

烧结多孔表面的氨喷雾冷却实验研究

杨 强² 王 宏^{1,2} 陈 蓉^{1,2} 朱 恂^{1,2} 廖 强^{1,2} 丁玉栋^{1,2} 杨宝海²

(¹重庆大学低品位能源利用及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)
²重庆大学工程热物理研究所, 重庆 400030

摘要 研究了光滑表面和不同粒径铜粉烧结的多孔表面上,以液氨为工质的喷雾相变冷却的传热特性。研究发现,在相同工况下,由于多孔结构的毛细作用和潜在的有效汽化核心数强化了多孔表面的换热性能,多孔表面的换热性能远高于光滑表面。随着烧结铜粉粒径的减小,在核态沸腾区的换热效果增强;对于烧结粒径为 28 μm 和 49 μm 的多孔表面,在流量为 0.0133 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,热流密度为 367 W/cm^2 时,换热系数分别高达 100612 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 和 96464 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;当流量从 0.0133 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 提高到 0.0181 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,维持其他实验工况不变,多孔表面的核态沸腾延长,并且推迟临界热流(CHF)密度出现;在热流密度达 367 W/cm^2 时,0.0181 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 流量下的换热系数达到 147503 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,换热系数相对于 0.0133 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时提高了约 47%。

关键词 激光器;喷雾冷却;多孔表面;流量

中图分类号 TK124 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0302006

Experimental Study of Spray Cooling on a Sintered Porous Surface with Ammonia

Yang Qiang² Wang Hong^{1,2} Chen Rong^{1,2} Zhu Xun^{1,2} Liao Qiang^{1,2}
Ding Yudong^{1,2} Yang Baohai²

(¹Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)
²Institute of Engineering Thermophysics, Chongqing University, Chongqing 400030, China

Abstract The heat transfer characteristics of the spray cooling with ammonia are experimentally investigated on a smooth surface and two porous surfaces with different sintered grain sizes. It is found that porous surfaces significantly enhance the heat transfer as a result of wicking action of porous structure and potential active nucleation sites. In nucleate boiling region, with the decrease of sintered grain size, heat transfer of porous surfaces performs better; the maximum heat transfer coefficients of 100612 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ and 96464 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ are achieved with the heat flux of 367 W/cm^2 at the flow rate of 0.0133 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ for the porous surfaces with sintered grain sizes of 28 μm and 49 μm . When the flow rate increases from 0.0133 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ to 0.0181 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, the appearance of critical heat flux (CHF) density is delayed and the heat transfer coefficient is increased by 47% to reach 147503 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ at the heat flux of 367 W/cm^2 .

Key words lasers; spray cooling; porous surface; flow rate

OCIS codes 140.6810; 140.3460; 140.3320

收稿日期: 2012-10-17; 收到修改稿日期: 2012-11-23

基金项目: 国家 973 计划(2012CB720403), 国家自然科学基金(50906102), 重庆市自然科学基金项目(CSTC2011jjA90015), 教育部留学回国人员科研启动基金(教外司留[2010]1561号)和中央高校基本科研业务费科研专项自然科学基金类项目(CDJZR10140012)资助课题。

作者简介: 杨 强(1987—),男,硕士研究生,主要从事电子元件冷却和强化传热传质等方面的研究。

E-mail: yangqiang240@sina.com

导师简介: 王 宏(1978—),男,博士,副教授,主要从事强化传热传质理论及实验方面的研究。

E-mail: hongwang@cqu.edu.cn

1 引 言

激光从被发现到得到广泛的应用只有短短的50余年,但是激光本身与其相应的理论却成为一批新兴学科发展和对未知领域开拓的重要保障。从激光核聚变、激光医学等前沿领域到激光打印机、舞台灯光等日常生活,激光得到了广泛的应用和发展。近年来,作为激光前沿技术领域之一的超强激光的蓬勃发展,使得人们对激光的应用达到一个新的阶段^[1,2]。但是从超强激光和大功率固态激光器的发展来看,虽然它们的研制和应用成为我国国防安全不可缺少的高端技术力量,然而超强激光和大功率激光以及激光阵列的发展同样面临散热的问题^[3~6],而散热问题常常成为阻碍激光技术发展的重要障碍,因此探求一种适用于大功率电子元器件的冷却技术显得尤为重要。喷雾冷却是利用雾化成的微小液滴喷射到换热表面上,通过相变蒸发带走大量热量的一种相变冷却技术,具有工质用量小、换热表面温度分布均匀等特点,成为应对高热流密度散热需求极具潜力的一种冷却技术,得到了国内外学者的广泛关注和研究^[7~9]。

以往的研究表明,通过改变换热表面的结构能改善换热性能,比如 Hsieh 等^[10]研究了在低流量下,光滑表面和正方形微槽表面的喷雾冷却特性。相对光滑表面,微型槽道表面形状产生的毛细作用力使得液膜在槽道中铺展,从而增加了液膜的表面积,大大地提高了微槽的表面换热系数,能获得更高的冷却热流密度。喷雾冷却与池沸腾传热都是利用液体的相变潜热来吸收大量热量,可以通过池沸腾现象大致预测喷雾冷却结果。Luke^[11]和

Benjamin 等^[12]研究了不同表面粗糙度下的池沸腾换热,发现汽化核心的形成与表面结构相关,通过人为改善表面结构,为萌芽胚胎的形成创造条件。B. Horacek 等^[13]使用单喷嘴探究了不同过冷度下的换热特性,通过测量液固接触区域和三相接触线的长度,认为由于相变的发生,改变表面的浸润特性,直接影响到三相接触线的长度,建议通过人为制造一定的易于浸润的结构表面来改变三相接触线的长度,增强换热性能。因此,可以通过形成合适的气泡活化结构条件来强化核态沸腾的程度。从国内外的研究可以看出,通过改变换热面的结构特征,可以大大地强化雾冷却换热性能。而烧结型多孔结构能为气泡的生长创造合适、稳定的条件,它在不改变体积的情况下提高换热性能。

本文重点通过使用液氨为喷雾冷却工质,探究了高温烧结而成的多孔表面的喷雾相变冷却传热特征,并对该多孔结构的喷雾冷却换热机理进行了探讨,分析了不同流量影响下的多孔结构喷雾冷却换热特性。

2 实验系统与方法

2.1 实验系统

图 1 为氨喷雾相变冷却系统示意图,其主要组成为液氨供给系统、实心锥形双喷嘴系统、模拟加热系统、数据采集处理系统、氨处理系统。工质从纯度为 99.9% 的液氨瓶 1 中,通过节流阀 3 调整到合适的压力后进入气液分离器 5 中,之后通过管式换热器 7,经流量计 9,最后通过实心锥形双喷嘴 15 雾化成细小液滴喷射到加热表面,加热蒸发未完全的余

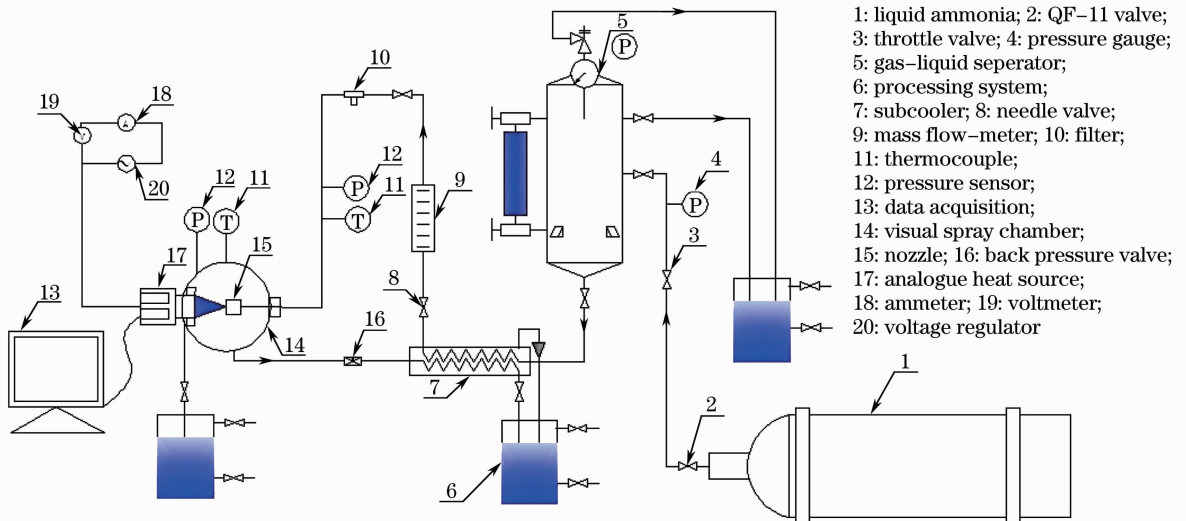


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Experimental setup of spray cooling system

液和氨气用氨处理系统 6 吸收处理。喷嘴 15 由两个喷嘴组成,两喷嘴间距为 12.5 mm,实心锥形喷雾,冷却换热面积为 25 mm×12 mm。模拟热源则是使用 7 根 200 W 的加热棒提供,热沉通过导热硅脂与紫铜加热基座压紧结合,并在加热基座周围缠绕绝热材料。在距热沉表面下 2 mm 处的同一平面上,分别布置 6 个 0.2 mm 的 K 型热电偶。根据傅里叶定律计算出热流密度,再由测点的平均温度可计算出热沉表面温度。数据采集系统包括 K 型热电偶、压力传感器、压差式流量计与 Agilent 34970A 数据采集系统。

2.2 实验方法

使用铜粉配合一定比例的调节剂,均匀地涂在紫铜基座上,在还原气体中高温烧结一段时间,待调节剂挥发后,留下微米级的多孔层。图 2 为放大 200 倍下两种多孔表面的电子显微镜图像,多孔层的相关参数如表 1 所示,其中面积比为对应表面的总面积(S)比上光滑表面的表面积(S_0)。调整实

心锥形双喷嘴距热沉表面的距离到 10.0 mm。维持流量在 $0.0133 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,比较不同换热表面的喷雾冷却性能;保持环境压力为 10^5 Pa 恒定,通过调节入口阀,调节液氨流量为 0.0133、0.0155、0.0181 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,分析不同流量下的喷雾相变冷却性能。

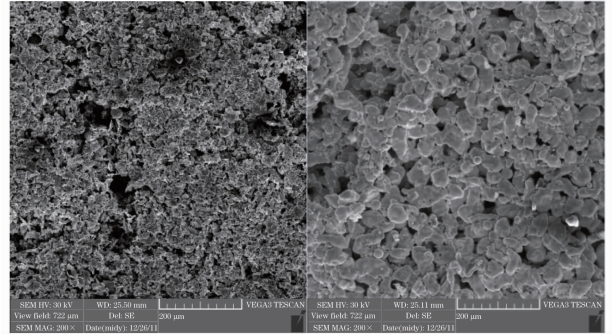


图 2 多孔表面 1 和多孔表面 2 的 SEM 图(200×)

Fig. 2 SEM photographs of porous surface 1 and surface 2 (200×)

表 1 不同表面结构参数

Table 1 Parameters of different surface structures

	Material	Size $d / \mu\text{m}$	Thickness $\delta / \mu\text{m}$	Total superficial area S / cm^2	Area ratio S/S_0
Smooth	Copper			3.0	1.0
Porous 1	Copper	28	255	26.1	8.7
Porous 2	Copper	49	358	41.0	13.7

2.3 误差分析

用耐高温硅酸铝绝热材料包裹的铜块加热器热损失功率约占输入总功率的 4.8%,热流密度的测量误差为±1.8%,喷淋式压力测量误差为±0.25%,表面温度的测量误差为±5.0%。

3 结果与分析

3.1 多孔表面的影响

已有的研究表明,通过增加宏观尺度下的换热面积,能够有效提高换热量,但是在有限宏观换热面积下实现更高热流密度的传递,成为当前激光技术向紧凑化和高功率发展道路上需要解决的首要问题之一。对有限宏观换热面积的表面进行物理或化学方法的处理,使其微观表面的形态发生显著的变化,以达到增强换热的目的一直是学者们研究的重点。因此,本实验着重研究了具有相同宏观换热面积的光滑表面和不同粒径烧结的多孔表面的喷雾相变冷却传热特性的变化规律。图 3、4 为光滑和多孔表面热流密度随过热器度和表面温度的变化关系曲线,在低热流密度时,由于换热处于以对流换热为主导的

阶段,光滑表面和多孔表面的换热效果基本相当。随着热流密度的增加,以相变蒸发为主的沸腾换热机制逐渐占据主导地位,多孔表面的换热效果逐渐高于光滑表面,且在较低过热度下实现了对高热流密度的换热。这主要是由于多孔表面微观形貌不仅增加了有效的换热面积(具有较大的比表面积),而且表面上形成的微孔结构增加了潜在的沸腾汽化核心,并且表面毛细力的作用进一步强化了表面的换热作用,因此换热效果明显加强。当热流密度上升到 305 W/cm^2 时,光滑表面逐渐接近临界热流(CHF)密度,对应表面过热度为 $51 \text{ }^\circ\text{C}$,而多孔表面的过热度仅为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 。多孔层内部能够提供稳定的汽化核心,从而使得核态沸腾延续。当热流密度达到 367 W/cm^2 时多孔表面才逐渐接近临界热流密度。多孔表面 1 和多孔表面 2 过热度分别为 $36 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $38 \text{ }^\circ\text{C}$ 。以较低的过热度实现高热流密度的运输能力是高效散热技术重要的特征之一。从图 3、4 中还可看出,两种多孔表面在强制对流换热阶段的换热程度相当,随着热流密度的增加,多孔表面 1 较之多孔表面 2 更早进入核态沸腾,这是由于烧结粒径

较小的多孔表面 1 具有较小的烧结层厚度 (255 μm) 和较强的毛细力作用, 尽管表面积略小于多孔表面 2。但是其换热效果仍优于多孔表面 2, 这说明孔隙粒径形成汽穴的大小和毛细力的耦合作用在沸腾换热机制中是占据主导地位的影响因素。随着热流密度的增加, 在热流密度达到 260 W/cm^2 时, 多孔表面换热曲线上上升趋势变缓, 此时的气液两相区逐渐推向多孔层表面, 随着热流密度进一步增加, 多孔表面开始出现部分灼干, 换热提升趋势放缓, 逐渐接近临界热流密度。

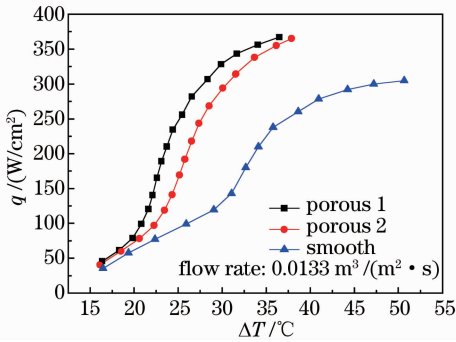


图 3 不同换热面的热流密度和表面过热度关系
Fig. 3 Heat flux as a function of surface over-heat for different surfaces

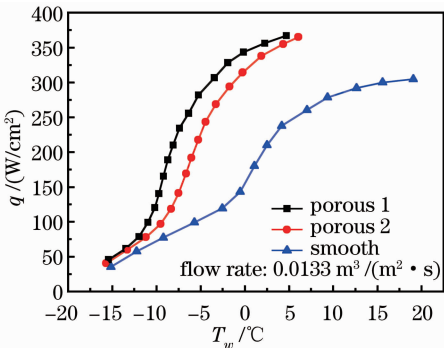


图 4 不同换热面的热流密度和表面温度关系
Fig. 4 Heat flux as a function of surface temperature for different surfaces

图 5 给出了三种换热面下热流密度和表面换热系数的关系曲线。从图 5 中可以得出, 多孔表面的换热系数随着热流密度的增加大幅度提高, 上升幅度明显大于光滑表面, 在热流密度为 278 W/cm^2 时候, 多孔表面 1 的换热系数高达 106234 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 相对于光滑表面增加了 56%; 随着热流密度的增加, 较小烧结粒径的多孔层内部间隙也越小, 毛细力泵吸作用增强, 表面液膜减薄, 并且较小的空隙结构内部汽化核心率增加, 稳定的汽化核心产生持续的核态沸腾能提供更高的表面换热系数, 强化传热效果明显, 在热流密度在 290 W/cm^2 时, 多孔表面 1 的换

热系数为 107047 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 比多孔表面 2 增加了 11.2%。

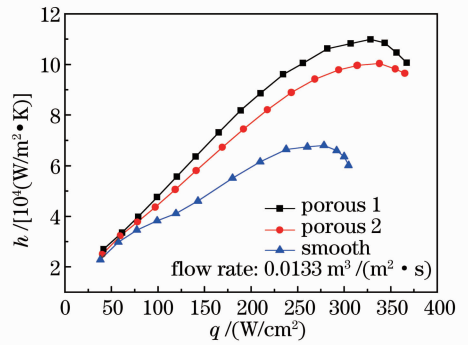


图 5 不同换热面换热系数和热流密度关系
Fig. 5 Heat transfer coefficient as a function of heat flux for different surfaces

从上述分析可以看出, 在较低热流密度区域, 由于是对流换热为主, 在相同的喷射流量下, 换热能力仅与宏观的换热面积有关, 因而不同烧结粒径的多孔表面和光滑表面换热能力相当。随着热流密度逐渐增加, 换热逐渐进入核态沸腾区域, 影响该阶段的主要因素为有效汽化核心率的增加和表面张力作用下的气泡产生与脱离频率等因素所引起的核态沸腾程度的不同, 这也成为影响换热性能的关键。由于多孔层毛细力的泵吸作用, 其表层液体在毛细作用力作用下浸入到下表层, 在多孔层内部的浸润、延展, 增加了在热层表面的浸润面积, 并且微米级多孔层内部结构极易形成汽化核心, 为核态沸腾气泡的形成创造了一定条件。随着热流密度的增加, 核态沸腾程度不断加强, 换热效果明显增强。还可以发现, 烧结颗粒越小, 颗粒的间隙越小, 毛细作用力越大, 液体越容易浸入多孔层内部, 并且随着烧结粒径的减小, 多孔层厚度又有一定程度的减小, 多孔层所产生的换热热阻减小, 换热效果更明显。

3.2 流量影响

当环境压力恒定的时候, 流量的增加带来入口压力的变大, 液体数量增多, 雾化粒径变小, 换热效果也会随之改变。因此, 本文研究了不同流量下多孔表面的喷雾冷却换热性能。图 6、7 反映了在不同流量下多孔表面 1 的喷雾冷却换热性能。在强制对流换热阶段, 随着喷嘴入口压力的增加, 流量增加, 雾化的液滴将获得更快的速度和更小的粒径, 对换热表面的冲击也更强, 因此, 对流换热能力将提高。随着热流密度的不断增加, 多孔内部开始产生气泡, 逐步进入核态沸腾, 但不同流量下的起始沸腾过热度在 18 $^\circ\text{C}$ 左右, 表明在同一多孔层内部, 起始核态

沸腾的转变点受不同流量的影响不太明显,说明多孔层内部结构对气泡生成有影响。进入核态沸腾后,更多的气泡在多孔层内部产生,带走大量热量,当热流密度达到 260 W/cm^2 时, $0.0133 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 流量下的多孔表面由于冷却工质的供给不足,换热表面逐渐形成汽膜,由于热阻的增加导致换热能力下降,并且逐渐接近临界热流密度。当流量从 $0.0133 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 升到 $0.0181 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,由于冷却工质的流量足够维持对应热流密度下的核态沸腾,因此使得该工况能够在更低的过热度下达到更高的CHF密度。在热流密度达到 367 W/cm^2 时,对应所需的过热度分别为 $36 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $28 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

367 W/cm^2 时,流量 0.0133 、 0.0155 、 $0.0181 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 对应的换热系数达 100612 、 129892 、 $147503 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,最大增幅为 47% 。

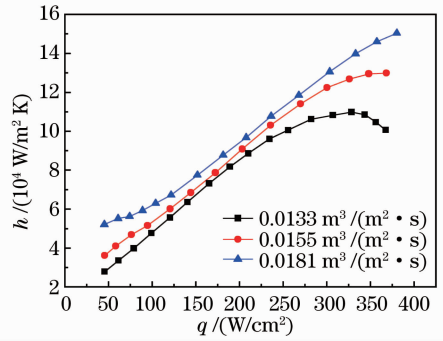


图 8 不同流量下换热系数与热流密度关系

Fig. 8 Heat transfer coefficient as a function of heat flux at different flow rates

通过上述对比发现,对于微米级的多孔表面,在较低热流密度下,热量的传递以强制对流换热和薄液膜的蒸发为主,流量的增加使得喷雾液滴对换热面的冲击加强,换热效果增强;进入核态沸腾后,以沸腾为主的换热机制将受到表面微观结构和流量大小的共同影响,其中微观结构导致的汽化核心数的增加和毛细作用的强化更为主要。随着热流密度的增加,核态沸腾的加剧使得多孔层内部液体不断消耗,较小流量下的多孔表面液膜不断减薄,首先开始出现部分灼干,使得换热性能下降,而较大流量仍能满足对剧烈蒸发过程的补充,从而延长沸腾换热的的时间,达到更高的热流密度冷却能力。

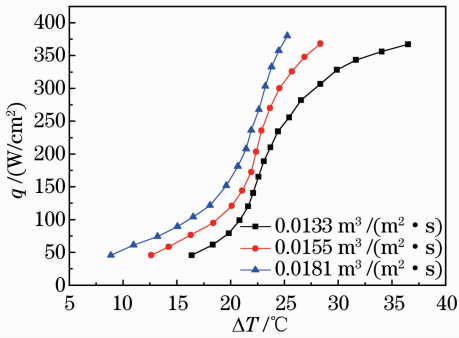


图 6 不同流量下热流密度与表面过热度关系

Fig. 6 Heat flux as a function of surface over-heat at different flow rates

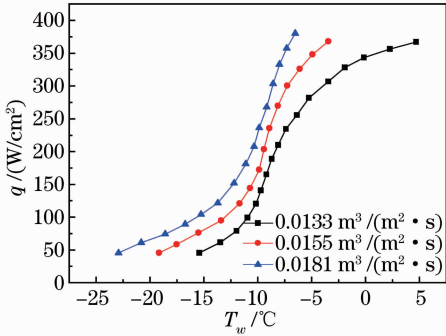


图 7 不同流量下热流密度与表面温度关系

Fig. 7 Heat flux as a function of surface temperature at different flow rates

图 8 给出的是不同流量下换热系数随热流密度变化曲线。从图 8 中可以看出,当流量从 $0.0133 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 升到 $0.0181 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,在低热流密度区域,较大流量下换热系数更高,但随着热流密度增加,开始逐步进入核态沸腾,不同流量下换热系数相差不大,随着热流密度进一步增加, $0.0133 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 流量下的换热系数增加减慢,最后出现下降趋势,当流量增加时,换热系数能够继续持续增加,并且推迟降低趋势。在热流密度为

4 结 论

通过使用液氨对多孔表面进行喷雾冷却实验,探讨了多孔表面的喷雾冷却强化换热机理,比较了不同烧结粒径下多孔表面的喷雾冷却效果,并分析了不同流量下多孔表面的喷雾冷却性能,得出以下结论:

- 1) 多孔表面微观构型增加了有效的换热面积,表面的微孔结构增加了潜在的沸腾汽化核心,其毛细作用有利于气泡生成,大幅地增强表面换热能力,当热流密度为 278 W/cm^2 时,换热系数相对于光滑表面增加了 56% ,多孔表面 1 在热流密度为 328 W/cm^2 时,换热系数为 $109851 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。
- 2) 随着烧结粒径的减小,毛细作用力增强,汽化核心数的增加和毛细力的共同作用使得沸腾起始点提前,有效降低了沸腾的过热度。
- 3) 随着流量的增加,在相同过热度下可以达到

更高的热流密度,当流量为 $0.0181 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, 换热系数达到 $147503 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

参 考 文 献

- 1 J. Faure, V. Malka, J.-R. Marque *et al.*. Interaction of an ultra-intense laser pulse with a nonuniform preformed plasma[J]. *Phys. Plasmas*, 2000, **7**(7): 3009~3016
- 2 D. Umstadter. Review of physics and applications of relativistic plasmas driven by ultra-intense lasers[J]. *Phys. Plasmas*, 2001, **8**(5): 1774~1785
- 3 Liu Gang, Zhu Chen, Lin Jixiang. Numerical simulation based on computational fluid dynamics method for a semiconductor laser external heat dissipation design[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(S1): 81~85
刘 刚, 朱 辰, 林 佶翔. 基于计算流体力学方法的半导体激光器外部散热设计的数值模拟[J]. 中国激光, 2010, **37**(S1): 81~85
- 4 Tao Yujia, Huai Xiulan, Li Zhigang *et al.*. Advancement of cooling techniques in high-power solid state laser[J]. *Laser Journal*, 2007, **28**(2): 11~12
陶毓伽, 淮秀兰, 李志刚 等. 大功率固体激光器冷却技术进展[J]. 激光杂志, 2007, **28**(2): 11~12
- 5 Wu Deyong, Yan Diyong, Tang Chun *et al.*. Thermal analysis of high average power laser diode arrays[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(5): 537~540
武德勇, 严地勇, 唐 淳 等. 高平均功率面阵二极管激光器散热分析[J]. 强激光与粒子束, 2001, **13**(5): 537~540
- 6 Qian Keyuan, Zheng Daishun, Luo Yi *et al.*. Thermal dispersion of GaN-based power LEDs[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(3): 236~239
钱可元, 郑代顺, 罗 毅 等. GaN 基功率型 LED 芯片散热性能测试与分析[J]. 半导体光电, 2006, **27**(3): 236~239
- 7 Wang Hong, Yu Yongsheng, Zhu Xun *et al.*. Effects of saturation pressure on spray cooling with ammonia[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0702004
王 宏, 余勇胜, 朱 恂 等. 氨饱和和压力对喷雾相变冷却特性的影响[J]. 中国激光, 2011, **38**(7): 0702004
- 8 E. A. Silk, E. L. Golliher, R. P. Selvam. Spray cooling heat transfer: technology overview and assessment of future challenges for micro-gravity application [J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, **49**(3): 453~468
- 9 Wang Yaqing, Liu Minghou, Liu Dong *et al.*. Experiment study on non-boiling heat transfer performance in spray cooling for high power laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1973~1978
王亚青, 刘明侯, 刘 东 等. 大功率激光器喷雾冷却中无沸腾区换热性能实验研究[J]. 中国激光, 2008, **36**(8): 1973~1978
- 10 C. C. Hsieh, S. C. Yao. Evaporative heat transfer characteristics of a water spray on micro-structured silicon surfaces[J]. *International J. Heat and Mass Transfer*, 2006, **49**(5-6): 962~974
- 11 A. Luke. Pool boiling heat transfer from horizontal tubes with different surface roughness[J]. *International J. Refrigeration*, 1997, **20**(8): 561~574
- 12 R. J. Benjamin, A. R. Balakrishnan. Nucleation site density in pool boiling of saturated pure liquids effect of surface microroughness and surface and liquid physical properties[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1997, **15**(1): 32~42
- 13 B. Horacek, K. T. Kiger, J. Kim. Single nozzle spray cooling heat transfer mechanisms[J]. *International J. Heat and Mass Transfer*, 2005, **48**(8): 1425~1438

栏目编辑: 宋梅梅