

文章编号: 0258-7025(2008)09-1342-04

液体激光系统流场特性对热畸变的影响

袁永轲 许正 李密 闫锋 张卫 苏毅

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 液体介质的循环流动为消除激光系统的热效应提供了有效途径,对改善激光系统的光束质量具有重要意义。根据液体介质的流场特性,结合 Fluent6.53 软件模拟计算,分析了抽运区介质流速、湍流强度与附面层厚度、温度扰动的关系及对激光热畸变的影响。增大抽运区介质流速能有效减小热畸变和附面层厚度;在给定抽运条件下,采用光阑限孔的方法进一步减小热畸变,流速为 20 m/s 时的光程差(OPD)最大差值由 10 个波长下降到 5 个波长。

关键词 激光技术;液体激光;流场特性;热畸变;附面层

中图分类号 TN 248.3⁺2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20083509.1342

Effect of Flow Field Characteristics in Liquid Laser System on Thermally Induced Distortion

Yuan Yongke Xu Zheng Li Mi Yan Feng Zhang Wei Su Yi

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Circulation system of liquid laser medium provides an effective method of eliminating thermal effect and improving laser beam quality. Based on turbulent flow field characteristic of this laser medium and numerical simulation using software Fluent6.53, the relationship between flow velocity, turbulent intensity, boundary layer thickness and temperature gradient has been investigated, which affects on thermally induced distortion. Increasing velocity of laser medium in the cell would reduce thermally induced distortion and boundary layer thickness. Setting proper aperture under current conditions can also further reduce the distortion. The maximum optical path difference decreases from 10 wavelengths to 5 wavelengths at the flow velocity of 20 m/s by setting aperture.

Key words laser technique; liquid laser; flow field characteristics; thermally induced distortion; boundary layer

1 引言

激光二极管抽运的掺钕无机液体激光系统可以利用循环流动实现高效散热,避免类似固体热容激光器的热积累问题,可能实现长时间连续激光输出和较好的光束质量。然而流动过程中的湍流效应对激光传输和热畸变有较大影响,需要针对这些问题进一步讨论。目前该无机液体激光系统已经实现静态出光,达到较高的光-光转换效率^[1]。

在循环流动系统中,液体介质在管道中的高速流动以湍流场形式存在。本文针对增益区内液体激光介质在湍流下的附面层效应、温度扰动等物理现象对输出激光波前的影响,并结合流体力学和光学理论,采用 Fluent6.53 软件模拟计算,分析了理想

连续抽运情况下流速、湍流强度、附面层厚度对波前畸变的影响,为即将开展的循环流动出光实验提供理论依据。

2 理论模型

2.1 液体激光抽运区模型

液体介质在封闭的管道内循环流动,循环系统中增益区管道模型结构示意图如图 1 所示,激光输出方向与增益区液体流动方向和抽运方向相互垂直。沿流动方向 x 上抽运高度为 h ,沿抽运方向 y 上抽运深度为 w ,沿光轴方向 z 上增益介质长度为 L ,并约定入口深度为管道内任意一点到入口截面的距离。介质池规格为 $L_0 \times w \times L$,取 $w = 1 \text{ cm}$, $h =$

收稿日期:2007-11-07;收到修改稿日期:2008-01-09

作者简介:袁永轲(1983—),男,湖北人,硕士研究生,主要从事液体激光系统方面的研究。E-mail:lorchid213@163.com

导师简介:张卫(1967—),男,四川人,研究员,博士生导师,主要从事激光物理及光学工程技术方面的研究。

E-mail:zhangwei@caep.ac.cn

1 cm, $L = 15$ cm, 将模型进行网格离散化, 网格步长取 0.5 mm。本文参量如表 1 所示^[1~3]。

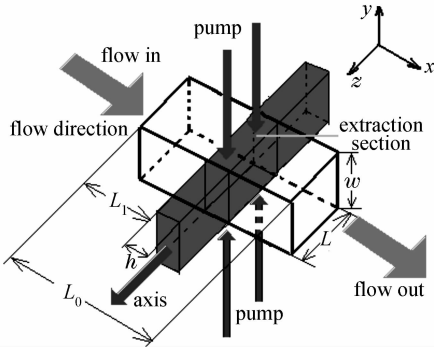


图 1 液体激光器抽运区模型示意图

Fig. 1 Schematic map of liquid laser pump section

表 1 参量列表

Table 1 Parameters list

Optical absorption α / cm^{-1}	5
Heat conduction coefficient $K / (\text{J}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}))$	0.0067
Index of refraction n	1.4898
Pump intensity $I_0 / (\text{W}/\text{cm}^2)$	400
Dynamic viscosity μ / cp	6
Specific heat volume $C_p / (\text{J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C}))$	1.302
Initial temperature T_0 / K	300
dn/dT	-5×10^{-4}
Liquid density $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	1.80
Turbulent intensity of entrance	5%
Heat irradiation intensity $/(\text{W}/\text{cm}^3)$	100
Turbulence to viscosity	5

2.2 理论分析

从湍流转变为层流的临界雷诺数为 Re_{cr} , 从层流转变为湍流的转换雷诺数为 Re_{tr} 。液体在矩形截面管道中流动的雷诺数^[2]为

$$Re = 2U_0 \frac{\rho \omega l}{\mu(\omega + l)}, \quad (1)$$

式中 U_0 为入口平均速率。由(1)式可以得出临界速率: $U_{cr} = 0.36$ m/s, $U_{tr} = 0.53$ m/s。

液体介质通过流动散热时, 应保证平均温升不过高, 流速控制在米每秒的量级。根据临界条件可知增益区内流场为湍流; 再由完全发展湍流理论^[4], 在已定参量下, 增益区域流场是未充分发展的湍流形态。

由于壁面摩擦力的作用, 液体在管道中流动时管壁附近的流速小于中心流速, 而且越靠近壁面流速下降得越快, 从而形成附面层。定义边界层为 0.99 倍主流速度的流线到管壁的区域, 其厚度为从壁面到流线的垂直距离, 用参量 δ 表示^[5]。模型中的边界层厚度可以近似表述为

$$\delta = 0.37x[v/(U_e x)]^{0.2}, \quad (2)$$

式中 $v = \mu/\rho$, U_e 为主流速度, x 为距离管道入口距离。

根据能量守恒定律及湍流度的平方正比于湍流动能与主流动能之比^[5]的结论, 可以得到湍流对温度的扰动 ΔT

$$\Delta T = -\frac{\sigma U_0^2}{k C_p} \left(1 + \frac{\sigma}{2k}\right), \quad (3)$$

式中 k 为比例系数, σ 为湍流度。(3) 式表述的是任意一点处的温度变化量与液体平均流速、液体浓度和该点湍流度的关系。实质上(3)式是湍流扰动对出光截面温度梯度^[6]的修正, 得到最终的温度梯度分布 $\Delta T'(x, y)$

$$\Delta T'(x, y) = \frac{\alpha \eta I_0 [e^{-\alpha y} + e^{-\alpha(\omega - y)}]}{\rho C_p U_0} x - \frac{\sigma(x, y) U(x, y)^2}{k C_p} \left[1 + \frac{\sigma(x, y)}{2k}\right], \quad (4)$$

式中 η 为热转换效率, I_0 为抽运光功率密度。由此可以得到受湍流影响的输出波面的光程差(OPD)为

$$OPD(x, y) = \frac{GL}{\lambda} \left(\frac{dn}{dT}\right) \Delta T'(x, y). \quad (5)$$

3 模拟分析

从输出光束质量和均匀性考虑, 为了获取较好的激光输出, 激光增益区域应当吸收抽运能量均匀, 产生温度梯度小^[7]。下面结合 Fluent6.53 模拟, 从湍流场特性出发, 针对流速、湍流强度、附面层厚度等影响波前的主要因素展开分析。

3.1 湍流扰动程度

湍流强度对于激光传输及输出都有一定影响, 在给定条件下, 可以用湍流强度来描述介质中流场的扰动程度。在管道中心附近, 沿流动方向单位长度的湍流扰动变化越小, 则中心流速差越小, 可使沿流动方向的温度梯度越小。

用 Fluent6.53 软件进行数值模拟可得到湍流强度的分布, 再根据不同入口深度的湍流强度变化不同, 选取湍流强度变化趋于稳定的位置作为增益区入口。根据模拟结果绘制不同流速下流动方向的管道中心湍流强度随入口深度的变化关系如图 2 所示。根据(3)式可知, 当湍流度发生明显变化时, 温度扰动 ΔT 也随之变化, 也就是说沿流动方向单位长度的湍流扰动变化越大, 对波前热畸变改善越不利。图 3 表示流速为 20 m/s 时两种不同模型下管道中心沿流动方向变化的温度曲线, 实线为不考虑湍

流情况的理想流动温度曲线,虚线为考虑湍流效应的温度曲线。由图可知,沿流动方向的距离越大,考虑湍流效应模型的温度曲线越接近线性变化,单位长度上的温度变化也越小,当其他条件一定时,湍流强度越大,温度扰动越大,与理论分析一致。另外在抽运方向上,管道中心的湍流强度变化也很小,同样保证了管壁中心附近温度差很小。

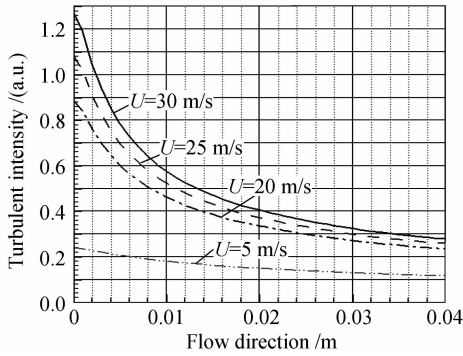


图2 湍流强度随入口深度的关系曲线

Fig. 2 Turbulent intensity versus entry depth

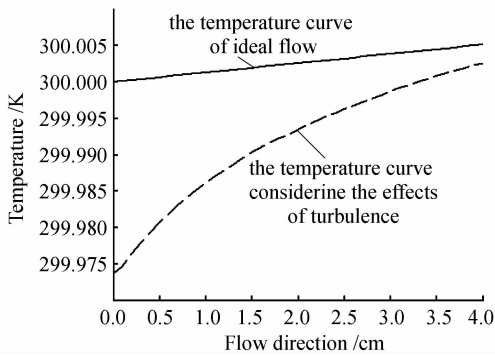


图3 不同模型下的温度曲线

Fig. 3 Temperature of different model

采用双增益区补偿^[8]流动方向的温度梯度,管壁中心附近温度差较小更利于矫正。取步长为1 mm计算,当入口深度超过1.98 cm时湍流强度变化与初始湍流强度的比值小于1%,可以认为湍流扰动在管道中心处趋于平缓。由于随着入口深度的增加附面层的厚度也会增大,而较大的附面层厚度会导致管壁边缘介质沿抽运方向温度梯度增大,因此在保证湍流扰动平缓的前提下应尽量减小 L_1 。综合分析,模型参数选取 $L_1 = 2$ cm。

3.2 附面层厚度

由(2)式可知,附面层厚度是沿着流动方向距离增加而增大的,越往下游边界层越厚。图4是中心流速为20 m/s时不同入口深度下的速度分布曲线。不同入口深度下管道中心的流速不同,下降到主流速度0.99倍位置也不同。随着入口深度的增大,中

心流速略有增大,因此附面层厚度也随之增大。从图5温度曲线中可以看出附面层效应对温度分布的影响,在抽运区域内热积累在抽运末端达到最大;同时也能看出管道中心附近温度变化较管壁附近平缓,在附面层内热量累积急剧增加,越靠近管壁累积越严重,对于激光输出很不利,必须加以限孔。也就是说,根据附面层厚度适当选取孔径光阑遮挡住边缘温度较高的区域,仅利用管道中心温度梯度较小的部分区域介质产生激光。

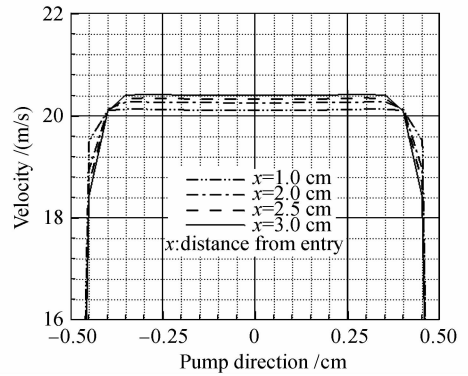


图4 不同入口深度的速度曲线

Fig. 4 Velocity versus entry depth

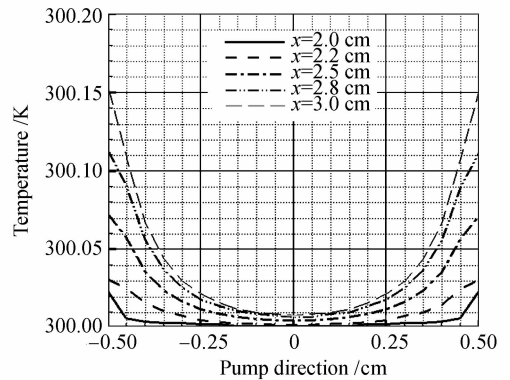


图5 流速20 m/s时抽运方向的温度曲线

Fig. 5 Temperature curves of pump direction at flow velocity of 20 m/s

根据图4速度变化曲线,对附面层内的速度变化作简单近似,假设附面层内速度下降是线性的,实际中在十分靠近管壁时这一近似误差非常小。可以确定速度下降到 U 时该流线位置与管壁的距离 d 满足比例关系 $d/\delta = U/U_0$,其中 U_0 为恰好进入附面层位置的流速。液体介质温度升高到约110 ℃时会产生气化,若初始温度为30 ℃,则允许的最大局部温升不超过80 ℃。为了不使介质气化影响到系统正常工作,将气化区域控制在管道抽运深度1%的厚度内,即取 $d = 0.01$ cm。由此可以根据距离管壁 d 处的速度,结合(4)式即可估算系统允许的最大抽运

光功率密度。

3.3 介质的温度梯度分布

增益介质中抽运光分布不平坦导致介质折射率分布不均匀,从而造成输出激光的波前畸变,使得光束质量变差^[7]。由于选用液体介质的 dn/dT 比一般掺 Nd^{3+} 固体热容激光介质的值大,同等温度差值对波前畸变影响更大;温度梯度分布直接影响激光输出的光斑均匀性和波前相位差,因此在相同抽运条件下需要减小介质的平均温度和温度差。

将 Fluent 计算结果的温度数据导入 Matlab 中,根据(5)式绘制出光截面的光程差分布图。图 6(a)为流速 20 m/s 的出光截面光程差分布图,对应的附面层厚度约为 0.1 cm。由图可知在进入附面层以后,温度的变化趋势较没有考虑附面层效应的温度变化^[8] 变大,温度急剧升高,严重影响输出光束质量,因此要对附面层进行处理。通过加入光阑限孔的方法,仅取管道中心光程差分布差异较小的部分作为激光有效增益区域,可以极大地减小温度分布的不均匀性,降低出光截面温度的标准差,从而减小输出激光波前畸变。图 6(b)为限孔之后出光截面对应的光程差分布。经比较可以明显看出 OPD 最大差值由 10 个波长下降到 5 个波长,同时计算得到温度标准差由 0.0288 °C 减小到 0.0137 °C。同样可得当流速为 5 m/s 时对应的温度标准差分别为 0.1178 °C 和 0.0374 °C,说明流速的增大对改善温

度梯度具有重要影响,与理论分析一致。

4 结 论

液体介质循环流动方式能较好地改善液体激光系统的热畸变,但是附面层的存在导致管壁边缘热梯度显著,对于输出激光波前畸变影响很大。增大流速可以改善输出激光波前畸变,流速从 5 m/s 增加到 20 m/s 时出光截面温度的标准差由 0.1178 °C 减小到 0.0374 °C;通过限孔避免附面层效应的方法也能改善同条件下输出激光的波前畸变,流速为 20 m/s 时限孔前后 OPD 最大差值由 10 个波长下降到 5 个波长。

循环系统流速受有效出光长度等因素和循环系统本身的限制,理论分析表明在给定条件下可估算流速的最佳范围使得热畸变较小。通过 Fluent 软件模拟了湍流强度、温度及流速等因素的变化规律并分析它们对激光输出波前热畸变的影响,验证了提出理论的合理性。

参 考 文 献

- Xu Zheng, Su Yi, Li Chunling *et al.*. Experimental study on diode pumping inorganic liquid laser output [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(12):1941~1943
许正,苏毅,李春领等. 二极管泵浦无机液体激光器出光实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(12):1941~1943
- H. Samelson. High Energy Pulsed Liquid Laser [M]. Waltham, Massachusetts, 1974. 11~24
- W. Koehner. Sun Wen *et al.* trans.. Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2003. 41~43, 176~203
W. 克希耐尔著,孙文等译. 固体激光工程[M]. 北京:科学出版社, 2003. 41~43, 176~203
- Arnold M. Kuethe, Chuen-Yen Chow. Foundations of Aerodynamics [M]. Beijing: Editing and Examining Group of Textbook for Aviation Major, 148~152, 301~303
Arnold M. Kuethe, Chuen-Yen Chow. 空气动力学基础[M]. 北京:航空专业教材编审组, 148~152, 301~303
- Yin Xingliang. The Theory of Aero-Optical [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2003. 45~78
殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京:中国宇航出版社, 2003. 45~78
- Eral R. Ault, Brian J. Comaskey, Kuklo Oakdale. Device for wavefront correction in an ultra high power laser [P]. United States Patent Application Publication, Paten No. US6438151B1 Aug. 20, 2002
- Ning Jiping, Cai Zhiqiang, Chen Zhiqiang *et al.*. Study on uniform of pump distributivity in a LD side-pumped Nd: YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4):390~394
宁继平,蔡志强,陈志强等. LD 侧面抽运的 Nd: YAG 激光器抽运均匀性研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4):390~394
- Li Mi, Xu Zheng, Chen Xingwu *et al.*. Performance simulation of laser diode two-sides-pumped transverse flow continuous liquid laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9):1653~1657
李密,许正,陈兴无等. 二极管双侧抽运横流连续液体激光系统性能模拟[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9):1653~1657

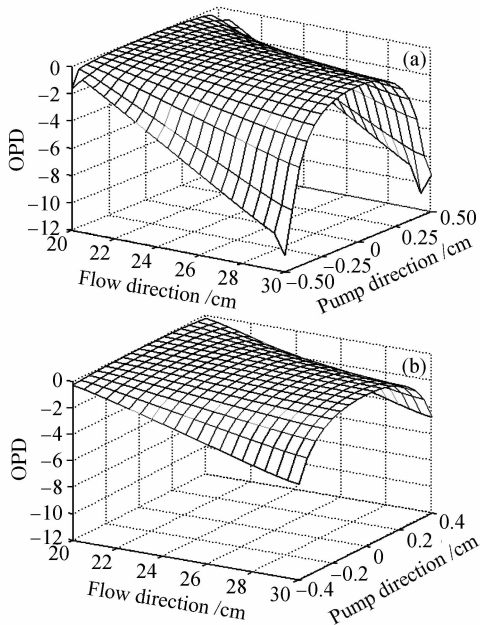


图 6 出光截面的光程差分布。(a) 无限孔;(b) 限孔

Fig. 6 OPD of output section. (a) without aperture;

(b) with aperture