

空间环境模拟器热沉热辐射当量吸收特性研究

刘 敏, 王紫娟

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 文章采用蒙特卡罗法模拟射线的传输过程, 分别对两种热沉形式的热辐射当量吸收系数进行了数值计算, 研究了表面形式、几何高度及入射光线方向等参数对表面热辐射当量吸收系数的影响。计算表明, 正六边形凹腔形式的吸收效果远好于正四棱锥形式, 但这种结构形式的吸收有明显的方向性, 正四棱锥形式对光线的吸收呈现各向同性。

关键词: 空间环境模拟器; 热沉; 当量吸收系数; 热辐射

中图分类号: V416.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2009)02-0154-04

1 前言

随着航天器在国民经济、科学研究、国防建设等方面应用和需求的不断增加, 空间环境模拟技术也在迅速地发展, 大型化、多功能是航天器主要的发展趋势并成为衡量一个国家航天器研制水平的重要标志之一。热沉是空间环境模拟器的一个重要组成部分, 其性能的优劣关系到空间环境模拟的精度。空间的低温环境是通过热沉中低温工质的冷却降温模拟的, “黑”环境是通过在热沉表面喷涂黑漆来模拟的^[1,2]。

在一些特殊试验中, 例如太阳模拟器试验时, 直射热沉表面需要有较高的吸收系数, 否则其反射的能量将对热平衡试验产生负面影响。在一些标定试验中, 星载红外遥感仪器需要制冷设备为其红外器件提供低温环境, 而且随着用户对遥感卫星的图像品质要求的不断提高, 寻求更低温度、更大制冷量、更长寿命、更高可靠性的低温制冷机愈加迫切。空间制冷机至今仍广泛采用辐射制冷器形式, 辐射制冷器是仅仅使用在中高轨道空间环境的被动式制冷装置, 在地面对其低温性能进行评价需要在空间环境模拟器中进行。辐射器的热性能测试必须建立温度低于 30 K、黑度不低于 0.98 的冷背景与辐射器开口紧密耦合才能满足试验精度。这些试验都需要更接近黑体的表面以减少试验误差。

在空间环境模拟器通常热试验中, 用喷涂过半球发射率 $\varepsilon_H \geq 0.90$ 的黑漆的液氮热沉就能够近似

模拟宇宙背景温度和黑度, 但对特殊试验来说满足不了要求, 因此只有靠研制出高吸收比的热沉壁板形式来满足这种特殊的试验要求。常用的措施是将热沉表面加工成凹槽或突起状, 造成光线在表面多次反射来增加表面的吸收系数, 改善其辐射特性和温度分布的均匀性^[3]。我国的空间环境模拟器中正在尝试使用这种表面处理方式, 但至今为止并未对其进行过详细地研究。

本文分别模拟了热沉的两种表面处理形式并考察了几种参数对其表面吸收效果的影响。

2 计算模型

分别将吸收表面加工成形状各自相同的正六边形凹腔和正四棱锥, 利用光线在凹腔或凸锥表面的多次吸收来改变表面的吸收系数(各面均是漫反射表面, 并假设表面处理后不会出现光线的衍射现象)。凹腔和凸锥的个体模型代表如图 1 所示, 所有六边形和矩形底面的边长均为 a , 高均为 h ; 凹腔内表面和凸锥外表面的吸收系数与吸收面的吸收系数相同, 均为 α_0 。采用蒙特卡罗法模拟入射光线, 跟踪能束的反射和吸收并分别对入射能束数和反射能束数进行统计。假定其能束抽样数为 M , 经表面多次吸收后, 最终被反射的能束数为 N , 则表面的热辐射当量吸收系数可表示为 $\bar{\alpha} = (M - N) / M$ 。

定义无量纲高度 $h^* = h / a$; 定义表面的吸收系数比 $K = \bar{\alpha} / \alpha_0$, K 值越大表明吸收效果越佳。

收稿日期: 2008-10-17

作者简介: 刘 敏(1970-), 女, 高级工程师, 现从事环模技术研究工作。E-mail: lemay_liu@hotmail.com。

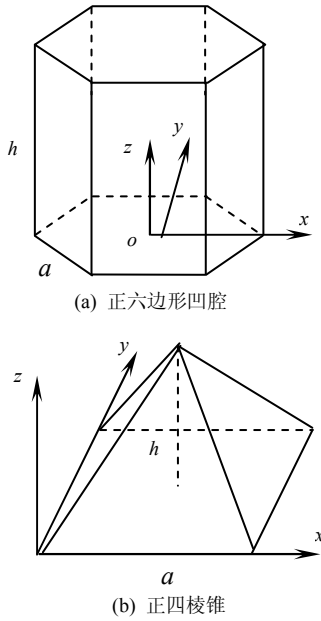


图1 两种吸收表面加工形状示意图

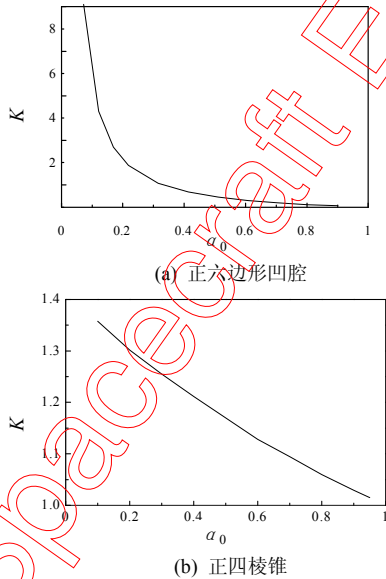
Fig.1 Two kinds of shapes of processed heat sink surface

3 计算结果分析

经多次比较分析,数值计算中已排除了蒙特卡罗法能束抽样数对计算结果的影响,本文计算中能束抽样数为 $M=1 \times 10^6$ 。

3.1 表面吸收系数对热辐射当量吸收系数的影响

图2反映了吸收面的吸收系数对该面形状处理后热辐射当量吸收系数的影响规律,其中凹腔和凸锥的高度均为 $h^*=0.5$,入射光为各向同性的散射光线。

图2 α_0 对热辐射当量吸收系数的影响Fig.2 The influence of α_0 on heat absorbance

由图可见,吸收系数对处理后表面的热辐射当

量吸收系数有很大的影响,不同表面处理形状的变化规律不同。对于凹腔状表面,吸收系数 α_0 较小时 K 值较大,随着吸收系数的增加吸收系数比值迅速减小,在 $\alpha_0=0.7$ 时, K 值已接近 1.0;而对于凸锥表面,其表面吸收系数比值随表面吸收系数的变化规律近似线性,即使在吸收系数较小的情况下 K 值也没有超过 1.4,只有在表面吸收系数超过 0.9 后吸收系数比值才接近 1.0。

上述变化规律是由于对表面的不同形状处理导致的:对于正六边形凹腔,入射光线通过上顶面进入腔内,经各面反射、吸收再通过上顶面射出的概率较小;而正四棱锥的入射光线被各面反射离开四面体的概率远大于凹腔。因此,在相同的条件下,正六边形凹腔的吸收效果总体上优于正四面体凸锥。 K 值和 α_0 的乘积即为热辐射当量吸收系数,凹腔 $\alpha_0=0.2$ 时,该表面的热辐射当量吸收系数可达 0.7,而相同条件下凸锥表面的热辐射当量吸收系数仅为 0.26。需要指出,上述研究旨在考察两种表面处理后热辐射当量吸收系数随底面吸收系数变化的规律,在工程应用中实际材料的表面吸收系数 α_0 一般在 0.9 左右。

3.2 凹腔(凸锥)高度对热辐射当量吸收系数的影响

保持凹腔和凸锥的表面吸收系数 $\alpha_0=0.9$ 不变,分析其尺寸高度对表面热辐射当量吸收系数的影响,计算结果如图3所示。

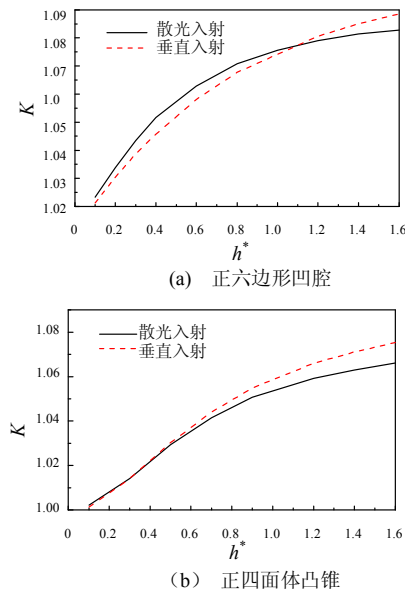
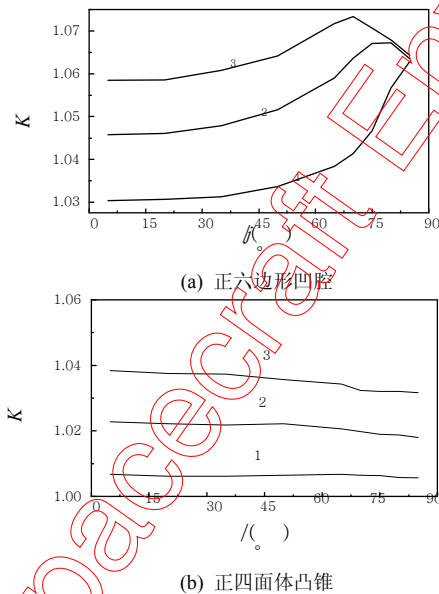
图3 h^* 对热辐射当量吸收系数的影响Fig.3 The influence of h^* on heat absorbance

图3(a)显示,随着高度的增加,凹腔的热辐射当量吸收系数增大,因为光线通过上顶面反射出凹腔的概率小,表面吸收系数比的变化呈弧线上升,随高度的增加 K 值的变化速率不断减小。 $\alpha_0 = 0.9$ 时, K 值最大为1.11,吸收系数比值随高度的增加不断接近该极值;对不同的入射光线, K 值的变化规律不同,对于散射光线,表面吸收比值随高度的增加,变化速度较快,在 $h^* < 1.1$ 时,散射光线的 K 值高于垂直入射光线,而当 $h^* > 1.1$ 后,散射光线的 K 值开始低于垂直入射光线。

对四面体凸锥,其高度增加意味着四面体各面更陡,则光线在各面间的反射概率增加,热辐射当量吸收系数增大。如3.1节的分析,正四棱锥的吸收系数比值较凹腔低,这种规律并未随其高度的增加而改变,如图3(b)所示。当 $h^* > 0.5$ 后,散光入射的吸收系数比值开始低于垂直入射的光线,而在 $h^* < 0.5$ 时,两者的差别较小。

3.3 入射光线角度对热辐射当量吸收系数的影响

对正六边形凹腔表面,在 $\alpha_0 = 0.9$ 的计算条件下,保持入射光线平行且圆周角 $\theta = 0^\circ$,改变入射的天顶角,考察入射光线的天顶角对热辐射当量吸收系数的影响,计算结果如图4所示。



图中曲线 1: $h^*=0.2$; 2: $h^*=0.4$; 3: $h^*=0.6$

图4 入射天顶角对热辐射当量吸收系数的影响

Fig. 4 The influence of incidence zenith angle on heat absorptance

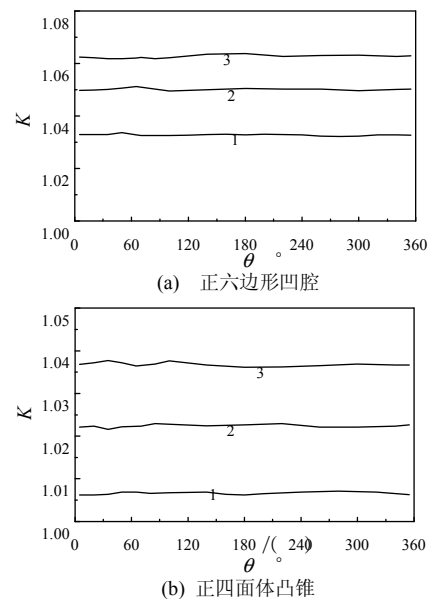
由图4(a)可见,在 $h^* = 0.2$ 的条件下, K 值随天顶角的增加而不断增大;但当 $h^* = 0.4$ 时,曲线上出

现一过渡点,其对应的天顶角 $\varphi = 70^\circ$ 左右,小于该角度的入射光线其吸收系数比值随天顶角的增加而增大,超过该值后随天顶角的增加 K 值不断减小; $h^* = 0.6$ 工况时表面吸收变化规律与 $h^* = 0.4$ 工况相同,但其过渡天顶角稍有减小。

分析可知,入射天顶角 $\varphi = 0^\circ$ 意味着射线垂直入射,此时射线不经凹腔侧面,而是完全直射到正六边形底面,经底面的漫反射最终形成凹腔的热辐射当量吸收系数。入射天顶角增加则使更多的射线到达凹腔的侧面,此时射线在凹腔内的总行程增加,被凹腔吸收的份额随之增多,热辐射当量吸收系数增大。而当入射光线的天顶角进一步增加时,射线全部打在凹腔的侧壁,且其交点位置更靠近上顶面,因此被侧壁反射出凹腔的概率增加, K 值降低。凹腔越高,射线与侧壁的交点位置越远离底面,进一步增加入射天顶角时,被侧壁反射出凹腔的概率越大。可见,对凹腔表面 K 值随入射天顶角的增加呈现先增大后减小的变化趋势,凹腔越高该变化越明显。

图4(b)显示,对于正四棱锥,入射天顶角对表面热辐射当量吸收的影响作用较小,且该变化规律并未随凸锥高度的增加而发生明显变化。

图5为表面吸收系数比值沿圆周角方向的分布图。由图可见,两种处理在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的入射圆周方向上吸收系数比值均大致保持不变,即表面的吸收系数比值在入射圆周方向上表现出较好的均匀性。



图中曲线 1: $h^*=0.2$; 2: $h^*=0.4$; 3: $h^*=0.6$

图5 入射圆周角对热辐射当量吸收系数的影响

Fig. 5 The influence of incidence circumferential angle on heat absorptance

4 结论

本文采用蒙特卡罗法分别模拟了正六边形凹腔和正四棱锥内、外表面的吸收—反射过程，分析了不同参数对各自表面热辐射当量吸收系数的影响。通过分析得到以下结论：

(1) 相同高度条件下正六边形凹腔表面的吸收效果远优于正四棱锥表面，在底面吸收系数较小的情况下，采用凹腔表面处理便可以得到较大的热辐射当量吸收系数，在 $\alpha_0 = 0.9$ 、 $h^* = 1.6$ 时，其热辐射当量吸收系数达到 0.98；

(2) 增加凹腔和凸锥的高度均能明显地提高其表面的热辐射当量吸收系数，但随高度的增加热辐射当量吸收系数的变化速度降低；

(3) 凹腔表面的吸收效果在入射天顶角方向表现出明显的各向异性，而在圆周角方向上表现各向同性；凸锥表面的热辐射当量吸收系数受入射方向的影响可忽略不计。

参考文献 (References)

- [1] 柯受全. 卫星环境工程和模拟试验[M]. 北京：宇航出版社, 1993
- [2] 黄本诚. 空间模拟器设计[M]. 北京：宇航出版社, 1994

科普走廊

什么是极端环境？

极端环境，这是由美国 NASA 空间探测计划引出的一个新概念。

为了牵引美国科学技术及经济发展，NASA 制定了一系列以科学为目标的具有挑战性的空间探测计划。这些计划分为三个级别：战略旗舰级、新领域级和发现与搜索级。其中，NASA 太阳系探测路线图规划了到 2035 年以机器人技术为主的太阳系探测任务，也包括月球及火星的载人飞行任务。

为了完成空间探测任务，遇到的最大挑战之一就是了解所遭遇的极端环境及其对航天器的影响，研究适当的防护技术。所谓极端环境，其范围包括：

- 进入大气时热流超过 1 kW/cm^2 ；
- 速度超过 20 km/s ；
- 低温低于 -55°C ；
- 高温超过 $+125^\circ\text{C}$ ；
- 压力超过 $2 \times 10^6 \text{ Pa}$ ；
- 辐射总剂量超过 300 krad ；
- 加速度超过 100 g ；
- 粉尘环境；
- 酸化学腐蚀环境。

应对极端环境技术研究的内容包括：通过飞行探测、地面观测、地面模拟试验、理论分析和数值仿真等研究极端环境及其环境效应；通过环境隔离技术、暴露材料及组件的环境耐受性设计技术、环境隔离与环境耐受性组合技术进行航天器的环境防护。

(童靖宇 供稿)