

文章编号: 0253-2239(2007)07-1224-4

近共振传能放热对氧碘化学激光器性能的影响*

杜燕贻 束小建 李守先

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要: 在氧碘化学激光器(COIL)中, $O_2(^1\Delta)$ 与 I 的近共振传能反应是一个放热反应;它与水汽等的猝灭放热反应一样会对激射过程产生不利影响,而且是不可避免的。计算了猝灭放热效应对光腔气动特性输出功率的影响。得到了近共振传能放热的大小与粒子数反转和激射的光子数相关,即与光腔内的增益、光场强度分布成正比,故主要发生在激光器的上游区前半部分。模型计算表明,其影响程度大致相当于 7%水汽所致的对氧碘化学激光器的影响。完善了氧碘化学激光器理论计算模型。

关键词: 氧碘化学激光器; 近共振传能放热; 输出功率; 猝灭

中图分类号: TN248; O437 文献标识码: A

Effects of Heat Release from Near-Resonant Energy Transfer on Chemical Oxygen-Iodine Laser

Du Yanyi Shu Xiaojian Li Shouxian

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088)

Abstract: In chemical oxygen-iodine laser (COIL), the near-resonant energy transfer reaction between $O_2(^1\Delta_2)$ and I is a process of heat release, which is harmful to the stimulated emission as the heat release reaction caused by vapor quenching and unavoidable. The influence of quenching heat release on pneumatic properties of resonator and output power is calculated. The magnitude of near-resonant energy transfer is related to the population inversion and stimulated emission, in other words, is proportional to the gain of resonator and intensity distribution of laser, so this effect mainly occurs at the front part of the entrance of resonator. The effects almost are equivalent to the quenching by 7% H_2O population influencing on chemical oxygen-iodine laser, and the theoretical model for chemical oxygen-iodine laser is improved.

Key words: laser; chemical oxygen-iodine laser; heat release of near-resonant energy transfer reaction; output power; quenching

1 引 言

氧碘化学激光器(COIL)中化学反应的存在使得放热产生的热量成为影响激光器性能的一个不可忽视的因素,因此分析光腔内各种放热反应的产生机理,计算其对氧碘化学激光器性能的影响程度,以及采取什么样的方式来避免放热带来的不利影响是非常重要的。研究表明,光腔内氧碘化学激光器化学反应放热主要由两部分组成:1)水汽和未分解碘的猝灭反应放热;2) $O_2(^1\Delta)$ 与 I 近共振传能的反应放热^[1]。在以往的研究中,考虑到氧碘化学激光器

中水汽的实际含量较高,已重点分析并计算了水汽猝灭的放热效应对氧碘化学激光器的影响^[2,3]。随着激光器的不断改进,水汽的含量得到较好的控制。这时近共振传能反应的放热效应就不可忽视了。本文采用折叠虚共焦非稳腔,考虑近共振传能放热,针对实际装置计算了共振传能放热对输出功率和腔内气动特性的影响,得到了近共振传能放热的影响规律和程度。同时给出了增大扩张角对抵消放热的关系,完善了理论模型。

* 国家 863 计划(863-802-4)资助课题。

作者简介: 杜燕贻(1965-),女,安徽安庆人,副研究员,主要从事光学方面的研究。E-mail: du_yanyi@iapcm.ac.cn

收稿日期: 2006-08-08; 收到修改稿日期: 2006-11-14

2 理论模型

在 $O_2(^1\Delta)$ 与 I 近共振传能反应过程中, $O_2(^1\Delta)$ 携带的能量高于激发态碘原子 I^* 的能量, 一个 $O_2(^1\Delta)$ 所携带的能量 $E_{O_2(^1\Delta)}$ 为 94294 J/mol, 而一个 I^* 所携带的能量 E_{I^*} 为 90956 J/mol, $\Delta E = E_{O_2(^1\Delta)} - E_{I^*} = 3338$ J/mol。它伴随着粒子数反转和激射作用, 因此该放热效应是不可避免的。

在准稳态近似条件下, 考虑猝灭和激射对 $O_2(^1\Delta)$ 产额 Y 的影响时, 根据文献[1,2], 得到 Y 的变化方程为

$$\frac{dY}{dt} = dY_{qu} + dY_{op}, \quad (1)$$

$$dY_{qu} = -k_{H_2O} x_{H_2O} N_{I^*} - k_P Y N_{I^*}, \quad (2)$$

$$dY_{op} = -\frac{gI}{h\nu N_{O_2t}}, \quad (3)$$

$$N_{I^*} = \frac{Y N_{I_t} - \frac{gI}{h\nu k_F N_{O_2t}}}{Y + \frac{1-Y}{k_{eq}} + \frac{k_P}{k_F} Y + \frac{k_{H_2O}}{k_F} x_{H_2O}}, \quad (4)$$

(1) 式右边第一项是猝灭引起的 Y 改变量, 第二项是激射引起的 Y 改变量。 N_{O_2t} , N_{I_t} , N_{I^*} 分别为总氧, 总碘和激发态碘的粒子数密度, k_{eq} , k_F , k_P 均为反应速率常量^[1], k_{H_2O} , x_{H_2O} 分别是水的猝灭反应数率和水汽与氧气数密度之比, $h\nu$ 为光子能量, g 是增益, I 是激光强度。考虑猝灭和传能造成的放热, 得到总放热公式为

$$dQ = dQ_{qu} + dQ_{op} = (-dY_{qu}) \cdot x_{O_2t} \cdot 1.14 \times 10^4 R + (-dY_{op}) \cdot x_{O_2t} \cdot 4.102 \times 10^2 R, \quad (5)$$

其中 dQ_{qu} , dQ_{op} 分别为猝灭和激射时近共振传能放出的热量。

以上两部分热量都释放到氧碘化学激光器气流

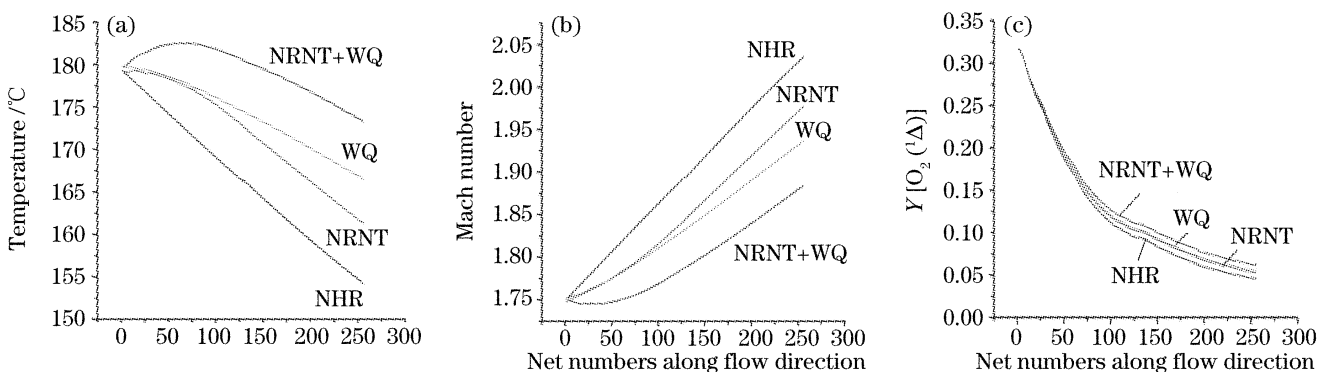


图 1 不同情况下光腔内沿气流方向上温度(a), 马赫数(b), $O_2(^1\Delta)$ 产额(c)的变化

Fig. 1 Temperature, Mach number and $O_2(^1\Delta)$ yield variation along the flow direction in different conditions

NHR: no heat release, NRNT: near-resonant energy transfer, QW: water quenching

中, 引起的氧碘化学激光器气体总温变化 dT_0 为

$$dT_0 = \frac{dQ}{xC_p} = \frac{dQ_{qu} + dQ_{op}}{xC_p}, \quad (6)$$

其中 x 为混合气体的摩尔流量, C_p 为混合气体的定压比热。

考虑传热的变截面定常一维非绝热流的方程组为^[2]

$$\frac{dT}{T} = \frac{(1-\gamma)M^2}{M^2-1} \frac{dA}{A} + \frac{\gamma M^2 - 1}{M^2 - 1} \frac{\Delta T}{T}, \quad (7)$$

$$\frac{dM}{M} = \frac{1 + [(\gamma-1)/2]M^2}{M^2-1} \frac{dA}{A} - \frac{1 + \gamma M^2}{2(M^2-1)} \frac{\Delta T}{T}, \quad (8)$$

ΔT 是放热引起的混合气体的温升, M 是马赫数。 A 是变截面积, γ 是定压定容比热。

综合考虑得到, 在氧碘化学激光器中, 光腔内的放热反应主要是水蒸汽的猝灭反应和在 $O_2(^1\Delta)$ 与 I 近共振传能反应等放热反应的综合效应。

3 计算结果

3.1 传能放热对输出功率的影响

对比猝灭放热得到三种不同情况下近场输出功率和强度均匀性的变化。计算取实验参量, 其中水汽含量与氧的比率 $\chi_{H_2O} = 0.1$, 光腔段扩张角为 $\theta = 3^\circ$ 。相对无放热理想情况, 计算得到传能放热使功率下降了 3%, 猝灭放热使功率下降了 10.97%, 综合影响导致功率下降 13.66%。因此得到传能放热会引起输出功率进一步下降近 3%, 这一结果使得计算更接近试验真实情况。图 1 给出了上述三种情况下折叠非稳腔内沿气流方向上温度、马赫数、 $O_2(^1\Delta)$ 产额的变化。横坐标的前半部分是上游区, 后半部分是下游区, 总网格分点为 256。可以看到, 光腔的上游区传能放热和猝灭放热对腔内温度和马

赫数的影响相当,而在下游区前者的作用明显减弱,说明了传能放热效应与增益介质、光场强度分布成正比,在激发态氧产额高,增益多、光强大的地方影响大。两种放热综合考虑,在光腔上游区前部出现温度上升,之后基本呈线性下降的趋势。这是因为在上游区前部,反转粒子数多,产生的光子数多,激射作用强,同时水汽的含量也高,故传能和猝灭放热均多,这时的扩张角不能满足抵消放热的要求,所以温度上升。到了上游区后部,激射作用变弱,水汽猝灭减少,所以放热也减少,这时的扩张角可以保证抵消放热的要求。在下游区,激射变得很弱,相对而言猝灭放热为主。从光腔内产额看,放热多,阈值增益高,腔内剩余的产额就多,氧的利用率下降。马赫数的变化与温度相反。

3.2 放热效应对扩张角的要求

因为传能放热是氧碘化学激光器固有现象,它的大小是与粒子数反转和激射的光子数相关的,当这些量一定时,可以说这个放热的影响是无法消除的。实验上往往把改变扩张角作为抵消各种因素而导致温度变化的主要手段,为此分析了扩张角大小

对传能放热和猝灭放热的匹配关系。

只考虑传能放热($\chi_{H_2O}=0.0$),当扩张角从 0° 增大到 3° 时,近场输出功率增加 3.17% ,强度均匀性增加 2.62% 。扩张角过大($>8^\circ$),输出功率下降。这是因为扩张角增大,腔内温度下降,马赫数增大,光腔内提取率会有提高。但是当扩张角过大而腔镜尺寸不变时,会导致几何提取效率降低,输出功率将会下降。从 $0^\circ\sim 3.5^\circ$ 计算温度分布图2(a)得到: $1.5^\circ\sim 2^\circ$ 的扩张角即可抵消其上游区的放热效应,下游区 0.5° 即可。实际中为方便起见都是均匀扩张角设计。考虑水汽猝灭和传能综合放热,计算得到图2(b),由于两种热效应叠加,在光腔入口上游区前半部,要想保持温度均匀,扩张角要增大到 $4^\circ\sim 4.5^\circ$,说明此时的角度与总放热效应相匹配;但是在后半部由于传能和猝灭同时减少,故在同样扩张角下温度明显下降,应减小扩张角。由此得到,实际光腔内的不同段对扩张角的要求是不同的;对相同扩张角的光腔段设计,扩张角的选择要综合考虑;如果仅从光腔入口处的高增益条件选择扩张角,会使扩张角过大从而导致光束均匀性下降。

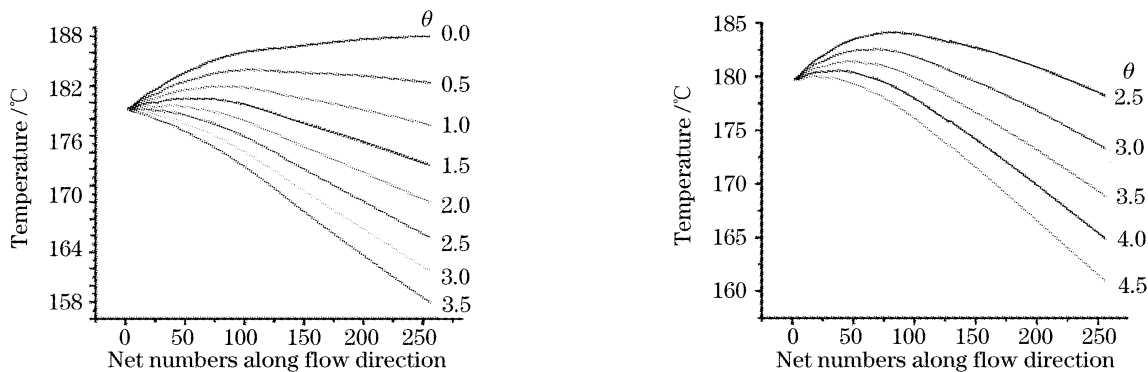


图2 仅有传能放热和综合放热下,腔内温度随扩张角变化对比

Fig. 2 Temperature versus expanding angles for different heat releases

3.3 传能放热效应与水汽猝灭放热之间的相当关系

保持扩张角不变为 3° ,改变水汽含量 $\chi_{H_2O}=0.0\sim 0.3$ 。得到综合放热下温度、马赫数和产额变化

图3(a)。可见要想保持温度基本恒定,水汽含量应该在 $0.05\sim 0.1$ 之间。对比仅考虑水汽猝灭放热的结果,如图3(b),它的水汽含量可以达到 $0.15\sim 0.2$ 。

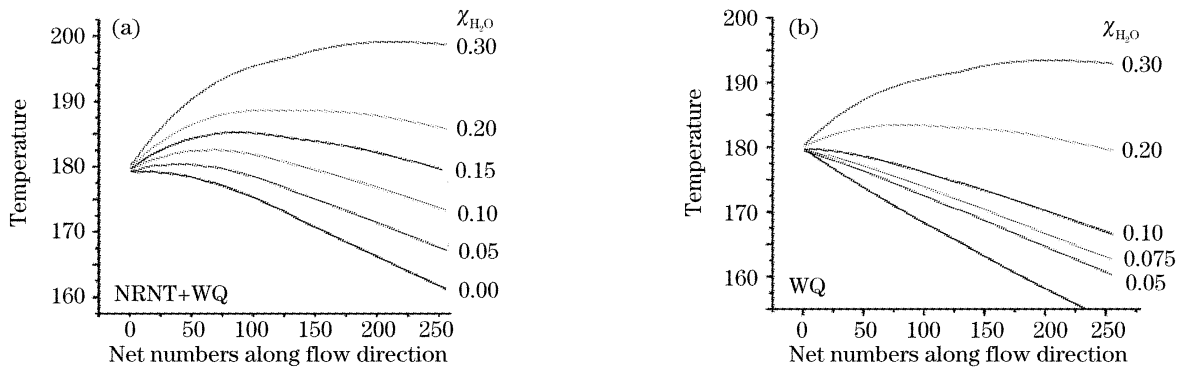


图3 传能放热效应与水猝灭放热效应之间的对比

Fig. 3 Comparison of heat release effects between near-resonant energy transfer and water vapor quenching

对比得到在 30 扩张角下,水汽含量在 0.07 左右时造成的放热效应与近共振传能的放热效应相当。也就是说即使没有水汽,光腔内也有大约相当于 0.07 水汽含量的放热效应。显然腔内水汽含量越小,传能放热越不能忽略;水汽含量很大时,则以猝灭放热为主。

4 结 论

研究了近共振传能放热效应对氧碘化学激光器性能的影响,并与水汽的猝灭效应进行了比较。共振传能伴随着粒子数反转和激射作用,是不可避免。它主要发生在光腔上游区的前半部分,所以其相应的放热效应也发生在光腔的这一区域;之后由于激发态碘原子密度急剧下降,共振反应变得很弱,放热的影响也急剧减弱。在 3°扩张角下,考虑传能放热会使输出功率下降 3%左右,计算结果更接近实验值。近共振传能的放热效应相当于水汽含量在 0.07 左右时造成的放热效应。由于光腔内总体放热反应的程度与位置有关,综合考虑放热引起的温升的总体

效果是在上游区的前部明显,中间平缓,后部下降,说明它们实际对扩张角的要求是不同的,因此光腔段恒定的扩张角不可能保持整个光腔内的温度均匀。

参 考 文 献

- 1 Shu Xiaojian. Calculations of the influences of iodine dissociation and quenching on COIL flow properties[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(2): 105~109 (in Chinese)
束小建. 碘离解和猝灭对氧碘化学激光气动特性影响的计算[J]. *强激光与粒子数*, 2003, **15**(2): 105~109
- 2 Du Yanyi, Liu Xingrong, Shu Xiaojian *et al.*. Simplified model calculation for COIL[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(3): 341~344 (in Chinese)
杜燕贻,刘兴荣,束小建等. COIL 简化模型计算[J]. *强激光与粒子数*, 2002, **14**(3): 341~344
- 3 G. D. Hager, C. A. Helms, K. A. Truesdell *et al.*. A simplified analytic model for gain saturation and power extraction in the flowing chemical oxygen-iodine laser[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1996, **32**(9): 1525~1536
- 4 Li Shouxian, Shu Xiaojian. Analysis of COIL resonator expanding angle design[G]. GF-A0091734N, 17
李守先,束小建. COIL 光腔扩张角设计因素分析[G]. GF-A0091734N, 17