

doi: 10.7690/bgzd.2016.06.022

钛合金在炮口制退器上的应用

刘 凯, 赵俊利, 郭利强, 赵 凡, 刘国志
(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要: 为减小炮口制退器质量, 提高射击精度和密集度, 对钛合金在炮口制退器上的应用进行研究。以计算流体动力学以及有限元理论为基础, 综合应用计算流体力学数值仿真技术和有限元分析方法, 完成了从炮口制退器炮口流场三维数值模拟到有限元分析的全过程, 得出了 TC4 钛合金和炮钢材料下的炮口制退器应力分布和变形结果。结果表明: 在满足使用条件的情况下, TC4 材料的使用能减轻炮口制退器的质量, 从而可减小其它部件的设计难度。

关键词: 炮口制退器; 计算流体动力学; 有限元分析

中图分类号: TJ303⁺.2 **文献标志码:** A

Application of Titanium Alloy in Muzzle Brake

Liu Kai, Zhao Junli, Guo Liqiang, Zhao Fan, Liu Guozhi
(School of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to reduce the mass of muzzle brake and improve firing accuracy and density, the application of titanium alloy in muzzle brake was researched. Based on the theory of computational fluid dynamics and the finite element theory and the application of computational fluid dynamics (CFD) numerical simulation and finite element analysis method, the entire process of the three-dimensional numerical simulation flow field of the muzzle brake and finite element analysis was accomplished. Stress distribution and deformation results of TC4 and gun-steel material of muzzle brake were obtained. The result shows that the using of TC4 can reduce the mass of muzzle brake in service conditions, then it can reduce design complexity of other components.

Keywords: muzzle brake; CFD; FEM

0 引言

炮口制退器是一种控制后效期火药气体流量、气流方向和气流速度的排气装置, 其目的是减小后坐动能从而减小炮架受力、减小炮架质量以提高火炮机动性^[1]。然而, 炮口制退器的引入加大了炮身质量, 特别是增加了起落部分的重力矩, 增加了平衡机的负担和随动系统设计的难度, 也会增加身管弯曲, 引起火炮射击时的振动等, 从而影响射击精度和密集度, 所以炮口制退器还必须满足轻量化要求。选用轻质材料是实现火炮部件结构减重的重要手段, 国内外已经在某些火炮上广泛使用。

钛合金因具有强度高、密度小、耐腐蚀性好、耐热性高等特点大量应用于武器装备领域, 显著减轻了武器装备的质量, 提高了武器系统的性能, 增强了战场生存和作战能力。例如 M2 “布雷德利”步兵战车的车长舱口是美国陆军首次应用低成本钛合金的部件, 该舱口原来用锻造铝合金制成, 改用钛合金材料后, 减轻质量 35%, 增加了防弹能力^[2]。笔者对钛合金和炮钢 2 种材料下炮口制退器的性能进行比较研究, 为钛合金在炮口制退器上的应用提

供了一定的理论基础。

1 炮口流场三维数值模拟

膛口气流为气固两相、多组分、含有化学反应的复杂气流结构, 建立其真正的数学模型是非常困难的; 因此根据工程实际需要, 对其进行简化^[3], 采用无粘三维 Euler 方程来描述炮口气流流动^[4-5], 其控制方程为

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0。$$

其中:

$$U = [\rho, \rho u, \rho v, \rho w, e]^T;$$

$$E = [\rho u, \rho u^2 + p, \rho uv, \rho wu, (e + p)u]^T;$$

$$F = [\rho v, \rho uv, \rho v^2 + p, \rho vw, (e + p)v]^T;$$

$$G = [\rho w, \rho wu, \rho vw, \rho w^2 + p, (e + p)w]^T。$$

式中 ρ 为气体密度; u , v , w 分别为 x 、 y 、 z 方向的速度分量; e 为单位质量气体的总能量, 其表达式为

$$e = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2)。$$

收稿日期: 2016-03-03; 修回日期: 2016-04-19

作者简介: 刘 凯(1989—), 男, 山东人, 硕士, 从事武器系统动力学仿真研究。

式中 γ 为理想气体绝热指数。

理想气体的状态方程为

$$p = \rho RT$$

式中 R 是通用气体常数。

方程的积分形式表示为

$$\iiint_{\Omega} \frac{\partial}{\partial t} U d\Omega + \iint_{\partial\Omega} R(n) ds = 0$$

其中：

$$R(n) = Ei + Fj + Gk$$

Ω 为控制体； $\partial\Omega$ 为控制体单元的边界； n 为有限单元面上的单元外法向量； ds 为有限体积面积元； i, j, k 分别是边界外法线方向 n 的 x, y, z 方向量； E, F, G 同上。

求解上述微分方程需要确定其初始条件和边界条件。初始条件就是计算初始给定的流场参数，即 $t=0$ 时刻流体各物理量的分布情况。弹丸离开炮口，火药气体开始向外流出的时刻，即内弹道结束的时刻是炮口流场计算的初始时刻，此时膛内火药气体高温、高压状态和膛外大气压状态作为计算的初始状态，以内弹道计算结束时的膛内参数分布对膛内区域进行初始化，以大气压条件初始化膛外区域，以此作为流场模拟的初始条件，并在此基础上进行炮口流场的数值求解。

初始时刻膛内气体压力、温度及速度沿轴向的分布规律如图 1 所示。

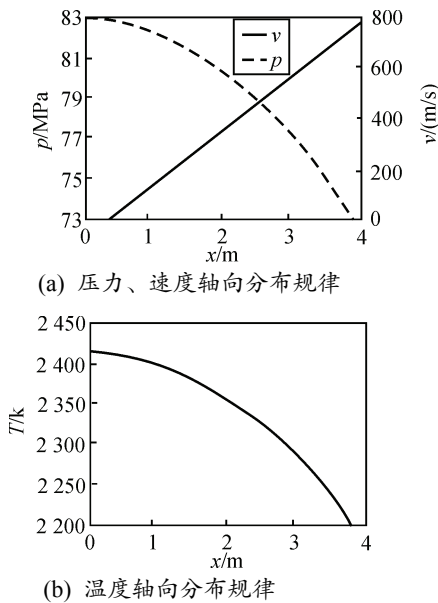


图 1 初始时刻膛内参数沿轴向的分布

笔者采用有限体积法对炮口制退器流场进行数值模拟，得到炮口制退器各个面上的压力数值。

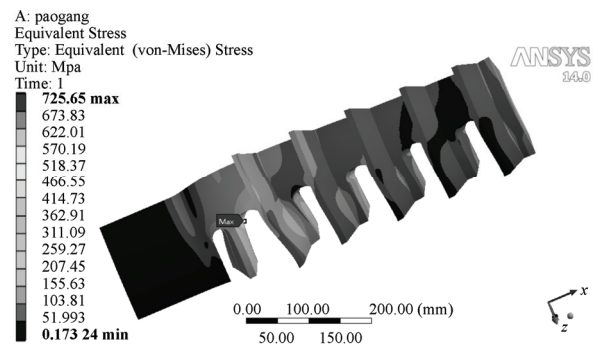
2 炮口制退器有限元分析

TC4 钛合金属于 $\alpha+\beta$ 型钛合金，其名义成分为 Ti-6Al-4V。其部分材料性能参数如表 1 所示。

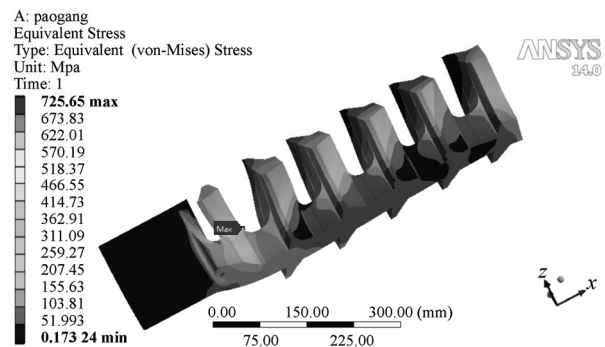
表 1 TC4 钛合金部分材料性能参数

材料号	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(g/cm ³)
TC4	895	110	0.34	4.5

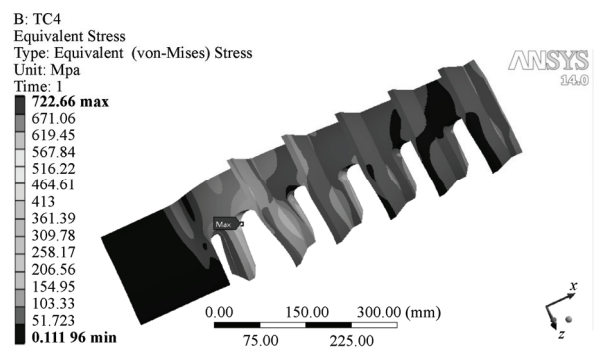
在火药气体排空过程中，炮口制退器内外壁面要承受高温高压高速的火药气体强烈的冲击作用。实际情况中，炮口制退器各个壁面所承受的压力是随时间变化的；但在文中，不考虑动态的气体压力作用，只考虑静态情况下各个壁面承受最大气体压力作用。对炮口制退器进行静力学分析，得到炮钢材料和 TC4 钛合金材料下的炮口制退器应力云图，如图 2 所示。



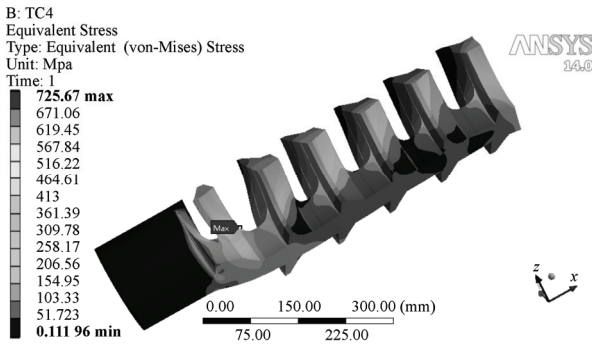
(a) 炮钢材料炮口制退应力云图



(b) 炮钢材料炮口制退应力云图



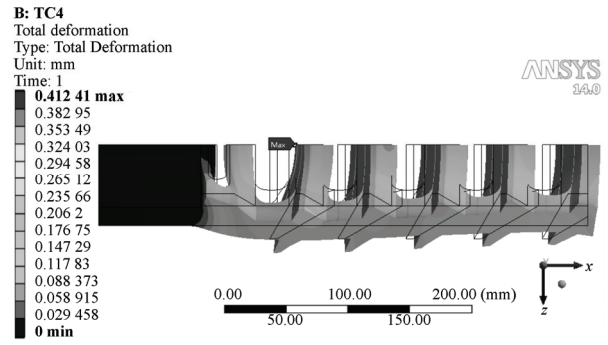
(c) TC4 材料炮口制退应力云图



(d) TC4 材料炮口制退应力云图

图 2 2 种材料炮口制退器应力云图

炮口制退器应力云图相比较可发现：最大应力出现在侧孔倒角处，TC4 材料下的炮口制退器最大应力 722.67 MPa，比炮钢材料下最大应力 725.65 MPa 稍小，都满足使用要求。两者应力分布相同，首个挡板受力最大，并依次向外递减。



(d) TC4 材料炮口制退器变形云图

图 3 2 种材料炮口制退器变形云图

通过图 3 相比较可发现，炮钢材料下最大变形量为 0.225 87 mm，TC4 材料下最大变形量为 0.412 41 mm，两者变形规律相同。如表 2 所示，炮钢材料下本炮口制退器模型质量为 92.468 kg，采用 TC4 钛合金材料后，其质量为 53.008 kg，质量减少了 39.46 kg，减重百分比达 42.67%。

表 2 2 种材料炮口制退器有限元计算结果对比

材料	最大应力/MPa	最大变形量/mm	质量/kg
炮钢材料	725.65	0.225 87	92.468
TC4	722.67	0.412 41	53.008

3 结论

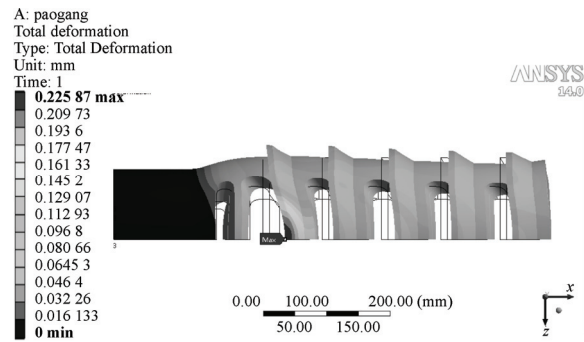
通过 2 种材料的应力云图对比发现，两者最大应力相差不大，并且其应力分布规律一致。这也说明在有限元静力学分析中，对于各向同性的线弹性材料，当所研究对象的几何形状、边界条件以及网格类型相同时，材料的不同并不对结构的应力分布规律产生太大的影响，影响的只是最大应力数值。

由于 TC4 的弹性模量较小，所以 TC4 材料下的炮口制退器的最大变形量均比炮钢材料大。

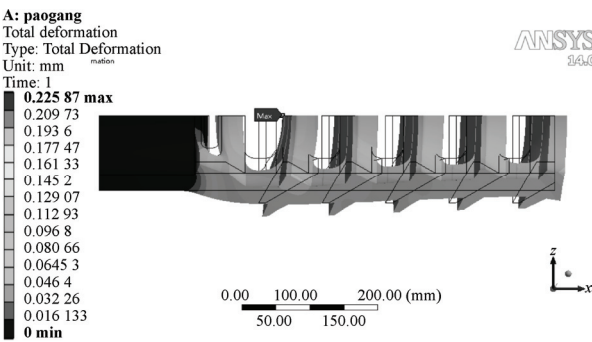
由于钛合金的密度比炮钢密度小得多，所以其减重效果很明显，从而减小其他部件的设计难度。

参考文献：

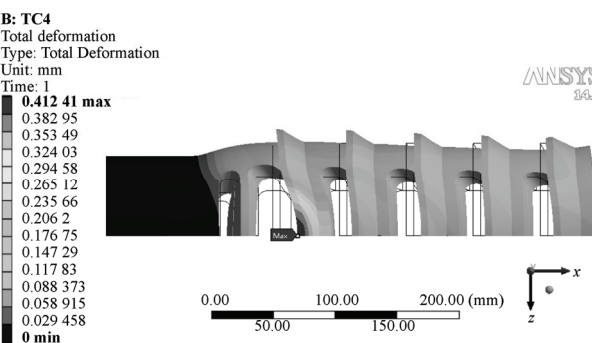
- [1] 谈乐斌, 张相炎, 管红根, 等. 火炮概论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 75-78.
- [2] 黄晓艳, 刘波. 钛合金是武器装备轻量化的首选金属材料[J]. 轻合金加工技术, 2007(35): 12-15.
- [3] 张辉. 复杂流场数值方法研究及在炮口制退器设计中的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009: 71-72.
- [4] 江坤. 炮口制退器优化设计理论与方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007: 12-16.
- [5] 张焕好, 陈志华, 姜孝海, 等. 膛口装置三维流场的数值模拟及制退效率计算[J]. 兵工学报, 2011, 32(5): 513-519.



(a) 炮钢材料炮口制退器变形云图



(b) 炮钢材料炮口制退器变形云图



(c) TC4 材料炮口制退器变形云图