

超声速化学氧碘激光(SCOIL)性能计算的半气体动理学(SGK)模型*

高 智 胡利民 申义庆

(中国科学院力学研究所高温气动实验室, 北京 100080)

摘要 对超声速 COIL 的分析和计算, 提出了氧碘反应气流取连续介质近似, 同时计算碘激光能级粒子速度分布函数, 并用双参数摄动法求解粒子速度分布函数方程组的半气体动理学(SGK)模型, 得到与常用 Voigt 线型及低压极限饱和模型不同的增益饱和模型. 对预混合情况, 分析计算了不同化学反应系统、不同增益饱和模型以及诸可调参数(包括气流参数、激发态氧的产率、水含量、阈值增益、频移等)对功效的影响. 分析计算说明多个反应(包括 21 个)与选用单一共振反应的功效计算结果接近, 而增益饱和模型不同和可调参数的差别对功效、最佳阈值增益范围、功率提取长度均有显著的影响.

关键词 超声速化学氧碘激光(SCOIL) 均匀加宽 非均匀加宽 半气体动理学(SGK)模型 速率方程(RE)模型

超声速化学氧碘激光(COIL)的光腔腔压约在 133.3~1333 Pa 的范围, 在此压力范围内, 谱线均匀加宽与非均匀加宽相竞争, 非均匀加宽占优效应对超声速 COIL 性能的影响十分显著. 超声速 COIL 的性能计算通常采用了谱线为均匀加宽的速率方程(RE)模型, 如见文献[1~4]; 这与低压超声速 HF/DF 化学激光性能计算曾经采用 RE 模型^[5]的情况相一致. 谱线均匀加宽的假设大大简化了问题的处理, 文献[5]曾对非均匀加宽占优条件下可采用均匀加宽模型的理由做了评述. RE 模型不能计算谱线的频率特性, 不能解释超声速 HF 化学激光增益反常饱和的实验现象^[6]. 气流激光的半气体动理学(SGK)模型^[7,8](即气流取连续介质近似、同时计算激光能级分子速度分布函数、并用双参数摄动法求解分子速度分布函数方程组的模型)正确地预测了超声速 HF 化学激光增益反常饱和规律和反常饱和谱

2003-07-01 收稿, 2003-11-25 收修改稿

*国家自然科学基金资助项目(批准号: 10027, 10032050)

SCIENCE IN CHINA Ser. G Physics, Mechanics & Astronomy

线形的实验结果^[9,10], 且它包括了气体(无宏观流动)激光的增益饱和理论以及气流激光的 RE 模型为它的特例. 超声速 HF/DF 化学激光性能的计算表明了^[8]: 在均匀与非均匀加宽相竞争、特别是在非均匀加宽占优的条件下, SGK 模型和 RE 模型预测的激光性能存在显著的差异. 超声速 COIL 的光腔气压范围与超声速 HF/DF 化学激光的气压范围^[5]大体一致. 因此, 有必要推导超声速 COIL 性能计算的半气体动理学(SGK)模型, 并把 SGK 模型预测的激光性能与速率方程(RE)模型的激光性能作比较, 以便更好地实现超声速 COIL 所有可调参数的最佳化. 在超声速 HF/DF 化学激光和超声速 COIL 的研制中, 保证可调参数最佳化具有十分重要的作用. 例如早期的超声速 HF 化学激光, 通过可调参数最佳化使功率输出由最初的多模几瓦提高到几千瓦的衍射极限输出^[5], 功率输出提高近千倍; 又如超声速 COIL 效率的实验值同样相差悬殊, 高的为 0.236, 低的为 0.015, 甚至为 0.003^[11]. 一个合适的谱线加宽模型(SLB)对于可调参数的最佳化, 激光性能计算模型的改进, 无疑十分有用. 因此检验和发展新的增益饱和模型具有重要的意义.

关于化学反应系统, Perram 等^[12]给出的“标准的”COIL 反应系统的反应数多达 53 个, Perram 还在另一篇文献^[13]里将反应简化到 13 个并与 53 个反应的系统进行了比较, 结论是在典型操作条件下, 13 个反应系统基本上能够反映 53 个反应系统的浓度变化情况. Carrol^[14]和 Paschkewitz^[15]等考察了不同反应系统的影响, 认为 8 个反应的系统对增益和功率的预测偏高. 对反应系统的选择可以有很多种, 本文取 Buggeln^[16]的 10 种成分和 21 个反应(外加光跃迁反应)的化学反应系统, 21 个反应系统是 COIL 中较为常用的化学动力学模型.

1 化学氧碘激光的流动与化学反应模型

化学氧碘激光利用氢氧化钾或者氢氧化钠与氯、水的反应产生激发态氧, 其中的氧气含有大量的水蒸气. 水是一种很强的淬灭剂, 并且淬灭反应放出大量的热量, 有可能导致热堵, 因此必须通过冷凝器除掉大部分的水分. 氧发生器中生成的氧通过冷凝除水后, 与碘蒸气以及大量的稀释剂, 通常是氩或者氮气, 通过列阵喷管进入反应腔, 在腔中边混合边反应. 列阵喷管的设计使得各种介质能够在较短的距离内得到混合, 在进入光腔时介质已基本混合均匀, 因此可将流场简化为一维流动处理. 流场中气流的压力 p 、温度 T 和速度 u 变化很小, 本文中假设为不变.

反应腔中除了碘蒸气分子的分解反应, 还涉及到氧的三个能级和碘原子的两个能级之间及其与其他分子之间的反应, 整个反应系统非常复杂. 文献[7]对化学反应系统作过详细的研究, 本文的计算采用文献[16]的 21 个反应模型, 其中的反应速率常数也参考了文献[13~15]. 计算将流动简化为一维, 且在进入光腔时已经充分混合, 温度、压力以及流动速率为常数. 表 1 列出了本文化学动力学模型的反应系统及其反应速率常数, 包括 $O_2(^1S)$, $O_2(^1D)$, $O_2(^3S)$, I , I^* , H_2O , He , Cl_2 , I_2 , I_2^* 等 10 种成分和 21 个反应. 对于碘分子全部分解的情况, 化学反应系统简化

为 8 种成分和 13 个反应(1~12 及 21).

表 1 化学反应系统与速率常数

反应	方程式	速率常数(cc/s-molec)
1	$I + O_2(^1D) \rightarrow I^* + O_2(^3S)$	$2.33 \times 10^{-8}/T$
2	$I^* + O_2(^3S) \rightarrow I + O_2(^1D)$	$3.11 \times 10^{-8}/T^* \exp(-401.4/T)$
3	$O_2(^1D) + O_2(^1D) \rightarrow O_2(^3S) + O_2(^1S)$	2.7×10^{-17}
4	$O_2(^1S) + H_2O \rightarrow O_2(^1D) + H_2O$	6.7×10^{-12}
5	$O_2(^1D) + H_2O \rightarrow H_2O + O_2(^3S)$	4×10^{-18}
6	$O_2(^1D) + O_2(^3S) \rightarrow O_2(^3S) + O_2(^3S)$	1.6×10^{-18}
7	$O_2(^1D) + He \rightarrow O_2(^3S) + He$	8×10^{-21}
8	$I + O_2(^1D) \rightarrow I + O_2(^3S)$	5×10^{-14}
9	$I^* + O_2(^1D) \rightarrow I + O_2(^1D)$	1.1×10^{-13}
10	$I^* + O_2(^1D) \rightarrow I + O_2(^1S)$	1.1×10^{-13}
11	$I + I^* \rightarrow I + I$	1.6×10^{-14}
12	$I^* + H_2O \rightarrow I + H_2O$	2×10^{-12}
13	$I_2 + O_2(^1S) \rightarrow 2I + O_2(^3S)$	3.9×10^{-11}
14	$I_2^* + O_2(^1D) \rightarrow 2I + O_2(^3S)$	3×10^{-10}
15	$I_2 + O_2(^1S) \rightarrow I_2 + O_2(^1D)$	1.6×10^{-11}
16	$I_2 + O_2(^1D) \rightarrow I_2^* + O_2(^3S)$	7×10^{-15}
17	$I_2^* + O_2(^3S) \rightarrow I_2 + O_2(^3S)$	4.9×10^{-12}
18	$I_2^* + H_2O \rightarrow I_2 + H_2O$	7×10^{-11}
19	$I_2^* + He \rightarrow I_2 + He$	9.8×10^{-12}
20	$I_2 + I^* \rightarrow I + I_2^*$	3.8×10^{-11}
21	$O_2(^1D) + Cl_2 \rightarrow O_2(^3S) + Cl_2$	6×10^{-18}
光跃迁	$I^* + h\nu \rightarrow I + 2h\nu$	$5 s^{-1}$

表 1 中不参与激光发射的各气体成分 X_i 之间的反应可用以下的通式表示为:

$$\sum_{i=1}^{nj} a_{ri} X_i \Rightarrow \sum_{i=1}^{nj} b_{ri} X_i, \quad (1)$$

不参与激光发射的气体成分单位体积中第 i 组元浓度(用 $[X_i]$ 表示)的生成速率为

$$u \frac{\partial [X_i]}{\partial x} = \sum_{r=1}^{nr} (b_{ri} - a_{ri}) k_{ri} \prod_{j=1}^{nj} ([X_j])^{a_{rj}}, \quad (2)$$

其中下标 r 是化学反应式的序号, a_{ri} , b_{ri} 分别为消耗和生成反应中 i 组元的当量系数, k_{ri} 表示第 i 个反应的速率常数, 其中 x 为流向坐标.

在室温时抽运可逆反应(1 和 2)的平衡常数 $K_e = 2.9$, 因此反应达到平衡状态时存在粒子数反转. 通常 COIL 腔中的温度低于 298K, 更有利于粒子反转和增益的形成. 碘原子浓度越高, 反转粒子浓度越高因而增益越大, 因此一定的碘原子浓度对产生增益是必须的. 但是另一方面, 随着碘原子浓度的增加, 耗费在碘分子分解上的激发态氧也将相应增加, 因此实际中碘分子的含量通常为氧的 1%~2%. 由于碘原子的含量相对较少, 在激射过程中, 碘原子被反复抽运到上能级并发射出光子, 不断循环往复, 多次利用.

如果认为在进入光腔时碘分子已分解完毕, 则总有

www.scichina.com

$$n_1 + n_2 = n_0 \quad (3)$$

成立. n_1, n_2 分别为基态和激发态碘原子(或称上下能级)的布居数, n_0 为进入光腔的所有碘原子(包括碘分子中的原子)的布居数. 本文中, 除了考虑未分解碘的影响, 否则上下能级碘原子总量保持不变; 如果尚有未分解碘分子存在, 则上下能级碘原子总浓度 n_0 为一变量, 随碘分子的分解而增加.

2 超声速 COIL 性能计算的增益饱和关系——SGK 模型的推导

本文的增益饱和模型, 从描述振动能级单粒子速度分布函数变化的 Boltzmann 方程出发, 引进与粒子运动速度相关的微分增益系数, 发展了求解运动和辐射交换联立方程组的近似解的求解方法. 下面叙述具体的推导方法. 为此, 引入与粒子运动速度有关的增益系数为

$$g_T = \mathbf{s}f(v, v_0)(f_2 - \mathbf{a}f_1), \quad (4)$$

其中 \mathbf{s} 为原子的受激发射截面, f_i ($i = 1, 2$) 为上下能级的速度分布函数, $f(v, v_0)$ 为 Lorentz 线形函数. \mathbf{a} 为下、上能级的简并度之比. 由(3)式, 有

$$f_1 + f_2 = f, \quad (5)$$

其中 f 为总的粒子速度分布函数, 即上下能级碘原子的速度分布函数之和. 由(4), (5)式得

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{1+\mathbf{a}} \left(f - \frac{g_T}{\mathbf{s}f} \right) \\ f_2 &= \frac{1}{1+\mathbf{a}} \left(\mathbf{a}f - \frac{g_T}{\mathbf{s}f} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

上下能级粒子的速度分布函数变化率方程为

$$\left. \begin{aligned} u \frac{\partial f_2}{\partial x} &= r f_1 + k_e(f_2^0 - f_2) - k_p f_2 - \mathbf{s}f(\mathbf{n}, \mathbf{n}_0)(f_2 - \mathbf{a}f_1) \frac{I}{h\nu} \\ u \frac{\partial f_1}{\partial x} &= -r f_1 + k_e(f_1^0 - f_1) + k_p f_2 + \mathbf{s}f(\mathbf{n}, \mathbf{n}_0)(f_2 - \mathbf{a}f_1) \frac{I}{h\nu} + k_s \\ c \frac{\partial f_n}{\partial x} &= f_n \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{s}(f_2 - \mathbf{a}f_1) dv_{Ty} \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

其中 f_i^0 ($i = 1, 2$) 为平衡分布函数(即 Maxwell 分布函数), f_0 为处于平衡 Maxwell 分布时总的粒子速度分布函数, k_p 为上能级粒子的淬灭速率, r 为上能级的抽运率, I 为光腔的光强, h, ν 分别为 Planck 常数和光子的频率, n_D, n_S 分别为 $\text{O}_2(^1D), \text{O}_2(^3S)$ 的粒子布居数, k_s 为由碘分子分解增加的碘原子的速率分布. 另外有

$$r = k_f n_{\Delta}, \quad k_p = k_2[\text{O}_2(^3S)] + k_9[\text{O}_2(^1D)] + k_{10}[\text{O}_2(^1D)] + k_{11}n_1 + k_{12}[\text{H}_2\text{O}] + k_{20}[\text{I}_2].$$

由(5)式及 $\frac{\partial f_2}{\partial x} \approx 0, \frac{\partial f_1}{\partial x} \approx 0$, 导出关于 g_T 的方程

$$u \frac{\partial g_T}{\partial x} + \left[(r+k_p) + (1+a) \frac{sfI}{hu} \right] g_T + k_e(1+a)(f_2^0 - f_2) = (r-ak_p)sff. \quad (8)$$

直接对上式进行分析求解是不可能的. 我们利用方程组(7)的双参数摄动解, 把未知的分布函数展开成如下的双重级数

$$f_i = \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{U}{Lk_v} \right)^j \left(\frac{U}{Lk_e} \right)^k f_i^{jk}, \quad (9)$$

这里 k_v 为辐射特征速率, L 为流动方向的特征长度, U 为流动方向的特征速率. 由(7)和(9)式得半阶关系为

$$f_2^0 - a f_1^0 = (f_2^{00} - a f_1^{00}) \left(1 + \frac{2s}{hvk_e} g_L I \right)^{-1}, \quad (10a)$$

$$f_2^{00} - f_2^0 = \frac{sI}{hk_e} g_L (f_2^{00} - a f_1^{00}) \approx 0, \quad (10b)$$

$$f_1^{00} - f_1^0 = \frac{sI}{hk_e} g_L (f_2^{00} - a f_1^{00}) \approx 0, \quad (10c)$$

$$g_T^0 = s g_L(\mathbf{n}', \mathbf{n})(f_2^{00} - a f_1^{00}). \quad (10d)$$

利用增益系数

$$g = \int_{-h/2}^{h/2} \int_{-\infty}^{+\infty} g_T dV_{Ty} dy. \quad (11)$$

对 Fabry-Perot 谐振腔, 根据增益等于损耗, 腔镜损耗不随流向距离而改变的等增益近似^[6,7], 有

$$g = g_{th}, \quad \frac{\partial g}{\partial x} \approx 0, \quad (12)$$

于是由(8)式及(10)式的分析, 对表观频率积分, 得增益

$$g = K s n_0 \frac{h^2(1+\bar{I})}{\sqrt{\delta}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-t^2}}{h^2(1+\bar{I}) + (x-t)^2} dt, \quad (13)$$

其中 $K = (r-ak_p)/(r+k_p)$, \bar{I} 为无量纲的饱和参数, $\bar{I} = I/\tilde{I}$, I 为光强, \tilde{I} 为饱和光强, $\tilde{I} = 2hn(r+k_p)/(3s)$, h 为加宽参数, $h = \sqrt{\ln 2} \dot{A}n_N / \Delta n_D$; 频移参数 $x = 2\sqrt{\ln 2}(v-v_0)/\dot{A}v_D$, Δv_N , Δv_D 分别为 Lorentz 和 Doppler 加宽谱线形半高处的宽度. 对光频与 Doppler 线形中心频率一致, 即频移 $x = 0$ 的情况由(11)式得

$$g = K s n_0 \frac{h\sqrt{\delta}}{\sqrt{1+\bar{I}}} \exp[(1+\bar{I})h^2][1 - \operatorname{erf}(h\sqrt{1+\bar{I}})]. \quad (14)$$

当 $h \gg 1$, 即均匀加宽占优(高压极限)时, 展开误差函数, (14)式近似化为

$$g = \frac{K s n_0}{1+\bar{I}}. \quad (15)$$

当 $h \ll 1$, 即非均匀加宽占优(低压极限)时, (14)式近似为

$$g = K S n_0 \frac{h\sqrt{\delta}}{\sqrt{1+I}}. \quad (16)$$

以上的高压和低压近似关系与气体激光的饱和关系^[17]一致.

在近共振传能为动态平衡假设下, 激发态氧 $O_2(^1D)$ 浓度随距离的变化率为

$$u \frac{dY}{dx} = -\frac{gI}{hm[O_2]} - k_c, \quad (17)$$

Y 为单重态氧的产率, $Y = n_D / (n_D + n_S)$, k_c 为化学反应消耗 $O_2(^1D)$ 的速率,

$$k_c = (2k_3[O_2(^1D)] + k_5[H_2O] + k_6[O_2(^3S)] + k_7[H_e] + k_8n_1 + k_{10}n_2 + k_{14}[I_2^*] + k_{16}[I_2] + k_{21}[Cl_2])O_2(^1D) + (2k_9[O_2(^1D)] + k_{10}[O_2(^1D)] + k_{11}[I] + k_{12}[H_2O] + k_{20}[I_2])[I^*] - (k_{15}[I_2] + k_4[H_2O])[O_2(^1a)].$$

(14)和(17)式及入口氧的产率条件相结合, 即可求出产率 Y , 光强 I 等随流向的变化. 对功率的计算, 由文献[10]中

$$P = h_{\text{extr}} L H \int_0^L g I dx \quad (18)$$

求出, h_{extr} 为腔镜的提取效率. 假设光腔为 Fabro-Perit 谐振腔, 则阈值增益 g_{th} 等于光腔的阈值增益, 且沿长度方向为一定值^[10].

3 与速率方程模型的比较

在 Fabro-Perit 近似下, 当取反应系统与本文模型相同时, COIL 的速率方程模型的增益关系为

$$g = K S n_0 \frac{h\sqrt{\delta} \text{erfc} h \exp(h^2)}{1 \text{erfc} h \sqrt{\exp(h)} h^2}, \quad (19)$$

比较(14)和(19), 当 $h \gg 1$, 即均匀加宽占优势时, 展开误差函数, (19)式的简化式与(15)相同; 当 $h \ll 1$ 时, 即非均匀加宽占优时, (19)式的近似展开为

$$g = \frac{h\sqrt{\delta}(K S n_0)}{1 \text{erfc} h \sqrt{\exp(h)}}, \quad (20)$$

此式与半气体模型低压近似展开式差别较大.

4 分析与讨论

对 COIL 的数值模拟, 我们利用文献[16]所给出的 RotoCOIL 实验及其计算数据. 反射镜的提取效率为

$$h_{\text{extr}} = (1 - R_{\text{out}} - S_{\text{out}}) / [(1 - R_{\text{out}} - S_{\text{out}})(1 + d) + S_{\text{out}} + (R_{\text{out}} / R_{\text{max}})^{1/2}(1 - R_{\text{max}})],$$

其中 R_{out} (可变) 为耦合输出镜的反射率, R_{max} ($= 0.995$) 为高反射率光学镜, $S_{\text{out}} = 0.004$ 为耦合输出镜的散射率, $d = 0.13$ 为衍射损失率^[1,18]. 阈值增益与 R_{out} , R_{max}

相关, $g_{th} = -\ln(R_{out}R_{max}/2L)$, L 为增益介质长度.

光腔内气流方向与光腔轴垂直, 腔内的气流参量条件如下^[3]: 温度 T 为 167 K, 入口压力 P 约为 4×133.3 Pa, 入口小信号增益 $g_0 = 0.0068 \text{ cm}^{-1}$, 入口激发态氧的产率 $Y_0 = 0.42$. 全部氧的流量 $Q = 1.395 \text{ mol/s}$, 稀释比约为 $\text{He} : \text{O}_2 = 4 : 1$, I_2 和 O_2 的流量比为 $\text{I}_2/\text{O}_2 = 0.0158$, 水、氯气的含量均为氧气量的 20%, 速度 $u = 84100 \text{ cm/s}$. 加宽参数 h 近似为 0.08, 文中计算取 $h = 0.08$. 所做计算均以实验为基础, 即除了所讨论的量, 其他量尽可能取实验值. 图中 SGK1 表示仅考虑抽运及其逆反应(即反应 1 和 2)的单一反应 SGK 模型.

图 1 为 4 种理论模型计算结果与 RotoCOIL 实验数据, 4 种模型分别为考虑包括 21 个反应的 RE 模型和本文 SGK 模型, 仅考虑抽运及其逆反应(即反应 1 和 2)的单一反应的 SGK 和低压极限模型^[1](图 1 中用气体动力学所示)的比较, 计算条件均为 RotoCOIL 实验条件^[16]. 由图可知, 在阈值增益的整个范围内各模型计算功率均与实验大致相符, SGK 和 SGK1 两模型的结果更接近实验值. 本文 SGK 模型的功率输出明显低于 RE 模型的结果, 也稍低于单一反应 SGK1 模型的计算结果. 4 种理论模型, 即低压极限(单一反应)、RE 模型(多反应系统)、SGK 模型(多反应系统)和 SGK1(单一反应)的最佳阈值增益范围(这里指的是功率 P 满足 $|P - P_{max}|$

0.1, 其中 P_{max} 为最高输出功率值)分别为: 0.00044~0.00250, 0.00043~ 0.00235, 0.00039~0.00176 以及 0.00041~0.00185. 由此可见, 不同模型之间, 尤其是 RE 和 SGK 两模型, 对最佳阈值增益范围的预测值存在相当大的差异, 这说明低压非均匀加宽效应对 COIL 的性能具有相当重要的影响. 由图可见, 阈值增益直接决定

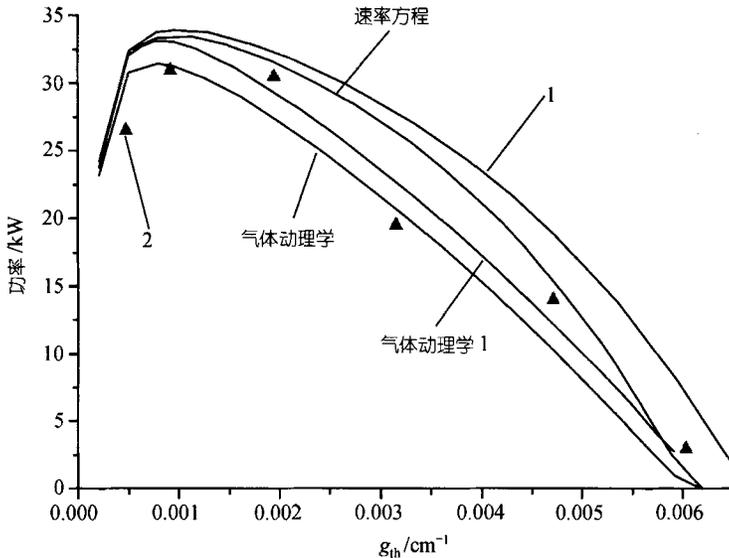


图 1 4 种理论模型的结果与 RotoCOIL 实验结果的比较

1 表示低压极限模型, 2 为实验结果, 其他如图中所注

着功率输出的大小, 因此最佳阈值增益的准确预测, 对于功率的提取和光腔的设计是非常重要的.

图 2 为频移对功率的影响. 频移的存在抑制了功率的提取, 不仅使提取功率降低, 还显著减少了功率提取的阈值增益的范围. RE 模型与 SGK 模型有相同的变化趋势, 但 RE 模型的计算结果明显高于 SGK 模型的结果, 单一反应 SGK 模型计算结果也稍高于本文 SGK 模型的计算结果.

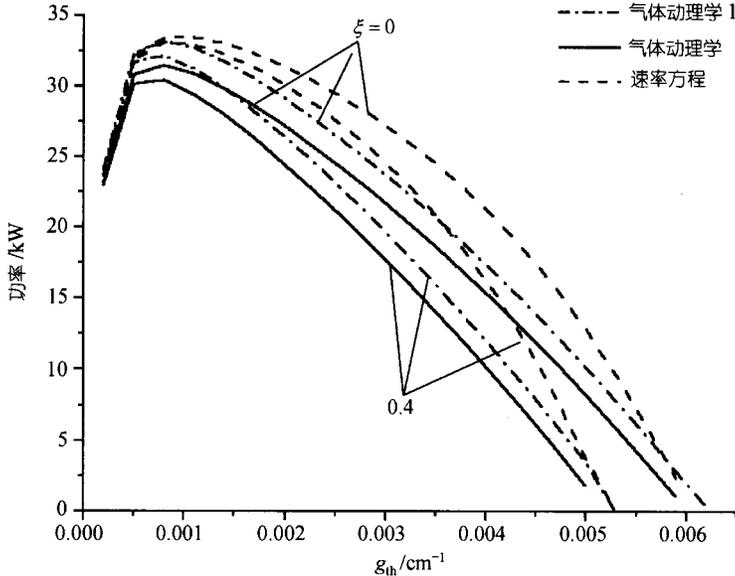


图 2 不同频移 ξ 下, 输出功率随阈值增益的变化

图 3 考察了水含量对于功率提取的影响. 图中计算了无水分, 含水量为氧含量的 50% 和 100% 时, 提取功率对于阈值增益的变化曲线. 由图可知, 在较高含水量的情况下, 水的存在使功率明显降低. RE 和 SGK 两模型的变化趋势基本一致, 但 SGK 模型的功率明显低于 RE 模型的计算结果.

图 4 所示为光腔入口处存在未分解碘分子时, 提取功率随阈值增益的变化曲线. 图示计算曲线表明光腔中一定量未分解碘分子的存在对于功率提取是有益的, 未分解碘分子浓度越高, 输出功率越高. 这是因为, 碘分子的分解使碘原子增加, 提高了小信号增益系数, 这有利于功率的提取. 但碘分子的量并非越多越好, 当未分解碘分子量较多而阈值增益较低时, 由图可知, 此时不利于功率的提取.

图 5 为入口处激发态氧的产率 Y_0 对 COIL 性能的影响曲线. 由图可知, 随产率增加, 功率随 Y_0 升高接近于成比例增加. RE 模型的功率明显高于 SGK 模型的预测值, 在阈值增益较低时差别更大, 且 RE 模型预测的最佳阈值增益范围也较大. 化学反应损耗对于输出功率也有一定的影响.

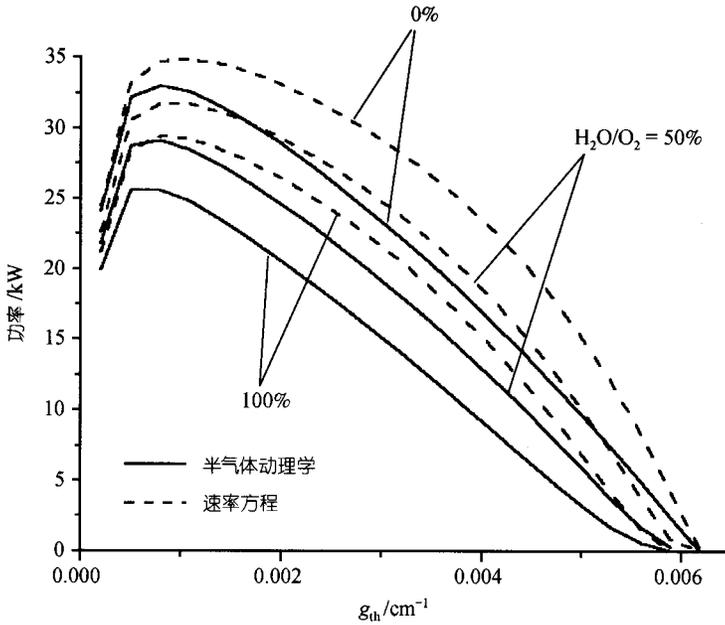


图 3 不同水含量下半气体动力学和速率方程模型计算的输出功率随阈值增益的变化

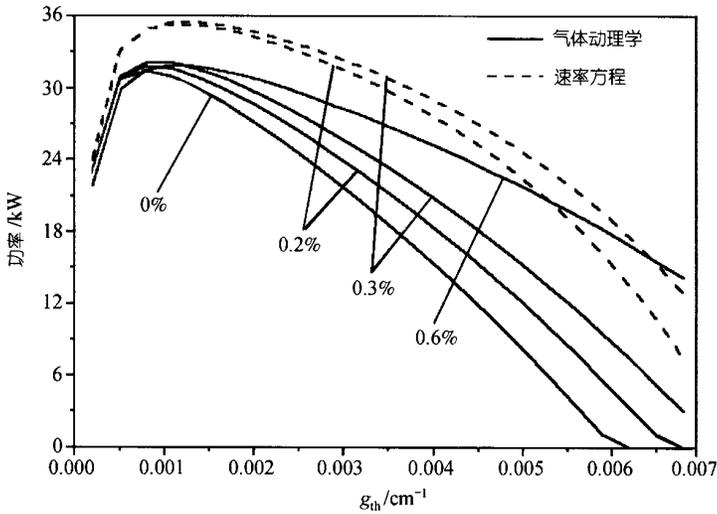


图 4 存在未分解碘分子时, 半气体动力学和速率方程模型计算的输出功率随阈值增益的变化(图中百分量为入口处未分解碘与已分解碘的质量比)

图 6 为温度对功率提取的影响. 温度越低, 输出功率有明显的增加. SGK 和 RE 两模型变化趋势基本一致, 随温度降低, 功率较高的阈值增益的范围扩大, 因此降低温度对提高功率输出很有意义. 单反应 SGK 模型的计算结果稍高于本文的多反应 SGK 模型.

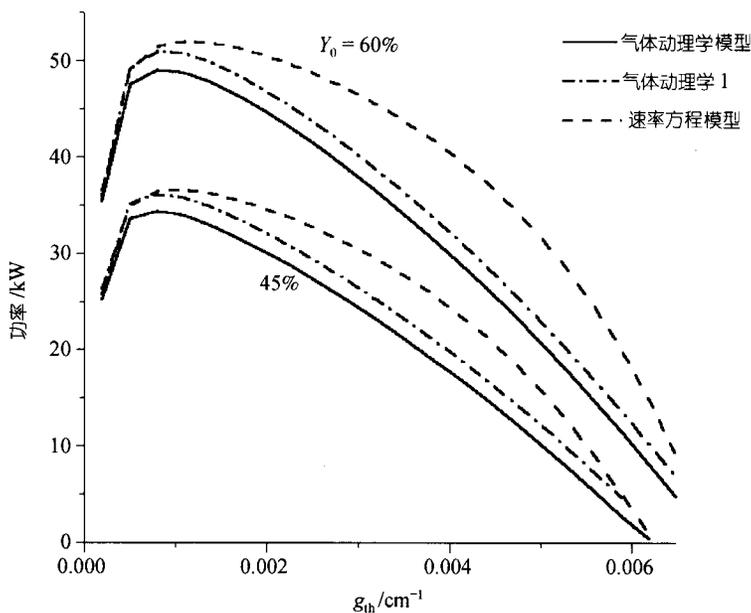


图 5 不同入口氧产率 Y_0 下, 半气体动力学和速率方程模型计算的输出功率随阈值增益的变化

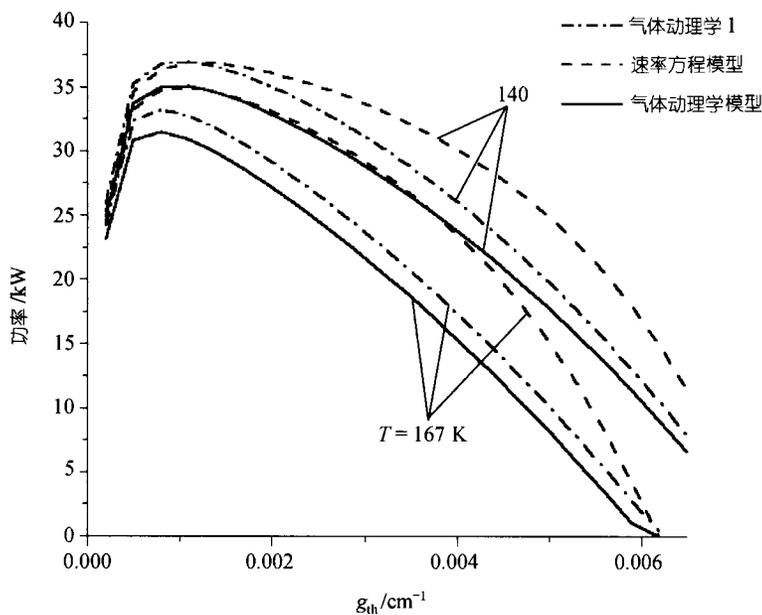


图 6 不同温度 T 下半气体动力学和速率方程模型计算的输出功率随阈值增益的变化

图 7 为本文 SGK 和 RE 模型, 以及单一反应 SGK 模型当阈值增益 $g_{th} = 0.002$

cm^{-1} 时输出功率、光强、饱和参数及产率沿流向距离 x 的变化. 图 7(a)表明, 在入口附近, SGK 和 RE 两模型的功率增长较快, 下游增长速度减慢. 单一反应的 SGK 模型与考虑多反应损耗的 SGK 模型相比, 在上游功率的变化几乎没有差别, 在下游出现一定的差别. SGK 和 RE 模型的功率输出相比, 前者直至腔镜末端功率仍有增加的趋势, 而 RE 模型功率输出在大约腔镜长度一半的位置处基本上已经完成. SGK 和 RE 模型对功率提取流向尺度的预测存在的较大差异, 进一步说明了腔镜设计中增益饱和模型的重要性.

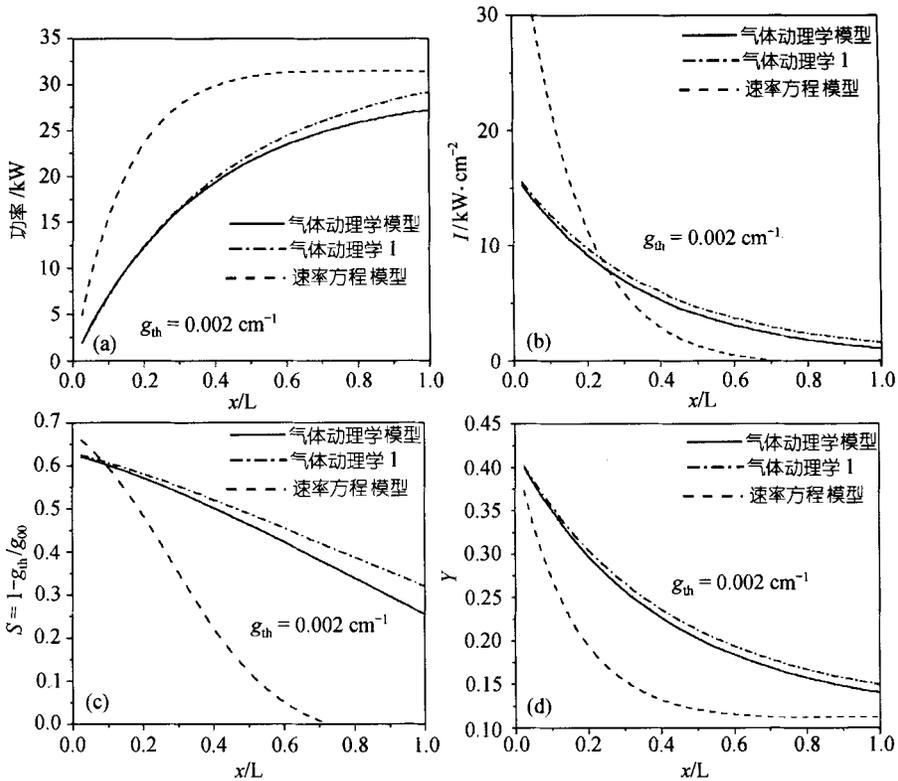


图 7 阈值增益为 0.002 时, 功率输出(a), 光强 I (b), 饱和参数 S (c) 及激发态氧的产率 Y (d) 随流向距离的变化 (L 为光腔镜的长度)

图 7(b)中, 光强随流向逐渐降低, 入口处下降较快, 随距离增加下降逐渐平缓, 在出口处达到一较低值. 入口处 SGK 模型的光强远远低于 RE 模型的光强. 对于 SGK 模型光强沿流向的变化, 21 个反应 SGK 模型的结果与单一反应 SGK 模型的结果基本一致.

由图 7(c)看出, 饱和参数随流向降低, 入口处两模型饱和参数较为接近, RE 模型饱和参数随流向的下降比 SGK 模型快, SGK 模型饱和参数的变化较为平缓, 单一反应 SGK 模型的饱和参数比本文多反应 SGK 模型稍高. 图 7(d)中关于激发

态氧产率随流向的变化, RE 模型激发态氧的产率明显低于 SGK 模型, 21 个反应与单一反应的激发态氧产率在整个流向长度上近似一致.

5 结束语

对超声速 COIL 的分析和计算, 本文提出了氧碘反应气流取连续介质近似, 同时计算碘激光能级分子速度分布函数, 并用双参数摄动法求解分子速度分布函数方程组的半气体动理学(SGK)模型, 得到与常用 Voigt 线型及低压极限饱和模型不同的增益饱和模型. 对于混合情况, 分析计算了不同化学反应系统、不同增益饱和模型以及诸可调参数(包括气流参数、激发态氧的产率、水含量、阈值增益、频移等)对功效的影响. 分析计算说明多个反应(包括 21 个)与选用单一共振反应的功效计算结果接近, 而增益饱和模型不同、可调参数的差别对功率、最佳输出耦合、激光区长度均有显著影响. 因此, 使用合理的增益饱和模型, 能够对气流化学激光实验和器件的优化设计, 并使可调参数处于最佳范围.

参 考 文 献

- 1 Hager G D, Helms C A, Truesdell K A, et al. A simplified analytic model for gain saturation and power extraction in the flowing chemical oxygen-iodine laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1996, 32(9): 1525~1536
- 2 Barmashenko B D, Rosenwaks S. Analysis of the optical extraction efficiency in gas-flow lasers with different types of resonators. *Applied Optics*, 1996, 35(36): 7091~7101
- 3 庄 琦, 桑凤亭, 周大正. 短波长化学激光. 北京: 国防工业出版社, 1997
- 4 李守先, 张本爱. 碘密度对 COIL 激光频率的影响. *强激光与粒子束*, 1999, 11(3): 262~265
- 5 Gross R W F, Bott J F. *Handbook of chemical lasers*. New York: Wiley, 1976, 501
- 6 高 智. 气流与化学激光中的碰撞和非均匀加宽效应——理论分析模型. *物理学报*, 1981, 12(12): 1591~1602
- 7 高 智, 鄂学全. 流动化学激光的运动论研究. *中国科学, A 辑*, 1982, (1): 46~57
- 8 鄂学全, 高 智. 连续波化学激光的非均匀加宽效应. *光学学报*, 1983, 3(6): 513~520
- 9 范安辅, 高 智. 非平衡气流与化学激光的增益饱和效应. *物理学报*, 1993, 42(3): 407~416
- 10 范安辅, 高 智, 周 昕. HF 化学激光放大器的交叉弛豫动力学研究. *中国科学, A 辑*, 1998, 28(8): 742~750
- 11 Hon J F, Plummer D N, Crowell P G. A heuristic method for evaluation COIL performance, presented at the AIAA-25th Plasmadynamics and Laser Conf. Colorado Springs, CO. June 20-23, 1994, 94~2422
- 12 Perram G P, Hager G D. The standard chemical oxygen-iodine laser kinetics package. USAF technical report AFWL-TR-88-50, 1988
- 13 Perram G P. Approximate analytic solution for the presence of singlet oxygen. *Int J Chem Kinetics*, 1995, 27(2): 817~828
- 14 Carrol D. Modeling high-pressure chemical oxygen-iodine lases. *AIAA Journal*, 1995, 33(8): 1454~1462
- 15 Paschkewitz J, Shang J, Miller J, et al. An assessment of COIL physical property and chemical kinetic modeling methodologies. Presented at the AIAA-31th Plasmadynamics and Laser Conf. Denver, CO. June 19-22, 2000, paper 2000~2574
- 16 Buggeln R C, Shamroth S, Lampson A, et al. Three-dimensional(3-D) Navier-Stokes analysis of the mixing and power extraction in a supersonic chemical oxygen-iodine laser(COIL) with transverse I₂ injection", presented at the AIAA 25th Plasmadynamics and Laser Conf., Colorado Springs, CO. June 20-23, 1994, paper 94~2435
- 17 陈渝庆, 王静环. *激光原理*. 杭州: 浙江大学出版社, 1998
- 18 Yang T T, Copeland D A, Bauer A H, et al. Chemical oxygen-iodine laser performance modeling. *AIAA Jour*, 1996, 34(2): 338~346