

# 折叠式准封离型 CO<sub>2</sub> 激光器的光学谐振腔设计

洪 蕾<sup>1,2</sup>

李力钧 鞠春雷

(<sup>1</sup> 清华大学, 北京 100084; <sup>2</sup> 株洲电力机车厂, 湖南株洲 412001)

(湖南大学, 湖南长沙 410082)

**提要** 在千瓦级基模连续 CO<sub>2</sub> 激光器谐振腔设计中, 采用具有良好横模选择能力的准封离型多折腔方案, 考虑到共振腔内负的气体热透镜效应, 使模体积与激发体积形成良好匹配, 谐振腔获得稳定的最大效益的功率输出。在此基础上采用机械斩光盘式调 Q 方案, 调整谐振腔设计参数, 补偿高功率激光窗口正的热透镜效应, 获得了最大平均输出功率 800 W 的以基模为主的 CO<sub>2</sub> 调 Q 脉冲输出。

**关键词** 折叠式准封离型 CO<sub>2</sub> 激光器, 谐振腔, 热透镜效应

**中图分类号** TN 242; TN 248.2+2 **文献标识码** A

## Design of Optical Resonator of Folded Quasi-sealed-off CO<sub>2</sub> Laser Unit

HONG Lei<sup>1,2</sup>, LI Li-jun<sup>3</sup>, JU Chun-lei<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> Tsinghua University, Beijing 100084; <sup>2</sup> Zhuzhou Electric Locomotive Works, Zhuzhou, Hunan 412001)  
<sup>3</sup> Hunan University, Changsha, Hunan 410082)

**Abstract** In designing the kW order TEM<sub>00</sub> mode continuous wave laser unit, a quasi-sealed-off and multi-folded resonator that has the good transverse mode selection ability was developed. In order to insure the mode volume matches with the discharge volume well, the negative thermal lensing effect was taken into account, resulting in the stable output laser whose power is high enough. Based on the forgoing design, a mechanical chopper Q-switched CO<sub>2</sub> pulse laser was developed then. The resonator parameters were adjusted, including the calculation of the positive thermal lensing effect of the high power laser windows. At last, a Q-switched CO<sub>2</sub> laser pulse with the highest average output power of 800 and TEM<sub>00</sub> mode was obtained.

**Key words** folded quasi-sealed-off, CO<sub>2</sub> laser, resonator, thermal lensing effect

众所周知, 最简单可靠的 CO<sub>2</sub> 激光器是封离型激光器。在封离型器件中, 工作气体不流动, 直流自持放电产生的热量, 通过玻璃或石英管壁传导散热, 导热率低。注入功率和激光功率受工作气体温升的限制, 每米激光管的输出功率在 50 W 以下, 则 1 kW 激光器放电管将长达 20 m, 这便是此类激光器最大的缺点。将长放电管折叠起来使其结构紧凑, 一些折叠式慢速轴流 CO<sub>2</sub> 激光器光束质量很好(为 TEM<sub>00</sub>)。但是伴随折叠方案而来的是由于折叠过程中多重反射镜的使用导致功率的损失和如何使经多重反射后的谐振腔稳定。由于现在镀膜反射镜对 10.6 μm 波长反射率高达 99.5%, 因此只要设计合

理, 可以在使谐振腔稳定工作的同时尽可能减小功率损失。

## 1 连续 CO<sub>2</sub> 激光器谐振腔

### 1.1 谐振腔设计

折叠腔具有长腔选模特性, 可获得低阶的模式输出, 改善光束质量, 但在折叠过程中由于多重反射镜的反射损失将导致输出功率的额外损失。从另一方面看, 可以通过调整各个反射镜的曲率半径, 在保持器件总尺寸不太大的前提下, 使模体积与激发体积形成最好的匹配, 即尽可能地增加其振荡模体积,

收稿日期 2001-05-31; 收到修改稿日期 2001-10-30

基金项目 (原) 机械工业部重点学科建设项目(94jx2097)。

作者简介 洪蕾(1972—), 女, 博士后, 主要从事激光器及激光加工的研究工作。E-mail: juhonglei@china.com

充分利用增益空间,使谐振腔输出稳定并获得最大的激光能量,从而获得较高的输出功率。因此各个谐振腔镜的设计原则必定是通过追寻高斯光束的变化,确保在所有球面反射镜上的光束半径相等。

在计算模体积时,必须考虑到 CO<sub>2</sub> 激光等离子体产生的热透镜效应。当腔内存在一个负的热透镜时,谐振腔参数如光斑尺寸、谐振腔损失、光束传播发散角等发生了变化<sup>[1]</sup>。

根据经验,将放电管管径均取为 30 mm,并将多折叠腔等效为一平-凹腔,根据设计原则计算选取各反射镜曲率半径。此时输出镜为平面镜,经计算,谐振腔另一端反射镜曲率半径为 50 m,腔长一半处的反射镜曲率半径为 70 m,得到基模激光的输入和输出光束半径均为 20 mm,基模光束能通过放电管。

### 1.2 试验结果

如图 1 所示,1 为水冷石英放电管,总长约 20 m,经十重折叠,分为相互平行的两排放置,之间用 45°反射镜 2 将光路耦合起来。在这些石英管的两端,用殷钢管将其连结,形成一个刚性桁架,并通过一系列的自由伸缩支承悬吊在机壳上,以保证谐振腔的机械稳定性和热稳定性。激光器采用分段直流激励。为了在一定的谐振腔长度下有尽可能大的激活长度,放电电极均布置在各段放电管的两端靠近转折处,相邻放电管的电极互相靠近。为保证各段放电管同时起辉并均匀一致,采用 5 台独立的直流电源,分别经限流电阻给相邻的两根放电管供电。

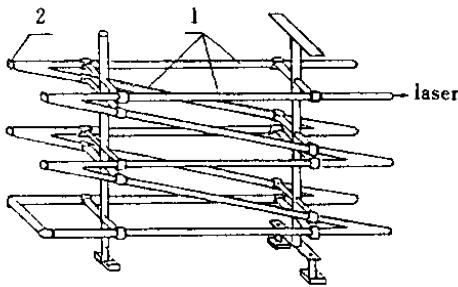


图 1 连续 CO<sub>2</sub> 激光器谐振腔示意图

Fig.1 Schematic diagram of the laser resonator

此时激光器最大输出功率为 1000 W ± 5%, 横向模式以 TEM<sub>00</sub> 为主,输出光斑形状为近正态高斯分布,激光束远场发散半角为 1 mrad,连续运行时间大于 24 h。

## 2 调 Q 脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器谐振腔

针对上述连续 CO<sub>2</sub> 激光器折叠腔特征,采用机械斩光盘式调 Q 装置,可以在保持平均功率变化不大的基础上获得高的脉冲重复频率和峰值功率<sup>[2,3]</sup>,谐振腔设计方案随之产生一些变动。

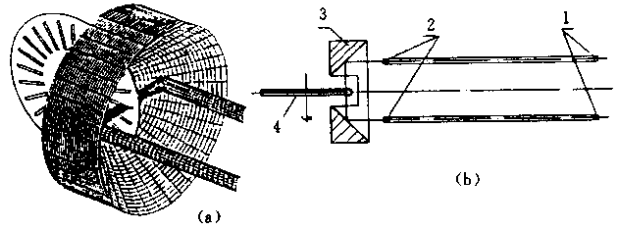


图 2 调 Q 脉冲激光器调 Q 装置 (a) 和谐振腔光路 (b) 示意图

1 反射镜 2 ZnSe 窗口透镜 3 圆锥面镜 4 斩光盘

Fig.2 Schematic diagram of the Q-switched (a) and the optical resonator (b) of the laser

1 : reflectors ; 2 : ZnSe windows ; 3 : conical mirror ; 4 : chopper

如图 2 所示,将原分为两排平行放置的十重折叠放电管各自一端口分别用两个 AR 镀膜的油冷 ZnSe 窗口透镜 2 封隔并被一 90°铜锥面镜 3 光学耦合。光束经透镜 2 入射此锥面镜,入射光线与锥面镜光轴平行。在此处光束聚焦成沿锥面镜光轴的线并被一高速旋转的斩光盘 4 周期性开、断。则在一部分时间,斩光盘的齿将谐振腔光路遮断,使其 Q 值在阈值以下,激光器无输出。随着斩光盘槽口边缘扫过锥面镜轴线,被遮断的谐振腔光路突然打开,其 Q 值猛增,在槽口扫过锥面镜光轴的一段时间内,谐振腔 Q 值持续处于高值,激光器输出一调 Q 脉冲。

### 2.1 谐振腔特点及改进设计

由设计方案可知,与连续激光器放电管布置不同的是,两排放电管各自一端口分别被两个 AR 镀膜的油冷 ZnSe 窗口封离,则当激光器处于高功率运行时,谐振腔内窗口对激光的吸收将使镜片温度升高导致热畸变,产生正的热透镜效应<sup>[4]</sup>,使得共振腔的参数均发生改变。因此有必要在光路追踪计算中,计及两窗口的正透镜效应,对原连续激光器谐振腔的参数进行调整。

窗口通光区域吸收光能使其温度升高,而窗口边界由于强制冷却处于恒温边界条件。在稳态条件下,窗口内有沿径向的温度梯度,致使窗口的折射率 n 随半径 r 和厚度 l 变化,一般说来窗口中心 r = 0 处温度高,厚度大,由于透镜材料具有正的折射率温度系数,因而中心部位的折射率也较大,从而使窗口变

成一个正透镜。

假设一  $\phi 38 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  ZnSe 窗口透镜,认为在半径处窗口温度为冷却油温,当激光功率为 1000 W 基模高斯光斑半径为 10 mm 时,经计算,得到等效透镜焦距为 76 m。这样,在用光路追踪法求各反射镜的曲面半径时,要计及在 ZnSe 窗口处有两面等效透镜焦距为 76 m 的正透镜。

## 2.2 试验结果

机械斩光盘式调  $Q$   $\text{CO}_2$  激光器在连续激励下工作,脉冲重复频率不受激发速率的限制,可高达  $50 \text{ kHz}^{[3]}$ 。但随着脉冲重复频率的增加,虽然平均输出功率提高,但是单个脉冲能量和峰值功率将下降,因此在选择脉冲重复频率时应综合考虑这两个矛盾的影响因素。利用电主轴带动斩光盘以  $250 \text{ n/s}$  的速度旋转,斩光盘齿数为 80,则形成的调  $Q$  脉冲重复频率为 20 kHz。此时激光器调  $Q$  脉冲最大平均输出功率为 800 W,仍以基模输出为主。

在不出现多脉冲前提下,可通过改变斩光盘槽宽来调整脉冲波形。在普通低气压下,受激  $\text{N}_2$  往  $\text{CO}_2$  上能级的共振转移过程长达  $50 \mu\text{s}^{[2]}$ ,而这种共振转移正是  $\text{CO}_2$  激光抽运的主要机制。在调  $Q$   $\text{CO}_2$  激光器中,一个主脉冲将储存的  $\text{CO}_2$  上能级粒子数基本消耗后,仍可以通过这个共振转移过程在约  $10 \mu\text{s}$  的时间内维持  $\text{CO}_2$  反转粒子数高于振荡阈值,只要在这段时间内斩光盘将光路打开,可以在主脉冲之后,输出一功率较低的平台,平台的能量与主脉冲能量相当。而若此时光路被斩光盘遮断,则仅输出一主脉冲,平台被切除。图 3 是在同一开关时间,同一注入功率和输出平均功率 300 W 下,取不同槽宽时拍得的调  $Q$  脉冲输出波形。波形记录采用快速 HgCdTe 传感器,每一个波形记录有 1300 个脉冲信号。当取斩光盘槽内角为  $0.75^\circ$  时,光路开启时间为  $8.3 \mu\text{s}$ 。由于在谐振腔  $Q$  值变高后激光脉冲建立时间的延迟,整个脉冲宽度为  $6 \mu\text{s}$ ,在主脉冲之后仍维持一功率较低的平台,主脉宽为  $1 \mu\text{s}$ ,尾部平台宽度为  $4 \mu\text{s}$ ,其功率是主脉冲峰值功率的  $1/7$ 。此时平均功率为 500 W,故峰值功率为 15 kW,如图 3(a) 所示;当取斩光盘槽内角为  $0.375^\circ$  时,光路开启时间为  $4.4 \mu\text{s}$ ,输出为纯尖峰脉冲,尾部平台部分被切除,主脉宽为  $1 \mu\text{s}$ 。此时平均功率为 350 W,峰值功率为 18 kW,如图 3(b) 所示。

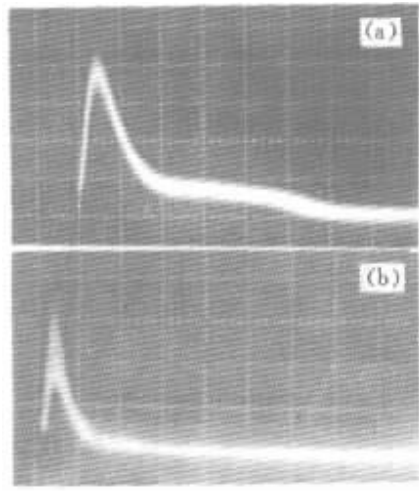


图 3 输出激光脉冲波形

(a) 组合激光脉冲波形图 ( $1 \mu\text{s}/\text{div}$ );

(b) 纯尖峰激光脉冲图 ( $2 \mu\text{s}/\text{div}$ )

Fig. 3 Oscillograms of laser pulses

(a) photograph of a composite laser pulse ( $1 \mu\text{s}/\text{div}$ );

(b) photograph of a pure initial laser pulse ( $2 \mu\text{s}/\text{div}$ )

## 3 结 论

1) 采用准封离型多折叠腔方案,既利用其良好的横模选择能力,又考虑到谐振腔内负的气体热透镜效应,通过追寻高斯光束的变化,使所有球面反射镜上的光束半径相等,从而模体积与激发体积形成良好匹配,谐振腔可获得稳定的最大效益的功率输出。

2) 对连续  $\text{CO}_2$  激光器谐振腔进行改进设计,采用机械斩光盘式调  $Q$  方案,在光路追踪计算中,计及高功率激光窗口的正的热透镜效应并进行补偿,调整谐振腔设计参数,获得了最大平均输出功率 800 W,高重复频率(在平均功率为 800 W 时为 20 kHz)脉冲宽度可调并在微秒数量级的以基模为主的  $\text{CO}_2$  调  $Q$  脉冲输出。

## 参 考 文 献

- Guangsheng Hao. Foundation of the Laser Design [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1979 (in Chinese)
- C. D' Ambrosio, W. O'Neill. New developments in high power CW discharge multikilohertz repetition rate  $\text{CO}_2$  lasers [C]. SPIE, 1988, **1031**: 48 ~ 55
- W. Fub, W. Schulz, D. Schuocker. Scaling of high-repetition rate  $Q$ -switched  $\text{CO}_2$  lasers for industrial applications [C]. SPIE, 1992, **1810**: 79 ~ 83
- Chen Qingming, Zhang Yong, Li Zaiguang. Thermal lens effect and its compensation in high power laser windows [J]. Chinese J. Lasers (中国激光), 1989, (16): 456 ~ 459, 455 (in Chinese)