

文章编号: 0258-7025(2009)10-2691-05

激光手术喷雾冷却中 R404a 液滴的蒸发特性

辛 慧¹ 周致富¹ 王国祥^{1, 2} 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 Akron 大学机械工程系, Akron, OH 44325)

摘要 制冷剂低温喷雾冷却是激光治疗葡萄酒色斑的主要辅助手段,可以有效保护表皮不受热损伤。目前采用的 R134a 制冷剂不易抵消深色人种皮肤的黑色素对激光能量的大量吸收,采用沸点更低的 R404a 制冷剂可以更好保护黄色与黑色人种的皮肤。针对单个液滴建立了蒸发过程的理论模型,水滴蒸发实验的预测结果与实验结果非常吻合,验证了模型的有效性。利用该模型比较了 R404a 液滴与 R134a 液滴的蒸发冷却效果,发现 R404a 液滴可以达到更低的温度。分析了不同初始直径和环境蒸气质量分数对 R404a 液滴蒸发特性的影响,所得结果对于黄色和黑色人种激光手术治疗鲜红斑痣的制冷剂喷雾手术有参考价值。

关键词 医用光学;鲜红斑痣;激光手术;制冷剂喷雾冷却;液滴蒸发

中图分类号 TK124; R758.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093610.2691

Evaporation Characteristics of Single R404a Droplet in Laser Treatment of PWS in Conjunction with Cryogen Spray Cooling

Xin Hui¹ Zhou Zhifu¹ Wang Guoxiang^{1, 2} Chen Bin¹ Wang Yueshe¹

¹ State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China
² Department of Mechanical Engineering, The University of Akron, Akron, OH 44325, USA

Abstract Cryogen spray is an effective cooling technique for the laser treatment of port wine stain (PWS), which can protect the epidermis from the thermal injuries safely. However, cryogen R134a cannot supply enough cooling capacity for the laser surgery in patients with darker skin because of the absorption of laser energy by melanin. Cryogen R404a are expected to protect the darker skin well because of its lower boiling point. A theoretical model is proposed to describe the evaporation process of single droplet and its validation is confirmed by the agreement between numerical simulation with experimental result. With this model, the cooling effect of R404a droplet is compared with R134a droplet and it is found that R404a droplet can reach lower temperature. Then the influences of initial diameter and ambient mass fraction of cryogen on the evaporation characteristics of R404a droplet are analyzed and the result is useful to guide the cryogen spray cooling for laser therapy of PWS patients with darker skin.

Key words medical optics; port wine stain; laser surgery; cryogen spray cooling; droplet evaporation

1 引 言

激光是治疗鲜红斑痣(PWS)的有效手段,其理想效果是在不损伤表皮和其他皮肤组织的前提下使深层 PWS 目标血管坏死^[1~3]。然而表皮中的黑色

素会吸收激光能量使得激光热量难以达到病变血管并破坏表皮组织,产生皮肤灼伤和色素沉着,对于黄色和黑色皮肤人种尤为严重。激光治疗前对皮肤表面实施短时间制冷剂喷雾,可以选择性冷却皮肤表

收稿日期: 2009-07-07; 收到修改稿日期: 2009-08-24

基金项目: 长江学者讲座教授配套项目、新世纪优秀人才计划项目(NCET-07-0661)和教育部科学技术研究重点项目(107101)资助课题。

作者简介: 辛 慧(1984—),女,硕士研究生,主要从事激光手术的低温喷雾冷却方面的研究。

E-mail: xin.hui@stu.xjtu.edu.cn

导师简介: 陈 斌(1971—),男,教授,主要从事生物多相流与传热等方面的研究。

E-mail: chenbin@mail.xjtu.edu.cn(通信联系人)

皮,有助于提高激光能量使目标 PWS 血管坏死。目前临床治疗多选用 R134a 制冷剂(1.01×10^5 Pa 下的沸点 -26.1 °C),在使用激光前进行 $40 \sim 100$ ms 的喷雾可以有效阻止浅肤色人种的皮肤热损伤^[4~6]。然而 R134a 制冷剂沸点较高,提供的冷量有限,不易抵消黑色素对激光能量的大量吸收,无法很好保护黄色与黑色人种的皮肤^[7~11]。

R404a 制冷剂的沸点为 -46.2 °C,低于 R134a 制冷剂的沸点,预期同样的喷雾时间可以带走更多的热量。T. Dai 等^[12]发现 R404a 制冷剂比 R134a 制冷剂可以带走更多的热量,是有望改善黄色和黑色皮肤人种 PWS 激光治疗效果的有效制冷剂。

接近球形的液滴蒸发是喷雾的基本过程,研究单个液滴蒸发是理解喷雾机理的理论基础。通常的研究方法是不管流动区域的宏观复杂性,考虑单个孤立液滴在环境气体中的质量、动量和能量守恒,建立单个液滴蒸发数学模型^[13]。得到的单个液滴蒸发模型不仅可以用来直接数值模拟单个液滴蒸发情况,也可以作为两相流喷雾大量液滴飞行模拟的基本模型^[14]。

G. Aguilar 等^[2]针对射流中的单个 R134a 液滴建立动态蒸发模型,此模型没有区分液滴蒸发的两个阶段,将制冷剂的物性参数取为定值,同时从其实验数据拟合液滴运动阻力系数,限制了该模型的适用范围。周致富等^[15]针对平衡蒸发阶段考虑了随温度变化的物性参数值并选取球形颗粒的阻力系数关系式建立了单个制冷剂液滴准稳态蒸发模型,但该模型没有考虑不同气相模型的影响,未考虑蒸发即 Stefan 流的影响的局限性。辛慧等^[16]对描述制冷剂喷雾平衡蒸发阶段单个液滴蒸发的理论模型进行改进,但该模型的传质方程中忽略了由于物质扩散引起的物质整体迁移的效果,能量方程中也没有考虑蒸发对传热的影响。

因此,本文总结各种工程应用中的经典液滴蒸发模型,针对能量方程考虑蒸发对传热和液滴运动的影响,建立喷雾应用中单个液滴蒸发模型的通用模型。分析不同初始参数、不同环境蒸气对液滴蒸发特性的影响,以及对不同制冷剂的选取意义和蒸发效果进行了分析。理论上研究了 R404a 单个液滴的蒸发冷却效果,并与 R134a 的进行了比较。

2 单个液滴蒸发模型的改进

假设液滴表面温度和压力瞬间达到平衡温度和环境压力,只考虑液滴蒸发的平衡阶段,假设 1)液

滴为球形;2)动量交换仅是阻力的函数;3)不考虑液滴与周围环境的辐射换热;4)不考虑重力作用。对液滴温度采用集总参数法处理,可以建立单个液滴蒸发过程的动量、质量和能量守恒的通用数学表达式^[15~17]

$$\frac{dV}{dt} = - \left(\frac{f_1}{\tau_d} \right) V, \quad (1)$$

$$\frac{dm_d}{dt} = - \frac{Sh}{3Sc} \left(\frac{m_d}{\tau_d} \right) H_M, \quad (2)$$

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{f_2 Nu}{3Pr} \left(\frac{C_{p,G}}{C_L \tau_d} \right) (T_G - T_d) + \left(\frac{L_V}{C_L} \right) \frac{\dot{m}_d}{m_d}, \quad (3)$$

式中, V 为流体与液滴的相对速度, m_d 和 \dot{m}_d 分别为球形液滴的质量和变化率, T_d 和 T_G 分别为液滴和环境气体的温度, t 为时间, Sh 和 Sc 分别为传质的舍伍德(Sherwood)和施密特(Schmidt)数, Nu 和 Pr 分别为传热的努塞尔(Nusselt)和普朗特(Prandtl)数, f_1 为对动量守恒方程中斯托克斯阻力系数的修正, H_M 为不同质量传递驱动力, f_2 为由于蒸发对热量传递的修正系数, τ_d 为时间常数, $\tau_d = \rho_d D^2 / 18 \mu_G$, ρ_d 为液滴的密度, μ_G 为气体动力粘性系数, C_L 和 $C_{p,G}$ 分别为液滴的比热容和环境气体的比定压热容, L_V 是液滴的气化潜热。

(1)~(3)式描述了单个液滴在空气中飞行的速度、质量和温度随时间的变化关系,其中能量方程考虑了蒸发对传热和液滴运动的影响,体现在 f_1 , f_2 和 H_M 等参数。不同的液滴蒸发模型可通过 f_1 , f_2 , Nu , Sh 和 H_M 的不同选择来区分^[14],本文采用经典的液滴蒸发模型^[14,17,18]

$$f_1 = 1 + 0.197 Re^{0.63} + 2.6 \times 10^{-4} Re^{1.38}$$

$$f_2 = \ln(1 + B_T) / B_T$$

$$H_M = \ln(1 + B_M)$$

$$Nu = 2(1 + 0.552 Re_d^{1/2} Pr_G^{1/3})$$

$$Sh = 2(1 + 0.552 Re_d^{1/2} Sc_G^{1/3}), \quad (4)$$

式中 Re_d 表示以液滴直径为特征长度的雷诺数(Reynolds), B_M , B_T 分别为质量传递数和热量传递数,可表示为

$$B_M = \frac{Y_s - Y_G}{1 - Y_s} = \frac{\rho_{vs} - \rho_{v\infty}}{\rho_{Gs}}, B_T = \frac{C_{pV}(T_G - T_s)}{L(T_s) - q_d / \dot{m}_d},$$

式中 Y_s , Y_G 分别代表液滴表面及环境中的蒸气质量分数, ρ_{vs} 和 $\rho_{v\infty}$ 分别表示液体表面及无穷远处的蒸气密度, ρ_{Gs} 代表液滴表面的空气密度。 T_s 表示液滴表面的温度, q_d 代表导入液滴内部的热量, C_{pV} 表示蒸气的定压比热。

R134a 制冷剂的物性参见文献^[15],而 R404a

的物性则用物性计算软件在一定温度范围内计算后拟合公式列于表 1。对于空气,取 20 °C 时干空气

的物性。(1)~(3)式中的环境气体物性均采用工质蒸气和周围气流的混合物性^[14,19]。

表 1 R404a 部分物性参数随温度的变化关系

Table 1 Temperature-dependent physical properties of R404a

Physical properties	Relation with temperature
Specific heat of saturated liquid $c_{p,liq}/[kJ/(kg \cdot K)]$	$1.36754 + 0.00262 T - 5.9665 \times 10^{-6} T^2 - 1.849 \times 10^{-7} T^3$
Specific heat of saturated steam $c_{p,vap}/[kJ/(kg \cdot K)]$	$0.9811 + 0.00488 T + 0.00001 T^2$
Thermal conductivity of saturated liquid $k_{q,liq}/[W/(m \cdot K)]$	$0.07133 - 0.00048 T$
Thermal conductivity of saturated steam $k_{q,vap}/[W/(m \cdot K)]$	$0.01412 + 0.00008 T$
Dynamic viscosity of saturated steam $\mu_{vap}/10^{-6} Pa \cdot s$	$12.42666 + 0.04781 T$
Density of saturated liquid $\rho_{liq}/(kg/m^3)$	$1164.71471 - 3.02799 T$
Density of saturated steam $\rho_{vap}/(kg/m^3)$	$29.13753 + 0.84939 T + 0.00861 T^2 + 0.00003 T^3$
Latent heat of vaporization $L_v/(kJ/kg)$	$173.67173 - 0.56866 T$
Pr number of saturated steam	$0.8619 + 0.00288 T + 0.00002 T^2$

3 模型的有效性验证

基于质量、动量和能量方程,选定相应的初始值和物性参数,即可求解液滴特性包括液滴温度 T ,速度 V ,直径 D 等随时间或液滴飞行距离 Z 的变化关系。为了验证本文模型的有效性,首先研究了水滴蒸发过程。水的蒸发率相对制冷剂的蒸发率比较低,无需考虑 Stefan 效应的影响,可取 $f_2 = 1$ 。W. E. Ranz 等^[20]将单个孤立水滴悬挂在细金属线端,在空气环境中蒸发。水滴的初始直径为 1.05 mm,初始温度 282 K,环境温度 298 K。图 1 示出了本文模拟得到的水滴蒸发过程的直径变化与实验结果的对比,可见二者非常吻合,说明本文的模型和算法是有效的。

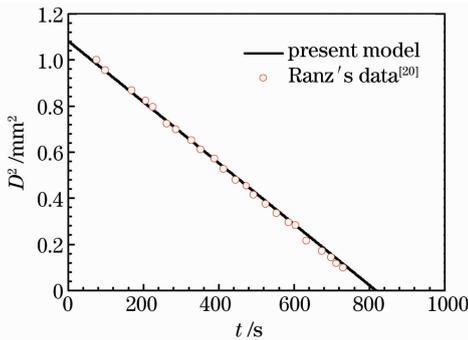


图 1 蒸发水滴直径随时间的变化

Fig. 1 Diameter of water droplet versus time

4 R404a 喷雾过程中液滴蒸发的特性

4.1 R404a 与 R134a 液滴蒸发特性比较

取 $f_2 = \ln(1 + B_T)/B_T$,比较 R404a 和 R134a 单液滴的蒸发特性。初始条件为 $V_0 = 60$ m/s, $D_0 = 100 \mu\text{m}$,R404a 液滴和 R134a 液滴的初始温度

T_0 分别为 -47 °C 和 -27 °C。结果示于图 2。

从图 2 可见,两种制冷剂液滴在飞行 100 mm 后温度达到稳定,R404a 液滴的温度可以降至 -79 °C,而 R134a 液滴仅能降至 -62 °C,最低温度相差 -15 °C,因此 R404a 的冷却效果更好,可以带走皮肤表面更多的热量。

综上所述,R404a 液滴飞行过程中直径和速度的下降速率均大于 R134a 的,而温度的下降基本速率没有变化,整体趋势一致。

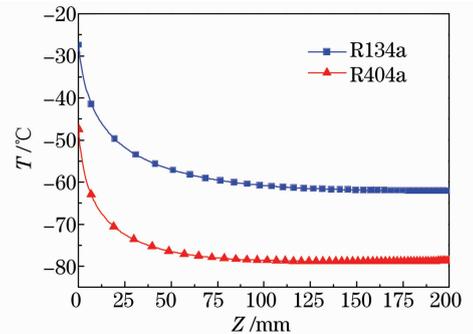


图 2 R404a 和 R134a 液滴温度随飞行距离的变化

Fig. 2 Droplet temperature of R404a and R134a droplet as a function of distance

4.2 不同初始参数对单液滴蒸发的影响

数值模拟中假设液滴的初始直径为 $100 \mu\text{m}$,而实际上制冷剂从喷嘴喷出,迅速破裂成直径大小不同的大量液滴,以下比较了不同初始直径对液滴蒸发的影响。图 3 为固定液滴初始温度和初始速度,改变液滴初始直径,比较 R134a 液滴和 R404a 液滴的飞行特性。两种制冷剂的初始参数为:R404a: $V_0 = 60$ m/s, $T_0 = -47$ °C; R134a: $V_0 = 60$ m/s, $T_0 = -27$ °C。

从图 3 可见,液滴的初始直径越小,两种制冷剂

液滴的温度、直径和速度随飞行距离下降的速率越快,液滴飞行的距离越短。不同初始直径对 R134a 液滴和 R404a 液滴可以达到的最低温度没有影响。实际医疗中喷嘴到皮肤的距离约为 30 mm,初始直

径越小,液滴温度越低,速度越小,冷却效果越好,病人舒适感更强。在不同初始直径下,R404a 液滴直径和速度下降的速率均高于 R134a 的。

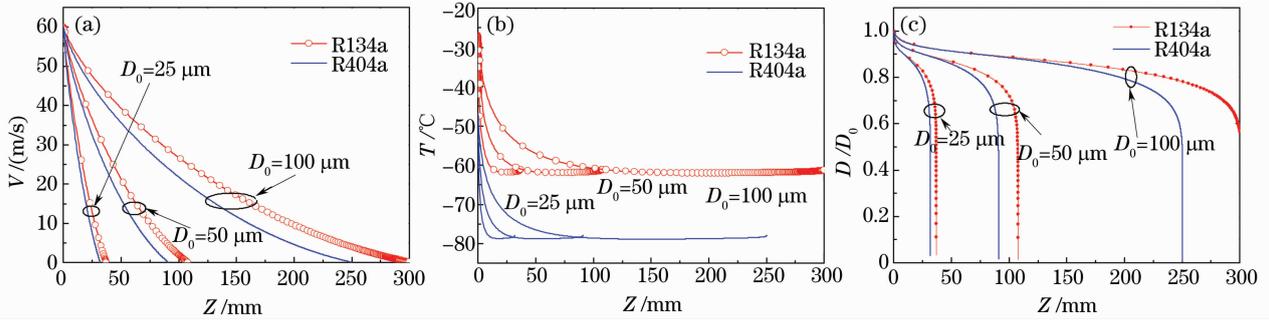


图 3 液滴初始直径对液滴冷却特性的影响,液滴速度(a),液滴温度(b)和直径(c)与飞行距离的关系

Fig. 3 Influence of initial diameter on the evaporation process of cryogen droplets, predicted droplet velocity (a), temperature (b) and diameter (c) as a function of the distance

4.3 对单液滴蒸发的影响

以上的数值模拟中均假设液滴周围环境中的蒸气质量分数 $Y_G = 0$,这种条件描述的是锥形喷雾外围液滴的情况。实际喷雾过程是大量液滴的相互耦合,由于周围其他蒸发液滴产生蒸气的影响,处于喷雾中的液滴其周围环境的蒸气质量分数并不为零。尤其是靠近锥形喷雾的中心处,大量液滴蒸发产生的制冷剂蒸气使得周围环境存在较大的蒸气质量分

数。因此,必须分析不同环境蒸气质量分数对蒸发特性的影响。

在标准大气压,环境温度 25 °C 的条件下,假设 R404a 液滴初始直径 60 μm ,初始速度 60 m/s,初始温度 -47 °C。取环境蒸气质量分数分别为 0, 40% 和 80%,计算得到液滴的飞行温度、速度和直径随距离的变化示于图 4。

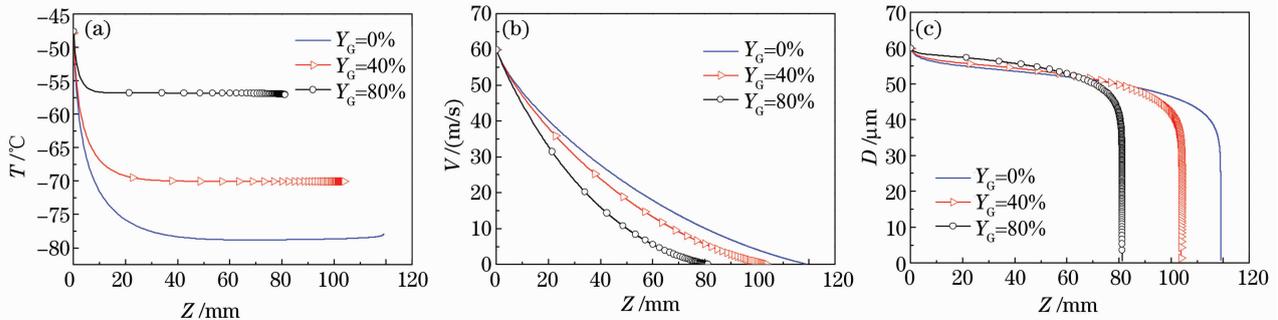


图 4 不同环境蒸气质量分数对 R404a 液滴蒸发特性的影响,液滴温度(a),液滴速度(b)和直径(c)与飞行距离的关系

Fig. 4 Influence of ambient mass fraction on the evaporation characteristics of R404a droplet, droplet temperature (a), velocity (b) and diameter (c) as a function of the distance

从图 4(a)可见,随着环境蒸气质量分数的增加,R404a 液滴能达到的最低温度逐渐升高。 $Y_G = 0$ 时,最低温度可以降到 -79 °C,而 $Y_G = 80\%$ 时,最低温度仅可以降到 -57 °C。这是由于环境蒸气质量分数的增加导致质量守恒方程中 H_M 的降低,从而质量变化率降低,蒸发能带走的热量减少,液滴所能降低的温度就越小。

从图 4(b)可见,环境蒸气质量分数越大,R404a 液滴的速度下降越快。制冷剂蒸气密度大于空气密度,当环境蒸气质量分数增大时,液滴的运动阻力会

加大,导致液滴速度下降得更快,能够飞行的最远距离更短。

从图 4(c)可见,在飞行的初始阶段(在 65 mm 之前)R404a 液滴的直径基本不随环境蒸气质量分数的增加而改变,在此之后液滴直径均迅速降低并全部蒸发。当液滴飞行距离比较远时,液滴速度已经减小,几乎接近于零,已经近似于滞止状态,液滴飞行较短的距离也需要很长的时间。在此段距离内,液滴的直径下降很快,几乎全部蒸发。

5 结 论

针对能量方程考虑蒸发对传热和液滴运动的影响,建立了单个制冷剂液滴飞行过程中液滴温度、直径和速度随飞行距离变化的数学模型。比较了 R404a 液滴和 R134a 液滴蒸发冷却效果,分析了不同初始直径和不同环境蒸气质量分数对 R404a 液滴蒸发特性的影响。得出主要结论如下:

1) R404a 液滴比 R134a 液滴喷雾可以达到更低的温度,可以带走表皮更多的热量,对黑肤色人鲜红斑痣的治疗应当有较好的效果。在相同喷射距离处 R404a 液滴的速度较小,病人的舒适感更强;

2) 制冷剂液滴的初始直径越小,液滴温度、直径和速度随飞行距离下降的速率越快,液滴飞行的距离越短。不同初始直径对 R404a 液滴和 R134a 液滴可以达到的最低温度没有影响。实际医疗中喷嘴到皮肤的距离 30 mm 处,初始直径越小,液滴温度越低,速度越小,冷却效果越好,病人舒适感更强;

3) 环境蒸气质量分数越高,蒸发带走的热量越少,液滴所能降到的最低温度减少。环境蒸气质量分数越高,液滴直径下降越慢,速度下降越快。

参 考 文 献

- 1 W. K. Woo, Z. F. Jasim, J. M. Handley. Evaluating the efficacy of treatment of resistant port-wine stains with variable-pulse 595 nm pulsed dye and 532 nm Nd: YAG lasers [J]. *Dermatol. Surg.*, 2004, **30**(2): 158~162
- 2 G. Aguilar, B. Majaron, W. Verkruyse *et al.*. Theoretical and experimental analysis of droplet diameter, temperature, and evaporation rate evolution in cryogenic sprays [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2001, **44**(17): 3201~3211
- 3 J. W. Tunnell, J. S. Nelson, J. H. Torres *et al.*. Epidermal protection with cryogen spray cooling during high fluence pulsed dye laser irradiation: an ex vivo study [J]. *Lasers Surg. Med.*, 2000, **27**(4): 373~383
- 4 Guillermo Aguilar, Guowang Wang, J. S. Nelson. Dynamic behavior of cryogen spray cooling: effects of spurt duration and spray distance [J]. *Lasers Surg. Med.*, 2003, **32**(2): 152~159
- 5 Tianhong Dai, B. M. Pikkula, J. W. Tunnell *et al.*. Thermal response of human skin epidermis to 595 nm laser irradiation at high incident dosages and long pulse durations in conjunction with cryogen spray cooling: an ex-vivo study [J]. *Lasers Surg. Med.*, 2003, **33**(1): 16~24
- 6 James W. Tunnell, David W. Chang, Carol Johnston *et al.*. Effects of cryogen spray cooling and high radiant exposures on

- selective vascular injury during laser irradiation of human skin [J]. *Arch Dermatol.*, 2003, **139**(6): 743~750
- 7 M. Haedersdal, M. Gniadecka, J. Efsen *et al.*. Side effects from the pulsed dye laser: the importance of skin pigmentation and skin redness [J]. *Acta Derm Venereol.*, 1998, **78**(6): 445~450
- 8 A. B. Garrett, S. Shieh. Treatment of vascular lesions in pigmented skin with the pulsed dye laser [J]. *J. Cutan Med. Surg.*, 2000, **4**(1): 36~39
- 9 S. Sommer, R. A. Sheehan-Dare. Pulsed dye laser treatment of port-wine stains in pigmented skin [J]. *J. Am. Acad. Dermatol.*, 2000, **42**(4): 667~671
- 10 T. S. Alster, E. L. Tanzi. Laser surgery in dark skin [J]. *SKINmed*, 2003, **2**(2): 80~85
- 11 J. W. Tunnell, L. V. Wang, B. Anvari. Optimum pulse duration and radiant exposure for vascular laser therapy of dark port-wine skin: a theoretical study [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(7): 1367~1378
- 12 T. Dai, M. A. Yaseen, P. Diagaradjane *et al.*. Comparative study of cryogen spray cooling with R134a and R404a: implications for laser treatment of dark human skin [J]. *J. Biomedical Optics*, 2006, **11**(4): 1~11
- 13 B. Abramzon, W. A. Sirignano. Droplet vaporization model for spray combustion calculations [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1989, **32**(9): 1605~1618
- 14 R. S. Miller, K. Harstad, J. Bellan. Evaluation of equilibrium and non-equilibrium evaporation models for many-droplet gas-liquid flow simulations [J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 1998, **24**(6): 1025~1055
- 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, Chen Bin *et al.*. Comparative analysis of single droplet evaporation models in cryogen spray cooling [J]. *J. Engineering Thermophysics*, 2009, **30**(4): 653~656
- 辛 慧, 周致富, 陈 斌 等. 激光治疗葡萄酒色斑的制冷剂喷雾冷却中单液滴蒸发理论模型比较 [J]. *工程热物理学报*, 2009, **30**(4): 653~656
- 17 Xin Hui. Development of droplet evaporation models and application in cryogen spray cooling [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2009
- 辛 慧. 液滴蒸发模型的发展及其在制冷剂喷雾冷却中的应用 [D]. 西安: 西安交通大学, 2009
- 18 Sergei S. Sazhin. Advanced models of fuel droplet heating and evaporation [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2006, **32**(2): 162~214
- 19 S. S. Sazhin, T. Kristyadi, W. A. Abdelghaffar *et al.*. Models for fuel droplet heating and evaporation: comparative analysis [J]. *Fuel*, 2006, **85**(12): 1613~1630
- 20 W. E. Ranz, W. R. Marshall. Evaporation from drops: Part 2 [J]. *Chemical Engineering Progress*, 1952, **48**(4): 173~180