

## 飞行弹丸红外辐射特性的理论计算

杨威<sup>1</sup>, 张建奇<sup>1</sup>, 刘劲松<sup>2</sup>

(1.西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071;

2.华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**基于红外辐射理论,建立了飞行弹丸辐射亮度及辐射强度的理论计算模型。该模型实现了在不同时刻、不同观测点对目标辐射强度的计算。最后分析了弹丸以不同初始条件飞行时在不同光谱波段内的辐射特点。

**关键词:**弹丸; 辐射亮度; 辐射强度

**中图分类号:**TN21 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)01-0042-04

## Theoretical calculations of infrared radiation of the projectile in flight

YANG Wei<sup>1</sup>, ZHANG Jian-qi<sup>1</sup>, LIU Jin-song<sup>2</sup>

(1.School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071,China;

2.State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Based on the infrared radiation theory, a theoretical model is proposed to calculate the radiant intensity and radiance of the projectile in flight. The radiant intensity of a special projectile is obtained at different time and observation points. Finally, for flight projectiles with different initial conditions, the radiant characteristic of different spectral bands is analysed.

**Key words:** Projectile; Radiance; Radiant intensity

### 0 引言

在国内常规靶场,对弹丸轨迹及落弹点的监测一般采用可见光的胶片摄像机和测量电视。这些可见光的测量设备探测距离有限,且受天气情况影响较大。目前一些靶场已采用了红外探测系统,该方法受天气情况影响较小,实现了全天候的工作。为了对不同类型、不同飞行状态的弹丸进行红外测量,必须了解空中飞行弹丸的光谱辐射特性及变化规律,进而为靶场的热红外探测系统的设计、研制提供基本参数和理论

依据。目标红外辐射特性的获取可通过实际测量和理论计算来实现,而实际测量需要大量的物力和财力。对于目标红外辐射特性的理论计算,就目前国内外公开发表的文献看,一般的研究对象为飞机及高马赫数飞行的弹道导弹,而对于低马赫数低空飞行的弹丸研究很少<sup>[1-3]</sup>。

为了获取弹丸的红外辐射特性,必须首先计算它的表面温度分布。而物体的表面温度取决于它与周围环境及它们内部的热交换和热平衡。采用节点网络法,通过求解热平衡方程来计算目标表面的温度分布。最

收稿日期:2004-02-10; 修订日期:2004-08-28

作者简介:杨威(1966-),男,山西原平人,副教授,从事目标与背景红外辐射理论的研究。

后建立飞行弹丸表面红外辐射特性的理论模型。

## 1 弹丸表面温度场的计算<sup>[4]</sup>

### 1.1 弹丸的几何模拟及表面面元的划分

针对普通炮弹进行简单的几何模拟,认为弹丸是圆锥和圆柱两部分组成的轴对称体<sup>[5]</sup>。其表面可分为圆锥面、圆柱侧面和圆柱底面。沿轴向和径向把弹丸表面分成  $n \times m$  个小面元。

### 1.2 节点热平衡方程的建立

把弹丸表面看成具有一定发射率的朗伯灰体表面,假设弹丸表皮厚度为  $\delta$ ,腔内温度为  $T_c$ <sup>[6]</sup>。针对弹丸表面的第  $(i,j)$  节点,分析其与周围及外界进行的各种热交换,根据能量守恒定律,得到该面元的节点热平衡方程<sup>[7]</sup>:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_5 = \rho \Delta S \delta c \frac{dT_{ij}}{dt} \quad (1)$$

式中  $\rho$ 、 $c$  分别为弹丸材料的密度和比热容;  $\Delta S$  为面元面积;  $\delta$  为弹丸壁厚;  $T_{ij}$  为  $(i,j)$  节点的温度。下面分别对  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $Q_4$  和  $Q_5$  具体说明:

$Q_1$  为面元  $(i,j)$  接收到的太阳辐射能,表达式为:

$$Q_1 = \alpha_r E_{\text{sun}} \eta \phi_{ij} \Delta S \quad (2)$$

式中  $\alpha_r$  为弹丸表面吸收率;  $E_{\text{sun}}$  为太阳常数;  $\eta$  为大气透过率;  $\phi_{ij}$  为面元  $(i,j)$  接收太阳辐射的方向因子。

$Q_2$  为面元  $(i,j)$  接收到其相邻面元的热传导之和,表达式为:

$$Q_2 = \sum_{i'j'} \frac{k_c A_{i'j'} (T_{i'j'} - T_{ij})}{L_{i'j'}} \quad (3)$$

式中  $A_{i'j'}$  为面元  $(i'j')$  与面元  $(i,j)$  的传导面积;  $L_{i'j'}$  为面元  $(i'j')$  与面元  $(i,j)$  之间的距离;  $k_c$  为弹丸材料的导热系数;  $T_{i'j'}$  为面元  $(i'j')$  的温度。

$Q_3$  为面元  $(i,j)$  接收到腔内的传导热,表达式为:

$$Q_3 = \frac{k_c (T_c - T_{ij}) \Delta S}{\delta} \quad (4)$$

式中  $T_c$  为腔内温度。

$Q_4$  为由于空气动力加热使面元  $(i,j)$  获得的能量。根据“边界层”理论,运用层流边界层的相似解法<sup>[8,9]</sup>可以得到:

$$Q_4 = q_w \Delta S \quad (5)$$

式中  $q_w$  为弹丸表面的热流密度。

$$q_{w \text{ 圆柱}} = 0.369 \sqrt{3} Pr^{-0.6} \sqrt{\frac{\rho_w \mu_w u_e}{x}} \times$$

$$\left[ (T_e - T_{ij}) \frac{\hat{R}}{M_0} + 1 + Pr^{0.5} \frac{\gamma_e - 1}{2} \frac{u_e}{v_s} \right] \quad (6)$$

$$q_{w \text{ 圆锥}} = \sqrt{3} q_{w \text{ 圆柱}} \quad (7)$$

式中  $Pr$  为普朗特数;  $\rho_w$ 、 $\mu_w$  分别为弹丸表面大气的密度和粘性系数;  $u_e$  是边界层外气流速度;  $x$  为弹丸表面第  $(i,j)$  面元到弹丸头的距离;  $T_e$  为边界层外大气的温度;  $\hat{R}$  为气体常数;  $M_0$  为大气平均分子量;  $\gamma_e$  为大气的比热比;  $v_s$  为大气的声速。

$Q_5$  为面元  $(i,j)$  的热辐射所造成的能量损失,表达式为:

$$Q_5 = \varepsilon_g \sigma T_{ij}^4 \Delta S \quad (8)$$

式中  $\varepsilon_g$  为弹丸表面材料的发射率;  $\sigma$  为玻耳兹曼常数。

### 1.3 热平衡方程的求解

将公式(2)~(8)代入公式(1),则第  $(i,j)$  面元的热平衡方程可以写为如下形式:

$$\frac{dT_{ij}}{dt} = f_{ij}(T_{ij}, T_{i-1,j}, T_{i+1,j}, T_{i,j-1}, T_{i,j+1}) \quad (9)$$

即把该面元上温度随时间的变化率  $\frac{dT_{ij}}{dt}$  表示为该面元的温度  $T_{ij}$  及相邻面元温度  $T_{i-1,j}$ 、 $T_{i+1,j}$ 、 $T_{i,j-1}$ 、 $T_{i,j+1}$  的函数。联立弹丸表面上所有面元的热平衡方程,再根据弹丸表面的初始温度,采用四阶龙格-库塔法对该微分方程组进行求解,最后得到每一时刻弹丸表面各个面元的温度值。

## 2 弹丸红外辐射特性的分析

在获取弹丸表面温度分布后,根据普朗克定律可以求出各面元的光谱辐射出射度  $M_\lambda$ :

$$M_\lambda = \varepsilon_g \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (10)$$

式中  $c_1$ 、 $c_2$  分别为第一、第二辐射常数;  $\lambda$  为辐射波长;  $T$  为弹丸面元温度。利用积分可以求出该面元在

任意波段内的辐出度。

把弹丸表面看成朗伯辐射面,则弹丸表面的辐射亮度  $L$  与观察角无关,则在某一时刻弹丸表面在  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  波段内的辐射亮度为:

$$L = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda} d\lambda}{\pi} \quad (11)$$

为进一步获取弹丸在空中飞行过程中的辐射强度,则必须确定地面观察点。在某时刻,把观察点可观察到的所有面元的辐射强度进行求和,即可得到该时刻弹丸的辐射强度:

$$I = \sum_{i,j} \frac{\Delta S \cos \theta}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda} d\lambda \quad (12)$$

式中  $\theta$  为视线与面元法线之间的夹角。显然在某一时刻,弹丸在某一光谱波段内的辐射强度除与弹丸在该时刻表面温度有关外,还与观察点位置及弹丸在空中的位置有关。

### 3 计算结果及分析

某种爆破榴弹的几何参数为:锥高  $l_1=514.2$  mm、柱长  $l_2=315.8$  mm 和直径  $D=152$  mm;弹体材料为 D 60 钢;假设弹丸表面的初始温度为 290 K、弹丸腔内的温度为 290 K、大气温度为 290 K、云层类型为高层云、太阳天顶角为  $\pi/6$ 、弹丸发射角为  $\pi/4$ ,具体计算结果如下。

图 1 给出了以初速度 955 m/s 飞行的弹丸,在其

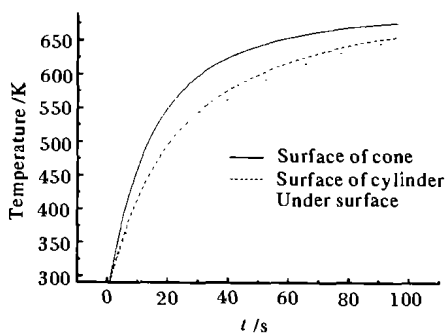


图 1 弹丸表面不同区域的温度变化  
Fig.1 Temperature variety of the different district of projectile

曲线。从图中可以看出:弹丸表面的平均温度随飞行时间的增加而升高。弹丸锥面的平均温度高于弹丸柱面平均温度,而弹丸柱面温度又高于底面温度,这是由于空气动力加热对弹丸顶部的影响远大于对其他部位的影响。同时还可以看出:弹丸表面温度的变化率随时间的增加逐渐减小,即弹丸表面与外界的热交换逐渐达到热平衡。

图 2 给出弹丸分别以 955 和 750 m/s 不同的初速度飞行时,弹丸表面平均温度随时间的变化情况。从图中可以看出:弹丸速度越大,其表面温度越大;在两根曲线前端,弹丸初速度越大,其表面温度的变化率越大;随时间的不断增加,弹丸表面与外界的热交换都逐渐达到热平衡。

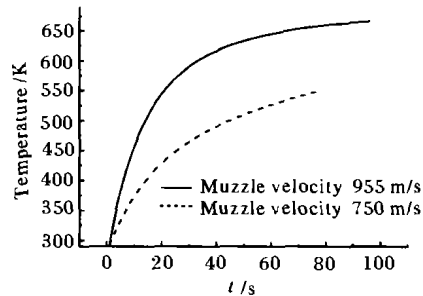


图 2 不同初速度弹丸表面的温度变化  
Fig.2 Temperature variety of the projectile with different muzzle velocity

图 3 给出了以 955 和 750 m/s 两种初速度飞行的弹丸,在飞行末端其光谱辐出度随波长的变化曲线。可以计算出:以 750 m/s 初速度飞行的弹丸在 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~14  $\mu\text{m}$  波段的辐出度分别占全波段辐出度的 19.7% 和 30.4%;而以 955 m/s 初速度飞行的弹丸在 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~14  $\mu\text{m}$  波段的辐出度分别占全波段辐出度的 28.6% 和 23.7%。即初速度越大,弹丸在 3~5  $\mu\text{m}$  波段内的辐出度比例就越大。

图 4 和图 5 给出了在 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~14  $\mu\text{m}$  波段内,弹丸的辐射强度随飞行时间的变化曲线。其中观测点取在弹丸发射处,弹丸分别以 955 和 750 m/s 两种初速度飞行。图中每根曲线的前段与后段辐射强度变化较缓慢,而在中段辐射强度变化相对剧烈,这是由于观察点设在弹丸的发射处,当弹丸在飞行中段时,观察点可观察到的辐射面积急剧增加的原因。比较图 4 和图 5,也可以看出低速飞行弹丸其辐射强度

飞行过程中其表面不同区域平均温度随时间的变化

在 8~14  $\mu\text{m}$  波段内较大,而高速飞行弹丸其辐射强度在 3~5  $\mu\text{m}$  波段内较大。

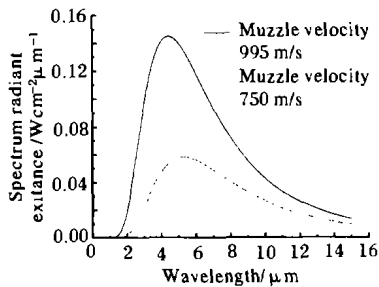


图3 弹丸的光谱辐出度随波长的变化

Fig.3 Spectrum radiant exitance vs wavelength

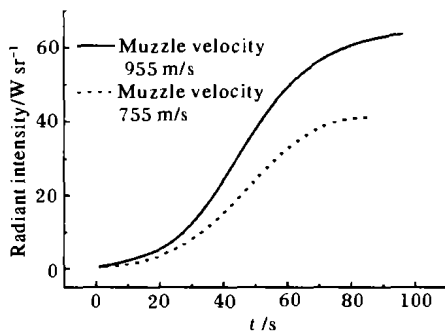


图4 3~5  $\mu\text{m}$  波段辐射强度随时间的变化

Fig.4 3~5  $\mu\text{m}$  radiant intensity vs time

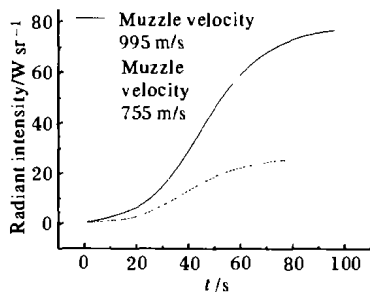


图5 8~14  $\mu\text{m}$  波段辐射强度随时间的变化

Fig.5 8~14  $\mu\text{m}$  radiant intensity vs time

## 4 结束语

本文从弹丸表面的每一面元出发,考虑了空气动力加热、太阳辐射等因素,最后建立了飞行弹丸红外辐射特性的理论计算模型。与其他模型相比<sup>[6]</sup>,该模型实现了弹丸表面的网格化;可以计算不同观测点、不同光谱波段的辐射强度。为靶场的热红外探测系统的设计、研制提供基本参数和理论依据。

## 参考文献:

- [1] Dupuis A D, Edwards J A. Flight tests and computational analysis of two hypersonic research projectiles[A]. 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit[C]. American: American Inst of Aeronautics and Astronautics, 1995. 1-11.
- [2] Clay W H. Theoretical temperature distribution in the precursor region ahead of projectiles traveling at hypersonic velocities[R]. AD-718 641. 1970.
- [3] Soenksen K P. Measurement of projectile surface temperature by means of its infrared radiation: a preliminary study[R]. AD-A264 053. 1993
- [4] 杨威, 邵晓鹏, 刘劲松, 等. 飞行弹丸表面温度场的理论计算[J]. 西安电子科技大学学报, 2001, 28(5): 651-654.
- [5] 王慧频, 徐晖, 孙仲康, 等. 大气层外弹道式目标的红外辐射特性的理论计算方法[J]. 系统工程与电子技术, 1998, 20(3): 1-6.
- [6] Tofani A. Computer modeling of infrared head-on emission from missile noses[J]. Optical Engineering, 1990, 29(2): 87-96.
- [7] 姚连兴, 仇维礼, 王福恒. 目标和环境的光学特性[M]. 北京: 宇航出版社, 1995.
- [8] 卞荫贵, 钟家康. 高温边界层传热[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [9] 丁碧珠, 王金荣. 弹头技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.

## 欢迎订阅《红外与激光工程》

《红外与激光工程》系中国宇航学会光电技术专业委员会会刊,由中国航天科工集团公司主管,创刊于1972年,是国家科委和国家新闻出版署批准的国家级学术刊物,中国科技论文统计源期刊,中国无线电电子学、电信技术类核心期刊,被美国“剑桥科学文摘(CSA)”、英国“科学文摘(SA)”、俄罗斯“文摘杂志(AJ)”收录,入编中国学术期刊(光盘版),国内外公开发售。本刊办理广告业务,广告经营许可证号:津工商广字3-141。本刊为A4开本,128页,全年定价60元(含邮费)。邮发代号为6-133,欢迎订阅。联系电话:022-23666400。