

文章编号: 0253-2239(2010)10-2958-05

高功率固体激光器用气助式雾化无沸腾 换热性能的实验研究

司春强^{1,2} 徐洪波¹ 唐明生^{1,2} 田长青¹

(¹ 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 以水为工质,在维持热流密度及进口水温不变的条件下,进行气助式雾化无沸腾喷雾冷却实验。分析了液体流量、压力以及气体流动参数对雾化液滴索太尔直径 d_{SMD} 的影响,并进一步研究了其对换热能力及换热表面温度均匀性的影响。实验结果表明气液质量流量比高于 5% 时,气液压力相当,可以实现气液相对速度、气体动能利用率、气耗率的最优匹配,可以得到最好的换热效果,而液体压力略低于气体压力,可以得到较好的温度均匀性;气液质量流量比低于 5% 时,气体压力略高于液体压力,保证气体动能利用率的同时提高了气液相对速度,优化了液体雾化和雾滴分布,得到了最好的换热性能和温度均匀性。

关键词 激光器;气助式雾化;换热;温度均匀性

中图分类号 TK124 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103010.2958

Experimental Study on Non-Boiling Heat Transfer with Air-Assist Atomization for High-Power Laser

Si Chunqiang^{1,2} Xu Hongbo¹ Tang Mingsheng^{1,2} Tian Changqing¹

(¹ Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Keeping the heat flux density and the temperature of water at inlet constant, cooling experiments on non-boiling heat transfer with air-assist atomization are carried out. The influences of liquid mass flow rate and pressure, air to liquid ratio and nitrogen pressure on sauter diameter d_{SMD} are analyzed. The heat transfer capacity and temperature uniformity are further studied respectively. The results show that when the air-liquid mass flow ratio is above 5%, the same nitrogen and liquid pressure can get a better heat transfer due to optimal match of gas-liquid relative velocity, the nitrogen kinetic energy utilization and gas consumption rate, and as the liquid pressure is slightly lower than the nitrogen pressure uniform temperature distribution can be achieved. When the air-liquid mass flow ratio is below 5%, a better heat transfer and temperature distribution can be gotten under the condition of the nitrogen pressure slightly higher than the liquid pressure, which ensure the utilization of gas kinetic energy while increase the relative velocity and optimize the droplet atomization and distribution.

Key words lasers; air-assist atomization; heat transfer; temperature uniformity

1 引 言

高功率激光器的研究是近十多年来激光科学技术最重要的发展方向之一,高功率二极管激光器的相继研制成功更促进了高功率固体激光器在军事、

医用、科研和航空航天等领域的应用。但是,在高功率抽运情况下,固体激光器工作中会产生大量的无用热,严重的热效应会降低激光光束质量和输出功率,甚至会损毁激光介质^[1~3]。为了保证激光器持

收稿日期: 2010-02-01; 收到修改稿日期: 2010-03-23

作者简介: 司春强(1982—),男,博士研究生,主要从事高热流密度冷却技术、制冷空调新技术等方面的研究。

E-mail: sichunqiang@126.com

导师简介: 田长青(1965—),男,博士,研究员,主要从事高热流密度冷却技术、新制冷技术等方面的研究。

E-mail: chqtian@mail.ipc.ac.cn

续稳定运转,避免产生热透镜、应力和双折射等不良效应,必须解决激光器散热冷却问题^[4,5]。抽运源、晶体棒的全腔式冷却、循环风冷和循环液冷等方法可以满足小功率激光器的需求^[6,7],但随着激光器功率的增大,热负荷越来越大,微通道液冷、固体冷却、喷雾冷却和微热管冷却等冷却方式被研究者提了出来^[8]。喷雾冷却具有换热系数大、过热度小、临界热流密度高和低冷却液流量等特点,相比冲击射流和池沸腾有更高的换热系数和临界热流密度(CHF)^[9]。

现有研究成果表明,喷雾冷却过程主要受强制对流、液膜蒸发和核态沸腾等机理共同作用。由于相对气助式雾化,压力式雾化系统简单,目前多数研究热点在压力式雾化的雾化参数(雾化细度、雾滴密度)、流动参数^[10~12](流量、流速)、几何参数^[13~15](喷射高度、喷射角度、换热面粗糙度)等因素在沸腾换热中的影响^[16]。沸腾换热带来高热流密度的同时也产生了表面温度不均等影响,限制了其在高功率激光器的应用,因此一些大功率器件仍采用无沸腾喷雾冷却。气助式雾化综合了液体压力和高速气流的双重雾化,得到比压力式雾化更为细小的雾化颗粒;同时雾滴高速冲击换热面,强化对流换热,气体高速冲击换热面蒸汽层,有利于液膜蒸发,即使是在无沸腾区也能提供高于压力式雾化的换热能力。而气助式雾化冷却研究,尤其是在无沸腾区的研究更为有限,因此对无沸腾区气助式雾化换热性能进行研究十分必要。

本文在维持加热量恒定前提下进行气助式雾化无沸腾换热实验,对不同液相进口压力、液体质量流量和气体进口参数条件下换热面的温度进行测量;分析了影响气助式雾化换热性能的因素,探究了温度非均匀性的成因及影响因素,为喷雾强化换热技术进一步发展提供理论支持。

2 实验系统

实验系统如图 1 所示,主要包括气助式喷嘴、模拟热源、升降装置、水泵、恒温水箱、供气(氮气)装置和数据采集系统。实验系统采用开放式系统,恒温水箱提供恒温蒸馏水,通过水泵提压进入气助式喷嘴液室,供气装置提供氮气进入气助式喷嘴气室,辅助液体雾化后喷射到模拟热源表面,换热后蒸馏水经喷雾室底部通道流回恒温水箱,氮气排入大气。升降装置可以调整喷嘴出口与热源表面之间的距离(喷射高度);水泵结合旁通阀可以调整喷嘴进口压

力。模拟热源主要由紫铜底座和 5 根 220 W 的加热棒组成结构,如图 2 所示。底座截面由 32 mm×32 mm 经 45°棱台渐变成 10 mm×10 mm 截面,四周分别包裹 15 mm 厚的绝热材料,模拟热源在竖直方向上具有较好的一维导热性^[13]。热源和喷雾室接触处添加聚四氟乙烯隔热垫,并用耐高温胶进行密封。

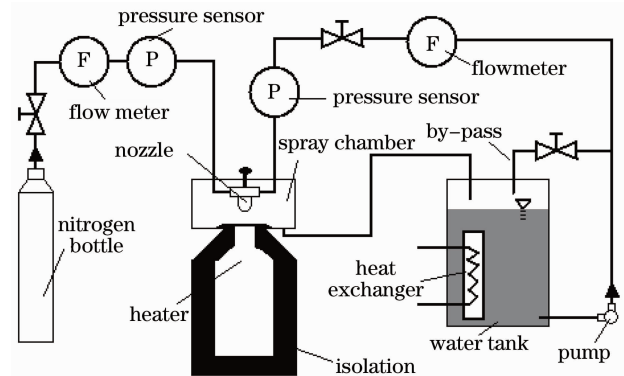


图 1 实验系统图

Fig. 1 Schematic of experimental set up

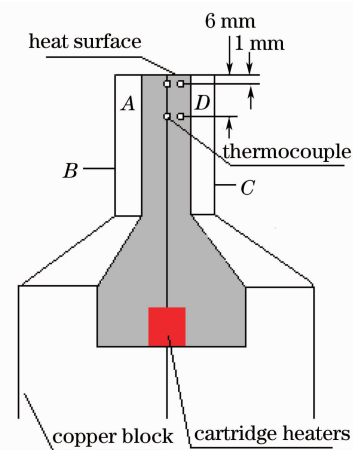


图 2 模拟热源的局部剖视图

Fig. 2 Partial cutaway view of the heat source unit

在模拟热源 A, B, C, D 四个侧面的每个侧面中心线上布有两个直径为 0.5 mm 的 T 型热电偶(共计 8 个),热电偶距离换热面表面的距离分别为 1 mm 和 6 mm。A 面热电偶进入深度是 5 mm, B 面(与 D 面相对)进入深度是 4 mm, C 面(与 A 面相对)进入深度是 3 mm, D 面进入深度是 2 mm。实验中利用热电偶测量进入喷嘴前和换热后的水温。数据采集系统由数据采集仪和计算机组成,用于测量和记录以上热电偶的测量数值。氮气流量采用转子流量计测量,液体流量采用称重法测量 5 次取其平均值。

为保证实验工况相同,每次实验前均对换热面进行去杂质、去氧化处理。实验过程中,由于蒸馏水

不断被模拟热源加热,故采用冷水机组冷却恒温水箱中蒸馏水,水箱供水温度控制精度在 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 以内。

3 实验结果

实验中,模拟热源表面热流密度一直维持在 $(103\pm 1)\text{ W/cm}^2$,表面无沸腾现象发生,喷嘴进口水温设定为室温 $21\text{ }^\circ\text{C}$ 。实验选用的气助喷嘴在出口 15 mm 内,可以较好的保持喷流角度,结合 Mudawar 和 Estes^[17]最优喷射高度(喷嘴出口到换热面的距离)研究成果,设定喷射高度为 10 mm ,进口氮气压力及流量如表 1 所示。针对不同喷嘴液体进口压力、液体流量进行雾化换热实验。实验中所有数据均在稳定状态(模拟热源中热电偶数值偏差在 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 以内而且持续时间达 30 min 以上)读取。

表 1 氮气进口压力及流量

Table 1 Relation of nitrogen pressure at inlet and mass flow

Pressure P_g/kPa	Mass flow $Q_g/(\text{kg/h})$
200	0.26
300	0.57
400	0.70
500	0.97
600	1.62

实验中采用的测量及采集仪器均为一级或以上误差精度,流量计及热电偶均进行标定,测试液体流量的天平最小刻度为 0.001 g 。分别对热流和表面温度进行误差分析。测温截面距离误差和温度测量误差分别为 $\pm 0.1\text{ mm}$ 和 $\pm 0.2\text{ }^\circ\text{C}$ 。热流误差 ϵ_q 表示为

$$\epsilon_q = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_T}{\Delta t}\right)^2}, \quad (1)$$

式中 Δt 表示不同截面上热电偶的温差, Δx 表示不同截面之间距离, ϵ_x 表示截面距离误差, ϵ_T 表示温度测量误差。根据实验测量数值计算,可知道热流误差 ϵ_q 在 2.3% 左右。表面温度的误差可表示为

$$\epsilon_{T_w} = \sqrt{\left(\frac{\Delta T_{12} \Delta x_{02} \epsilon_x}{\Delta x_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x_{02} \epsilon_T}{\Delta t}\right)^2 + (\epsilon_T)^2 + \left(\frac{\Delta T_{12} \epsilon_T}{\Delta x_{12}}\right)^2}, \quad (2)$$

式中 ΔT_{12} 表示截面 1 和截面 2 温差, Δx_{12} 表示截面 1 和截面 2 之间距离, Δx_{02} 表示换热表面和截面 2 之间距离。同样计算可以得到表面温度误差在 5.7% 左右。

3.1 表面平均温度

通过数值模拟分析,实验中模拟热源具有较好的一维导热性。根据 A, B, C, D 各自截面上的热电偶测量值,利用傅里叶导热定律可得到换热面表面 4 个不同位置的温度值,定义其平均值为表面温度 T_w :

$$q = k \frac{\Delta T}{\Delta x}, \quad (3)$$

$$T_w = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 T_i, \quad (4)$$

式中 ΔT 表示不同截面上热电偶的平均温差, k 表示紫铜的导热率, T_w 表示表面温度, T_i 表示换热面不同截面温度。

维持氮气进口压力 400 kPa 恒定,不同液体进口压力下,调整喷嘴上阀针的状态从而改变液体流量进行实验。根据实验数据和(3),(4)式,可以计算换热表面温度,结果如图 3 所示。

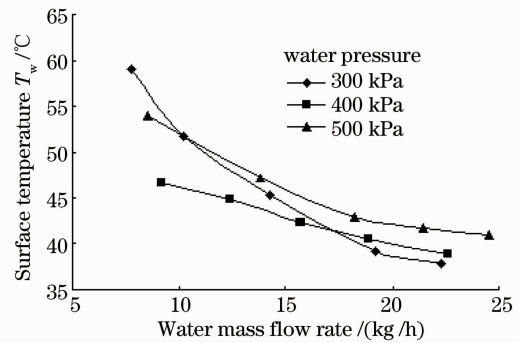


图 3 表面温度随液体质量流量的变化

Fig. 3 Surface temperature changes with liquid mass flow rate

气助式雾化利用高速气流冲击液体,使其破碎雾化成很细小的液滴。Lefebvre^[18]对气助式雾化过程进行能量衡算,得到雾滴的索太尔平均直径 d_{SMD} 公式:

$$d_{SMD} = 3 \left[\frac{1}{t} + \frac{C \rho_l u^2}{4\sigma(1+1/k)} \right], \quad (5)$$

式中 d_{SMD} 表示索太尔平均直径, t 表示液膜厚度, C 表示气体动能利用率, ρ_l 表示液体密度, u 表示气液相对速度, σ 表示液体表面张力, k 表示气耗率。

从图 3 可以看出,液体质量流量从 7 kg/h 开始逐步增大,气液质量流量比(以下简称气液比)随之从 10% 降低到 3.5% 左右,换热面表面温度下降近 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。3 条曲线均表明,液体质量流量较小时,增加液体质量流量可以实现表面温度大幅度降低;随着液体质量流量的进一步增大,通过增加液体质量流量降低表面温度的趋势越来越缓慢,从 3 条曲线走势可以预见,继续增大液体流量降低气液比不会增强换热效果。这是由于液体质量流量增加,气体

体积流量不变,使得单位时间内作用在单位质量液体上的气体流量减少,气液相对速度减小,气耗率(单位质量液体雾化消耗的气体质量)减小,雾滴直径增大,雾化效果减弱所致,极端情况就成为了单独的水和换热面进行强制对流换热情况,这会使得换热效果变差。比较 3 条曲线可以看出,气液比高于 5% 时,相同液体质量流量条件下,液体进口压力和气体进口压力相同,换热效果最好;当气液比低于 5% 时,气体压力略高于液体压力,换热效果较好,究其原因,气助式雾化液滴直径受耗气率和气体动能利用率共同作用,耗气率增大会减小液滴直径,但也会减小气体动能利用率,增大液滴直径。结合现有气助式雾化研究结论,在这种压力条件下雾化效果最优,进一步致使换热效果较好。综合 3 条曲线可知,根据气液比高于或低于 5%,选择液体压力等于或略低于气体压力,换热效果最为明显。

维持液体进口压力及质量流量恒定,改变氮气进口压力及流量进行实验,换热表面温度变化如图 4 所示。

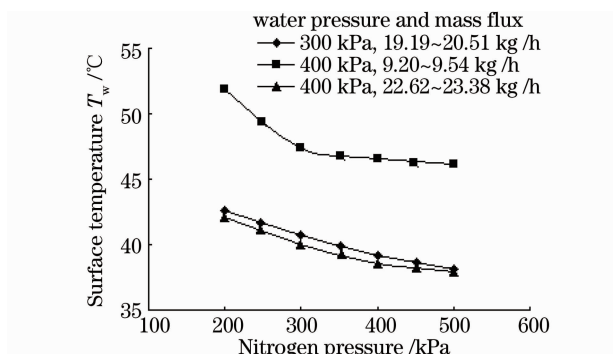


图 4 表面温度随气体压力变化

Fig. 4 Surface temperature changes with nitrogen pressure

从图 4 中液体压力 400 kPa, 流量 9.54 kg/h 的曲线可以看出,高气液比条件下,过大的增加气体压力(高于液体压力),虽然会增大气流对换热面蒸汽层的扰动,也会使得气体动能利用率 C 降低,不会明显增强雾化效果,也不会明显强化换热,相反会造成耗气率的增加;当液体流量是 19.19~23.38 kg/h,气液比低于 5% 时,气体压力略高于液体压力可以增强换热,如果过高增加气体压力,可以使得气液相对速度 u 增加,但气体动能利用率 C 会降低,雾化效果无明显优化,增大耗气率的同时却不能更好强化换热。实验结果可以看出,过大的增加气体压力,是可以增加气体对换热表面蒸汽层的扰动,但是也会影响液体雾化效果和雾滴在换热面的分布,综合效果并不能

强化换热,相反还会带来耗气率的增加。

3.2 温度均匀性

换热表面温度的均匀性对激光介质散热至关重要。为了研究表面温度均匀性方便,定义换热表面温度的标准差 $S(T)$ 为

$$S(T) = \sqrt{\frac{1}{n}[(T_1 - T_w)^2 + (T_2 - T_w)^2 + \dots + (T_n - T_w)^2]}, \quad (6)$$

$S(T)$ 越大表明表面温度波动越大,温度均匀性越差,反之温度均匀性越好。维持氮气压力 400 kPa 恒定,在不同液体进口压力下,调整喷嘴上调针的状态从而改变液体流量进行实验,研究液体的流量特性对换热表面温度均匀性的影响,结果如图 5 所示。

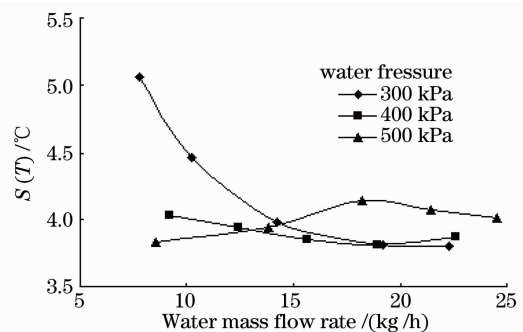


图 5 温度标准差随液体质量流量的变化

Fig. 5 Surface temperature standard deviation changes with liquid mass flow rate

图 5 表明,当液体进口压力低于气体压力时,气液比对换热表面温度均匀性影响很大,随着进口液体质量流量的增加,气液比降低,表面温度标准差 $S(T)$ 呈先下降再趋于平稳的变化趋势;当液体压力等于气体压力时,气液比对表面温度分布影响不大,但气液比在 5% 左右时表面温度最为均匀;当液体压力高于气体压力时,较小的液体流量,较大的气液比可以获得更为均匀的表面温度。综合 3 条曲线可知,表面温度均匀性受气液压力和气液比共同影响,液体压力低时,气液相对速度 u 大,气体对液滴扰动增强,极易造成液滴分布不均,通过增加液体流量,减小气液比,实现雾滴和换热面的更多的接触,可以有效降低表面温度不均匀度;液体压力等于气体压力时,气液比对表面温度均匀性影响不大;液体压力高于气体压力时,减小气液比也不会强化雾化效果,相反会因为液体流量过大,使得换热近似为射流冲击,温度均匀性变差。

针对不同液体进口压力及质量流量条件下,研究氮气进口压力及流量对温度均匀性的影响,结果

如图 6 所示。图中曲线表明,气液比过大时,导致雾滴直径增大和气体对液滴扰动增强,容易造成液滴分布不均,表面温度均匀性变差,尤其是气液压力相差过大时,这一现象更为明显。原因是气体压力过大,气体扰动增加,减小了液体与换热面的接触机会,造成液滴分布不均所致;气体压力过低,雾化效果减弱,换热近似为射流造成液滴有效覆盖面积减小。当液体流量为 19.19~23.38 kg/h,气液比较小,表面温度均匀性变好,尤其是当液体压力略低于气体压力时,表面温度更为均匀。气液比影响液体的流量,而气体压力影响雾化和出口速度,流量对温度均匀性影响较大,雾化的细度和雾滴均匀度对温度均匀性均有影响。

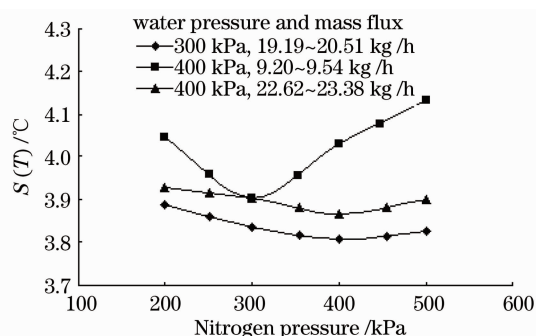


图 6 温度标准差随气体压力变化

Fig. 6 Surface temperature standard deviation changes with nitrogen pressure

4 结 论

本文在维持热流密度不变、喷嘴进口水温不变的前提下,实验研究了气助式雾化无沸腾换热能力及表面温度均匀性的影响因素,得出主要结论如下:

1) 气液比高于 5% 时,气体压力和液体压力相当,换热能力最强;气液比低于 5% 时,气体压力略高于液体压力,换热最好,过大的增加气体压力,会增大耗气率,不会明显强化换热。

2) 低气液比时,液体压力不高于气体压力,温度均匀性较好;高气液比时,液体压力略低于气体压力,最有利于温度均匀分布,增大液体流量,减小气液比,会使温度均匀性变差。

3) 液体压力等于气体压力时,气液比对温度均匀性影响不大。

参 考 文 献

1 Shao Jie, Li Xiaoli, Feng Yutong *et al.*. LD-end-pumped Nd: YVO₄ slab laser and its thermal effects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 497~501
邵 杰, 李小莉, 冯宇彤 等. 激光二极管端面抽运 Nd: YVO₄ 板

条激光器及其热效应[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 497~501
2 Shi Peng, Li Jinping, Li Long *et al.*. Influence of pump light distribution on thermal effects within Nd: YAG microchip laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 643~646
史 彭, 李金平, 李 隆 等. 抽运光分布对 Nd: YAG 微片激光器热效应的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 643~646
3 Zhang Xingyu, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu *et al.*. Study on thermal lens of Nd³⁺: YAG laser pumped by a laser diode[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(9): 777~781
张行愚, 赵圣之, 王青圃 等. 激光二极管抽运的激光器热透镜效应研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(9): 777~781
4 Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1605~1618
周寿桓, 赵 鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1605~1618
5 He Kunna, Wei Zhiyi, Zhang Zhiguo *et al.*. Overview on laser diode pumped solid-state laser with direct pumping scheme [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1679~1685
何坤娜, 魏志义, 张志国 等. 全固态激光直接抽运技术的发展和研究现状[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1679~1685
6 Ren Hongliang, Zhuang Lihui, Li Yinmei. Measurement of interaction potential between colloidal particles using dual optical tweezers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 151~155
任洪亮, 庄礼辉, 李银妹. 双光镊测量胶体微粒间相互作用势[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 151~155
7 Wang Xiao, Zhang Huizhong, Ding Guomin *et al.*. Laser transmission welding polypropylene plastics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 466~471
王 霄, 张惠中, 丁国民 等. 聚丙烯塑料激光透射焊接工艺[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 466~471
8 Tian Changqing, Xu Hongbo, Cao Hongzhang *et al.*. Cooling technology for high-power solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1686~1692
田长青, 徐洪波, 曹宏章 等. 高功率固体激光器冷却技术[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1686~1692
9 L. C. Chow, M. S. Schembey, M. R. Pais. High heat flux spray cooling [J]. *Annual Rev. Heat Transfer*, 1997, **8**: 291~318
10 A. G. Pautsch, T. A. Shedd. Spray impingement cooling with single-and multiple-nozzle arrays, part I: heat transfer data using FC-72[J]. *Internat. Heat and Mass Transfer*, 2005, **48**(15): 3167~3175
11 A. Pautsch, T. Shedd, G. Nellis. Thickness measurements of the thin film in spray evaporative cooling [C]. *ITHERM'04*, 2004, **1**: 70~76
12 J. Yang, L. Chow, M. Pais. Liquid film thickness and topography determination using fresnel diffraction and holography [J]. *Exp. Heat Transfer*, 1992, **5**(4): 239~252
13 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): 1973~1979
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*, 2009, **36**(8): 1973~1979
14 K. J. Choi, S. C. Yao. Mechanism of film boiling heat transfer of normally impacting spray [J]. *Internat. J. Heat and Mass Transfer*, 1987, **30**(2): 311~318
15 C. Sadtke, P. Stephan. Spray cooling on micro structured surface [J]. *Internat. J. Heat and Mass Transfer*, 2007, **50**(19-20): 4089~4097
16 Zhou Zhifu, Xin Hui, Chen Bin *et al.*. Evaporation characteristics of a single droplet in laser treatment of port wine stain in conjunction with cryogen spray cooling [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 952~956
周致富, 辛 慧, 陈 斌 等. 激光手术喷雾冷却中单个液滴蒸发特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 952~956
17 I. Mudawar, K. A. Estes. Optimization and predicting CHF in spray cooling of a square surface [J]. *J. Heat Transfer*, 1996, **118**(3): 672~679
18 A. H. Lefebvre. Energy considerations in twin-fluid atomization [J]. *J. Engineering for Gas Turbines and Power*, 1992, **14**(1): 89~92