

doi: 10.7690/bgzdh.2016.06.004

太阳辐射下狙击枪枪管附近流场及其热变形分析

张艳蓉, 周克栋, 冯国桐, 赫 雷

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为了预测太阳辐射下狙击枪枪管的变形程度, 以某型狙击步枪为基础, 在 CFX 与 ANSYS 中建立了空气与枪管的瞬态热流固耦合计算模型, 求解枪管与外界的对流换热系数。计算得到 3 h 内枪管附近对流换热流场情况、枪管温度场变化以及最终枪管变形程度, 分析枪管周围流动换热结果和枪管热变形结果, 显示太阳辐射作用下枪管周围会产生显著热对流效应, 热气流上升最终产生复杂的大气湍流运动影响了枪管周围的对流换热, 对流换热系数明显不是定值。分析结果表明: 辐射导致的温差与自重耦合作用下枪口弯曲角可达约 0.3 mil, 将对狙击步枪的射击精度产生明显影响。该研究为该类狙击步枪枪管受太阳辐射导致的热变形提供数值预测方法。

关键词: 狙击步枪; 太阳辐射; 枪管; 热变形; 流场

中图分类号: TJ203+.1 **文献标志码:** A

Flow Field and Thermal Deformation Analysis of Sniper Barrel Under Solar Radiation

Zhang Yanrong, Zhou Kedong, Feng Guotong, He Lei

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

Abstract: The estimate of sniper rifle barrel deformation under solar radiation highly depends on accurate convective heat transfer coefficient. Based on a certain sniper model, a transient thermal fluid-solid interaction calculation model of a sniper barrel and nearby air had been built in CFX and ANSYS. The convection heat flow field around barrel, temperature variation and final deformation of barrel within 3 hours were obtained. Calculation results showed that there was obvious convection flow around barrel under solar radiation, complex turbulent air flow would be formed under continuous upper hot flow, this affected convection around barrel. The bending angle at barrel muzzle could reach 0.3mil under the coupling effect of temperature difference resulting from solar radiation and the barrel weight itself, which had obvious effect on shooting accuracy of sniper rifle. So the results will provide a numerical prediction solution for the sniper barrel deformation under solar radiation.

Keywords: sniper; solar radiation; barrel; thermal deformation; flow field

0 引言

狙击步枪是特种作战的利器, 射击精度是其生命。狙击手有时需长时间在野外潜伏, 此时太阳辐射对枪管的影响变得尤为重要。光照不仅引起枪管材质的力学性能变化, 且光照的方向性会造成温度差。2 种作用下枪管发生热弯曲变形, 必然会影响狙击步枪的射击精度^[1]。

何忠波、胡鹏韬、刘红波、罗来科等对炮管、坦克炮管等^[2-8]进行了太阳辐射下变形的多种分析与实验, 表明太阳辐射对火炮射击精度有显著影响, 但在狙击步枪方面未见其他文献。如上文献分析中, 仅根据过往资料就直接给定了一个固体表面与外界换热的热对流系数, 并未考虑周边流体流动对温度场分布的影响。

基于此, 笔者采用 CFX 对一处于有限大空间的狙击步枪枪管进行了热流固耦合分析, 得出了枪管周围空气流动形态及枪管温度场分布。在此基础上

进行热变形分析, 得到了太阳辐射下枪管的热变形程度。

1 辐射-变形原理模型与控制方程

1.1 辐射-变形原理模型

太阳辐射导致狙击步枪枪管变形的原理模型如图 1 所示。太阳辐射输入下枪管的热行为分为对流、辐射换热及发生于本体内部的热传导 3 种方式, 枪管在辐射输入及 3 种方式共同作用下产生温度差, 最终产生热变形。

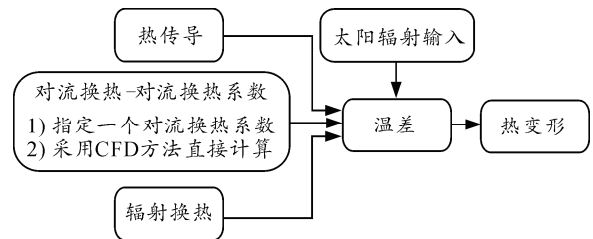


图 1 辐射-变形原理模型

收稿日期: 2016-02-22; 修回日期: 2016-03-30

作者简介: 张艳蓉(1989—), 女, 山西人, 在读硕士, 从事自动武器射击精度、自动武器受热影响研究。

对流换热是计算分析的重点, 其中最重要的是如何确定流固域之间的对流换热系数: 其一是直接指定一个常系数, 正如引言中所述文献涉及对流计算时, 均根据过往资料直接给定了一个对流换热常系数, 但实际中固体表面换热系数并非定值, 而是与周围流体流动情况密切相关。确定合理的对流换热系数是理论分析与单纯热仿真分析中的难点。其二是采用 CFD 方法直接计算流体流动, 进而得到换热系数。笔者将采用此方法, 在 CFX 中直接计算太阳辐射下枪管周围气体的运动以及换热情况, 得出温度差, 而后在 ANSYS 中计算得到热变形。

1.2 枪管固体域传热控制方程

狙击步枪枪管是钢铁制成的空心圆柱体。在三维直角坐标系 (x, y, z) 下, 不含内热源的情况下建立枪管的瞬态温度场 $T(x, y, z, t)$, 满足以下方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

其中 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 各为材料不同方向上导热系数。它是研究枪管瞬态导热问题最基本的方程式。

1.3 枪管周围空气域流动传热控制方程

流体流动遵守物理守恒定律, 基本定律包括质量、动量、能量守恒定律, 其通用控制方程形式为

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (2)$$

其中, 左边第一项为瞬态项, 第二项为对流项, 右边第一项为扩散项, 第二项为广义源项。若流动处于湍流还遵守湍流输送方程。SST 模型 $k-\omega$ 的方程如下式:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho w u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_w \frac{\partial w}{\partial x_j} \right) + G_w - Y_w + D_w + S_w \quad (4)$$

上述方程中, G_k 为平均速度梯度引起的湍动能产生; Y_k 为平均速度湍流脉动膨胀对耗散率的影响; G_w 是用于浮力影响引起的湍动能产生; Y_w 为可压速湍流脉动膨胀对耗散率的影响。其中流体黏性系数为:

$$\mu_t = \rho C \frac{k^2}{\mu \varepsilon} \quad (5)$$

1.4 太阳辐射模型

处于地球表面的枪管吸收的太阳辐射从接受路径上分由 3 部分辐射组成, 即直接辐射、散射辐射以及地面反射辐射。根据 ASHRAE 晴空模型, 晴天地球表面的太阳辐射强度值^[9-13]

$$G_{\text{ND}} = \frac{A}{\exp(B/\sin\beta)} C_N \quad (6)$$

其中: G_{ND} 为太阳垂直照晒辐射强度; A 为大气质量为零时的太阳辐射强度; B 为大气的消光系数; β 为太阳高度角; C_N 为大气清洁度。

2 建立瞬态热流固耦合计算模型

2.1 计算模型简化

某狙击步枪口径 12.7 mm, 枪管长约 780 mm。其上装配有瞄准装置、导气装置和枪口装置, 内部主要由弹膛、坡膛、线膛 3 部分构成, 结构较为复杂^[14]。考虑计算中存在流固耦合效应, 高质量流体网格的划分对固体外形有较高要求; 因此, 将枪管外部近似为圆锥形如图 2。



图 2 枪管简化模型

计算区域如图 3, 计算域尺寸 10 m×5 m×6 m 以保证边界对枪管区域的影响可以忽略, 坐标系方向如图 3 中 XYZ 所示。

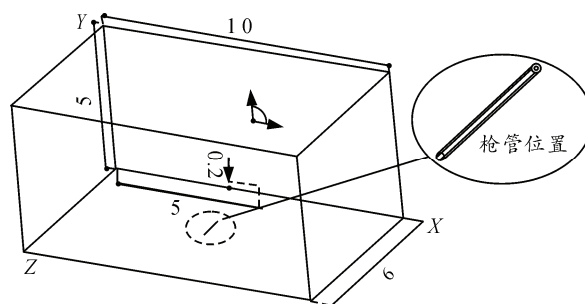


图 3 计算区域简化示意图

2.2 流固计算域网格划分

为了得到高质量的流固耦合传热网格, 在 ICEM CFD 中采用 Block 对枪管固体域及周围空气域划分了纯六面体网格, 并在空气域近壁面划分了边界层网格, 以便更加准确地预测近壁面空气流动情况以及流体换热效果。

划分完毕后总网格单元数 898 416, 其中空气流
体域网格数 880 784, 枪管固体域网格 17 632, 总
体网格线框透视图如图 4, 枪管附近区域网格截面
如图 5。所有单元的网格质量均在 0.45 以上。

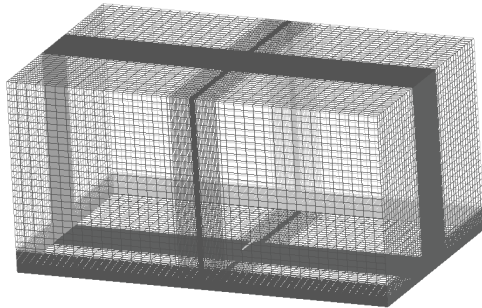


图 4 总体网格线框透视

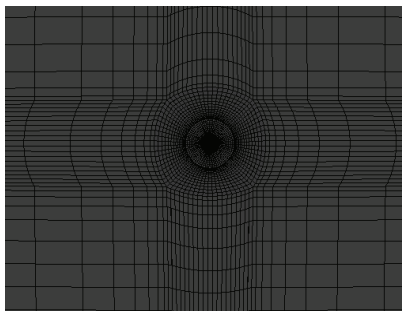


图 5 枪管附近区域网格截面

2.3 计算域及边界条件

空气域介质为理想气体, 参考压力设为 1 atm。
为了准确求解流固换热及近壁面空气流动, 湍流模
型采用 SST 模型。开启浮力及热传递项, 考虑对热
厚度的普适性, 热辐射模型选择 Discrete Transfer
模型, 传递模式为面到面。

空气域四周及顶部边界定义为 Opening 开口边
界, 允许流体进出。考虑到夏季野外环境温度可达
37~42 °C, 设定 Opening Temperature 为 311 K(约
38 °C)。参考压力中心为枪管轴线, 在 CFX 中采用
函数方式设定各边界压力

$$\text{Opening-pressure} = 1.19[\text{kg/m}^3] \times g \times (-1 \times y + 4.8[\text{m}]) \quad (7)$$

其中: g 为重力加速度; y 为重力方向坐标。太阳辐
射从空气域顶部垂直射入; 因此, 在顶部加入辐射
源项。设定瞬态计算总时间为 10 800 s(3 h), 时间
步长 6 s。

3 计算结果分析

枪管周围气体流动情况对枪管温度分布影响极
大, 是枪管温差形成及热变形分析的重点。

3.1 枪管周围流动换热结果分析

狙击枪管处于 38 °C 环境温度中, 受太阳辐射

后枪管表面温度场随时间的变化趋势如图 6 所示。
可见枪管在太阳辐射下前约 30 min 内温度上升很
明显, 从 311 K 跃升至 322 K 左右, 上升约 11 °C,
30 min 以后温度呈缓慢上升, 大约 1 h 后温度基本
恒定, 枪管表面最高温度为 325 K(约 52 °C), 基本
不再上升。

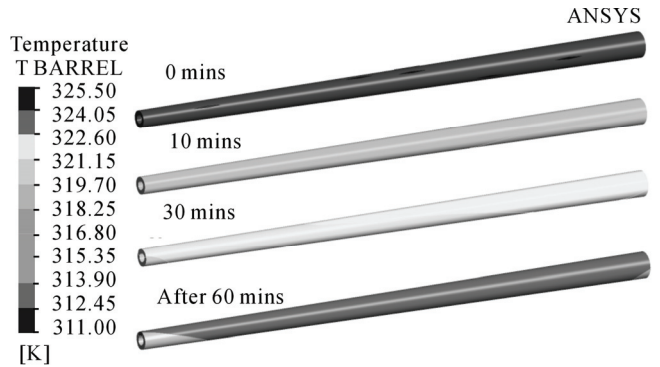


图 6 枪管表面温度随时间变化趋势

图 7 为 3 h 后枪管表面温度等值线, 显示最高
温度约为 325.4 K(即 52.4 °C), 位于枪管中部上表
面; 最小温度在枪口及膛底两端位置, 约为 323.4
K(50.4 °C), 最大温差为 2 K 左右。考虑到枪管表
面温度的不均匀性, 将温度平均后得到图 8 所示曲
线, 分别为身管平均温度以及上下表面中线附近平
均温度随时间的变化曲线。可见枪管上下表面平均
温度差在接受太阳辐射约 1 h 后达到最大, 并在其
后 2 h 内保持基本不变, 约为 0.56 K。

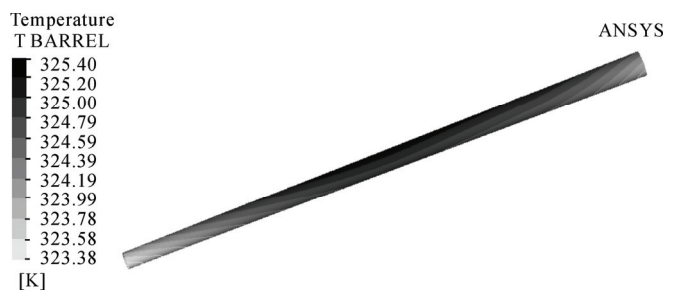


图 7 太阳辐射 3 h 后枪管表面温度等值线

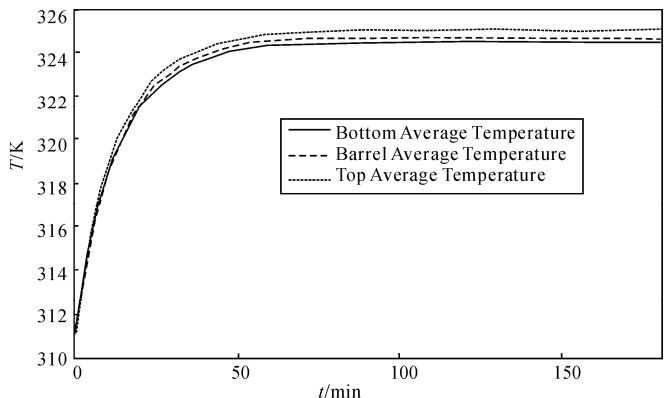


图 8 枪管上下表面及身管平均温度随时间变化曲线

图 9~图 11 展示了接收辐射 3 h 后某时刻枪管周围截面内流线和流固域温度的分布,因湍流效应,流线呈非对称结构。枪管上表面接收太阳辐射后迅速将热量传导至整个枪管,温度上升的枪管导致周围部分空气温度上升,该部分空气密度随之减小,在周围空气对该局部气体团形成浮力的作用下开始上升,即枪管周围局部热空气上升,形成对流换热环境。周围补充的冷空气对枪管下部起到冷却作用,最终出现稳定的上下温差。图 10、图 11 中枪管上方火焰状的温度等值线轮廓更清晰地展现了由于热对流而形成的空气域温度场。

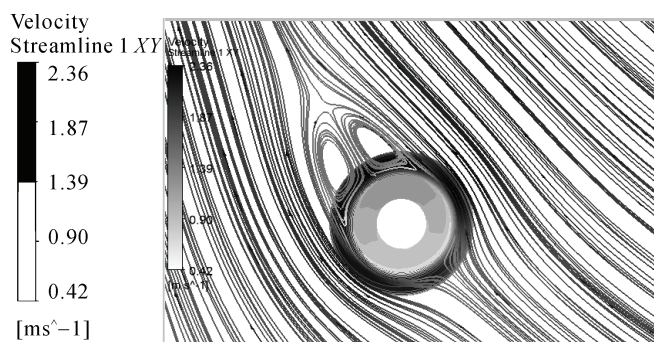


图 9 枪管周围一截面内流线分布图(3 h 后某时刻)

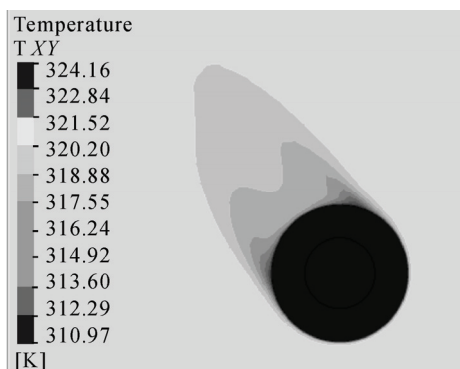


图 10 枪管周围一截面内流固温度分布图(3 h 后某时刻)

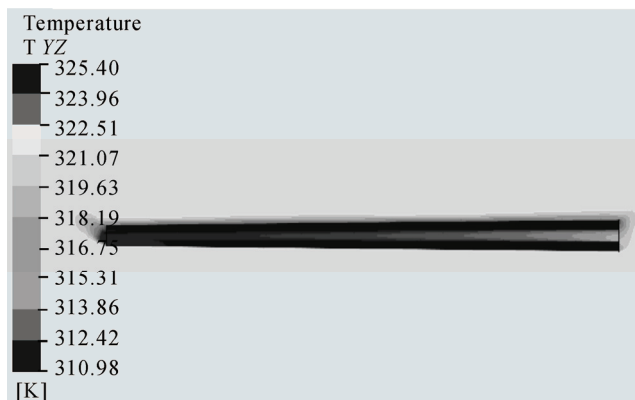
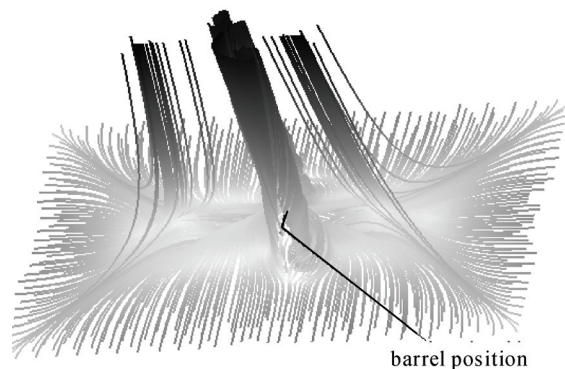


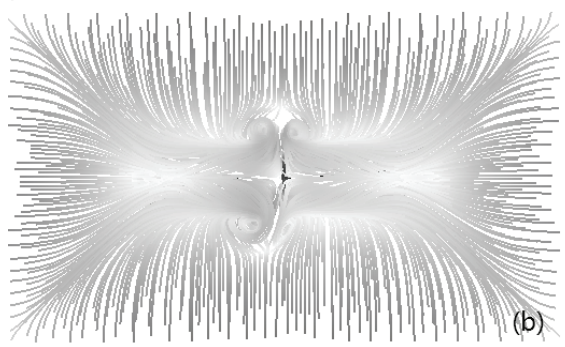
图 11 枪管 YZ 面内周围温度等值线图(3 h 后某时刻)

图 12(a)为空气计算域中从底部边界出发的三

维流线图,图 12(b)为其对应的俯视图。枪管处于图 3 中所示位置。在枪管周围热气团上升的影响下导致枪管上方出现了复杂的大气湍流运动,最终形成 4 个气流漩涡,这些漩涡对枪管周围空气与枪管之间的对流换热有较大影响。图中可见在 4 个气流漩涡的中心交界位置,即枪管正上方气流流速很低,出现了一个气流“死区”,这对于枪管上表面的散热是不利的,容易出现热量聚集导致局部温度高于附近区域。而枪管两端由于存在 4 个气流漩涡加速带走热流因此温度较之枪管中部为低,图 13 为枪管轴线水平面(平行于 XZ 面)上流线图,更清晰地显示了这种对流作用。这是太阳辐射下枪管表面温度呈现中部温度高、两端温度低现象的成因。



(a) 流线斜视图



(b) 流线俯视图

图 12 底部边界出发的三维流线图

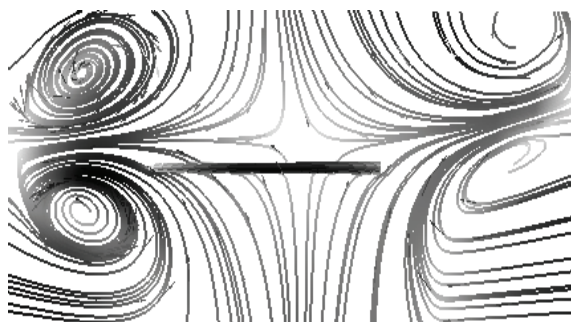


图 13 枪管 XZ 面内平面流线图

3.2 枪管热变形结果分析

将以上 CFX 瞬态计算中最后一时间步得到的枪管温度场导入 ANSYS Structure 中, 计算得到枪管在温度场及重力场共同作用下 Y 方向的变形, 如图 14。枪管材料的热物理性能参数如表 1。图 14 中枪管 Y 方向最大变形可达 0.22 mm。枪管在太阳辐射的作用下产生热变形, 热变形又导致枪口角的变化。以下计算枪口弯曲角

$$\tan\theta = \frac{y_1 - y_2}{d} = \frac{0.22 \text{ mm}}{780 \text{ mm}} = 2.82 \times 10^{-4}.$$

其中 $\theta \approx 0.01616^\circ$, 相当于 0.269 mil (约 0.3 mil)。

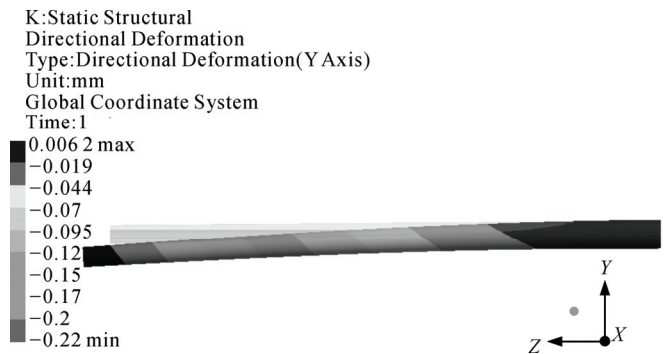


图 14 枪管变形等值线

表 1 枪管材料的热物理性能参数^[8]

温度/℃	线膨胀系数/ (E ⁻⁶ ℃ ⁻¹)	比热容/ (J·(kg·K) ⁻¹)	导热系数/ (W·(m·K) ⁻¹)	弹性模量/ GPa	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比
20	11.7	523	47.73	206	7 850	0.271
100	12.1	540	46.89	198	7 850	0.271
200	12.4	561	45.22	192	7 850	0.271
300	12.9	582	43.54	183	7 850	0.271

可见, 在有太阳辐射情况下, 太阳辐射造成枪管的阳面、阴面受热不均与其自重耦合将导致枪管产生显著的弯曲变形。一方面弯曲变形直接影响狙击步枪的发射角; 另一方面弹丸发射时, 弯曲的枪管在多种动载荷(弹丸偏心载荷、弹丸导转载荷、枪管气动载荷及波尔登载荷等)作用下会产生复杂的随机振动。这两方面都会影响射击精度; 因此, 对于射击精度要求很高的狙击步枪必须重视太阳辐射问题。

4 结束语

笔者利用 ANSYS 和 CFX 建立狙击步枪枪管及周围气体的瞬态热流固耦合计算模型, 计算显示太阳辐射下狙击步枪枪管周围会产生明显的对流换热效应, 对流下产生的温差与自重耦合会导致枪管发生较大变形, 枪口弯曲角可达约 0.3 mil。对比文献 [8] 可知: 此结果较为合理, 表明高射击精度前提下太阳辐射对狙击步枪射击精度的影响不可忽视。鉴于此, 在射击过程中要根据天气情况进行射击诸元适时修正和采用热护套、定时校枪等方法, 以提高狙击步枪射击精度。

参考文献:

[1] 齐心, 申文杰, 贺亮. 狙击步枪枪管动态特性分析[J]. 兵工自动化, 2013, 32(11): 27-30.
 [2] 傅建平, 何忠波, 赵金辉, 等. 大口径火炮身管热弯曲

计算与试验[J]. 军械工程学院学报, 2011, 23(6): 32-35.
 [3] 何忠波, 赵金辉, 傅建平, 等. 火炮身管温差热弯曲的仿真与计算[J]. 火炮发射与控制学报, 2010(1): 34-38.
 [4] 蒋闪, 张金林, 芮挺, 等. 基于太阳辐射模型的坦克表面温度场计算[J]. 装备制造技术, 2013(9): 142-145.
 [5] 胡鹏韬. 太阳辐射作用下钢管混凝土截面温度分布研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012: 23-25.
 [6] 刘红波, 陈志华, 周婷. 太阳辐射作用下钢管温度场分析[J]. 空间结构, 2011, 17(2): 65-71.
 [7] 罗来科, 宣益民, 韩玉阁. 坦克炮管温度场的有限元计算[J]. 兵工学报, 2005, 26(1): 5-9.
 [8] 罗来科, 朱英贵. 坦克炮身管温度变化对射击精度的影响[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(3): 75-77.
 [9] Handbook A. 2001 Fundamental: American Society of Heating[Z]. Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA, 2001.
 [10] Gupta H. K. Geothermal resources[Z]. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands, 1980.
 [11] Hammer T A, Ryan W L, Zirjacks W L. Ground temperature observations[Z]. In thermal design considerations in frozen ground engineering. New York: American Society of Civil Engineers, 1985.
 [12] 何洪林, 于贵瑞, 牛栋. 复杂地形条件下的太阳资源辐射计算方法研究[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 78-85.
 [13] 张鹤飞. 太阳能热利用原理与计算机模拟[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 151-160.
 [14] 王裕安, 徐万和, 薄玉成. 自动武器构造[M]. 南京: 南京理工大学翻印, 1991: 2.