

文章编号: 1001-3806(2002)03-0198-03

天基激光器的排热方案研究

李明海 任建勋 宋耀祖 梁新刚 过增元

(清华大学工程力学系,北京,100084)

摘要: 天基激光器运行过程中产生的大量废热需要排散,采用传统的热泵、单相或两相流体排热回路以及消耗性冷却剂等热控技术会使整个热管理系统质量、体积或功耗过大。以系统的轻量化和紧凑性为指标,对辐射冷却-冰蓄冷组合排热方案用于天基激光器的可行性进行了研究,结果表明,该方案能满足激光器废热排放要求,可大大减轻热控系统的质量和体积,说明它在未来天基激光器热管理中具有相当的应用潜力。

关键词: 热管理;激光武器;辐射冷却;冰蓄冷;航天器

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A

Schemes of heat rejection for a space-based laser

Li Minghai, Ren Jianxun, Song Yaozu, Liang Xingang, Guo Zengyuan

(Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract: A great deal of waste heat from a space-based laser must be rejected to outer space environment. Conventional thermal control systems such as heat pump, single phase or two phase pumped fluid loops or expendable water vaporizer are not very well suited for heat rejection requirements due to excessive mass, value and/or power consumption. A feasibility study on an integrated radiate cooling system with ice storage for the thermal management of a space-based laser is assessed on the basis of compact and lightweight. The analytical results show that the integrated scheme can meet the waste heat rejection requirements and greatly reduce the total mass and volume of the thermal management system, and show its promising prospects in future space-based lasers' thermal management systems.

Key words: thermal management; laser weapon; radiate cooling; ice storage; spacecraft

引 言

随着卫星及星座的有效应用,远程精确制导武器的出现,已使现代战争从陆、海、空三维战争发展成陆、海、空、天与信息战的五维战争形式。在“海湾战争”和“科索沃战争”中,大量卫星密布战地上空,成为侦察与指挥、信息处理与通信、导航与定位、打击效果评估的战争系统中枢。卫星如此重要,但其自身防卫能力极差,也就成为整个战争机器中最致命的薄弱环节。激光武器以光速攻击目标的独特性能受到各国的充分重视,如美、俄等国在过去几年里相继开展了地基和机载激光反卫星武器的研制,并考虑在未来几年开展有关天基全球精确光学武器或空间中继激光武器系统的研究^[1]。

天基激光器是以空间为基地,也就是发射一个

“空间平台”,将符合要求的激光器及相关子系统安装于该平台,与陆基系统相比,它不仅有效避免了激光传输过程中的大气损耗效应,而且可居高临下对敌方发射的导弹予以摧毁,或在近距离对敌方卫星实施打击,从而大大降低了目标捕获跟踪系统的复杂性。

作为天基激光平台的一个子系统,热管理系统对提高激光器的可靠性和运行效率至关重要,开展有关激光介质热效应和空间环境下激光整机最佳热控制方案的研究是发展空间激光武器事业的一个重要环节。

1 天基激光器热管理方案评述

天基激光器通常采用高效能的二极管泵浦固体激光器,它由一系列功能独立的子系统组成,主要的子系统有:激光本体系统、热管理系统和电源系统。其中热管理系统按功能结构又分为内部集热回路和外部排热回路。对外部排热回路而言,由于天基激光平台所处的工作环境是真空,故不存在传导或对

作者简介:李明海,男,1970年3月出生。博士研究生。目前主要从事航天器热控制和激光器热效应方向的研究课题。

收稿日期:2001-04-13;**收到修改稿日期:**2001-06-19

流形式的散热。因此,可供利用的终端排热方式只有两种:(1)从外表面将热量辐射到宇宙空间的热辐射器;(2)消耗性冷却剂。由于消耗性冷却剂带来重量增加的问题,对长期在轨运行的激光器而言,一般不考虑采用这种排热方式。因此,在设计激光器的热管理方案时,如何将激光器所产生的废热有效地排放到太空环境中,这就涉及到热管理内回路与辐射器之间需采用何种耦合方式以保证废热的高效传输和排放。

1.1 泵驱动单相流体/两相流体回路热控系统

目前,在航天器热控技术中被广泛采纳的单相液体/两相流体热控回路通常由内回路和辐射器回路(外回路)两部分组成(如图 1 所示),它原则上仍适用于天基激光器热管理系统,不足之处在于辐射器面积过大。该回路的工作流程是:内回路流体吸收来自激光本体系统、供电系统等处的废热,通过中间热交换器传输给外回路的工质,然后经辐射器排放至宇宙空间。

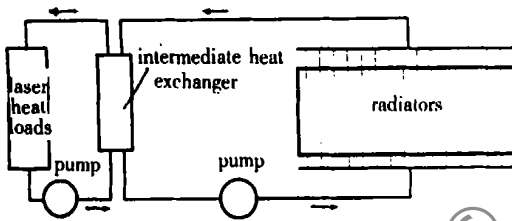


Fig. 1 Schematic diagram of single-phase/ two-phase fluid loop thermal control system

单相和两相流体回路的区别在于外回路流体工质是否发生相变。对单相冷却回路而言,其优点在于安全可靠,设计和试验较简易,因此,现有载人航天器的热控系统设计均为单相冷却回路^[2]。两相回路利用工质的潜热进行热量的传输,与前者相比,其优点在于可减少外回路工质的充灌量和泵驱动功率,并有效降低流体传输过程的温降;缺点是它尚不如单相回路成熟可靠,其中主要问题在于目前还不能妥善解决两相混合物的有效分离、不溶气体捕集以及两相介质在微重力环境下的流动传热特性等技术问题^[2~3],要将其应用于激光器热控系统中,尚需在安全性设计方面作深入研究。

1.2 热泵回路热控系统

与单相流体/两相流体回路相比,热泵回路是在中间换热器与辐射器之间用压缩机和节流装置取代了对应的液体泵部件(如图 2 所示)。热泵热控回路的突出优点在于能大大提高流经辐射器的流体温度,因而能达到强化辐射器排热能力和降低辐射器

面积及重量的目的。但由于热泵本身具有制冷效率,因而它会带来整个电源系统重量的增加^[2,4],同时,辐射器除了排散来自激光器系统的废热外,还须排散附加的热泵自身功耗。因此,对天基激光器而言,热泵回路不是一种最佳选择,从定性上考虑,尚不如单相流体回路。

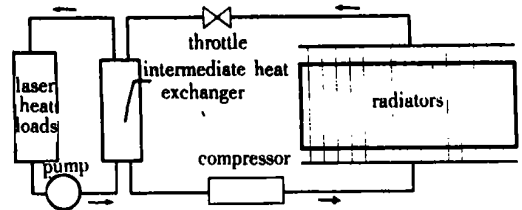


Fig. 2 Schematic diagram of heat pump loop thermal control system

因此,对大功率激光器而言,采用常规的单相或两相流体回路会令辐射器面积和重量过大,采用热泵回路虽然能较大幅度提高辐射器的排热能力,但需消耗系统有限的电力资源。结合天基激光器的工作性能指标(受空间供电系统所限,1kW 激光器持续工作时间通常不超过 1h),笔者首次提出辐射冷却-蓄冷组合热控方案的设想,对该热控方案的可行性进行分析时,按空间系统的轻量化设计要求,拟通过与单相流体回路的比较,并以系统的质量和体积参数作为评判系统优劣的依据。

2 辐射冷却-冰蓄冷组合热控方案

2.1 运行模式

辐射冷却-冰蓄冷组合方案的工作原理如图 3 所示:通过设计一块较小面积的辐射器,在激光器未工作时,一定流量的外部回路流体在泵驱动下沿外回路 1 2 3 4 1 作循环流动,当流经辐射器时,

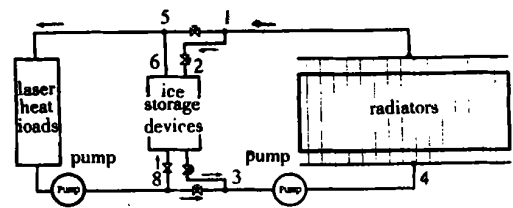


Fig. 3 Schematic diagram of the integrated radiate cooling system with ice storage

由于辐射致冷,出口流体温度降低,当经过蓄冰器时,流体将冷量传输给蓄冰器中的蓄冷介质,如此反复循环,当循环历经一段周期后,蓄冰器中的水便可全部凝结为冰;激光器正式启动后,内回路中的流体吸收来自激光器的废热,在节点 8 处分为两路,一部分沿 8 3 4 1 5 路径流经空间辐射器放出热量,另一部分则沿 8 6 5 路径流经蓄冰装置吸收

流量,两路流体在节点5处汇合后继续回到舱内重复废热的收集和传输。由于此组合热控方案可借助储冰来达到减少辐射器面积的目的,因而大大降低了激光器排热系统的质量。

2.2 可行性分析

2.2.1 理论计算依据

(1) 辐射器排热能力 沿辐射器管流方向的流体温度与辐射器单位面积排热能力 q_r 的关系式为:

$$d[G C_p T]/dz = - q_r \tag{1}$$

$$q_r = S_{width} (T^4 - T_s^4) \tag{2}$$

式中, q_r 为辐射器单位管长所传输的热负荷, W/m; G 为传热流体的质量流率, kg/s; S_{width} 为辐射器辐射面有效宽度, m; T 为辐射器管内流体温度。对单相流体回路而言,考虑激光器正常工作所需的温度和传热温差等因素,其进口温度取 300 K,出口温度则取 290 K;对蓄冷装置蓄冷过程,考虑冰蓄冷的需要,辐射器进口温度取 270 K,出口温度则取 260 K。 T_s 为辐射器空间等效热沉温度,对运行在 300km ~ 600km 高度的轨道范围内的航天器而言,通常在 180 K 至 230 K 范围内^[5],计算按 210 K 取值,为 S-B 辐射常数 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$, 和 分别为辐射器表面发射率和肋面效率,分别取 0.9 和 0.85。

(2) 单相液体回路热控系统质量构成

$$G_{liquidloop} = m_{rad} \cdot A_{liquid} \tag{3}$$

式中, m_{rad} 为辐射器单位面积重量, 11 kg/m^2 ^[11]; A_{liquid} 为辐射器面积, m^2 ; 其值等于: $A_{liquid} = N \cdot z \cdot S_{width}$; 其中 N 为微元段数,其值满足如下关联式:

$$\sum_{i=1}^N q_r^i \cdot z = Q_{reject}, Q_{reject}$$
 为激光整机系统的废热排放量,按 9000W 进行计算(按激光器平均输出功率 1000W,电-光转换效率 10% 折算得到该废热排放值)。

(3) 辐射冷却-蓄冷组合热控系统的质量构成:

$$G_{cool} = m_{rad} \cdot A_{cool} + k \cdot Q_{reject} \cdot t \tag{4}$$

式中, A_{cool} 为预先设定的辐射器面积, m^2 ; k 为贮藏 1J 冷量所需的贮冰器重量(包括介质和容器),按 $0.45 \text{ e} - 5 \text{ kg/J}$ 进行折算。 t 为激光器持续工作时间,本计算按 3600s 取值。

(4) 蓄冷装置的充冷周期 在辐射冷却-蓄冷组合方案中,另一个重要指标是蓄冷装置的充冷时间,蓄冷装置的充冷时间受多种因素影响,其中主要有辐射器面积、辐射器入口流体温度和以及入口流体的质量流率。辐射器面积越大,则系统充冷速率愈

快,但由此会带来整个系统重量的增加;提高辐射器入口流体温度能提高辐射器单位辐射面积的排热能力,但过高的辐射器入口温度也会带来蓄冷装置内部传热温差的降低,从而影响蓄冷装置的蓄冷速率。笔者仅就辐射器面积对蓄冷装置的充冷周期进行分析,其它因素的影响有待今后作进一步的研究。

2.2.2 计算结果讨论 当激光器废热排放量为 9000W 时,采用单相流体热控回路所对应的空间辐射器散热面积大小为 40.46 m^2 ,对应的辐射器重量约 445kg(如图 4 所示)。因此,对天基激光器而言,按单相流体热控回路所设计的辐射器面积和重量相对于整个激光器平台而言显得过大,给整个排热系统的空间结构布局设计带来一定的困难。

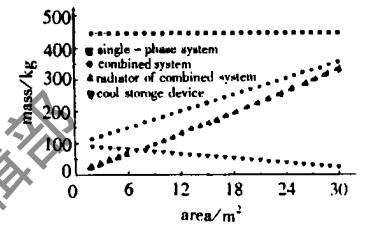


Fig. 4 Effect of area of radiator on mass of heat rejection system

对辐射冷却-冰蓄冷组合热控方案而言,以激光器持续工作 60min 计算,全部用冰释冷方式实现废热排放要求仅需冰 96kg,蓄冰器所占的体积仅 0.1 m^3 左右,故无论从系统的质量还是体积考虑,均要较传统的单相流体回路优越许多。从图 5 可以看

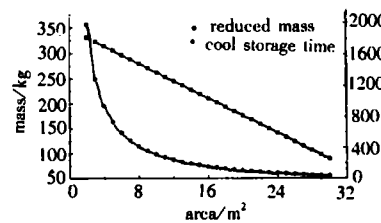


Fig. 5 Effect of area of radiator on mass of heat rejection system and time of

出,所设计的辐射器面积越小,组合热控方案的轻量化效果就愈佳,但由此也会造成蓄冰器充冷时间的延长。例如,当辐射器面积为 8 m^2 时,组合系统质量要较单相流体回路的质量节省 280kg,降幅约 63%,而实现再充冷的时间约 419min;当辐射器面积提高到 30 m^2 时,组合系统可节省质量 90kg,降幅约 20%,所对应充冷时间则缩短至 36min。因此,采用辐射冷却-蓄冷组合热控方案可大大减小热控系统的质量和体积,激光器两次持续工作期间所允许的间断时间越长,则辐射器面积可设计得越小,从而系统轻量化效果就愈显著。

3 结论
 与单相流体回路相比,辐射冷却-蓄冷组合方案具有将冷量储存至激光器工作时再予以释放的特

透膜,通过调整 OPO 输出镜透过率,得到稳定的单脉冲 1.57 μm OPO 激光输出。器件结构如图 2 所示,器件实物(外形尺寸 260mm \times 86mm \times 86mm)见图 3。

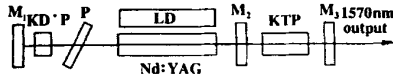


Fig. 2 Experimental layout of 1.57 μm all solid state eye-safe OPO laser

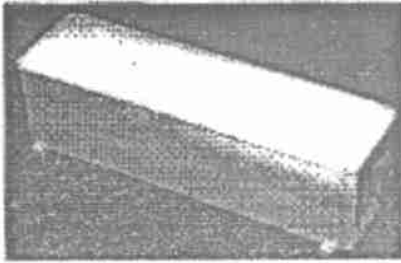


Fig. 3 1.57 μm all solid state eye-safe OPO laser

M_1, M_3 两镜构成 Nd:YAG 的 1.06 μm 波长的激光谐振腔, M_2, M_3 两镜构成 1.57 μm 波长的 OPO 激光谐振腔,其中 M_1 对 1.06 μm 波长高反, M_2 对 1.06 μm 波长增透、对 1.57 μm 波长高反, M_3 对 1.06 μm 波长高反、对 1.57 μm 波长透过率为 30%。

在 QCW 二极管工作电压为 48.5V、脉宽 200 μs 、电流 60A 时,测得全固态 1.57 μm OPO 器件输出能量达 15mJ/pulse,脉宽 \sim 7ns,重复频率 20Hz,总效率为 2.6%。

用 WDG-30 光栅单色仪测量该全固态 OPO 输出波长为 1573nm。图 4 为测得的 1.57 μm 信号光输出波形,可看出输出为单脉冲。

高效率 1.57 μm 全固态 OPO 激光器的技术关键,一是如何抑制多脉冲获得单脉冲信号光;二是既要获得高的 OPO 转换效率,同时又要采取措施避免

腔内光损伤。我们通过选择合适的 OPO 激光器输出镜透过率和适当的泵浦能量及脉宽,来控制泵浦源和 OPO 腔内的功率密度在一个恰当的水平,远低于晶体及模式的损伤阈值,从而获得高效率、稳定的单脉冲 1.57 μm OPO 激光输出。

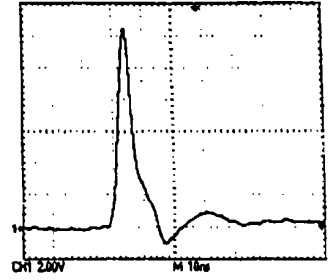


Fig. 4 1.57 μm OPO laser pulse shape

3 结束语

我们用 3 只国产准连续 600W 二极管泵浦 Nd:YAG 激光器取代传统闪光灯 Nd:YAG 激光器,研制出了结构紧凑、高效全固态 1.57 μm 人眼安全 OPO 激光器,其输出能量达 15mJ/pulse,脉宽 \sim 7ns,重复频率 20Hz。与灯泵同类器件相比,激光器效率提高约 5~10 倍,光束质量也有一定改善。今后,全固态 1.57 μm 人眼安全 OPO 激光器可进一步提高输出能量和重复频率,将具有更广泛的应用前景。

在此,向北京半导体所肖建伟等同志提供国产大功率准连续二极管表示感谢!

参 考 文 献

- [1] Marshall L R, Kasinski J, Burnham R L. Opt Lett, 1991, 16(21): 1680~1682.
- [2] Badunsky M B. Laser Focus World, 1995, 31(10): 107~116.
- [3] Koehner W. Solid-State Laser Engineering. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1996.
- [4] Debuisschert T, Raffy J, Pocholle J P et al. J O S A, 1996, B13(7): 1569~1587.

(上接第 200 页)

点,因而有效解决了按单相流体回路排热所带来的辐射器面积和重量过大的缺点,表明其在天基激光器热管理系统中具有相当的应用潜力。

参 考 文 献

- [1] 李清源. 导弹与航天技术, 2000, (2).

- [2] 闵桂荣, 郭舜. 航天器热控制. 2 版, 北京: 科学出版社, 1998.
- [3] Chang W S, Hager B G. Advanced two-phase thermal management in spacecraft. Presented by 25th Intersociety Energy Conversion Conference, 1990.
- [4] Ernst Messerschmid, Reinhold Bertrand. Space station: systems and utilization. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1999.
- [5] John A O, Harold R H. Space station heat rejection subsystem radiator assembly design and development. SAE951651.