

doi: 10.7690/bgzdh.2026.05.011

基于生死单元法的枪管温度场仿真方法

张超, 李欣, 胡海宾, 韩鹏

(中国人民解放军 63850 部队, 吉林 白城 137001)

摘要: 针对枪械射击过程中弹壳向弹膛传递热量, 抽壳时弹壳从弹膛吸收并带走热量和使用耦合场仿真方法计算量大、效率低的问题, 提出基于生死单元法的枪管温度场仿真方法。基于 ANSYS APDL 软件, 对某型机枪连发射击 60 发空冷 3 min 后继续连发射击 60 发空冷 3 min 过程, 设计了基于生死单元法不同抽壳时机的仿真方案, 不考虑弹壳与枪管热交换使用无壳弹射击时的枪管温度场仿真方案并开展了枪管温度场仿真计算。结果表明: 基于生死单元法的枪管温度场仿真计算方法能够计入枪械射击过程中弹壳与弹膛的热交换, 抽壳时机的不同将对枪管温度场产生一定影响。

关键词: 枪管温度场; 生死单元法; 弹壳; 仿真

中图分类号: TJ411 **文献标志码:** A

Simulation Method of Gun Barrel Temperature Field Based on Birth and Death Element Method

Zhang Chao, Li Xin, Hu Haibin, Han Peng

(No. 63850 Unit of PLA, Baicheng 137001, China)

Abstract: Aiming at the problem of the heat is transferred from the cartridge case to the chamber during firing, the heat was absorbed and taken away from the chamber by the cartridge case during ejection, coupled field simulation methods is complicated in calculation and low in efficiency, a simulation method of the temperature field of the gun barrel based on the birth and death element method was proposed. Based on ANSYS-APDL software, a simulation scheme based on different extraction times of a certain machine gun with 60 rounds of air cooling for 3 minutes and then 60 rounds of air cooling for 3 minutes was designed, and the simulation scheme of barrel temperature field was carried out when the shell and barrel heat exchange were not considered and the shell was fired without shells. The results show that the simulation method of gun barrel temperature field based on the death and death element method can take into account the heat exchange between the cartridge case and the chamber of the gun in the shooting process, and the difference of the extraction time will have a certain effect on the temperature field of the gun barrel.

Keywords: gun barrel temperature field; birth and death element method; cartridge case; simulation

0 引言

针对枪械射击和空冷过程中枪管温度场的数值模拟, 无论是对枪管铬层烧蚀厚度的计算还是对枪管热应力、冷却效率、枪弹留堂安全性的计算或评估及研究枪管热变形对枪械射击精度的影响都具有重要的支撑意义, 枪管温度场数值模拟的准确性也直接决定了其他计算和评估工作的准确性。

目前, 关于枪管温度场的数值计算已有大量相关的文献。1995年, 高付申等^[1]推导并建立了火炮膛内非定常湍流边界层微分方程组, 进行了核心流为准两相流、边界层为湍流的膛壁传热计算。2000年, 田青超等^[2]基于经典内弹道理论使用有限差分法建立了多层枪管射击温度场的简化模型, 计算了某枪管在特定射击规范下的温度场。2006年, 吴永海等^[3]采用热一流一固耦合的研究方法, 将传统的

温度场计算方法割裂的身管固体计算区域和冷却水流体计算区域耦合在一起, 建立了统一的流固传热数学模型。2020年, 徐宁等^[4]针对持续射击状态自动步枪枪管瞬态温度和变形预测问题, 建立枪管的热弹耦合轴对称有限元计算模型, 计算获得了连续射击 150 发过程中枪管温度和变形情况, 分析了枪管壁厚和射击频率对枪管瞬态温度和变形影响情况。2021年 12 月, 刘振华等^[5]针对不同工况条件和设计参数下通用机枪身管瞬态温度和烧蚀特性, 建立了枪管有限元计算模型, 研究了不同环境温度、射击模式、冷却周期射弹总量、镀铬层厚度、射击频率下身管温度场和烧蚀量变化规律。

弹壳在枪械射击过程中为弹膛抵挡了部分热冲击, 同时弹膛内壁温度高于弹壳温度时, 弹壳对弹膛起一定的冷却作用。以往关于枪管温度场计算的

收稿日期: 2024-12-10; 修回日期: 2025-01-12

第一作者: 张超(1995—), 男, 内蒙古人。

文献未考虑弹壳与枪管的热交换。为准确计算枪管温度场，笔者针对枪械射击过程中弹壳与弹膛的热交换和使用耦合场仿真方法带来的计算量大、效率低的问题，在枪管温度场仿真中，应用生死单元法通过杀死和激活弹壳有限元模型模拟射击过程中抛壳和子弹装填。

1 研究假设

1) 将每发弹的射击过程分为 5 个时期：① 击发时期：子弹装填到位至弹壳内发射药被点燃；② 定容时期：弹壳内发射药被点燃至弹头启动；③ 变容时期：弹头启动至出膛口；④ 后效期：弹头出膛口至膛内气体压力接近大气压力；⑤ 射击间隔：从后效期结束至下一发子弹装填到位。

2) 为便于仿真，突出主要因素，忽略次要因素，仿真过程基于如下假设：① 在定容时期，由于定容燃烧时间很短且膛内空气流速很低，忽略弹头、弹壳口、枪管内壁与膛内空气的自然对流换热以及弹头与火药燃气、弹壳之间的传热；② 在变容时期，忽略弹头与枪管内壁之间的摩擦生热，忽略弹前空气与弹头、枪管内壁的强制对流换热；③ 在后效期，由于弹壳抽出过程的流场非常复杂，忽略弹壳外壁与弹膛内壁之间火药气体对枪管的热作用；④ 在射击间隔和空冷过程忽略弹膛内壁与膛内空气的自然流换热；⑤ 在整个分析过程中忽略各部件及空气之间的辐射换热；⑥ 忽略部件之间的接触热阻；⑦ 忽略膛线对传热过程的影响；⑧ 假设镀铬层材料与枪管材料相同。

2 仿真方案设计与对比

2.1 方案设计

仿真所要实现的过程为：机枪在 50 °C 条件下先连发射击 60 发，而后在 50 °C 条件下空冷 3 min，空冷结束后再次连发射击 60 发，射击结束后继续在 50 °C 条件下空冷 3 min。以是否考虑弹壳与枪管热交换和抽壳时机为控制变量，设计以下 4 种仿真方案进行对比分析。

2.1.1 方案 1：基于生死单元法的后效期开始时抽壳仿真方案

弹壳在弹膛内不仅承受高温高压的火药燃气作用，而且可能向弹膛内壁传递热量或吸收来自弹膛内壁的热量并抛出，在不明确弹壳和弹膛热交换情况的情况下，应对射击过程中进弹和抛壳过程中弹

壳与弹膛的热交换过程进行仿真。

生死单元法经常被应用出现材料及构件增加或减少情况时全过程的建模和分析，如焊缝焊接成形过程中焊缝温度和残余应力的计算和施工过程中去掉预紧螺栓后拉丝的应力和应变计算^[6-7]，当应用生死单元法进行仿真分析时，可通过激活构件单元实现在仿真分析过程中增加部件，通过杀死构件单元实现在仿真分析过程中减少构件，而不必分别建立包含构件单元和不包含构件单元的 2 个仿真项目分别开展仿真。

该方案采用生死单元法，即当进弹时激活弹壳单元，当抛壳时杀死弹壳单元，以实现射过程中弹壳与弹膛热交换的仿真。

1) 具体仿真流程：① 建立枪管、弹壳 2 维轴对称几何模型；② 定义枪管、弹壳单元类型及材料属性；③ 对枪管、弹壳 2 维轴对称几何模型划分网格，有限元模型如图 1 所示；④ 设置射击过程相关参数，导入通过 Matlab 计算出的火药气体温度表格、对流换热系数表格、杀死弹壳单元；⑤ 60 发连射过程中枪管温度场数值模拟；⑥ 空冷 3 min 过程中枪管温度场数值模拟；⑦ 60 发连射过程中枪管温度场数值模拟；⑧ 空冷 3 min 过程中枪管温度场数值模拟。

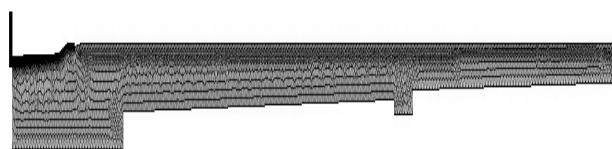


图 1 仿真方案 1、2 有限元模型

2) 载荷施加情况：a) 连发射击过程。每个内弹道循环分为 5 个载荷步：① 击发时期：删除所有节点载荷和面载荷，激活弹壳单元，并对弹壳施加 50 °C 节点温度载荷；② 定容时期：删除所有节点载荷和面载荷，对弹壳内壁施加恒定火药爆温载荷；③ 变容时期：删除所有节点载荷和面载荷，对膛内弹壳内壁和不与弹壳外壁接触的枪管内壁施加与膛内火药气体之间的变容时期强制对流换热载荷；④ 后效期：删除所有节点载荷和面载荷，杀死弹壳单元，对不与弹壳外壁接触的枪管内壁施加与膛内火药气体之间的后效期强制对流换热载荷；⑤ 射击间隔：删除所有节点载荷和面载荷。b) 空冷过程。删除所有节点载荷和面载荷。在每个载荷步中均对枪管外壁施加与空气的自然对流换热载荷（方案 2、3、4 与此相同，不再赘述）。

2.1.2 方案 2: 基于生死单元法的后效期结束时抽壳仿真方案

实现后效期结束时抽壳只需在方案 1 中将载荷步④、⑤改为: ④后效期: 删除所有节点载荷和面载荷, 对膛内弹壳内壁和与弹壳外壁接触的枪管内壁施加与膛内火药气体之间的后效期强制对流换热载荷; ⑤射击间隔: 杀死弹壳单元, 删除所有节点载荷和面载荷。

2.1.3 方案 3: 不考虑弹壳与枪管热交换的仿真方案

若枪械射击过程中作用于弹壳内壁的火药气体向弹壳传递的热量难以穿透弹壳传向弹膛且弹膛也只有很少的热量传递给弹壳, 以至于可以忽略射击过程中弹壳对枪管温度场的影响, 则在整个射击仿真过程无需建立弹壳模型。

1) 具体仿真流程: ① 建立枪管 2 维轴对称几何模型; ② 定义枪管单元类型及材料属性; ③ 对枪管 2 维轴对称几何模型划分网格, 有限元模型如图 2 所示; ④ 设置射击过程相关参数, 导入通过 Matlab 计算出的火药气体温度表格、对流换热系数表格; ⑤、⑥、⑦、⑧同方案 1。

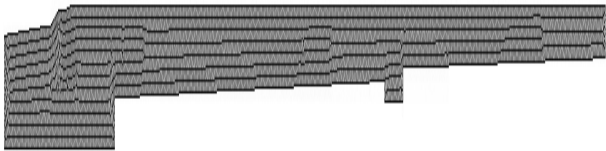


图 2 仿真方案 3、4 有限元模型

2) 载荷施加情况: a) 连发射击过程。每个内弹道循环分为 4 个载荷步: ① 击发时期与定容时期: 删除所有节点载荷和面载荷; ② 变容时期: 删除所有节点载荷和面载荷, 对膛内弹壳内壁和与弹壳外壁接触的枪管内壁施加与膛内火药气体之间的变容时期强制对流换热载荷; ③ 后效期: 删除所有节点载荷和面载荷, 对膛内弹壳内壁和与弹壳外壁接触的枪管内壁施加与膛内火药气体之间的后效期强制对流换热载荷; ④ 射击间隔: 删除所有节点载荷和面载荷, 对枪管外壁施加与空气的自然对流换热载荷。b) 空冷过程。删除所有节点载荷和面载荷。

2.1.4 方案 4: 火药气体直接作用于弹膛内壁的仿真方案

假设在射击过程中使用的是无壳枪弹, 则在射击过程中火药气体直接作用于弹膛内壁。

具体仿真流程与方案 3 相同。载荷施加情况: a) 连发射击过程。每个内弹道循环分为 4 个载荷步: ① 击发时期与定容时期: 删除所有节点载荷和面载荷, 对弹壳内壁施加恒定的火药气体爆温载荷; ② 变容时期: 删除所有节点载荷和面载荷, 对整个枪管内壁施加变容时期强制对流换热载荷; ③ 后效期: 删除所有节点载荷和面载荷, 对整个枪管内壁后效期强制对流换热载荷; ④ 射击间隔: 删除所有节点载荷和面载荷, 对枪管外壁施加与空气的自然对流换热载荷。b) 空冷过程。删除所有节点载荷和面载荷。

2.2 仿真方案对比

方案 1 与方案 2 对比时的控制变量为抽壳时机为后效期开始时还是后效期结束时。

方案 1、2 与方案 3、4 对比时的控制变量为仿真时是否考虑弹壳的与枪管的热交换。

方案 1、2 中枪管单元数量均为 12 052, 弹壳单元数量均为 7 640; 方案 3、4 中枪管单元数量均为 6 847。划分网格时, 4 种仿真方案均采用轴对称 PLANE55 单元, 枪管均采用三角形单元, 弹壳均采用四边形单元。

方案 1、2 能够模拟射击时上弹和抛壳过程中弹壳与弹膛的热交换, 适用于弹壳与弹膛热交换量大的情况。由于弹壳壁厚远小于弹膛壁厚, 在划分网格时应先对弹壳划分网格, 再对枪管划分网格, 否则会导致弹壳网格尺寸过大, 降低弹壳和枪管温度场的求解精度。然而由于弹壳弹壳口部很薄(约 0.5 mm), 对其划分和细化网格后, 网格数量为 8 000 左右, 对枪管划分和细化网格后网格数量为 12 000 左右。

方案 3 适用于弹壳与弹膛热交换量较少的情况, 方案 4 适用于枪械使用无壳弹射击的情况。方案 3、4 无需对弹壳进行网格划分, 对枪管划分网格也不存在从枪管大网格到弹壳小网格的过渡, 网格数量大大减少, 使用方案 3、4 对枪管划分和细化网格后网格数量为 7 000 左右, 相对方案 1、2 大大减少了计算量、计算时间和存储空间。

3 数学模型

3.1 膛内气流参数和对流换热系数计算

定容时期、变容时期和后效期随枪管轴向距离和时间变化的膛内火药气体密度、运动速度、压强、温度根据相关文献[8-11]进行计算。

变容时期和后效期弹壳和枪管内壁与火药气体的强制对流换热系数根据管槽内湍流强制对流传热关联式进行计算^[9]。枪管外壁与空气的自然对流换热系数根据大空间内水平圆杆与理想气体之间的层流自然对流换热实验关联式^[12]进行计算。

3.2 部件内部及各部件之间的传热计算

枪管、弹壳的热传导方程为^[9]：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (1)$$

式中： ρ 为物质密度， kg/m^3 ； c 为物质比热容， $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； T 、 t 、 r 、 y 分别为物质温度、时间、枪管径向距离、枪管轴向距离。

在枪管和弹壳交界面上应满足温度和热流密度连续条件^[9]：

$$T_{r=a, y=b}^m = T_{r=a, y=b}^n \quad (2)$$

$$\lambda^m \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=a, y=b}^m = \lambda^n \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=a, y=b}^n \quad (3)$$

式中 m 和 n 分别为枪管和弹壳。

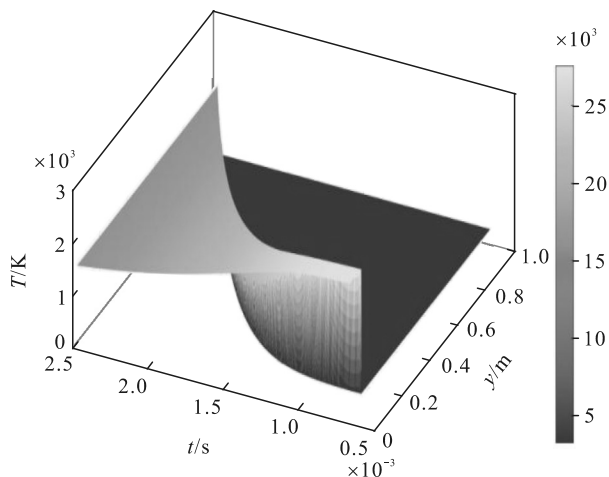
在火药气体或空气与枪管、弹壳壁面的交界面上应满足热流密度连续条件^[9]：

$$\lambda^w \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^w = h(T^w - T^f) \quad (4)$$

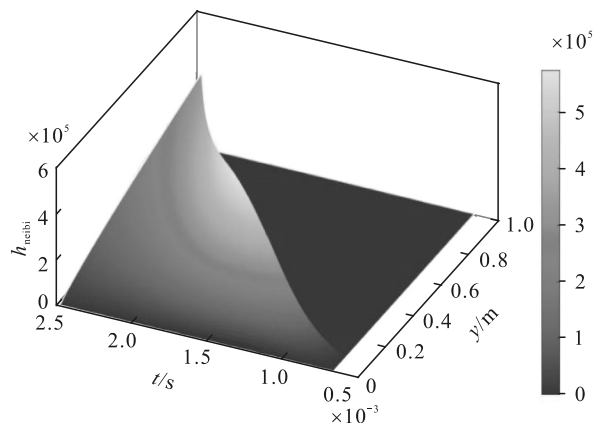
式中： w 为枪管或弹壳壁面处固体； f 为与壁面处固体相邻的空气或火药气体； h 为自然对流换热系数或强制对流换热系数。

3.3 膛内气流参数和强制对流换热系数计算结果

通过 Matlab 编程对膛内气流参数进行求解，获得的单发射击时变容时期膛内火药气体压强、速度、温度和火药气体与枪管内壁的对流换热系数，随时间和枪管轴向距离的变化如图 3 所示。



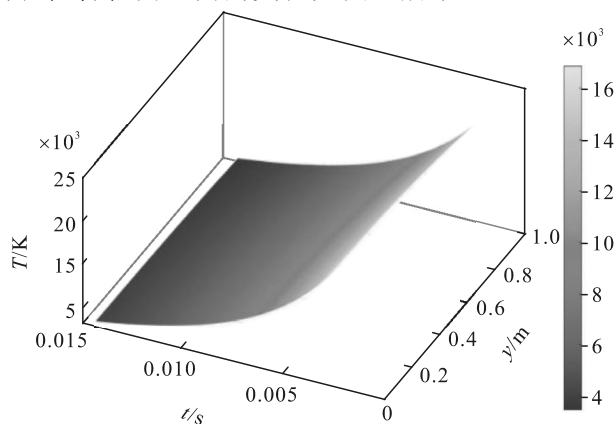
(a) 变容时期膛内火药气体温度曲面



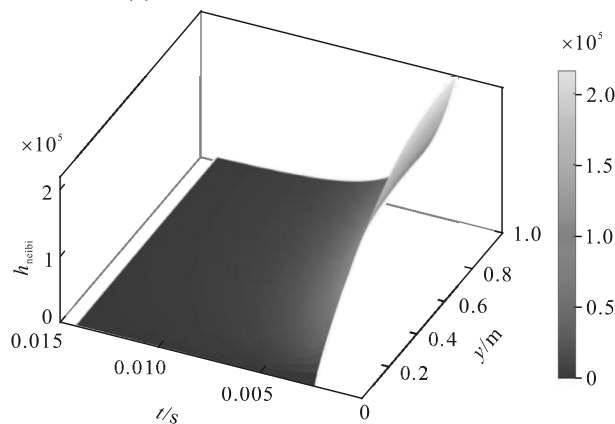
(b) 变容时期强制对流换热系数曲面

图 3 变容时期膛内气流参数和强制对流换热系数计算结果

单发射击时后效期内膛内火药气体压强、速度、温度和火药气体和枪管内壁的对流换热系数，随时间和枪管轴向距离的变化如图 4 所示。



(a) 后效期膛内火药气体温度曲面



(b) 后效期强制对流换热系数曲面

图 4 后效期膛内气流参数和强制对流换热系数计算结果

4 枪管温度场仿真结果对比与分析

按照 4 种方案仿真得出的机枪连发射击 60 发后、空冷 3 min 后、再次连发射击 60 发后、空冷 3 min 后的枪管内壁和外壁温度沿枪管轴向距离(以弹膛底部中心为原点)变化的曲线如图 5—12 所示。

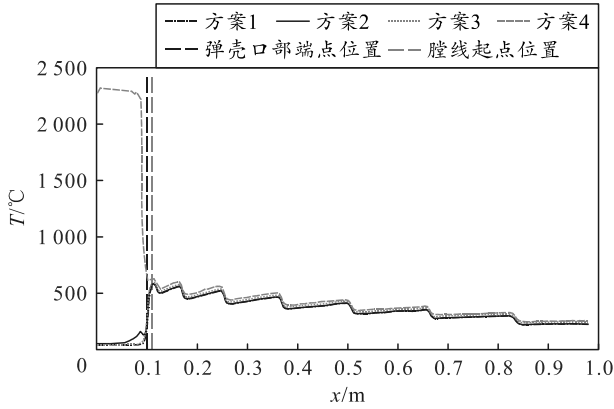


图 5 机枪连发射击 60 发后枪管内壁温度

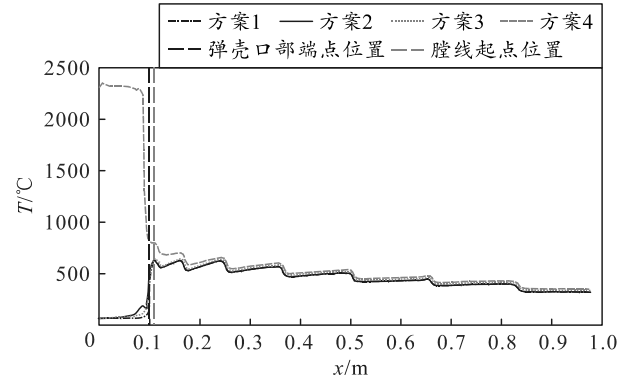


图 9 机枪再次连发射击 60 发后枪管内壁温度

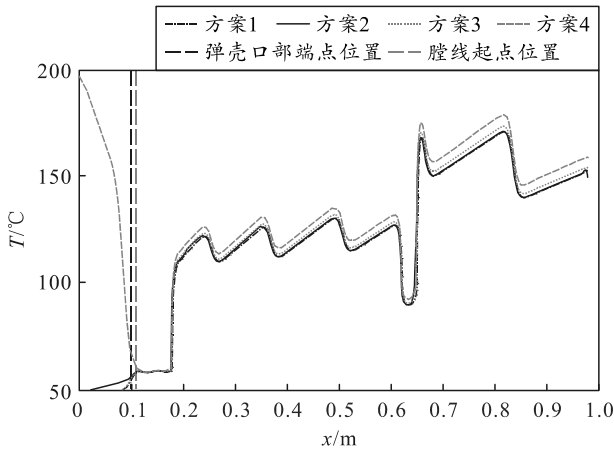


图 6 机枪连发射击 60 发后枪管外壁温度

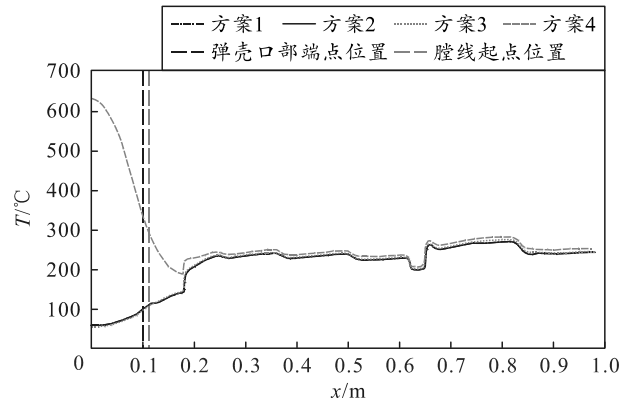


图 10 机枪再次连发射击 60 发后枪管外壁温度

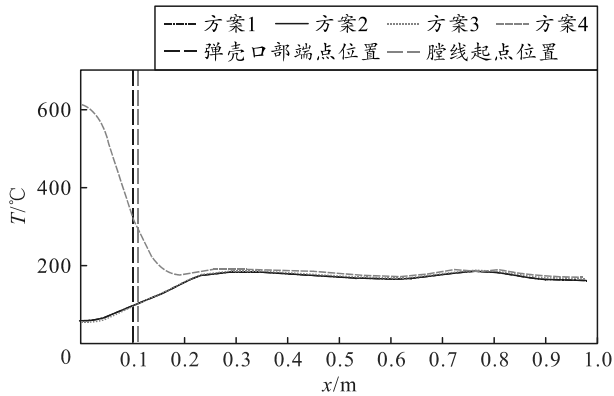


图 7 机枪空冷 3 min 后枪管内壁温度

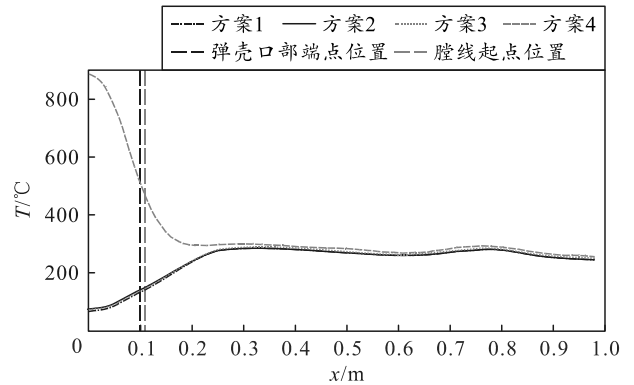


图 11 机枪再次空冷 3min 后枪管内壁温度

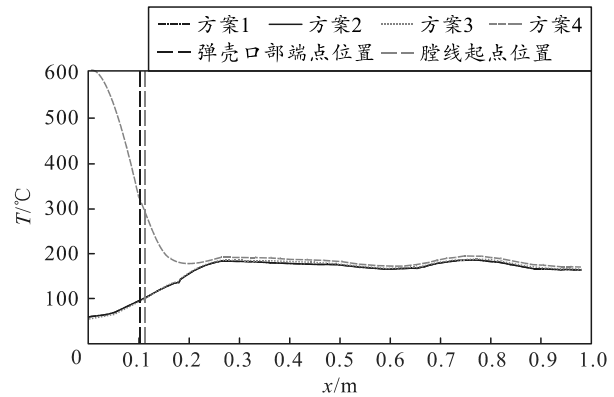


图 8 机枪空冷 3 min 后枪管外壁温度

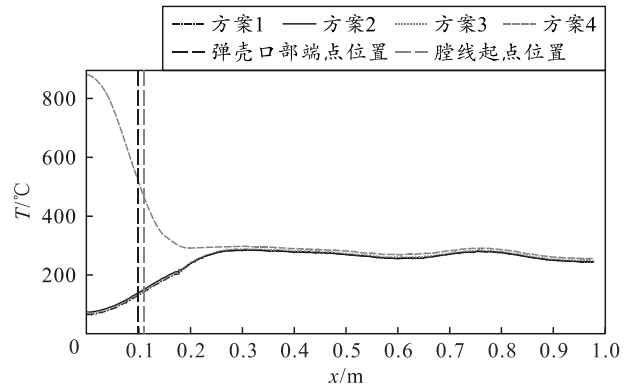


图 12 机枪再次空冷 3min 后枪管外壁温度

从图 5—12 可以看出：按照方案 1 仿真得出的枪械射击结束时枪管内壁温度(以下简称方案 1 内

壁温度)与按照方案 3 仿真得出的枪械射击结束时枪管内壁温度(以下简称方案 3 内壁温度)基本相同,在弹膛内壁前段,方案 1 内壁温度略低于方案 3 内壁温度,说明后效期开始时抽壳从枪管向弹壳传递的热量高于从弹壳向枪管传递的热量,弹壳起到冷却弹膛的作用;按照方案 2 仿真得出的弹膛内壁温度(以下简称方案 2 内壁温度)高于方案 1 内壁温度,说明由于弹壳滞留于弹膛内时间的增加,热量传递至弹壳外表面,并对弹膛起加热作用。按照方案 4 仿真得出的射击结束时的弹膛段枪管内壁温度远高于按照方案 1、2、3 仿真得出的射击结束时的膛线段内壁温度,说明弹壳在枪械射击过程中能够较好地抵挡火药气体对弹膛的热冲击;对比方案 1、2 内壁温度和方案 3 内壁温度中的弹膛段内壁温度可以看出:使用生死单元法对枪械射击时枪管温度场进行仿真时,能够计入在射击过程中弹壳与枪管的热交换。

5 结论

笔者提出并设计了基于生死单元法不同抽壳时机的仿真方案,并以某 12.7 mm 机枪为例,开展了连续射击 60 发空冷 3 min,继续连发射击 60 发并空冷 3 min 的枪管温度场仿真,将仿真结果与不考虑弹壳与枪管热交换和使用无壳弹射击时的枪管温度场仿真结果进行了对比。结果表明:

- 1) 基于生死单元法的枪管温度场仿真计算方法能够计入枪械射击过程中弹壳与弹膛的热交换;
- 2) 对于本文中所使用的枪、弹模型,抽壳时机的不同将对枪管温度场产生一定影响,在后效期开始时抽壳弹壳对枪管起冷却作用,而在后效期结束时抽壳弹壳对枪管起加热作用;
- 3) 弹壳在枪械射击过程中能够较好地抵挡火

药气体对弹膛的热冲击;

4) 基于生死单元法的枪管温度场仿真方法适用于弹壳与枪管热交换量较大的情况,以提高枪管温度场计算的准确性,为枪管热应力、弹药留膛安全性的数值计算与分析提供更加准确的数据支撑。

参考文献:

- [1] 高付中,邱文坚,梁世超,等. 火炮膛内气流流动与传热的数值模拟[J]. 弹道学报, 1996, 8(1): 51-57.
 - [2] 田青超,吴建生,樊新民,等. 有限差分法在复合枪管传热中的应用[J]. 兵工学报, 2000, 21(4): 297-300.
 - [3] 吴永海,徐诚,陆昌龙,等. 基于流固耦合的某速射火炮身管温度场仿真计算[J]. 兵工学报, 2008, 29(3): 266-270.
 - [4] 徐宁,曹帅,吴永海,等. 持续射击状态自动步枪枪管瞬态温度和变形特性数值分析[J]. 兵工自动化, 2020, 39(1): 63-67.
 - [5] 刘振华,方峻,杨晨. 变工况条件下的通用机枪身管温度场与烧蚀特性分析[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(10): 137-145.
 - [6] 龚曙光,谢桂兰,黄云清. ANSYS 参数化编程与命令手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 179, 473.
 - [7] 曾攀. 有限元分析及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 388.
 - [8] 张小兵. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 11-77, 132-164.
 - [9] 陶文铨. 传热学(第五版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2019: 206, 232.
 - [10] 潘光浩,张领科,王克,等. 双基药燃烧产物热物性参数计算分析[J]. 弹道学报, 2022, 34(2): 93-98.
 - [11] 陆家鹏,谭兴良,雷志义,等. 自动武器气体动力学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1991: 35-38, 45-50, 71-76, 97-102.
 - [12] 傅秦生. 热工基础与应用(第三版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 188.
- *****
- [5] 孙红梅,牟明明,高磊. 故障树分析法的定性和定量分析研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2023, 41(3): 22-26.
- [6] 黄山伐. 东方“122之歌”中国 122 毫米榴弹炮家族(上)[J]. 坦克装甲车辆, 2023(5): 19-27.
- [7] 张晶. 某型自行火炮综合电气系统故障诊断专家系
- 统[J]. 兵工自动化, 2010, 29(3): 58-59.
- [8] 王斐,房立清,陈敬文. 基于支持向量数据描述的火炮自动机故障状态监测技术研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2022, 43(1): 29-35.
- [9] 郭梅静,于复生,王伟,等. 升降横移立体车库的故障诊断专家系统[J]. 自动测量与控制, 2007, 26(4): 68-69.

(上接第 31 页)