

doi: 10.7690/bgzdh.2016.07.006

## 基于流固耦合的复合结构炮口制退器强度分析

吴喜富, 郑建国

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 为减小炮口制退器质量并能耐烧蚀, 设计一种复合结构的炮口制退器。分别采用炮钢和钛合金材料组成炮口制退器的内、外层结构。以带炮口制退器的炮口流场的瞬态动载荷为计算条件, 利用单向流固耦合方法对复合结构炮口制退器进行强度分析。分析结果表明: 复合结构炮口制退器可满足强度要求, 且质量明显小于全炮钢炮口制退器, 可为提高炮口制退器的性能提供一种新的设计思路。

**关键词:** 炮口制退器; 复合结构; 钛合金; 瞬态动载荷; 流固耦合

**中图分类号:** TJ306 **文献标志码:** A

## Strength Analysis of Muzzle Brake with Composite Structure by Method of Fluid Solid Coupling

Wu Xifu, Zheng Jianguo

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** A muzzle brake with composite structure is proposed to reduce the mass and resist ablation. The muzzle brake with composite structure is composed of inner structure and outer structure, whose inner structure is made of gun steel and whose outer structure is made of titanium alloy. Based on the transient dynamic load which is calculated from muzzle flow field with muzzle brake, the strength analysis of muzzle brake with composite structure is operated via fluid solid coupling method. The results show that the muzzle brake with composite structure can meet the required strength, and its mass is much smaller than that of muzzle brake which is made of gun steel, it opens a new avenue for the design strategies of high-performance muzzle brake.

**Keywords:** muzzle brake; composite structure; titanium alloy; transient dynamic load; fluid solid coupling

### 0 引言

火炮素有“战争之王”的称号, 在战争中有不可替代的地位。现代战争具有突发性和速战性等特点。这要求火炮不仅具有快速反应能力和精确打击目标能力, 还要有足够摧毁目标的威力。炮口制退器是身管的重要组成部分, 主要作用是减小后坐动能。通过减小后坐动能可以减小对炮架的作用力, 从而减小火炮质量<sup>[1]</sup>。炮口制退器的应用促进了火炮的轻量化发展。但是, 炮口制退器安装在炮口处, 增加了身管的负荷, 从而提高了火炮对身管的强度要求; 炮口制退器还影响炮口扰动, 从而降低火炮的射击精度<sup>[2]</sup>。为此, 笔者提出一种用轻质炮口制退器替代传统炮口制退器方法。

钛合金是一种应用比较广泛的轻金属合金, 它具有高强度、低密度和耐腐蚀等优点, 广泛应用于航空航天和航海等领域<sup>[3-5]</sup>。钛合金的密度约为炮钢材料的一半, 一个 120 kg 的传统炮口制退器如果采用钛合金材料, 质量就会减为 60 kg, 可大幅度地降低炮口制退器的质量。此外, 在生产钛合金炮口制

退器过程中, 通过改善加工工艺, 不仅可提升材料的利用率, 而且可以降低生产成本<sup>[6]</sup>。但是钛合金不耐烧蚀, 炮口流场是一个高温高压流场, 最高温度可达 2 000 °C, 对炮口制退器三腔室和三排侧孔等与火药气体直接接触的表面会产生严重的烧蚀。

为此, 笔者设计出一种既可以减轻炮口制退器的质量, 又可以防烧蚀的复合结构炮口制退器, 并以炮口流场模拟得到的瞬态动载荷为计算条件, 通过流固耦合方法<sup>[7-8]</sup>对复合结构炮口制退器进行强度分析, 以检验这种炮口制退器的可行性。

### 1 计算模型

图 1 所示为复合结构炮口制退器剖分后的局部三维模型。它是根据某 155 mm 火炮的冲击-反作用式炮口制退器设计的, 其整体尺寸和结构特点也与冲击反作用式炮口制退器一致。笔者采用 Creo 软件分别建立复合结构炮口制退器的内层炮钢结构和外层钛合金结构, 并在 Creo 中进行结构的装配, 然后导入 Ansys Workbench 中进行计算。

收稿日期: 2016-03-18; 修回日期: 2016-04-29

作者简介: 吴喜富(1991—), 男, 广西人, 硕士, 从事火炮设计理论、武器流体力学研究。

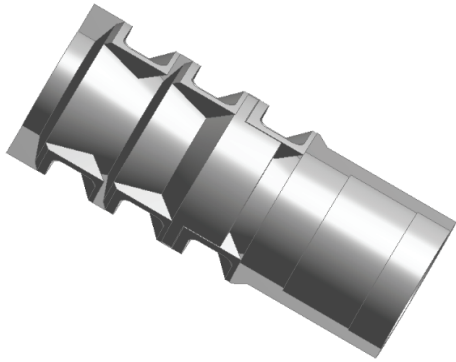


图 1 复合结构炮口制退器剖分的局部三维模型

## 2 计算理论

火药气体作用在炮口制退器上的冲击载荷是一个瞬态载荷；因此，笔者采用单向流固耦合方法给炮口制退器施加瞬态动载荷，可以更准确地还原复合结构炮口制退器受火药气体作用后的强度变化情况。分析复合结构炮口制退器的强度需要用到计算流体力学、流固耦合方法及瞬态动力学等。基于 Ansys Workbench 软件平台分析复合结构炮口制退器强度的流程如图 2 所示。

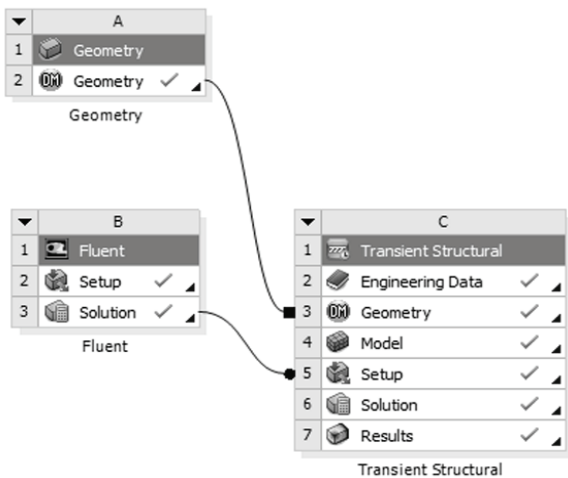


图 2 复合结构炮口制退器强度分析流程

笔者采用 ICMCFD(The integrated computer engineering and manufacturing code for computational fluid dynamics)软件划分炮口流场的结构网格，然后采用三维直角坐标系下的  $N-S$  方程并结合标准  $\kappa-\varepsilon$  雷诺湍流模型计算炮口流场。为提取炮口制退器受火药气体作用的冲击载荷，定义炮口流场的边界时，必须单独定义炮口流场与炮口制退器耦合面的边界。

### 2.1 流固耦合理论

流固耦合理论是流体力学和固体力学交互作用的产物，可理解为既要考虑流体计算，又不能忽略

固体计算。采用流固耦合方法不但能有效地节约计算时间和成本，而且能真实地描述物理现象的本质。

流固耦合问题的本质是流体域与固体域交界面的数据传递问题。采用流固耦合方法在界面需要遵守守恒定律，界面变量主要有应力  $\tau$ 、位移  $d$ 、热能量  $q$  及温度  $T$ ，方程表达式<sup>[9]</sup>为：

$$\left. \begin{aligned} \tau_f \cdot n_f &= \tau_s \cdot n_s \\ d_f &= d_s \\ q_f &= q_s \\ T_f &= T_s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中：下标 f 表示流体；s 表示固体。

Ansys Workbench 中提供的耦合方法有直接解法和分离解法。直接解法没有滞后性，但是需要更多的计算时间和增加收敛难度。分离解法是以一定次序计算流体控制方程和固体控制方程，再通过耦合面进行数据传递。分离解法存在一定滞后性，但是可以加快计算速度。文中采用的单向流固耦合方法就属于分离解法的一种。单向流固耦合就是在流固耦合面上进行数据的单向传递，即流体计算结果单向传递给固体结构。单向流固耦合主要用在固体变形小、变形量对流场的影响可忽略不计的情况。

### 2.2 瞬态动力学理论

在装有炮口制退器的火炮中，以弹丸飞离炮口为初始时刻，身管内的火药气体一部分从炮口制退器的中央弹孔喷出，另一部分从炮口制退器的侧孔喷出，整个过程只有短暂的几十毫秒。在这个过程中，炮口制退器受到火药气体作用的压力值先从一个大气压升到几百个大气压，再回到与大气压相等的值。即炮口制退器受力的作用过程是一个瞬态变化的动载荷过程。

瞬态动载荷分析是动力学的一种，表示应力或位移等随时间变化的响应分析，用于分析结构受力随时间变化的载荷作用下的动态响应。输入的数据为时间载荷函数，输出数据为随时间变化的应力或其他输出量，如位移、应变等。根据经典力学理论可以知道，三维实体动力学的运动方程<sup>[10]</sup>为：

$$[M]\{\ddot{a}(t)\} + [C]\{\dot{a}(t)\} + [K]\{a(t)\} = \{F(t)\} \quad (2)$$

式中： $\{\ddot{a}(t)\}$ 、 $\{\dot{a}(t)\}$ 和 $\{a(t)\}$ 分别为系统结点的加速度矢量、速度矢量和位移矢量； $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 和 $\{F(t)\}$ 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和结合点力矢量。

### 3 计算结果分析

基于 Ansys Workbench 软件平台，利用 Fluent 软件计算出带炮口制退器的炮口流场，通过单向流固耦合方法得到施加在炮口制退器上的压力，然后采用瞬态动力学分析模块 (Transient structural) 对复合结构炮口制退器进行强度分析。

复合结构炮口制退器由内层炮钢结构和外层钛合金结构复合而成，炮钢结构和钛合金结构之间是面接触关系。Ansys Workbench 提供了几种接触类型：绑定 (Bonded)、无分离 (No separation)、无摩擦 (Frictionless)、粗糙 (Rough)、摩擦 (Frictional) 和强制摩擦滑动 (Forced frictional sliding)。假设复合结构炮口制退器是通过浇注的形式制成，即炮钢结构和钛合金结构之间是绑定关系；所以，分析复合结构炮口制退器的强度，不仅要分析整体强度，而且要分析炮钢结构和钛合金结构接触面的切应力大小，判断结构是否会发生分裂。

由于炮口流场只取 1/4 模型进行分析，模拟过程只有 3 ms；所以，只取 1/4 复合结构炮口制退器模型进行强度分析，分析总时长为 3 ms，时间步长为 0.01 ms。

图 3 表示的是带炮口制退器的炮口流场速度矢量图。从图中可以看出：火药气体一部分经中央弹孔向外喷出，另一部分经三排侧孔向外喷出。经三排侧孔喷出的火药气体先是撞击前挡板，然后改变运动方向向侧后方运动。在这个过程中，炮口制退器承受了火药气体的强冲击力，而且三排侧孔承受的冲击力是从右到左依次递减。由力学知识可知：前挡板的应力要大于其他地方的应力，三排侧孔的应力是从右到左依次减小。

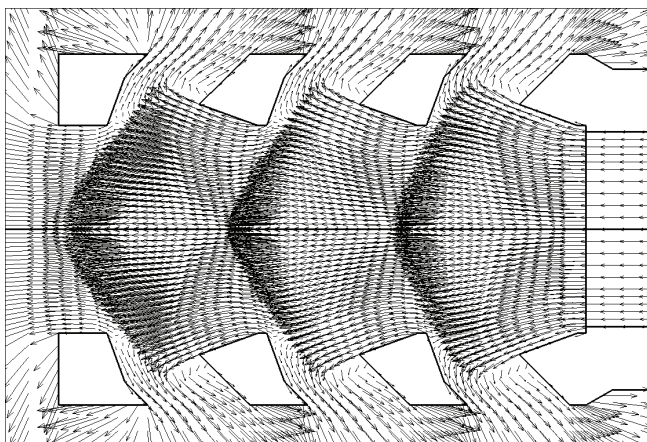


图 3 带炮口制退器的炮口流场速度矢量

图 4 为炮钢结构在应力最大时刻的应力云图。从图中可以看出：炮钢结构最大应力出现在第一排

斜切口的前端靠右侧，最大应力 1 103 MPa。此处的应力值达到这么高，可能是因为它受到的冲击最大。最大应力点在一个易产生应力集中拐角区域，此外，该处还受到冲击力的叠加作用。炮钢结构其他应力较大的区域集中在前挡板和侧孔。这是因为经侧孔向外喷出的火药气体，由于前挡板的存在改变了其运动方向，所以前挡板受到了很大的冲击力。

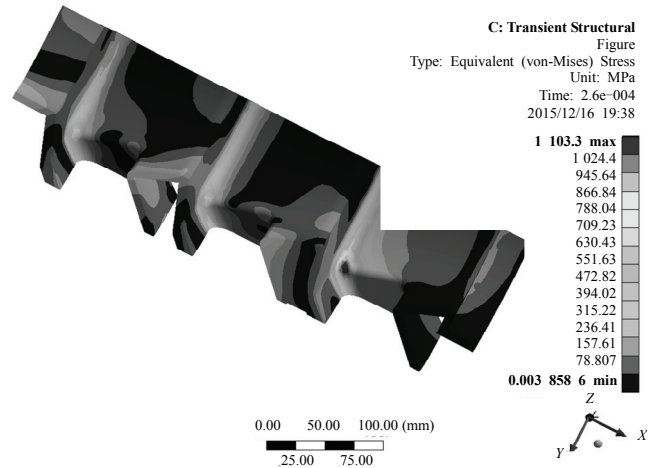


图 4 炮钢结构在应力最大时刻的应力云图

图 5 所示为钛合金结构在应力最大时刻的应力云图。从图中可以看出：钛合金结构的最大应力为 250 MPa，出现在第二排斜切口。最大应力远小于钛合金的屈服极限，钛合金结构属于绝对安全状态。

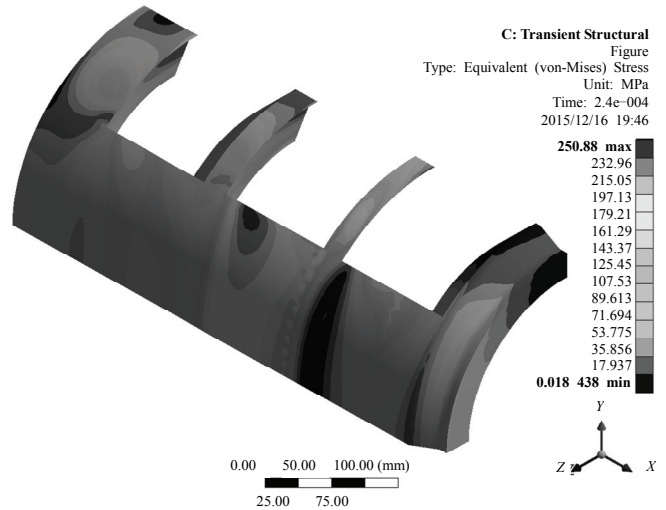


图 5 钛合金结构在应力最大时刻的应力云图

炮钢结构和钛合金结构的最大应力随时间变化的曲线如图 6 所示。从图中可以看出，炮钢结构和钛合金结构的最大应力随时间的变化是振动的过程。这是因为复合结构炮口制退器受到随时间变化的载荷作用，而引起的结构自振。通过对复合结构炮口制退器的模态分析结果可知，分析过程中引起的结构自振是一阶振动。炮钢结构和钛合金结构的

最大应力出现于第一个振动波形。

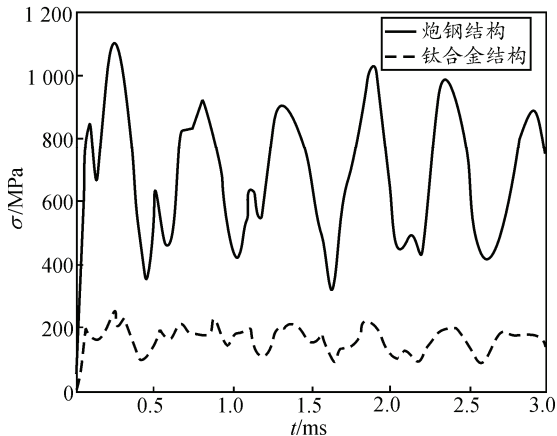


图 6 炮钢结构和钛合金结构的最大应力随时间变化曲线

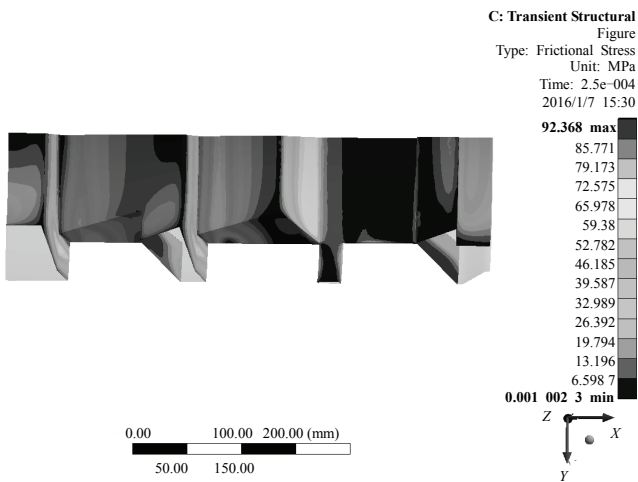


图 7 炮钢结构与钛合金结构接触面在最大切应力时刻的切应力云图

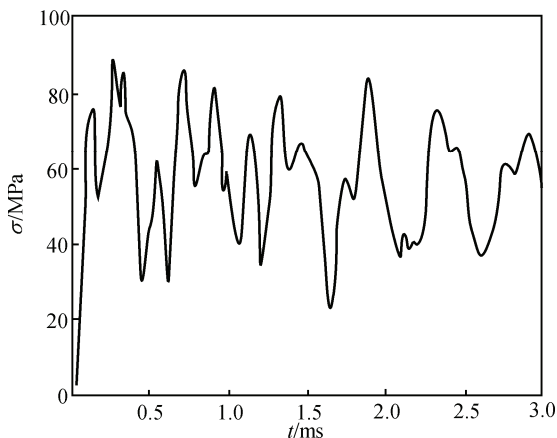


图 8 炮钢结构与钛合金接触面最大切应力变化曲线

炮钢结构和钛合金结构接触面在最大切应力时刻的切应力云图如图 7 所示。由图中可以看出：接触面的最大切应力为 92 MPa，出现在第二排斜切口的侧端。其他较大切应力出现在第一腔室前端、第二腔室中间以及第二侧孔和第三排侧孔。

炮钢结构与钛合金结构接触面的最大切应力变

化曲线如图 8 所示。由图中可以看出：最大切应力是随时间振动的波形，这是因为分析过程中引起了结构的一阶振动。最大切应力出现在第一个波形。

### 4 结论

笔者设计了以炮钢材料为内层结构、钛合金材料为外层结构的复合结构炮口制退器，并基于 Ansys Workbench 软件平台，以炮口流场的瞬态动载荷为计算载荷，利用单向流固耦合方法分析其在瞬态动载荷作用下的强度。由分析结果可知：炮钢结构最大应力为 1 103 MPa，钛合金结构最大应力为 250 MPa，即笔者设计的复合结构炮口制退器符合强度要求。内层炮钢结构和外层钛合金结构接触面的最大切应力为 92 MPa，2 种结构并没有发生分裂等现象，说明此结构设计合理。

该复合结构炮口制退器不仅符合工作强度需求，而且它的质量仅有 87 kg，有效地降低了炮口制退器质量。复合结构炮口制退器为炮口制退器的发展提供了一种新思路。

### 参考文献：

- [1] 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: 168-169.
- [2] 岳明凯, 刘欣宁. 炮口制退器现状及其发展趋势[J]. 兵工自动化, 2015, 34(3): 1-6.
- [3] Cui C X, Hu B M, Zhao L C, et al. Titanium alloy production technology, market prospects and industry development[J]. Materials & Design, 2011, 32(3): 1684-1691.
- [4] 付艳艳, 宋月清, 惠松晓, 等. 航空用钛合金的研究与应用进展[J]. 稀有金属, 2006, 30(6): 850-856.
- [5] Sima M, Özel T. Modified material constitutive models for serrated chip formation simulations and experimental validation in machining of titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(11): 943-960.
- [6] 李保成, 赵家萍, 张治民. 钛合金炮口制退器铸造-挤压成形强化技术研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2006, 29(4): 45-47.
- [7] 陈锋, 王春江, 周岱. 流固耦合理论与算法评述[J]. 空间结构, 2012, 18(4): 55-63.
- [8] 张磊, 郎进花, 王松岭. 流固耦合问题数值模拟算法研究进展[J]. 热力发电, 2015, 44(1): 1-7.
- [9] 宋学官, 蔡林, 张华. ANSYS 流固耦合分析与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 2-4.
- [10] 万峻麟, 聂宏, 李立春, 等. 基于瞬态动力学方法的月球探测器软着陆腿着陆冲击性能分析[J]. 兵工学报, 2010, 31(5): 567-573.