

反应速率系数对 HF 化学激光器 增益特性的影响

陈丽吟 周学华

(中国科学院力学研究所)

提要: 本文研究了 HF 化学激光器中两股平行气流的速度比和动力学速率系数的不确定性对增益系数的影响。指出 HF(v)-H 是最快的碰撞弛豫过程, 其速率系数值对估算的增益系数有较大影响。

Influence of reaction and relaxation rate coefficients on gain characteristics in HF chemical lasers

Chen Liyin, Zhou Xuehua

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: The effects of different velocity ratios of two parallel gas flow and the uncertainty of kinetic rate coefficients on the characteristics of HF chemical lasers are investigated. It is shown that the collisional relaxation process of HF(v)-H is so fast that the variation of its rate coefficient have significant influence on the gain characteristics.

一、引言

F_2-H_2 体系化学激光器中细致动力学过程及其速率系数值的大小直接影响生成 HF(v) 分子的快慢及粒子数相对分布。已公布的速率系数值 $k(T)$ 有时相差颇大, 如 N. Cohen 等人从 1970~1978 年发表过六篇关于 H_2-F_2 体系动力学过程速率系数的评述性文章^[3~8], 每次都做了一定的更正和补充。另外有些过程较复杂, 速度极快, 不易得到精确表达式。如不同文献报道的 HF(v)-H 碰撞

弛豫过程的速率系数相差可达 6~7 个数量级, 见表 3。

本文推导了两股平行、不等速流动的扩散、混合方程组, 扩大了原方程^[2]的应用范围。探讨了重要的化学反应和弛豫过程速率系数的不确定性对增益系数的影响。

二、流动模型和方程

相邻两股平行气流的扩散混合反应模型见图 1。其对应的流动守恒方程组为:

收稿日期: 1985 年 8 月 12 日。

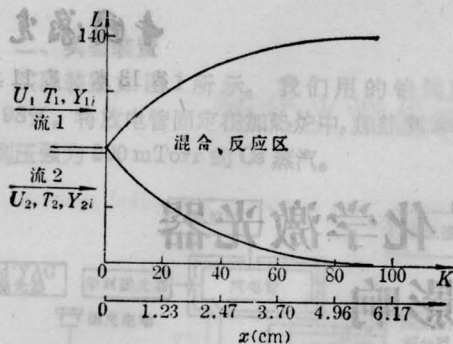


图1 HF化学激光器中两股平行气流混合、反应示意图

$$f'''(\eta) + f(\eta)f''(\eta) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 Y_i}{\partial \eta^2} + f(\eta) \frac{\partial Y_i}{\partial \eta} - 2f'(\eta)\xi \frac{\partial Y_i}{\partial \xi} = -\frac{2\xi\omega_i M_i}{u_1 \rho^2 \mu} \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 H_0}{\partial \eta^2} + f(\eta) \frac{\partial H_0}{\partial \eta} - 2f'(\eta)\xi \frac{\partial H_0}{\partial \xi} = -\frac{2\xi}{u_1 \rho^2 \mu} \sum_i h_i \omega_i \quad (3)$$

$$\rho = P[RT \sum_i (Y_i/M_i)]^{-1} \quad (4)$$

式中 $i=1-8$

$$u = u_1 f'(\eta) \quad (5)$$

$$\eta = z \cdot \sqrt{u_1/2\xi}, \quad z = \int_0^y \rho dy, \quad \xi = \int_0^x \rho \mu dx \quad (6)$$

$$H_0 = \int_{T_0}^T C_p dT + u^2/2 \quad (7)$$

其中 P 、 ρ 、 T 、 u 、 μ 、 M 分别代表混合物的压力、密度、温度、流速、粘性系数、分子量； C_p 、 ω 、 h 为一克物质的比热、摩尔反应速率和摩尔生成热。下标 i 表示第 i 种组元； Y_i 表示第 i 种组元的质量分数，即 $Y_i = \frac{\rho_i}{\rho}$ ； u_1 、 u_2 分别是图1中上、下两股流的流速； ξ 、 η 是通过方程(6)变换后的坐标。 H_0 是一克质量的焓。

方程(1)为描述两股流混合后速度场分布的 Blasius 方程，若赋予边界条件^[20] 则

$$\text{当 } \eta = \infty, u = u_1, f'(\eta) = \frac{u}{u_1} = 1$$

$$\eta = -\infty, u = u_2, f'(\eta) = \frac{u_2}{u_1} = \lambda \quad (8)$$

在两股流边界上，流函数 $\psi=0$ ， $f(\eta)=0$ ，应用龙格库塔法和牛顿迭代法求得方程(1)的 $f(\eta)$ 、 $f'(\eta)$ 和 $f''(\eta)$ 的数值及其随 λ 的关系，满足本计算需要。将方程(5)、(7)和(1)代入方程(3)， C_p 取对应温度范围内的平均值，并用文献[2]的稳式差分格式，由(2)和(3)得：

$$Y_{L,k} = \frac{A}{E} Y_{L+1,k} + \frac{D}{E} Y_{L-1,k} + \frac{2C}{E} Y_{k-1,L} - \frac{2C}{E} Y_{k-2,L} - \frac{2\xi M_i \omega_i}{u_1 \rho^2 \mu E} \quad (9)$$

$$\Delta T_{L,k} = \frac{A}{E} \Delta T_{L+1,k} + \frac{D}{E} \Delta T_{L-1,k} + \frac{2C}{E} \Delta T_{k-1,L} - \frac{C}{2E} \Delta T_{k-2,L} + \frac{u_1}{EC_p} [f''(\eta)]^2 + \frac{2\xi}{u_1 \rho^2 \mu C_p E} \sum_i h_i \omega_i \quad (10)$$

其中

$$A = \frac{1}{k^2} + \frac{f(\eta)}{2k}$$

$$C = \frac{2\xi f'(\eta)}{h}$$

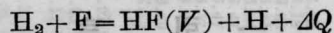
$$D = \frac{1}{k^2} - \frac{f(\eta)}{2k}$$

$$E = \frac{2}{k^2} + \frac{3\xi f'(\eta)}{h} \quad (11)$$

式中 L 、 K 为沿 η 、 ξ 的格点数； h 、 k 为对应计算步长。

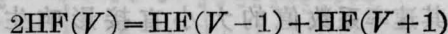
假定混合区中有如下基元反应：

泵浦反应



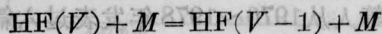
$$V=0, 3; \Delta Q \text{ 为反应热}$$

(V-V)反应



$$V=1, 2$$

(V-T)反应



$$V=1, 3$$

此处 M 代表 H_2 、 F 、 $HF(V)$ 、 H 和 He 组元。将方程(9)和(10)与上述组元的速率方程联立，求解出激活区中的温度、浓度和增益

系数分布。计算用的参数值和增益表达式与文献[1]同。平均增益定义为：

$$\overline{\alpha_{v,j}} = \frac{\int_0^{y_e} \alpha_{v,j} dy}{y_e} \quad \text{或} \quad \overline{\alpha_{v,j}} = \left(\sum_0^L \alpha_{v,j} \right) / L \quad (12)$$

$\alpha_{v,j}$ 为增益系数, y_e 是两个喷管的中心距离。

三、计算结果

1. 速度比 λ 对平均增益系数 $\overline{\alpha_{v,j}}$ 分布的影响

当两股流不等速时, HF(V) 的 Y_i 、 T 和 $\overline{\alpha_{v,j}}$ 沿 ξ 和 η 的分布规律与等速条件 $\lambda=1$ 时大致相似, 但绝对值不同, 其差别见图2。表现为速度比 λ 越小, 峰值增益越低; 增益达到峰值所需的时间越短, 峰值位置就越靠近入口处。当 $\lambda = \frac{1}{4}$, 增益的峰值在 $K=40$; 当 $\lambda=1$ 时峰值就后移到 $K=80$ 了。这种现象的重要原因之一是: 当两股流速不等时, 沿 η (或 y) 方向有速度梯度, 加速气体混合和

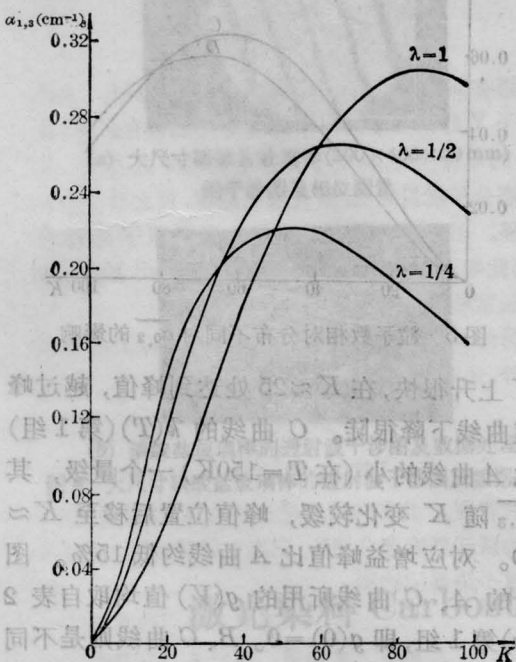


图2 不同 λ 条件下 $\overline{\alpha_{v,j}}$ 沿 ξ 的分布

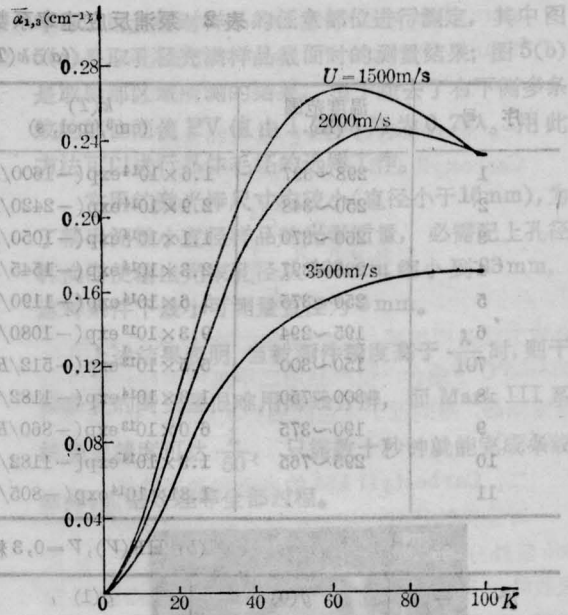


图3 速度比相同时 ($\lambda = \frac{1}{2}$), 不同 u_1 对 $\overline{\alpha_{v,j}}$ $\sim K$ 曲线的影响

反应, 缩短了达到 $\overline{\alpha_{v,j}}$ 峰值所需要的时间。另外, 不同 u_1 对 $\overline{\alpha_{v,j}}$ 的分布也有影响 (见图3)。由此可知, 增益系数不仅和速度比有关, 还与速度的绝对值相关。

下面 $\overline{\alpha_{v,j}}$ 的计算工作都是在 $\lambda = \frac{1}{2}$ 条件下进行的, 其他进口参数值列于表1。

表1 初始条件

U_1 (m/s)	T_1 K	$Y_{F,1}$	$Y_{He,1}$	U_2 (m/s)	T_2 K	$Y_{He,2}$	$Y_{He,2}$
1500	150	0.249	0.751	750	150	0.251	0.749

2. 泵浦反应速率系数 $k(T)$ 对 $\overline{\alpha_{v,j}}$ 的影响

泵浦反应是 HF 化学激光器的核心反应。由于不同振动态的激励速率不同, 如 HF(2) 的生成率最大; HF(1) 的生成率大于 HF(0) 等等, 使各振动能级的粒子数分布偏离热平衡, 在某些能级之间造成粒子数反转。现将已报道的有关泵浦反应的速率系数及其温度表达式整理在表2。为了考察 $k(T)$ 对 $\overline{\alpha_{v,j}}$ 的影响, 本文任取偏差较大的两组数据

表 2 泵浦反应速率系数 $k(T)$ 关系式(测量值)

(a) $k(T)$ 表达式

序号	温度范围 (K)	$k(T)$ (cm ³ /mol, s)	$k(295)$ (cm ³ /mol, s)	$k(150)$ (cm ³ /mol, s)	文献
1	298~397	$1.6 \times 10^{14} \exp(-1600/RT)$	1.1×10^{13}	7.5×10^{11}	[9, 14]
2	250~348	$2.9 \times 10^{14} \exp(-2420/RT)$	5.0×10^{12}	8.6×10^{10}	[11]
3	260~370	$1.1 \times 10^{14} \exp(-1050/RT)$	1.9×10^{13}	3.2×10^{12}	[9]
4	298~397	$2.3 \times 10^{14} \exp(-1545/RT)$	1.7×10^{13}	1.3×10^{12}	[9]
5	250~375	$1.6 \times 10^{14} \exp(-1190/RT)$	2.2×10^{13}	3.0×10^{12}	[9]
6	195~294	$9.3 \times 10^{13} \exp(-1080/RT)$	1.5×10^{13}	2.5×10^{12}	[9]
7	150~300	$5.5 \times 10^{13} \exp(-512/RT)$	2.3×10^{13}	$\sim 1 \times 10^{13}$	[9]
8	300~750	$1.3 \times 10^{14} \exp(-1182/RT)$	1.8×10^{13}	2.5×10^{12}	[12]
9	190~375	$6.0 \times 10^{13} \exp(-860/RT)$	1.4×10^{13}	3.3×10^{12}	[9]
10	295~765	$1.3 \times 10^{14} \exp[-1182/RT]$	1.8×10^{13}	2.5×10^{12}	[9]
11		$1.81 \times 10^{14} \exp(-805/T)$	1.2×10^{13}	8.4×10^{11}	[19]

(b) HF(V), V=0, 3 粒子数相对分布 $g(V)$

序号	$g(0)$	$g(1)$	$g(2)$	$g(3)$	文献
1	0	0.17	0.55	0.28	[7]
2	0.056	0.111	0.556	0.278	[13]
3	0.05	0.156	0.527	0.263	[14]
4	0.03	0.146	0.505	0.318	[15]
5	0.021	0.15	0.535	0.294	[16]

*: $k(T) = \sum_0^3 k(V)$; $k(V) = g(V)k$; $\sum_0^3 g(V) = 1$

(表 2(a)的(1)和(7)组)作为例子, 分别计算 $\overline{\alpha_{1,3}} \sim \xi$ 曲线, 结果绘在图 4。图中 A 曲线采用快速的 $k(T)$ 值(第 7 组), 对应的 $\overline{\alpha_{1,3}}$ 随

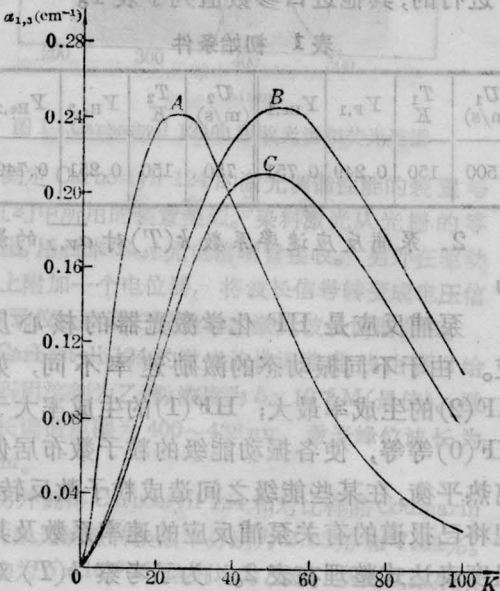


图 4 泵浦反应速率系数对 $\overline{\alpha_{1,3}} \sim K$ 曲线的影响

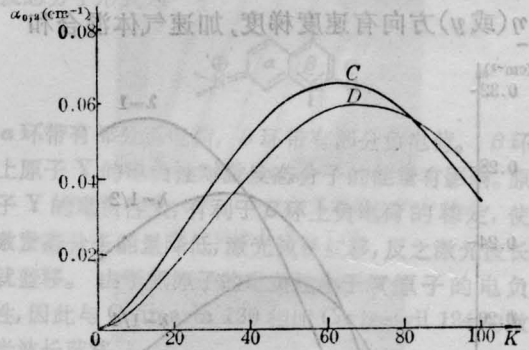


图 5 粒子数相对分布不同对 $\overline{\alpha_{0,2}}$ 的影响

K 上升很快, 在 $K \approx 25$ 处达到峰值, 越过峰值曲线下降很陡。C 曲线的 $k(T)$ (第 1 组) 比 A 曲线的小 (在 $T=150K$) 一个量级, 其 $\overline{\alpha_{1,3}}$ 随 K 变化较缓, 峰值位置后移至 $K \approx 50$ 。对应增益峰值比 A 曲线约低 15%。图 4 的 A、C 曲线所用的 $g(V)$ 值均取自表 2 (b) 第 1 组, 即 $g(0)=0$ 。B、C 曲线则是不同 $g(V)$ 的结果。前者用表 2(b) 中第 2 组数据,

表3 $k_{\text{HF}(v)-\text{H}}(T)$ 的关系式($k_{\text{HF}(v)-\text{H}}(T)$ 为反应 $\text{HF}(V)+\text{H}=\text{HF}(V-1)+\text{H}$ 的速率系数)

序号	$k(T)$ ($\text{cm}^3/\text{mol}\cdot\text{s}$)	$T=150\text{K}$			$T=300\text{K}$			文献
		* $k(1\rightarrow 0)$	$k(2\rightarrow 1)$	$k(3\rightarrow 2)$	$k(1\rightarrow 0)$	$k(2\rightarrow 1)$	$k(3\rightarrow 2)$	
1	$V \cdot 1.3 \times 10^{-2} \cdot T^{3.6}$	8.9×10^5	1.8×10^6	2.7×10^6	1.1×10^7	2.2×10^7	3.3×10^7	[3, 17]
2	$2 \cdot 10^{12-1.0/v^*}$	7.0×10^{10}	7.0×10^{10}	7.0×10^{10}	3.7×10^{11}	3.7×10^{11}	3.7×10^{11}	[4]
3	$A(V) \cdot 4.5 \times 10^{12} \exp(-700/RT)$ $A(1)=0.1, A(V>1)=1$	4.3×10^{10}	4.3×10^{11}	4.3×10^{11}	1.4×10^{11}	1.4×10^{12}	1.4×10^{12}	[6]
4	$1.8 \times 10^{13} \exp(-700/RT)$	1.7×10^{12}	1.7×10^{12}	1.7×10^{12}	5.6×10^{12}	5.6×10^{12}	5.6×10^{12}	[5]
5	$g(V, V') \cdot 1.5 \times 10^{12} \exp(-700/RT)$ $g(1, 0)=1; g(2, 1)=1.8$ $g(V, V-1)=360, V=3, \dots, 6$	1.4×10^{11}	2.6×10^{11}	5.2×10^{13}	4.6×10^{11}	8.3×10^{11}	1.7×10^{14}	[8]
6	$4.5 \times 10^{11} \exp(-700kT), V=1 \rightarrow V=0$ $1.6 \times 10^{12} \exp(-700/RT), V=2 \rightarrow V=1$ $2.0 \times 10^{14} \exp(-700/RT), 3 \leq V \leq 8$	4.3×10^{10}	1.5×10^{11}	1.9×10^{13}	1.4×10^{11}	4.9×10^{11}	6.2×10^{13}	[17]

* $k(1\rightarrow 0)$ 表示 $k(V=1 \rightarrow V'=0)$, 余类推
 $\theta=4.575 T/1000 \text{ kcal/mol}$

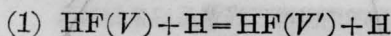
后者用其1组数据(其他条件全同)。二者的峰值 $\alpha_{1,3}$ 相差约 15%, 且线型相似。图 5 的 C、D 曲线检查了不同 $g(0)$ 对 $\alpha_{0,j}$ 曲线的影响。前者用 $g(0)=0.056$, 后者用 $g(0)=0$, 此二曲线略有不同, 但总的差别不算太大。

3. 碰撞消激发速率系数对 $\alpha_{v,j}$ 的影响

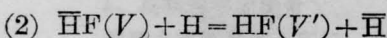
$\text{HF}(V)$ 的振动—平动碰撞弛豫反应统一写为 $\text{HF}(V)+M=\text{HF}(V-1)+M$, 式中 M 代表 H 、 HF 、 F 、 He 和 H_2 。现将除 He 外其他组元对 $\text{HF}(V)$ 弛豫过程的贡献分述如下:

3.1 $M=\text{H}$ 的速率系数对 $\alpha_{v,j}$ 的影响

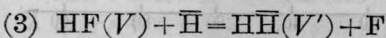
H 是非常活泼的碰撞伴侣, 与 $\text{HF}(V)$ 碰撞时弛豫速率极快, 且同时可能发生三个过程^[6~7]:



碰撞弛豫过程



交换反应与弛豫过程



泵浦逆反应过程

式中 H 和 $\overline{\text{H}}$ 是不可分辨的两个 H 原子, 反应(1)和(2)不可区分。 $\text{HF}(V)-\text{H}$ 过程的测

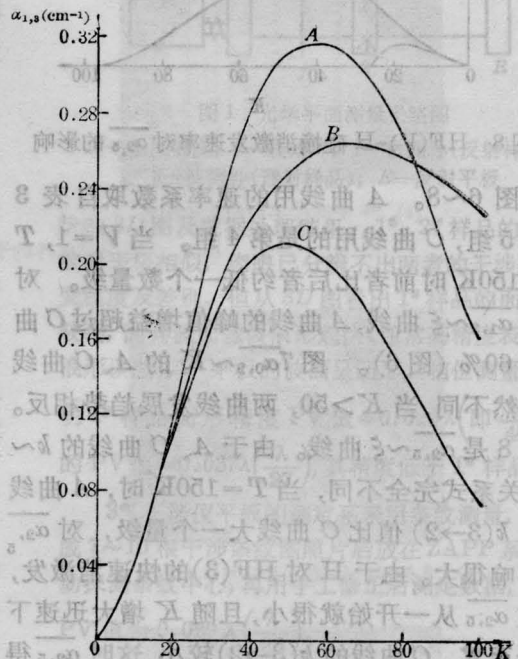


图6 $k_{M=\text{H}}(T)$ 对 $\alpha_{1,3}$ 的影响

量值是上述三个反应之和, 数据处理时应把反应(3)的贡献扣除。此外还可能有多量子跃迁过程存在。过程快且复杂, 难以得到准确数据。不同作者给出的 $k_{M=\text{H}}(T)$ 值及其随 v 的关系式有很大不同(见表3)。我们引用了其中的典型数据对 $\alpha_{1,3}$ 进行估算, 结果绘

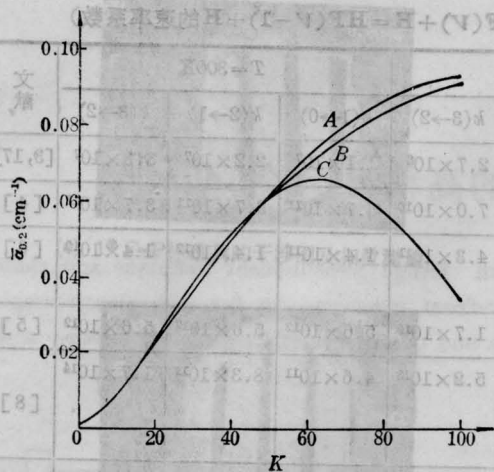


图7 HF(V)-H 碰撞消激发速率对 $\overline{\alpha_{0,2}}$ 的影响

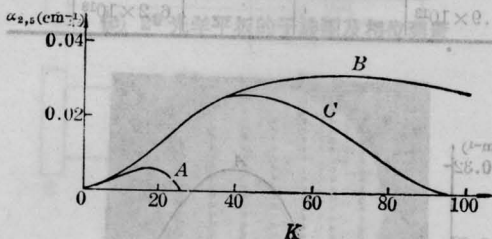


图8 HF(V)-H 碰撞消激发速率对 $\overline{\alpha_{2,5}}$ 的影响

在图6~8。A曲线用的速率系数取自表3第5组，C曲线用的是第4组。当 $V=1, T=150\text{K}$ 时前者比后者约低一个数量级。对于 $\overline{\alpha_{1,3}} \sim \xi$ 曲线，A曲线的峰值增益超过C曲线60% (图6)。图7 $\overline{\alpha_{0,2}} \sim K$ 的A、C曲线回然不同，当 $K > 50$ ，两曲线发展趋势相反。图8是 $\overline{\alpha_{2,5}} \sim \xi$ 曲线。由于A、C曲线的 $k \sim v$ 关系式完全不同，当 $T=150\text{K}$ 时，A曲线的 $k(3 \rightarrow 2)$ 值比C曲线大一个量级，对 $\overline{\alpha_{2,5}}$ 影响很大。由于H对HF(3)的快速消激发，使 $\overline{\alpha_{2,5}}$ 从一开始就很小，且随K增大迅速下降至零。C曲线的 $k(3 \rightarrow 2)$ 较小，这时 $\overline{\alpha_{2,5}}$ 得以随K加大而上升，到 $K \sim 45$ 时，越过峰值缓缓下降。图6~8也给出了忽略H弛豫过程的 $\overline{\alpha_{V,J}}$ 曲线以做对照(B曲线)。这些图形的巨大差别反映了H原子和HF(V)的弛豫过程对增益系数的重大影响。因此选用准确的 $k_{M=H}(T)$ 是估算 $\overline{\alpha_{V,J}}$ 的重要环节。

3.2 $M = \text{H}_2$ (或 F) 的弛豫速率系数对

表4 $M = \text{H}_2$ 的碰撞弛豫速率系数表达式

序号	$k(T)_{-M\text{H}_2} (\text{cm}^3/\text{mol}\cdot\text{s})$	T (150 K)	T' (300K)	文献
1	$V \cdot 8 \times 10^4 T^{2.0}, (V=1, 3)$	$1.8 \times 10^9 \cdot V$	$7.2 \times 10^9 \cdot v$	[18]
2	$V \cdot (5 \times 10^4 T^{2.03}), (V=1, 8)$	$1.7 \times 10^9 \cdot V$	$7.1 \times 10^9 \cdot v$	[4]
3	$V \cdot 1 \times 10^5 T^2, (V=1, 8)$	$2.3 \times 10^9 \cdot V$	$9.0 \times 10^9 \cdot v$	[14]
4	$V \cdot 6 \times 10^7 T, (V=1, \dots)$	$9.0 \times 10^9 \cdot V$	$1.8 \times 10^{10} \cdot v$	[6]
5	$V \cdot 2 \times 10^8 T$	$3 \times 10^{10} \cdot V$	$6 \times 10^{10} \cdot v$	[17]

$\overline{\alpha_{V,J}}$ 的影响

$M = \text{H}_2$ (或 F) 与 HF(V) 的碰撞消激发速率系数比 $M = \text{H}$ 小 2~3 个数量级。不同作者的测量值差别也不大 (见表4)。采用表4第3和第4组 $k_{M=\text{H}_2}(T)$ 表达式分别算出的 $\overline{\alpha_{V,J}}$ 基本上没有什么区别，计算点都落在图9的B曲线上。F原子的 $k_{M=\text{F}}(T)$ 值与 $k_{M=\text{H}_2}(T)$ 差别不大。对 $\overline{\alpha_{V,J}}$ 的影响与 H_2 相似。

3.3 $M = \text{HF}$ 的弛豫速率系数对 $\overline{\alpha_{V,J}}$ 的影响。

HF(V) 与 $M = \text{HF}$ 相遇，可能发生 (V-V) 交换或 (V-T) 消激发过程，从而引起 HF(V) 内部各能态之间粒子数相对分布发生变化。除 HF(0) 外每一 HF(V) 能级都有由高能级弛豫到本能级的和由于 (V-V) 交

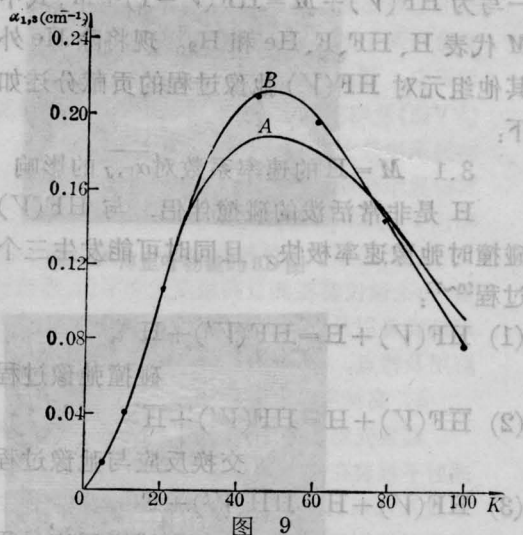


图9

B曲线: $M = \text{H}_2$, 各种不同 $k_{M=\text{H}_2}$ 的 $\overline{\alpha_{1,3}} \sim K$ 曲线

A、B曲线: HF(V)-HF(V), (V-V) 消激发速率

系数对 $\overline{\alpha_{1,3}}$ 的影响

表 5 $M=HF$ 的碰撞弛豫速率系数表达式

(a) $V-T$ 过程

序号	$k_{HF(V)-HF(T)}(cm^3/mol \cdot s)$	T (150K)	T (300K)	文献
1	$v \cdot (5 \times 10^7 T^{1.3} + 10^{13}, T-1.43)$	$8.3 \times 10^{10} \cdot v$	$1.7 \times 10^{11} \cdot V$	[3]
2	$v \cdot (10^{4.37} T^{2.3} + 10^{13} T^{-0.4})$	$2.7 \times 10^{12} \cdot v$	$2.0 \times 10^{12} \cdot V$	[4]
3	$v \cdot (10^{14} T^{-0.5} + 10^{0.47} T^{3.5})$	$1.6 \times 10^{13} \cdot v$	$1.2 \times 10^{13} \cdot V$	[5]
4	$*g(V) (3 \times 10^{14} T^{-1} + 3.5 \times 10^4 T^{2.26})$	$2.0 \times 10^{12} \cdot g(V)$	$1.0 \times 10^{12} \cdot g(V)$	[6]
5	$*g'(V) (3 \times 10^{14} T^{-1} + 3.5 \times 10^4 T^{2.26})$	$2.0 \times 10^{12} \cdot g'(V)$	$1.0 \times 10^{12} g'(V)$	[8]

$*g(V)$

V	1	2	3	4	≥ 5
$g(V)$	1	8	28	25	5

$g'(V)$

V	1	2	3	4	5	6
$g'(V)$	1	4	6	3	10	14

(b) $V-V$

序号	$k_{HF(V)-HF(V)}(T)(cm^3/mol \cdot s)$	T (150K)	T (300K)	文献
1	$2 \times 10^8 T^{1.5}$	3.6×10^{11}	1×10^{12}	[3]
2	$v(V'+1) \cdot 10^8 \cdot T^{1.5}$	$v(V'+1) \times 1.84 \times 10^{11}$	$v(V'+1) \times 5.2 \times 10^{12}$	[4]
3	$1.5 \times 10^{12} T^{0.5} (V=1, 7)$	1.8×10^{13}	2.6×10^{13}	[5]
4	$3.6 \times 10^{15} T^{-1} (V=1, 6; V'=1)$	2.4×10^{13}	1.2×10^{13}	[8]
5	$3.0 \times 10^{15} T^{-1} (V \geq 1, V' < 8)$	2.0×10^{13}	1.0×10^{13}	[17]
6	$v(V'+1) \cdot 9 \times 10^7 T^{1.5}$	$v(V'+1) \times 1.65 \times 10^{11}$	$v(V'+1) \times 5.2 \times 10^{12}$	[19]

转而增加的粒子数布居过程和由本能级向下弛豫或交换而丧失粒子数的过程。这两个过程部分相消，因而该能级的粒子数在反应过程中的净变化不会太剧烈。尽管 $HF(V)$ 的 $(V-T)$ 过程速率也很快，但 $\overline{\alpha_{V,J}}$ 不会发生重

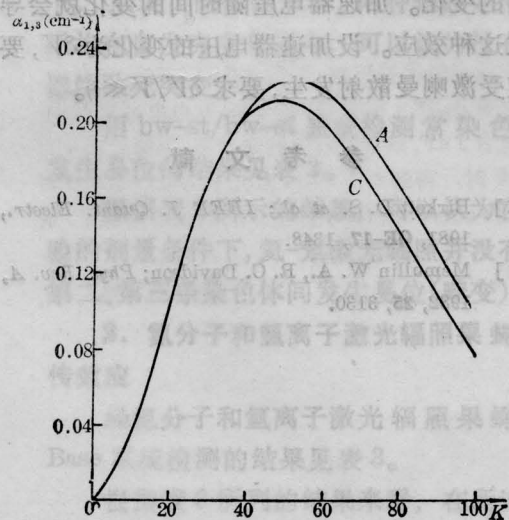


图 10 $M=HF$ 的速率系数对 $\overline{\alpha_{1,3}}$ 的影响

大变化。图 10 是 $M=HF$ 的 $(V-T)$ 过程速率系数对 $\overline{\alpha_{1,3}}$ 的影响。图中 A、C 曲线所用的速率系数分别取自表 5 第 1 和第 2 组。当 $T=150K$ 时，前者比后者约低一个数量级。A、C 曲线在 $K < 40$ 相重合，待 $K > 40$ 才开始分离，且偏差只有 5%。 $(V-V)$ 交换速率的差别对 $\overline{\alpha_{1,3}}$ 的影响绘在图 9 的 A、B 曲线上。前者用表 5(b) 第 1 组数据，后者用第 3 组数据。虽然在 $T \sim 150K$ 时二者相差约 2 个数量级，但曲线两端差别很小，峰值附近偏差较大，约为 10%。

四、结束语

本文探索了两股气流速度比 λ 和反应弛豫速率系数的不准确对 HF 化学激光器增益系数的影响，有以下几点结论：

1. λ 不同， $HF(V)$ 、 T 、 $\overline{\alpha_{V,J}}$ 诸参数沿 ξ 、 η 平面分布线型相似，但绝对值不同。 λ 越小

$\overline{\alpha_{v,j}}$ 会更快地达到峰值, 峰值 $\overline{\alpha_{v,j}}$ 也越小。

2. 泵浦反应 $k(T)$ 值相差一倍 ($T = 150K$), $\overline{\alpha_{v,j}}$ 峰值位置相差 $\Delta K \sim 25$ (约 1.5 cm)。较慢的 $k(T)$ 引起 $\overline{\alpha_{v,j}}$ 峰值后移。

3. HF(V)-M 碰撞弛豫过程的速率系数数值对 $\overline{\alpha_{v,j}}$ 的影响与 $k_M(T)$ 值的大小有关, 快速的 $k_M(T)$ 对 $\overline{\alpha_{v,j}}$ 影响较大。M=H 是本体系统较快的弛豫过程, $k_{M=H}(T)$ 相差一个量级引起 $\overline{\alpha_{1,3}}$ 峰值相差 60%; 使 $\overline{\alpha_{0,2}}$ 曲线线型发生趋势性变化; 并使 $\overline{\alpha_{2,5}}$ 沿 ξ 迅速降低、消失。但其他过程的 $k_M(T)$ 值的差别对 $\overline{\alpha_{v,j}}$ 影响不大。

本工作只限于研究冷反应条件下 HF(V) 的单量子跃迁过程, 工作是初步的, 供有关工作者参考。

参 考 文 献

[1] 周学华, 陈丽吟; 《中国激光》, 待发表。
 [2] 陈海韬, 周学华; 《力学学报》, 1984, 16, No.2, 151.
 [3] R. L. Kerber et al.; *Appl. Opt.*, 1972, 11, No. 5, 1112.
 [4] N. Cohen; Aerospace Corp. Rept., No. TR-0172,

(2779)-2.
 [5] R. L. Kerber et al.; *Appl. Opt.*, 1976, 15, No. 10, 2358.
 [6] N. Cohen; Aerospace Corp. Rept., TR-0076, (6603)-2.
 [7] R. W. F. Gross, J. F. Bott; Handbook of Chemical Lasers, Chapter III, New York, Wiley, 1976.
 [8] N. Cohen; AD-A056281, 1978.
 [9] R. F. Heidner III; *J. Chem. Phys.*, 1980, 72, No. 9, 4815.
 [10] S. H. Mo; *Am. Soc. Symp.*, 1978, Ser. 66, 59.
 [11] R. Foon; *Trans. Faraday Soc.*, 1971, 67, 3513.
 [12] R. F. Heidner III; *J. Chem. Phys.*, 1979, 70, 4509.
 [13] W. S. King et al.; *AIAA J.*, 1972, 10, No. 12, 1647.
 [14] 陈锡荣, 王忠诚等; 《中国激光》, 1983, 10, No. 3, 129.
 [15] M. J. Berry; *J. Chem. Phys.*, 1973, 59, 6229.
 [16] J. C. Polanyi; *J. Chem. Phys.*, 1976, 12, 419.
 [17] S. W. Zelazny et al.; *AIAA Paper*, 77~63.
 [18] R. Hofland, H. Mirels; *AIAA J.*, 1972, 10, No. 10, 1271.
 [19] B. Г. Крутова; *Кван. Электр.*, 1976, 3, №. 9, 1919.
 [20] R. C. Lock; *Quart. J. Mech. and Appl. Math.*, 1951, No. 4, 42.

(上接第 674 页)

$$\Delta V = (I/4\pi\epsilon_0 v_e)(t/a)$$

因为 $t \ll a$, 从而当总电流一定时, 这种环电子束穿过半径的势差比实电子束要小得多。换句话说, 当 $\Delta V/V$ 的允许上限给定后所允许的电流就更大。这就是为什么强流电子束的实验中多采用环电子束的原因。

对于物理上可实现的摆动场在作用区的空腔内必须满足条件 $\nabla \cdot \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{B} = 0$, 因此沿横向不可能是均匀的。摆动场的这种横向梯度也会导致纵向速度剪切, 但它对于空间

电荷效应所导致的剪切具有抵消作用。

3. 于给定的位置电子束纵向能量随时间的变化。加速器电压随时间的变化就会导致这种效应。设加速器电压的变化为 δV , 要使受激喇曼散射发生, 要求 $\delta V/V \ll \eta$ 。

参 考 文 献

[1] Birkett D. S. et al.; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1981, QE-17, 1348.
 [2] Memullin W. A., R. C. Davidson; *Phys. Rev. A*, 1982, 25, 3130.

