

千瓦级快速轴流 CO₂ 激光器设计中 重要物理参数的优化选择

周杰

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 本篇论文通过较新的快速轴流 CO₂ 激光器的理论及理论模型, 对影响到小信号增益、饱和参量、输出功率、输出模式等出光特性的主要物理参数进行了讨论, 并依此对我们的千瓦级轴流 CO₂ 激光器主要物理参数进行了优化选择。

1 引言

快速流动 CO₂ 激光器较一般 CO₂ 激光器突出特点是单位长度内输出功率大, 光束质量好(以基模为主), 调制性能佳, 总的电光转换效率高, 运转成本低, 可与数控机床连成激光加工机, 广泛应用于机械制造、钢铁制造、电子和汽车制造等行业的切割、打孔、焊接、表面处理等材料加工方面。

我们设计的千瓦级轴流 CO₂ 激光器采用直流高压激励的快速轴流式, 重点要求激光输出功率、输出模式等出光特性达到设计要求, 由于加工周期及材料用品的限制, 我们不可能对激光器腔长、管径、气压、反射窗等各种参数大小一一去试, 这样既费时间又费经费, 因此我们希望能事先建立一套快速轴流 CO₂ 激光器的理论及理论模型, 帮助我们进一步了解激光器内部工作机理, 掌握各主要物理参数对出光特性的影响大小及影响趋势, 从而提出一些主要物理参数设计中取值大小的参考值。作为今后设计轴流 CO₂ 激光器的软件, 这对缩短调试周期, 降低费用, 有着很实际的意义。

2 轴流激光器工作原理

我们设计的千瓦级大功率轴流 CO₂ 激光器由四大部分组成, 即激光放电管及光学谐振腔, 气体循环冷却系统, 充气排气系统, 电源系统。

预抽真空后, 将气体按适当比例充入到一定气压, 开启罗茨泵使得混合气体在放电管中

快速流动,然后在放电管两端加电压使气体放电,光波在谐振腔中来回振荡,输出激光。排气充气系统在工作时同时开动。

3 轴流激光器理论模型

(1)由于对激光器系统可采取一些措施,所以在考虑主要碰撞类型时,为简便起见,我们不考虑 O_2 、 CO_2^- 、 CO 、 NO 等分解、化合产生的杂质。综合 CO_2 、 He 、 N_2 、电子及光子间的相互作用,提炼出九类主要反应类型。粒子间的相互碰撞,造成 CO_2 分子 $(1,0^0,0)$ 能级与 $(0,0^0,1)$ 能级间粒子数出现反转,受激辐射时产生跃迁从而形成激光输出。

(2)快速轴流 CO_2 激光器的对流扩散过程主要分为轴向对流过程及电管放,模体积内外气体分子径向产生的对流、扩散过程。

对于快速轴流 CO_2 激光器,以轴向对流冷却为主,可近似处理为一维模型。

由于放电管中有质量连续方程、动量平衡方程、能量平衡方程成立,综合三方程,有

$$\frac{\rho C_p}{L}(T - T_0) = \frac{\Delta p}{L} - \frac{f^*}{4R} \left(\frac{\dot{m}}{Q}\right)_2 \frac{1}{\rho} + \frac{Q}{\dot{m}} \rho [W_0 - \frac{2h}{R}(T - T_w)] \quad (1)$$

其中 \dot{m} 为质量流速, L 为放电管长, R_g 为气体普适常数, Q 为管横截面面积, V_0 、 T_0 为进口气流速度及气体温度, f^* 为放电管内粘滞阻尼系数, $\omega_0 = \epsilon \cdot P_1 / (N_1 \cdot V_1)$ 为单位体积单位时间的净能量注入, ϵ 为注入功率密度, N_1 为放电管节数, V_1 为单个放电管体积。 T_w 为管壁温度,由此式可求得平均气体温度 T 。

(3)引入玻尔兹曼因子 $X_i = e^{-\epsilon_i / kT}$ ($i=1,2,3,n$), ϵ_i 、 T_i 对应为各振动模式能级间隙及模温,定义各振动模式的量子密度为 $q_i = X_i / (1 - X_i)$,分析归纳九类碰撞反应及对流、扩散过程对量子密度的影响,将值代入量子密度方程组

$$\frac{q_1 - q_1^0}{\tau_z} = \dot{q}_1^c + \dot{q} \cdot q_1^2 + \dot{q}_1^{diff} + \dot{q}_1^{conv} + \dot{q} \cdot q_1^{rad} \quad (2)$$

$$\frac{q_2 - q_2^0}{\tau_z} = \dot{q}_2^c - \dot{q}_1^2 + \frac{2}{3} \dot{q}_3^{3,2} + \dot{q}_2^2 + \dot{q}_2^{diff} + \dot{q}_2^{diff} \quad (3)$$

$$\frac{q_3 - q_3^0}{\tau_z} = \dot{q}_3^c + \dot{q}_3^N + \dot{q}_3^3 + \dot{q}_3^{diff} + \dot{q}_1^{conv} \dot{q}_3^{rad} \quad (4)$$

$$\frac{q_N - q_N^0}{\tau_z} = \dot{q}_N^c - \frac{\psi_1 O_2}{\psi_{N_2}} \cdot \dot{q}_3^N + \dot{q}_N^{diff} + \dot{q}_N^{conv} \quad (5)$$

其中 $\tau_z = L/V_z$,可解得模体积内外量子密度值(模体积外时无辐射项),将模体积内外量子密度值代入相应公式,可求得小信号增益,饱和参数量及输出功率。

4 计算结果分析

建立起激光器内部过程的数学模型后,通过计算机编程,利用算出的数据及曲线图可具体讨论各项重要物理参数对出光特性的影响。

(1)气流速度增大,其它条件不就的情况下,气体温度将必低,导致 $(1,0^0,0)$ 能级粒子数减少,即 T_1 减小。而 $(0,0^0,1)$ 能级粒子数在不同流速下就化不是很大,见图 1 中 T_1 ,因此增益系数随粒子数反转增大而增大。

当流速不大时,饱和参数量的变化随流速增大而下降。当流速就大时,饱和参数量随流速增大有上升趋势,见图 3 图 4。由于罗茨泵压差,排气量等客观因素的限制,太高的气流速度是不现实的。一般在 200—300m/s 左右。

在 250m/s 左右的流速下,综合增益、饱和强度两方面的考虑,增益变化起主导作用,输出功率总体看来是随流速增大而增大,在保证设备正常工作条件下,尽量使速度大。

(2) 总气压的影响。各种物理参数中,保持气压比不变的前提下,总气压的改变对出光特性的影响是非常大的。随着气压的增大,增益曲线随着功率密度的变化变得平缓了些,开始下降点推后,模温全都变小,即各模式量子密度减小。而气压的增大,还导致能级弛豫时间变小,但对激发速度影响不大,因此随着气压的增大,各模式量子密度减小,增益的上升也就缓慢了。

饱和参数如图 5 随气压的增大而增大。小信号增益及饱和参量的综合效应,使得输出功率也随压力增大,且饱和趋势越来越推迟,见图 6。但是,与流速类似,总压力也不是能一味升高的。由于气体循环系统及罗茨泵工作值的限制,同时气压过高,激励电压要求更高,加上高压易导致放电管内部等离子体块的不稳定性,引起放电不稳,因此我们根据经验及实际情况,一般充气气压取值小于 10000Pa。

(3) CO₂ 气体的影响。改变 CO₂ 的分压比,使得 P_{CO₂}:P_{N₂}:P_{He} 由 1:7:8 增至 1.3:7:8、2:7:8,随 CO₂ 分压比的提高,增益系数就大。但 CO₂ 分压比的提高伴随着饱和参量的下降,因此 CO₂ 压力提到一定值,对输出功率的影响很小了,发现以 1.4:7:8 的比例为佳,没必要一味增高 CO₂ 分压。

(4) He 气的影响。相同功率密度时,增益随 He 分压增加而增加,但分压大到一定程度后,增益变化就不太明显了,这是因为 He 对 CO₂ 下能级的弛豫非常有效,对上能级粒子数变化的影响不大。但是总气压不变时,P_{He} 过大的话,CO₂、N₂ 的含量相对减小,故增益不再能增加,另外 H₂ 气的增多也会带来 I₁ 的减小,因此不同情况下 H₂ 分压比以一定值时较好,功率既大又不很费价钱较贵的 He 气。

(5) N₂ 分压力的增加对出光特性最显著的影响是使饱和参量直线上升。因为 N₂ 分子密度的增多,对上能级的抽运速率也大大增强。但 N₂ 分压的增加导致 He、CO₂ 分子数相对减小,而 N₂ 分子对 (0,1,0) 能级的弛豫速率系数远不及 H₂ 分子及 CO₂ 分子,从而导致 CO₂ 低能级粒子数大大增加,反过来导致增益的下降,而输出功率正比于小信号增益和饱和参量的乘积,所以 N₂ 分气压比也有一适当值。

(6) 放电管半径大小的影响。对于对流为主的轴流 CO₂ 激光器,一般增益随放电管的增大而减小。这是因为 R 的增大,温度略升。而饱和参量的变化影响相对小些,所以总的输出功率减小。但是放电管半径不能太小,否则衍射损失加大,对输出功率影响就很大了。其大小的选择应在保证出光模式及模体积的前提下适当小些,这也有利于流速的提高,这项应结合模式选取考虑。

(7) 其它主要物理参数保持不变的情况下,输出功率总的来说随放电管 L 增大而明显增大。可这些都得在其它参数几乎不就的理想模型下推得的,而在我们的设计中掺入了众多的实际成分。首先我们不希望一台激光器腔太长,占地而庞大,宁可腔短些而加以高的注入功率密度达到同样的输出功率。另外腔太长对增加流速、降低放电电压等也不利。根据我们激励电源的负载能力,在 15W/cm² 的功率密度下能达到千瓦输出就符合要求了。根据我们的计算,L 长 240mm 左右是可能达到要求的。八节放电管加上隔离区等部分,我们这台激光器设计成谐振腔长 L₀ 为 4 米左右,采用折叠式。

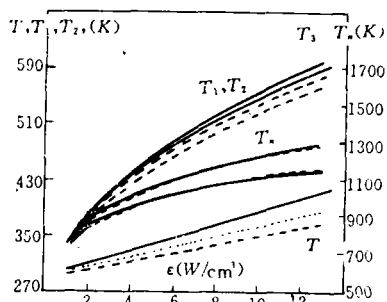


图 1. 不同流速下模温图

实线对应 $V_s=200\text{m/s}$
 点虚线对应 $v_s=250\text{m/s}$
 虚线对应 $V_s=300\text{m/s}$

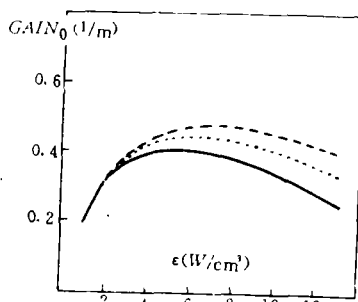


图 2. 不同流速下增益系数图

实线对应 $V_s=200\text{m/s}$
 点虚线对应 $V_s=250\text{m/s}$
 虚线对应 $V_s=300\text{m/s}$

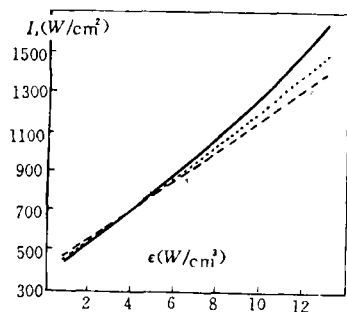


图 3. 不同流速时 I 图

实线对应 $V_s=200\text{m/s}$
 点虚线对应 $V_s=250\text{m/s}$
 虚线对应 $V_s=300\text{m/s}$

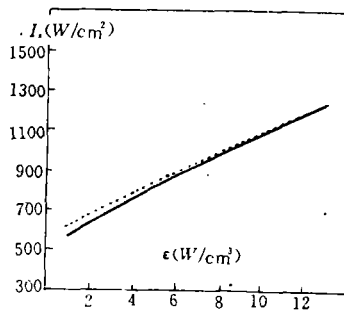


图 4. 不同流速时 I. 时图

实线对应 $V_s=550\text{m/s}$
 点虚线对应 $V_s=600\text{m/s}$

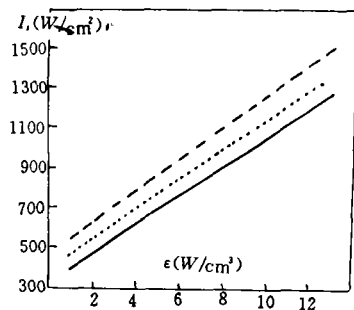


图 5. 不同总气压下 I.

实线对应 $P=4700\text{p}$.
 点虚线对应 $P=5300\text{p}$.
 虚线对应 $P=6000\text{p}$.

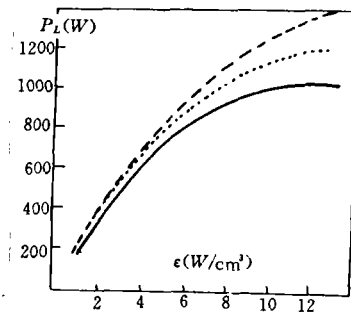


图 6. 不同总气压下 P_L

实线对应 $P=4700\text{p}$.
 点虚线对应 $P=5300\text{p}$.
 虚线对应 $P=6000\text{p}$.

(8) 由输出功率表达式看出, P_L 为 t_m 的非线性函数, 其透过率的大小直接影响到输出功率的大小。我们发现 t_m 为 0.3 左右时, P_L 有最大输出功率。

5 模式选择

大功率轴流 CO₂ 激光器与横流 CO₂ 激光器相比,主要优点就是出光模式好,发散角小,便于聚焦用于切割、打孔等激光加工中。因此,在我们的千瓦级轴流激光器的设计中,对模式的考虑是相当重要的。

(1) 选基模的原则。激光谐振理论告诉我们,激光振荡的条件之一就是增益 γ 必须大于损耗 δ ,而损耗概括地说有三部分,即激光束通过增益介质所产生的损耗 δ_i ,激光束在镜面上由于透射、散射和吸收等因素产生的损耗,设为 δ_m ,再加上激光在谐振腔中因衍射而产生的损耗设为 δ_a ,要求

$$\gamma > \delta_i + \delta_m + \delta_a \quad (6)$$

除去高阶模的方法就是使得对高阶模上式不成立,而对基模成立。因为 δ_i, δ_m 对高低阶模几乎相同,因此只有利用高、低模 δ_a 的不同来达到目的。对横模(1,0)模能滤去的话,其它高阶模也就滤去了,所以要求 δ_{i0}/δ_{00} 尽量大, δ_a/δ 值也尽量大。模体积的大小直接关系到出光功率大小,因此腰粗不能太小,而腰粗 ω_0 与腔长及反射镜曲率半径 R_2 有关。

(2) 经比较分析,当 g 参数取 0.9, $R_2=40m$ 时,要 δ_{i0} 不满足(6)式,则要求菲涅尔数 $N < 1.2$,此时管径 $R=7.13mm$, $\omega_0=6.36mm$, $\delta_{00}=10\%$, $\delta_{i0}=28\%$, δ_{00}, δ_{i0} 较大且 δ_{i0}/δ_{00} 较大,腰粗也符合要求。因为我们要求的是基模为主。实际上,因为八段放电管是对接起来的,准直性不一定非常理想,应该将管径稍选大点。

6 实验比较及其结论

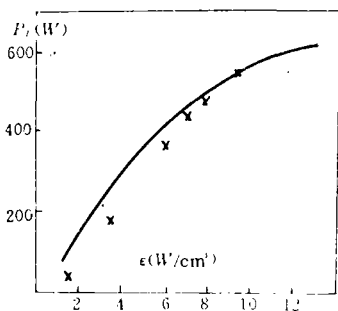


图 7. 理论、实验比较图 每段放电管长为 350mm

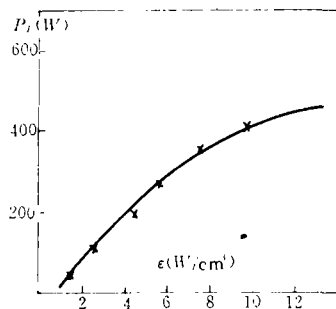


图 8. 理论、实验比较图 每段放电管长为 260mm

(1) 当四段放电管,每段长 350mm 及 260mm, $P_{CO_2}:P_{N_2}:P_{He}=1:7:8$,管径 18mm,光斑直径 12mm,总气压为 6000Pa 时,理论计算结果和实验比较图如下,实线为理论值,测量值用星号标出。

此外我们在 500 瓦激光器反射镜曲率半径 $R_2=20m$,腔长 $L_0=3m$ 时,在出射窗外 2 米处测得光斑大小为 12mm 左右。理论计算得基模光斑尺寸为 11mm 左右,加上些没完全滤尽的高阶模,与实验结果比较符合。

(2) 根据前面的理论分析及与实验的比较,结合实际考虑,我们可以选定千瓦级轴流 CO₂ 激光器的主要物理参数,气体流速以 250m/s 为宜,总气压可取为 5700Pa 分压比可试着在

$P_{\text{CO}_2}:P_{\text{N}_2}:P_{\text{He}}=1:4:7:7=1:5:5$ 附近变动,放电管半径取为 7.2mm,但实际对接放电管时,最好找直径 15mm 的,稍大点。8 段放电管每节长取 220mm,谐振腔总长 L_0 为 4 米,折叠式,出射窗透过率为 30%左右,反射镜曲率半径为 40m。当取以上各项数据时,计算输出功率,当功率密度大于 $10\text{W}/\text{cm}^2$ 时,激光器将输出以基模为主的,功率达到千瓦的激光束,符合设计要求。

The Selection of Optimal Parameters Design for 1KW CO₂ Laser

Zhou Jie

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)*

Abstract

Based on a new theoretical model of fast axial flow CO₂ Lasers and Laser theories, the main physics parameters which influence the small signal gain, saturation parameter, output power, optical mode and other properties of laser, are discussed in this dissertation.

The optimal parameters design for our 1KW CO₂ laser, therefore, have been selected.