

文章编号:1004-4213(2010)08-1438-5

水在激光作用下的强制流动沸腾模型*

魏继锋, 高学燕, 张凯, 周山, 何均章, 关有光

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要:通过分析影响沸腾的各种因素,结合水的流动特性以及激光在水中按照指数衰减的特点,利用单元差分方法着重分析了整个光斑所在区域过余温度的分布,借助水沸腾状态与过余温度之间的关系,建立了水在激光作用下的强制流动沸腾模型. 环形光束被作为主要研究对象,对环形光束进行了数据模拟和实验验证. 在实验中采用照相法记录下气团的形态,与模拟沸腾曲线具有较好的一致性.

关键词:激光;模型;差分;沸腾;过余温度

中图分类号: O348

文献标识码: A

doi: 10. 3788/gzxb20103908. 1438

0 引言

在封闭的流道内,介质受外力或自升力的推动,产生明显的流动,并同时受热进行的沸腾,称为强制流动沸腾^[1]. 传统的强制流动沸腾模型通常是根据管道与水流交界面处热交换方程建立的^[2-3]. 由于其热交换主要发生在交界面上,通常只需要分析交界面处壁面与水体之间的温差以及壁面的形状等因素即可确定水体的沸腾状态及分布. 然而当用强激光照射水流时,随着激光的传播,整个光传播路径上的水流均被激光加热,当激光功率足够高时,整个水体可能快速出现大面积沸腾,采用传统沸腾模型将无法解决此类问题,因此需要根据激光的特性建立相应的沸腾模型,而目前国内外文献上还没有类似模型报道.

本文根据激光在水体中传输特性,利用单元差分方法以激光所覆盖区域为研究对象推导出水在激光作用下的过余温度分布特性,并结合过余温度与水流的沸腾状态之间关系确定了水流在一定的激光作用下的沸腾模型. 为了减少计算量整个推导以环形超高斯光束为主,其它形状和分布的光束可采用类似方法. 文中还对上述模型进行了模拟和实验验证,其中实验验证采用照相法,拍摄了水流在不同工况下气团的分布及形态,并与模拟结果进行比较,两者具有较好的一致性,从而印证了本模型的正确性.

1 强制沸腾模型的建立

当平行光在均匀的水体中传输时,其透过功率

P_i 与入射功率 P_0 满足式(1)的关系^[4-5]

$$P_i = P_0 e^{-kZ} \quad (1)$$

式中 k 为衰减系数, Z 为激光在水体中传输的距离. 由式(1)可以看出激光在水中的吸收是体吸收,因此其沸腾也应发生在一个立体空间内. 影响水流沸腾模型的因素较多,它包括激光的初始功率密度、水体对激光前向和后向散射特性、管路的形状、水流速度、水流的位置、光斑的形状、水流的初始温度等^[6],要建立上述相变模型需综合考虑以上各个因素. 根据强激光光斑形状通常为空心环这一特点^[7-8], 本文将以环形光斑作为研究对象,其它形状的光斑分析方法与环形光斑类似,可参照环形光斑中的相关方法进行研究. 因此取环形中心为原点,圆环所在面为 XY 面,水流方向与 Y 轴方向相同,光入射方向为 Z 轴方向,建立坐标系,以整个圆环所在区域为研究对象,并将整个区域分成若干等份,其横向单元分布如图 1.

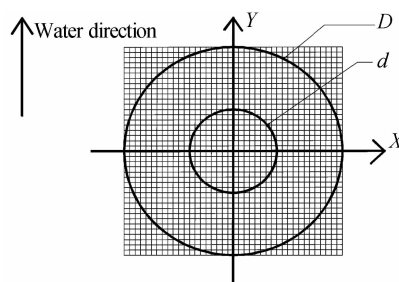


图 1 水流 XY 向单元分布

Fig 1 Water unit distribution of XY direction

对于图 1 中的区域,设内圆直径为 d ,外圆直径为 D ,取 X 、 Y 方向步长为 l , Z 方向步长为 l' ,可将上述整个光斑截面划分成一个 $m \times m$ 的矩阵,沿 Z 轴方向可划分成 n 列,水流流速为 $v(X, Y, Z)$,密度为 ρ ,比热为 c ,激光平均功率为 P_a ,点 (X, Y, Z) 处

* 国家高技术研究发展计划资助

Tel: 0816-2492441

Email: wjfc02000@163.com

收稿日期: 2008-08-09

修回日期: 2008-10-09

功率为 $P(X, Y, Z)$, 光斑面积为 S , 则对于每个单元移动距离 l 后, 其温度增加 ΔT , 由于水流与激光作用时间很短, 同时沸腾换热速度远大于对流换热速度, 因此在相变区域内可忽略水流自身对流影响^[9]. 由能量守恒可得到以下关系式^[10]

$$\rho l^2 l' c \Delta T = P(X, Y, Z) * l / v(X, Y, Z) \quad (2)$$

由于强激光大多数都是超高斯光束, 因此可以近似认为其为平顶光束^[11-13]. 为了减少计算量, 这里忽略光斑分布的不均匀性影响, 同时考虑到激光在水中的传输特性为按指数衰减, 设衰减因子为 γ (其大小与光的波长和水的特性有关), 前向散射修正因子为 c_f ^[14], 后向散射修正因子为 c_b ^[15], 可得到 $P(X, Y, Z)$ 的表达式为

$$P(X, Y, Z) = \frac{P_a}{S} * l^2 * r * c_f * c_b \quad (3)$$

衰减因子 γ 及 S 的表达式为

$$S = \pi(D^2 - d^2) / 4 \quad (4)$$

$$r = e^{-kz_1} - e^{-kz_2} \quad (5)$$

将式(4)、(5)代入式(3)中得

$$P(X, Y, Z) = \frac{4P_a l^2 c_f c_b}{\pi(D^2 - d^2)} (e^{-kz_1} - e^{-kz_2}) \quad (6)$$

将式(6)代入式(2), 同时如果将水流速度 $v(X, Y, Z)$ 用平均速度 v 代替, 整理后得到的表达式为

$$\Delta T = \frac{4P_a l^2 c_f c_b}{\pi \rho v c l' (D^2 - d^2)} (e^{-kz_1} - e^{-kz_2}) \quad (7)$$

要研究沸腾状态实质上就是研究液体的过余温度, 它等于物质温度与液体饱和温度之差, 其表达式为^[16-17]

$$\Delta T_e = T_s - T_{sat} \quad (8)$$

式中为过余温度, T_s 为水流温度, T_{sat} 为水流饱和温度. 根据过余温度的不同, 沸腾可分为 4 个模式, 饱和温度要求由低到高分别为自然对流沸腾、核态沸腾、过渡沸腾和膜态沸腾, 其温度临界值分别为 0°C 、 5°C 、 30°C 、 120°C ^[9].

对于初始温度为 T_0 的水流有

$$T_s = T_0 + \Delta T n_1 \quad (9)$$

式中 n_1 为激光辐照的有效单元数.

将式(7)和式(8)代入式(9)中得

$$\Delta T_e = T_0 + \frac{4P_a l c_f c_b}{\pi \rho v c l' (D^2 - d^2)} (e^{-kz_1} - e^{-kz_2}) n_1 - T_{sat} \quad (10)$$

对于整个区域上任意位置处的过余温度为

$$\Delta T_e(X, Y, Z) = T_0 + \sum_{g=-m/2}^Y \left[b_g \frac{4P_a l^2 c_f c_b}{\pi \rho v c l' (D^2 - d^2)} \cdot (e^{-kz_1} - e^{-kz_2}) \right] - T_{sat} \quad (11)$$

式中 b_g 为

$$b_g = 0 \quad \text{当} \sqrt{X^2 + Y^2} > D \text{ 或} \sqrt{X^2 + Y^2} < d \text{ 时} \quad (12)$$

$$b_g = 1 \quad \text{当} d < \sqrt{X^2 + Y^2} < D \text{ 时}$$

其它形状的光斑的模型与式(11)类似, 以实心圆形光斑为例, 此时 $d=0$, 式(12)的条件不变. 对于一个方形空心光斑, 则只需改变式(11)中面积的表达式以及式(12)中的条件即可. 对于一个分布不均匀、且形状不规则的光斑, 如果在已知其分布的情况下, 仍然可以采用类似方法, 对各点光强分别计算得到其沸腾模式, 只是计算过程会较上述过程复杂一些, 为了更好说明问题, 下面仍然会以超高斯环形光束作为主要研究对象.

2 数值仿真

式(11)即为强制沸腾模型的表达式, 根据此式就可以获取任意一点过余温度, 从而可以根据临界温度判断其沸腾模式和状态了. 下面根据一组数据模拟了其过余温度分布, 设激光为超高斯光束, 整个光斑分布均匀, $D=20\text{ mm}$, $d=8\text{ mm}$, $T_0=20^\circ\text{C}$, $l=0.2\text{ mm}$, $l'=0.1\text{ mm}$, $\rho=1000\text{ kg/m}^3$, $c=4.2\text{ kJ/(k}\cdot\text{kg)}$, $k=1.6/\text{cm}$ ($\lambda=1.315\text{ }\mu\text{m}$), $T_{sat}=100^\circ\text{C}$, $v=0.045\text{ m/s}$, $P_a=3\text{ kW}$, 并忽略前向和后向散射的影响, 则可得到整个区域过余温度分布. 图 2 给出了 $Z=0$ 处过余温度分布, 即光斑与水流交界面上的过余温度分布.

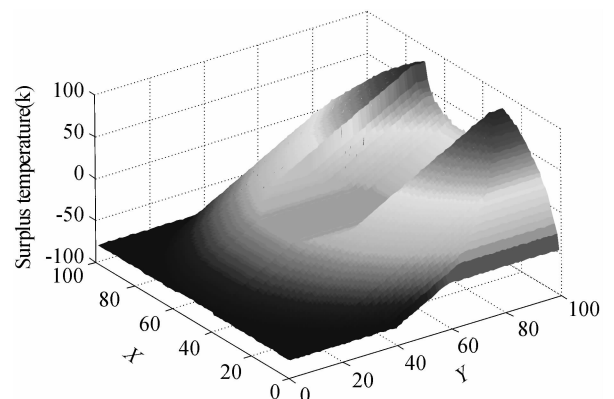


图 2 界面 $Z=0$ 处过余温度分布

Fig. 2 Surplus temperature distribution of $Z=0$ direction

由图 2 可以看出沿着 Y 轴 (即水流方向), 过余温度逐渐增大, 并达到沸腾的各级临界值, 沸腾程度也急剧增大, 在 $Y=D/2$ 处达到最大, 同时在 $X=0$ 两侧各形成一个峰, 在峰顶附近区域沸腾达到最强, 两个峰呈扇形分布, 且沿 X 轴左右对称, 其中心位于 $X=\pm d/2$ 上, 两峰大小相等. 对于上述模拟数据, 可以看出在上述两个峰附近过余温度将大于 0°C ; 开始发生自然对流沸腾, 并逐渐增强至核态沸腾和过渡沸腾, 在峰顶处过余温度 $=82^\circ\text{C}$.

图 3 中给出了 $Y=D/2$ 处水流过余温度分布, 即光斑边缘水流横截面过余温度分布.

由图 3 可以看出在光入射方向, 最靠近光入射

面(图中 $Z=0$ 处)的沸腾程度最强,其过余温度与图 2 中峰顶处过余温度相同,其形态仍然是一个双峰型.沿着光传播方向过余温度急剧衰减,并最终达到沸腾临界值以下,随着沸腾的减弱,对流将逐渐增强,并最终完全由两相流所取代.根据以上模型可以计算出各点的过余温度,结合临界值就可以得到该点的状态,进而得到整个区域水流状态.

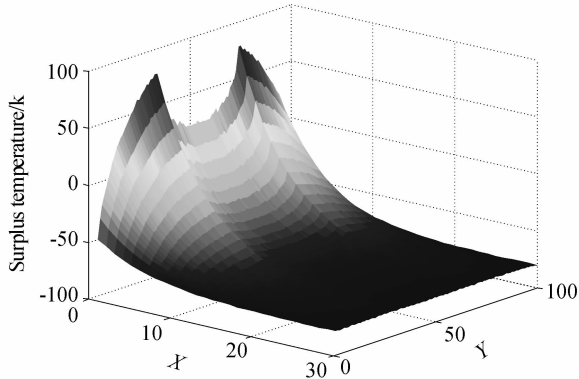


图 3 光斑边缘 $Y=D/2$ 处水流横截面过余温度分布
Fig. 3 Surplus temperature distribution of $Y=D/2$ direction

对于一个圆形实心光斑,设其参数与上述环形光斑相同(除内径为 0 外),可计算出 $Z=0$ 处过余温度分布,即光斑与水流交界面上的过余温度分布,其分布如图 4.与环形光斑会形成双峰不同,实心光斑只形成了一个单峰.

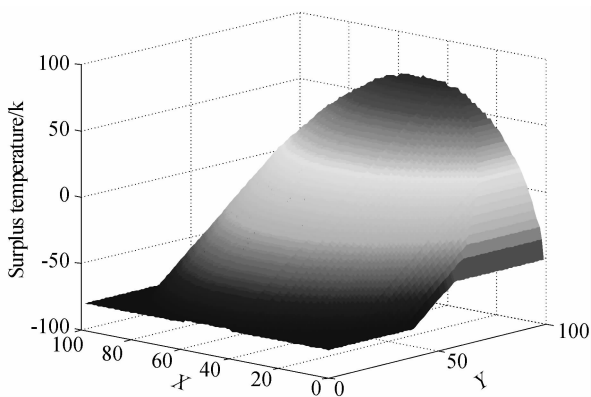


图 4 交界面 $Z=0$ 处过余温度分布
Fig. 4 Surplus temperature distribution of $Z=0$ direction

3 实验结果

根据本文模型进行了实验研究,采用一束较均匀的空心激光束照射水流,激光平均功率为 3kW,波长为 $1.315 \mu\text{m}$,光斑外径为 20 mm,内径为 8 mm,水流速度为 0.045 m/s,压力为一个大气压,水温为常温,当激光入射到水中后,采用相机记录下水流的沸腾状态,并与模拟结果进行比较.其沸腾图像如图 5.

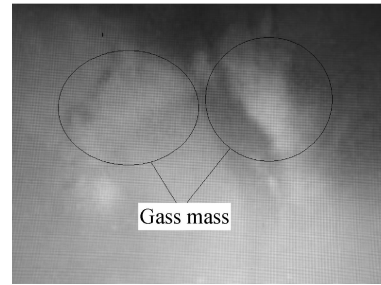


图 5 水在环形激光作用下的沸腾图像($v=0.045 \text{ m/s}$)
Fig. 5 Water boiling figure by annular laser ($v=0.045 \text{ m/s}$)

图 4 中水流自下往上流动,对应图 2 中 Y 轴方向,由图 4 中可以看出其沸腾强度和分布同图 2 中的模拟结果非常一致,在图中正中区域为一空心区域,其两侧分别有一块气团(图中两个椭圆内部区域),为沸腾产生的水蒸气形成,在光斑最上端区域气团量最大,分别形成两个峰,对应图 2 中过余温度的两个峰,此两峰大致呈扇形对称分布,右峰比左峰稍大,其形态与图 2 中的两个峰的形态基本一致.

保持上述激光功率及其它状态不变,调节水流流量,使水流流速增加至 0.09 m/s,此时其沸腾图像如图 6(图中红色亮点为 $0.6328 \mu\text{m}$ 的导引光反射所致),可以看出其分布与图 5 中基本相同,只是气泡团的密度和体积大大减小,这与前面的模拟结果有较好的一致性.

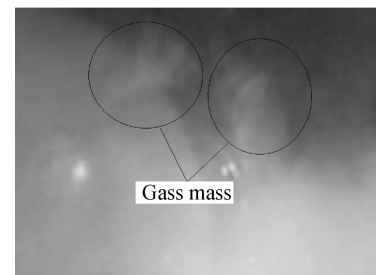


图 6 水在环形激光作用下的沸腾图像($v=0.09 \text{ m/s}$)
Fig. 6 Water boiling figure by annular laser ($v=0.09 \text{ m/s}$)

采用一束实心光束重复上述实验,光束的功率及其它参数与前面的条件基本相同,此时其沸腾图像如图 7,可以看出其形态与图 4 中的模拟结果有较好的一致性,只形成了一个单峰气团,从而进一步印证了上述模型的正确性.

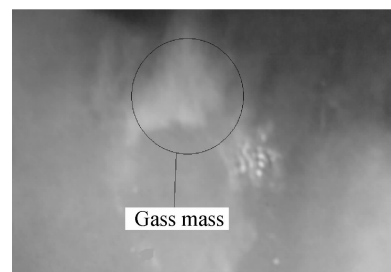


图 7 水在实心激光作用下的沸腾图像
Fig. 7 Water boiling figure by solid laser

4 结论

根据激光与水作用特点,随着激光辐照时间增长,过剩温度逐渐增大,沸腾程度也逐渐增强,并最终在水流方向上 $X=0$ 两侧形成两个峰,沸腾程度在两个峰附近达到最大.在光传播方向上,由于水流对光有很强的吸收能力,因此过剩温度会急剧减小,并最终低于沸腾临界值,完全被两相流所取代.对于其它形状和分布的光斑,也同样可以采用类似方法,建立其沸腾模型,并能取得较好的实验效果.通过上述单元差分方法建立的激光与水作用模型,其仿真和实验结果相当一致,这也为今后激光与包括水在内的各种液体物质作用的研究提供了一种较为有效的手段.

参考文献

- [1] LU Zhong-qi. Two-phase flow and boiling heat transfer[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 61.
陆钟淇. 两相流和沸腾传热[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 61.
- [2] CHANG Dong-ying, LIAN Guo-jun, HUANG Jin-tao, et al. Investigation on forced convective boiling heat transfer inside Tube for ammonia/ water mixtures[J]. *Fluid Machinery*, 2004, **32**(8): 62-65.
唱东颖, 连国钧, 黄锦涛, 等. 氨/水混合物管内强制对流沸腾换热计算[J]. *流体机械*, 2004, **32**(8): 62-65.
- [3] LIU Xiao-hong. Modal test of intratube forced convective heat transfer [J]. *Journal of Wuhan University of Water Transportation Engineering*, 1994, **18**(2): 265-268.
刘晓红. 管内强制对流沸腾模型研究[J]. *武汉水运工程学院学报*, 1994, **18**(2): 265-268.
- [4] LI Tian-ze. Laser transmission property in water and its application in measurement[J]. *Appl Opt* 1998, **19**(1): 17-21.
李田泽. 激光的水下传输特性及其在测量中的应用[J]. *应用光学*, 1998, **19**(1): 17-21.
- [5] SCHIPPINICK P F. Phenomenological model of beam spreading in ocean water[C]. *SPIE*, 1990, **303**: 1246-1248.
- [6] ZHOU Yun-long, SUN Bing, CHEN Ting-kuan, et al. An investigation on steam-water two-phase forced convection boiling heat transfer in helical-coiled tubes [J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 2002, **22**(3): 217-219.
周云龙, 孙斌, 陈听宽, 等. 螺旋管中汽-水两相流强制对流沸腾传热研究[J]. *核科学与工程*, 2002, **22**(3): 217-219.
- [7] ZHANG Shuai, LI Jin-quan, ZHANG Bin. Study on focusing properties of annular beams through circular lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 888-890.
张帅, 李金全, 张彬. 环状光束通过透镜的聚焦特性研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 888-890.
- [8] ZHENG Rui-lun, LIU Jun. Thermodynamic effect of the metal material face irradiated by strong laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(4): 481-483.
郑瑞伦, 刘俊. 强激光辐照下金属材料表面热力学效应[J]. *光子学报*, 2002, **31**(4): 481-483.
- [9] INCROPERA F P, DWYTT D P, BERGMAN T L. Fundamentals of heat and mass transfer[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 378-379.
- [10] CAO Yu-zhang. Experiment heat transfer [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 128.
曹玉璋. 实验传热学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 128.
- [11] SU Yi, WAN Min. High energy laser system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 301-302.
苏毅, 万敏. 高能激光系统[J]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 301-302.
- [12] QING Yu-san, LÜ Bai-da. Similar propagation property of flattened Gaussian beams and super-Gaussian beams [J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2001, **13**(6): 675-678.
卿与三, 吕百达. 平顶高斯光束和超高斯光束传输特性的相似性[J]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(6): 675-678.
- [13] LUO Shi-rong, LÜ Bai-da, ZHANG Bin. Propagation Characteristics of Flattened Gaussian beams [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **10**(9): 1213-1217.
罗时荣, 吕百达, 张彬. 平顶高斯光束的传输特性[J]. *光子学报*, 2000, **10**(9): 1213-1217.
- [14] XIANG Jian-sheng, HE Jun-hua, CHEN Min, et al. Study of character of the forward scattered light of bubbles based on Mie's light scattering theory[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 2111-2114.
项建胜, 何俊华, 陈敏, 等. 基于 Mie 光散射理论的尾流气泡前向散射光特性研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(11): 2111-2114.
- [15] LI Zeng-rong, LIU Ji-fang, DENG Zhong-fang. Study of attenuation characteristic of ship wake's backward scattered light based on the detection of optical power [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1417-1420.
李增荣, 刘继芳, 邓仲芳. 尾流后向散射光功率衰减特性研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 1417-1420.
- [16] VANSTRALEN S R. Boiling phenoena[M]. New York: McGraw-Hill/Hemisphere, 1979: 412.
- [17] BUTTERWORTH D T. Two-phase flow and heat transfer [M]. London: Oxford University Press, 1977: 245-246.

Forced Convective Boiling Model of Water by Laser

WEI Ji-feng, GAO Xue-yan, ZHANG Kai, ZHOU Shan, HE Jun-zhang, GUAN You-guang
(*Institute of Applied Electronics, China Academy Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*)

Abstract: Various factors affecting boiling state are analyzed when water flow and exponent-decadence of laser by water characteristic are considered. By using unit difference methods surplus temperature of the coverage by laser is studied. According to the relationship of surplus temperature and boiling state, forced Convective Boiling modal of water by laser is founded. Annular beam is regarded as the main research object, concerned data was simulated and experiments are carried out. As a result they have good coherence.

Key words: Laser; Model; Difference; Boiling; Surplus temperature



WEI Ji-feng is an engineer at Institute of Applied Electronics, CAEP, and is also a postgraduate candidate of China Academy of Engineering Physics. His research interests focus on laser physic and laser parameter diagnosis.