

火炮身管—反后坐装置集成优化设计方法研究

洪亚军 曹岩枫 尹 强 徐 诚

南京理工大学,南京,210094

摘要:为减小火炮发射时的后坐阻力,同时减小火炮身管质量,以节制杆结构参数、身管结构参数和内弹道装药参数为设计变量,以身管刚度、强度、寿命、弹丸初速等为约束,建立火炮身管—反后坐装置集成优化设计模型,并采用两种优化方法进行优化,再比较其结果。首先,采用加权组合法将两个目标函数归一为单个目标,应用模拟退火算法进行优化设计,优化后,后坐阻力减小 53%,身管质量减小 2.8%。其次,基于 Pareto 最优理论,采用遗传算法进行优化设计,获得了 Pareto 最优解集,给设计者提供了更多优化方案;根据工程经验,选取一组优化解,结果发现,对比原设计,后坐阻力减小 50.4%,身管质量减小 9.8%。研究表明,基于 Pareto 最优理论和遗传算法可以获得更好的优化方案。该研究提供的集成优化模型和算法为火炮身管—反后坐装置一体化设计提供了新方法。

关键词:后坐阻力;身管质量;多目标优化;多学科优化

中图分类号:TJ303

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.01.004

Research on Integrated Optimization Method of Barrel and Recoil Mechanisms

Hong Yajun Cao Yanfeng Yin Qiang Xu Cheng

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094

Abstract: To reduce the recoil resistance force and the barrel mass, an integrated optimization model involving barrel and recoil mechanisms was built considering the control rod and barrel structural parameters, the interior ballistic charge parameters as design variables, and the stiffness, strength, life of barrel and the initial velocity as the constraints. Two optimization methods were selected to optimize and the results were compared. First, using the weighted method, the double objects were normalized to a single target. The model was optimized by the simulated annealing algorithm, and the recoil resistance force is reduced by 53% while the barrel mass is lightened by 2.8% after the optimization. Then based on the optimal theory of Pareto, the optimal solution set was obtained by the genetic algorithm. It provides more optimal schemes for the designers. According to engineering experiences, a solution was chosen, the recoil resistance force is reduced by 50.4% and the barrel mass is lightened by 9.8%. Studies show that it can obtain better optimization schemes based on the Pareto theory and genetic algorithm. It provides a new method for the integrated design of barrel and recoil mechanism.

Key words: recoil resistance force; barrel mass; multi-objective optimization; multi-disciplinary optimization

0 引言

身管和反后坐装置是火炮的两个重要组成部分。身管主要承受火药燃气压力,导引弹丸运动并赋予其一定的初速度。反后坐装置通过后坐部分运动产生一定的后坐阻力,从而控制后坐运动规律,减小炮架受力,同时储存部分能量,为复进提供动力。身管和反后坐装置的设计涉及内弹道、后坐阻力、身管结构、强度、刚度、寿命等多学科,这些学科模型都相对比较复杂,相互联系又相互制约。对于上述单学科的建模和仿真,已有研究者做了一定的工作。徐亚栋等^[1]从结构和刚度角度出发对身管进行了研究,并获得了身管近似模型。贾长治等^[2]基于虚拟样机建立了反后坐

装置的仿真模型,并对其进行了定量化评估研究。宗士增等^[3]对火炮反后坐装置进行了动力学仿真和优化。然而目前对于火炮身管及反后坐装置的集成优化设计还鲜有研究。本文将火炮身管和反后坐装置集成为一体,综合考虑内弹道、后坐阻力、身管结构、强度、刚度及寿命等多个学科,实现各学科仿真模型间数据的相互自动传递,建立火炮身管—反后坐装置集成优化设计模型,在一定后坐行程限制下,从全局角度出发,以后坐阻力最小和身管最轻为优化目标,寻求身管和反后坐装置各设计参数间更优的匹配关系。

1 多学科多目标优化问题

现代复杂工程问题的设计常常涉及多个学科,这些学科相互联系、相互影响;同时,设计时常期望几项设计指标能同时达到最优值,但这些目

收稿日期:2011-12-31

基金项目:国防基础科研项目

标之间往往相互矛盾,需要通过综合权衡,才能获得全局最优的设计方法。上述的这类问题称为多学科多目标的优化设计问题^[4],其数学形式可以表示为

$$\begin{aligned} \min \quad & F(X) = \{f_1(X, X_1, y_1), f_2(X, X_2, y_2), \dots, \\ & f_i(X, X_i, y_i)\} \\ \text{s. t.} \quad & h_i(X, X_i, y_i) = 0, i = 1, 2, \dots, n \\ & g_i(X, X_i, y_i) \leq 0, i = 1, 2, \dots, n \\ & E_i(X, X_i, y_i, y_{ji}(X, X_1, y_1), \dots, y_{ji}(X, \\ & X_j, y_j), \dots, y_{mi}(X, X_n, y_n)) = 0 \quad (i, j = 1, \\ & 2, \dots, n; i \neq j) \end{aligned}$$

式中, X 为全局设计变量; X_i 为 i 学科设计变量; y_i 为 i 学科状态变量; $F(X)$ 为系统目标函数; $f_i(X, X_i, y_i)$ 为 i 学科目标; $h_i(X, X_i, y_i)$ 、 $g_i(X, X_i, y_i)$ 分别为 i 学科等式和不等式约束; $y_{ji}(X, X_j, y_j)$ 为 j 学科输出到 i 学科的耦合变量; E_i 为 i 学科在给定设计变量、状态变量及耦合变量时状态方程的残差。

2 身管—反后坐装置各学科模型

2.1 内弹道仿真计算模型

内弹道仿真计算是在给定火炮的内膛结构诸元和装填条件下,通过所建立的内弹道基本方程组,求解内弹道性能即膛内压力变化规律和弹丸速度变化规律等问题的过程。火炮内弹道时期的膛内压力是弹丸飞行及火炮后坐运动的主动动力。火炮内弹道基本方程组如下:

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \chi Z(1 + \lambda Z + \mu Z^2) \\ \frac{dZ}{dt} &= \frac{u_1}{e_1} p^q \\ \varphi m_d \frac{dv_d}{dt} &= S_g p \\ \frac{dl}{dt} &= v_d \\ S_g p(l_\psi + l) &= f_h m_y \psi - \frac{\theta}{2} \varphi m_d v_d^2 \\ l_\psi &= l_0 \left[1 - \frac{\Delta}{\rho_p} - \Delta \left(\alpha - \frac{1}{\rho_p} \right) \psi \right] \quad \Delta = \frac{m_y}{V_y} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, χ, λ, μ 均为火药形状特征量; Z 为火药已燃相对厚度; ψ 为火药已燃百分数; u_1 为燃速系数; e_1 为火药弧厚; p 为平均压力; q 为燃速指数; φ 为次要功计算系数; m_d 为弹丸质量; v_d 为弹丸运动速度; t 为弹丸运动时间; S_g 为膛腔断面面积; l 为弹丸行程长; l_ψ 为药室自由容积缩径长; f_h 为火药力; m_y 为装药质量; θ 为火药热力参数; l_0 为药室容积缩颈长; α 为火药气体余容; ρ_p 为火药密度; Δ 为火药装填密度; V_y 为药室容积。

弹丸在膛内运动时期和后效期的膛腔合力 F_{pt} 如下:

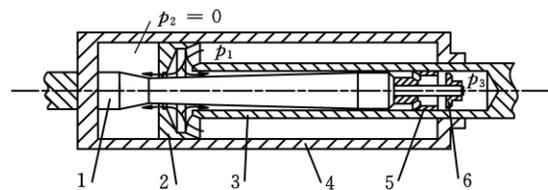
$$F_{pt} = \begin{cases} \frac{1}{\varphi} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{m_y}{m_d} \right) A p & (\text{膛内运动时期}) \\ F_g e^{-\frac{t}{b_r}} & (\text{后效期}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, A 为线膛部分截面积; F_g 为弹丸脱离炮口瞬间时的膛腔合力; b_r 为反映膛腔合力衰减快慢的时间常数; t 为以后效期开始为起点计算的时间。

采用四阶龙格—库塔法编制内弹道仿真计算程序来求解火炮内弹道微分方程^[5],得到膛压 p 随时间变化的值、弹丸出炮口时的速度 v_0 及最大膛压 p_{max} ; 根据内弹道仿真结果,求出弹丸在膛内运动及后效期时的膛腔合力 F_{pt} ,并以文件格式输出。

2.2 反后坐装置模型

本文所研究的火炮采用以节制杆式驻退机和液体气压式复进机组成的反后坐装置,图 1、图 2 分别为典型的节制杆式驻退机和液体气压式复进机的原理图^[3,6]。



1. 节制杆 2. 节制环 3. 驻退杆
4. 驻退筒 5. 调速筒 6. 活瓣

图 1 节制杆式驻退机的结构原理图



图 2 复进机工作原理图

后坐时,驻退筒与摇架相连,驻退杆随后坐部分一起运动,活塞挤压工作腔内的液体,使一部分液体沿节制环与节制杆形成的流液孔流入非工作腔,另一部分液体沿驻退杆内腔与节制杆的环形间隙,经过调速筒上的斜孔向后冲开活瓣,进入复进节制腔,分别构成主流和支流,从而形成液阻阻力 $F_{\Phi h}$, $F_{\Phi h}$ 的表达式如下:

$$F_{\Phi h} = \frac{K_1 \rho}{2} \left[\frac{(A_0 - A_p)^3}{a_x^2} + \frac{K_2 A_{fj}^3}{K_1 A_1^2} \right] v^2 \quad (3)$$

式中, K_1, K_2 分别为主流和支流的液阻系数; ρ 为驻退液密度; A_0 为驻退机活塞工作面积; A_p 为节制环孔面积; a_x 为节制杆任意截面的流液孔面积; A_{fj} 为复进节制器工作面积; A_1 为支流最小截面积; v 为后坐速度。

后坐同时,复进杆带动复进活塞运动,使得复进机中的气体受压缩,形成复进机力 F_f , F_f 的表达式如下:

$$F_f = A_f p_{f0} \left(\frac{V_{f0}}{V_{f0} - A_f S} \right)^n \quad (4)$$

式中, A_f 为复进机活塞工作面积; p_{f0} 为气体初压; V_{f0} 为初始气体体积; S 为后坐行程。

火炮在发射时,其后坐部分在膛腔合力和反

后坐装置力等的共同作用下后坐。取火炮后坐的方向为 x 方向(与膛轴线平行),根据牛顿第二定律,火炮制退后坐运动方程如下:

$$m_h \frac{d^2 S}{dt^2} = m_h \frac{dv}{dt} = F_{pt} - F_R \quad (5)$$

式中, m_h 为后坐部分质量; F_R 为后坐阻力。

式(5)中,后坐阻力 F_R 由液压阻力 $F_{\Phi h}$ 、复进机力 F_f 、密封装置摩擦力 F_m 、摇架导轨摩擦力 F_T 及后坐部分重力分量等构成,即

$$F_R = F_{\Phi h} + F_f + F_m + F_T - m_h g \sin\varphi \quad (6)$$

火炮后坐阻力的调整一般是通过调整驻退机的节制杆形状,即节制杆各段截面直径 $d_1 \sim d_9$, 来调整液孔面积 a_x , 改变驻退机力 $F_{\Phi h}$, 从而改变后坐阻力 F_R 的。采用四阶龙格-库塔法,通过编程实现对式(5)的求解。程序以节制杆结构参数、内弹道仿真计算模型输出的膛膛合力及反后坐部分质量为输入,以一定后坐行程为约束,计算并输出火炮反后坐装置后坐阻力随后坐行程的曲线及后坐过程中最大后坐阻力 F_{Rmax} 。

2.3 身管结构模型

身管作为炮身的重要零件,在发射时承受火药燃气压力,并导引弹丸运动。身管结构如图3所示,提取身管结构若干关键尺寸,其中 $L_1 \sim L_3$ 为身管各段长度尺寸, $b_1 \sim b_5$ 为身管各截面直径,当尺寸参数变化时,将影响到身管质量、强度、刚度及寿命。通过编程计算可以得到各相应尺寸下的身管质量 M 。

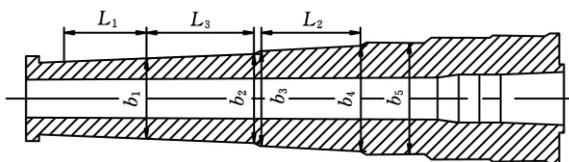


图3 身管结构示意图

2.4 身管刚度模型

对于图3所示的身管,以一阶固有频率作为衡量其刚度的标准,根据身管结构模型中所提取的关键尺寸,在有限元前后处理软件 HyperMesh 中建立身管参数化网格模型,并在有限元分析软件 Abaqus 上进行二次开发,将所建立的网格模型自动导入 Abaqus 中进行分析计算,计算完成后输出身管频率 f 。身管刚度的有限元模型如图4所示。



图4 身管刚度有限元模型图

2.5 身管强度模型

火炮在各种复杂情况下射击时,身管必须具有足够的强度,其在火药气体压力作用下,不但不能产生破裂,而且表面不能产生塑性变形,即肿胀^[7]。假设身管的任意截面是一个内半径为 r_1 、外半径为 r_2 的厚壁圆筒,根据第二强度理论,身管在不产生塑性变形时所承受的最大内压力 p_1 (身管弹性强度极限)为

$$p_1 = \frac{3}{2} \sigma_p \frac{r_2^2 - r_1^2}{2r_2^2 + r_1^2} \quad (7)$$

式中, σ_p 为身管材料比例极限。

根据内弹道仿真模型计算出的 $p-l$ 曲线及身管各部位所要求的安全系数,可以得到身管各截面的理论弹性强度曲线。当身管各截面理论弹性强度曲线满足身管弹性强度极限时,身管满足强度要求。通过编程实现身管强度校核程序,当满足强度要求时,身管强度校核结果 Str 为 True, 否则为 False。

2.6 身管寿命模型

由于发射时高温、高压的火药气体及弹丸导引部分对身管的反复作用,造成膛线部分的烧蚀和磨损,破坏了正常的装填条件和弹丸工作条件,使弹丸达不到正常的前进运动和旋转速度,则身管达到寿命终了。身管寿命即是指身管在丧失要求的弹道性能之前所能发射正装药弹丸的数目。

在一定装填条件下,提高膛压有利于提高火药气体能量的利用率,因而可以提高火炮初速,增加射程,但是膛压增高造成火药气体密度增大,火药燃烧速度提高,从而使传给膛膛的热量增加,加剧了火药气体对膛面的热作用,同时也加速了火药气体对膛壁的化学作用。此外,高膛压增加了膛线导转侧的作用力,使弹带与膛线导转侧的磨损加快。火炮发射时的膛内气体压力是影响身管寿命的重要因素,以初速降低 5% 为寿命终了标准^[8],得到的身管寿命 N 如下:

$$N = 60 \frac{D}{m_y} \left[\frac{\sigma_p}{2250} - 4 \left(\frac{p_{max}}{2250} - 1 \right) \right] \frac{1}{B} \quad (8)$$

式中, D 为身管口径, cm; B 为弹带宽度, cm; m_y 、 σ_p 、 p_{max} 的单位分别为 kg、 10^5 Pa、 10^5 Pa。

2.7 身管一反后坐装置各学科模型耦合关系

火炮身管一反后坐装置集成优化所涉及到的6个学科模型间耦合关系及数据传递关系见图5。

3 身管一反后坐装置集成优化设计模型

反后坐装置的驻退筒与摇架相连接,通过耳轴将后坐阻力传递到炮架的其他部分,后坐阻力的大小决定了炮架受力的大小,而最大后坐阻力

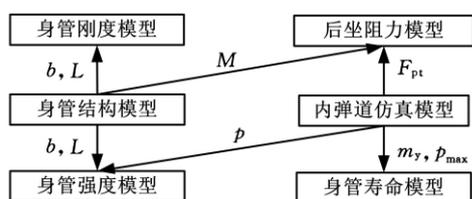


图 5 各学科模型耦合关系图

是设计和校核炮架强度及刚度的依据。为使炮架满足一定的强度和刚度,较大的后坐阻力要求炮架结构尺寸必然增大,这将使火炮变得笨重,影响火炮的机动性^[6]。此外,由式(5)可知,当身管质量减小时,在相同膛合力作用下,火炮后坐阻力将增大,这与降低最大后坐阻力的要求相矛盾。本文建立火炮身管—反后坐装置集成优化设计模型,以炮身身管结构参数、内弹道装药参数和反后坐装置节制杆结构参数为设计变量,在一定后坐行程限制下,以后坐阻力最小和身管最轻为目标,充分挖掘各参数间更优的匹配关系,对身管—反后坐装置进行多学科多目标集成优化设计。

3.1 集成优化设计数学模型

(1) 目标函数 $\min(F_R, M)$ 。本文采用两种方法对身管—反后坐装置多目标优化问题进行求解。

第一,依据处理多目标优化问题的加权组合法,分别给目标函数身管质量和后坐阻力按重要性赋予相应的权系数,将多目标问题转化成单目标问题,采用模拟退火算法,对身管及反后座装置进行优化设计。目标函数如下:

$$\min F = \omega_1 \frac{F_R}{F_R^*} + \omega_2 \frac{M}{M^*}$$

式中, ω_1, ω_2 为相应的权重系数, $\omega_1 = 0.6, \omega_2 = 0.4$; F_R^*, M^* 分别为 F_R, M 的归一化系数。

第二,考虑到一般情况,多目标优化问题并不存在一个最优解,而是存在一个 Pareto 解集。Pareto 解集中的解无法进行简单比较,任一个目标函数值的提高都必须以牺牲其他目标函数值为代价,最终解的确定需依据对问题的了解程度及工程的需要来进行选择。依据 Pareto 最优理论,采用非支配排序改进遗传算法(NSGA-II),对炮身身管及反后坐装置进行优化求解,获得其 Pareto 最优解集。

(2) 设计变量。设计变量包括身管结构参数、内弹道装药参数及节制杆结构参数,共计 18 个,表达式如下:

$$X = (b_1, b_2, \dots, b_5, L_1, L_2, m_y, V_y, d_1, d_2, \dots, d_9)$$

(3) 约束变量。约束分为设计变量约束和状态变量约束,由于身管结构参数及节制杆结构参

数较多,其设计变量约束在此不一列出,只给出内弹道设计变量约束及状态变量约束如下:
 $4.5\text{kg} \leq m_y \leq 5\text{kg}; 0.0068\text{m}^3 \leq V_y \leq 0.0075\text{m}^3$;
 $260\text{MPa} \leq p_{\max} \leq 300\text{MPa}; v_0 \geq 750\text{m/s}; Str = \text{True}; f \geq 61\text{Hz}; S \leq 0.91\text{m}$ 。

3.2 集成优化设计流程

火炮身管—反后坐装置集成优化设计流程如图 6 所示。在上述所建立各学科模型的基础上,在 multidisciplinary design optimization 平台 iSIGHT 上实现火炮身管—反后坐装置集成优化设计模型,为缩短优化计算时间,身管强度、刚度、寿命及反后坐阻力采用并行计算,分别采用模拟退火算法和非支配排序改进遗传算法对模型进行单目标及多目标优化计算。

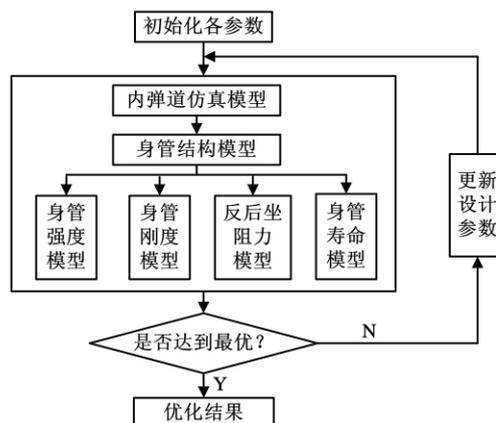


图 6 集成优化设计流程图

3.3 集成优化设计结果

(1) 采用加权组合法将后坐阻力和身管质量最小两个目标统一为单目标,对其进行优化设计求解,模拟退火法经过 2050 次迭代,获得最优解,如表 1 所示,后坐阻力收敛曲线如图 7 所示,身管质量收敛曲线如图 8 所示。与原设计(表 1)相比,后坐阻力 F_R 由原设计的 236kN 下降到 111kN,减小 53%;身管质量由原设计的 643.9kg 下降到 626kg,减小 2.8%。

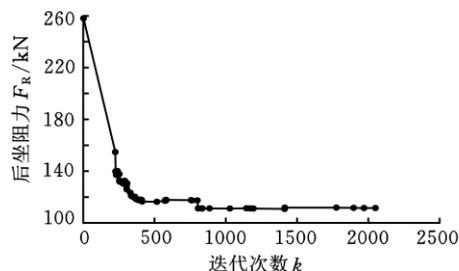


图 7 后坐阻力收敛历程

(2) 依据 Pareto 最优理论,采用 NSGA-II 优化算法,经过 6658 次迭代,求得身管—反后坐装置集成优化 Pareto 最优解集如图 9 所示。根

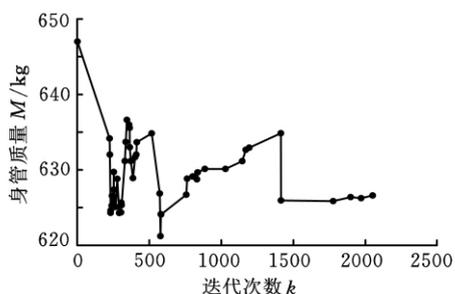


图 8 身管质量收敛历程

据工程经验,选取一组优化解如表 1 所示。与原设计相比,后坐阻力 F_R 由原设计的 236kN 下降到 117kN,减小 50.4%;身管质量由原设计的 643.9kg 下降到 581.1kg,减小 9.8%。

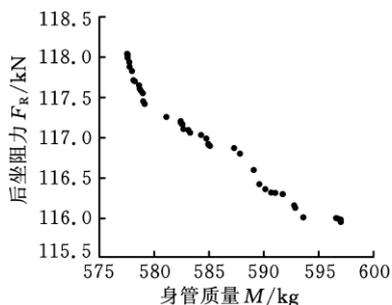


图 9 Pareto 解集

表 1 各参数表

变量	初始变量	加权法	Pareto 解	变量	初始变量	加权法	Pareto 解
b_1 (mm)	86.9	86.9	83.7	d_1 (mm)	38.6	38.8	38.8
b_2 (mm)	97.7	97.6	94.1	d_2 (mm)	36.9	33.7	33.5
b_3 (mm)	103.8	99.1	99.0	d_3 (mm)	34.6	34.7	33.0
b_4 (mm)	118.0	115.3	115.3	d_4 (mm)	35.9	35.4	35.1
b_5 (mm)	124.7	123.3	119.3	d_5 (mm)	36.2	36.1	36.1
L_1 (mm)	772.6	770.0	760.0	d_6 (mm)	36.8	37.0	37.0
L_2 (mm)	596.0	602.8	594.8	d_7 (mm)	38.2	38.2	38.2
m_y (kg)	4.6	4.528	4.54	d_8 (mm)	39.4	39.5	39.7
V_y (m ³)	0.007 21	0.007 21	0.007 23	d_9 (mm)	41.6	41.6	41.7
p_{max} (MPa)	269.1	260.0	260.1	F_R (kN)	236	111	117
v_0 (m/s)	777.0	767.3	767.7	f (Hz)	63.8	63.7	61.0
M (kg)	643.9	626.0	581.1	N (发)	2589	2812	2807

对比以上两种优化方法,通过优化,目标性能均有明显提高,但 Pareto 解给出了更为全面的优化解集,提供给设计者更多的优化设计方案,以供

其综合考虑后再进行选择。根据初始设计和以上所选 Pareto 最优解,求得后坐阻力—后坐行程曲线,如图 10 所示,优化后,最大后坐阻力得到了显著减小。

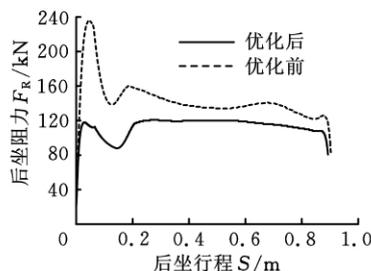


图 10 后坐阻力—后坐行程曲线对比

4 结束语

本文综合考虑了反后坐装置后坐阻力、身管结构、刚度、强度、寿命和内弹道等学科,在各学科分析模型的基础上,以后坐阻力最小和身管质量最轻为目标,建立了火炮身管—反后坐装置集成优化设计模型。分别采用模拟退火法和非支配排序改进遗传算法,对身管—反后坐装置进行了优化设计,优化后综合性能得到明显提升。对于多目标优化问题,Pareto 最优解集给出了更为全面的优化设计方案,给予设计者更多的决策权。本文为火炮多部件一体化设计和集成优化设计提供了新方法。

参考文献:

[1] 徐亚栋,钱林方,陈龙森. 基于 Kriging 方法的复合材料身管结构近似分析[J]. 中国机械工程,2007,18(8):988-990.
 Xu Yadong, Qian Linfang, Chen Longmiao. Structural Approximate Analysis for Composite Barrel by Using Kriging Method[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(8): 988-990.

[2] 贾长治,胡仁喜,刘海平. 基于虚拟样机的火炮反后坐装置性能仿真和量化评估研究[J]. 系统仿真学报,2007,19(2):322-325.
 Jia Changzhi, Hu Renxi, Liu Haiping. Research on Simulation and Quantitative Evaluation of Performance of Recoil System Based on Virtual Prototyping of Guns[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(2): 322-325.

[3] 宗士增,钱林方,徐亚栋. 火炮反后坐装置动力学耦合分析与优化[J]. 兵工学报,2007,28(3):272-275.
 Zong Shizeng, Qian Lifang, Xu Yadong. Dynamic Coupling Analysis and Optimization of Gun Recoil Mechanism[J]. Acta Armamentar II, 2007, 28(3): 272-275.

开槽冰冻固结磨料抛光微晶玻璃的工艺研究

杨张一 左敦稳 孙玉利 童巨特

南京航空航天大学,南京,210016

摘要:采用成形模具热压法给微米级 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 冰冻固结磨料抛光垫开槽。设计四因素三水平正交试验,对开槽冰冻固结磨料抛光垫抛光微晶玻璃的工艺进行了研究,与同样试验条件下未开槽冰冻固结磨料抛光垫的抛光效果进行了对比分析。结果表明:开槽情况下的去除率比未开槽情况下的去除率提高40%左右,微晶玻璃表面形貌略有改善但出现划痕现象,主轴转速对材料去除率影响更为显著。

关键词:开槽;冰冻固结磨料抛光垫;微晶玻璃;去除率;正交试验

中图分类号: TG580

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.01.005

Research on Polishing Process of Glass—ceramics by Ice Fixed Abrasive Polishing Pad with Grooves

Yang Zhangyi Zuo Dunwen Sun Yuli Tong Jute

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

Abstract: Mould pressing method was used to groove the micron—sized $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ice fixed abrasive polishing pad. The polishing process of glass—ceramics by ice—fixed—abrasive polishing pad with grooves was researched through orthogonal test of four factors and three levels, and the results were compared with the ice—fixed—abrasive polishing pad without grooves under the same experimental conditions. The results show that the material removal ratio increases about 40% in grooved condition, and the surface topography of glass—ceramics is improved slightly although with little scratches. Spindle speed influences the material removal ratio more greatly.

Key words: groove; ice fixed abrasive polishing pad; glass—ceramics; removal ratio; orthogonal test

0 引言

化学机械抛光(CMP)技术是半导体晶片表面加工的关键技术之一,近年来得到广泛应用^[1]。作为CMP系统关键部件之一的抛光垫对抛光效率和加工质量有着重要影响^[2]。传统的微晶玻璃的超精密抛光工艺使用游离磨料方式。为解决游离磨料研磨抛光过程中暴露出来的众多缺点,固

结磨料抛光技术应运而生。固结磨料抛光技术把磨料固结在抛光垫中,抛光液中不再需要添加磨粒,抛光时只有固结在抛光垫上突出部位的磨粒才与工件上的相接触部位发生作用;由于接触区域的减小,微小区域产生较大的压力,去除率增加;抛光速率对工件的形貌有很高的选择性,而对材质无选择性。固结磨料抛光技术只需要较少的去除量,即可达到平坦化的目的,降低了企业的生产成本^[3]。

冰冻固结磨料抛光(IFAP)技术是近年来固结磨料化学机械抛光技术的新发展,属于低温固结磨料抛光技术^[4]。韩荣久等^[5]利用胶态 SiO_2

收稿日期:2011—11—10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175260);中国博士后科学基金特别资助金资助项目(201003583);江苏省自然科学基金资助项目(BK2012796);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金资助项目(kfj20110228)

[4] Huang C H, Christina L B. Multi—Objective Pareto Concurrent Subspace Optimization for Multidisciplinary Design, AIAA 2004—278 [R]. Reston, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.

[5] 郭文凤,刘树华,杨少宇. 火炮内弹道计算机辅助优化设计[J]. 机械管理开发,2004,19(5):20-23.
Guo Wenfeng, Liu Shuhua, Yang Shaoyu. Computer Aided Optimized Design of Artillery Interior Ballistics[J]. Mechanical Management and Development, 2004, 19(5): 20-23.

[6] 高树滋,陈运生,张月林,等. 火炮反后坐装置设计

[M]. 北京:兵器工业出版社,1995.

[7] 张相炎,郑建国,杨军荣. 火炮设计理论[M]. 北京:北京理工大学出版社,2005.

[8] 刘智英. 炮用材料和身管寿命[M]. 北京:国防工业出版社,1965. (编辑 郭伟)

作者简介:洪亚军,男,1985年生。南京理工大学机械工程学院博士研究生。主要研究方向为复杂机械系统建模、仿真及优化。曹岩枫,男,1988年生。南京理工大学机械工程学院博士研究生。尹强,男,1980年生。南京理工大学机械工程学院讲师。徐诚,男,1962年生。南京理工大学机械工程学院教授、博士研究生导师。