

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.07.003

钛合金轻质枪管热-结构耦合分析

翟光涛, 李引

(中国兵器工业第二〇八研究所一室, 北京 102202)

摘要: 为分析高温高压火药气体对钛合金枪管热性能的影响, 以某型小口径钛合金轻质枪管为研究对象, 建立基于 ANSYS 平台的枪管热-结构耦合分析模型。采用直接耦合方法, 利用 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 编程计算枪管在高频动态热脉冲和动态压力循环作用下的温度场和瞬态应力响应, 并对计算结果进行实验验证。研究结果表明: 热脉冲和压力脉冲的耦合作用显著; 钛合金的材料性能能满足枪管的设计要求。

关键词: 钛合金轻质枪管; 直接耦合; 有限元; 瞬态应力

中图分类号: TJ203+1 **文献标志码:** A

Thermal-Structure Coupling Analysis of Titanium Alloy Light-Weight Gun Barrel

Zhai Guangtao, Li Yin

(No. 1 Staff Room, No. 208 Research Institute of China Ordnance Industries, Beijing 102202, China)

Abstract: In order to study the influence of the power gas with high temperature and high pressure on the titanium alloy light-weight gun barrel, taking certain type small-caliber titanium alloy light-weight gun barrel as studies object, a thermal-structure coupling model of gun barrel was established based on ANSYS platform. The direct coupling analysis is employed and the program was written based on ANSYS parameter design language. Temperature field and transient stress response of this gun barrel was calculated under the cyclic action of high-frequency dynamic thermal pulse and dynamic pressure pulse. And a series of experiments were carried out to test the simulation results. This study shows that the coupling effect of thermal pulse and pressure pulse are very obvious and material property of titanium alloy meets the requirement of the design of gun barrel. And the research results have important significance for the design and optimization of titanium alloy gun barrel.

Keywords: titanium alloy light-weight gun barrel; direct coupling; finite element; transient stress

0 引言

将轻质金属合金材料应用于枪管可减轻武器重量, 提高轻武器的战场机动性, 获得更好的综合性能。但在射击过程中, 枪管受到高温、高压火药气体的烧蚀和冲刷, 承受高频动态热脉冲和动态压力的循环作用。烧蚀磨损机理研究表明, 在造成内膛破坏的众多因素中, 发热是一个起主导、控制作用的因素^[1]。而且枪管的发热还会引起其它一些不良现象, 不同程度地影响着轻武器作战效能的发挥, 因此深入研究轻质金属合金枪管在发射过程中的温度场和动态应力具有重要意义。笔者以某型小口径步枪钛合金枪管为研究对象, 运用有限元方法计算分析了该枪管在连续射击时的温度场和瞬态应力响应, 为钛合金枪管的结构设计和优化提供理论参考。

1 分析模型

1.1 枪管受热的物理过程

火药燃气沿枪管轴向流动的方式是带热流体的紊流流动, 其显著特点是带热流体以强迫对流及辐射方式向枪管内壁放热。连续射击时, 枪管内壁受

到周期性的快速加热和冷却, 热量沿枪管内壁的传递是不稳定导热过程。同时, 当枪管外表面与环境产生温差时, 发生与大气的自然对流换热。在射击间隙, 枪管内膛表面也会与大气产生自然对流换热。

1.2 枪管传热数学模型

根据枪管的几何结构, 对枪管传热模型作以下基本假设:

- 1) 不考虑弹丸的摩擦, 不考虑膛线的影响^[2]。
- 2) 忽略枪管外壁的其他装配件对散热的影响。
- 3) 相对于枪管轴向的温度梯度值, 其径向的温度梯度要大很多, 可认为枪管各层壁内的热传导过程为一维不稳定热传导。

根据上述假设, 枪管的传热微分方程^[1]为:

$$\begin{cases} a \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} & (r_0 < r < R) \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = a_g (T_g - T_{r0}) & (r = r_0) \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = -a_a (T_R - T_0) & (r = R) \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中 T_g , T_{r0} , T_R 和 T_0 分别为火药气体、枪管内壁、枪管外壁和环境温度; a_g , a_a 分别为火药

收稿日期: 2011-02-05; 修回日期: 2011-04-02

作者简介: 翟光涛(1984—), 男, 湖北人, 研究生, 从事自动武器的设计与仿真研究。

气体和空气的对流换热系数; a 为热扩散率, $a = \lambda / (\rho c)$; λ , ρ , c 分别为材料的导热系数、密度和比热容; r , r_0 , R 分别为枪管径向坐标、内半径和外半径。

1.3 材料特性

笔者所研究的枪管材料为 Ti-6Al-4V, 其国内牌号为 TC4 (简称为 TC4)。TC4 具有密度小、耐腐蚀性优异等特点, 其比强度远远超过了合金钢。TC4 的密度为 $4.45 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 113 Gpa, 泊松比为 0.33, 线膨胀系数为 $8.4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 其热物性参数见表 1、表 2。

表 1 TC4 导热系数

温度 / $^\circ\text{C}$	导热系数 λ / $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	温度 / $^\circ\text{C}$	导热系数 λ / $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	温度 / $^\circ\text{C}$	导热系数 λ / $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$
20	6.7	93	7.3	205	9.1
315	10.6	425	12.6	540	14.5
650	17.5	950	23.5	1 100	24.5

表 2 TC4 比热容

温度 / $^\circ\text{C}$	比热容 C / $(\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	温度 / $^\circ\text{C}$	比热容 C / $(\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	温度 / $^\circ\text{C}$	比热容 C / $(\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$
20	520	100	550	200	590
400	620	600	730	800	910
1 000	950	1 100	1 000		

1.4 边界条件

高温高压火药气体沿枪管膛内高速流动, 其与枪管内壁热交换的主要方式是对流和辐射换热^[3-4]。由于大部分辐射能在抵达内膛表面前就被吸收, 因此可将枪管内膛和火药燃气之间的热交换简化为只存在强迫对流换热。在求取换热系数时, 针对辐射换热作适当修正。火药燃气的对流放热系数^[1]计算如下:

$$\alpha_g(t) = 0.023 \frac{\lambda_g(t)}{d} \left(\frac{V_g(t) \rho_g(t) d}{\mu_g(t)} \right)^{0.8} \cdot \left(\frac{C_{pg}(t) \mu_g(t)}{\lambda_g(t)} \right)^{0.4} K_c \quad (2)$$

式中: $\lambda_g(t)$, $\alpha_g(t)$, $\rho_g(t)$, $V_g(t)$, $\mu_g(t)$, $C_{pg}(t)$ 分别为 t 瞬时火药燃气的导热率、放热系数、密度、流速、粘度系数及比热; d 为口径; K_c 为修正系数, $K_c = 1.15 \sim 1.20$ 。

火药气体温度时间历程^[1]可通过式 (3) 求出:

$$T_g(t) = [1 - (k - 1) \phi q v(t)^2 / (2 g f \omega \psi)] T_1 \quad (3)$$

式中: k 为绝热系数; ϕ 为虚拟系数; q 为弹头质量; $v(t)$ 为弹丸运动速度; ω 为装药量; ψ 为火药燃去部分的百分比; T_1 为爆温。

该 TC4 枪管传热分析的初始条件为 $T = T_0$, 即第一发射击时温度分布为环境温度。连发射击时第 N 发射击时为已射击 $(N-1)$ 发弹所引起枪管径向温度

分布, 而结构分析时的边界条件主要是施加火药气体压力载荷和位置约束。

1.5 有限元模型

笔者的研究对象为某型小口径轻量化步枪 TC4 枪管, 射频为 600 发/min。枪管内膛作自润滑处理, 无金属内衬。基于上述分析, 选取 TC4 枪管最大膛压截面进行分析, 考虑材料物理性能参数随温度的变化, 忽略枪管外壁其他装配件对传热的影响, 将模型简化为 1/4 圆柱, 并选取直接耦合单元进行网格划分。有限元模型示意图如图 1。

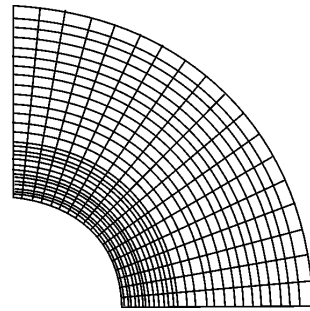


图 1 TC4 枪管有限元模型

2 仿真计算

2.1 热-结构耦合分析

耦合分析是指有限元分析过程中考虑了 2 种或多种工程学科 (物理场) 相互作用的分析。耦合分析主要分为直接耦合法和间接耦合法^[5]。直接耦合法使用包含多场自由度的耦合单元, 通过一次计算即可得到耦合场的分析结果, 适用于多个物理场各自响应相互依赖的情况, 如热-电分析等。间接耦合法则是按照顺序进行 2 次或更多次的相关场分析, 它是通过把第 1 个场分析结果作为第 2 个场分析的载荷来实现 2 种场的耦合。

射击时, 枪管受到高频动态热脉冲和动态压力作用, 而且作用时间极短, 枪管内温度场和应力场剧烈变化, 相互影响, 因此采用直接耦合方法计算兼顾温度场和应力场的相互作用, 所得结果更为准确。笔者选取直接耦合单元, 在枪管内壁上施加火药气体对流换热及压力载荷, 在枪管外壁施加其与大气自然对流换热载荷, 通过一次计算即可得出 TC4 枪管连续射击时的温度场和瞬态应力响应。

枪管热-结构直接耦合分析中, 单元控制方程^[6]为:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_q \\ P_x \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： q 和 X 分别为应力场和温度场的节点参量，即 q 为节点位移， X 为节点温度。

在直接耦合分析中，约束方程^[7]为：

$$\text{const } t = \sum_{i=1}^n (\text{coefficient}(I) \times U(I)) \quad (5)$$

式中： $U(I)$ 为自由度项(I)； n 是方程中项的编号。

2.2 仿真计算

TC4 枪管有限元模型建立以后，考虑弹丸发射的内弹道时间和每两发射击之间的时间间隔所对应的不同边界条件，利用基于 ANSYS 的 APDL 语言编制程序，计算了连续射击 30 发过程中的瞬态温度场和热应力。

3 计算结果分析

经过计算，连续射击 30 发过程中，TC4 枪管最大膛压区的外壁温度随时间变化曲线如图 2。采用同样的射击规范连续射击 30 发后，实测 TC4 枪管对应位置的外壁温度为 69.5 °C，这与计算结果 68.5 °C 误差不大，说明该分析模型是正确的。

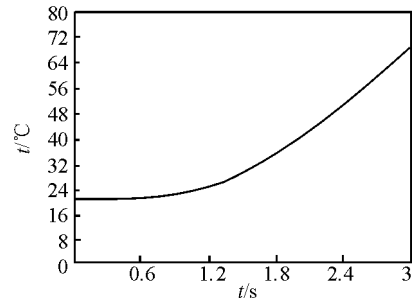


图 2 TC4 外壁温度与 T 的关系曲线

在射击过程中，相对于两发射击之间的时间间隔，内弹道时间很短，因此火药气体对枪管内壁的加热和施加压力都是瞬间完成的。相对于压力载荷的瞬时传递，热量在枪管材料中以一定的速度进行传导，内膛表层在内弹道时期被急剧加热，温度迅速升高，材料快速膨胀，而内层材料对热量的吸收和释放速率相对较慢，膨胀较少，因此内膛表面在内弹道时期会因表层材料膨胀受限而产生很大的应力，如图 3。随着射弹数量的增加和时间延续，枪管径向各点的温度梯度逐渐减小，各点温度逐渐升高，应力幅值逐渐下降并趋于稳定。

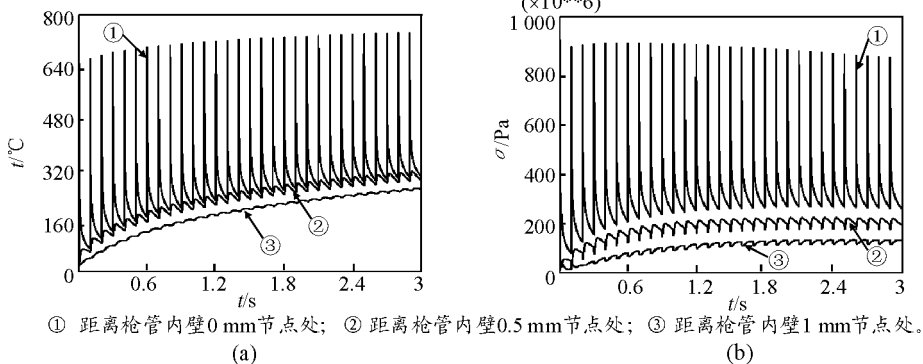


图 3 各点温度及温度等效应力

图 4 给出的枪管内壁的全等效应力是由其温度等效应力和压力载荷耦合产生。由图 3 和图 4 可以看出，枪管内壁的温度等效应力要大于其全等效应力。因此，温度载荷和压力载荷所引起的应力是相互抵消的，其耦合作用效果明显。由于

火药燃气压力引起的应力幅值随时间的变化很小，所以全等效应力幅值的变化主要受温度等效应力的影响。由此可见，热作用是影响枪管内壁应力幅值的最主要因素，也是枪管内膛破坏的主要原因。

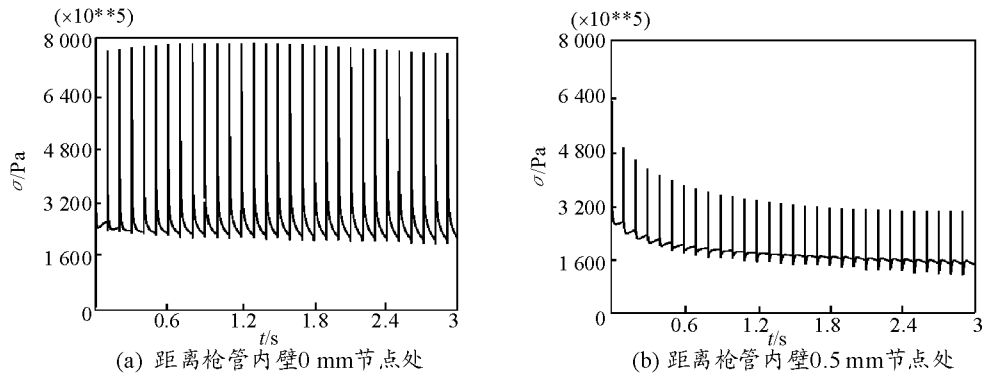


图 4 各点全等效应力