星载荷热控制辐冷板激光致热计算分析

唐进迎[1,2],雷武虎[1,2,3],任晓东[1,2],张 坤[1],张明鑫[1,2]

(1. 国防科技大学 电子对抗学院,安徽 合肥 230037;
2. 脉冲功率激光技术国家重点实验室,安徽 合肥 230037;
3. 电子制约技术安徽省重点实验室,安徽 合肥 230037)

摘 要:卫星的温度变化直接影响着电子器件的工作性能,为了研究辐冷板的温升效应对电子器件温度的影响,通过分析辐冷板的散热机理和辐冷板工作特性,采用有限元分析软件,对简化后的辐冷板模型进行了激光辐照热效应计算分析。以脉冲激光作为辐射源,对辐冷板进行照射,通过对其表面温度场进行数值模拟,得到了在脉冲激光照射下的瞬态温度场分布,并对模拟结果进行了分析和研究。发现电子器件在没有散热的情况下温度将升高 64.5 K,在最大工作状态时激光的照射将严重影响热管的工作性能,而且热管的非正常工作将使电子器件温度升高,影响电子器件正常运行,为星上温度影响电子器件性能实验奠定了理论基础。

关键词:辐冷板; 脉冲激光; 有限元; 温度场

中图分类号:O551 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201847.1243002

Calculation and analysis of the thermal characteristic of the satellite load radiant plate irradiated by laser

Tang Jinying[1,2], Lei Wuhu[1,2,3], Ren Xiaodong[1,2], Zhang Kun[1], Zhang Mingxin[1,2]

(1. College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;
2. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China;
3. Anhui Province Key Laboratory of Electronic Restriction, Hefei 230037, China)

Abstract: The change of temperature in satellite have a direct influence on the performance of electrical devices. Aiming at studying the performance of electrical devices due to temperature distribution of radiant plate, the mechanism of temperature dissipation of the radiant plate was analyzed based on its characteristics. The research on thermal effect of laser irradiation in a simplified model of radiant plate was done by using the finite element analysis software. The transient temperature distribution under pulsed laser radiation was got by numerical simulation of the surface temperature field. The pulsed laser was used as the radiation source to irradiate the radiant plate, based on analysis and study of the simulation results, it was founded that the temperature of the electronic device would rise by 64.5 K when there was

收稿日期:2018-07-05; **修订日期**:2018-08-03

基金项目:国家重点实验室 2017 年度主任基金项目(SKL2017ZR02)

作者简介:唐进迎(1993-),男,硕士生,主要从事光电工程方面的研究。Email:qhqlystjy@163.com

导师简介:雷武虎(1965-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事光电工程、图像信息获取与处理方面的研究。Email:leiwhy@163.com

no heat dissipation around the electrical devices. When the heat pipe radiator was in the maximum working performance, the thermal effect of pulsed laser irradiation would seriously affect the heat dissipation performance of the heat pipe, the abnormal work of the heat pipe would increase the temperature of the electronic device and affected the normal operation of the electronic devices. It lays a theoretical foundation for the influence of the temperature on the performance of electronic devices.

Key words: radiant plate; pulsed laser; finite element analysis; temperature field

0 引 言

随着航天器电子设备集成度的提高和元器件的进步,其功率越来越大,热流密度越来越高[1]。长时间工作时电子器件产生的巨大热量必须利用外太空的冷黑环境背景，经过辐冷板向外辐射的形式散出去。辐冷板的散热能力间接地又影响着电子器件的工作性能，激光由于亮度高和方向性好的的特性而对辐冷板的加热具有重要的意义。由于激光小型化轻量化技术的研究与应用目前在航天、航空等领域取得了显著的效果，并具有很大的发展空间及应用前景[2],星载的激光更可避免大气的消光以及扩束影响，在星载激光致热方面具有备更好的选择性。

文中以卫星辐冷板为研究对象，脉冲功率激光作为加热热源，采用固体传热物理场仿真辐冷板的散热过程,层流场仿真连接辐冷板的热管温度分布,结合电子基板的上的焦耳热,形成温度仿真模型,通过瞬态求解器得到在脉冲激光加热条件下星上辐冷板温度分布以及电子器件的温升规律，并分析了热管的工作限。

1 材料与模型参数

为了形成较完善的辐冷板模型，需要考虑电子发热组件,构造内部的热模型,同时考虑加入热管的简化模型，使电子发热组件产生的热量传递到辐冷板上。将激光辐照外辐冷板的温升规律与电子器件自身热和热管冷却热分布模型结合,通过理论分析,获得脉冲激光加热辐冷板对安装热管的电子器件热平衡的影响结论。

1.1 发热电子组件模型

基板的材质为硅(Silicon),长80 mm,宽 130 mm,厚度为 2 mm;分布在其上的为薄层结构,厚度为 10 μm,模拟基板上的电路走势,走线为铜(Copper);在其两个端面上为银(Silver),模拟电势正极以及接地端。引入电势 0.1 V,环境温度为室温 293.15 K,为了将电子组件的热搜集到热管，电子组件底部以铝为导热材料,热传导率为 238 W/(m²·K),使电子发热组件温度维持稳态。发热电子组件模型如图 1 所示。

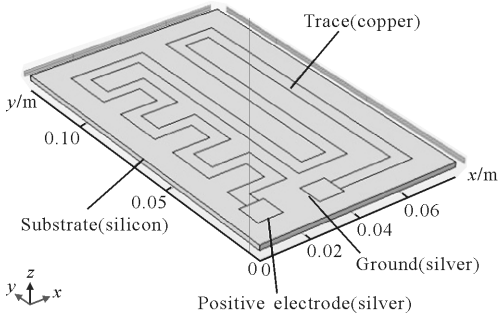

图 1 发热电子组件模型

Fig.1 Heating electronic module model

基板上的走线为薄层结构，而且基板产生的热也来自于电流流经金属线时产生的电阻损耗，根据电流守恒方程：

$$\nabla_T\cdot(d_S\vec{J})=d_SQ_j \tag{1}$$

$$\vec{J}=\left(\sigma+\varepsilon_0\varepsilon_r\frac{\partial}{\partial t}\right)\vec{E}+\vec{J_e} \tag{2}$$

$$\vec{E}=-\nabla_T V \tag{3}$$

式中：$\vec{E}$表示电场;V 表示电势;σ 表示电导率;Q_j 表示电阻损耗;ε_0 为真空绝对介电常数;ε_r 为相对介电常数;$\vec{J}$表示电流密度矢量;$\vec{J_e}$表示电场流密度;给定边界电绝缘条件为$\vec{n}\cdot\vec{J}=0$,$\vec{n}$表示法向矢量。

在基板、走线以及正负极(接地端)上,由于焦耳热产生的热量将在固体之间进行传导，假设所有域均为各向同性连续介质,固体传热方程为：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}+\rho C_p \vec{u}\cdot\nabla T+\nabla\cdot\vec{q}=Q+Q_{\text{ted}} \tag{4}$$

$$\vec{q}=-k\nabla T \tag{5}$$

式中：ρ 为材料密度；C_p 为定压比热容；T 表示温度；t 表示时间；$\vec{u}$表示流体速率矢量；$\vec{q}$为热流传导率矢量；Q 表示热源；Q_{ted} 表示热弹性阻尼（忽略热弹性形变 $Q_{\text{ted}}=0$）；k 表示热导率。热绝缘方程$-\vec{n}\cdot\vec{q}=0$；热通量方程$-\vec{n}\cdot\vec{q}=q_0$，q_0 表示内部热流量。由此，便建立了发热电子组件的模型。

1.2 热管散热器模型

热管是一种利用工质的蒸发、凝结相变和循环流动而工作的器械。由于液体蒸发和凝结时的热阻很小，因此利用热管可以实现在小温差下传递大热量。热管大部分预埋于冷板内，使星上载荷产生的热量通过管壁传递给管芯和内部的液态工质，利用热管在冷板内的分布减小热耦合阻抗。热管一端与热源连接，由于温度升高，蒸发加强，称为蒸发段，压力为 P_1。热管另一端与热沉或辐冷板连接(辐冷板温度低于内部热源温度)，蒸汽凝结从而释放热量，称为冷凝段，压力为 P_2。热量便在(P_1-P_2)的作用下流向辐冷板。热管内一般以丙烯为工质，其物理参数如表 1 所示(1 atm=1.013×10^5 Pa)。

表 1 室温下(1 atm)丙烯的物理参数

Tab.1 Physical parameters of propylene under room temperature(1 atm)

Melting point/K	Boiling point/K	Kinetic viscosity/ $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$	Specific heat capacity/ $\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	Density/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Thermal conductivity/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$
87.9	225.43	8.628×10^{-6}	1.347	1.743	1.708×10^{-2}

热管模型如图 2 所示，由上冷凝板和下蒸发板组成，材质为铝，尺寸均为 30 cm×30 cm×1 cm；嵌入冷凝板与 Y 轴平行的长方体为冷凝管，目的是把热管收集的热通过耦合的形式传递到辐冷板；嵌入蒸发板与 X 轴平行的长方体为蒸发管，目的是通过管内工质的流动把电子发热组件产生的热带到冷凝段，达到冷却的效果，工质(丙烯)流速为 2.5 mm/s。假设冷凝端流入的工质温度为 310.15 K，蒸发端流入的工质温度为 280.15 K。

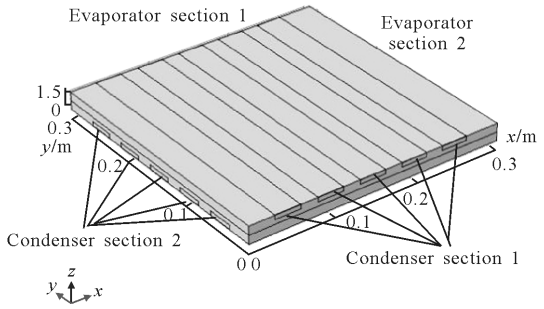

图 2 热管散热器模型

Fig.2 Heat pipe radiator model

流体传热方程：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}+\rho C_p \vec{u}\cdot\nabla T+\nabla\cdot\vec{q}=Q+Q_P+Q_{\text{vd}} \tag{6}$$

式中：Q_P 表示压力功；Q_{vd} 表示粘性耗散功。

层流公式：

$$\rho\frac{\partial u}{\partial t}+\rho(\vec{u}\cdot\nabla)\vec{u}=\nabla\cdot[-\rho l+\mu(\nabla u+(\nabla u)^{\text{T}}-\frac{2}{3}\mu(\nabla\cdot u)l]+F \tag{7}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho u)=0 \tag{8}$$

式中：$\vec{u}$表示流体矢量；l 表示流体管长度；F 表示质量力。

初始条件和边界条件为：

$$t=0,x,y,z=x,y,z|\Gamma,T=T_0=293.15\ \text{K}$$

$$x,y,z=x,y,z|_{\Gamma_h},T=280.15\ \text{K}$$

$$x,y,z=x,y,z|_{\Gamma_c},T=310.15\ \text{K}$$

$$x,y,z=x,y,z|_{\kappa},T=\mathring{T}$$

式中：Γ 为热管所有域；T 为热管工质瞬时温度；T_0 为初始环境温度；Γ_h 为热端工质流入截面；Γ_c 为冷端工质流入截面；κ 为与工质接触的热边界；$\mathring{T}$遵守流体的传热方程(公式(6))。

1.3 辐冷板模型

辐射是物体由于某种原因，例如受热、光照射以及化学反应等，使得内部分子、原子或电子振动并产生各种能级跃迁，因而向外发出辐射能。根据 Stefan-Boltzmann 定律，物体辐射力与其绝对温度的四次方成正比，因此辐冷板表面的辐射力为：

$$Q=\varepsilon\sigma AT^4 \tag{9}$$

式中：ε 为辐冷板表面的发射；σ 为玻耳兹曼常数，

σ=5.67×10^{-8} W/(m^2·K);A 为辐冷板表面的辐射面积;T 为辐冷板表面的温度。辐射能是依靠电磁波在真空或者介质中传播,而外太空中不存在空气,地面通过空气对流散热的形式在太空中不可行。电子器件消耗电能或化学能,产生热量,加上太空中的宇宙射线和太阳对卫星的加热,星上热量集聚,根据能量守恒原理,热量不可能凭空消失,辐冷板的辐射散热,成为了卫星上热量排散的唯一形式。辐冷板规格为 30 cm×30 cm×50 μm,选取铝为仿真材料,铝的比热容为 2.7×10^3 kJ/(kg·K),密度为 1.05 kJ/m^3,热导率为 238 W/(m·K)。由于现实中辐冷板有着 V 形和隔热组件等复杂结构,为了只关注研究重点,将辐冷板结构简化如图 3 所示,由热量收集的热管和辐射面组成。

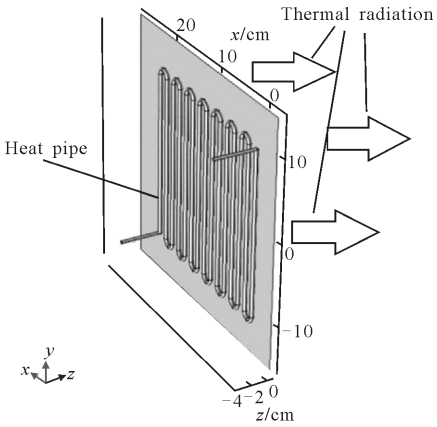

图 3 辐冷板模型

Fig.3 Radiant plate model

初始条件为:

$$t=0,0\ \text{cm}\leqslant x\leqslant 30\ \text{cm},-15\ \text{cm}\leqslant y\leqslant 15\ \text{cm},$$
$$0\ \text{cm}\leqslant z\leqslant 30\ \mu\text{m},T=293.15\ \text{K} \tag{10}$$

材料受激光照射的表面(z=50 μm)存在着热流载荷:

$$q\frac{\partial T}{\partial \vec{n}}\Big|_{0\ \text{cm}\leqslant x\leqslant 30\ \text{cm},-15\ \text{cm}\leqslant y\leqslant 15\ \text{cm}}=\alpha I_0 \tag{11}$$

除了垂直于 z 轴的四周边界外,各表面均存在热传导与辐射换热,换热边界条件为:

$$q\frac{\partial T}{\partial \vec{n}}\Big|_{\Phi}=h(T-T_0) \tag{12}$$

式中:$\vec{n}$为表面的法向矢量;Φ 为除垂直于 z 轴四周表面的边界;h 为换热系数。

2 温度场仿真与分析

在进行仿真过程中,为了方便进行温度分布对比,分别将辐射散热模型分为三部分。在进行瞬态温度场计算时忽略材料比热容、热导系数等参量随温度的变化。各材料类型、参数等在模型中已给出,根据数据可得到各模块仿真计算结果。

2.1 发热电子组件

发热电子组件的温度仿真如图 4 所示,由图可知,温度集中分布在薄层的走线上,最低温度293.15 K,最高温度 357.65 K。电路上一点(0.036,0.051,0.002)的温度变化如图 5 所示。在计算过程中除了底部有热传导以外,不存在任何的散热措施。

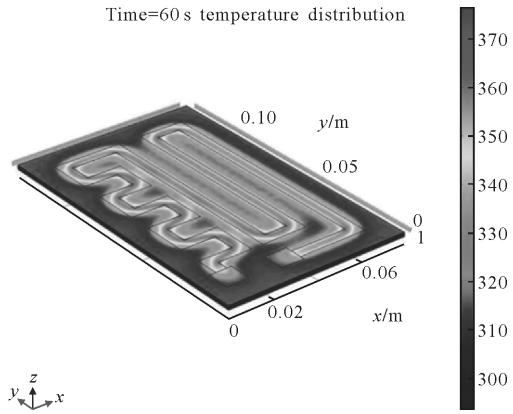

图 4 发热电子组件温度仿真结果

Fig.4 Simulation results of heating electronic components

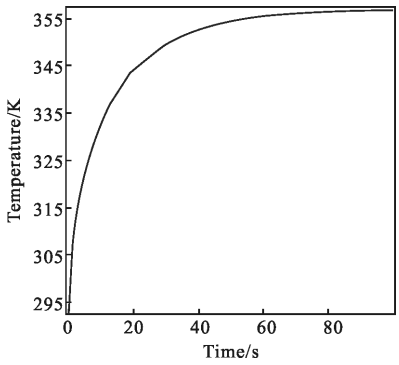

图 5 发热电子组件温度仿真结果

Fig.5 Simulation results of heating electronic components

由图 5 可知:电子器件线路在刚开始工作时的温度升高较快,在 20 s 的时间内便从 285.15 K 攀升至 345 K,而在以后的 40 s 内升高了 12.65 K。可知电

子器件的发热如果不采取措施进行排散的话，很容易造成电路的高温。

2.2 热管散热器

从图 6 中曲线可看出热管的温度包络，在蒸发端(吸热)形成了冷端，冷端的作用是通过温度耦合带走电子器件的热温；在冷凝端形成了热端，目的是将热借助外层的辐冷板向宇宙空间背景环境辐射热量，达到降温的目的。图 7 是电子器件同一点的热温度变化情况。可以看出，由于电子器件贴近热管的冷端，与刚开始时的不存在热管发热图 5 比较，同一点的温度由 355 K 逐渐降低，而且在 500 s 以后逐渐趋于稳定，初始温度由于温差较大，冷端耦合进行散热的速度较快，100 s 的时间内可以进行 20 K 的温度降低，随着温度接近热管冷端的假设工作温度，热传导速率降低，制冷效率降低。热管的工作限在结构布局不变的情况下，主要来自于工质、端口的流速决定的毛细限和携带限等[3]。

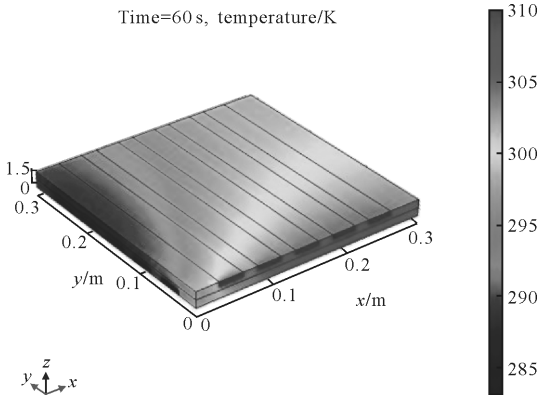

图 6 热管温度变化规律

Fig.6 Temperature variation of LHP

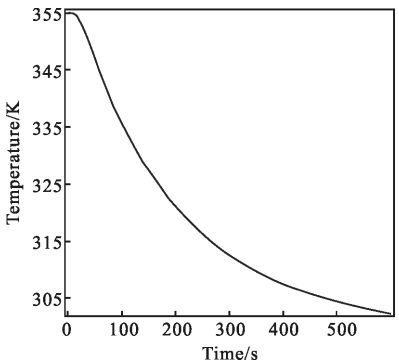

图 7 热管温度变化规律

Fig.7 Temperature variation of LHP

2.3 激光加热辐冷板

物质对激光的吸收与其物质结构和电子能带结构有关。金属中自由电子在激光作用下发生高频振动，通过坚韧辐射过程，部分振动能量转化为反射电磁波，其余则由于脉冲激光对吸收深度内的自由电子进行热激发转化为电子的平均动能，热激发的电子能量传递到附近的晶格，通过电子与晶格之间的弛豫过程与电子-声子间的热耦合过程将能量传递到材料的较深区域，最后转变为热能[4]，最终形成热的动态平衡。脉冲激光加热函数的空间分布采用高斯函数，辐冷板材料对激光的吸收为体吸收，所吸收的能量密度可表示为[5-6]：

$$Q(r,z,t)=\alpha I_0 f(r)\exp(-\alpha z)g(t) \tag{13}$$

其中，

$$f(r)=\exp\left(\frac{-2r^2}{w_0^2}\right) \tag{14}$$

$$g(t)=\exp\left[-\frac{2(t-\Delta t)^2}{\Delta t^2}\right] \tag{15}$$

式中：α 为材料吸收率；I_0 为脉冲激光峰值功率密度；w_0 为光斑半径；$f(r)$ 和 $g(t)$ 分别为脉冲激光的空间分布和时间分布函数；r 和 z 分别是脉冲激光在笛卡尔坐标系下的径向和轴向位置；Δt 为脉冲激光脉宽的半高全宽。热量在内部的传导可参照公式(4)，上表面为激光的热通量，激光参量选择为：波长1 064 nm，脉宽 0.05 s，频率 10 Hz，脉冲平均功率为 100 W，发散角为 10 μrad，距离辐冷板距离为 50 km，光斑半径为 50 cm。辐冷板对激光的吸收率为 0.04，发射率为 0.15，作用时间为 60 s。

初始温度为 293.15 K。由图 8 可知，激光照射在材料表面后，沿径向形成温度梯度，由中心最高温度向外扩散。辐冷板上表面中心点(0.15，0.15，0.5×10^{-4})温度分布如图 9 所示，高斯激光中心点形成的温度最高达到了 304 K，升高了 11 K。图中的 10 s 内温升梯度较大而后形成一趋平温度，由于温升在 2 K 以内，可排除吸收率、比热容等物性参数随温度变化而导致。猜测可能原因是温度升高，材料发射强度增加，同时光斑半径开始扩大，上表面的辐射面辐射度增加所致。10 s 后，辐冷板温升趋于线性，这是假设的物性参数不随温度变化与激光照射热效应和辐射散热成正比增加作用的结果。除了激光加热外，存在额外热管将内热运输至辐冷板的热量，根据材料热

容与温度关系得热通量为 0.012 9 W/m²。

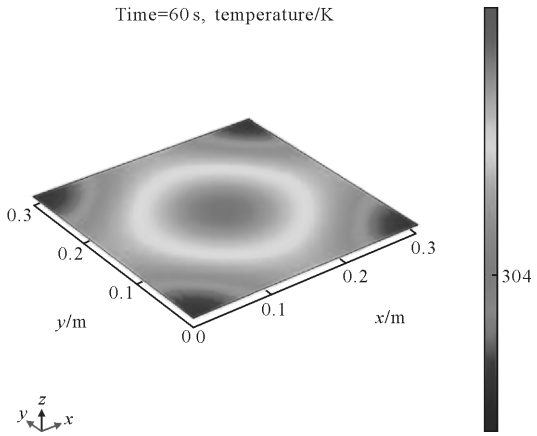

图 8 激光照射辐冷板温度分布

Fig.8 Temperature distribution of laser irradiated radiant plate

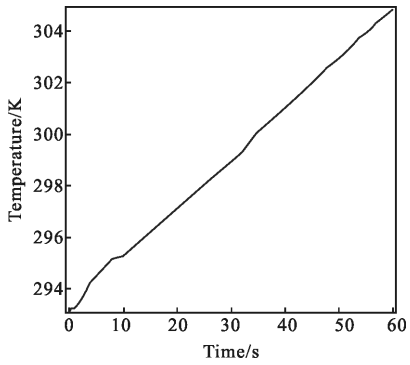

图 9 激光照射辐冷板温度分布

Fig.9 Temperature distribution of laser irradiated radiant plate

由酚醛树脂涂层裂解残炭石墨化程度分析的拉曼光谱图散射峰[7]可知,不同的材料存在不同的光谱峰,因此在激光的选择方面,针对不同辐冷板材料选择不同的激光器将使材料的温升最大化。

但是，关于脉冲和连续激光照射的热效应说法不一,参考文献[8]研究了不同占空比的重复频率脉冲激光照射下，金属材料前后表面温升特性和烧蚀深度变化规律，得出了重复频率脉冲激光更有利于金属材料的加热结论;参考文献[9]则认为长脉冲激光对材料有更好的热效果。

3 整体热性能分析

卫星设备温度的平衡在辐冷板面积一定、星上电子设备一定和轨道高度确定的时候主要受热管的工作限制,而热管的工作限主要受工质的黏性限、沸腾限和毛细限制约,在卫星正常工作的温度范围内,黏性限和毛细限随温度的变化很小,可忽略,而沸腾限随着温度的升高有着明显的降低，直接制约着热管的工作限。整体模型如图 10 所示。

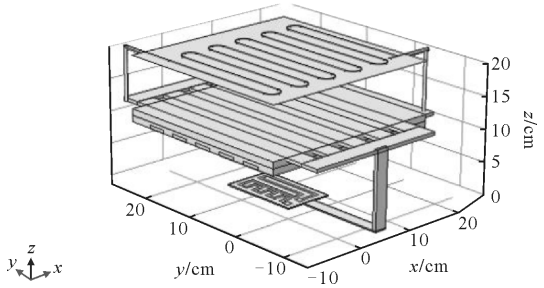

图 10 整体模型

Fig.10 Integral model

根据文中假设，激光的照射加热了辐冷板的外板,虽然存在着热管散热器的制冷效果,但是由于热管存在着工作限 (文中假设热管最高制冷温度在 310.15 K),假设在轨道上太阳照射一定时间后,温度升高达到热管最大工作限 Q_{max}，此时电路上产生的热(不计耦合热阻)全部传递到辐冷板,辐冷板此时温度为 T_r,根据能量守恒定律:

$$CM\Delta T=A_r\varepsilon\sigma T_r^4 \tag{16}$$

式中:C 为电路的比热容;M 为电路的质量;A_r 为辐冷板面积;ε 为辐冷板发射率，电路产生的热为 1.507 J,辐冷板温度为 293.15 K,经过激光照射后,辐冷板温升至 304 K 以上，升高的温度将直接导致热管工作性能的下降。

当热管达到最大的制冷量后,根据热量公式:

$$Q=\int_{V1}^{V2}\Delta V\cdot\rho\cdot C_r\cdot\Delta T\cdot \mathrm{d}V \tag{17}$$

式中:V 为辐冷板温升体积;ρ 为辐冷板密度;C_r 为辐冷板比热容。激光对辐冷板的加热给热管引入了 121 W/m² 的热通量，直接影响到热管的沸腾限,打破热管工作时形成的温度平衡，蒸汽流和液体流不能实现平衡补充。热端呈现热量的集聚,热管温度分布如图 11 所示,经过一段时间后,工质流速变缓,最终将形成阻塞,热管工作性能下降。

另一方面，热管的阻塞将使激光照射辐冷板的温度升高通过热传导的形式令电子器件温升，升高规律如图 12 所示。

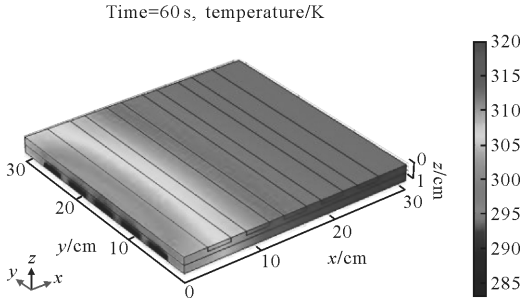

图 11 激光照射后热管温度仿真结果

Fig.11 Simulation results of heat pipe after laser irration

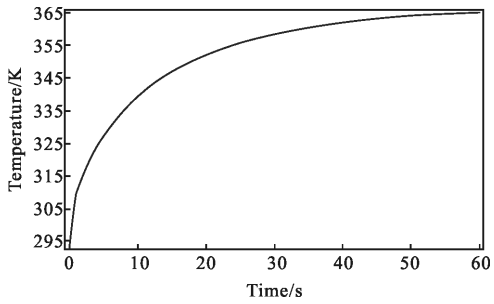

图 12 激光照射后电子发热组件温度仿真结果

Fig.12 Simulation results of heating electronic after laser irration

激光对辐冷板的照射使电子发热组件达到预定平衡温度的时间提前,同时温度升高了 7.35 K。参考文献[1]中指出:电子元器件每升高 10 ℃,失效率增加一倍,增加 25 ℃时,失效率增加 10 倍。由此,热管由于温度载荷过高而引起的散热平衡态破坏将直接影响着星上电子器件的正常工作。同时,卫星在空间中运行,当处于日照区域时,表面反射辐射会影响目标的辐射特性,在中波波段,辐射散热对目标的辐射特性影响很小,但在长波波段,辐射散热仍明显影响目标的辐射特性。空间目标的散热对空间目标的辐射特性有很大的影响[10]。激光对辐冷板的照射使卫星的散热性能发生了变化,因此将导致卫星固定的辐射特性变化,进一步影响着卫星的散热。

4 结 论

在 COMSOL5.3 有限元分析软件中分别建立了电子组件、热管和辐冷板的模型,通过确立初始条件和边界条件进行了数值仿真,获得了各个模块的温度分布模型。并且假设热管达到最大工作限后,分析了电子器件平衡态破坏的温度变化情况,温度的升高将严重影响电子器件的正常工作,为后期的激光加热辐冷板提供了理论依据。同时,结合文中的仿真可得到结论:在星上热管散热器存在工作限的情况下,脉冲激光对辐冷板的照射将严重影响辐冷板温度平衡态,而这各平衡态的破坏又将间接影响与辐冷板耦合的星上电子器件的工作性能,这为未来空间卫星的破坏和防御提供了参考。

参考文献[11-12]中验证了激光预处理对于薄膜的抗激光损伤,当负面影响大于正面影响时,在去除缺陷的同时也造成了膜层内部破坏。在较高能量密度激光辐照下,晶体体内“不可见”的缺陷诱导损伤的概率明显增加,促进了新的吸收前驱体形成。可设想,如果通过激光预处理后再进行激光照射辐冷板温升,或将达到事半功倍的效果。

参考文献:

[1] Fan Hanlin. De mand analysis of thermal control technology for the development of spacecraft [J]. ***Spacecraft Engineering***, 2010, 19(1): 7-11. (in Chinese)
范含林. 航天器发展对热控制技术的需求分析[J]. 航天器工程, 2010, 19(1): 7-11.

[2] An Haixia, Deng Kun, Bi Zhiyue. Miniaturization and lightweight technology of high-power laser equipment [J]. ***Chinese Optics***, 2017, 10 (3): 321-330. (in Chinese)
安海霞, 邓坤, 闭治跃. 高功率激光装备小型化轻量化技术[J]. 中国光学, 2017, 10(3): 321-330.

[3] Hou Zengqi, Hu Jingang. Thermal Control Technology of Spacecraft-Principles and Applications [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2007: 7-8, 167-169. (in Chinese)
侯增祺, 胡金刚. 航天器热控制技术——原理及其应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007: 7-8, 167-169.

[4] Qiu T Q, Tien C L. Heat transfer mechanisms during short-pulse laser heating of metals [J]. ***Journal of Heat Transfer***, 1993, 115: 4(4): 835-841.

[5] Jiao Luguang, Zhao Guomin. Numerical simulation of the temperature rise of a metal circular plate irradiated by laser [J]. ***Laser Journal***, 2010, 31(1): 25-27. (in Chinese)
焦路光, 赵国民. 激光辐照下金属圆板温升的数值模拟研究[J]. 激光杂志, 2010, 31(1): 25-27.

[6] Li Z, Wang X, Shen Z, et al. Mechanisms for the millisecond laser-induced functional damage to silicon

charge-coupled imaging sensors[J]. ***Applied Optics***, 2015, 54 (3): 378-388.

[7] Ma Chen, Ma Zhuang, Gao Lihong, et al. Laser damage mechanism of flake graphite modified phenolic resin coating [J]. ***Chinese Optics***, 2017, 10(2): 249-255. (in Chinese)
马琛, 马壮, 高丽红, 等. 激光对鳞片石墨改性酚醛树脂涂层的损伤机理[J]. 中国光学, 2017, 10(2): 249-255.

[8] Hu Peng, Chen Faliang. Simulation analysis of thermal effect of metal materials irradiated by repeated frequency pulse laser [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2016, 43 (10): 1006006. (in Chinese)
胡鹏, 陈发良. 重复频率脉冲激光辐照金属材料热效应模拟分析[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1006006.

[9] Zhou Guiyong, Ma Zairu, Xia Huijun, et al. Numerical simulation of temperature field of monocrystalline silicon irradiated by Gauss long pulse laser [J]. ***Journal of Xihua University: Natural Science Edition***, 2016, 35 (4): 44-47. (in Chinese)
周桂勇, 马再如, 夏惠军, 等. 高斯长脉冲激光辐照单晶硅温度场的数值模拟[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2016, 35(4): 44-47.

[10] Li Wenhao, Liu Zhaohui, Mu You, et al. Modeling and research of infrared characteristics of space target based on radiation dissipation [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46 (6): 0604003. (in Chinese)
李文豪, 刘朝晖, 穆猷, 等. 基于辐射散热的空间目标红外特性建模与研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(6): 0604003.

[11] Li Yongjun, Xiao Junfeng, Zhu Lichun, et al. Research on detection of thickness of thermal barrier coating by laser transmission infrared thermal wave method [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(7): 0704003. (in Chinese)
李永君, 肖俊峰, 朱立春, 等. 热障涂层厚度激光透射法红外热波检测技术研究 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(7): 0704003.

[12] Zhao Yuanan, Hu Guoxing, Liu Xiaofeng, et al. Laser conditioning technology and its applications[C]//Strong Laser Materials and Components Symposium and Laser Damage Symposium, 2016. (in Chinese)
赵元安, 胡国行, 刘晓凤, 等. 激光预处理技术及其应用[C]//强激光材料与元器件学术研讨会暨激光破坏学术研讨会论文集, 2016.