

激光手术中喷嘴尺寸对制冷剂闪蒸喷雾冷却表面传热特性的影响

周致富¹ 王锐¹ 王国祥^{1,2} 郭烈锦¹ 陈斌^{1*} 王跃社¹

(¹西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

²美国亚克朗大学机械工程系, 亚克朗 俄亥俄 44325

摘要 制冷剂闪蒸喷雾冷却(CSC)已经成为激光治疗葡萄酒色斑等皮肤病手术中的标准冷却辅助手段。为优化喷嘴设计,进一步增进冷却效率和改善治疗效果,搭建了制冷剂闪蒸瞬态喷雾冷却实验台,设计了8个不同内径和长度的直管型喷嘴,采用先进的磁控溅射沉积薄膜热电偶测温方法,应用杜哈梅尔定理计算表面热流密度,定量研究了不同喷嘴对冷却表面传热特性的影响,并对其传热规律和雾化特性进行了系统的分析比较。此外,提出了评价喷嘴冷却效率标准,给出了采用不同几何尺寸喷嘴时冷却表面换热量随喷雾距离的变化规律。

关键词 激光技术;制冷剂闪蒸喷雾冷却;激光皮肤手术;喷嘴;传热特性

中图分类号 TK124; R758.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0303005

Effect of Nozzle Size on the Surface Heat Transfer Dynamics during Cryogen Spray Cooling in Dermatologic Laser Surgery

Zhou Zhifu¹ Wang Rui¹ Wang Guoxiang^{1,2} Guo Liejin¹ Chen Bin¹ Wang Yueshe¹

(¹State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

²Department of Mechanical Engineering, University of Akron, Akron, Ohio 44325, USA

Abstract Cryogen spray cooling (CSC) in conjunction with laser therapy has been the clinical standard for hypervascular lesions. In order to optimize nozzle and enhance the cooling efficiency to improve the treatment of laser surgery, an experimental system of transient cryogen spray cooling is built and eight straight-tube nozzles with different diameter and length are designed. A thin film thermocouple is directly deposited on the cooling surface to measure the surface temperature during the cryogen spray cooling. An analytical expression based on Fourier's law and Duhamel's theorem is used to calculate surface heat flux from the temperature measurements. Based on the measurements and calculations, the effect of the eight straight-tube nozzles on the heat transfer dynamics of the cooling surface and the atomization characteristics are comparatively studied. Additionally, the criterion to evaluate the cooling efficiency of different nozzles is proposed, and the variation of heat extraction from the cooling surface with different spray distances by different nozzles is given.

Key words laser technique; cryogen spray cooling; dermatologic laser surgery; nozzles; heat transfer dynamics

OCIS codes 140.6810; 140.2050; 170.1870

1 引言

葡萄酒色斑(PWS)是一种先天性、低血流量的

真皮内血管畸形,新生儿发病率约为0.3%^[1]。PWS常位于面部或颈部等人体暴露部位,损坏患者

收稿日期: 2011-10-14; 收到修改稿日期: 2011-11-21

基金项目: 长江学者讲座教授配套项目(2006-2009)和中央高校基本科研业务费专项基金(2011jdhz35)资助课题。

作者简介: 周致富(1984—),男,博士研究生,主要从事闪蒸喷雾实验和液滴蒸发理论等方面的研究。

E-mail: xjtuzhou@yahoo.cn

导师简介: 王国祥(1963—),男,教授,主要从事生物多相流方面的研究。E-mail: gwang@uakron.edu

* 通信联系人。E-mail: chenbin@mail.xjtu.edu.cn

的容貌并影响其生活质量和身体健康。激光已经成为治疗 PWS 的首选方法,其原理是根据激光的选择性吸收特性^[2],通过选择特定波长的激光^[3~5],加热病变血管并使其消融,达到治愈的目的。但是,表皮中存在的黑色素对激光也有较强的吸收,可能造成表皮的热烧伤,同时降低达到病变血管的激光能量而影响治疗效果。针对这一问题,Nelson 等^[6]提出了制冷剂闪蒸喷雾冷却(CSC)方法。目前,临床上 CSC 一般使用杜邦(R134a)制冷剂,喷雾冷却的时间通常为几十毫秒。CSC 能够在几个毫秒内快速将表皮温度降低 40 ℃以上^[7],而对真皮内的血管温度影响较小,从而能够在激光手术进行中对表皮进行有效的冷保护,提高治疗激光剂量、改善治疗效果。

由于 CSC 在激光皮肤手术中的成功应用,一些学者对 CSC 的表面传热特性进行了研究。Aguilar 等^[8~11]以有机玻璃模拟人体材料,采用微型热电偶及在喷雾表面覆盖铝膜的测温方法,研究了喷雾时间、喷雾距离、喷雾角度、喷雾背压等参数对表面传热的影响,发现喷雾时间和喷雾角度对表面传热影响较小,而喷雾距离对表面传热影响较大,适当降低喷雾背压,有利于增加冷却效率。在喷嘴研究方面,Verkruysee 等^[12]研究了稳态喷雾条件下 4 种不同长度和内径的直管喷嘴的冷却效率,发现喷嘴长度对冷却效率影响较小,而喷嘴内径则影响较大,喷嘴内径越大,其冷却效率越高。Aguilar 等^[13]同样发现喷嘴长度对雾化特性没有影响。Brian 等^[14]研究了 6 种不同形式的喷嘴对制冷剂质量流量、雾化效果(制冷剂颗粒数量分布密度和颗粒大小)以及表面吸收热量的影响,发现从皮肤表面提取的热量与制冷剂颗粒大小以及颗粒分布密度呈非线性关系。上述研究者对 CSC 表面传热特征的研究,采用的都是外部嵌入式热电偶测温方式,且缺乏对临床用直管喷嘴几何尺寸对 CSC 传热特征影响的系统研究。

为进一步优化喷嘴设计,提高冷却效果,本研究在前理论^[15,16]和实验研究^[17~19]的基础上,针对目前激光皮肤手术中冷却用的直管喷嘴,设计制造了 8 个不同内径和长度的不锈钢直管喷嘴,采用自行开发的喷涂薄膜热电偶表面瞬态温度测量及数据处理方法^[18],并应用杜哈梅尔定理计算表面热流密度和传热系数,系统研究了直管型喷嘴几何尺寸对 CSC 表面传热特性的影响。

2 实验及数据处理方法

2.1 实 验

搭建了制冷剂闪蒸喷雾冷却实验台,实验系统如图 1 所示,主要由制冷剂储罐、微型快速反应电磁阀、自制喷嘴、三维电动平移台以及连接用的标准高压软管组成。其中,实验用的制冷剂为 R134a,电磁阀开关时间小于 5 ms,可以精确控制瞬态喷雾时间,一般为几十毫秒。喷嘴采用 2 种不同长度和 4 种不同内径共 8 个直管型喷嘴,详细参数见表 1。三维电动平移台可以精确调整喷嘴与冷却基质的相对位置。冷却基质选用尺寸为 50 mm×50 mm×5 mm 的环氧树脂块,其热物性与人体皮肤近似^[20]。

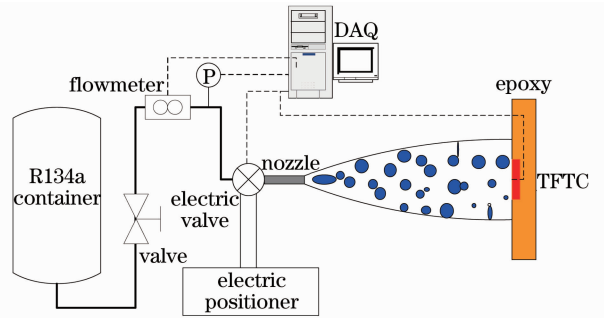


图 1 制冷剂闪蒸瞬态喷雾冷却实验系统

Fig. 1 Experimental system of cryogen spray cooling

表 1 8 个直管喷嘴的几何尺寸

Table 1 Size of eight straight-tube nozzles

Nozzle size (diameter×length /mm×mm)			
0.48×40	0.96×40	1.21×40	1.75×40
0.48×80	0.96×80	1.21×80	1.75×80

与常规的外部嵌入式热电偶测温不同,本文利用磁控喷射技术直接在环氧树脂表面喷涂厚度为 2 μm 的 T 型薄膜热电偶(TFTC)。与常规热电偶相比,TFTC 具有热容小、响应时间快(温度变化率超过 100 ℃/μs),且对被测物体表面的温度场无干扰等优点^[18]。瞬态喷雾流量通过微型流量计测量,温度和流量信号的读取以及电磁阀控制信号的产生都由 NI 数据采集卡完成,信号控制和数据采集及处理程序由 Labview 编写,可以实现电磁阀开启和温度信号采集的精确同步。

文献[8,9]的研究结果表明,喷雾时间对 CSC 表面传热特性影响较小,故本实验中 CSC 瞬态喷雾时间设为定值(研究喷嘴内径和长度的影响时分别设置为 60 ms 和 20 ms),重点研究不同距离下各种喷嘴的传热规律。实验时,环境温度为 20 ℃,相对湿度为 20%(实验环境为冬天,室内开暖气,湿度值

由温湿度记录仪 MicroLogPRO-EC650 测得,湿度测量误差为 $\pm 3\%$ 。

2.2 数据处理方法

采用薄膜热电偶测量冷却基质的表面温度后,需要由得到的温度信息进一步计算表面热流密度和传热系数。由于喷雾时间较短,基质表面堆积制冷剂层厚度不超过 $200\ \mu\text{m}$,远小于制冷剂喷雾宽度(直径约 $2\ \text{cm}$),在基质表面,温度沿径向传递相比沿厚度方向传递可忽略不计,所以可将基质的热传导视为沿基质厚度方向的一维导热问题^[20]。又由于薄膜热电偶直接喷涂于环氧树脂基质表面,可认为薄膜热电偶所测量温度即是环氧树脂基质表面温度,从而避免了求解导热反问题的复杂性。测得表面温度后,可应用杜哈梅尔定理计算表面热流密度。文献[21]详细描述了运用杜哈梅尔积分法解决此类问题,并给出了表面热流密度的计算式:

$$q(t) = \sqrt{\frac{\rho c \lambda}{\pi}} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-\Theta}} \frac{dT(\Theta)}{d\Theta} d\Theta, \quad (1)$$

式中 q 为热流密度, T 为温度, ρ 、 c 、 λ 分别为环氧树脂的密度、比热容和导热系数, Θ 为时间, t 为喷雾结束时间。为减弱计算结果的振荡幅度,采用 11 点数字式方法对温度数据滤波,即 t_i 时刻的温度值由 t_i 前后 11 个时刻 ($t_{i-5}, t_{i-4}, \dots, t_i, t_{i+1}, \dots, t_{i+5}$) 的测量温度值经如下插值获取:

$$Y_i = \frac{1}{429} (-36T_{i-5} + 9T_{i-4} + 44T_{i-3} + 69T_{i-2} + 84T_{i-1} + 89T_i + 84T_{i+1} + 69T_{i+2} + 44T_{i+3} + 9T_{i+4} - 36T_{i+5}), \quad (2)$$

式中 Y_i 为滤波后 t_i 时刻的平均温度。

3 实验结果

3.1 喷嘴内径对传热特性的影响

为比较喷嘴内径对 CSC 表面传热特性的影响,固定喷嘴长度为 $40\ \text{mm}$,喷雾时间为 $60\ \text{ms}$,喷雾距离分别为 $z=10, 30, 50\ \text{mm}$ 。图 2 分别为 3 个不同喷雾距离下喷嘴内径对 CSC 环氧树脂表面温度的影响。首先,从图 2 可以看出,当制冷剂液滴撞击环氧树脂表面瞬间,表面温度快速下降(所需时间为几个毫秒,此为快速降温阶段)并到达某一低温,之后在表面开始形成制冷剂液膜,表面温度维持在低温阶段并逐渐降低至最低温度(所需时间为几十毫秒至上百毫秒,此为液膜残留阶段),当制冷剂液膜完全蒸发后,温度开始回升(此为回温阶段)。其次,表面温度变化受喷雾距离和喷嘴内径影响较大,表现

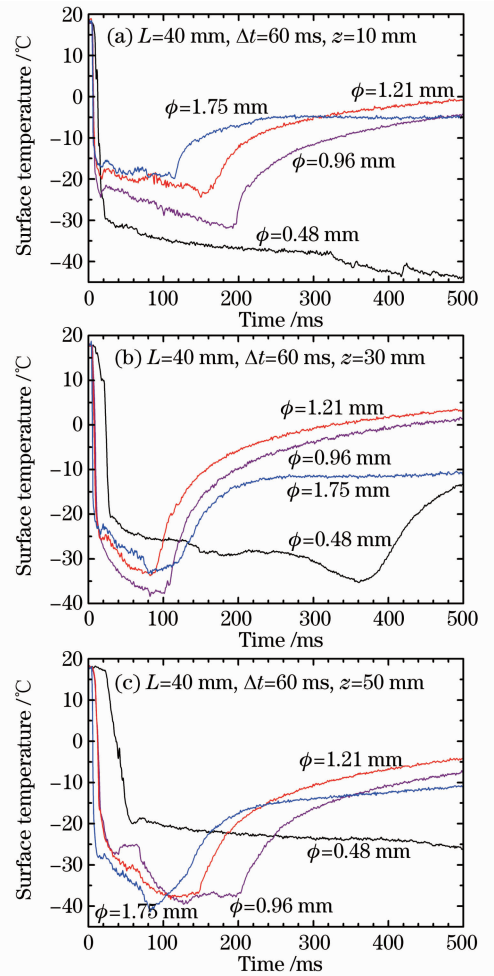


图 2 不同喷雾距离下喷嘴内径对 CSC 表面温度的影响

Fig. 2 Effect of nozzle diameter on the temperature vary with time under different spray distances

为两方面:1) 喷嘴内径对表面温度变化影响与喷雾距离无关。在同样喷雾距离下,快速降温阶段所需时间、液膜残留时间以及回温时间随喷嘴内径减小而增加;2) 喷嘴内径对表面温度变化影响随喷雾距离不同而变化,当喷雾距离为 $10\ \text{mm}$ 时[图 2(a)],表面最低温度随喷嘴内径增加而升高,当距离为 $30\ \text{mm}$ 时[图 2(b)],表面最低温度随喷嘴内径增加先降低再上升,当距离为 $50\ \text{mm}$ 时[图 2(c)],表面最低温度随喷嘴内径增加而下降。

图 3 示出了经杜哈梅尔定理计算得到的不同距离下喷嘴内径对表面热流密度 q 随时间的变化曲线。 q 先随时间快速增加上升到最大值(q_{max} ,与快速降温阶段相对应),然后快速下降到某一值附近 $q_{\text{sec-max}}$ 并维持一段时间(与液膜残留时间相对应)。当液膜完全蒸发后, q 快速下降为 0 (与表面回温阶段相对应)。喷嘴内径对表面热流密度的影响与喷雾距离无关,在同一距离下, q_{max} 随喷嘴内径增加而上

升,达到 q_{\max} 的时间随喷嘴内径增加而减小。从图 3 还可以得知, q_{\max} 随喷雾距离变化受喷嘴内径影响较大,当喷嘴内径较大时(1.21 mm 和 1.75 mm), q_{\max} 随喷雾距离增加先上升而后下降,距离为 30 mm 时, q_{\max} 为最大,而对于较小内径的喷嘴(0.48 mm 和 0.96 mm), q_{\max} 随喷雾距离增加而单调下降,距离为 10 mm 时, q_{\max} 为最大。

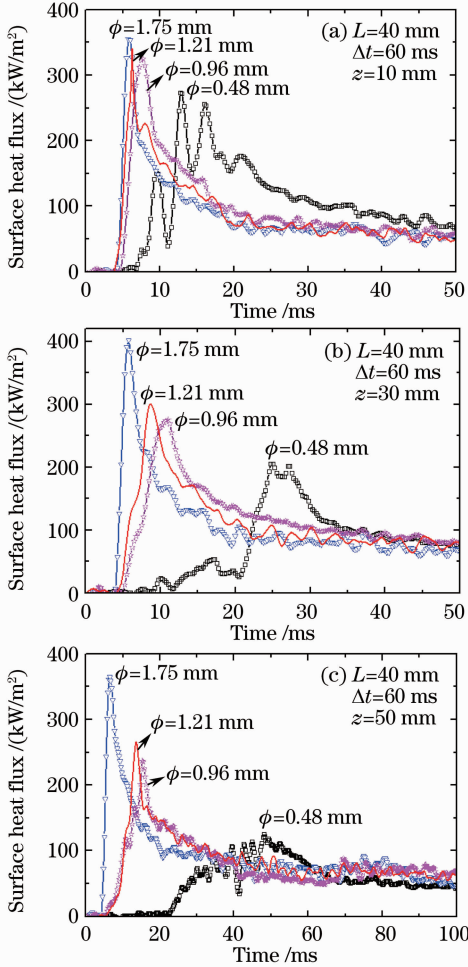


图 3 不同喷雾距离下喷嘴内径对 CSC 表面热流密度的影响

Fig. 3 Effect of nozzle diameter on the heat flux variation with time under different spray distances

3.2 喷嘴长度对传热特性的影响

从喷嘴内径对 CSC 表面传热特性的影响研究发现,对于小内径喷嘴,喷雾距离越近 q_{\max} 值越大 ($z=10$ mm),而对于大内径喷嘴, q_{\max} 处在中间喷雾距离时最大 ($z=30$ mm),故在比较喷嘴长度对 CSC 表面传热特性影响时,选取最小和最大的两种内径喷嘴,内径分别为 0.48 mm 和 1.75 mm。对于小内径喷嘴,喷雾距离设定为 10 mm,而对于大内径喷嘴喷雾距离设定为 30 mm,此时二者的 q_{\max} 为最大

值,喷雾时间统一设置为 20 ms。

图 4 示出了喷嘴长度对小内径喷嘴 CSC 表面温度和热流密度影响的比较结果。对小内径喷嘴而言,从图 4(a)中可以看出,喷嘴长度主要影响液膜残留时间和回温速度,而对表面最低温度和降温速度影响较小,喷嘴越长,液膜残留时间越长,回温越缓慢。从图 4(b)可知,喷嘴长度对表面热流密度最大值 q_{\max} 和达到 q_{\max} 所需的时间都有较大影响,长喷嘴的 q_{\max} 较小,达到 q_{\max} 所需时间较长。

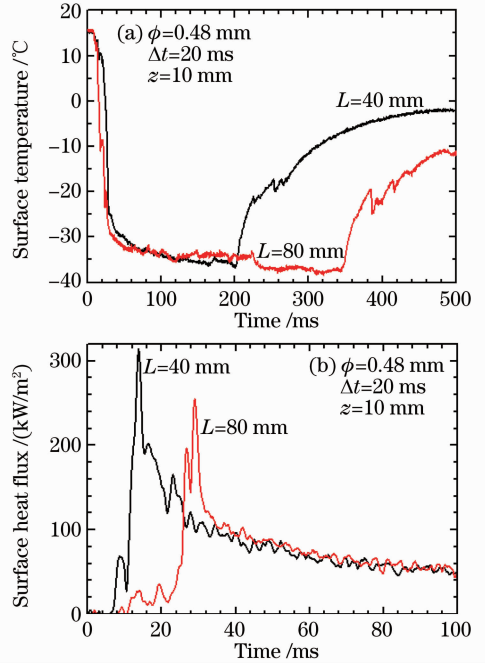


图 4 喷嘴长度对小喷嘴 CSC 表面传热特性的影响。

(a) 温度随时间的变化; (b) 热流密度随时间的变化
Fig. 4 Effect of nozzle length on the variation of (a) temperature and (b) heat flux with time

图 5 为大内径喷嘴条件下,喷嘴长度对 CSC 表面温度和热流密度的影响。从图 5(a)可知,喷嘴长度只对表面最低温度有较大影响,长度越大,最低温度越小,而对液膜残留时间和回温速度影响很小,在快速降温阶段温度随时间变化基本一致。由图 5(b)看出,喷嘴长度只对热流密度最大值 q_{\max} 有较大影响,而对达到 q_{\max} 所需时间基本没有影响,喷嘴长度越大, q_{\max} 越大。

4 讨 论

4.1 喷嘴雾化特性对表面传热特性的影响

喷嘴内径和长度不仅影响喷雾流量大小,而且对喷雾特性影响较大,二者耦合在一起造成瞬态喷雾冷却表面传热特性不同。

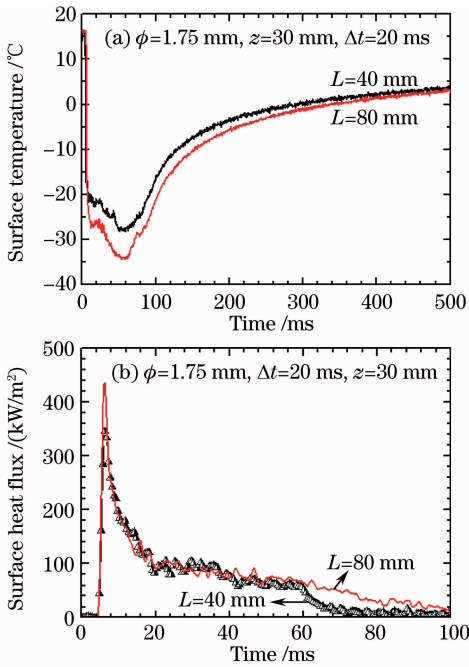


图5 喷嘴长度对大喷嘴 CSC 表面传热特性的影响。

(a) 温度随时间的变化; (b) 热流密度随时间的变化

Fig. 5 Effect of nozzle length on the variation of

(a) temperature and (b) heat flux with time

通过实验结果分析,喷嘴内径对于 CSC 表面传热特性的影响主要表现为:1) 当喷雾距离较近时,表面最低温度随喷嘴内径减小而降低,随着喷雾距离增加,小内径喷嘴的最低温度一直上升,而大内径喷嘴的最低温度先下降然后再上升;2) q_{\max} 随喷嘴内径增加而增加,液膜残留时间以及到达 q_{\max} 所需时间则随喷嘴内径增加而减小,与喷雾距离无关。研究喷嘴长度对 CSC 表面传热特性的影响发现,在最佳喷雾距离下(即某一喷嘴的 q_{\max} 为最大),对于小内径喷嘴,较短的喷嘴 q_{\max} 越大,到达 q_{\max} 所需时间越短;对于大内径喷嘴,较长的喷嘴 q_{\max} 越大,到达 q_{\max} 所需时间与长度无关。喷嘴内径和长度对 CSC 表面传热特性的影响是由喷嘴对 CSC 的雾化特性决定的,Verkruysee 等^[12]的研究结果证实了这一观点,其研究发现,大内径的喷嘴喷雾雾化效果较差,喷雾锥角小,产生的液滴直径和速度都比较大,为普通的射流,而对于内径较小长度较长的细长型喷嘴,喷雾雾化效果好,喷雾锥角大,液滴直径和速度都比较小,称之为雾化喷雾。本研究小组对不同喷嘴的雾化特性也进行了实验研究^[17,19],使用热电偶和相位多普勒粒子分析仪(PDPA)测量了喷雾液滴的温度以及直径和速度,结果同样支持了上述观点。雾化较好的小喷嘴产生的制冷剂液滴,蒸发速率快,由于蒸发需要大量的潜热,液滴温度下降更

快,所以在喷雾距离较近时,表面最低温度更低。但是由于其速度和直径都小,故到达冷却表面的时间较长,且由于动量小,细小液滴容易在表面形成液膜,阻碍换热。雾化较差的大喷嘴产生的液滴蒸发速率相对较慢,而直径和速度都较大,所以适当增加喷雾距离,可使表面温度达到最低和热流密度峰值 q_{\max} 达最大,由于液滴的动量大,对冷却表面的撞击较强,对形成的制冷剂液膜有较强的冲刷作用,故其液膜残留时间短,换热效率较高。

4.2 喷嘴的选取

临床上进行激光手术通常采用的激光脉冲持续时间为 0.5~1.5 ms,所需的 CSC 喷射持续时间为 10~100 ms,制冷剂对皮肤的有效冷却时间为 100 ms 左右。因此,提出可将 100 ms 内的冷却表面累积放热量作为判断不同喷嘴冷却效果的标准。由于喷射持续时间对喷嘴选取影响较小,在本实验中,固定喷射持续时间 $\Delta t=60$ ms,定义 100 ms 内基质单位面积放热量 Q_{100} 作为衡量不同喷嘴喷雾冷却效果的参数:

$$Q(t) = \int_0^{t_{100}} q(t) dt. \quad (3)$$

研究不同距离下实验所用的 8 组直管喷嘴的冷却效果,结果如图 6 所示。

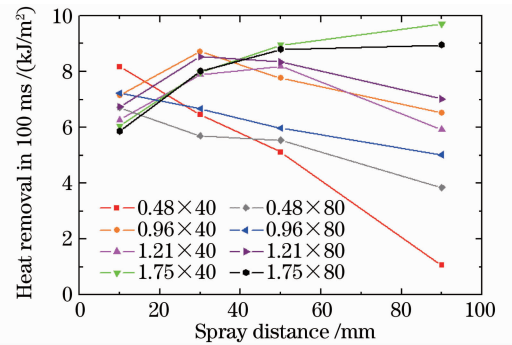


图6 8组直管喷嘴单位面积放热量 Q_{100} 随喷射距离的变化

Fig. 6 Variation of heat extraction from the cooling surface during the first 100 ms of eight different nozzles with the spray distances

根据 Q_{100} 与喷雾距离的变化关系,可以将 8 个喷嘴分为三组:第一组为 0.48×40、0.48×80、0.96×80 3 个细长型喷嘴, Q_{100} 随喷雾距离增加单调减小。此类喷嘴喷射雾化最好,液滴蒸发速率快,直径和速度较小,但液滴动量不足,易在冷却表面形成液膜。使用此类喷嘴冷却时,应尽量减小喷雾距离;第二组为 1.75×40、1.75×80 两个粗大型喷嘴, Q_{100} 随喷雾距

离增加而单调增加。此类喷嘴喷射雾化效果最差,液滴蒸发速率慢,直径和速度较大,液滴动量大,能够对液膜形成较强的冲击,液膜残留时间短。冷却时,可以适当增加喷雾距离,以提高表面换热量;第三组为 0.96×40 、 1.21×40 、 1.21×80 3 个中型喷嘴, Q_{100} 随喷雾距离先增加而后减小。此类喷嘴雾化效果介于上述两组之间,应选择最佳的中间喷雾距离 ($z=30$ mm), 此时的表面换热量最大。

5 结 论

针对激光皮肤手术中制冷剂闪蒸瞬态喷雾冷却表面传热问题,搭建了实验台,应用磁控溅射技术喷涂薄膜热电偶快速准确测量表面温度,利用杜哈梅尔定理计算冷却表面热流密度。为了优化喷嘴设计,进一步提高冷却效率,对 8 个不同内径和长度直管型喷嘴的表面传热特性进行了系统的对比研究,并提出了判断不同喷嘴冷却效果的标准,为 CSC 在临床应用时对喷嘴的选取和喷雾距离的调整给出了指导建议,得到的主要结论如下:

1) 喷嘴内径和长度对 CSC 表面传热特性都有影响。一方面,在相同喷嘴长度下,内径对冷却表面最低温度的影响随喷雾距离的不同而不同,而表面热流密度峰值、液膜残留时间以及到达表面热流密度峰值所需时间随喷嘴内径的变化则与喷雾距离无关;另一方面,在最大热流密度峰值喷雾距离下,喷嘴长度对细长型喷嘴和粗型喷嘴的表面传热特性影响不一致;

2) 可将 100 ms 内的冷却表面累积放热量作为判断不同喷嘴冷却效果的标准。对于喷嘴的选取,总体来说,细长型的喷嘴雾化效果最好,近距离喷雾条件下其冷却效果好,大喷嘴的雾化效果最差,可适当增加喷雾距离以提高表面换热量,而对于中间尺寸的喷嘴,可以选择最佳的中间喷雾距离,此时换热效率最佳。

参 考 文 献

- 1 J. S. Nelson, T. E. Milner, B. Anvari *et al.*. Dynamic epidermal cooling in conjunction with laser-induced photochemical ablation of port wine stain blood vessels [J]. *Lasers Surg. Med.*, 1996, **19**(2): 224~229
- 2 R. R. Anderson, J. A. Parrish. Selective photothermolysis: precise microsurgery by selective absorption of pulsed radiation [J]. *Science*, 1983, **220**(4596): 524~527
- 3 Zhang Xiang, Su Likun, Cai Qing. Analysis of thermal effect and experimental tests of beam wavefront aberration in all solid-state Nd:YAG laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 802~807

- 4 Xiao Chongli, Wan Chunming, Ling Ming. Side-pumped Nd:YAG pulsed laser with conduction cooling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0414001
- 肖崇深, 万春明, 凌 铭. 传导冷却侧面抽运 Nd:YAG 激光器 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0414001
- 5 Luo Pingping, Liu Cheng, Xu Peng *et al.*. Solar pumped Nd:YAG laser with Fresnel lens [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1002002
- 罗萍萍, 刘 诚, 徐 鹏等. 使用菲涅耳透镜的太阳光抽运 Nd:YAG 激光器 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1002002
- 6 J. S. Nelson, T. E. Milner, Svaasand. Apparatus and method for dynamic cooling of biological tissues for thermal mediated surgery [P]. US Patent, Patent Number: 5814040, 1998
- 7 C. Julio, Ramirez-San-Juan, Guillermo Aguilar *et al.*. Skin model surface temperatures during single and multiple cryogen spurts used in laser dermatologic surgery [J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2005, **36**(2): 141~146
- 8 Guillermo Aguilar, Guoxiang Wang. Dynamic behavior of cryogen spray cooling; effects of spurt duration and spray distance [J]. *Laser in Surgery and Medicine*, 2003, **32**(2): 152~159
- 9 Guillermo Aguilar, Guoxiang Wang, J. S. Nelson. Effect of spurt duration on the heat transfer dynamics during cryogen spray cooling [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2003, **48**(14): 2169~2181
- 10 Guillermo Aguilar, Henry Vu, J. Stuart Nelson. Influence of angle between the nozzle and skin surface on the heat flux and overall heat extraction during cryogen spray cooling [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2004, **49**(10): N147~N153
- 11 Guillermo Aguilar, Walfre Franco, Jie Liu *et al.*. Effects of hypobaric pressure on human skin; implications for cryogen spray cooling (part II) [J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2005, **36**(2): 130~135
- 12 Wim Verkruysee, Boris Majaron, Guillermo Aguilar *et al.*. Dynamics of cryogen deposition relative to heat extraction rate during cryogen spray cooling [C]. *Lasers in Surgery: Advanced Characterization, Therapeutics, and Systems X*, San Jose, CA, USA, 2000
- 13 G. Aguilar, B. Majaron, W. Verkruysee *et al.*. Theoretical and experimental analysis of droplet diameter, temperature, and evaporation rate evolution in cryogenic sprays [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, **44**(17): 3201~3211
- 14 M. Brian, Pikkula, H. Jorge *et al.*. Cryogen spray cooling: effects of droplet size and spray density on heat removal [J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2001, **28**(2): 103~112
- 15 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
- 16 Xin Hui, Zhou Zhifu, Wang Guoxiang *et al.*. Evaporation characteristics of single R404a droplet in laser treatment of PWS in conjunction with cryogen spray cooling [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2691~2695
- 辛 慧, 周致富, 王国祥等. 激光手术中喷雾冷却中 R404a 液滴的蒸发特性 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(10): 2691~2695
- 17 Zhou Zhifu, Wu Weitao, Gong Zheng *et al.*. An experimental study on the atomization dynamics and heat transfer characteristics in flashing transient spray with refrigerant R134a [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, **32**(6): 977~980
- 周致富, 吴威涛, 龚 政等. R134a 制冷剂闪蒸瞬态喷雾和传热特性的实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2011, **32**(6): 977~980
- 18 Zhou Zhifu, Wu Weitao, Wang Guoxiang *et al.*. Thin-film

thermocouples for rapid measurement of transient surface temperature in cryogen spray cooling[J]. *CIESC Journal*, 2011, **62**(11): 2691~2695

周致富, 吴威涛, 王国祥等. 制冷剂闪蒸瞬态喷雾冷却表面温度的快速测量[J]. *化工学报*, 2011, **62**(11): 2691~2695

- 19 Zhou Zhifu, Wu Weitao, Wang Guoxiang *et al.*. An experimental study on the droplets dynamics of flashing spray with R134a[C]. Chinese Academic Conference of Multiphase Flow in Engineering Thermophysics, Wulumuqi, China, 2011

周致富, 吴威涛, 王国祥等. R134a 闪蒸喷雾液滴动力学特征实

验研究[C]. 中国工程热物理多相流学术会议, 中国, 乌鲁木齐, 2011

- 20 James W. Tunnell, Jorge H. Torres, Bahman Anvari. Methodology for estimation of time-dependent surface heat flux due to cryogen spray cooling [J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2002, **30**(1): 19~33

- 21 W. Franco, J. Liu, G. X. Wang *et al.*. Radial and temporal variations in surface heat transfer during cryogen spray cooling [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2005, **50**(2): 387~397

栏目编辑: 韩 峰