

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0073-04

# 高功率固体激光器无沸腾喷雾冷却 温度均匀性实验研究

司春强<sup>1,2</sup> 梁楠<sup>1,2</sup> 田长青<sup>1</sup> 徐洪波<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190; <sup>2</sup> 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,分别对 3 个实心锥形喷嘴进行“无沸腾”喷雾冷却温度均匀性实验,研究了喷嘴几何特性、喷射高度、喷嘴进口压力对换热表面温度均匀性的影响。结果表明,换热表面温度标准差  $S(T)$  受喷嘴喷射口径、喷射高度、进口压力影响,而喷嘴锥角对其没有明显影响。

**关键词** 激光器;喷雾冷却;无沸腾;温度均匀性

**中图分类号** TK124;TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0073

## Experimental Study on Temperature Uniformity of Spray Cooling in Non-Boiling Regime for High-Power Laser

Si Chunqiang<sup>1,2</sup> Liang Nan<sup>1,2</sup> Tian Changqing<sup>1</sup> Xu Hongbo<sup>1</sup>

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

**Abstract** Keeping the heat flux and the temperature of water inlet constant, three full cone nozzles are applied to study the temperature uniformity of spray cooling in non-boiling regime. The influences of nozzle geometry characteristics, spray distance and inlet pressure are studied respectively. The results show that the standard deviation of the surface temperature is affected by nozzle diameter, spray distance and inlet pressure, while the nozzle cone angle has no significant impact on the temperature uniformity.

**Key words** lasers; spray cooling; non-boiling; temperature uniformity

### 1 引 言

固体激光器工作中会产生大量的无用热,为了保证激光器持续稳定运转,避免产生热透镜、应力、双折射等不良效应,必须解决激光器散热冷却问题<sup>[1]</sup>。抽运源、晶体棒的全腔式冷却、循环风冷、循环液冷等方法可以满足小功率激光器的需求<sup>[2,3]</sup>,但随着高功率激光在军民领域的广泛应用,激光器功率增大,热负荷越来越大<sup>[4]</sup>,传统的冷却方法散热能力已逐渐不能满足技术发展的需求。喷雾冷却具有换热系数大、温度均匀性好、过热度小、临界热流密度高和低冷却液流量等特点,相比冲击射流和池式沸腾有更高的换热系数和临界热流密度(CHF),是一种非常有效的冷却

方式<sup>[5]</sup>,得到越来越多的关注。

Pautsch 等<sup>[6]</sup>用压力式喷嘴试验研究了体积流量对换热能力的影响,体积流量的增加会导致表面液膜厚度的降低;在单喷嘴及四喷嘴实验中用震荡红外温度计对加热面的对流换热系数分布进行了测量,发现换热系数沿喷雾中心向四周递减<sup>[7]</sup>;Sodtke 等<sup>[8]</sup>实验研究了表面粗糙度对换热系数的影响,结果表明具有微小粗糙结构的表面换热效果好于平滑表面;芦秋敏等<sup>[9]</sup>对加热面、液膜、液滴之间建立能量方程,给出了换热系数与壁面温度沿径向的分布;王亚青等<sup>[10]</sup>通过实验研究了流量、表面粗糙度等因素对换热能力的影响,提出了无沸腾喷雾冷却受流

收稿日期: 2009-11-30; 收到修改稿日期: 2010-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(50676099)资助课题。

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方面的研究。E-mail: cqsi@mail.ipc.ac.cn

导师简介: 田长青(1965—),男,博士,研究员,主要从事制冷新技术方面的研究。E-mail: chqtian@mail.ipc.ac.cn

量和喷射速度共同影响,粗糙表面有着更好的换热能力。更多研究在于探索影响换热系数的因素,但是实验结果表明在换热面存在温度不均匀性,这种换热表面温度不均匀严重时会引起散热器局部过热<sup>[1]</sup>,进而导致整个系统因局部过热而温控失效,甚至造成不可估量的损失。

相比喷雾冷却中的沸腾换热,“无沸腾”喷雾冷却以降低换热能力为代价,改善了换热表面的温度不均匀性,但是温度不均匀性仍然存在。本文用实验方法在给定热流密度的前提下,对无沸腾喷雾冷却中发热壁面温度非均匀性进行了测量。通过对数据分析,对壁面温度非均匀现象的成因及影响因素进行了综合剖析。

## 2 实验系统

实验系统如图 1 所示,主要由喷嘴、模拟热源、升降装置、水泵、恒温水箱和数据采集系统构成。实验系统采用开放式系统,恒温水箱提供恒温蒸馏水,通过水泵提压进入喷嘴雾化后喷射到模拟热源表面,一部分蒸馏水对流换热后经喷雾室底部通道流回恒温水箱,一部分蒸馏水蒸发后以蒸气形式散入大气。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(图 2)。为保证模拟热源垂直方向的一维导热性,底座截面 32 mm×32 mm 经 45°棱台渐变成 10 mm×10 mm 截面。热源四周包裹 15 mm 厚绝热材料,热源和喷雾室接触面添加聚四氟乙烯隔热垫,并用耐高温胶进行密封。

在模拟热源 A、B、C、D 四个侧面的每个侧面沿中心线自上而下布有 4 个直径为 0.5 mm 的 T 型热电偶(共计 16 个),热电偶距离换热表面的距离分别为 1, 6, 11 和 16 mm(图 2)。A 面热电偶进入深度为 5 mm, B 面进入深度为 4 mm, C 面进入深度为 3 mm, D 面进入深度为 2 mm。实验段中设置热电偶测量进入喷嘴前及换热后的水温。数据采集系统

由数据采集仪和 PC 机组成,用于采集和记录以上热电偶测量数值。不同压力下喷嘴流量及换热后流入恒温水箱的水流量采用称重法测量 5 次取其平均值。

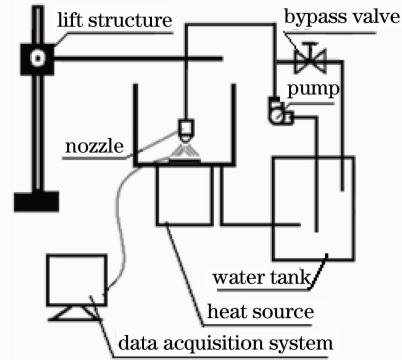


图 1 实验系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

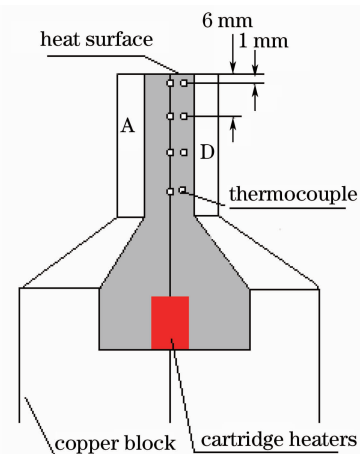


图 2 模拟热源(局部剖视)

Fig. 2 Heat unit (partial cutaway view)

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的蒸馏水,保持喷嘴进口水温控制精度在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。

实验中选用某公司生产的微细雾化喷嘴,表 1 为生产厂家提供的在 700 kPa(相对压力)压力下喷嘴的雾化参数。

表 1 喷嘴雾化参数

Table 1 Parameters of nozzles atomization

No.	Nozzle diameter /mm	Velocity /(m/s)	Flux /(mL/min)	Cone angle /( $^{\circ}$ )	Partial size / $\mu\text{m}$
1	0.28	15.34	56.67	60	
2	0.38	16.72	113.83	60	20~40
3	0.38	17.46	118.83	45	

### 3 实验结果

实验中,模拟热源表面热流密度一直维持在  $103 \pm 1 \text{ W/cm}^2$ ,保持换热表面无沸腾发生。喷嘴进口水温设定为室温  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 。针对不同喷嘴类型、喷射高度、喷嘴进口压力进行无沸腾喷雾换热实验。实验中所有数据均在稳定状态(热电偶数值偏差在  $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$  以内而且持续时间达  $30 \text{ min}$  以上,压力数值均是在一个标准大气压下的相对压力)读取。根据 A, B, C, D 各自截面上的热电偶测量值,利用 Fourier 导热定律可得到换热表面中心及距离中心  $1, 2$  和  $3 \text{ mm}$  4 个径向温度  $T_1, T_2, T_3, T_4$  的数值,为了研究方便,定义换热表面温度的平均温度  $\bar{T}$  及温度标准差  $S(T)$  为

$$\bar{T} = \frac{1}{n}(T_1 + T_2 + \dots + T_n). \quad (1)$$

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

#### 3.1 喷嘴几何特性影响

喷嘴的喷口孔径、锥角等几何因素对液滴的雾化细度、喷雾密度等有重要影响,通过对实验中 1, 2, 3 号喷嘴在  $700 \text{ kPa}$  进口压力、喷射高度为  $8 \text{ mm}$  条件下实验,结果如图 3 所示。

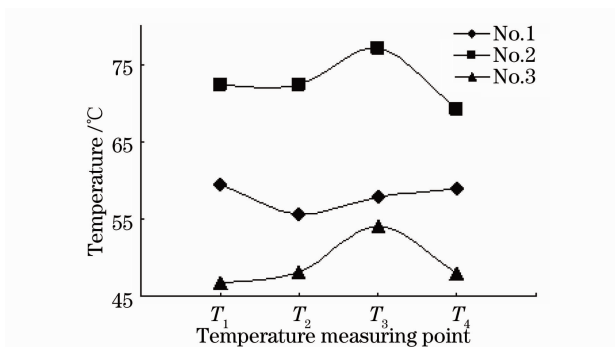


图 3 喷嘴几何特性对换热表面温度分布的影响  
Fig. 3 Influence of nozzle geometry characteristics on surface temperature

图 3 中 1 号喷嘴和 2 号喷嘴曲线表明在相同锥角、相同进口压力及喷射高度条件下,喷口孔径越小,换热表面温度越均匀;2 号喷嘴和 3 号喷嘴曲线表明在相同喷嘴孔径、相同进口压力及喷射高度条件下,锥角对换热表面温度均匀性影响不大。究其原因,相同条件下,喷嘴孔径小,雾化细度好,喷雾密度均匀,有利于均匀换热,保持换热表面的温度均匀特性;锥角不同,更多是使得喷雾覆盖区域不同,在

完全覆盖的区域里,锥角对换热表面温度均匀性影响不大。

#### 3.2 喷射高度的影响

以 2 号喷嘴为例,在喷嘴进口压力维持在  $600 \text{ kPa}$ ,研究不同喷射高度下,换热表面温度的平均温度  $\bar{T}$  及温度标准差  $S(T)$ ,实验结果如图 4 所示。

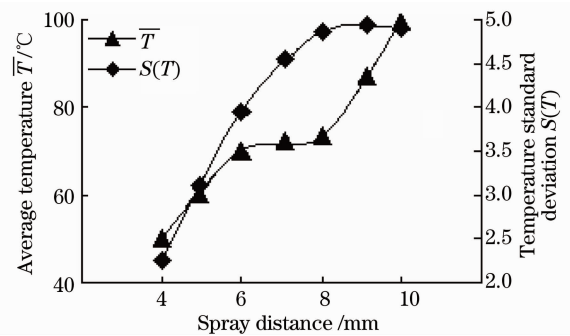


图 4 喷射高度对换热表面温度均匀性的影响  
Fig. 4 Influence of spray distance on the surface temperature uniformity

从图 4 中看出,随着喷射高度的增加,表面平均温度  $\bar{T}$  增加,在喷射高度为  $6 \sim 8 \text{ mm}$  时,  $\bar{T}$  变化不大,这表明在对无沸腾喷雾冷却换热中,存在一个换热系数相对稳定的喷射高度段,在稳定的喷射高度段内,喷射高度对换热的影响不大。换热表面温度标准差  $S(T)$  随着喷射高度增加而急剧升高,说明表面温度不均匀状况随着喷射高度增加愈加剧烈,主要是因为高度增加,喷射到换热表面的有效雾滴数量减少,喷雾密度降低,致使换热表面出现温度梯度;随着高度进一步增加,  $S(T)$  趋于稳定,出现了恒定的温度不均匀性,究其原因是高度增加到一定程度,喷射到换热表面的雾滴更多来自喷雾区域的中心部位,高度对其影响不大,喷雾密度相对稳定,出现了恒定的温度不均匀性。

#### 3.3 喷嘴进口压力的影响

以 2 号喷嘴为例,当喷射高度维持在  $8 \text{ mm}$  时,研究不同喷嘴进口压力对换热表面的平均温度  $\bar{T}$  及温度标准差  $S(T)$  的影响,实验结果如图 5 所示。

图 5 表明,喷嘴进口压力对换热表面平均温度  $\bar{T}$  影响不大,也说明改变进口压力不是提高无沸腾喷雾冷却换热效率的有效途径。从温度标准差  $S(T)$  变化曲线可以看出,压力对换热表面温度不均匀性有很大影响,压力越高,换热表面温度不均匀性越小,换热表面的温度越接近均一稳定,有利于激光器的散热应用。分析原因,压力越高,液滴喷射速度越快,单位时间内换热表面的喷雾密度越大,大量的

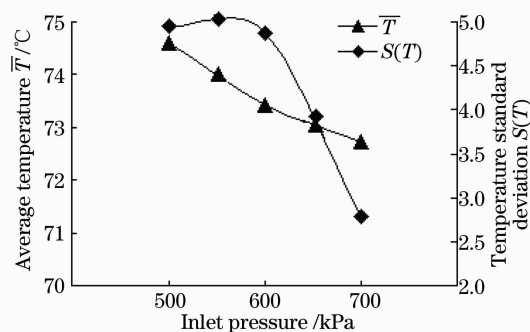


图5 喷射压力对换热表面温度均匀性的影响

Fig. 5 Influence of inlet pressure on the surface temperature uniformity

雾滴同时喷射到热表面,导致热表面径向温度分布均匀。综合来看,虽然增加压力可以在一定程度上降低换热表面的温度不均匀性,但是对换热系数影响不大,从高效角度看,喷雾冷却中不宜过分用增加压力来实现温度均匀性的目的。

## 4 结 论

在维持热流密度不变、喷嘴进口水温不变的前提下,实验研究了无沸腾工况下喷嘴类型、压力及喷射高度对换热表面温度及其均匀性的影响,得出主要结论如下:

1) 喷嘴口径对换热表面温度不均匀性影响较大,锥角对换热表面温度不均匀性影响不大。

2) 随喷射高度增加,会出现一个换热能力相对稳定的喷射高度段。

3) 换热表面温度不均匀性随着高度增加而增加,当喷射高度增加到一定程度时,换热表面出现了恒定的温度不均匀特性。

4) 喷嘴进口压力对温度不均匀性有重要影响,但是压力的增加对换热系数影响不大,所以不宜过分采用增加喷嘴进口压力来实现温度均匀性。

## 参 考 文 献

- 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
- 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
- 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
- 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
- L. C. Chow, M. S. Schembey, M. R. Pais. High heat flux spray cooling [J]. *Annual Reviews of Heat Transfer*, 1997, **8**(8): 291~318
- A. G. Pautsch, T. A. Shedd, G. Nellis. Thickness measurements of the thin film in spray evaporative cooling [C] Proc. of Thermal and Thermo mechanical Phenomena in Electronic Systems, ITherm '04, 2004, **1**: 70~76
- A. G. Pautsch, T. A. Shedd. Spray impingement cooling with single-and multiple-nozzle arrays, part I: heat transfer data using FC-72 [J]. *Int. J. Heat Mass Tran.*, 2005, **48** (15): 3167~3175
- C. Sadtke, P. Stephan. Spray cooling on micro structured surface [J]. *Int. J. Heat Mass Tran.*, 2007, **50** (19-20): 4089~4097
- Lu Qiumin, Lei Shuye. Study on mechanisms and model of heat transfer in spray cooling [J]. *J. Engineering Thermophysics*, 2005, **26**(5): 817~819  
芦秋敏, 雷树业. 雾化喷射冷却的机理及模型研究[J]. *工程热物理学报*, 2005, **26**(5): 817~819
- 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*, 2009, **36**(8): 1973~1978
- 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