

文章编号 1004-924X(2024)19-2877-12

空间高功率激光二极管泵浦源阵列的 相变热控系统

上官爱红¹, 张昊苏^{1*}, 曹 钰^{1,2}, 谢友金^{1,2}, 张海洋^{1,3},
姜泳帆^{1,3}, 王 熹^{1,3}, 苏盛明^{1,3}

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院 空间精密测量技术重点实验室, 陕西 西安 710119;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了实现空间高功率激光二极管泵浦源阵列的快速散热,建立了空间高功率激光二极管泵浦源阵列相变热控系统,对热控系统的热界面材料(TIM)、紫铜热沉、相变材料、相变增强材料、主动加热回路和太空辐射板进行了研究与设计。首先,介绍了激光二极管泵浦源阵列的热特性与热控指标,从而提出热控设计思路,详细设计了热控系统,并在有无泡沫铜填充的条件下制定了两种热控方案。然后,用NX软件分析了两种不同的方案。分析结果显示:不填充泡沫铜方案的整个相变过程在800 s完成,LD上的温度最高达到59.98℃,相变材料上表面温度最高达到47.12℃;填充泡沫铜方案在200 s内完成相变过程,LD最高温度为38.35℃,并且LD在360 s后和相变温度点温度一致。填充泡沫铜方案可以满足10~40℃的温度指标要求。最后,根据填充泡沫铜方案设计加工了激光二极管泵浦源阵列热控系统,通过实验验证,该系统可以满足空间高功率激光二极管泵浦源阵列快速散热要求。

关键词:空间高功率激光器;激光二极管;泵浦源阵列;相变热控系统

中图分类号:TH133;V11;V476 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243219.2877

Phase change thermal control system for space high-power laser diode pumping source array

SHANGGUAN Aihong¹, ZHANG Haosu^{1*}, CAO Yu^{1,2}, XIE Youjin^{1,2}, ZHANG Haiyang^{1,3},
JIANG Yongfan^{1,3}, WANG Xi^{1,3}, SU Shengming^{1,3}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Xi'an 710119, China;

2. Key Laboratory of Space Precision Measurement Technology, Chinese Academy of Sciences,
Xi'an 710119, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: zhanghaosu@opt.ac.cn

Abstract: To achieve effective heat dissipation for a space high-power laser diode pumping source array, a phase change thermal control system has been developed. Key components like thermal interface materials

收稿日期:2024-05-16;修订日期:2024-06-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 62301558);中科院青年创新促进会项目(No. 2022405)

(TIM), copper heat sinks, phase-change materials, reinforcing materials, active heaters, and space radiators have been designed and evaluated. Initially, the thermal specifications of the laser diode pumping array are outlined, followed by the thermal control design concepts. A detailed design of the thermal control system was developed, and two thermal control schemes were formulated with and without copper foam filling. Then, the two different schemes were analyzed using NX software. The first scheme reaches a peak temperature of 59.98 °C in 800 s, with the phase-change material surface at 47.12 °C. The second scheme achieves a maximum temperature of 38.35 °C in 200 s and maintains thermal congruence with the phase-change temperature after 360 s, meeting the 10-40 °C specification. Consequently, the thermal control system for the laser diode pumping source is designed and manufactured based on the second scheme, ensuring efficient heat dissipation.

Key words: space high-power laser; laser diode; pumping source array; phase change thermal control system

1 引言

激光器的主要组成部分为谐振腔、泵浦源及工作物质。泵浦源的作用是对激光工作物质进行激励,将激活粒子从基态抽运到高能级,以实现粒子数反转。常见的泵浦方式包含电泵浦、化学泵浦、光泵浦和气动泵浦4种,其中,光泵浦和电泵浦是应用最广泛的方式。电泵浦方式常用于气体激光器中作为激励源,光泵浦方式则广泛应用于固体和液体激光器中。光泵浦是用一束光照射工作物质,工作物质中的粒子吸收光子的能量被激励到高能级上。激光二极管(Laser Diode, LD)泵浦源作为光泵浦的一种,具有效率高、噪声较低、频率稳定、寿命长和结构紧凑等优点,广泛应用在光纤激光器中。高功率光纤激光器搭载在卫星上可实现空间自由光通信、空间预警和空间攻防等作用。

高功率激光二极管阵列的散热是亟待解决的问题,如果LD散热不及时,势必造成结温升高,从而使LD的阈值电流密度升高,电光转换效率降低,激光波长发生严重温漂,从而影响激光器的寿命和可靠性。因此,如何及时消除因耗散功率所转化的热量是激光二极管阵列的关键^[1]。

激光二极管的传统散热方式是使用热导率较高的热沉,采用自然散热方式,以此达到对芯片温度降低的目标,通常使用铜作为热沉材料,但该方法的散热能力有限。在地面使用时,通常会采用水冷机通过水冷的方式强制散热。但在

空间领域,前述方面均不适用,需要研制高导热、可辐射至冷黑空间的散热系统。本文建立了空间高功率激光二极管泵源阵列相变热控系统,该系统满足快速散热的要求。

2 激光二极管阵列构成及其热特性

2.1 阵列构成

激光二极管尺寸约为 50 mm×20 mm×9 mm,通过螺钉紧固在热控系统上,为了达到高功率激光输出的要求,通过布置激光二极管阵列来实现,如图1所示。激光二极管阵列安装在热控系统上,每个激光二极管在进行电光转换时,一部分能量转化为热能,传导至二极管的封装壳体上。热控系统的作用是将多数量、高功率、密布的激光二极管壳体上的热量排散掉,从而保证激光二极管的高可靠、高电光转换效率。

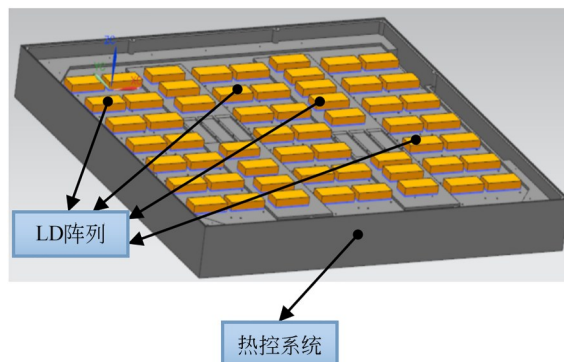


图1 激光二极管阵列系统构成

Fig. 1 Composition of laser diode array system

2.2 阵列热特性

LD阵列中二极管的数量由激光器总体设计方提出。目前,根据应用需求大部分为间隔工作模式,单次工作时间约为几十秒到上百秒不等,工作时阵列中所有LD同时工作,并产生热量,工作完成后所有LD同时关机,间歇关机时间在60 min左右,然后开始下一次工作。大功率激光器中单片激光二极管的发热功率在几瓦到几十瓦之间。

本文中热控系统设计和分析针对的LD具有如下特性:单个LD尺寸约为 $50\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 9\text{ mm}$,功率为100 W,电光转换效率为70%,单次工作时间为190 s,间隔时间为60 min。LD数量为70个,每片二极管间隔14.5 mm。

2.3 LD热控指标

LD阵列的工作温度为 $10\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$;不工作时,安装热沉温度为 $10\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

根据LD的间隔工作、较大的发热功率、阵列同时散热的特点,选择由紫铜箱体-泡沫铜-相变材料组成复合结构热沉实现LD阵列工作时热量的吸收存储。当LD阵列不工作时,利用间歇关机时间实现热量的排散及相变材料的转化,以便下一次工作的正常进行。

空间高功率LD阵列工作在空间黑冷环境中,系统吸收存储的热量可以通过热辐射板辐射至4 K的空间环境中。热辐射板的放置注意避开太阳照射和其他星上设备的辐射。

3 激光二极管阵列相变热控系统

3.1 设计原则

空间高功率LD阵列热控设计的主要原则有:

(1)优先采用简单、可靠、成熟,历经飞行验证的热控产品和技术;

(2)充分进行光、机、电、热、装调、检测及试验等多学科一体化及优化设计;

(3)合理选择极端工况,既确保足够的工程余量,又避免不必要的功率、质量及散热面面积等资源的浪费;

(4)应确保热控措施实施的可行性和热控设

计的可验证性。

3.2 热控系统设计

针对LD间隔工作、大功率的特点,采用复合结构热沉实现泵浦热量的吸收,由紫铜箱体-泡沫铜-相变材料组成复合结构吸收存储热量,最后将通过热辐射板排散至空间环境。图2为相变热控系统热量传递过程示意图。

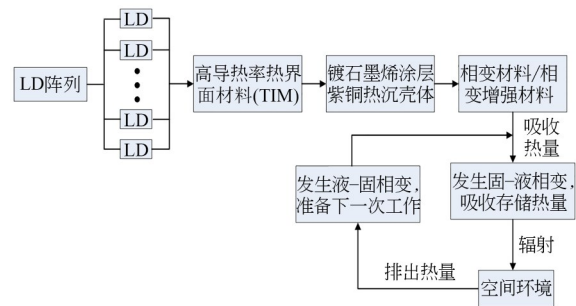


图2 相变热控系统热量传递过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of heat transfer process in phase-change thermal control system

根据热量传递过程,LD相变热控系统主要由热界面材料、紫铜热沉、相变材料、相变增强材料和太空辐射板等组成。

3.2.1 高导热率热界面材料(TIM)

LD安装在热沉上,通过热传导将热量传导至热沉,由于LD和热沉的接触形状或者加工表面可能不完全贴合,接触界面之间存在空隙,因而产生接触热阻。实际应用中,接触热阻受多方面因素的影响,主要有两个接触面的材料、压力,间隙层材料及平面粗糙度。在间隙有介质且压力不大的情况下,接触热阻近似等于两表面填充的间隙层热阻。如果两个接触表面不进行填充,那么两接触界面之间的是空气,而空气具有较低的热传导系数($k_{\text{air}}=0.026\text{ W/m}\cdot\text{K}$)。由于LD尺寸较小、发热高,容易造成热量集中,影响散热效率,不能及时地将LD的热量排散出去,导致LD结温升高从而使LD失效。为了避免热量集中,在LD和热沉之间需要增加高导热率热界面材料TIM。根据接触热阻的定义,厚度越薄,接触热阻越小,通过高导热率热界面材料TIM将LD热量传递给热沉。

理想的热界面材料应具有以下特性:(1)可压缩性及柔软性,保证两个接触表面能够充分接触;(2)高热传导性;(3)低热阻尼;(4)对扣合压力的敏感性高;(5)安装简便并具有可拆性;(6)可重复使用;(7)冷热循环的稳定性好;(8)适用性广,可以填充小缝隙,也可以填充大缝隙。

石墨烯-铜箔复合导热膜的平面热导率达到 $800 \text{ W/m}\cdot\text{K}$,垂直热导率为 $25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$,铜箔厚度为 0.009 mm 。在每个 LD 下面垫尺寸约为 $50 \text{ mm}\times 20 \text{ mm}\times 0.04 \text{ mm}$ 左右的导热膜。通过螺钉将 LD 与热沉压紧以减小接触热阻。

按照 LD 与热沉的传热路径,石墨烯-铜箔复合导热膜厚度方向为传热方向。通过热阻计算公式可以计算出间隙层热阻为:

$$R_s = \frac{d}{k_s A}, \quad (1)$$

其中: k_s 为间隙层材质的热导率, A 为接触面积, d 为间隙层厚度。将石墨烯-铜箔复合导热膜的参数代入式(1),可以得到:

$$R_s = \frac{0.04 \times 10^{-3}}{25 \times 1000 \times 10^{-6}} = 0.0016 \text{ K/W}. \quad (2)$$

石墨烯-铜箔复合导热膜平面方向的高热导率可以使 LD 的热量从横向导出,为系统高效均匀散热提供保障。

3.2.2 镀石墨烯涂层紫铜热沉

大功发热部件 LD 安装在镀石墨烯涂层的紫铜热沉上。热沉平台一方面为 LD 和光纤提供一个结构安装平台;另一方面,将大功率发热部件-泵浦(LD)及光纤的发热热量快速稳定地传至空间环境中,从而保证泵浦始终保持在工作温度范围内。

为了保证热量的快速传导,热沉选用热导率为 $386.4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 的紫铜作为材料,采用槽道设计,增加的肋条可以保证热沉的结构强度和增强热量的传导。紫铜热沉的厚度约为 3 mm ,为了保证焊接的强度和灌装相变材料后箱体需要承受的压力,增加的肋条也与热沉箱体上表面焊接以增大焊接面积。肋条与箱体下表面为一体,采用铣切工艺完成。紫铜热沉的上盖板与下面的一体化肋条箱体结构之间采用真空焊接的方式进行焊接。图 3 为镀石墨烯涂层紫铜热沉构成。

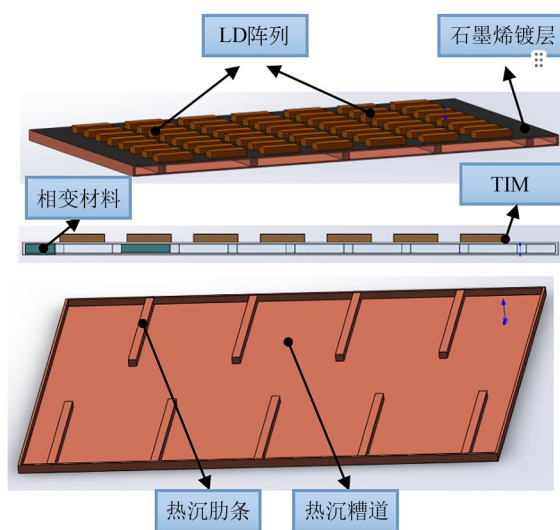


图 3 镀石墨烯涂层紫铜热沉构成

Fig.3 Composition of copper heat sink coated with graphene

3.2.3 紫铜热沉内相变材料

相变材料作为储存热量的载体,需要根据使用环境和任务目的来选择,这关系到热控系统的成败。相变材料的种类多达 6 000 种以上,根据相变的形式可分为固-固、固-液、气-液、气-固 4 种,相变潜热按照分类顺序逐渐增大。在气-液和气-固相变过程中会产生大量气体,相变装置必须能承受气体膨胀高压,因而变得复杂^[1]。目前,在航天器热控系统中,固-液相变材料具有相变潜热较大、热胀率小、相变温度范围广的优点,因此得到了广泛的应用^[2]。

航天器热控相变材料的选用应考虑以下因素^[3-4]:(1)适合的相变温度;(2)相变潜热高;(3)有较高的热导率和热扩散率;(4)比热大,密度大;(5)熔化时体积变化小;(6)熔化和凝固可靠且可逆;(7)与容器和填充材料相容;(8)无毒和其他危害性。在比热、密度、相容和无毒等条件都满足的条件下,主要考虑相变温度和相变潜热,从而选择合适的相变材料^[5]。

根据航天器的使用环境和任务要求,得到热控系统的控温指标,选择合适的相变温度点,尽可能使升温过程的传热量等于降温过程的传热量。这样可以避免在多次的固-液相变转换中因升温传热量与降温传热量的不平衡而导致热量残留,从而使相变材料热控系统失效。在空间航天器中,热控系统的工作要求一般为 $-20\sim$

+55℃,表1列出了-25~+55℃相变温度内的相变材料及热特性。

表1 -25~+55℃相变温度内的相变材料及热特性

Tab.1 Phase-change materials and thermal characteristics in temperature range from -25℃~+55℃

序号	材料	相变温度/℃	相变潜热/(kJ·kg ⁻¹)
1	正十一烷(C ₁₁ H ₂₄)	-25	141
2	正十二烷(C ₁₂ H ₂₆)	-12	211
3	正十三烷(C ₁₃ H ₂₈)	-6	155
4	水(H ₂ O)	0	333
5	正十四烷(C ₁₄ H ₃₀)	5.5	225
6	正十五烷(C ₁₅ H ₃₂)	10	247
7	醋酸(CH ₃ COOH)	17	187
8	正十六烷(C ₁₆ H ₃₄)	18.1	236
9	正十七烷(C ₁₇ H ₃₆)	21.7	213
10	正十八烷(C ₁₈ H ₃₈)	28	244
11	正十九烷(C ₁₉ H ₄₀)	32	187
12	正二十烷(C ₂₀ H ₄₂)	38	248
13	正二十六烷(C ₂₆ H ₅₄)	56	248

相变时温度维持在相变点,可实现对温度敏感的电子元件的精确控温。根据高功率激光的热控要求,LD基板温度控制在(18±2)℃,因此选定正十六烷作为相变材料。

正十六烷的相变潜热为236 kJ/kg,相变温度为18.1℃,固相比热为1.75 kJ/kg·K,液相比热为2.22 kJ/kg·K,热导率为0.5 W/m·K。经过计算填充正十六烷1.9 kg,将正十六烷封装在紫铜热沉中实现相变储热。

相变材料的密度为0.773 4 g/cm³,考虑固液体积差及设计裕度,确定紫铜热沉的尺寸为476 mm×596 mm×16 mm,壁厚3 mm。

3.2.4 紫铜热沉内相变强化材料

相变材料内部的热过程是一个瞬态传热过程,每个时刻材料内部都存在温差。因此,需要在相变热控系统中降低热阻、提高导热性能,提高相变材料内部的温度均匀性和储热能力。相变系统内部的高效传热是制约相变系统使用效果的一个关键因素^[6]。

增强导热的方式目前有两种,一种是在相变

材料中填充导热填料,如金属粉、石墨粉等。研究表明:在石蜡中加入质量分数为5%~20%的铝粉和铜粉时,其导热系数分别提高了20%~48%和11%~24%;在脂酸中加入质量分数为5%~20%的铝粉和铜粉时,其导热系数分别提高了23%~56%和13%~28%。在相变材料中添加石墨后,其热导率从纯石蜡的0.24 W/m·K提高到4~7 W/m·K。相变材料的储热时间和放热时间分别比纯石蜡缩短了70.7%和56.5%。另一种是在相变材料中植入导热增强体,如金属泡沫、肋片、蜂窝等结构形式。高孔隙率的泡沫铜材料是近年来开发出的一种新型材料^[7-8],以高孔隙率泡沫铜为骨架,在泡沫铜中填充相应的相变材料可以制成复合相变材料。这种复合相变材料的密度和单位体积的相变潜热改变不大,将其封装在紫铜热沉中,可以大大地降低相变材料散热通道沿程的接触热阻,提高导热性能。

3.2.5 与空间环境的热交换

为了将热量排散至冷黑空间,设计散热板进行散热。散热板设计在紫铜热沉的背面,表面喷涂KS-Z白漆,并设置1路控温加热回路进行温度控制。

LD阵列工作时的发热量为:

$$Q_{LD} = P_{LD} \times t_{LD}, \quad (3)$$

其中: Q_{LD} 为LD阵列在工作时间内的发热量; P_{LD} 为LD阵列的发热功率; t_{LD} 为LD阵列的工作时间。

散热板表面喷涂KS-Z白漆,散热板单位时间向空间辐射的热量为:

$$\Phi = \epsilon \sigma A (T^4 - T_0^4), \quad (4)$$

其中: ϵ 为散热板的表面发射率,KS-Z白漆的表面发射率为0.9; σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常量,它是自然常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;A为散热面的面积;T为散热板的温度; T_0 为冷黑空间的温度。

在一个工作周期 τ 内,通过散热板辐射出的热量为:

$$Q_R = \Phi \cdot \tau. \quad (5)$$

而 $Q_{LD} = Q_R$,因此可以计算散热面的面积A。

4 激光二极管阵列热分析

4.1 方案对比

实验制定了两种激光器热控方案,分别为未填充泡沫铜方案和填充泡沫铜方案,如表 2 所示。

表 2 两种不同的热控方案

Tab. 2 Two different thermal control schemes

方案	关键技术
1	热沉内填充正十六烷相变材料,不填充泡沫铜
2	热沉内填充泡沫铜,泡沫铜间隙内充满正十六烷相变材料

方案 1 采用未填充泡沫铜,在镀石墨烯涂层紫铜热沉侧面加工两个填充孔分别为相变材料的进口和出口,加热相变材料正十六烷到相变点 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,然后将液态的相变材料灌入热沉中。

方案 2 将孔隙率为 95% 的泡沫铜放置在镀石墨烯涂层紫铜热沉中,然后采用真空焊将热沉壳体 and 上表面焊接在一起,通过热沉侧面加工的两个填充进口和出口将相变点 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的液态相变材料正十六烷灌入热沉中。

4.2 计算工况选择

为了确定最优方案,针对激光器两种热控方案分别进行分析计算,工况 1 和工况 2 分别对应两种方案。初始工作温度设定为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。选择紫铜热沉侧面为安装面,安装面温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

LD、箱体和相变材料采用四面体实体网格,散热面采用八面体实体单元,共划分节点 40 420 个,网格 154 531 个,相变热控系统的有限元模型如图 4 所示。

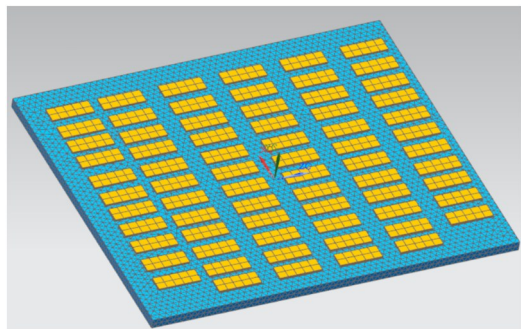


图 4 相变热控系统的有限元模型

Fig. 4 Finite element model of phase-change thermal control system

4.3 计算结果

德国 SIMENSE 公司 NX 软件中的 TMG 模块可以很好地模拟太空环境、太阳辐照、地球反照和地球红外辐射等太空条件,并且可以进行有限元分析和计算,从而模拟出载荷的温度水平和温度梯度。

4.3.1 工况 1

在工况 1 下,激光器 LD 阵列的工作时间为 190 s ,计算时间为 $3\ 600\text{ s}$,对 $20, 190, 300, 360, 800\text{ s}$ 的 LD、热沉和相变材料进行了分析,得到的温度分布云图如图 5~图 14 所示。

激光器工作 20 s 后整个箱体热沉、LD 的温度分布如图 5 所示,LD 上最高温度为 $23.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从图 6 可以看出,相变材料上表面已发生相变,上表面温度为 $18.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,目前处于固液混合状态。

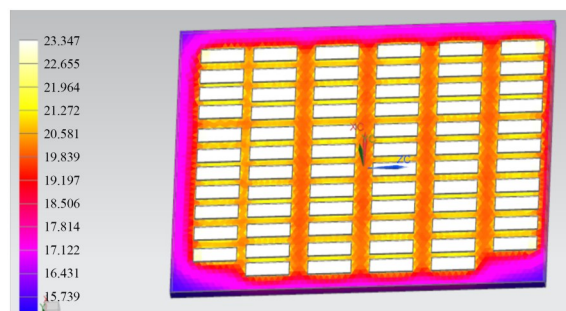


图 5 LD 及箱体热沉在 20 s 时的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of LD and heat sink at 20 s

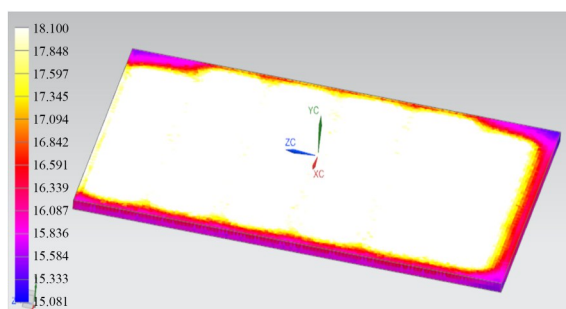


图 6 相变材料在 20 s 时的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of phase-change material at 20 s

激光器工作 190 s 后整个箱体热沉、LD 的温度分布如图 7 所示,LD 上最高温度 $59.98\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从图 8 可以看出,由于相变材料自身的热导率较低,相变材料的上表面温度为 $47.12\text{ }^{\circ}\text{C}$,下表面为 $16.71\text{ }^{\circ}\text{C}$,处于固液混合状态。

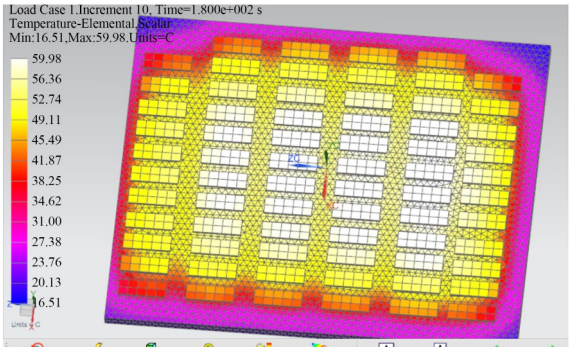


图 7 LD 及箱体热沉在 190 s 时的温度分布
Fig. 7 Temperature distribution of LD and heat sink at 190 s

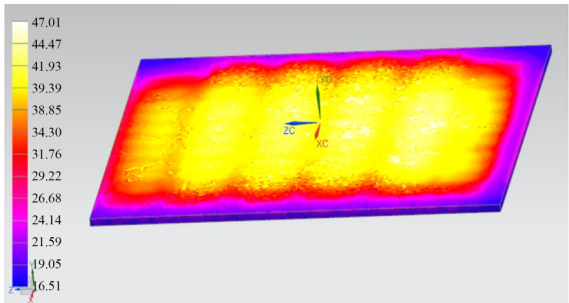


图 8 相变材料在 190 s 时的温度分布
Fig. 8 Temperature distribution of phase-change material at 190 s

300 s 时,热量不停传向相变材料,温度下降。整个箱体热沉、LD 的温度分布如图 9 所示,LD 上最高温度为 33.10℃,较 200 s 时的 54.33℃下降 21℃。从图 10 可以看出,随着相变材料自身的导热,相变材料的上表面温度为 31.09℃,较 200 s 时的 46.64℃下降 15℃,下表面上升为 17.83℃,处于固液混合状态,相变过程未全部完成。

360 s 时,热量不停传向相变材料,温度不断

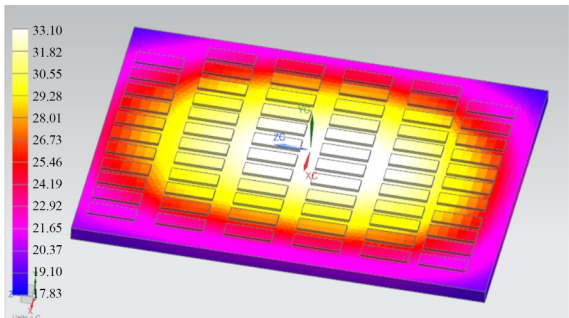


图 9 LD 及箱体热沉在 300 s 时的温度分布
Fig. 9 Temperature distribution of LD and heat sink at 300 s

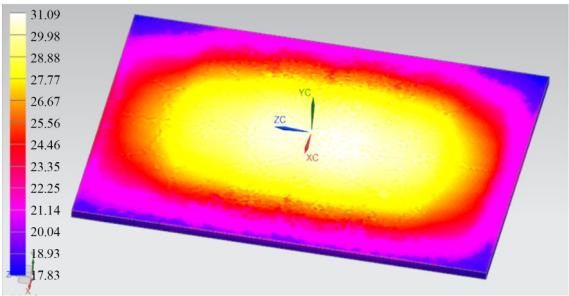


图 10 相变材料在 300 s 时的温度分布
Fig. 10 Temperature distribution of phase-change material at 300 s

下降。整个箱体热沉、LD 的温度分布如图 11 所示,LD 上最高温度 27.34℃,较 300 s 时的 33.10℃下降 6℃。从图 12 可以看出,相变材料的上表面温度为 26.3℃,较 300 s 时的 31.09℃约下降 5℃,下表面上升为 18.03℃,处于固液混合状态。

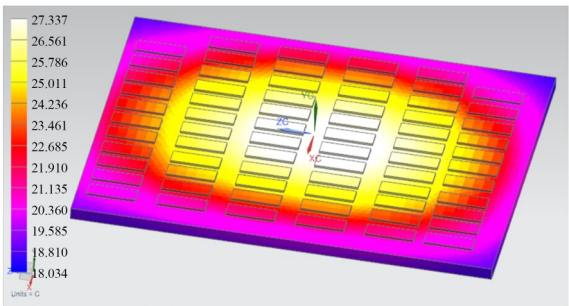


图 11 LD 及箱体热沉在 360 s 时的温度分布
Fig. 11 Temperature distribution of LD and heat sink at 360 s

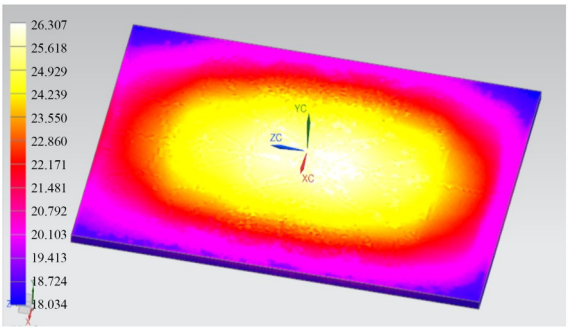


图 12 相变材料在 360 s 时的温度分布
Fig. 12 Temperature distribution of phase-change material at 360 s

800 s 时,热量不停传向相变材料,温度继续下降。整个箱体热沉、LD 的温度分布如图 13 所示,LD 上最高温度为 18.55℃,较 600 s 时的

19.8 °C 下降 1.25 °C。从图 14 可以看出,随着相变材料自身的导热,相变材料的上表面温度为 18.52 °C,较 600 s 时的 19.67 °C 约下降 1.1 °C,下表面上升为 18.1 °C,相变完成。

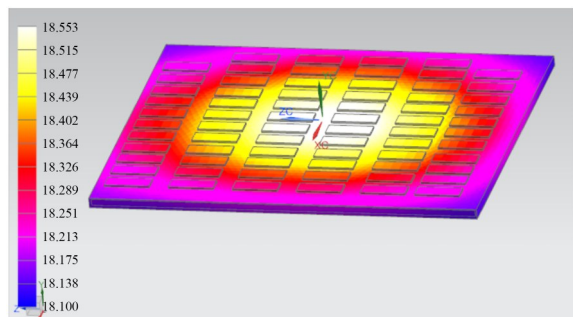


图 13 LD 及箱体热沉在 800 s 时的温度分布

Fig. 13 Temperature distribution of LD and heat sink at 800 s

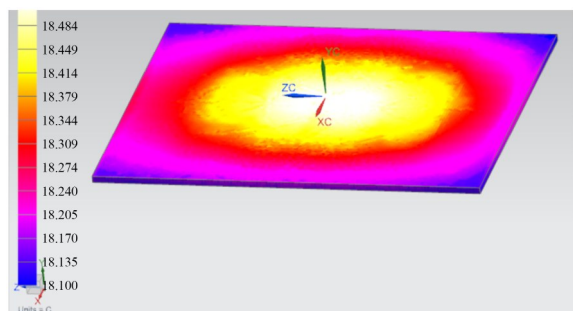


图 14 相变材料在 800 s 时的温度分布

Fig. 14 Temperature distribution of phase-change material at 800 s

4.3.2 工况 2

在工况 2 下,考虑泡沫铜的添加,和工况 1 一样,激光器 LD 阵列的工作时间为 190 s,计算时间为 3 600 s,对 20, 100 和 200 s 的 LD、热沉和相变材料进行了分析,得到的温度分布云图如图 15~图 20 所示。

激光器工作 20 s 后整个箱体热沉、LD 的温度分布如图 15 所示,LD 上最高温度为 27.88 °C。从图 16 可以看出,相变材料上表面发生相变,上表面温度为 18.1 °C,相变材料的最低温度为 15.17 °C,处于固液混合状态。

激光器工作 100 s 后整个箱体热沉、LD 的温度分布如图 17 所示,LD 上最高温度为 33.38 °C。从图 18 可以看出,由于填充泡沫铜后相变材料热导率较高,100 s 时相变材料的上表面温度为

19.76 °C,下表面温度为 17.68 °C,相变过程还未完成。

激光器工作 200 s 后整个箱体热沉、LD 的温度分布如图 19 所示,LD 上最高温度为 28.62 °C。从图 20 可以看出,由于填充泡沫铜后相变材料热

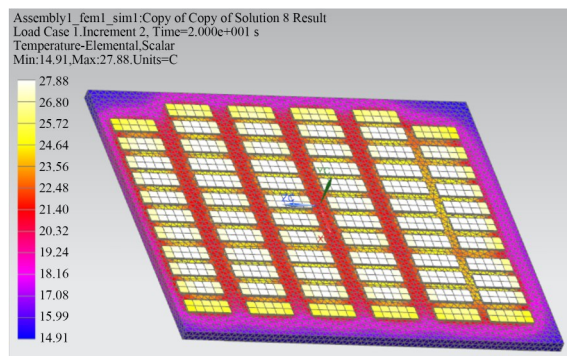


图 15 LD 及箱体热沉在 20 s 时的温度分布

Fig. 15 Temperature distribution of LD and heat sink at 20 s

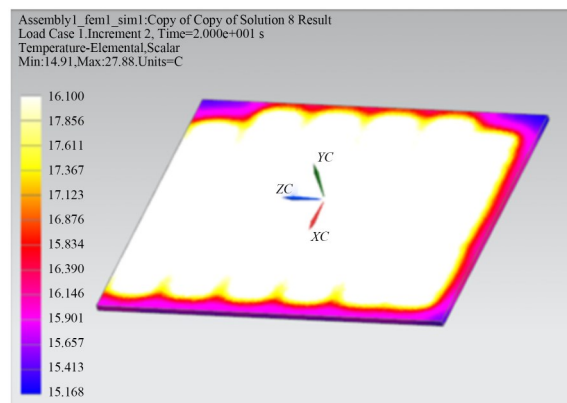


图 16 相变材料在 20 s 时的温度分布

Fig. 16 Temperature distribution of phase-change material at 20 s

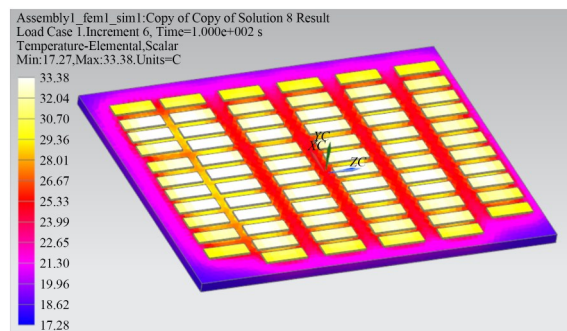


图 17 LD 及箱体热沉在 100 s 时的温度分布

Fig. 17 Temperature distribution of LD and heat sink at 100 s

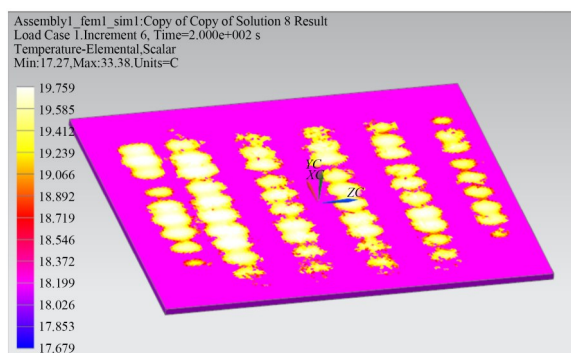


图 18 相变材料在 100 s 时的温度分布

Fig. 18 Temperature distribution of phase-change material at 100 s

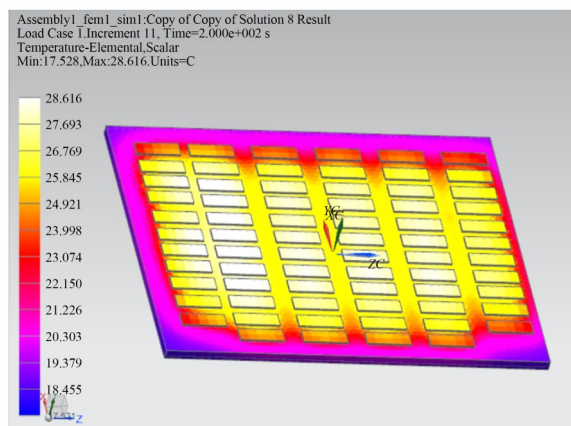


图 19 LD 及箱体热沉在 200 s 时的温度分布

Fig. 19 Temperature distribution of LD and heat sink at 200 s

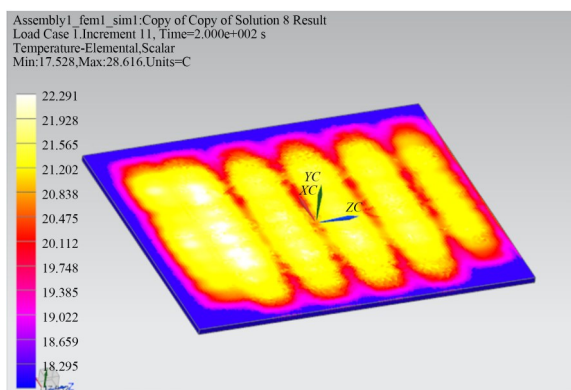


图 20 相变材料在 200 s 时的温度分布

Fig. 20 Temperature distribution of phase-change material at 200 s

导率较高,传热途径较好,目前相变材料的上表面最高温度为 22.29℃,下表面为 18.1℃,相变过程完成。

对单个 LD 进行温度跟踪,得到的温度曲线如图 21 所示。经过泡沫铜填充后,相变材料可以满足系统要求,LD 最高温度为 32.41℃。整个 LD 阵列在 190 s 时出现最高温度,为 38.35℃。

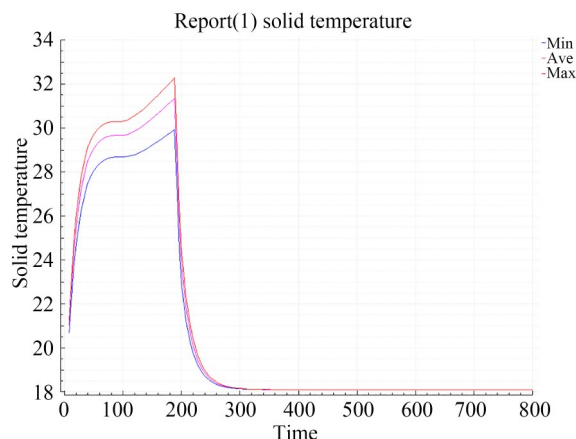


图 21 单个 LD 温度曲线

Fig. 21 Temperature curve of single LD component

4.4 方案分析比较

工况 1 中,整个相变过程在 800 s 完成,LD 上的温度最高达到 59.98℃,相变材料上表面最高达到 47℃,由于相变材料传热热阻的影响,180 s 时相变材料上下表面的温差最大达到 40.3℃。激光器 LD 不工作后,随着传热过程的持续和平衡,最终在 800 s 时下表面相变材料达到相变温度点,相变材料上下表面温差 0.4℃,从而完成相变过程。

工况 2 中,相变过程在 200 s 内完成,LD 的最高温度为 38.35℃,并且 LD 温度在 360 s 后和相变温度点一致。整个热控系统可以快速排散热量,这是由于热沉中填充了泡沫铜,增强了相变材料的传热能力。

5 实验

根据方案 2 设计加工相变热控系统,将孔隙率为 95% 的泡沫铜放置在紫铜热沉中,如图 22 所示。采用真空焊将热沉壳体和上表面焊接在一起,通过热沉侧面加工的两个填充进口和出口将相变点 18℃ 以上的液态相变材料正十六烷灌入热沉中。



图 22 放置在紫铜热沉中的泡沫铜
Fig. 22 Copper foam placed in red copper heat sink

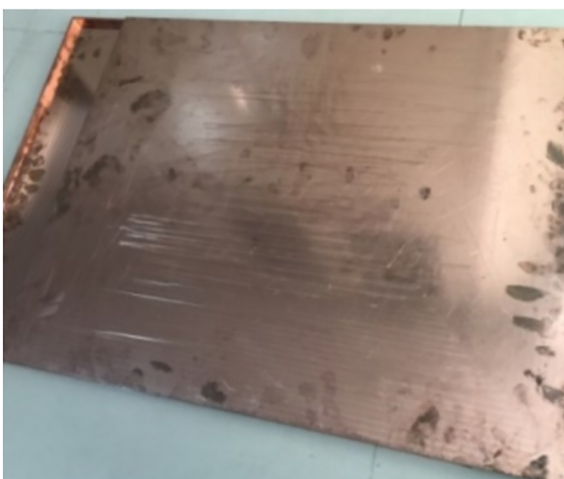


图 23 制作过程中的相变热控系统
Fig. 23 Phase-change thermal control system in process

然后,在紫铜热沉表面喷涂 $9\ \mu\text{m}$ 厚的石墨烯涂层,将 LD 贴在石墨烯涂层上,并在紫铜热沉背面喷涂 KS-Z 白漆作为散热面,从而制成空间高功率激光二极管泵浦源阵列相变热控系统,如图 23 所示。

将热控系统改装后进行地面实验,在散热板表面包覆 20 单元多层材料防止漏热,将紫铜热沉通过 15 mm 隔热垫安装于 KM1 真空罐安装平台上,控制安装平台的温度,实验装置如图 24 所示。实验条件为:

(1)空间环境模拟室内的真空度优于 $1.3 \times 10^{-3}\ \text{Pa}$;

(2)采用热沉和红外加热笼复合控制的方

式,实现安装平台温度的有效控制,安装平台温度为 $15\ ^\circ\text{C}$ 。一般上载荷安装在卫星舱内,卫星提供的安装边界为 $-20\sim 15\ ^\circ\text{C}$,在这里模拟高温散热能力;

(3)应能监测真空室的压力和安装平台的温度;

(4)在 LD、紫铜热沉等关键部位粘贴测温电阻进行温度检测。



图 24 相变热控系统实验装置
Fig. 24 Experimental setup of phase-change thermal control system

测温点 1 放置在 LD(01)上表面,测温点 2 放置在 LD(01)下表面与石墨烯涂层接触的位置,测温点 3 放置在紫铜热沉上表面,测温点 4 放置在紫铜热沉下表面,测温点 5 放置在安装平台表面,对测点进行温度监测,实验完成后对数据进行整理和分析。

激光器工作 20, 100, 200 s 后,各测点的温度分别如表 3~表 5 所示。实验数据和分析数据比对发现,分析误差在 3% 以内,相变热控系统满足

表 3 激光器工作 20 s 后各测点的温度

Tab. 3 Each sensor temperature after laser working for 20 s

测 点	仿真分析 结果/ $^\circ\text{C}$	实验 数据/ $^\circ\text{C}$	温度 偏差/ $^\circ\text{C}$	分析 误差/%
测温点 1	27.88	27.29	0.59	2.1
测温点 2	22.48	21.94	0.54	2.4
测温点 3	18.16	17.69	0.47	2.6
测温点 4	15.17	14.82	0.35	2.3
测温点 5	15.01	14.69	0.32	2.1

表 4 激光器工作 100 s 后各测点的温度

Tab. 4 Each sensor temperature after laser working for 100 s

测 点	仿真分析 结果/℃	实验 数据/℃	温度 偏差/℃	分析 误差/%
测温点 1	33.38	32.61	0.77	2.3
测温点 2	25.33	24.85	0.48	1.9
测温点 3	19.76	19.25	0.51	2.6
测温点 4	17.68	17.26	0.42	2.4
测温点 5	15.05	14.67	0.38	2.5

表 5 激光器工作 200 s 后各测点的温度

Tab. 5 Each sensor temperature after laser working for 200 s

测 点	仿真分析 结果/℃	实验 数据/℃	温度 偏差/℃	分析误 差/%
测温点 1	28.62	27.93	0.69	2.4
测温点 2	25.84	25.25	0.59	2.3
测温点 3	22.29	21.73	0.56	2.5
测温点 4	18.10	17.70	0.40	2.2
测温点 5	15.03	14.67	0.36	2.4

参考文献:

[1] RATHOD M K, BANERJEE J. Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 18: 246-258.

[2] FARID M M, KHUDHAIR A M, ALI K RAZACK S, et al. A review on phase change energy storage: materials and applications[J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45 (9/10) : 1597-1615.

[3] SHARMA A, TYAGI V V, CHEN C R, et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13 (2) : 318-345.

[4] 上官爱红, 穆猷, 李治国, 等. 空间环境对 MoS₂ 固体润滑运动部件寿命的影响[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3264-3271.

SHANGGUAN A H, MU Y, LI ZH G, et al. Ef-

空间高功率激光二极管阵列的热控要求。

6 结 论

本文介绍了激光二极管泵浦源阵列的热特性与热控指标,详细设计热控系统包含热界面材料,紫铜热沉,相变材料、相变增强材料和太空辐射板等,选择合适的热控材料和相变材料,提出了两种不同的热控方案。方案 1 不填充泡沫铜,整个相变过程在 800 s 完成,LD 上的温度最高达到 59.98 ℃,相变材料上表面最高达到 47.12 ℃;方案 2 填充泡沫铜,在 200 s 之内完成相变过程,LD 最高温度为 38.35 ℃,并且 LD 在 360 s 后和相变温度点温度一致。方案 2 可以快速排散热量,满足设计要求。最后设计加工了激光二极管泵浦源阵列热控系统,并且在真空罐中进行了实验验证。实验结果与模拟分析结果的误差在 3% 以内,可以满足空间高功率激光二极管阵列的快速散热要求。该热控系统需要的星上资源较少,结构简单,成本较低,可以广泛应用在空间预警、空间攻防等领域。

fect of space environment on working life of solid-lubricated rotating parts [J]. *Opt. Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3264-3271. (in Chinese)

[5] 上官爱红, 张昊苏, 王晨洁, 等. 空间二维运动机构的热真空准加速寿命试验设计[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2016, 46(1): 186-192.

SHANGGUAN A H, ZHANG H S, WANG C J, et al. Design of thermal vacuum quasi-accelerated life test for space two-axis gimbal[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2016, 46(1): 186-192. (in Chinese)

[6] 代守军, 何兵, 周军, 等. 高功率散热技术及高功率光纤激光放大器[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 18-23.

DAI S J, HE B, ZHOU J, et al. Cooling technology of high-power and high-power fiber laser amplifier[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(5): 18-23. (in Chinese)

[7] 陈立恒, 徐抒岩. 高分辨率空间相机电控箱热设计

[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 69-76.

CHEN L H, XU SH Y. Thermal design of electric cabinet for high-resolution space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 69-76. (in Chinese)

- [8] 郭亮, 吴清文, 颜昌翔, 等. 光谱成像仪 CCD 组件的稳态/瞬态热分析与验证[J]. 光学精密工程,

2010, 18(11): 2375-2383.

GUO L, WU Q W, YAN CH X, *et al.* Thermal analysis and verification of CCD components in spectral imagers at steady and transient states[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2375-2383. (in Chinese)

作者简介:



上官爱红(1981—),女,河南三门峡人,博士,高级工程师,2019年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事空间光电载荷总体技术、激光传输与测量装置总体技术、空间载荷热控制技术等方面的研究。E-mail: xiner@opt.ac.cn

通讯作者:



张昊苏(1985—),男,陕西西安人,博士,高级工程师,2020年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事空间光学结构设计力学仿真、高精度空间运动机构结构设计及力学仿真等方面的研究。E-mail: zhanghaosu@opt.ac.cn