

文章编号: 2095-4980(2019)04-0661-05

高功率微波装置散热热沉传热流动特性

潘 瑶, 刘 欣

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘 要: 高功率微波装置在运行时面临的高热流密度散热是当前热控必须解决的难题。微小通道热沉散热结构简单, 换热能力突出, 在一定程度上能够解决高热流密度散热的问题。但使用微小通道热沉散热时, 散热面温度在沿工质流动方向不断升高, 这对器件稳定运行不利。而射流冲击技术中流体垂直于热源喷射, 温度边界层薄, 温度梯度大, 换热效果强。将射流冲击技术与微通道热沉相结合, 不仅能提高换热系数, 增大换热量, 而且能实现良好的温度均匀性。对高热流密度下射流冲击微小通道热沉进行数值模拟, 分析不同射流孔径对其传热和流动特性的影响。结果表明, 增大远离出口处的射流孔径, 有利于提高传热效率和减小流动阻力。优化后的射流微通道热沉, 在质量流量为 14 g/s 时, 换热系数接近 $39\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

关键词: 高功率微波技术; 微通道热沉; 射流冲击; 数值计算; 传热特性

中图分类号: TN015

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201904.0661

Heat transfer and flow characteristics of heat sink in high power microwave devices

PAN Yao, LIU Xin

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: How to dissipate heat effectively is the important topic for high power microwave devices. The conventional straight micro-channel heat sink which has been considered as an effective heat removal tool has the attributes of simple structure, large convective heat transfer coefficient and high surface area to volume ratio. But the increase of temperature of the dissipating surface along the direction of the fluid flow will influence the stability of electronic components. For jet impingements, the way to obtain a quite uniform temperature distribution is the use of matrix of jets, which has thinner temperature boundary, higher temperature gradient and larger heat exchange coefficient by fluid perpendicular impinging cooled object. The micro-channel heat sink combined with jet impingement not only has large heat exchange coefficient but also improves the temperature uniformity of the cooled object. In this paper, performance of micro-channel heat sink combined with jet impingement for high heat flux density cooling is simulated with numerical method. The effects of different jet apertures on the heat transfer and flow characteristics are analyzed. The results show that increasing the pore size away from the exit is beneficial to increase the heat transfer efficiency and reduce the flow resistance. The optimized heat transfer coefficient of the micro-channel heat sink combined with jet impingement is closed to $39\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, when the mass flow rate is 14 g/s.

Keywords: high power microwave technology; micro-channel heat sink; jet impingement; numerical simulation; heat transfer characteristics

高功率微波在国家安全、社会生活等方面重要性日益增强, 是电子战的一次技术革命^[1-2]。随着微波装置不断发展, 其峰值功率、工作频率不断提高^[3], 但由于能量转换效率较低, 绝大部分能量转换为热量。而微波装置的逐步实用化发展中, 其进一步向小型化、高集成度的方向发展^[4], 导致高功率微波装置运行过程中, 部分位置单位面积产生的热流急速提升, 收集极上的平均热流密度达到或超过 $100\sim 1\,000\text{ W}/\text{cm}^2$, 远超过一般电子器件

10 W/cm^2 以内的热流密度。若不将热量及时排散, 局部区域将出现高温, 影响功能器件的工作性能和可靠性, 更严重的情况将导致器件烧毁。

在众多液体散热装置中, 射流冲击散热技术^[5]和微通道散热^[6]技术是其中 2 种散热效果最好的, 能够解决一定程度的散热问题。但二者均有各自的弱点, 射流冲击散热在射流滞止区外的换热能力急剧下降, 导致器件表面温度变化剧烈; 而微通道散热中工质沿流动方向的温度上升较大, 出口附近传热恶化, 器件表面温度升高较大。这些均对散热不利, 若将微通道散热和射流冲击技术相结合, 利用二者的优点弥补各自的弱点, 不仅能提高换热性能, 同时还能改善散热表面的温度均匀性。Hansen 和 Webb^[7]对单孔空气射流冲击 6 种不同微通道热沉的传热特性进行了研究, 能提高射流性能; Zhuang 等^[8]以 FC-72 和油为工质实验, 研究了单个狭缝射流孔与通道结合的散热情况; Sung 和 Mudawar^[9-12]通过实验和模拟的方法, 研究了多种带冲击射流的微通道散热结构的换热特性, 均具有较好的换热性能; Barrau 等^[13]使用混合射流冲击/微通道获得了良好的结果; Husain^[14]评估了用于电子冷却应用的硅基微射流冲击散热器, 并研究了稳定不可压层流下的压降特性。在射流微通道相结合的散热技术中, 射流孔的设计关系到工质在各射流孔中的分配和流动状态, 进而影响射流微通道热沉整体的换热性能。本文对采用不同射流孔径的射流微通道热沉进行数值模拟, 通过分析工质在其中的流动状态, 对比各热沉的换热性能和工质流动过程中的压力损失, 研究不同射流孔径对射流微通道传热与流动性能的影响。

1 计算模型

射流微通道热沉结构如图 1 所示, 工质从热沉顶端的进口进入热沉上部的液体分配腔, 在经过喷射孔分配后喷射到热沉下部的直列微通道内, 吸收热沉底部均匀热源的加热后, 经热沉侧面的出口流出。由于射流微通道热沉中各直列通道和通道上部对应的射流孔结构相同, 其中的传热和流动情况相似, 因此本文选择对其中一个单元(包括直列通道和上方射流孔)进行仿真分析。

图 2 为仿真分析的 2 种射流微通道单元结构示意图, 2 种结构的微通道均长 65 mm, 宽 2 mm, 高 3 mm, 通道侧壁厚 1.5 mm, 通道底面厚 1 mm。两结构的微通道上部均分布有 13 个间距 5 mm, 深 2.5 mm 的射流孔。其中一个结构的射流孔为 13 个直径 0.5 mm 的均匀孔径射流孔; 另一个结构中远离出口的 6 个射流孔直径为 1 mm, 其余射流孔直径为 0.5 mm。热沉的材料为紫铜, 工质为去离子水, 工质由各射流孔喷射进入微通道后, 向微通道出口流动, 带走加载在射流微通道热沉底部的均匀热流。

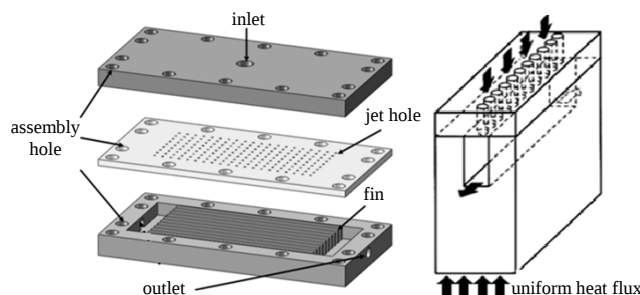


Fig.1 Micro-channel heat sink combined with jet impingement structure diagram
图 1 射流微通道热沉结构模型

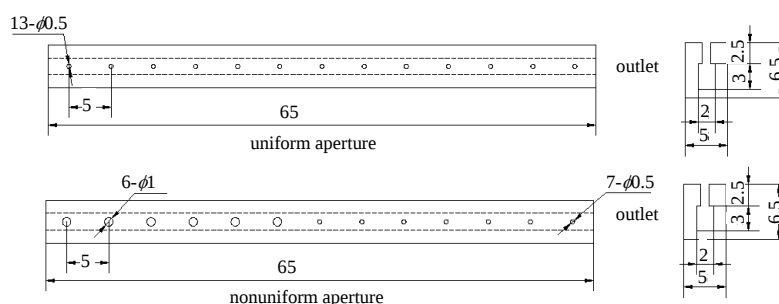


Fig.2 Micro-channel combined with jet impingement unit model
图 2 射流微通道单元计算模型

本文所研究的结构尺寸在毫米量级, 远大于分子的平均自由程, 所以连续性假设依旧成立, 可以用傅里叶导热定律描述导热过程, 工质流动满足 Navier-Stokes 方程。采用 FLUENT 软件求解射流微通道热沉内的流动与传热问题。实验过程中各射流孔的进口总压和温度相同, 考虑数值模拟与试验工况的一致性, 设定各射流孔为压力入口, 温度为 5°C 。微通道一端为压力出口, 另一端为绝热壁面。热沉底部为均匀热流加热, 热流密度为 100 W/cm^2 。其余壁面做绝热处理。计算区域采用六面体网格划分, 在流体中靠近壁面的区域和射流冲击区进行网格局部加密, 并实现网格独立化。在本文的计算范围内流动状态为湍流, 采用适合射流流动计算的重整化群 $k-\varepsilon$ 模型求解流动

方程^[15],采用求解压力耦合方程的半隐算法(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation, SIMPLE),解决速度和压力耦合的问题。其中,射流微通道热沉的换热性能使用平均换热系数 k 表示:

$$q = Q / A = c_p m (T_{out} - T_{in}) / A \quad (1)$$

$$k = \frac{Q}{A(T_w - T_f)} = \frac{q}{(T_w - T_f)} \quad (2)$$

式中: Q 为工质流经热沉吸收的热量; q 为热流密度; A 为热沉底部面积; c_p 为工质比热容; m 为工质质量流量; T_{in} 为工质入口温度; T_{out} 为工质出口温度; T_w 为加热面温度; T_f 为工质平均温度。

2 计算结果分析

2.1 均匀孔径射流微通道热沉流动与换热特性

图3为射流微通道中心截面速度矢量图,从图中可以看出,工质在射流孔中的流动速度垂直于微通道底面,但进入微通道区域后,由于受到微通道中主流的影响,会向微通道出口方向偏转。图4为其中3个射流孔的局部放大图。可以看出,在微通道入口附近,由于通道内流体较少,对射流工质的影响较小,射流工质在微通道流动方向的速度分量较小,射流工质进入微通道后更多的向底部流动。因此,在远离出口位置,由射流工质冲击带来的扰动更强。在射流工质到达微通道底部后,向四周扩散流动,但由于微通道中只有一个出口,在主流的影响下在射流柱远离出口的一侧将出现回流涡,且沿微通道的流动方向漩涡逐渐减小。

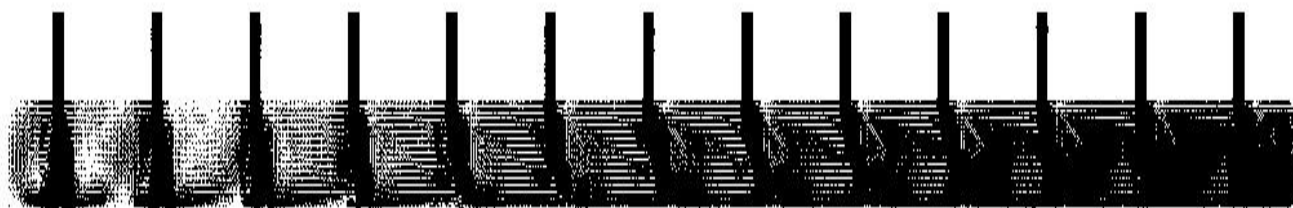


Fig.3 Velocity vector of center section
图3 中心截面速度矢量图

图5为加热热流密度为 100 W/cm^2 、工质入口温度为 5°C 、质量流量为 1.7 g/s 时,加热面的温度云图。从图中可以看出,加热面温度分布较均匀,最高温度为 85.05°C ,最低温度为 82.11°C ,最高温度与最低温度之间相差不超过 3°C ,证明射流微通道相结合的热沉结构具有较好的温度一致性,有效改进了微通道热沉中由于工质沿微通道流动温度不断升高导致的加热面温度升高较快,均匀性较差的问题。这是由于沿工质在微通道中的流动方向,一直有工质通过射流孔补充进入微通道,使得微通道内工质的体积流量不断增加,换热能力也不断增强,同时补充的低温工质有效抑制了微通道内工质由于不断吸收加热面传来的热量导致的温度升高,所以在出口附近的加热面温度升高较少。但由于工质在微通道沿程流动过程中吸收了热量,温度仍会持续升高,并且其对加热面温升的影响相比换热增强的影响更大,所以加热面温度沿流动方向仍逐步升高。

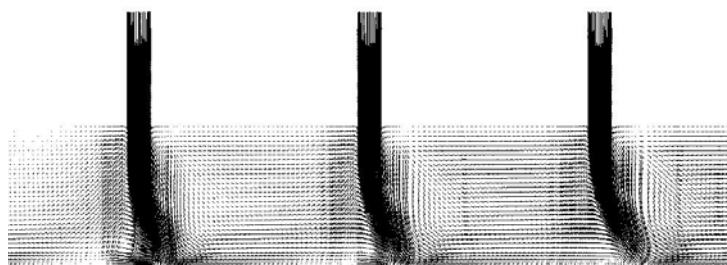


Fig.4 Partial enlargement of velocity vector
图4 速度矢量局部放大图

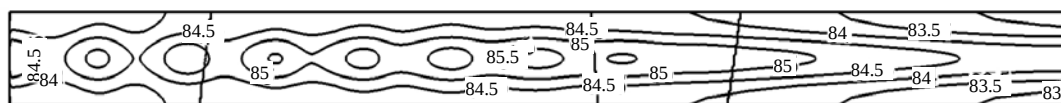


Fig.5 Temperature distribution of heating surface
图5 加热面温度分布图

另外从图5中可以看出,在远离出口位置,加热面上对应射流孔位置的温度相比于其他位置的温度有所降低,但越靠近出口越不明显。通过分析图3~4可以得出:在远离出口位置,由射流工质冲击带来的扰动更强,而射流滞止区的换热效果最好,所以该处对应的加热面温度较低。同时由于微通道沿程一直有工质通过射流孔进入,体

积流量不断增大,导致射流对微通道内换热的影响沿微通道流动方向不断减弱,所以靠近出口处该现象不明显。

图 6 为射流微通道热沉中心截面的压力分布图。从图中可以看出,工质从射流孔喷射入微通道后压力大幅度降低,而沿微通道中的工质流动方向,虽然压力也逐渐降低,但变化幅度相比于工质由射流孔进入微通道的压力损失明显更小。压力损失主要出现在工质从射流孔喷射到微通道的过程,因此,射流孔的优化设计不仅与射流微通道热沉的换热息息相关,还将影响热沉的压力特性。

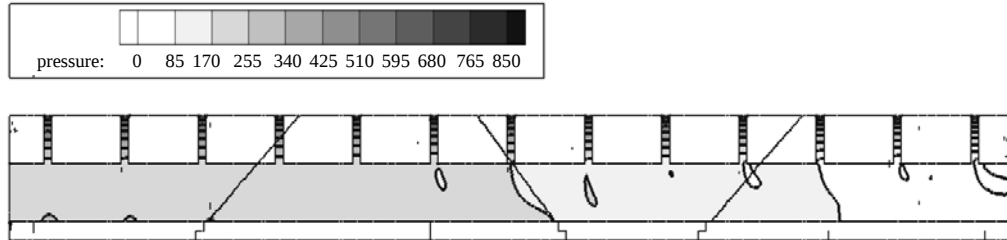


Fig.6 Pressure distribution of center section
图 6 中心截面压力分布图

2.2 不同孔径热沉性能对比

通过之前的分析发现,射流孔的大小将影响射流微通道热沉的传热和流动特性。因此本文对比分析均匀孔径射流微通道热沉和增大远离出口位置孔径的非均匀孔径射流微通道热沉的传热和流动特性。

图 7 为两不同孔径结构的射流微通道热沉换热系数随质量流量的变化情况。从图中可看出,无论何种射流孔径的射流,微通道热沉均具有较好的换热性能,在质量流量为 14 g/s 时,两热沉的换热系数均超过 $37\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。在工质的质量流量相同时,非均匀孔径的射流微通道热沉的换热效果明显优于均匀孔径的射流微通道热沉。这是因为在总压一定的情况下,增大射流孔径使工质更多的沿大孔径射流孔喷射进入微通道,射流驻点的面积也相比均匀孔径更大,射流带来的强化换热面积增加,换热效果有所增强。

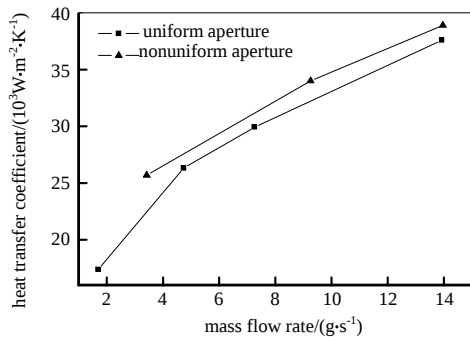


Fig.7 Heat transfer coefficient vs. mass flow rate
图 7 换热系数随质量流量变化情况

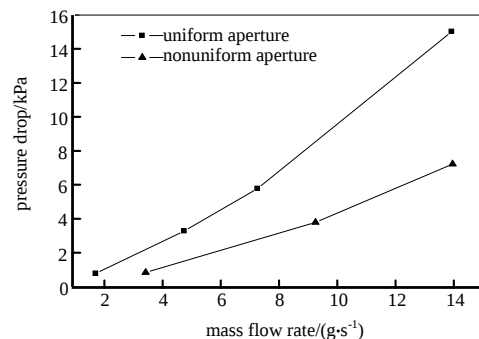


Fig.8 Pressure drop vs. mass flow rate
图 8 进出口压差随质量流量变化情况

图 8 为两不同孔径结构的射流微通道热沉进出口压差随质量流量的变化情况。从图中可以看出,工质的质量流量相同时,均匀孔径的射流微通道热沉的进出口压差明显大于非均匀孔径射流微通道热沉的进出口压差,且其随质量流量增加的幅度更大。这是因为在相同的质量流量下,由于非均匀孔径的热沉中射流的流通面积更大,由射流孔进入微通道的压力损失更小,而射流孔部位的压力损失在整个热沉压力损失中占主要地位,所以增大射流孔径能够有效改善射流微通道热沉的流动阻力。

3 结论

本文对一种将射流冲击和微通道散热相结合的新型散热热沉的传热和流动特性进行了数值模拟研究,并对比分析了均匀孔径和非均匀孔径两种射流孔结构的射流微通道热沉的性能。模拟结果表明,该结构具有优异的换热性能,模拟得到的最高换热系数接近 $39\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;同时热源面的温度均匀性也较好,在模拟的各种工况下,最大温差不超过 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外,增大远离微通道出口的射流孔径,有利于工质的合理分配,强化射流微通道热沉的整体换热效果,并减小工质在热沉中的流动阻力。

参考文献:

- [1] 蒙林,李天明,李浩. 国外高功率微波发展综述[J]. 真空电子技术, 2015(2):8-12. (MENG Lin,LI Tianming,LI Hao. Developments of high power microwave abroad[J]. Vacuum Electronics, 2015(2):8-12.)
- [2] 李巍,王杰. 微波武器对弹载制导电子接收机的毁伤分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(6):685-688. (LI Wei,WANG Jie. Damage effect of high power microwave weapon on missile-borne guidance electronic equipments[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(6):685-688.)
- [3] 钱宝良. 国外高功率微波技术的研究现状与发展趋势[J]. 真空电子技术, 2015(2):2-7. (QIAN Baoliang. The research status and developing tendency of high power microwave technology in foreign countries[J]. Vacuum Electronics, 2015(2):2-7.)
- [4] 王俞卫,陈冬群,张建德,等. 一种紧凑型宽带高功率微波驱动源[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(2):224-228. (WANG Yuwei,CHEN Dongqun,ZHANG Jiande,et al. A compact pulsed power driving source for wideband high power microwave radiation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(2):224-228.)
- [5] ROBINSON A J,SCHNITZLER E. An experimental investigation of free and submerged miniature liquid jet array impingement heat transfer[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007,32(1):1-13.
- [6] TUCKERMAN D B,PEASE R. High-performance heat sinking for VLSI[J]. IEEE Electron Device Letters, 1981,2(5):126-129.
- [7] HANSEN L G,WEBB B W. Air jet impingement heat transfer from modified surfaces[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1993,36(4):989-997.
- [8] ZHUANG Y,MA C F,QIN M. Experimental study on local heat transfer with liquid impingement flow in two-dimensional micro-channels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997,40(17):4055-4059.
- [9] SUNG M K,MUDAWAR I. Single-phase and two-phase cooling using hybrid micro-channel/slot-jet module[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008,51(15):3825-3839.
- [10] SUNG M K,MUDAWAR I. Single-phase and two-phase heat transfer characteristics of low temperature hybrid micro-channel/micro-jet impingement cooling module[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008,51(15):3882-3895.
- [11] SUNG M K,MUDAWAR I. Effects of jet pattern on single-phase cooling performance of hybrid micro-channel/micro-circular-jet-impingement thermal management scheme[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008,51(19):4614-4627.
- [12] SUNG M K,MUDAWAR I. CHF determination for high-heat flux phase change cooling system incorporating both micro-channel flow and jet impingement[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009,52(3):610-619.
- [13] BARRAU J,PERONA A,DOLLET A,et al. Outdoor test of a hybrid jet impingement/micro-channel cooling device for densely packed concentrated photovoltaic cells[J]. Solar Energy, 2014,107(9):113-121.
- [14] HUSAIN A,KIM S M,KIM K Y. Performance analysis and design optimization of micro-jet impingement heat sink[J]. Heat and Mass Transfer, 2013,49(11):1613-1624.
- [15] 陈庆光,徐忠,张永建. RNG湍流模型在冲击射流数值计算中的应用[J]. 力学与实践, 2002,24(6):21-24. (CHEN Qingguang,XU Zhong,ZHANG Yongjian. Application of RNG turbulence models on numerical computations of an impinging jet flow[J]. Mechanics in Engineering, 2002,24(6):21-24.)

作者简介:



潘 瑶(1989-),女,长沙市人,硕士,工程师,主要研究方向为小空间大功率高效散热技术.email:741825191@qq.com.

刘 欣(1978-),男,云南省昭通市人,研究员,主要研究方向为航天热控设计、电子器件散热等.