

机载激光武器热管理系统研究

高光波, 韩林森

(航空工业中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

[摘要] 配备激光武器是下一代军用飞机的典型标志之一。激光武器将电能转换为激光的效率仅为 10%~20%, 导致激光武器工作周期内热载荷达到 10^6W 量级。在短时间内要将如此大的热量实时消散所需的冷却系统十分庞大, 这与机载设备的体积重量要求相矛盾。讨论了未来机载激光武器热管理解决方案及其可能采用的技术, 如相变储能技术、环路热管技术、强化换热技术等。通过分析认为, 相变储热技术的应用能够有效应对高功率激光器热流对机载热管理系统的冲击, 是飞机热管理系统未来发展的一种必然趋势。

关键词: 相变储能; 相变材料; 热管; 激光武器; 机载; 热管理系统

Study on Thermal Management of Airborne Laser Weapon

GAO Guangbo, HAN Linsen

(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] Laser weapon is thought to be a sign of next generation fighter plane. The heat produced by laser during working cycle has reached a level as high as 10^6W , while electric-photovoltaic conversion of laser weapon was only 10%~20%. A bulky cooling equipment will be needed to clear the heat off, which can't meet the strict standard of bulk and weight on plane. This topic discussed several projects to solve the problem, such as phase change energy storage technology, loop heat pipe technology and enhanced heat transfer technology. It is concluded that the application of phase change storage technology can effectively deal with the impact of high power laser heat flux on airborne thermal management system, and it is an inevitable trend of the development of aircraft thermal management system.

Keywords: Thermal energy storage; Phase change material; Heat pipe; Laser weapon; Airborne; Thermal management system

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.07.093

新一代军机在巡航速度、隐身性能等方面大幅提升, 并将配备以高性能雷达、激光武器为代表的大功率光电设备, 以提高其生存与战斗能力。飞机的高速巡航与隐身要求, 限制了冲压空气的使用, 机载热管理系统只能利用有限的机载热沉为设备提供冷却通道, 新一代飞机将面临大功率热载荷急剧增加而散热条件变差的矛盾^[1-2]。

相变储热技术在太阳能利用、电力削峰填谷、余热回收及建筑材料等领域已经推广使用, 在航天器领域应用实例也较多。相变材料具有等温相变、相变潜热大等特性, 将相变材料热存储技术应用于机载热管理系统, 在热载荷与飞机终端热沉之间提供热缓冲及存储, 可有效缓解大功率机载激光武器热载荷对机载热管理系统的冲击^[3]。

考虑到机载激光武器具有工作时间短以及瞬时生成大量废热等特点, 其热管理系统适合使用相变储能技术, 即在激光武器工作时, 将其产生的瞬时峰值热载荷

通过某种传热方式全部或部分存储到相变材料中, 然后在整个飞行任务阶段通过蒸发循环系统、空气循环系统或直接采用冲压空气将热量传递到大气中。

1 储能热管理结构方案

针对机载激光武器热特性, 对于热管理系统提出 3 种相变储热方案。方案 1 的系统工作原理(见图 1)为: 相变换热器作为系统的核心部件, 在大功率激光热沉与机载热沉之间起到储热、换热、温控及缓冲大热流量对机载热管理系统冲击的作用, 相变换热器通过两套热管回路实现热量传递、交换。热管回路 1 将激光器产生热量传递给相变换热器, 相变材料吸收热量, 保证设备在最佳环境中工作, 相变换热器为热管回路 1 的冷凝器。

热管回路 2 的冷凝器为机体热沉, 当机体热沉温度低于相变材料相变温度时, 相变材料释放热量并通过热管回路传递给机体热沉, 相变材料由液态变为固态。热管回路 2 中设有截止阀, 当飞机超音速飞行, 机体热沉

温度高于相变材料相变温度时,截止阀关闭,发热设备产生的热量存储在相变材料中。

方案2(见图2)与方案1的主要区别是其与机载热管理系统产生交联,热管回路2的冷凝器热沉是冲压空气、机载燃油或蒸发冷却回路换热器。由于激光武器系统的瞬时、周期工作特性,可以将热管回路2散热功率设计较小,工作周期内设备产生热量由相变材料吸收,非工作周期内再通过热管回路2将相变材料中存储的热量缓慢释放到机载热沉中。

方案3是以上两种方案的结合,图3是该系统工作原理图,当机体热沉温度低于相变材料相变温度时,相变材料释放热量并通过热管回路传递给机体热沉,相变材料由液态变为固态。热管回路2中设有旁通阀,当飞机超音速飞行,机体表面温度高于相变材料相变温度时,通过旁通阀将热管回路2与机载热管理系统产生交联,相变材料放热被飞机热沉吸收。

2 强化换热技术

相变换热器主要由高温均温基板、低温均温基板、热管阵列、强化散热翅片、绝热层及复合相变材料组成。高温均温基板与热管回路1相连,是热管回路1的冷凝

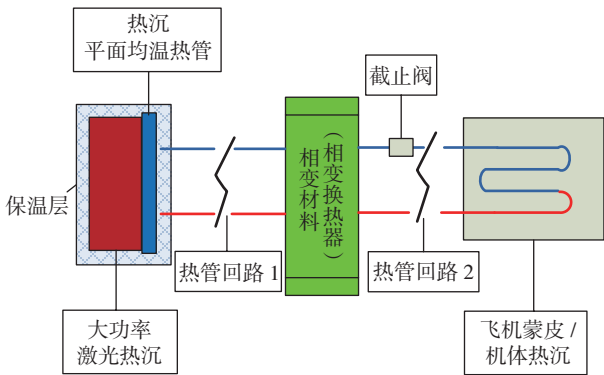


图1 方案1系统原理图

Fig.1 Schematic of project 1

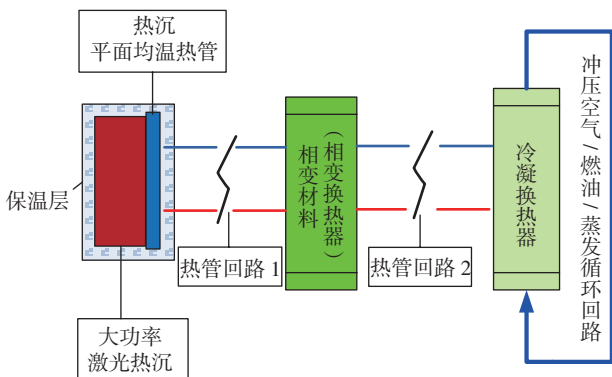


图2 方案2系统原理图

Fig.2 Schematic of project 2

端;低温均温基板与热管回路2相连,是热管回路2的蒸发端。两个基板上均布置热管与强化散热翅片的组合阵列,换热器外部做绝热设计。大功率发热设备工作周期内产生的热量通过热管回路1、高温均温基板、热管阵列及强化散热翅片被复合相变材料吸收、存储,相变材料发生固-液相变。热管回路2的冷凝器为飞机机翼内蒙皮或其他机载热沉,相变材料热量通过强化散热翅片、热管阵列及低温均温基板最终被热管回路2冷凝端吸收,相变材料发生液-固相变。图4与图5分别为相变换热器与高温均温基板结构示意图。

3 环路热管技术

热管回路采用环路热管技术,功率高热流密度发热设备已超过常规的空气强制对流换热的散热极限,需要采用具有更强散热性能的强制散热手段,如液体循环冷却、微通道冷却、喷雾冷却等,而这些散热方法均需用泵作为动力源,系统大而复杂,而且有些技术尚不成熟,大部分机载电子产品受空间限制无法采用^[4]。传统热管

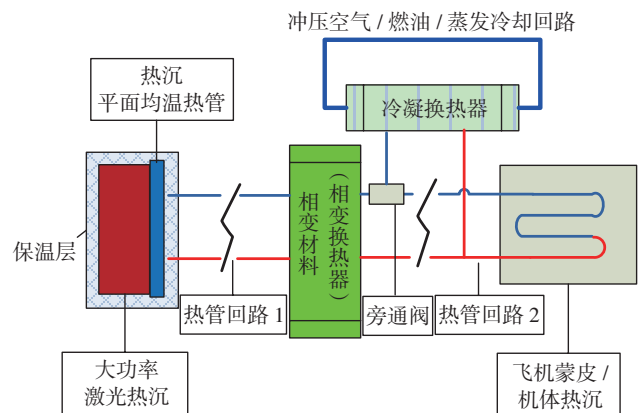


图3 方案3系统原理图

Fig.3 Schematic of project 3

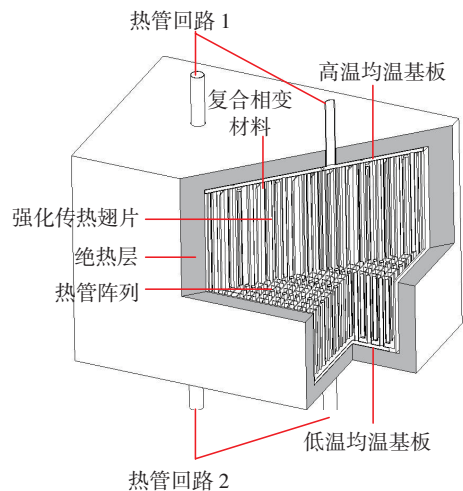


图4 相变换热器结构示意图

Fig.4 Structure of phase-change heat exchanger

具有极低的热阻,可实现几乎零温差的传热,但其具有传热功率小、受安装角度及传送距离限制等缺点。环路热管分为蒸发端与冷凝端,两端分别与蒸气流道和液体流通道组成环路,蒸发端吸收热量,冷媒蒸发为气体,并在内部结构毛细作用和表面张力的作用下产生压力差,使蒸气流动至冷凝端冷凝为液体,释放热量后回流至蒸发端。环路热管克服了传统热管缺点,具有受重力影响小、传热性与等温性好、可长距离传送等优点,是解决高热流密度电子设备热控问题的有效途径之一^[5]。图6为环路热管原理图。

(1)热管回路1方案。该方案原理如图7所示。热管回路1蒸发端为均温平板热沉,均温平板热沉吸收高功率激光器热量,环路热管回路的运行靠平板热沉内部结构产生的毛细力驱动,利用冷媒的蒸发和冷凝传递热量,热管回路的平板热沉内部设计为高性能的毛细结构,与之相连的液体补偿室处于毛细结果上方,共同封装在平板热沉内;热管回路1的冷凝端为相变换热器的高温均温基板;蒸发端与冷凝端之间由蒸气管线和液体管线相连接,蒸气管路和液体管路是流阻较小且易于弯曲的细长光管,使得蒸发器与冷凝器可以相距较远且灵

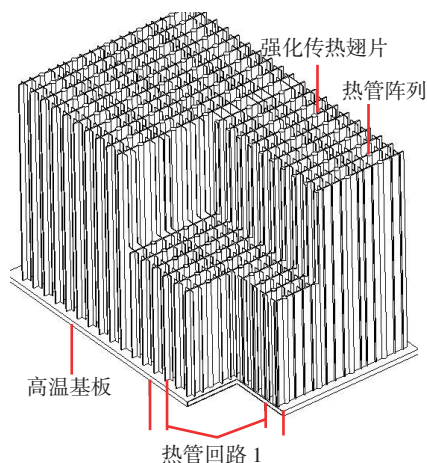


图5 高温均温基板结构示意图
Fig.5 Structure of high-uniform temperature plate

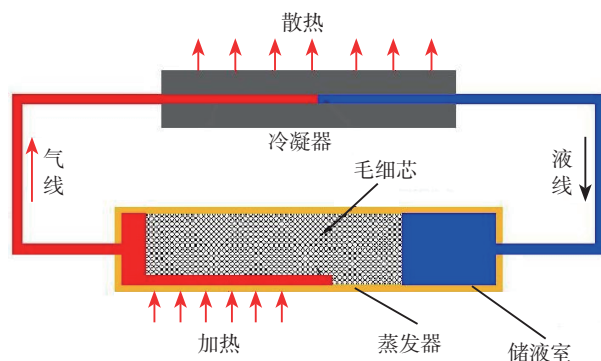


图6 环路热管原理图
Fig.6 Schematic of loop heat pipe

活布置^[6]。过冷液体冷媒由冷凝器通过液体回流管路被预热到饱和状态;然后进入补偿室,被均匀地分配到毛细芯表面;饱和液体冷媒径向流过毛细芯并被加热到一定过热度,在毛细芯外表面吸收发热设备的散热而蒸发,并通过蒸气槽进入气线管路,最终通过冷凝端释放热量。

(2)热管回路2方案。该方案原理(图8),热管回路2工作原理与热管回路1类似,其蒸发端为相变换热器中的低温均温基板,冷凝端为机体热沉或燃油回路换热器等其他飞机热沉。

(3)热管回路方案优点。机载高热流密度设备冷却采用环路热管这一冷却技术有以下优势:首先,环路热管具有较高的传热效率,它能够在很小的温差上通过较小的传热断面传递大量热量;其次,环路热管可长距离传递热量,细长弯管可做成柔性管道,不受几何形状和物理约束,因此环路热管作为机载设备与热沉之间热的传递回路,不会占用太多的机舱内空间;第三,环路热管无需动力设备驱动,结构设计灵活^[7-9]。

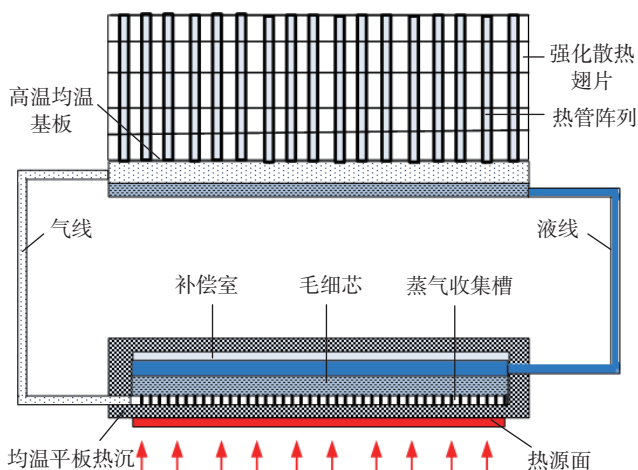


图7 热管回路1方案原理图
Fig.7 Schematic of heat pipe circuit 1

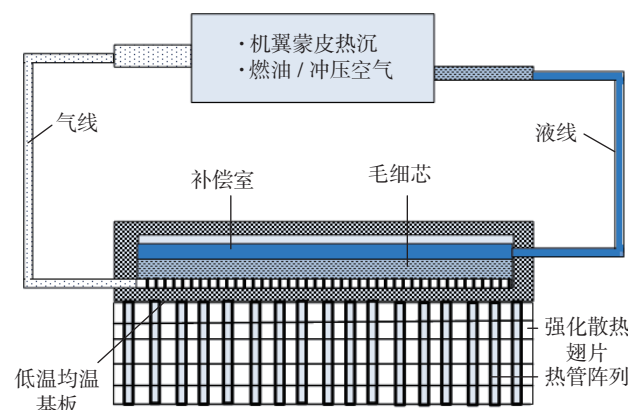


图8 热管回路2方案原理图
Fig.8 Schematic of heat pipe circuit 2

4 相变储能技术

4.1 相变材料

相变材料在储能、热控系统中已得到广泛应用,现有的相变材料的种类大致可分为有机相变材料、无机相变材料及两者混合而成的混合类相变材料。

相变材料的种类较多,且均具有各自的优缺点,在具体应用时,需要根据具体应用背景选取适合的材料。适用于航空领域大功率器件热管理应用的相变材料应遵循以下原则:相变温度合适(50~100℃)、潜热高、比热高、热导率高、环境适应性好、相变体积变化小、相变过程可逆、过冷度小、化学稳定性好、无腐蚀作用、无毒性、不易燃烧、无爆炸性等。

石蜡类相变材料以其良好的综合性能被广泛采用。将石蜡类相变材料应用于航空航天领域的储能与热控是近年来国内外研究的热点,在材料封装、导热性能改善等方面取得了丰硕成果,并已成功应用^[10-11]。

4.2 相变材料强化导热方案

提高相变材料导热性能的通常做法是将相变材料与高导热率材料进行复合,制备复合相变材料以提高整体的导热能力。添加的材料一般为石墨、碳纤维等碳基材料及金属片、金属蜂窝、泡沫金属等金属结构。

石墨材料导热性和吸附性较好,被广泛用于相变材料以提高热导率和封装性能。研究表明,在石蜡中加入膨胀石墨可以使其热导率显著提高,若在石蜡中加入3%(质量分数)的膨胀石墨可使材料热导率提高4倍以上。此外,在石蜡中加入粒径80μm的铅粉末对石蜡导热性能的改善也较显著,研究表明复合材料的热导率随着铅粉末含量的增加而上升,当铅粉末的质量分数为0.5%时,完全相变的时间比纯石蜡缩小了60%。由于具有重量轻、热导率高和吸收能量强的特点,将蜂窝结构复合相变材料应用于电子元器件的散热及航空航天领域近年来得到越来越多的重视。

5 结论

随着先进飞机技术的发展,因大量配备高负荷设备而带来的冷却载荷需求急剧增加的问题越来越突出。如何有效利用有限的机载热沉,已经成为未来飞机热管理系统发展的研究重点之一。相变材料储热技术的应用,可有效解决大功率激光器大功率器件热流对机载热管理系统的冲击,材料的定温相变特性也可应用于有温控要求的大功率发热器件,该技术在下一代飞机热管理系统中的应用是一种必然的发展趋势。开展相变材料储能技术在大功率高热流密度发热设备热管理中的应用研究,可为该技术在下一代战机热管理系统中的应用奠定技术基础。

参考文献

- [1] 罗志会,李胜全,黄纯洲.下一代飞机热管理技术的研究热点[J].航空科学技术,2015,26(8):6-12.
LUO Zhihui, LI Shengquan, HUANG Chunzhou. Highlights of next generation aircraft thermal management technology[J]. Aeronautical Science and Technology, 2015, 26(8): 6-12.
- [2] 王文龙,王伟.下一代战斗机综合环境控制/热管理系统开发现状[J].飞机设计,2004(1):74-76.
WANG Wenlong, WANG Wei. Development of integrated environmental control system/thermal management system for next generation fighter aircraft[J]. Aircraft Design, 2004(1): 74-76.
- [3] 谢标.复合相变材料储能及热控理论和试验研究[D].合肥:中国科学技术大学,2016.
XIE Biao. Theoretical and experimental study on energy storage and thermal control with composite phase change materials[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- [4] 苏向辉.航空电子设备冷却用环路热管冷凝器热沉分析[J].航空动力学报,2010,25(9):1942-1947.
SU Xianghui. Analysis of heat sink for rejected condenser heat of loop heat pipes for cooling avionics[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(9): 1942-1947.
- [5] 胡丽华,钟志珊,赵杰.热管散热模组在机载电子设备热设计中的应用[J].航空电子技术,2014,45(2):36-42.
HU Lihua, ZHONG Zhishan, ZHAO Jie. Application of thermal pipe module in airborne electronics design[J]. Avionics Technology, 2014, 45(2): 36-42.
- [6] 赵国昌,路天栋,宋丽萍,等.热管在机载电子设备冷却中的应用分析[J].沈阳航空航天大学学报,2013,30(5):1-4.
ZHAO Guochang, LU Tiandong, SONG Liping, et al. Analysis on the application of heat-pipe in cooling airborne electronic equipment[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2013, 30(5): 1-4.
- [7] 杨帆,董德平,刘成志.回路热管工作温度控制方式[J].航天器工程,2010,19(2):41-45.
YANG Fan, DONG Deping, LIU Chengzhi. Active control of the operation temperature in a loop heat pipe[J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19(2): 41-45.
- [8] 康芹,郭建利.热管换热器的应用[J].机械管理开发,2010,25(5):60-62.
KANG Qin, GUO Jianli. Application of heat pipe heat exchanger[J]. Mechanical Management and Development, 2010, 25(5): 60-62.
- [9] 赵忠超,周根明,陈育平,等.环路热管理论研究进展[J].江苏科技大学学报(自然科学版),2009,23(5):416-420.
ZHAO Zhongchao, ZHOU Genming, CHEN Yuping, et al. Progress in loop heat pipe theory[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2009, 23(5): 416-420.
- [10] KARNI Y, KLUMEL G, LEVY M, et al. Active cooling solutions for high power laser diodes stacks[J]. Proceedings of the SPIE, 2007, 6876: 6876041-6876049.
- [11] AGOSTINI B. State of the art of high heat flux cooling technologies[J]. Heat Transfer Engineering, 2007, 28(4): 258-281.

通讯作者:高光波,硕士、高级工程师,研究方向为光学精密结构设计、热管理系统设计,E-mail:157627757@qq.com。(责编 逸飞)