z = \frac{a}{K} M \quad (9)$$

式 (9) 中, M 为弯矩载荷, K 为总抗弯刚度, ε_z 为轴向应变, a 为内膛半径。



图 6 复合身管轴向应变 ε_z 分布图

图 7 为两种身管应变-弯矩图,在较小的载荷下应变-弯矩呈现较好的线性关系,可以用斜率的倒数反映抗弯刚度的大小,斜率越大表示抗弯刚度越差,相同弯矩下应变越大。则抗弯刚度比 K 即为两条直线斜率的反比,得刚度比为 1.34,略大于理论计算结果,说明抗弯刚度的计算和优化结果较好。

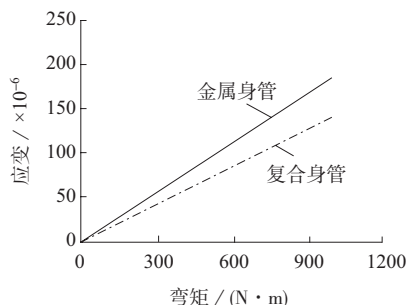


图 7 应变-弯矩图

5.2 复合身管水压试验

(1) 试验材料。

碳纤维: M46J-6K 型,日本东丽公司;

环氧树脂: E51 型,无锡蓝星石油化工有限公司;

TC11 钛合金: 河北太行机械工业有限公司。

(2) 主要试验设备。

数控缠绕机: XCL-048 型,连云港市中通复合材料设备有限公司;

DC 型电热恒温干燥箱: 宁波红菱电热烘箱有限公司;

水压静压试验台: JY-HT-200 / 70-A 型,上海馨予液压机电设备有限公司。

按照表 5 中优化后的参数制作了复合身管,内衬材料为 TC11 钛合金,纤维层为 M46 / E51 复合材料,采用湿法缠绕工艺等张力缠绕。复合身管进行水压试验,两段开口采用橡胶圈密封,轴向可以自由伸缩。选取纤维层外表面应变测量代替内衬应变测量,应变测量点见图 8。

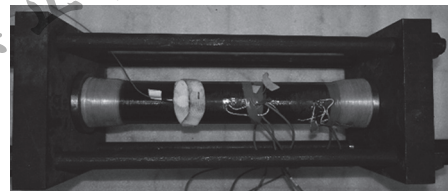


图 8 复合身管水压试验和应变测量点

图 9 为复合身管外缘环向应变-载荷曲线,由图 9 可知复合身管经历了两个变形阶段: 内衬弹性变形阶段和塑性变形阶段。根据应变-载荷曲线斜率的变化可知,内衬屈服前的最大水压载荷约为 104 MPa,内衬安全系数为 1.8,略比优化结果 1.84 稍低。随着水压载荷继续增加,内衬发生屈服进入塑性变形阶段,应变-载荷曲线斜率增大,最终的爆破压力高达 118 MPa。纤维层外部的环向层和纵向层完全碎裂脱离,钛合金内衬产生了不均匀的塑性变形但未破裂,详细破坏样貌如图 10 所示。

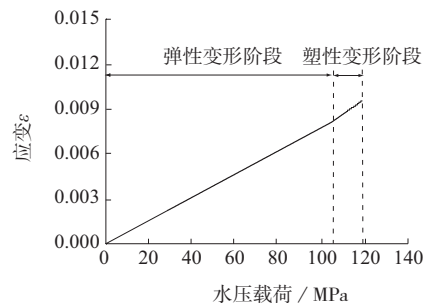


图 9 复合身管外缘环向应变-水压载荷曲线

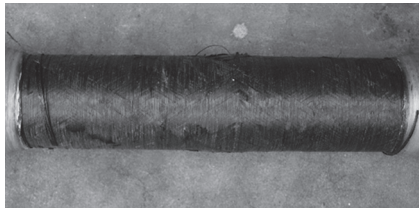


图 10 复合身管破坏形式

6 结论

(1) 以复合身管重量和抗弯刚度为优化目标,基于多岛遗传算法,提出了考虑内衬预应力的迫击炮复合身管多目标优化设计方法。

(2) 内衬材料相同时, M46 高模量碳纤维方案的轻量化效能明显优于 T300 和 T700 方案,同等模量的 T300 和 T700 方案轻量化效能相同,就 T300, T700 和 M46 三种等级的碳纤维而言,高模量的属性比高强度的属性更有利于减重。

(3) 碳纤维等级为 T300, T700 时, Ni_2 方案优于 TC11 方案;碳纤维等级为 M46 时, TC11 方案稍稍好于 Ni_2 方案。受抗弯刚度的限制,钛合金作为薄壁内衬材料相比于传统炮钢没有体现出优势。

(4) 选取 $K=1.3$ 时的优化方案,有限元仿真对抗弯刚度的验证结果和水压试验对强度的验证结果均证明了复合身管多目标优化设计方法的有效性。

参考文献

- [1] Anthony P P, Edward T J, Underwood J H. Stresses within compound tubes comprising a steel liner and an external carbon-fiber wrapped laminate [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2005(127):26-29.
- [2] Andrew L, Edward H, Andrew A, et al. Carbon fiber / thermoplastic overwrapped gun tube[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2006, (128):257-262.
- [3] De R W S, Audino M J. Advanced gun barrel materials and manufacturing technology symposium overview and perspective [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2011, 21:571-572.
- [4] 刘成旭, 型静忠, 陈利, 等. 柔性厚壁筒环向缠绕张力分析与设计 [J]. 固体火箭技术, 2013, 36(2):261-265.
- [5] 康超, 史耀耀, 何晓东, 等. 具有厚壁内衬圆筒的缠绕张力算法 [J]. 工程力学, 2016, 33(2):200-208.
- [6] 徐亚栋. 复合材料身管结构分析与优化 [D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [7] Shadmehri F, Derisi B, Hoa S V. On bending stiffness of composite tubes [J]. Composite Structures, 2011, 93:2 173-2 179.
- [8] Hyer M. Stress analysis of fiber-reinforced composite materials [M]. Destech Publication, 2009.
- [9] Geuchy A M T, Hoa S V. Flexural stiffness of thick walled composite tubes [J]. Composite Structures, 2016, 149:125-133.
- [10] 刘新东, 刘伟. 复合材料力学基础 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
- [11] 边文凤, 孙芳, 王彪. 提高金属内衬容器承载能力的预外压法 [J]. 固体火箭技术, 2005, 28(1):60-64.
- [12] Wang H X, Yugang D, Dilimulati A, et al. Design optimization of CFRP stacking sequence using a multi-island genetic algorithms under low-velocity impact loads[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater.Sci.Edit., 2017, 6(32):720-725.
- [13] Shuguang L, Elena S, Liang Y N, et al. The Tsai-Wu failure criterion rationalized in the context of UD composites [J]. Composites:Part A, 2017, 102:207-217.
- [14] 张博平. 复合材料力学 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2012.
- [15] Liu Chengxu, Xing Jingzhong, Chen Li, et al. Analysis of residual winding tension and design of winding tension for hoop winding on flexible cylinder[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2013, 36(2):261-265.
- [16] Kang Chao, Shi Yaoyao, He Xiaodong, et al. Algorithm of winding tension for cylinder with thick-walled liner [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(2):200-208.

蓝山屯河 PBSA 全生物降解树脂项目主体厂房开工

11月13日,由中国化学工程第四建设有限公司承建的新疆蓝山屯河聚酯有限公司2×3万t/a PBSA全生物降解树脂项目开工。该项目位于新疆昌吉高新技术产业开发区,由新疆蓝山屯河聚酯有限公司投资建设。项目建成后,将成为国内技术最先进、规模最大的PBSA生产装置。PBSA是全生物降解塑料制品基本原料,广泛应用于农业、3D打印、

包装、医用、纺织等领域,发展PBSA树脂符合国家可持续发展战略和绿色发展理念,从根本上解决“白色污染”难题。

四化建公司承建了该项目PBSA1全生物降解树脂主体厂房及THF回收楼建设工程,计划于2018年9月5日完工。为了安全、优质、高效建好此项目,该公司以建精品工程为目标,组织了具有丰富施工经验的资源力量进驻项目施工。

(慧聪塑料网)