

doi: 10.7690/bgzdh.2015.01.008

# 枪管强度的理论计算与数值计算的误差分析

张振辉, 秦涛, 付强

(中国兵器工业第二〇八研究所枪械系统研究室, 北京 102201)

**摘要:** 针对现有文献对枪管强度计算的误差分析缺乏研究的问题, 笔者将给出枪管强度计算的误差来源及提高求解精度的方法。笔者基于 Abaqus 软件对某枪管强度进行数值计算, 并采用最大线应变准则、最大切应力准则和第四强度理论进行计算, 将理论计算结果与仿真结果进行对比, 并给出了离散误差和数值误差对计算结果的影响。仿真结果表明: 采用第四强度理论作为枪管设计和校核的理论依据较为合理, 采用 C3D8I 单元类型计算结果比 C3D8R 单元类型计算结果更加逼近第四强度理论计算结果。

**关键词:** 枪管; 强度准则; Abaqus; Von Mises; 数值误差

**中图分类号:** TJ205 **文献标志码:** A

## Error Analysis of Theoretical Calculation and Numerical Calculation of the Gun Barrel Strength

Zhang Zhenhui, Qin Tao, Fu Qiang

(Research Department of Gun Systems, No. 208 Research Institute of China Ordnance Industries, Beijing 102201, China)

**Abstract:** Due to the lack of gun barrel strength calculation of the error analysis, this paper will analyze the gun barrel's strength with Abaqus software, and calculate the gun barrel's strength with the maximum strain criterion, the maximum shearing stress criterion and the fourth strength theory, then compare the simulation results with the theoretical calculations. The effect of discretization error and numerical error on calculation results will be given. The calculation results show that using the fourth strength theory as a theoretical basis for designing and checking is more reasonable. The simulation results present that the C3D8I element type calculation results are more close to the fourth strength theoretical solution than the C3D8R element type.

**Keywords:** gun barrel; strength criterion; Abaqus; Von Mises; numerical error

### 0 引言

强度理论是研究材料在复杂应力下的屈服和破坏的规律。强度理论包括屈服准则、破坏准则、多轴疲劳准则、多轴蠕变条件、以及计算力学和计算程序中的材料模型<sup>[1]</sup>。

19 世纪, 第一强度理论被采用并写入 Rankine 的著名的应用力学手册和教科书, 该理论认为最大拉应力或最大压应力是决定材料强度的准则。Mariotte 首次对最大线应变准则(又称为 Saint-Venant 准则)做出论述, 该理论认为当材料最大应变等于单项拉伸屈服应变时发生破坏。1864 年, Tresca 发表了关于金属在高压下流动的报告, 他认为金属流动时最大剪应力保持为一定的常量, 现在称为 Tresca 屈服准则。1856 年, Maxwell 提出了现在称之为最大形状改变能的屈服理论(第四强度理论), 他认为形状改变能是材料破坏的主要原因, 但是这一思想在 20 世纪 30 年代才被人们知晓<sup>[1]</sup>。

枪管的主要作用是赋予弹头一定的方向和初速

度<sup>[2]</sup>。设计枪管外形时, 首先应进行强度计算, 以决定各主要断面的壁厚。枪管在射击时, 承受高温、高压火药气体的作用, 以及和弹头发生机械摩擦, 因此要求枪管材料有较高的弹性极限, 足够的冲击韧性, 均匀的成分和组织, 良好的可加工性和足够的耐磨性、耐烧蚀能力, 因此枪管的强度计算是枪械设计关键问题之一<sup>[3-5]</sup>。

一些学者对枪管的残余应力、残余应变和弹塑性变形进行了理论计算和数值仿真, 但是缺乏对数值解的误差分析<sup>[6-7]</sup>。基于此, 笔者采用最大线应变准则、最大切应力准则和畸变能密度准则, 分别校核枪管承受火药气体压力作用的强度。最后, 笔者采用 Abaqus/Standard 求解器求解枪管的应力分布, 分析离散误差和数值误差对结果的影响, 并将数值仿真结果与上述理论准则计算结果进行对比。

### 1 枪管强度的理论求解

射击时, 枪管承受的力很复杂, 有火药气体的压力, 弹头在膛内运动的作用力, 枪管后座的惯性

收稿日期: 2014-07-30; 修回日期: 2014-09-17

作者简介: 张振辉(1985—), 男, 山西人, 工学硕士, 助理工程师, 从事枪械结构设计研究。

力和因受热而产生的热应力等。为了简化计算，近似认为枪管仅受有均匀分布的火药气体压力。由于枪管不存在刚性位移，火药气体压力为均布压力，外界大气压力不计，边界约束呈轴对称分布，以枪管壁内某微小单元体作为研究对象，应力分析见图 1 所示。

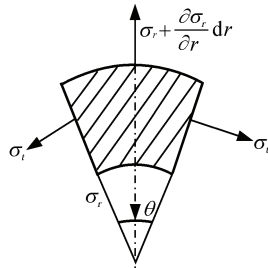


图 1 枪管壁内某微小单元体受力分析

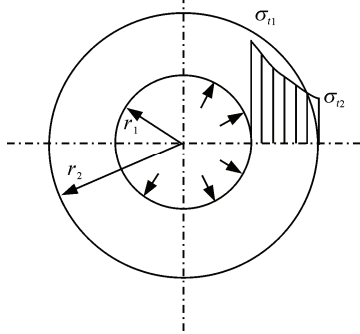


图 2 枪管任意截面应力分布

### 1.1 理论方程建立及求解

由于约束是轴对称的，因此为轴对称平面位移问题，位移与  $\theta$  无关，枪管断面应力分布见图 2。应力表达式和边界条件表达式分别为：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{A}{r^2} + 2C \\ \sigma_\theta &= -\frac{A}{r^2} + 2C \\ \tau_{r\theta} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} (\tau_{r\theta})_{r=r_1} &= 0 \\ (\tau_{r\theta})_{r=r_2} &= 0 \\ (\sigma_r)_{r=r_1} &= -P \\ (\sigma_r)_{r=r_2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \frac{-p}{r^2} + \frac{r_1^2 p}{r_2^2 - r_1^2} \\ \sigma_\theta &= -\frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \frac{-p}{r^2} + \frac{r_1^2 p}{r_2^2 - r_1^2} \\ \tau_{r\theta} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： $\sigma_r$  为径向应力； $\sigma_\theta$  为环向应力； $\tau_{r\theta}$  为切应力； $r_1$  为枪管内径； $r_2$  为枪管外径； $p$  为枪管所承受的均布压力；式 (1) 和式 (2) 联立可以得到微小单元体的各向应力值，见式 (3)。

### 1.2 基于强度准则求解枪管强度

1) 根据最大线应变准则(第二强度理论准则)，该理论认为材料在某一方向的伸张或压缩变形是材料破损的主要原因，即当最大线应变达到简单拉压条件下的极限应变时，材料即行破坏。因此，为了保证枪管强度，要求这个变形不得超出没有残余变形的某一极限。计算枪管承受火药气体压力情况下的应力为：

$$\sigma_t = E \varepsilon_t = \frac{r_1^2 p}{r_2^2 - r_1^2} [(1 + \mu) \frac{r_2^2}{r^2} + (1 - \mu)] \quad (4)$$

式中： $E$  为枪管材料弹性极限； $\varepsilon_t$  为枪管某断面的切向线应变； $\mu$  为泊松比。

当  $r = r_1$  时， $\sigma_t = \sigma_{t1}$  为切向应力的最大值：

$$\sigma_{t1} = \frac{[(1 + \mu)r_2^2 + (1 - \mu)r_1^2]}{(r_2^2 - r_1^2)} p \quad (5)$$

2) 根据最大切应力准则(第三强度理论准则)，该理论认为最大切应力是引起材料塑性流动破坏的主要因素。

$$\sigma_t = \frac{2r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \frac{p}{r^2} \quad (6)$$

当  $r = r_1$  时， $\sigma_t = \sigma_{t1}$  为切向应力的最大值：

$$\sigma_{t1} = \frac{2r_2^2 p}{r_2^2 - r_1^2} \quad (7)$$

3) 根据畸变能密度准则(第四强度理论准则)，该理论认为材料塑性流动主要取决于畸变能密度。

$$\sigma_t = \frac{r_1^2 p}{r_2^2 - r_1^2} \sqrt{\frac{3r_2^4}{r^4} + 1} \quad (8)$$

当  $r = r_1$  时， $\sigma_t = \sigma_{t1}$  为切向应力的最大值：

$$\sigma_{t1} = \frac{\sqrt{3r_2^4 + r_1^4}}{r_2^2 - r_1^2} p \quad (9)$$

例：已知某自动步枪枪管各断面尺寸及膛压曲线  $p-l$ (见表 1)。枪管材料为 50BA，材料参数详见表 2。在求解枪管在膛压作用下的应力大小时，首先将最大膛压点延伸至膛底、向右延伸 2.5 倍口径，详细内容见文献[2]。

根据式 (5), 式 (7) 和式 (9) 推导并带入数据求得表 1 结果。根据计算结果可知:

1) 最大剪应力准则计算枪管强度结果偏高, 最大线性变准则计算所得结果偏低, 而第四强度准则计算所得结果居中, 这些结果主要取决于各个不同的理论公式。枪管材料大都采用高强度合金钢, 其受力情况复杂, 最大剪应力准则计算结果偏于安全, 最大线性应变准则计算结果偏于危险, 因此文献[2]引

入不同安全系数来修正计算结果与实际强度之间的误差, 第四强度准则计算结果较为合理, 建议采用。

2) 3种强度准则和 Abaqus 软件计算枪管弹膛部分的应力值均大于材料的屈服强度, 实际枪管材料在该处不会发生屈服和断裂, 这是由于弹膛部分内部有弹壳, 外部有节套和机匣, 且枪管在该处经过二次淬火, 硬度较高, 因此单纯计算枪管在膛压作用下的强度, 应力会超出材料屈服强度。

表 1 基于强度理论准则枪管强度计算结果和 Abaqus 分析结果

端面	断面位置/mm	内径/mm	外径/mm	膛压/MPa	第二强度准则/MPa	第三强度准则/MPa	第四强度准则/MPa	Abaqus 解/MPa
1-1	0	5.68	11.00	280.0	559.20	763.60	669.09	634.50
2-2	18.50	5.27	11.50	280.0	504.46	708.86	618.39	600.00
3-3	27.20	5.06	11.50	280.0	490.04	694.44	605.15	561.81
4-4	29.50	4.37	11.50	280.0	450.11	654.51	568.79	585.02
5-5	34.70	4.33	11.00	280.0	458.28	662.68	576.19	525.75
6-6	36.70	4.30	14.50	280.0	409.60	614.00	532.42	514.56
7-7	40.00	4.20	14.50	280.0	406.89	611.29	530.01	508.65
8-8	45.70	3.96	11.00	279.8	438.67	642.92	558.34	555.96
9-9	69.00	3.96	9.03	240.7	420.31	596.02	519.34	519.73
10-10	95.00	3.96	8.75	194.6	347.39	489.45	426.83	427.29
11-11	186.50	3.96	8.28	110.5	205.88	286.54	250.31	248.16
12-12	260.50	3.96	8.00	81.8	156.98	216.70	189.53	188.24
13-13	447.00	3.96	7.28	49.9	105.31	141.74	124.53	118.12
14-14	507.00	3.96	6.35	44.4	112.90	145.31	128.98	121.13
15-15	520.00	3.96	6.35	44.0	111.88	144.00	127.82	117.21

表 2 枪管材料机械性能<sup>[2]</sup>

钢号	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	屈服点 $\sigma_s$ /MPa	伸长率 $\delta_5$ /%	收缩率 $\psi$ /%	泊松比
50BA	800~1 000	550	8	40	0.27

## 2 基于 Abaqus 求解枪管强度

### 2.1 有限元建模及求解

通过表 1 数据可以建立枪管几何模型(见图 3), 将建立的几何模型导入 Hypermesh 前处理软件进行有限元网格划分, 单元类型采用等参六面体单元, 将划分好的网格模型导入 Abaqus 软件进行设置求解并进行后处理。膛压施加是通过空间解析场 Analytical Field 建立参数方程, 使得膛压是关于轴向距离的函数(见图 4)。计算结果见图 5。

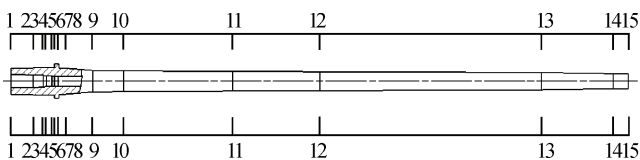


图 3 枪管断面示意图

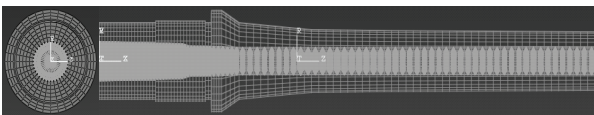


图 4 枪管有限元模型及膛压施加

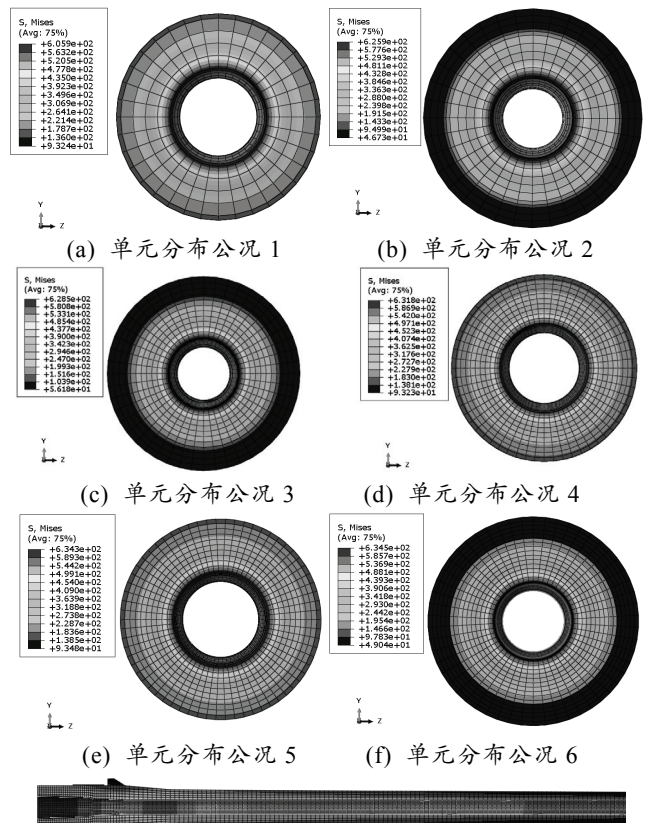


图 5 不同工况下枪管 Von Mises 应力云图

根据 Abaqus 计算结果可知: 枪管强度最大值为 634.5 MPa, 位置在枪管弹膛部分前端内表面处。Abaqus 采用 Von Mises 准则正是第四强度理论计算

所得，因此仿真结果与第四强度理论计算结果相对误差较小。

## 2.2 离散误差和数值误差对计算结果影响

网格划分精度和单元类型选取对枪管强度计算会产生影响。网格划分质量对计算结果精度具有较大的影响，由网格划分引起的误差称为离散化误差。枪管有限元建模是通过二维壳单元通过旋转拉伸形成三维实体模型，因此壳单元需要足够高的质量，实体单元沿枪管周向分布需要足够多的数量。图5给出了6种工况下，不同单元密度对计算结果的误差分析。

图5(a)~(f)对应了不同单元密度6种工况下枪管强度应力云图。由图5可知，网格经过细化并且枪管轴向分布足够密的单元后，枪管的应力趋于收敛，并收敛于1个定值，可见离散化误差是人为可控误差，在有限元分析时需要尽可能提高求解精度。

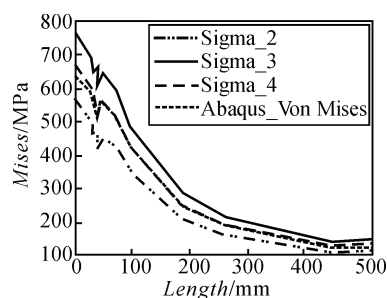


图6 枪管应力计算结果

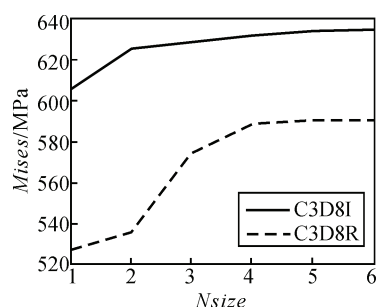


图7 不同单元类型对计算结果影响

由于单元类型选取而引起的计算误差称为数值误差。数值误差不是人为引起的，而是根据有限元计算本身引起的。表3中给出了不同单元类型在相同网格划分的工况下，枪管的应力最大值响应情况。由表3可知：不论何种单元类型，只要网格划分足够细，那么计算结果会收敛于1个定值。图6比较了第二强度准则、第三强度准则、第四强度准则和Abaqus求解结果进行了对比，通过对比可知第四强度准则计算结果与Abaqus求解结果最为相

近。由图7曲线可知，采用C3D8I单元类型比C3D8R单元类型求解的结果更加逼近第四强度准则的理论解。

表3 单元类型对枪管强度影响

Nsize 编号	单元大小分布	C3D8I		C3D8R	
		Von	Mises/MPa	Von	Mises/MPa
1	1.2×1.2×36	605.9		526.9	
2	1.0×1.0×36	625.9		535.9	
3	0.8×0.8×36	628.5		574.3	
4	0.8×0.8×54	631.8		588.6	
5	0.8×0.8×60	634.3		590.9	
6	0.6×0.6×72	634.5		591.1	

## 3 结论

笔者通过强度准则的理论推导，求得枪管在膛压作用下的强度响应，采用Abaqus有限元数值仿真软件求得枪管应力云图，并给出了数值解和各理论解的结果，最后分析了离散误差和数值误差对结果的影响。总结如下：

1) 最大线应变准则计算结果偏于危险，最大剪应力准则计算结果偏于保守，建议采用第四强度理论进行枪管外形设计并作为强度校核理论准则。

2) Abaqus采用Von Mises准则计算枪管强度与第四强度准则计算结果误差较小，说明仿真结果可靠、可行。

3) 结构强度校核中，分析人员应采用高精度单元进行数值计算，减小离散化误差，以提高数值计算精度。单元类型建议采用非协调模式，由计算结果来看，非协调模式的单元类型比减缩积分单元类型计算所得应力值更逼近理论解。

## 参考文献：

- [1] 俞茂宏. 强度理论百年总结[J]. 力学进展, 2004, 34(4): 529-559.
- [2] 步兵自动武器及弹药设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1977: 98-103.
- [3] 张永昌. 材料的非线性混合硬化模型及自紧身管残余应力、应变的计算[J]. 兵工学报: 坦克装甲车及发动机分册, 1982, 9(3): 1-7.
- [4] 张福田. 自紧身管的弹塑性分析与强度设计[J]. 兵工学报: 坦克装甲车与发动机分册, 1984, 3(1): 35-42.
- [5] 黄士振, 卢静玉, 沈培辉. 厚壁圆筒半椭圆表面浅裂纹的应力强度因子[J]. 兵工学报, 1991(1): 91-96.
- [6] Zeng Zhiyin, Ning Bianfang, Wang Zaisen. A Finite Element Solution for Barrel Dynamic Stress[J]. Journal of China Ordnance, 2007, 3(1): 11-14.
- [7] Fan Lixia, Hu Zhigang, Zhao Jianbo. Thermo-Mechanical Analysis of Water-Cooled Gun Barrel During Burst Firing[J]. Journal of China Ordnance, 2006, 2(1): 1-6.