

文章编号: 0258-7025(2001)04-0317-04

轴向流动激光放电管温度场的解析分析

陆培华 王润文

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 从能量守恒定律出发,分析了快速轴向流动激光器放电管中的传热情况。采用微元分析法建立了快速轴向流动激光器放电管的热能平衡方程。根据实际器件放电管的工作气体流场,进行了合理的数学物理处理,并应用热传导的物理边界条件,求出了热能平衡方程的解析解,得出了实际器件放电管横截面内的工作气体温度分布公式及温度分布曲线。

关键词 温度分布,快速轴向流动,激光放电管

中图分类号 TN 248.2⁺1 **文献标识码** A

Analytically Study on Gas Temperature for Axial Flow Laser Tube

LU Pei-hua WANG Run-wen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract From energy balance equation, using micropiece analytical method, heat balance equation for high power fast axial gas flow CO₂ laser tube is established. To practical fast axial CO₂ laser, the temperature distribution of fast flow laser tube from solving the heat equation is derived. The curves for the temperature distribution are given and the result is discussed.

Key words temperature distribution, fast axial flow, laser tube

1 引 言

高功率快速轴向流动 CO₂ 激光器既能迅速流入常温的工作气体,同时又能快速把激光振荡过程中热化了的工作气体流出工作区,因而单位体积能耦合出的激光功率较通常慢轴向流动或封闭式激光器有大幅度提高。与横流激光器相比,它更容易获得好的光束质量,因此被广泛应用于激光加工中的切割及深熔焊接系统^[1~3]。研究分析快速轴流激光放电管中的气体温度分布对提高激光输出功率、改善光束质量都有重要意义。气体温度分布确定以后,同时也可确定放电管内的气体密度分布。由于管壁处于常温状态,在气体放电过程中中轴的吸热量很大,在热扩散作用下,放电管的截面温度分布由中轴向边沿递减,致使中心气体密度小于边缘密度。当激光光束在放电管轴向传输时,便会产生发散作用,即热致负透镜效应^[4~6]。由于气体放电管热致负透镜效应的存在,设计高功率快速轴流 CO₂ 激光器的谐振腔时必须考虑气体放电管截面的温度分布。否

则,实际状态下输出光束的方向角及光强截面分布与理想情况会产生很大的差别。

放电管内的气体温度分布还会直接影响工作气体的放电电子温度分布,从而影响到激光器的电光转换效率和运转稳定性。其中的关键是求出放电管截面的气体温度分布。因此,放电管截面的温度分布计算对于快速轴向流动 CO₂ 激光器的理论分析至关重要。

本文从能量守恒定律出发进行分析,采用微元分析法建立了放电管的热能平衡方程。根据实际器件中放电管的流场分布情况,进行了合理的数学物理处理。并应用热传导的物理边界条件,求出了热能平衡方程的解析解,得出了实际器件放电管横截面内的气体温度分布公式及温度分布曲线。

2 热能平衡方程的建立

如图 1 所示,取放电管的轴向微段 dx 。假定放电管内半径为 r_0 ,工作气体在管中的轴向流动速度为 u ,在放电管气体平衡流动及稳定放电情况下中心温度为 T_c ,管壁温度为常温 $T_w = 298$ K。在放电

管内这一微段中取同心微环 $r \sim r + dr$,设在离管中心半径 r 环处 ,气体温度为 T 。

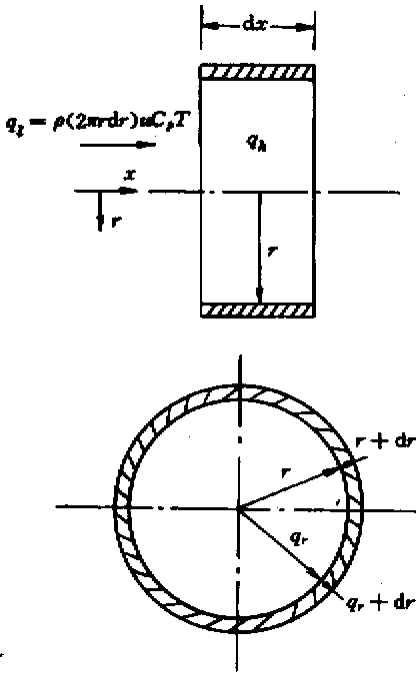


图 1 激光放电管热量平衡的微元分析图

Fig.1 Heat equation microanalysis of laser tube

分析这一微元热能的平衡方程为：

对流带出的净热量 = 气体放电产生的热量 - 传导带出的净热量

通过传导进入微元体的热流量是^[7] $dq_r =$

$-k2\pi r \frac{\partial T}{\partial r} dx$,式中 dq_r 为热流量 , k 为气体导热系数。

通过传导带出微元体的热流量是^[7] $dq_{r+dr} =$

$-k2\pi(r+dr)dx \left(\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} dr \right)$;

单位时间里传导带出微元体的净热量为：

$-2\pi k \left(\frac{\partial T}{\partial r} + r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) dx dr$;

单位时间里通过气流从微元带出的净热量

为^[7] $2\pi r dr \rho C_p u \frac{\partial T}{\partial x} dx$ 。其中 ρ 为气流密度。当气体轴向流速足够快时 ,管内气体横截面的径向温差一般不会太大 ,可以认为气体密度随温度变化的影响相对于其他因素对计算放电管中气体温度分布的影响相对较小。为简化计算方法 ,在以后的分析中采用工作气体的平均密度来计算。即假定 ρ 为一常数 取工作气体密度的平均值。其他参数也作同样的考虑。

C_p 为工作气体定压比热常数 , u 是在 r 微环上轴向气体速度。

在激光电抽运过程中对微元所注入的电功率 ,一部分抽运工作气体反转形成激光 ,另一部分转化为气体转动及平动能以热量形式使气体被加热 :

注入电功率 = 激光功率 + 气体热量

单位时间里气体放电产生的热量密度为 :

$$\epsilon_h = (1 - \eta)\epsilon_e = \frac{1 - \eta}{\eta}\epsilon_l$$

其中 , η 为光电转换效率 , ϵ_e 为注入电功率密度 , ϵ_l 为激光功率密度。

单位时间里这一微元在气体放电过程中产生的热量为 $\epsilon_h 2\pi r dx dr$ 。

综合上面各关系式 ,应用热能平衡方程可得如下热流平衡方程

$$2\pi r \rho C_p u \frac{\partial T}{\partial x} dx dr = 2\pi k \left(\frac{\partial T}{\partial r} + r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) dx dr + \epsilon_h 2\pi r dx dr$$

容易将上式简化为如下偏微分方程

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{ur}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\epsilon_h r}{k} \quad (1)$$

其中 ,定义 $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ 为热扩散系数 ; x 为沿放电管的轴向坐标。

现在来讨论激光器处于平衡状态下情形 ,即满足气体轴向流动速度稳定和激光输出稳定的条件。我们研制的器件的光束方向性很好(约为 0.1 mrad) ,即对 1.6 m 的腔长光斑直径仅改变 0.16 mm。相对于 20 mm 的放电管内径来说可认为在放电管内 ,激光的强度沿放电管的轴向是均匀分布的。同时 ,在激光器处于平衡状态下 ,放电管管壁上的热通量是常数 ,即 $\frac{dq_w}{dx} = \text{常数}$ 。由于连续抽运强度不变 ,气体将在轴上各截面产生相同的热量。此时 ,工作气体沿放电管 x 轴方向的平均温度将是随 x 线性增加的 ,即 $\frac{\partial T}{\partial x} = g = \text{常数}$ 。这就意味着沿着放电管的不同距离 x ,温度分布将是相似的。因此 ,只需考虑工作气体在放电管内横截面上的温度分布。

方程式(1)的边界条件是 :

(1) 在 $r = 0$ 处 $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$

(2) $q_w = -k2\pi r_0 L \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \text{常数}$

其中 L 为放电管长度 , q_w 为管壁的传热量。即在激光器参数确定以后 ,在稳定运转的情况下放电管壁

面温度为一定值。该值的大小由激光器工作的环境温度决定。

边界条件(1)中 $\frac{\partial T}{\partial r}$ 是方程式在 $r = 0$ 仍保持热平衡的物理条件所必需的。

3 热能平衡方程的解析分析

在研制的快速轴流 CO₂ 激光器中,为了保证增益圆对称分布,从而获得低阶模激光输出,采用了螺旋涡流装置。该装置的采用造成放电管内工作气体的径向流动相当混乱,而轴向流动在整个放电管横截面上基本均匀。放电管在径向的传热既有热传导又有工作气体对流的质传热。对实际工作情况进行数学物理简化处理,认为放电管横截面上工作气体的轴向流速为常数,同时用放电管平均温度的热传导率来描述工作气体的径向传热。即有

$$u(r) = u_0 \quad (2)$$

我们研制的快速轴流 CO₂ 激光器的光束质量相当好,约为 0.1 mrad。光斑花样表明其输出激光模式结构为 TEM₀₀ 模。因此可以认为放电管内激光强度呈现高斯分布,即

$$\epsilon_h = \epsilon_{h_0} \exp\left(-\frac{r^2}{2r_0^2}\right) \quad (3)$$

计算中采用放电管中注入的平均电功率密度通过下式来估算激光光强

$$\frac{1}{r_0} \int_0^{r_0} \epsilon_h dr = (1 - \eta) \epsilon_e$$

$$\epsilon_{h_0} = \frac{(1 - \eta) \epsilon_e r_0}{\int_0^{r_0} \exp\left(-\frac{r^2}{2r_0^2}\right) dr} \quad (4)$$

由(1)~(4)式可得到实际器件的热能平衡方程

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{u_0 r}{\alpha} g - \frac{\epsilon_{h_0} r}{k} \exp\left(-\frac{r^2}{2r_0^2}\right) \quad (5)$$

对(5)式两次积分,并采用(1)式的边界条件以及 $r = r_0$ 时的工作气体温度与管壁温度相等,即 $T(r_0) = T_W$ 可解得放电管内工作气体横截面上的温度分布表达式为

$$T(r) = \frac{u_0}{4\alpha} gr^2 - \frac{\epsilon_{h_0} r_0^2}{k} \int_0^r \frac{1}{r} \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2r_0^2}\right) \right] dr + T_C \quad (6)$$

(6)式中, T_C 为放电管中心工作气体的温度,即

$$T(r = 0) = T_C$$

由(6)式可得放电管内工作气体中心温度与管壁处温度的关系式为

$$T_C = T_W + \frac{\epsilon_{h_0} r_0^2}{k} \int_0^{r_0} \frac{1}{r} \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2r_0^2}\right) \right] dr - \frac{u_0}{4\alpha} gr_0^2 \quad (7)$$

考虑到稳定运行的物理条件

$$\frac{\partial T}{\partial x} = g = \text{常数} \quad (8)$$

可写成差分形式

$$g = \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} = \frac{T_2 - T_1}{l} \quad (9)$$

(9)式中, T_1, T_2 分别为放电管中工作气体进口平均温度及出口平均温度,可在实际运行的器件中通过仪器测定。 l 为放电管的长度。

因此从原始截面的温度分布 $T(r, x = 0) = T(r)$ 便可由(8)式求得各截面的温度分布

$$T(r, x) = T(r) + gx \quad (10)$$

4 计算结果及讨论

图2为针对我们研制的器件经过计算所得的放电管横截面上工作气体的温度分布曲线。器件的工作参数为:

工作气体比例为 CO₂:N₂:He = 1:5:15, 气体密度 $\rho = 2.9 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 工作压力 $P = 8000 \text{ Pa}$, 光电转换效率 $\eta = 20\%$, 放电管管壁温度为 298 K, 放电管长度为 230 mm, 气体放电管半径为 10 mm, 入口气体整体流速为 200 m/s, 气体热传导系数 K 取 0.128 W/m·K, 气体定压比热 C_p 取 $3.89 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 。其中, 曲线 a: 气体放电注入功率 $\epsilon_e = 1.8 \text{ Wcm}^{-3}$, 放电管轴向温升约为 $T_2 - T_1$ 为 10 K; 曲线 b: 气体放电注入功率 $\epsilon_e = 3.6 \text{ Wcm}^{-3}$, 放电管轴向温升约为 $T_2 - T_1$ 为 23 K; 曲线 c: 气体放电注入功

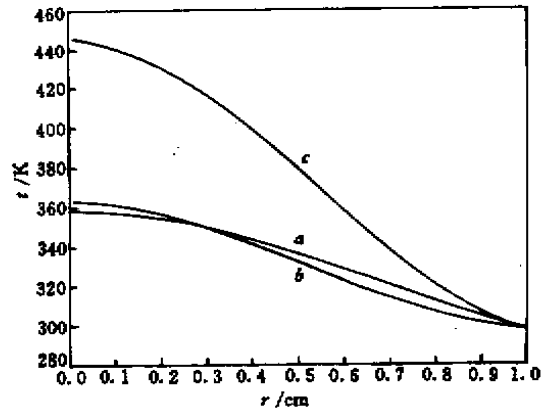


图2 激光放电管横截面内的气体温度分布
Fig.2 Radius temperature distribution of laser tube

率 $\epsilon_e = 7.2 \text{ Wcm}^{-3}$, 放电管轴向温升约为 $T_2 - T_1$ 为 45 K。

图 3 给出了图 2 中气体流速变化、其他参数不变时的放电管横截面内气体温度的分布,其中,曲线 a : 气体流速 $u_0 = 200 \text{ m/s}$; 曲线 b : 气体流速 $u_0 = 150 \text{ m/s}$; 曲线 c : 气体流速 $u_0 = 250 \text{ m/s}$ 。

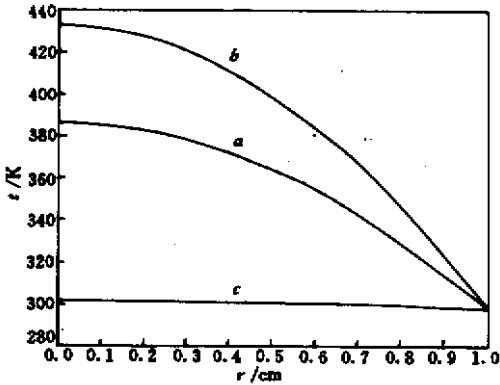


图 3 不同气体流速下放电管内的气体温度分布

Fig.3 Radius temperature distribution of laser tube for different gas velocity

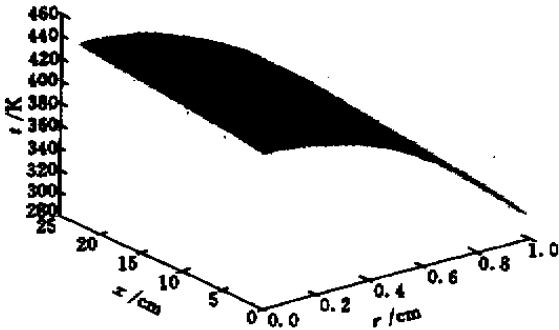


图 4 放电管内气体温度的三维分布

Fig.4 3D temperature distribution of laser tube

图 4 给出了气体温度在放电管内的三维分布曲线情况。

图 2 表明放电管内横截面上工作气体的温度是由中心温度 T_C 单调地沿半径到达管壁温度 T_W 。在激光器的光电转换效率保持不变的情况下,注入的电功率越大,工作气体吸收的热量也越多,放电管中心的工作气体温度也越高,由温度变化而导致的工作气体热致负透镜效应也会越严重。工作气体温度在管中心缓慢下降后即迅速近线性下降,这是由于单模激光的横截面能量高斯分布使抽运能量大部分消耗在模体内,大量的热量已由轴向气流带走所引起的。

图 3 的情况说明,提高工作气体轴向流动速度有利于减小放电管横截面内的气体温度梯度,减小热致负透镜效应,从而有利于改善激光光束分布的均匀性,提高光束质量。当气体流速达到足够快时,放电管横截面上的气体温度分布几乎均匀分布,此时激光器工作过程中产生的热量极大部分被轴向流动气体带走,可基本不考虑径向热扩散的影响,这种状态正是快速激光器所要求达到的理想状态。

5 结 论

本文从能量平衡出发,采用微元分析的方法分析了高功率快速轴流 CO_2 激光器放电管中的热平衡情况,建立了热能平衡方程。对实际工作器件进行了合理数学物理简化,并求得了放电管中各截面的工作气体温度分布。该结果的初等函数表示更有利于实际应用,也为进一步分析激光器放电管的热致负透镜效应及激光器谐振腔的设计提供了理论分析依据。应用该理论结果求得的激光器最佳工作参数与我们在实际器件中所采用的最佳工作参数基本一致。

参 考 文 献

- 1 S. G. Anderson. Review and forecast of laser markets Part I : Nondiode lasers. *Laser Focus World*, 2000, **36**(1) :92 ~ 112
- 2 Zuo Duluo, Li Shimin. Review of fast axial flow CO_2 laser. *Laser Technology* (激光技术), 2000, **24**(1) :4 ~ 8 (in Chinese)
- 3 Shi Lishen, Zhu Youxin, Liu Jiayan *et al.*. Compact 500 W fast-axial-flow CO_2 lasers. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 1996, **4**(4) :1 ~ 3 (in Chinese)
- 4 M. Moissl, R. Paul, K. Breining *et al.*. Thermal lensing effect in fast axial flow CO_2 -lasers. *SPIE*, 1990, **1397** :395 ~ 398
- 5 O. Maerten, G. Herziger, R. Klein *et al.*. Laser medium/resonator field interaction of fast axial flow CO_2 lasers. *SPIE*, 1987, **801** :51 ~ 57
- 6 H. K. V. Lotsch, W. C. Davis. The lensing of effect CO_2 laser plasma. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(12) :2725 ~ 2728
- 7 J. P. Holman. Heat Transfer. Beijing : People's Education Publishing House, Edition one, 1979. 195 ~ 200 (in Chinese)