

## R404A 脉冲喷雾冷却类皮肤表面动态传热规律研究

杨燃, 朱新港, 杨涛, 周致富\*, 陈斌

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

**摘要** 目前,辅助激光临床治疗鲜红斑痣所使用的 R134a 制冷剂喷雾冷却冷量不足,导致表皮黑色素含量高的患者的治疗效果较差。R404A 以其更强的冷却能力具有取代 R134a 的潜力。本文通过实验定量研究了喷雾距离和时间对 R404A 喷雾冷却类皮肤表面动态传热的影响,并分析了不同工况下传热规律的相似性。结果表明:增加喷雾时间,可以延长对表皮的冷却保护时间;喷雾距离对表面温度的影响取决于时间尺度,短时间喷雾(20 ms)下,表面最低温度  $T_{\min}$  随着喷雾距离的增大而升高,而长时间喷雾下(100 ms),表面最低温度  $T_{\min}$  在喷雾距离为 30 mm 时达到最小值;表面的最大热流密度  $q_{\max}$  和最大换热系数  $h_{\max}$  随喷雾距离增大而单调递减,与喷雾时长无关。通过理论分析提出了无量纲热流密度随无量纲时间变化的关系式。本研究结果对 R404A 喷雾冷却未来的临床应用具有重要的指导意义。

**关键词** 医用光学; 激光皮肤手术; 脉冲喷雾冷却; 动态传热; R404A; 鲜红斑痣

**中图分类号** TK124; R751.05

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202249.0507002

## 1 引言

激光技术的迅速发展促进了其在临床医学上的应用,以皮肤医学为例,激光已经应用到了生物光学成像<sup>[1-2]</sup>、生物组织激光融合<sup>[3]</sup>以及血管性皮肤病(如鲜红斑痣)的治疗上<sup>[4]</sup>。鲜红斑痣(PWS)是一种常见的真皮内血管畸变,通常位于面部或颈部等暴露位置,严重影响患者的生活质量和身心健康。目前,激光疗法已成为治疗鲜红斑痣等皮肤血管病变的首选,该治疗方法的原理是通过选择特定波长的激光(目前临床上多用 585 nm 和 595 nm 脉冲染料激光),选择性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可见光和近红外波长范围内(500~1000 nm)的激光也有较强的吸收<sup>[5]</sup>,这不仅会使表皮被加热引起不可逆灼伤,出现色素沉着、萎缩性疤痕等副作用<sup>[6]</sup>,还会降低到达真皮层病变血管处的激光能量,从而影响治疗效果。因此,在激光治疗皮肤病过程中对表皮进行冷却保护十分重要。

Nelson 等<sup>[7]</sup>在 1995 年最先提出了制冷剂 R134a 脉冲喷雾冷却(CSC)的方法,其原理是在激光照射前向皮肤患处喷射一定时间( $<100$  ms)的液态制冷剂,液态制冷剂发生闪蒸雾化,形成细小的低温液滴冲击皮肤表面,使表皮温度瞬间降低,避免或最大限度地减小病变组织上层正常表皮组织的不可逆热损伤。然而,表皮中黑色素含量较高的黄色人种患者在临床治疗鲜红斑痣过程中的并发症发生率较高,并且鲜红斑痣的清除效果较差<sup>[8]</sup>。如何改善 CSC 冷却特性亟待研究。

为了在临床激光手术中获得更好的治疗效果,尤其是对深肤色患者实现更好的治疗,研究人员致力于增强 CSC 的表面冷却效果。CSC 参数中的喷嘴尺寸<sup>[9]</sup>、喷雾背压<sup>[10]</sup>、环境温度<sup>[11]</sup>和制冷剂类型<sup>[12]</sup>对冷却表面的传热特性具有显著影响,而喷雾角度<sup>[13]</sup>的影响较小。大气压下沸点为  $-26.1$  °C 的 R134a 是目前临床实践中使用的唯一的商用制冷剂,其提供的喷雾冷却冷量不足以抵消黑色素对激光能量的吸收<sup>[14]</sup>。相比之下,R404A 的沸点更低

**收稿日期:** 2021-07-13; **修回日期:** 2021-08-30; **录用日期:** 2021-09-22

**基金项目:** 国家自然科学基金(52176163)、陕西省科技新星项目(2020KJXX-040)、国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2017YFE0134200)

**通信作者:** \*zfzhou@mail.xjtu.edu.cn

(在大气压下的沸点为  $-46.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 具有更强的冷却能力, 在深肤色患者表皮冷却保护方面具有更好的应用前景。Zhou 等<sup>[15]</sup>研究了 R134a、R407C 和 R404A 脉冲喷雾冷却的传热特性, 结果发现: R404A 具有更强的冷却效果, 液膜残留时间比 R134a 短约 50%, 同时其喷雾形态呈现收缩特性, 更有利于医生对冷却位置的精确控制。

为了进一步研究 R404A 脉冲喷雾冷却表面复杂的相变传热机制, 本文搭建了制冷剂 R404A 脉冲喷雾冷却实验系统, 通过磁控溅射技术在冷却表面喷涂薄膜热电偶, 测量类皮肤材料(环氧树脂)表面的瞬态温度变化; 然后采用杜哈梅尔定理计算冷却表面的热流密度与传热系数, 系统研究喷雾距离与脉冲喷雾时长对 R404A 脉冲喷雾冷却动态传热的影响规律, 为 R404A 脉冲喷雾冷却的临床应用提供理论指导与实际参考。

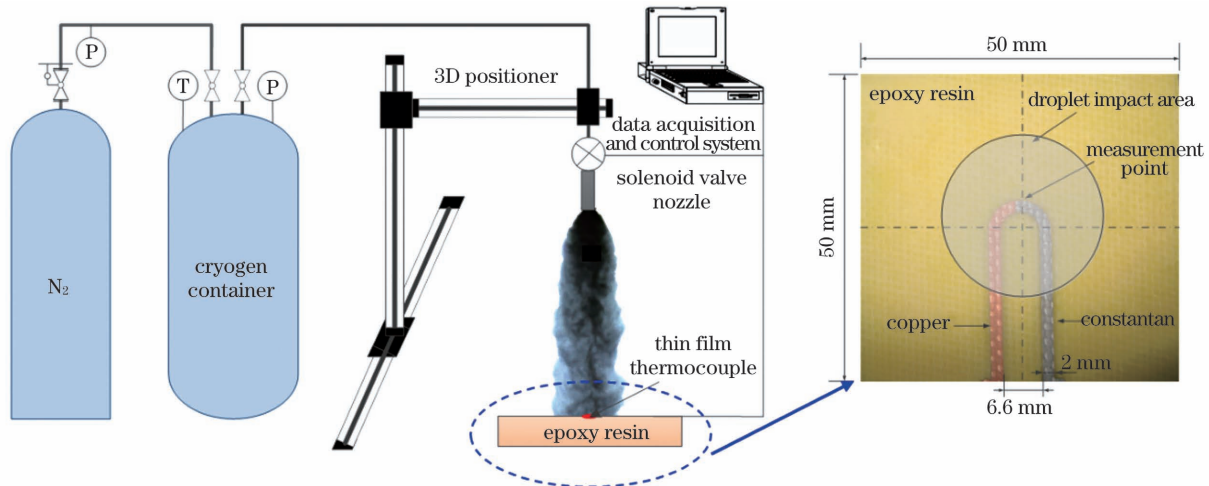


图 1 制冷剂喷雾冷却实验系统图

Fig. 1 Schematic of experimental system of cryogen spray cooling

测量系统包括冷却基体、表面瞬态温度测量用薄膜热电偶(TFTC)及数据采集卡。冷却基体选用与人体皮肤热性能相近的环氧树脂, 其热物性如表 1 所示。TFTC 通过磁控溅射技术直接喷涂在环氧树脂表面, 喷涂厚度为  $2\text{ }\mu\text{m}$ 。TFTC 具有极短的动态测温响应时间( $1.2\text{ }\mu\text{s}$ ), 同时对表面测温的干扰极小<sup>[15]</sup>。TFTC 通过信号采集板(M-6251)采集热电信号, 采样率为 100000 次/s。利用 LabVIEW 图形化语言编写控制程序, 保证电磁阀开启与冷却表面温度测量同步进行, 同时将 TFTC 电信号转化为温度信号, 并保存数据。

由于 TFTC 的厚度极薄, 且直接溅射喷涂在基体表面, 因此其测得的温度可视为环氧树脂的表面温度。同时, 前人的研究证明, 在喷雾冷却的中心区

## 2 实验系统和方法

制冷剂喷雾冷却实验系统如图 1 所示, 主要包括喷雾发生系统和测量系统。喷雾发生系统包括高压氮气瓶、制冷剂储罐、电磁阀及喷嘴等主要部件。实验用制冷剂为杜邦公司生产的制冷剂 R404A, 储存于可控压的制冷剂储罐内。高压氮气瓶为制冷剂储罐提供压力, 使制冷剂 R404A 维持在常温下的过冷状态, 保证从喷嘴喷出的是纯制冷剂液体。高压软管连接制冷剂储罐出口和电磁阀(099-0169-900, Parker, USA)进口, 电磁阀另一端接喷嘴, 通过 LabVIEW 程序控制电磁阀的开闭, 从而精确控制喷雾时间。实验所用喷嘴的出口内径为  $0.38\text{ mm}$ , 长度为  $40\text{ mm}$ , 与基体表面的夹角为  $20^{\circ}$ 。电磁阀固定于三维电动坐标平台(北京维纳光科仪器(集团)有限公司)上, 可以精准控制喷嘴与冷却表面之间的相对位置。

表 1 环氧树脂材料与人体皮肤的热物性<sup>[16]</sup>

Table 1 Thermal properties of epoxy resin and human epidermis<sup>[16]</sup>

Parameter	Epoxy resin	Epidermis
Specific heat capacity $c_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	1631	3600
Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1019	1200
Thermal conductivity $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.14	0.21
Thermal diffusivity $\alpha / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$8.43 \times 10^{-8}$	$4.86 \times 10^{-8}$

域, 表面温度沿径向分布均匀<sup>[17]</sup>。因此, 冷却基体内部的传热可视为沿厚度方向的一维热传导问题。因此, 可采用杜哈梅尔定理计算表面的瞬态热流密

度  $q(t)$ , 然后根据牛顿冷却定律, 可求解获得环氧树脂表面的瞬态传热系数  $h(t)$ 。瞬态热流密度和瞬态传热系数的计算公式为

$$q(t) = \sqrt{\frac{\lambda \rho c_p}{\pi}} \int_{t_0}^t \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} \frac{dT}{d\tau} d\tau, \quad (1)$$

$$h(t) = \frac{q(t)}{T - T_{\text{drop}}}, \quad (2)$$

式中:  $\lambda$ 、 $\rho$ 、 $c_p$  分别为环氧树脂的热导率、密度和比热容;  $T$  与  $T_{\text{drop}}$  分别为环氧树脂表面和喷雾液滴的温度;  $t_0$  和  $t$  为积分初始和终止时间;  $\tau$  表示时间积分变量。

### 3 制冷剂闪蒸喷雾冷却表面的传热特性

#### 3.1 喷雾距离对表面传热特性的影响

首先, 选择两个不同的脉冲喷雾时间 ( $t_s = 20, 100 \text{ ms}$ ), 研究喷雾距离对 R404A 制冷剂脉冲喷雾冷却环氧树脂表面传热特性的影响, 喷雾距离  $L$  分别为 10, 20, 30, 40, 50, 60 mm。图 2(a) 为  $t_s = 20 \text{ ms}$  时不同喷雾距离下环氧树脂表面的温度随时间的变化, 可以看到, 环氧树脂表面温度经几毫秒快速降至最低, 随后又缓慢回升至初始温度。这是因为在喷雾时间较短的情况 ( $t_s = 20 \text{ ms}$ ) 下, 喷出的制冷剂液体较少, 不足以形成液膜。喷雾距离对表面温度的影响主要体现在两方面: 1) 喷雾距离对表面的降温速率有较大影响, 喷雾距离越短, 表面的降温速率越快; 2) 随着喷雾距离由 10 mm 逐渐增加到

60 mm, 表面最低温度  $T_{\text{min}}$  由  $-31.7 \text{ }^\circ\text{C}$  单调上升至  $8.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 。制冷剂液体喷出后发生强烈的破碎雾化和蒸发, 随着喷雾距离增大, 制冷剂液滴飞行距离增加, 飞行过程中蒸发消失的制冷剂液滴增多, 导致用于冷却环氧树脂的制冷剂减少。因此, 喷雾距离越大, 冷却效果越差。

图 2(b) 是  $t_s = 100 \text{ ms}$  时不同喷雾距离下环氧树脂表面温度随时间的变化, 其与喷雾时间为 20 ms 时各喷雾距离下的温度变化趋势有所不同, 表面最低温度  $T_{\text{min}}$  随着喷雾距离的增加先小幅降低后升高, 存在使  $T_{\text{min}}$  为最小值的最佳喷雾距离, 最佳喷雾距离  $L_c = 30 \text{ mm}$ 。当喷雾距离小于  $L_c$  时, 制冷剂撞击冷却表面的动量过大, 有一部分制冷剂可能会反弹离开表面, 而且液滴由于蒸发时间短, 温度下降得还不够多, 因此冷却效果不佳; 当喷雾距离大于  $L_c$  时, 随着喷雾距离增加, 制冷剂液滴对基体表面的冲击力减小, 易在表面沉积成一层制冷剂液膜, 液膜阻碍了充分雾化的制冷剂液滴在表面闪蒸降温, 从而使表面的最低温度  $T_{\text{min}}$  升高。此外, 短距离喷雾 ( $L = 10 \sim 40 \text{ mm}$ ) 与长距离喷雾 ( $L = 50 \sim 60 \text{ mm}$ ) 的温度变化趋势明显不同。长距离喷雾下, 表面温度迅速下降后并不是随即回升至室温, 而是长时间保持在  $T_{\text{min}}$  附近, 然后缓慢回升至室温。这与制冷剂液膜在完全蒸发之前于环氧树脂表面的停留时间  $t_r$  有关。在  $L = 50 \text{ mm}$  处, 停留时间  $t_r$  达到最大值, 这意味着 50 mm 是使制冷剂液滴沉积厚度达到最大值的喷雾距离, 环氧树脂表面的有效冷却时间最长。

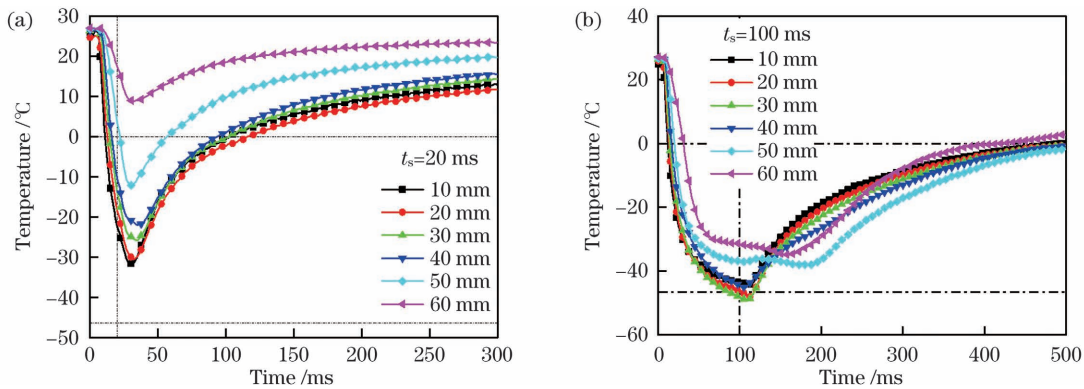


图 2 确定的喷雾时间  $t_s$  和不同的喷雾距离下, 环氧树脂表面温度随时间的变化。(a)  $t_s = 20 \text{ ms}$ ; (b)  $t_s = 100 \text{ ms}$

Fig. 2 Epoxy surface temperature variations as a function of time for various spray distances and certain spray duration.

(a)  $t_s = 20 \text{ ms}$ ; (b)  $t_s = 100 \text{ ms}$

图 3(a)、(b) 分别是喷雾时间为 20 ms 和 100 ms 时环氧树脂表面热流密度  $q$  随时间的变化曲线。喷雾开始时, 表面温度快速降低。由(1)式可知, 温度变化率越大, 表面热流密度越大, 所以环氧树脂表面的

热流密度在喷雾开始后便快速上升至最大值  $q_{\text{max}}$ , 如图 3(a) 所示。随着喷雾距离增大, 制冷剂液滴对冷却基体表面的冲击力减小, 热流密度峰值  $q_{\text{max}}$  逐渐下降, 热流密度达到峰值的时间  $t_{\text{max}}$  也向后推移。之

后,制冷剂液滴在环氧树脂表面形成液膜,环氧树脂的表面散热主要由喷射期间沉积在表面上的制冷剂液膜的热传导以及液膜表面制冷剂的蒸发控制;随着液膜逐渐蒸发,温度逐渐上升并且温度变化率逐渐减小,表面热流密度逐渐下降至 0。短时间喷雾( $t_s = 20$  ms)停止后 2 ms 左右,短距离工况( $L = 10 \sim 40$  mm)下热流密度不再下降,而是迅速上升到第二个峰值,如图 3(a)所示。这是因为喷雾结束后,皮肤表面积存的制冷剂液膜随着蒸发而变薄,强化了传热。当喷雾距离为 50~60 mm 时,结合图 3(b)可知,

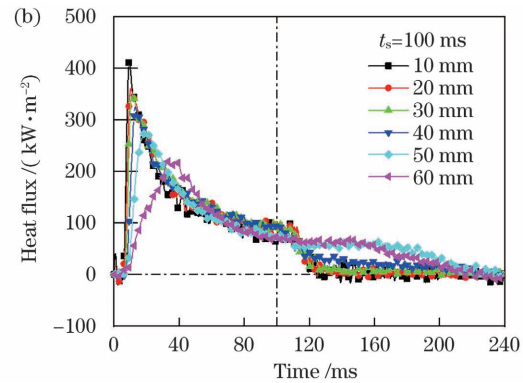
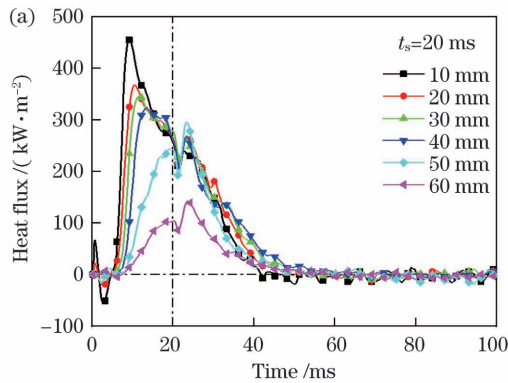


图 3 确定的喷雾时间  $t_s$  和不同的喷雾距离下,环氧树脂表面热流密度随时间的变化。(a)  $t_s = 20$  ms; (b)  $t_s = 100$  ms

Fig. 3 Epoxy surface heat flux variations as a function of time for various spray distances and certain spray duration.

(a)  $t_s = 20$  ms; (b)  $t_s = 100$  ms

结合前文所得环氧树脂的表面温度  $T$  和表面热流密度  $q$  可以计算得到喷雾冷却过程中传热系数  $h$  随时间的变化。如图 4 所示,环氧树脂表面传热系数随时间变化的曲线呈“勺子”状,喷雾距离决定了“勺子”的深度。具体来说,环氧树脂表面传热系数在喷雾开始后迅速上升至一较大值,随后在较大值附近震荡。结合(2)式可知,传热系数由表面热流密度和表面温度的变化共同决定,在喷雾结束前这段时间内,热流密度缓慢下降,温度也下降,二者同步的快速变化导致传热系数在

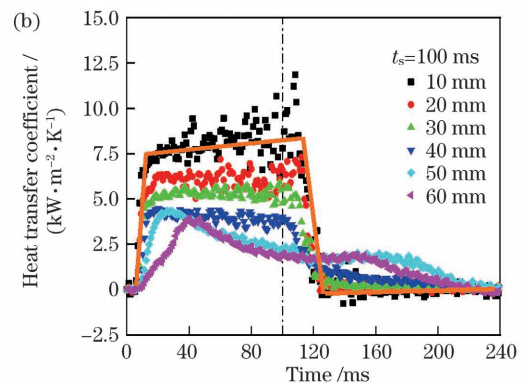
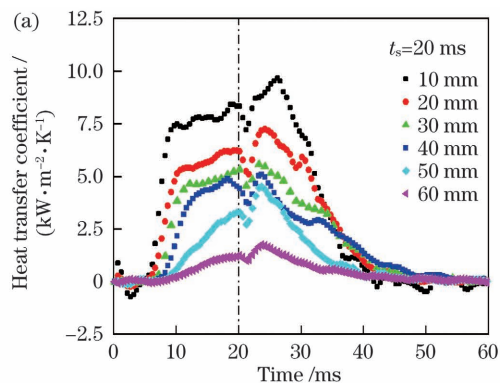


图 4 确定的喷雾时间和不同的喷雾距离下,环氧树脂表面传热系数随时间的变化。(a)  $t_s = 20$  ms; (b)  $t_s = 100$  ms

Fig. 4 Epoxy surface heat transfer coefficient as a function of time for various spray distances and certain spray duration.

(a)  $t_s = 20$  ms; (b)  $t_s = 100$  ms

热流密度在喷雾时间为 20 ms 时还未到达峰值,所以喷雾停止时不再有制冷剂液滴撞击表面,表面热流密度下降,随后随着表面制冷剂液膜的蒸发,热流密度上升到峰值。长时间喷雾( $t_s = 100$  ms)结束后,各个喷雾距离下的热流密度在  $100 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  上下波动,如图 3(b)所示。这是因为在喷雾结束前,表面累积了一定厚度的制冷剂液膜,因此喷雾停止后热流密度没有立即下降,而是随着液膜蒸发逐渐下降为 0。此外,随着喷雾距离增加,表面累积的液膜变厚,热流密度开始下降的时间也随之延后。

较大值附近震荡。喷雾结束后震荡加剧,甚至达到了比喷雾期间更高的值,直到喷雾结束 10 ms 后迅速至一较低值,之后随着热流密度下降为 0,传热系数也缓慢下降为 0。短时间喷雾( $t_s = 20$  ms)与长时间喷雾( $t_s = 100$  ms)下喷雾距离都是影响环氧树脂表面传热系数峰值的主要因素,且与表面热流密度的变化趋势相对应,即:喷雾距离越小,传热系数峰值  $h_{\max}$  越大,制冷效果越好,并且传热系数都在喷雾距离  $L = 10$  mm 时达到最大值( $10 \sim 12.5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ )。

### 3.2 脉冲喷雾时间对表面动态传热的影响

上述研究发现,喷雾距离小于  $L_c$  (30 mm) 和喷雾距离大于  $L_c$  时表面传热特性存在显著差异。因此,本节研究了长、短两个不同喷雾距离下喷雾时间对表面动态传热的影响。图 5(a)和图 5(b)分别展示了喷雾距离  $L$  分别为 20 mm 和 50 mm 时,不同脉冲喷雾时间下环氧树脂表面温度随时间的变化。可以看出,增加喷雾时长,表面最低温度  $T_{\min}$  降低,表面温度开始回升的时间也随之向后推移。这是因为随着喷雾时间增加,环氧树脂表面沉积的制冷剂增加,液膜蒸发不断地带走热量使表面温度降低,当液膜完全蒸发后,表面温度开始逐渐回升。此外,在喷雾开

始后的 5~25 ms 内,两个喷雾距离下的温度快速下降阶段的曲线重合,这意味着快速降温速率不受喷雾时长的影响,增加喷雾时间仅仅可以延长降温过程。

对比喷雾距离  $L=20$  mm 与  $L=50$  mm 下的曲线可以发现,随着喷雾时间延长, $L=50$  mm 时的表面温度在快速下降之后并不是直接缓慢回升到室温,而是出现了明显的二次冷却,并且喷雾时间越长,二次冷却时间越长,也就是制冷剂液膜停留时间越长。产生这一现象的原因主要是在快速冷却阶段结束后,沉积的制冷剂液膜会再蒸发,从而产生二次冷却过程。喷雾时间越长,制冷剂液膜越厚,基体的有效冷却时间越长。

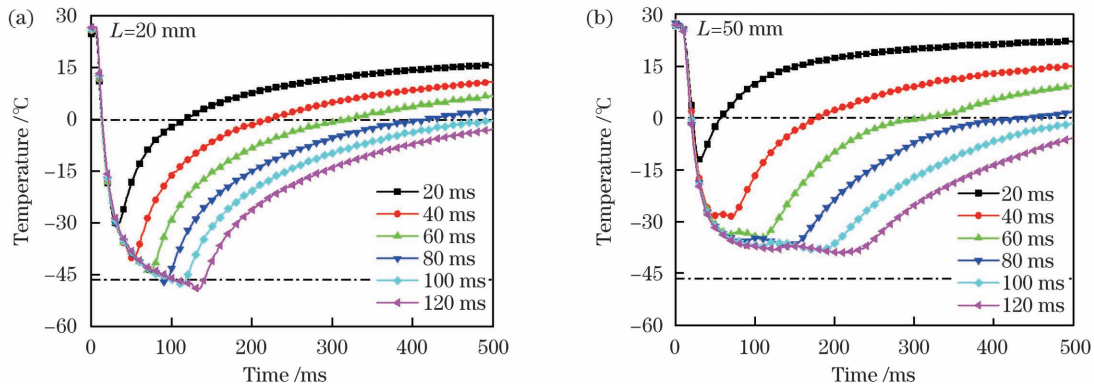


图 5 确定的喷雾距离和不同的喷雾时间下,环氧树脂表面温度随时间的变化。(a) $L=20$  mm;(b) $L=50$  mm

Fig. 5 Epoxy surface temperature variations as a function of time for various spray durations and certain spray distance.

(a)  $L=20$  mm; (b)  $L=50$  mm

图 6(a)和图 6(b)分别是喷雾距离为 20 mm 和 50 mm 时,不同喷雾时间下环氧树脂表面热流密度随时间的变化,二者基本呈现出了相同的规律。在相同的喷雾距离下,喷雾开始后,由于表面温度快速变化,表面热流密度急速上升,20 ms 左右便达到峰值,表面热流密度峰值  $q_{\max}$  几乎不随喷雾时间而变,出现热流密度峰值的时间

$t_{\max}$  也基本不变。这是因为改变喷雾时间并不能对快速升温阶段的升温速率产生影响。当热流密度达到峰值后,由于残余制冷剂液膜的蒸发,热流密度以较低的速率缓慢下降,直到液膜完全蒸发后,热流密度降为 0。不同喷雾时间下热流密度的变化规律几乎一致,仅仅是热流密度下降到 0 的时刻不同。

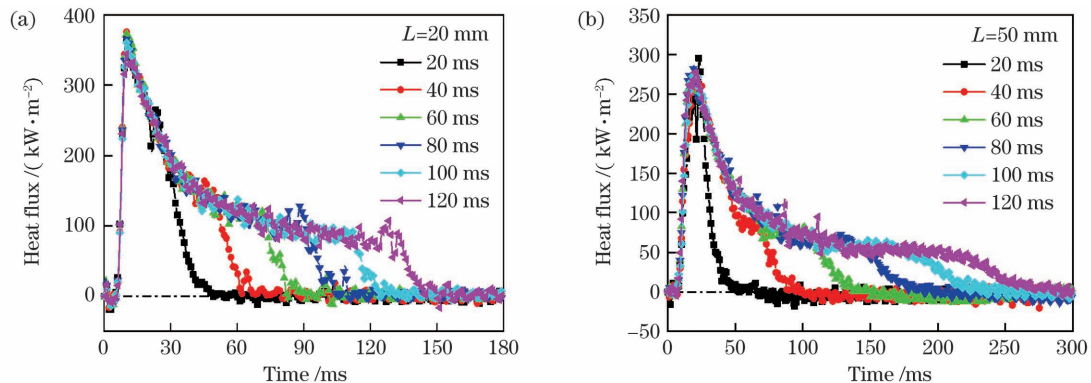


图 6 确定的喷雾距离和不同的喷雾时间下,环氧树脂表面热流密度随时间的变化。(a) $L=20$  mm;(b) $L=50$  mm

Fig. 6 Epoxy surface heat flux as a function of time for various spray durations and certain spray distance.

(a)  $L=20$  mm; (b)  $L=50$  mm

图 7(a)和图 7(b)分别为  $L=20\text{ mm}$  与  $L=50\text{ mm}$  时不同喷雾时间下环氧树脂表面传热系数随时间的变化曲线,可以看出:与表面热流密度的变化相似,表面传热系数峰值  $h_{\max}$  在不同喷雾时间下基本保持恒定, $h_{\max}$  出现的时间  $t_{h_{\max}}$  也几乎相同。喷雾时间越长,制冷剂液膜在环氧树脂表面停留的时间越长,表面热流密度减小为 0 的时间也越延后,表面传热系数震荡减小的时间越长。这再次说明了最大表面传热系数不随喷雾时间变化,仅仅是冷却

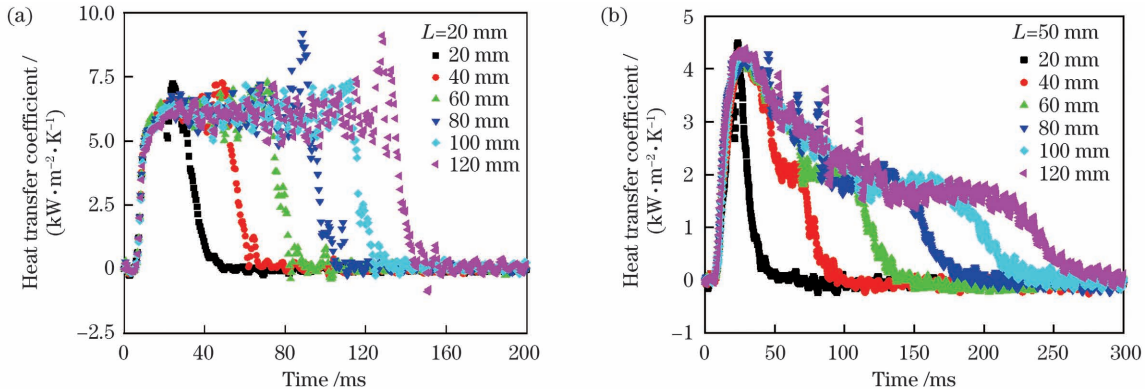


图 7 确定的喷雾距离和不同的喷雾时间下,环氧树脂表面换热系数随时间的变化。(a) $L=20\text{ mm}$ ;(b) $L=50\text{ mm}$   
Fig. 7 Epoxy surface heat transfer coefficient as a function of time for various spray durations and certain spray distance.

(a)  $L=20\text{ mm}$ ; (b)  $L=50\text{ mm}$

### 3.3 R404A 脉冲喷雾冷却动态传热规律相似性分析

图 8 展示了  $L=20\text{ mm}$  和  $L=40\text{ mm}$  时热流密度  $q$  随表面温度  $T$  的变化曲线(喷雾冷却沸腾曲线)。为了更好地理解 CSC 冷却表面的传热机制,这里用经典沸腾理论进行解释。喷雾开始时,表面温度较高,冷却表面和撞击表面的制冷剂液滴之间的传热处于过渡沸腾状态,当制冷剂液滴刚刚撞击到表面时,便在其与冷却表面之间形成蒸汽层,蒸汽层的存在使得传热效率恶化,导致表面热流密度处于较低水平。随着表面温度降低,制冷剂开始有效地润湿冷却表面,蒸汽层消失,表面沸腾换热加剧,表面热流密度迅速增大。当整个冷却表面被制冷剂润湿时,表面热流密度达到最大值  $q_{\max}$  (也称为“临界热通量”)。随后,表面传热过程进入核态沸腾状态,热流密度与表面上成核的气泡数量成正比。随着表面温度进一步降低,表面过热度降低,气泡成核速度减小,因此热流密度下降。最后,当表面温度降低到最小过热水平时,核态沸腾停止,并且表面与液体之间发生单相传热,导致热流密度非常低。

相较于  $L=40\text{ mm}$ ,  $L=20\text{ mm}$  时的热流密度相对更大。这是因为制冷剂液滴到达冷却表面的

时间增加。

比较来看,当  $L=20\text{ mm}$  时,在喷雾开始后,环氧树脂表面的传热系数在短时间内快速增大,且所有工况下均是在  $20\text{ ms}$  左右达到峰值,之后在峰值附近震荡,喷雾结束后  $20\text{ ms}$  左右表面传热系数下降为 0。当  $L=50\text{ mm}$  时,环氧树脂表面的传热系数先快速上升到最大值,然后迅速下降到较低值附近震荡变化,直到液膜完全蒸发后,传热系数降为 0。由前面的分析可知,这一区别是由喷雾距离导致的。

距离更短,液滴对表面的冲击力更大,因此可以更深地渗透到液体层中,允许冷液滴在大部分喷射持续时间内与表面直接接触。此外,液滴的撞击扰动冷却表面的制冷剂液膜,改善了单相对流传热。

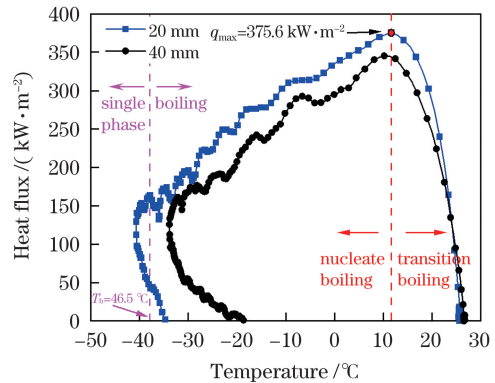
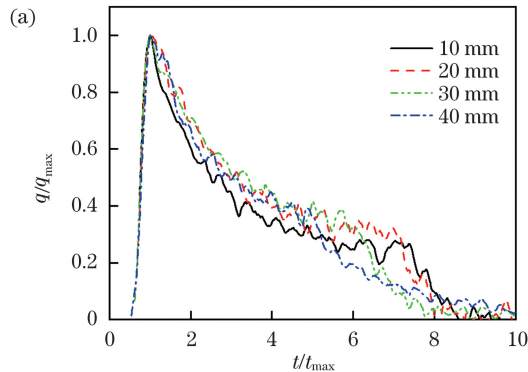


图 8 环氧树脂表面热流密度与温度的变化曲线  
Fig. 8 Epoxy surface heat flux as a function of surface temperature

选取环氧树脂表面达到最大热流密度  $q_{\max}$  的热流为特征热流,达到最大热流密度对应的时间  $t_{\max}$  为特征时间,对热流密度曲线进行无量纲化分析。图 9 为不同喷雾距离下 ( $10\sim 40\text{ mm}$ )  $q/q_{\max}$  随  $t/t_{\max}$  的变化曲线,可以发现,不同喷雾距离下无量

纲热流密度随无量纲时间的变化趋势基本相似。与图 8 所示的沸腾曲线相对应,将其大致分为三个阶段: I 过渡沸腾阶段, II 核态沸腾阶段, III 由液膜表面蒸发引起的单相传热阶段。基于  $q_{\max}$  和  $t_{\max}$  实验数据(如表 2 所示)和相似性分析,可以在不同喷射距离下建立起  $q/q_{\max}$  与  $t/t_{\max}$  之间的定量相关



性,如图 9(b)所示。设  $\tau = t/t_{\max}$ , 拟合曲线的分段表达式为

$$\frac{q}{q_{\max}} = \begin{cases} \tau, & \tau \leq 1.0 \\ 1.23 - 0.27\tau, & 1 < \tau \leq 2.5 \\ 0.52 - 0.04\tau, & 2.5 < \tau \leq 8 \\ 0.29 - 0.03\tau, & \tau > 8 \end{cases} \quad (3)$$

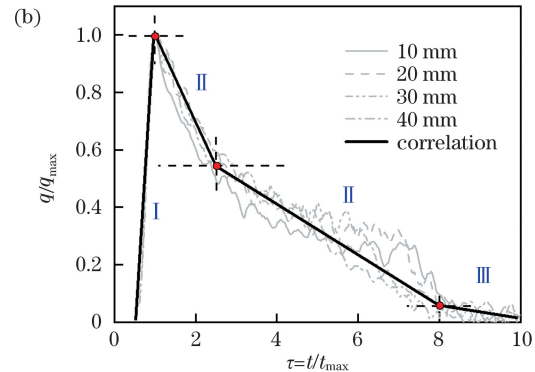


图 9 不同喷雾距离下无量纲表面热流密度  $q/q_{\max}$  随无量纲时间  $t/t_{\max}$  的变化。(a)  $q/q_{\max}$  与  $t/t_{\max}$ ; (b)  $q/q_{\max}$  与  $t/t_{\max}$  的相关性

Fig. 9 Normalized heat flux  $q/q_{\max}$  as a function of normalized time  $t/t_{\max}$  under different spray distances. (a)  $q/q_{\max}$  and  $t/t_{\max}$ ; (b) correlation of  $q/q_{\max}$  and  $t/t_{\max}$

表 2 不同喷雾距离下表面最大热流密度  $q_{\max}$  及其出现的时间  $t_{\max}$

Table 2 Maximum surface heat flux  $q_{\max}$  and its appearance time  $t_{\max}$  under different spray distances

Spray distance $L$ /mm	$q_{\max}$ /( $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$t_{\max}$ /ms
10	432.3	9.5
20	327.8	10.25
30	353.1	11.25
40	330.9	13

## 4 结 论

本文对 R404A 脉冲喷雾冷却表面的传热特性进行了实验研究,利用薄膜热电偶测量环氧树脂表面瞬态温度的变化,并计算得到了表面热流密度和表面传热系数随时间的变化,获得了喷雾距离和喷雾时间对传热特性的影响规律。增加喷雾时间,只是单纯增加了制冷剂液膜在表面的残留时间和表面的低温维持时间,表面热流密度和传热系数的峰值几乎不随喷雾时间而变。相比喷雾时间,喷雾距离对 R404A 脉冲喷雾冷却传热的影响更大,表面热流密度和传热系数峰值随喷雾距离增加基本呈单调下降的趋势,且存在一最佳距离,使表面温度最低。通过分析不同工况下 R404A 脉冲喷雾冷却的动态传热规律发现,不同工况下热流密度的变化曲线呈现一定的相似性。最后,本文给出了无量纲热流密度

与无量纲时间之间的关系式。

## 参 考 文 献

- [1] Chen J W, Gong H, Yuan J. Multispectral imaging technology and its applications in biomedicine [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(4): 0400001.  
陈键伟, 龚辉, 袁菁. 多光谱成像技术及其在生物医学中的应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(4): 0400001.
- [2] Yang Y Q, Yang L Z, Lü Y H, et al. Foreign object detection in intralipid solution using cross-correlation peak of chaotic laser [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0614001.  
杨永强, 杨玲珍, 吕艺辉, 等. 基于混沌激光互相关峰值实现脂肪乳液内异质物的检测 [J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0614001.
- [3] Chen Z B, Huang J, Wang K H, et al. Effect of laser processing parameters on microstructural characteristics of skin *in vitro* [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0302001.  
陈子博, 黄俊, 王克鸿, 等. 激光工艺参数对离体皮肤显微组织特征的影响 [J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0302001.
- [4] Ma J, Chen B, Li D, et al. Effect of optical clearing agent on laser treatment [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 1007001.  
马俊, 陈斌, 李东, 等. 光清透剂对激光疗效影响的

- 实验研究[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1007001.
- [5] Shang Y L, Yuan Y, Li D, et al. Influence of morphological distributions of melanin on parameters selection in laser thermotherapy for vascular skin diseases[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1107002.
- 尚要龙, 袁园, 李东, 等. 黑色素形态分布对血管性皮肤病激光热疗参数选取的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1107002.
- [6] Kumaresan M, Srinivas C R. Lasers for vascular lesions: standard guidelines of care [J]. Indian Journal of Dermatology, Venereology, and Leprology, 2011, 77(3): 349.
- [7] Nelson J S, Milner T E, Anvari B, et al. Dynamic epidermal cooling during pulsed laser treatment of port-wine stain: a new methodology with preliminary clinical evaluation [J]. Archives of Dermatology, 1995, 131(6): 695-700.
- [8] Li D, Chen B, Zhang H, et al. Retrospective study of the treatment of port-wine stains with 595-nm pulsed dye laser in 261 Chinese patients[J]. Lasers in Medical Science, 2020, 35(8): 1811-1819.
- [9] Wang X S, Chen B, Zhou Z F. Atomization and surface heat transfer characteristics of cryogen spray cooling with expansion-chambered nozzles [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 121: 15-27.
- [10] Aguilar G, Franco W, Liu J, 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.
- [11] Tian J M, Chen B, Zhou Z F. Parametric effect investigation on surface heat transfer performances during cryogen spray cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 143: 767-776.
- [12] Chen B, Tian J M, Wang R, et al. Theoretical study of cryogen spray cooling with R134a, R404A and R1234yf: comparison and clinical potential application [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 148: 1058-1067.
- [13] Aguilar G, Vu H, Nelson J S. 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.
- [14] Zhou Z F, Chen B, Wang Y S, et al. An experimental study on pulsed spray cooling with refrigerant R-404a in laser surgery [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 39: 29-36.
- [15] Zhou Z F, Chen B, Wang R, et al. Comparative investigation on the spray characteristics and heat transfer dynamics of pulsed spray cooling with volatile cryogens [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 82: 189-197.
- [16] Tunnell J W, Torres J H, Anvari B. Methodology for estimation of time-dependent surface heat flux due to cryogen spray cooling[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2002, 30(1): 19-33.
- [17] Franco W, Liu J, Wang G X, 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.

## Dynamic Heat Transfer on Skin Phantom Exposed to R404A Pulsed Spray Cooling

Yang Ran, Zhu Xingang, Yang Tao, Zhou Zhifu\*, Chen Bin

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

### Abstract

**Objective** Cryogen spray cooling (CSC) with several tens of milliseconds prior to laser irradiation has been widely used in laser surgeries for treating port-wine stain (PWS). CSC can protect the epidermis from nonirreversible thermal injuries due to competitive absorption by melanin in the epidermis; thus, enhancing the threshold of laser energy. However, the currently used cryogen R134a has shown little efficacy in protecting dark patients as compared with white patients because of the higher melanin content in the epidermis. Meanwhile, to improve the cooling capacity, R404A has been proposed to replace the R134a due to its lower boiling temperature, higher latent heat of vaporization, nontoxicity, and friendly with ozone depletion. In this paper, the influence of spray distance and the duration on the dynamic heat transfer of R404A spray cooling is quantitatively investigated through experiments to



analyze the mechanism of heat transfer under different conditions. These results are useful in selecting optimal CSC parameters for PWS patients with dark skin, which are significant for the clinical applications of R404A spray cooling in laser dermatology.

**Methods** This study developed an experimental system of CSC, which included the cryogen spray generation and surface transient temperature measurement parts (Fig. 1). The cryogen spray generation system consists of a high-pressure nitrogen bottle, cryogen container, fast-response solenoid valve, and straight-tube nozzle. The liquid cryogen R404A was stored in the cryogen container that connected with the high-pressure nitrogen bottle to adjust its pressure. A solenoid valve was used to precisely control the opening and closing of the pulsed spray, and the nozzle was fitted tightly into the outlet of the solenoid valve. The relative space between the nozzle tip and the measurement points on the cooling surface was controlled by a three-dimensional positioner. The measurement part consists of a fast-response film thermocouple and data acquisition system. The thin-film thermocouple (TFTC) with  $2\ \mu\text{m}$  thickness was directly deposited on the skin phantom (epoxy resin) through the magnetron sputtering technique. The response time of TFTC is only  $1.2\ \mu\text{s}$  fast enough to capture the rapid change of surface temperature. A LabVIEW software system was used to control the temperature sampling, the start and close of the solenoid valve. Then, Duhamel's theorem was used to calculate the heat flux of the epoxy resin surface based on the measured surface temperature. The heat transfer coefficient was estimated using Newton's law of cooling. The boiling curves on the cooling surface were also obtained based on the heat flux and surface temperature.

**Results and Discussions** The effect of spray distance on the surface temperature depends on the duration scale. The minimum temperature  $T_{\min}$  under short spray duration, such as 20 ms, increases as the spray distance increases. However, for a long spray duration, such as 100 ms, there exists an optimal spray distance of 30 mm that obtains the minimum temperature  $T_{\min}$  (Fig. 2). As the spray distance decreases, the rate of surface temperature change increases, resulting in a higher maximum surface heat flux  $q_{\max}$  and higher maximum surface heat transfer coefficient  $h_{\max}$ . Thus, the maximum heat flux  $q_{\max}$  and heat transfer coefficient  $h_{\max}$  decrease monotonously with the spray distance regardless of the spray duration (Figs. 3 and 4). Therefore, increasing the spray duration can only prolong the remaining time of the cryogen liquid film on the epoxy resin surface (Fig. 5). However, the maximum heat flux  $q_{\max}$  and maximum heat transfer coefficient  $h_{\max}$  hardly change (Figs. 6 and 7). The spray distance has more obvious influences on the surface heat transfer characteristics than the spray duration. The boiling curves of heat transfer of R404A pulse spray cooling under different conditions are quite similar (Fig. 8). A piecewise linear correlation of dimensionless heat flux has been proposed through theoretical analysis (Fig. 9). It demonstrates the similarity of dynamic heat transfer on epoxy resin exposed to R404A pulsed spray cooling. The entire cooling process can be separated into two stages: the impinging nucleate boiling and liquid film evaporation.

**Conclusions** R404A can replace R134a due to its stronger cooling capacity in CSC. In this paper, the influence of spray distance and duration on the dynamic heat transfer of the R404A spray cooling is quantitatively investigated through experiments to analyze the mechanism of heat transfer under different conditions. The results show that increasing spray duration can prolong the cooling time of the liquid film; thus, improving the cooling protection of the skin. The maximum surface heat flux  $q_{\max}$  and maximum heat transfer coefficient  $h_{\max}$  decrease as the spray distance increases. It is worth noting that  $q_{\max}$  changes slightly before 30 mm. Thus, the distance of 30 mm may be regarded as the optimal spray distance that obtains the lowest minimum temperature and relatively high heat flux. Finally, the dimensionless heat flux correlation is proposed based on theoretical analysis.

**Key words** medical optics; laser dermatology; pulsed spray cooling; dynamic heat transfer; R404A; port-wine stain