飞行弹丸红外特性的地面模拟试验

柯维娜 朱定强 蔡国飙 王伟东

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191) (试验物理与计算数学国家级重点实验室, 北京 100076)

摘 要: 设计并建立了用于飞行弹丸中段飞行状态实验室模拟的试验系统,测量获得了飞行弹丸的红外辐射特性. 基于传热与辐射理论,分析了相关参数对实验结果的影响,获得飞行弹丸在一定飞行状态下的辐射特性变化规律. 目标的初始温度和辐照条件是影响目标辐射特性的主要因素,自旋状态影响辐射特性的空间分布. 试验测量与数值仿真和理论分析结果均具有很好的一致性,证明在实验室开展飞行弹丸的红外辐射特性模拟试验具有可行性.

关 键 词: 红外辐射特性; 飞行弹丸; 试验; 温度; 辐射亮度

中图分类号: TN 21

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)10-1410-05

Infrared radiation characteristic ground test of ballistic flying projectile

Ke Weina Zhu Dingqiang Cai Guobiao

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Wang Weidong

(National Key Labortory of Science and Technology on Test Physics & Numerical Mathematical, Beijing 100076, China)

Abstract: An experimental system based on the laboratory equipments was designed and set up to simulate the mid-course flying condition of projectile, and measured the infrared radiation characteristic data of flying projectile. Based on the conductive and radiant theory, the influences of simulation parameters on experimental results were analyzed, and the changing rules of radiation characteristic during the flying conditions were concluded. The initialize temperature of flying projectile and the radiation sources were the important parameters to the infrared radiation temporal characteristic of flying projectile, and the spin station has effects on the infrared radiation spatial characteristic. Comparing the results between the experiment, the numeric simulation and academic analysis, the results are correct and accordant, which sustain that the infrared radiation characteristic simulation experiment of flying projectile carried on the laboratory is feasible.

Key words: infrared radiation characteristic; flying projectile; experiment; temperature; radiation intensity

红外辐射特性作为飞行弹丸的一个重要参数,在常规武器靶场试验中具有重要应用,红外辐射特性探测结果影响目标轨迹及落弹地点的结果判断[1];飞行弹丸的红外辐射特性的获取及数据对比分析是军事攻防系统中空间目标探测的有效方法之一[2];通过降低目标红外辐射特性减小目标被捕获识别机率从而提高攻击有效性[3];目标的红外辐射特性在传感器和武器系统的设计和试验中具有重要的作用[4];在开展红外假目标研究中也需要详细研究真假目标的辐射特性[5]. 因此,开展不发光飞行弹丸的红外辐射特性研究具有重要的军事应用价值及意义,是目标特性领域研究的一个重要组成部分.

国内外针对多种材料的红外辐射特性开展基础研究[6],但不能获得直接军事应用成果. 针对各种真实飞行弹丸开展红外辐射特性现场跟踪测

收稿日期: 2011-11-22; **网络出版时间**: 2012-09-26 11:04

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120926.1104.010.html

基金项目: 总装备部航天研发中心资助项目

作者简介: 柯维娜(1983 -),女,河北赤城人,博士生,keverna@sa.buaa.edu.cn.

量是最具有说服力的方法,但投入巨大,目前我国尚不具备在飞行全程中实时测试的条件[7]. 开展飞行弹丸的数值仿真和实验室模拟测量研究受时间和空间约束较小,因此可以作为外场试验的有利补充. 但现阶段开展飞行弹丸实验室模拟研究较少,尤其是在地面模拟真空环境开展红外辐射特性测量尚未见到公开报道.

本文简单介绍了在地面开展红外辐射特性实验室模拟的系统,获得了在相应飞行条件下飞行弹丸的红外辐射特性,并通过与理论分析和数值仿真结果的对比,获得较好的一致性.

1　试验系统和装置

试验系统由冷黑环境模拟器、辐射源模拟系统、目标模拟系统、测量控制系统和其他辅助系统组成. 试验系统原理如图 1 所示.

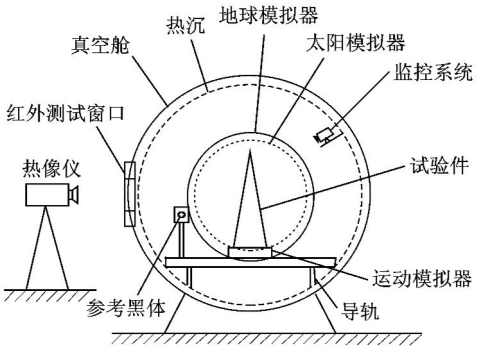

图 1　试验系统原理图

1.1　冷黑环境系统

冷黑环境模拟器,如图 2 所示,用于建立目标飞行的冷黑环境,主要由真空舱、泵组和热沉组成. 真空舱是由不锈钢材料制成的圆柱体,直径为 2.5 m,卧式放置于水平地面. 利用机械泵、罗茨泵机组、分子泵、外置式低温泵及相应前级泵组成的泵组和热沉液氮吸附使真空舱内的真空度达到 10^{-4} Pa,热沉结构内壁面温度为 100 K,表面涂发射率 0.95 的黑漆,由以上条件综合模拟实现目标飞行的冷黑高空环境.

1.2　辐射源模拟系统

辐射源模拟系统由太阳模拟器和地球模拟器两部分组成. 太阳模拟器放置在真空舱外部,通过图 2 中的光学窗口将太阳模拟器的辐射光引入真空舱内,并通过准直镜保证照射到目标表面的太阳辐射是平行光源. 采用红外加热片方式模拟地球辐射,地球模拟器放置在真空舱内部.

1.3　目标模拟系统

目标模拟系统包含试验目标,初温获取装置

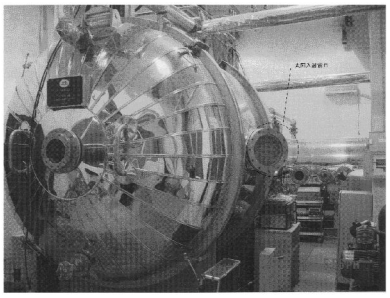

图 2　冷黑环境模拟器

和运动模拟装置. 试验目标与运动模拟器连接,整体固定在真空舱底部的导轨上,如图 1 中所示.

初温获取装置利用外置式电加热薄膜实现电能与热能间的转化. 具有三轴自由度的运动模拟器,如图 3 所示,可以同时模拟飞行弹丸 3 个不同方向的相对运动,并实现不同太阳入射角度下目标红外辐射特性的实验室模拟测量.

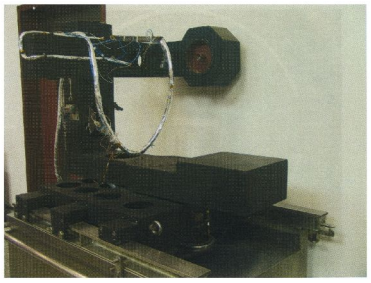

图 3　运动模拟器

试验目标采用某真实飞行弹丸缩比模型,材料选用铝合金,忽略内部有效载荷,采用薄壁壳体三锥体结构. 试验件与运动模拟器之间采用与目标自旋方向相反方向螺纹连接,在无连接处试验件壳体壁厚 5 mm. 试验件外表面涂黑漆,其中黑漆表面在不同温度下发射率如表 1 所示.

表 1　目标表面材料发射率

序号	试片	温度/K	发射率
1	铝片	323	0.20
2	试片	323	0.94
3	试片	350	0.96
4	试片	500	0.94

1.4　测量控制系统

测控系统分为两类,一类用于模拟环境设备参数测量控制,如真空计、温度传感器、流量计等,利用专门的计算机采集系统采集环境模拟设备关键参数并进行实时显示. 另一类用于试验数据测量,可分为接触式测量和非接触式测量 2 种.

针对试验件表面温度的接触式测量,采用 12 个温度传感器分 4 组均布于试验件表面,温度传感器和辐射源相对分布示意图如图 4 所示.

温度传感器测量数据作为试验件红外特性中

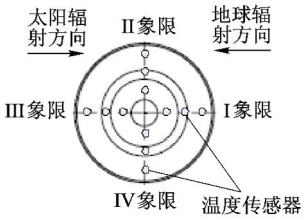

图 4 辐照光源和温度传感器相对目标位置

温度分布特性研究依据. 温度传感器测温范围 ±200 ℃,测温精度 ±0.5 ℃. 应用无线遥测技术,解决试验件旋转时数据传输线路缠绕问题.

在试验中非接触式测量采用 AGM SC2000 型红外热像仪,工作波段为 7.5 ~ 13.0 μm,通过转化间接获得试验件辐射亮度. 红外热像仪放置于真空舱外的红外窗口处. 红外热像仪测温范围为 −40 ~ 2 000 ℃,测温精度 ±2%.

1.5 其他辅助系统

试验中采用可温控的标准黑体辐射源进行标校,标准黑体辐射源和被测试验件在试验系统中保持相对红外热像仪、红外窗口和真空冷黑环境相同的试验位置. 针对不同试验件温度,在试验过程中采用不定时标定的方法. 利用标准黑体标定消除红外玻璃透过率和试验舱壁面温度对辐射特性测量的影响.

2 试验过程

试验过程如图 5 所示. 根据飞行弹丸的特点,可以将实际飞行情况归结为 2 种,即飞行弹丸初始分别位于太阳照射区和地球阴影区. 具体开展的 12 个试验内容如表 2 所示. 为保证试验数据的有效性及可重复性,在每个相同工况条件下,进行 3 次重复试验,测量数据.

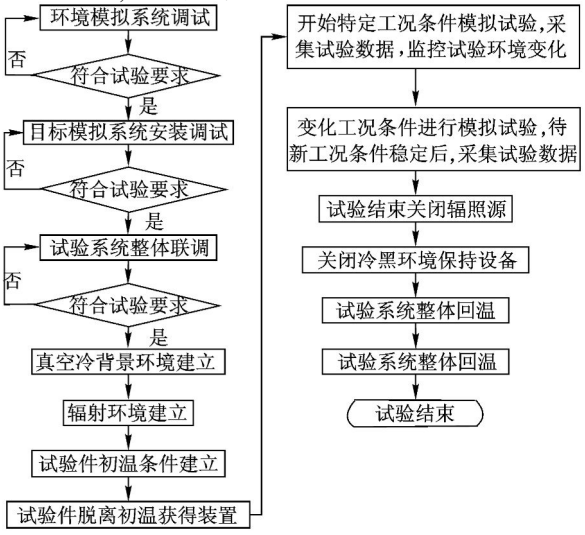

图 5 试验过程流程图

表 2 不同试验内容初温条件

初始弹道位置	自旋状态	
	无自旋	1r/s
太阳照射区	350 K/305 K/293 K	350 K/305 K/293 K
地球阴影区	342 K/315 K/299 K	342 K/315 K/299 K

3 试验结果及分析

3.1 试验结果误差分析

对全部数据进行误差分析,本文中仅选取升温和降温两个典型试验过程示例说明. 同一过程 3 次测量值及平均值如图 6 中所示. 按文献[8]中的误差分析方法可知,不同时间点温度的 *A* 类和 *B* 类不准确度如图 7 所示.

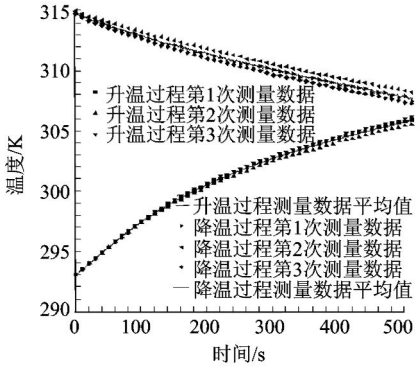

图 6 3 次测量数据平均值

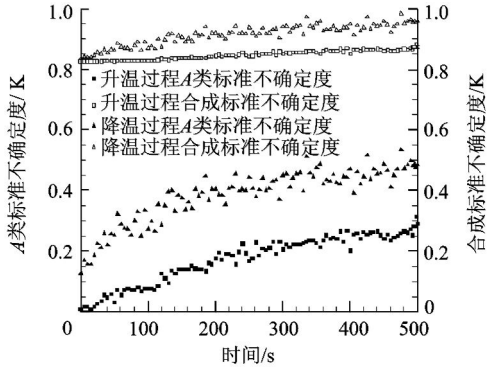

图 7 测量数据不确定度分布

3.2 表面初温对辐射特性的影响

图 8 和图 9 给出不同表面初温条件下试验件温度和辐射亮度随时间变化的对比曲线图. 不同温度传感器测点温度不完全相同,但具有相同变化趋势,限于篇幅,文中仅选取位于图 5 中第 4 象限的第 2 个测点的温度数据,以及对应通过红外热像仪获得的辐射亮度进行说明.

对比图 8 和图 9 中 2,3 曲线可知,当表面初始温度低于平衡温度时,目标辐射亮度随时间呈上升趋势,随着温度的升高,辐射亮度增长变缓,变化曲线为单调递增凸曲线. 对比图 8 和图 9 中 1,4,5,6 曲线可知,当表面初温高于估算平衡温

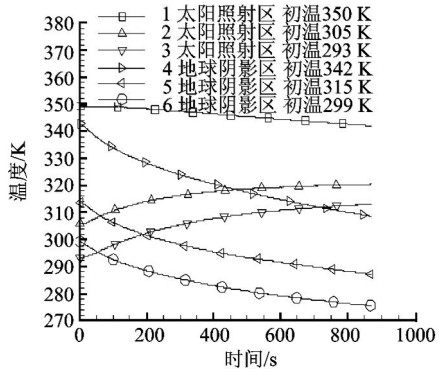

图 8　不同工况及初温条件下温度随时间变化

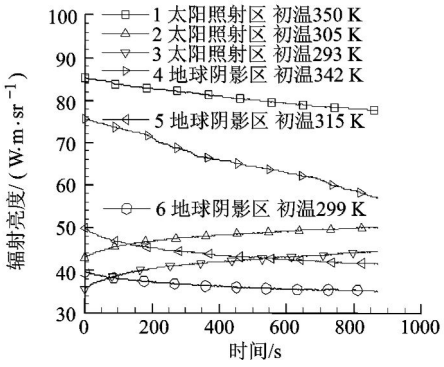

图 9　不同工况及初温条件下辐射亮度随时间变化

度时,目标辐射亮度随时间呈下降趋势,随着温度降低,辐射亮度递减变缓. 变化曲线为单调递减凹曲线. 上述变化规律与理论分析[9]吻合.

3.3　目标自旋状态对辐射特性的影响

在目标弹道位于两种不同飞行环境模拟时,目标不同自旋状态对目标辐射特性影响如图 10 所示. 由于辐射亮度是温度的单调函数,自旋频率对辐射亮度和温度的影响规律相同.

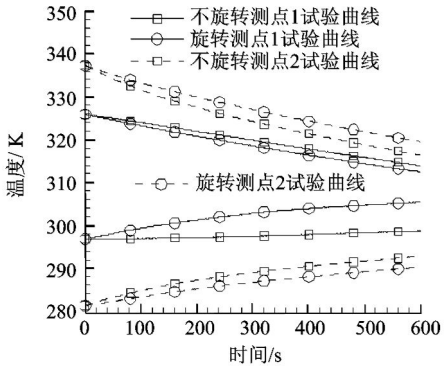

图 10　不同测点不同自旋状态下温度变化

由图 10 测点 1 和 2 数据对比可知,同一试验过程其他试验条件相同时,自旋状态对两测点在升温和降温过程中影响不同. 测点 1 在升温过程中自旋时的温度要高于无自旋状态,降温过程中自旋时的温度低于无自旋状态;对于测点 2 恰为相反. 自旋状态对测点 1 和测点 2 的影响相反,这是由于在无自旋状态中,测点 2 位于太阳照射表面,而测点 1 位于地球照射表面,自旋使得测点 1 接收到的辐射增加,而测点 2 接受到的辐射减少. 有文献[10]研究指出当自旋频率大于一定值时,目标面元接受太阳照射的程度趋于一致.

3.4　辐照条件对辐射特性的影响

典型辐照条件对辐射特性影响曲线如图 11 所示. 由图 11 可知,当目标具有相同的初始温度,在太阳和地球同时辐照时,目标温度和辐射亮度随时间升高;而当仅有地球辐照时,目标温度和辐射亮度随时间降低. 由此可知太阳辐射是影响目标表面辐射特性变化趋势的主要因素.

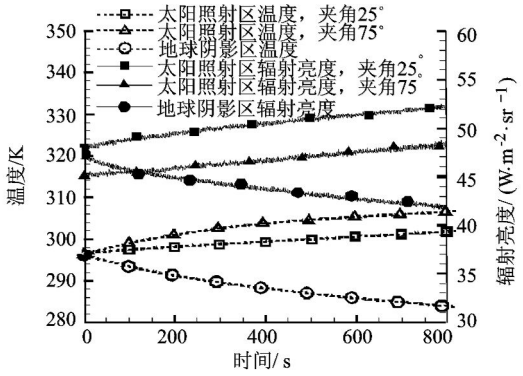

图 11　辐照条件对辐射特性的影响

对比图中太阳照射情况下的曲线可知,太阳照射表面的温度变化速率随太阳入射方向与目标表面法向夹角的增大而降低. 这是由于太阳入射方向和目标表面法向的夹角决定了入射到目标表面的有效太阳辐射热流,最终影响目标表面的温度和辐射亮度分布. 图中在初始相同温度下辐射亮度不同是由表面法线不同引起辐射亮度在红外热像仪成像元件上投影角度不同而产生的差异.

4　试验结果与仿真对比

针对具体研究问题,开展两种类型的数值仿真计算. 第 1 种针对试验内容开展数值仿真计算,用于分析不同试验条件参数对试验结果的影响. 第 1 种仿真与试验对比如图 12 所示. 第 2 种针对研究目标实际飞行状态开展数值仿真,用于校验地面模拟试验的可行性和精确性,第 2 种仿真与试验对比如图 13 所示.

针对不同初温和飞行弹道环境,与图 8 中相同的 4 个具有代表性的工况进行仿真. 由图 12 可知,在不同初温条件下试验与仿真数据具有相同的变化规律,两者基本吻合. 产生试验和仿真曲线的差别有以下原因:发射率实际随温度变化,而在数值仿真中认为发射率是常数;由于舱体内部结构表面反射的辐射使得在试验中照射到表面的实

际热流增大;试验中导热的影响在仿真分析中不能精确定量.

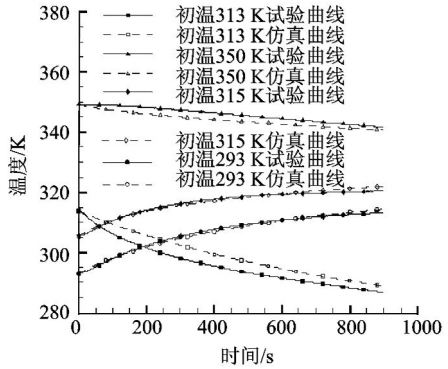

图 12 针对试验内容的试验和仿真结果对比

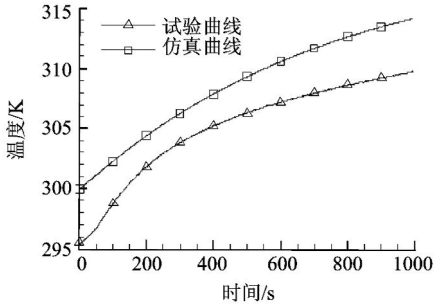

图 13 目标特性数值仿真和试验结果对比

针对地面模拟试验情况,选定相似的目标飞行弹道和太阳地球辐照条件,在合理范围内选择影响辐射特性的关键参数目标表面的发射率和太阳吸收率,得到数值仿真[9]和试验的温度结果对比. 由图 13 可以看出,飞行弹丸真实飞行环境辐射特性的数值仿真和试验数据变化规律相同,但存在系统性误差,分析原因有以下 3 方面:①试验研究中没有数值模拟中研究的目标内部内热源;②在数值模拟中采用多层结构与试验模型中的两层结构的材料的热物性参数不完全相同;③通过进行大量的数值仿真发现,目标表面的太阳吸收率对辐射特性变化趋势影响很大,仿真计算中材料的太阳吸收率为估计值,因此影响了仿真和试验结果的吻合程度.

5 结 论

本文基于弹丸真实飞行条件,设计了用于目标特性地面模拟试验系统,针对不同飞行状态开展了多次试验研究. 通过对理论分析、数值仿真和试验数据的对比研究,获得不同参数对弹丸目标特性变化的影响,其中目标表面初始温度和辐射源是影响目标特性变化的主要因素,而目标的自旋状态决定辐射特性空间分布的均匀性. 针对目标特性地面模拟试验和仿真数据不完全吻合的问题,还需要针对目标在实际状态的太阳吸收率和试验模拟条件对试验结果的影响等问题开展更为广泛深入的研究.

参考文献(References)

[1] 高昕,李建安. 应用于弹丸跟踪测量的红外期间工作波段选择[J]. 测试技术学报,2002,16(3):192 - 195
Gao Xin, Li Jianan. The research of response wave band for conventional projects detecting and tracking by using infrared focal plane sensor[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2002,16(3):192 - 195(in Chinese)

[2] Chen Y. On suboptimal detection of 3 dimensional moving target [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1989, AES-25:343 - 350

[3] 安德鲁·赛斯勒,约翰·康沃尔,鲍勃·迪艾兹,等. NMD 与反制 NMD[M]. 卢胜利,米建军,译. 北京:国防大学出版社, 2001
S A M, Comwal J M, Dearze B, et al. Counter measures[M]. Translated by Lu Shengli, Mi Jianjun. Beijing: National Defense University Press, 2001(in Chinese)

[4] 杨贵军,柳钦火,黄华国. 基于场景模型的热红外遥感成像模拟方法 [J]. 红外与毫米波学报,2007,26(1):15 - 21
Yang Guijun, Liu Qinhuo, Huang Huaguo. Methods for simulating infrared remote sensing images based on scene models[J]. J Infrared Millim Waves, 2007,26(1):15 - 21(in Chinese)

[5] 杨莉,杨华. 红外假目标关键技术及应用[J]. 红外技术, 2006,28(9):531 - 534
Yang Li, Yang Hua. The key techniques and applications of infrared false target [J]. Infrared Technology, 2006,28(9):531 - 534(in Chinese)

[6] 杜胜华,夏新林. 气动加热下高温陶瓷材料的红外辐射机理与特性[J]. 红外与毫米波学报,2010,29(4):268 - 272
Du Shenghua, Xia Xinlin. Infrared radiation of high temperature ceramics under aerodynamic heating [J]. J Infrared Millim Waves, 2010,29(4):268 - 272(in Chinese)

[7] 李颖杰,吕相银,杨华. 空间目标的红外辐射理论计算[J]. 红外,2010,31(2):39 - 42
Li Yingjie, Lü Xiangyin, Yang Hua. Theoretical calculation of infrared radiation of space target[J]. Infrared, 2010,31(2):39 - 42(in Chinese)

[8] JJF 1003—2008 计量标准考核规范[S]
JJF 1003—2008 Rule of examination of measurement standard [S](in Chinese)

[9] 徐根兴. 目标和环境的光学特性[M]. 北京:中国宇航出版社,1995
Xu Genxing. Object and environment's optical characteristics [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1995 (in Chinese)

[10] 厉夫兵,许小剑. 空间目标红外特征仿真模型[J]. 北京航空航天大学学报,2009,35(11):1330 - 1334
Li Fubing, Xu Xiaojian. Infrared signature simulation model for space objects[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009,35(11):1330 - 1334(in Chinese)

(编 辑:张 嵘)