

文章编号 2097-1842(2023)02-0390-09

机载宽温域 CO₂ 激光器温控方法

赵紫云^{1,2}, 张阔^{1*}, 周峰³, 陈飞¹, 何洋¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国人民解放军 96035 部队, 吉林 吉林 132101)

摘要:机载激光雷达是实现远距离大气精准监测的重要手段, CO₂ 激光器工作谱段与部分大气污染物和化学物质吸收谱一致, 是大气监测激光雷达的重要光源。面向机载要求, 在控制体积重量的条件下实现-40 °C~55 °C 宽温域工作是机载 CO₂ 激光器温控系统的设计难点。因此, 本文提出一种以激光器性能和环境温度为设计输入, 半导体热电制冷与强制风冷相结合的闭环温控方法。根据激光器、半导体热电制冷和强制风冷等的结构与传热特性, 建立温控方法的有限元模型, 基于此模型对激光器温控性能进行研究。对于 55 °C 高温环境, 温控系统工作 25 min 后, 激光器温度控制在 40 °C; 对于 -40 °C 低温环境, 温控系统在工作 20 min 后, 激光器温度控制在 25 °C, 满足激光器正常工作要求。根据激光器及建立的温控方法, 开展高低温环境下激光器工作能力实验研究, 采集实验过程中的激光器温度数据, 测量高低温条件下激光输出能力。实验结果表明: 实测激光器温度与有限元仿真温度数据基本吻合, 两者误差小于 10%; 采用所提出的温控方法, 激光器在高低温条件下可以正常工作, 输出功率与室温条件下一致。

关键词: CO₂ 激光器; 宽温域; 半导体热电制冷; 散热结构; 温控方法

中图分类号: TN248.2 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0089

Temperature control method of CO₂ laser operating in airborne wide temperature range

ZHAO Zi-yun^{1,2}, ZHANG Kuo^{1*}, ZHOU Feng³, CHEN Fei¹, HE Yang¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. No. 96035 Troop, the Chinese People's Liberation Army, Jilin 132101, China)
* Corresponding author, E-mail: cole_fx@163.com

Abstract: Airborne lidar is an important means to achieve long-range accurate atmospheric monitoring. Its laser wavelength is consistent with the absorption spectrum of most atmospheric pollutants and chemical substances, which makes it an important laser source for airborne lidar. However, it is difficult to design a temperature control system for airborne CO₂ lasers to work in the -40 °C~55 °C temperature range under the

收稿日期: 2022-04-30; 修订日期: 2022-05-31

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(No. 2018YFE0203201); 国家自然科学基金项目(No. 61904178)

Supported by National Key Research and Development Program (No. 2018YFE0203201); National Natural Science Foundation of China (No. 61904178)

controlled volume and weight conditions. In this paper, we propose a temperature closed-loop control method, in which the laser characteristic and environment temperature are used as input, and a thermo electric cooler and forced air cooling are combined. According to the structure and heat transfer characteristics of the laser, the thermo-electric cooler and the level of forced air cooling, the finite element model of temperature control method is established to optimize the temperature control performance of the laser. In a high temperature environment of 55 °C, the temperature of the laser is controlled at 40 °C after the temperature control system operates for 25 min. In a low temperature environment of -40 °C, the laser temperature is controlled at 25 °C after the temperature control system operates for 20 minutes, which meets the normal working requirements of the laser. According to the laser and the established temperature control method, the experimental research on the working ability of the laser in high and low temperature environment is carried out, the temperature data of the laser in the experimental process is collected, and the laser output power is measured under high and low temperature conditions. The experimental results show that the experimental measured temperature data is consistent with the finite element simulation results and the error between them is less than 10%. The laser using the proposed temperature control method can work steadily, and the output power of the laser is consistent with that of the laser at room temperature.

Key words: CO₂ laser; wide temperature range; thermo-electric cooler; heat dissipation structure; temperature control method

1 引言

CO₂ 激光器工作在 9~11 μm 的长波红外波段, 与部分大气污染物和化学物质的特征吸收谱一致^[1-4], 可同时输出较高的平均功率和峰值功率, 是用于大气污染监测的激光雷达的理想光源。机载大气监测激光雷达具有探测距离远, 灵活机动性强的特点, 已成为大气监测的重要手段。机载宽温域环境对激光器的稳定工作能力提出了严苛挑战。因此, 亟需开展小型轻质的激光器温控技术研究。在高温环境下, 有效降低环境和激光器运行产生的废热的影响, 避免激光器温度过高而导致激光波长漂移、输出功率降低或激光器失效^[5-6]; 在低温环境下, 通过精准温控使激光器温度上升至正常工作范围, 与环境形成动态平衡。

温度是影响激光器性能的重要因素, 散热技术是激光器领域的研究重点。散热技术随精密加工、材料、制冷器件等技术的发展而不断发展。基于微通道和多孔结构的冷却技术可降低换热器热阻、提高导热系数^[7-8]。吴胤祺等^[9]用高热导率碳化硅材料制作过渡热沉, 用于 C-mount 封装的

半导体激光器散热结构, 获得了更好的散热效果。然而, 目前的散热方式存在散热设备体积较大, 温度控制范围窄, 无法快速将热量散出等问题, 不适于机载等对体积有严苛限制的使用环境。近些年, 半导体热电制冷 (Thermo Electric Cooler, TEC) 技术发展迅速, 并应用于激光器散热领域, 在保证散热效果的同时显著提高了激光器的功率体积比^[10-12]。利用仿真分析方法可表征激光器的能量耗散过程, 为激光器散热提供了设计支撑^[13-16]。但是, 设计激光器温控系统时需要综合考虑激光器、使用环境和温控器件的性能, 特别是温控器件能力随环境温度发生改变, 会导致激光器温控能力不足, 甚至使激光器不能正常工作。

因此, 本文针对高功率 CO₂ 激光器宽温域稳定工作问题, 提出一种包含激光器工作性能-TEC 温控能力-环境温度-散热结构的闭环激光器温度控制方法。该方法将激光器的光机特性作为输入条件, 以不同环境温度下 TEC 温控特性为节点, 优化激光器散热结构, 建立激光器温度分布与散热结构换热能力的关系, 采用有限元方法分析宽温域环境下激光器系统的温度特性。搭建实验平台模拟机载温度环境, 测试激光器温度与输出功率水平, 验证本文所提出的温控方法的有效性。

2 高功率 CO₂ 激光器及温控方法

大气监测需要使用具备高峰值功率的激光光源,其结构如图 1 所示。其中:波导 CO₂ 激光器通过射频激励产生高平均功率的激光;通过 Q 开关形成高峰值功率的脉冲激光;光栅安装于高精度旋转台上,通过旋转台使光栅发生转动,进行波长选支。波导 CO₂ 激光器是 CO₂ 激光输出的核心,其使用温度要求为 0 °C~40 °C,与机载-40 °C~55 °C 的工作范围不一致。因此,本文针对机载温度要求,开展 CO₂ 激光器温控方法研究,并分析激光器的温度特性。

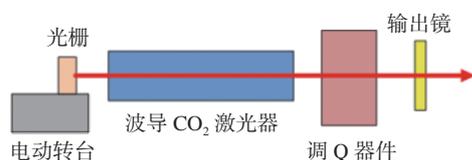


图 1 高峰值功率 CO₂ 激光器

Fig. 1 CO₂ laser with high peak power

根据大气污染物的探测需求,波导 CO₂ 激光器的平均输出功率为 15 W。根据激光器结构和散热量,设计了一套基于 TEC 主动温控与强制风冷的 CO₂ 激光器温控方法(图 2)。该方法将 TEC 通过导热硅脂紧密粘贴于激光器侧壁,TEC 另一端与散热翅片区域紧密连接,散热翅片上方安装风扇。当激光器处于高温环境时,TEC 紧贴激光器侧壁的表面为冷端,工作时冷端温度维持在低于环境温度水平。在温差驱动下,使得激光器热量经由接触表面传递至 TEC。为维持 TEC 冷端的工作温度,TEC 产生的热量需要及时传递至热端。热端采用强制对流冷却的方法,通过与热端

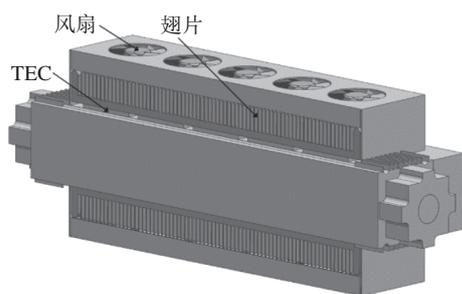


图 2 CO₂ 激光器温控结构

Fig. 2 Temperature control structure of CO₂ laser

接触的散热翅片设计,增加散热面积,提高散热效率。通过设置 TEC 的数量、排布方式与冷端温度,结合散热结构优化设计,保证 TEC 的制冷能力,从而确保激光器在高温环境下正常工作。对于处在低温环境的激光器,则通过改变 TEC 的电流方向,使其与激光器紧密连接的一端温度高于激光器温度,使热量由 TEC 传递至激光器,以保证激光器在低温环境下正常工作。

3 激光器温控模型

3.1 激光器温控理论模型

根据激光温控方法,建立包含激光器、TEC、散热翅片和风扇的温控模型。模型包含两个过程:一是环境与激光器运行产生的热量传导至 TEC,二是散热翅片与风扇和空气构成热对流,对 TEC 热端进行散热。以上两过程通过 TEC 进行耦合,通过传热与流场的耦合计算,可以确定满足激光器工作要求的 TEC、风扇和散热翅片的关键参数。

CO₂ 激光器利用电能对工作介质放电。工作时,约有 85% 的电能转换为热能,需要通过机箱散除。激光器电源作为主要产热元件,设激光器工作时产生的热量为 Q ,此热量作为激光器箱体热传导的热源,通过方程(1)来计算激光器箱体温度 T_L 的分布。

$$\rho_L C_{PL} \frac{\partial T_L}{\partial \tau} = \nabla \cdot (k_L \nabla T_L) + Q \quad (1)$$

式中: ρ_L 表示激光器箱体材料的密度, C_{PL} 表示箱体材料的比热容, τ 表示时间, K_L 表示箱体材料的导热系数。

对 TEC 热端进行对流换热时,在风扇的作用下,空气在散热翅片构成的区域处于强制对流状态。根据雷诺数方程 $Re = \rho_a \mu d / \nu$,结合激光器两侧散热器的结构判断空气的流动状态,雷诺方程中 μ 、 ρ_a 、 ν 分别为流体的流速、密度与黏性系数, d 为特征长度,取值同风扇进风口直径。对于本方法的散热结构, $\rho_a = 1.29 \text{ kg/m}^3$, $d = 0.047 \text{ m}$, $\mu = 17.9 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。计算表明当风扇速度大于 1.18 m/s 时,激光器散热区域形成的流场处于湍流状态。由于 $k-\varepsilon$ 湍流模型具有很好的鲁棒性、经济性和对大范围湍流的合理预测,选择 $k-\varepsilon$ 湍流模型模

拟该区域的空气流动。激光器强制对流散热的热对流平衡方程可用式(2)表示:

$$\rho_a C_{pa} \mathbf{U} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_a \nabla T) + Q_h \quad (2)$$

式(2)中, \mathbf{U} 表示空气在不同方向上的流动矢量, ρ_a 、 C_{pa} 和 k_a 分别为激光器外部空气的密度、比热容和导热系数, Q_h 示在激光器两侧空气流动区域里 TEC 热端的发热量, 与 TEC 温控能力有关。

$$Q_h = N + Q_c \quad (3)$$

Q_h 在数值上等于 TEC 工作时所输入的电功率 N 与冷端的制冷量 Q_c 之和。而 TEC 冷端制冷量 Q_c 与激光器工作产生的热量和激光器工作的环境温度有关, 为使激光器整体温度场均匀, 在激光器箱体两个侧面各等间距排布 5 片 TEC, 它们同时工作, 以对激光器进行温控。

环境温度对激光器的影响体现在激光器与空气之间的对流换热, 可以表示为:

$$-k_b \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = h(T_b - T_a) \quad (4)$$

其中, 激光器箱体与空气进行自然对流换热, 根据工程经验, 换热系数 $h=9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

至此, 以 TEC 为节点, 建立了基于 TEC 与强制风冷的 CO₂ 激光器温控系统的理论模型。

3.2 激光器温控有限元仿真模型

为分析本系统对 CO₂ 激光器的温控效果, 本文采用 COMSOL 有限元分析软件建立有限元模型进行数值求解, 并根据激光器使用环境确定 TEC 参数, 以 TEC 性能确定风扇转速、散热翅片结构等关键参数。CO₂ 激光器温控有限元模型如图 3 所示。

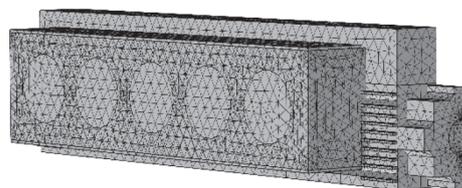


图3 CO₂激光器温控有限元模型

Fig. 3 Finite element model of CO₂ laser

对系统几何模型进行合理简化, 去掉倒角、螺栓孔等对散热影响微小的细节结构特征。根据激光器结构对称性, 采用对称计算以减小计算量。

与理论模型一致, 有限元仿真也分两个步骤:

第一步对激光器散热结构进行对流换热仿真, 分析在 TEC 电流不变时, 能否把 TEC 热端产生的热量及时散除, 使 TEC 热端维持在一个稳定的温度, 即使 TEC 输出所要求的制冷量, 从而使 TEC 冷端达到所要求的温度; 第二步在 TEC 制冷量达到要求时对激光器箱体进行热传导仿真, 计算激光器箱体的温度分布, 分析 TEC 对激光器温控效能是否满足激光器正常工作要求。

TEC 是仿真分析的关键环节。TEC 工作时热端温度需要高于环境温度, 根据 TEC 性能曲线和激光器正常工作的温度范围, 当冷端温度控制在 40 °C, 热端温度达到 70 °C, $\Delta T=30 \text{ °C}$, 此时, 冷端制冷量 $Q_c=14 \text{ W}$ 对应的热端散热量 $Q_h=27 \text{ W}$ 。

在仿真过程中, 对 TEC 与激光器和散热翅片的连接方式进行精细处理。在实际使用时, 为提高导热效率, TEC 与 CO₂ 激光器、TEC 与散热翅片之间涂有导热脂。在有限元仿真中, 在对应的热接触边界条件中根据导热脂参数创建热阻。

4 高低温环境激光器温控能力仿真研究

4.1 散热结构能力分析与参数优化设计

对流换热过程考核风扇与散热翅片构成的散热结构对 TEC 热端热量的散除能力。散热结构有限元模型如图 4 所示。对风扇的处理采用 COMSOL 软件传热模块中共轭传热物理场的入口边界条件, 设置风速大小。网格划分采用自由四面体网格, 大小设置为细化, 在靠近壁面的部分采用边界层, 网格单元数为 175 672。

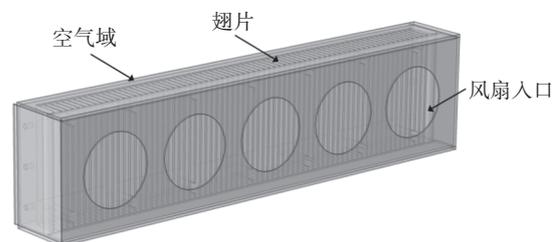


图4 散热结构模型

Fig. 4 Heat-dissipating structure model

设计散热器之前, 首先根据公式(5)对所需散热面积进行计算。

$$F = \frac{Q_h}{\alpha \Delta T_s} \quad (5)$$

式中: F 为散热器换热总表面积, ΔT_s 为散热器与环境之间的温差, α 为散热器与环境的换热系数。估算得散热面积为 0.225 m^2 , 由于激光器能容纳散热器的大小确定, 散热结构初始模型的翅片厚度与翅片间距分别取 1.2 mm 与 5 mm , 由 57 片相同的翅片构成, 翅片的材料为 Aluminum 6063-T83, 其导热系数为 $201 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 空气状态为实际气体。首先, 在散热翅片间距为 5 mm 的条件下, 对比分析不同转速风扇对流换热效果的影响。分别选择 10 只型号为 LFS0524FH 的轴流风扇, 额定转速为 $6400 \text{ r}/\text{min}$; 型号为 DC0402812W2B 的轴流风扇, 额定转速为 $23000 \text{ r}/\text{min}$, 计算不同转速下风扇形成的散热翅片区域温度分布, 如图 5 (彩图见期刊电子版) 所示。

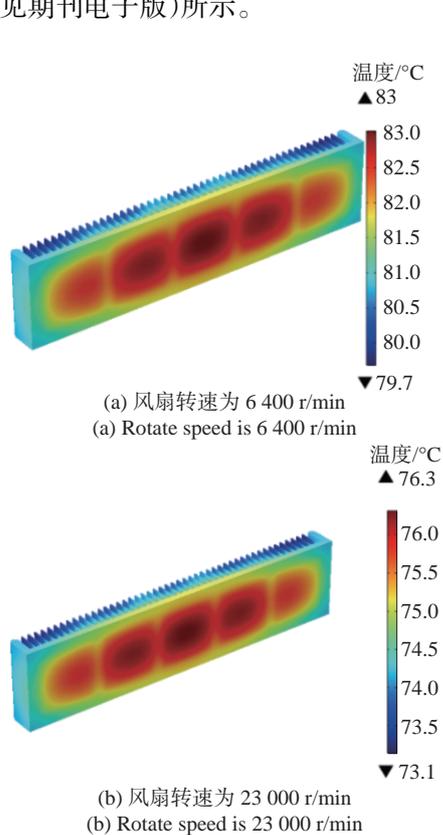


图 5 散热翅片间距为 5 mm 时, 不同转速风扇形成的对流换热区域温度分布

Fig. 5 Temperature distributions of convection heat transfer region formed by fans at different rotate speeds when the cooling fin spacing is 5 mm

由图 5 可知, 散热翅片的最高温度出现在与 TEC 热端接触位置, 此温度可表征 TEC 的热端温度, 提高风扇转速可以降低散热翅片的温度。但是, 当散热翅片间距为 5 mm 时, 本文所用两种参数的风扇均不能使 TEC 热端温度降低至 $70 \text{ }^\circ\text{C}$

以下, 这表明 TEC 热端温度高于正常工作的许用温度, 此时, TEC 不能正常工作。

因此, 将散热翅片间距减小至 3 mm , 增加对流换热面积。对应两种型号的风扇获得的散热翅片温度分布如图 6 (彩图见期刊电子版) 所示。此工况下, 当风扇转速为 $6400 \text{ r}/\text{min}$ 时, TEC 热端最高温度为 $76.6 \text{ }^\circ\text{C}$, 不满足 TEC 正常工作要求; 当风扇转速为 $23000 \text{ r}/\text{min}$ 时, TEC 热端最高温度为 $69.8 \text{ }^\circ\text{C}$, 满足正常工作要求。根据仿真分析结果, 最终选取型号为 DC0402812W2B 的轴流风扇, 额定转速为 $23000 \text{ r}/\text{min}$, 散热结构中翅片厚度设定为 1.2 mm , 翅片间距设定为 3 mm , 翅片数目为 70 个。

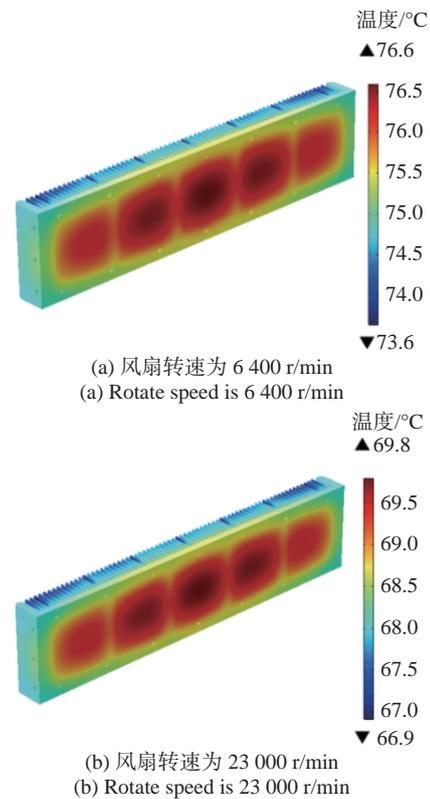


图 6 散热翅片间距为 3 mm 时, 不同转速风扇形成的对流换热区域温度分布

Fig. 6 Temperature distributions of convection heat transfer region formed by fans at different rotate speeds when the cooling fin spacing is 3 mm

4.2 高温环境下激光器温控能力分析

在 TEC 热端温度满足所需条件下, 仿真分析高温环境下激光器与 TEC 的热传导过程, 得到平衡状态下激光器三维温度分布如图 7 (彩图见期刊电子版) 所示。由于 TEC 安装在激光器的放电谐振区域, 使得激光器放电谐振区域温度与 TEC

冷端温度基本一致,降低至 40 °C。激光器放电谐振区域与电源等区域存在一定的温差,温差范围约 1.7 °C。

为表征激光器温度随时间的变化关系,考虑后续实验时温度传感器的安装可行性,选取激光器箱体壁面靠近 TEC 的节点作为监测点,位置如图 7 所示。为避免损伤激光器,激光器自身温度需要先降低至允许范围,然后再打开激光器,产生废热。根据此过程开展激光器温度非稳态仿真分析,分析 30 min 内激光器的温度变化,前 10 s 的时间步长设为 0.1 s,之后的时间步长设为 1 s,最大迭代收敛次数为 10000 次,获得该点温度随时间变化的关系,如图 8 所示。结果表明,处于高温环境下的激光器需要 25 min 使温度由 55 °C 下降至 40 °C,然后打开激光器,激光器工作并产生热量,箱体温度呈现先下降,后上升的趋势,最高温度为 40.5 °C,4 分钟后稳定在 40 °C,满足激光器正常工作温度要求。

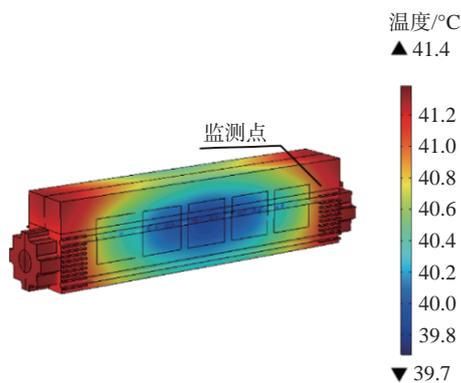


图 7 高温环境下,基于温控制冷的激光器温度分布
Fig. 7 Temperature distribution of laser based on temperature control cooling in high temperature environment

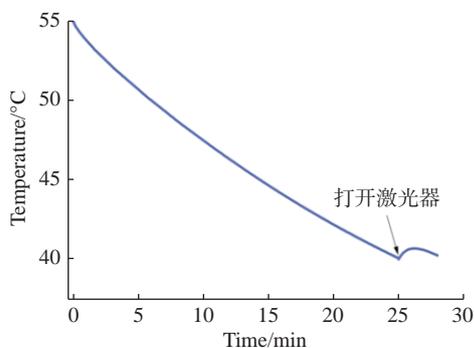


图 8 高温环境下,激光器表面监测点温度随时间变化
Fig. 8 Temperature of the monitoring point on the laser surface changing with time in high temperature environment

4.3 低温环境下激光器温控能力分析

针对机载应用的激光器面临低温环境,需要将激光器加热至预置温度以满足正常工作要求。本文提出的温控方法中选择 TEC 作为温控元件,通反向电流可对激光器进行加热,根据 TEC 性能,当电流为 5 A 时,其热端热量为 60 W,计算当电流可得到激光器温度分布,如图 9(彩图见期刊电子版)所示。由于 TEC 安装在激光器的放电谐振区域,使得激光器放电谐振区域温度上升至 25 °C,激光器系统温差范围约 1.9 °C。

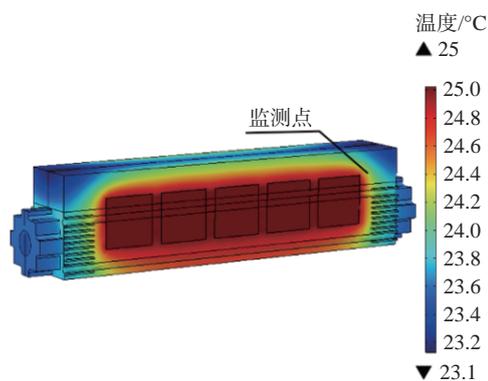


图 9 低温环境下,基于温控加热的激光器温度分布
Fig. 9 Temperature distribution of laser based on temperature control heating in low temperature environment

加热过程中,激光器监测点温度随时间变化情况如图 10 所示。结果表明,低温环境下,激光器需要约 20 min 使温度上升至 25 °C,此时打开激光器,激光器工作并产生热量,箱体温度呈现先上升,后下降的趋势,最高温度为 25.7 °C,5 min 后稳定在 25 °C。

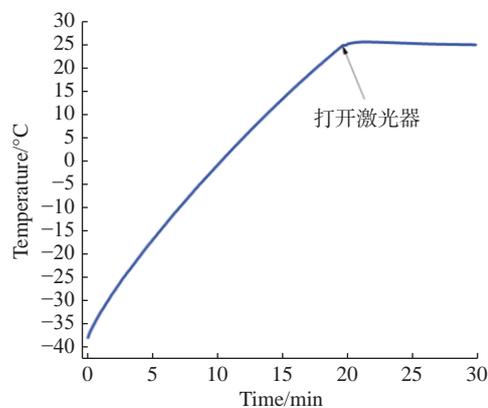


图 10 低温环境下,激光器表面监测点温度随时间变化
Fig. 10 Temperature of the monitoring point on the laser surface changing with time in low temperature environment

5 高低温环境激光器温控能力实验研究

根据所设计的激光器温控方法,搭建 CO₂ 激光器高低温实验平台(如图 11 所示),开展激光器温控能力实验研究。激光器安装于高低温试验箱内,通过调节试验箱温度模拟机载高低温环境,通过安装在激光器箱体侧壁的温度传感器采集实验过程激光器温度数据,温度传感器型号为 DS18B20,测量精度为 ± 0.05 °C。调节激光器高度使其出口对准试验箱光学窗口,光学窗口外安装功率计用于测量高低温条件下激光器的输出能力。



图 11 CO₂ 激光器高低温实验平台

Fig. 11 High and low temperature experimental setup for CO₂ laser

高温环境下的激光器温控性能测试实验过程如下:首先,将试验箱温度设定为 55 °C,激光器在此温度下静止,直至温度传感器显示的激光器温度与环境温度一致;然后,启动温控系统,通过温度传感器采集激光器温度数据;最后,当温度传感器显示激光器温度降低至工作范围后,启动激光器电源,激光器输出激光,并记录此过程中激光器温度的变化。

实验采集的激光器温度数据如图 12 所示。当温控系统工作 25 min 后,激光器箱体温度下降至 39.5 °C;此时,打开激光器电源,激光器开始输出激光。在激光器输出激光过程中,激光器温度呈现先上升、后下降的趋势,最高温度为 40.2 °C,4 min 后稳定在 39.5 °C。

由图 12 可知,高温环境实验测量的激光器温度变化与仿真计算基本一致。激光器稳态工作后,采用方差计算激光器的温度稳定性。计算得出高温环境下激光器稳态工作后 5 min 内激

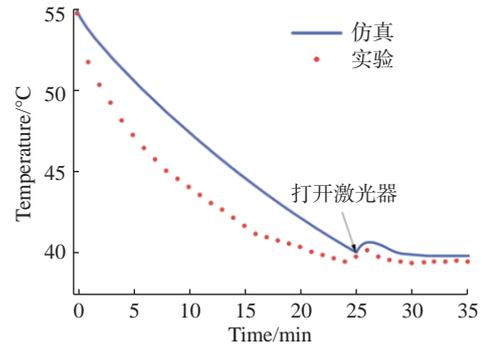


图 12 高温环境下实验测量温度数据与仿真结果对比

Fig. 12 Comparison of the measured temperature and the simulation data in high temperature environment

光器温度稳定性为 0.7%。由于激光器出光后产生废热使激光器监测点的温度分布更均匀,所以在 25 min 后激光器监测点温度仿真数据与实验数据误差较小。

低温环境下激光器的温控能力实验过程与高温实验一致,试验箱温度设定为 -40 °C。实验采集的激光器温度数据如图 13 所示。当温控系统工作 20 min 后,激光器箱体温度上升至 25 °C;此时,打开激光器电源,激光器开始输出激光。在激光器输出激光过程中,激光器温度呈现先上升、后下降的趋势,最高温度为 25.7 °C,5 min 后稳定在 25 °C。低温环境实验测量的激光器温度变化与仿真计算结果基本一致。激光器稳态工作后,采用方差计算激光器温度的稳定性。计算得出低温环境下激光器稳态工作后 5 min 内激光器温度稳定性为 0.4%。同理,由于激光器出光后产生废

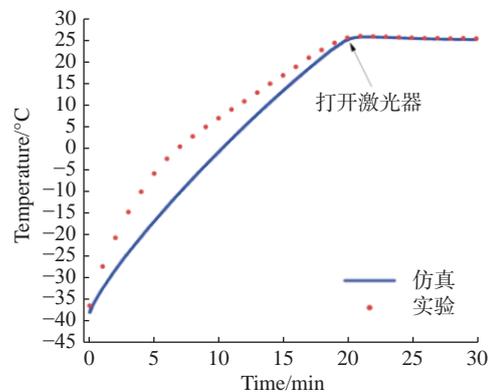


图 13 低温环境下实验测量温度数据与仿真结果对比

Fig. 13 Comparison of the measured temperature and the simulation data in the low temperature environment

热使激光器监测点的温度分布更均匀,所以在20 min后激光器监测点温度仿真数据与实验数据误差较小。

将激光器分别设置为70%输出和100%输出,在相同工况下采集10个功率数据,对比高低温条件下与实验室温度下的输出能力。当激光器70%输出时,高温条件下的平均功率为10.7 W,低温条件下的平均功率为10.2 W,实验室温度下激光器输出功率为10.5 W。当激光器100%输出时,高温条件下的平均功率为13.8 W,低温条件下的平均功率为14 W,实验室温度下激光器输出功率为14.7 W。结合此激光器功率10%的不稳定度,表明高低温条件下激光器输出功率与实验室条件一致。

通过温度与输出激光功率的对比分析可知,在高低温条件下,实验与仿真所得的激光器箱体温度变化趋势相同,温度误差在10%以内;实验测量得到的激光功率在激光器功率稳定度范围内。由此证明本文所建立的温控模型可以有效反映激光器的温控过程,所提出的温控方法可使激光器在机载宽温域条件下稳定工作。

参考文献:

- [1] 潘其坤,俞航航,陈飞,等.声光偏转快调谐脉冲CO₂激光器实验研究[J].中国光学,2019,12(2):355-361.
PAN Q K, YU H H, CHEN F, et al.. Experimental research on acousto-optic deflection rapid tuning pulsed CO₂ lasers[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 355-361. (in Chinese)
- [2] 郑义军,朱子任,谭荣清,等.双光路快速调谐脉冲CO₂激光器[J].红外与激光工程,2020,49(1):0105001.
ZHENG Y J, ZHU Z R, TAN R Q, et al.. Rapidly tuned pulsed CO₂ Laser with dual optical path[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0105001. (in Chinese)
- [3] 谭荣清,万重怡,吴谨,等.高重复频率可调谐TEA CO₂激光研究[J].中国激光,2005,32(6):739-742.
TAN R Q, WAN CH Y, WU J, et al.. Investigation on tunable high repetition rate TEA CO₂ laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(6): 739-742. (in Chinese)
- [4] 吴世松,张合勇,王挺峰,等.基于透射式非稳腔的单纵模TEA CO₂激光器[J].光学精密工程,2018,26(2):293-299.
WU SH S, ZHANG H Y, WANG T F, et al.. Single longitudinal mode TEA CO₂ laser based on transmissive unstable resonator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(2): 293-299. (in Chinese)
- [5] WU F P, XIE X Y, LI SH P. A thermal dissipation design method for LED array structure illumination[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 670-684.
- [6] 全伟,李光慧,陈熙,等.一体化半导体激光器的ANSYS热仿真及结构设计[J].光学精密工程,2016,24(5):1080-1086.
QUAN W, LI G H, CHEN X, et al.. Structural design and ANSYS thermal simulation for semiconductor laser system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(5): 1080-1086. (in Chinese)
- [7] APOLLONOV V V, DERZHAVIN S I, FILONENKO V A, et al.. Highly efficient heat exchangers for laser diode arrays[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 3889: 71-81.
- [8] 杨波,高松信,刘军,等.高功率二极管激光器喷雾冷却实验研究[J].强激光与粒子束,2014,26(7):071001.

6 结 论

针对机载宽温域稳定工作要求,开展了CO₂激光器温控方法与温度特性研究。提出了一种基于激光器工作性能-TEC温控能力-环境温度-散热结构的闭环温度控制方法。该方法以TEC为节点,以环境温度为边界条件,将系统散热过程分为激光器导热与散热结构对流换热两部分,两过程通过TEC耦合实现对CO₂激光器的温度控制。采用有限元方法对激光器温控过程进行分析,依据TEC工作性能迭代优化散热结构,确定高低温环境下激光器的温控特性。根据机载温度要求,结合温控方法,搭建CO₂激光器高低温实验平台,采集高低温条件下的激光器温度,并与仿真温度分布进行对比,结果表明所建立的温控模型可以有效反映高低温环境下激光器的温度特性;通过采集高低温条件下的激光器输出功率,并与实验室温度下激光器输出功率做对比,证明本文提出的温控方法可以使CO₂激光器满足-40℃~55℃的宽温域稳定工作的要求。

- YANG B, GAO S X, LIU J, *et al.*. Spray cooling of high power diode laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(7): 071001. (in Chinese)
- [9] 吴胤祺, 柳祎, 高全宝, 等. 碳化硅过渡热沉对C-mount封装激光器散热的影响[J]. 中国科技论文, 2019, 14(12): 1362-1368.
WU Y ZH, LIU Y, GAO Q B, *et al.*. Effect of silicon carbide transition heat sink on heat dissipation of C-mount package laser[J]. *China Sciencepaper*, 2019, 14(12): 1362-1368. (in Chinese)
- [10] 张龙, 陈建生, 高静, 等. 大功率半导体激光器驱动电源及温控系统设计[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 1005003.
ZHANG L, CHEN J SH, GAO J, *et al.*. Design of driving power and temperature control system for high power semiconductor laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1005003. (in Chinese)
- [11] 张志军, 刘云, 付喜宏, 等. 百瓦级半导体激光器模块的风冷散热系统分析[J]. 发光学报, 2012, 33(2): 187-191.
ZHANG ZH J, LIU Y, FU X H, *et al.*. Analysis of air-cooled heat system in hundred-watt level semiconductor laser module[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 33(2): 187-191. (in Chinese)
- [12] 张阔, 于德洋, 何洋, 等. 紧凑型中红外固体激光器散热性能分析[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0301002.
ZHANG K, YU D Y, HE Y, *et al.*. Analysis on cooling performance of compact mid-infrared solid state laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 0301002. (in Chinese)
- [13] ZHANG W, SHEN L M, YANG Y X, *et al.*. Thermal management for a micro semiconductor laser based on thermoelectric cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 90: 664-673.
- [14] 刘玉华. RF激励全金属CO₂波导激光器散热系统的设计[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2013, 43(3): 400-402.
LIU Y H. Devising of an inner hydro-cooling circulation system of RF-excited the all metal CO₂ waveguide laser[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2013, 43(3): 400-402. (in Chinese)
- [15] 陆培华, 王润文. 高功率CO₂激光器热平衡分析及热交换器换热计算[J]. 中国激光, 2001, 28(9): 775-778.
LU P H, WANG R W. Heat balance analysis of high power CO₂ laser and calculation to the heat exchanger[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, 28(9): 775-778. (in Chinese)
- [16] 李岩, 张艺轩, 纳全鑫, 等. Tm: YLF激光器温度场分布计算与实验[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 0506001.
LI Y, ZHANG Y X, NA Q X, *et al.*. Temperature distribution calculation and experiments of Tm: YLF laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0506001. (in Chinese)

作者简介:



赵紫云(1996—), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事高功率激光器方面的研究。E-mail: ziyizix@163.com



张阔(1984—), 男, 辽宁阜新人, 博士, 副研究员, 2012年于吉林大学获得博士学位, 主要从事高功率激光及激光应用技术研究。E-mail: cole_fx@163.com