

CO₂-N₂-H₂O 激光体系的振动 弛豫过程速率数据

严海星

(中国科学院力学研究所)

提要: 对于迄今关于 CO₂-N₂-H₂O 激光体系的振动弛豫过程的研究进行了综合评述, 其中 1968 年以前的部分, 以 Taylor 和 Bitterman 的评述^[1]为基础。将各过程的弛豫速率, 用加权的最小二乘法整理成 $\log_{10}K = A + BX + CX^2 + DX^3$ 形式的最佳拟合式, 并给出了相应的系数值。用这些数据和基于本文结果而提出的三振型四(振动)温度弛豫模型, 对气动激光器的小信号增益进行的数值计算^[2], 与实验吻合得很好, 消除了由弛豫数据和弛豫模型的不准确带来的误差。

The vibrational relaxation processes in CO₂-N₂-H₂O laser system

Yan Haixing

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: Vibrational relaxation processes and data of CO₂-N₂-H₂O laser system up to now are surveyed. The data before 1968 are based on Taylor & Bitterman's review. The data are treated with weighed least square method to get best fit in the form of $\log_{10}K = A + BX + CX^2 + DX^3$, and the corresponding coefficients are presented. Using these best fits of data and relaxation model with three modes and four vibrational temperatures based on present work, numerical calculation results of small signal gain of GDL agree with experiments, thus eliminating the error introduced by the uncertainties of relaxation data and mode.

一、引言

分子内部振动自由度的弛豫过程。对高速气体动力学^[3]、大气物理^[4]、声学^[5]、化学动力学^[6~8]等领域有重要的影响。过去几十年对振动弛豫过程进行了广泛的研究, 发表了一系列专著^[9~13]和评述^[1,14~17]。弛豫过程在气体激光中起着核心的作用, 没有关于

弛豫过程的知识就不可能发明新的激光体系, 改进器件性能和对激光动力学过程进行分析。激光技术的发展要求对弛豫过程有更深入的认识, 也为弛豫过程的实验测量提供了有力的手段。

1969年初, Taylor 和 Bitterman 曾对 CO₂-N₂ 激光体系中的振动弛豫过程作了综合评述^[1], 至今被广泛地引用。但限于

收稿日期: 1979年11月6日。

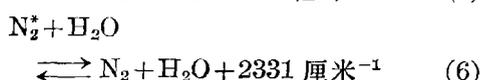
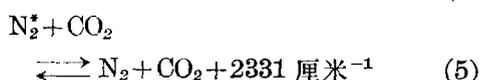
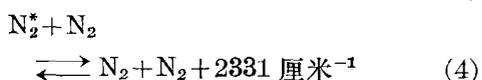
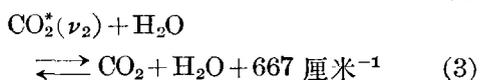
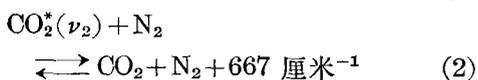
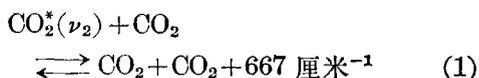
• 1 •

当时的研究水平,有许多重要的弛豫过程,缺乏数据;对实验数据的分析处理也有欠缺,使一些速率数据不准;对体系的弛豫过程中的一些重要问题,缺乏深入的分析。1969年后,对 $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-H}_2\text{O}$ 激光体系的弛豫过程,积累了丰富的资料。有人为了对气动激光器(GDL)性能作计算,曾收集和采用了部分新数据^[18,19],但他们既未对弛豫过程作详细分析,收集的数据又很少,只给出了十分粗糙的速率值,致使 GDL 性能的计算结果有大的误差,见[2]。

我们在文献[1]的基础上,收集、处理和评述了迄今的实验和理论研究结果,给出了各种弛豫速率的最佳拟合曲线和解析表达式,可供方便地使用。本文的最佳拟合扩展了数据的适用范围,并在几种重要的过程上与[1]的结果有大的差别。把本文结果用于燃烧型 GDL 的非平衡流计算,得到了好的结果^[2],这也从侧面证明本文结果的可靠性。

二、弛豫机制

我们考虑的能量交换反应为(参见图 1)
 $V\text{-}T$ 交换:



分子间 $V\text{-}V$ 交换:

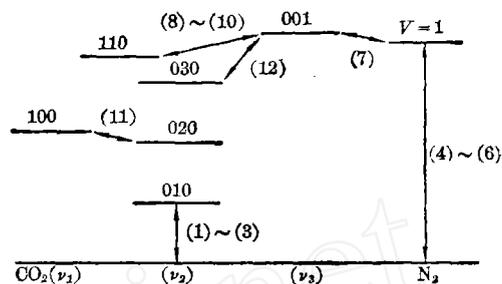
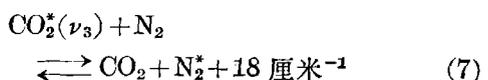
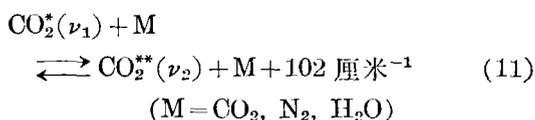
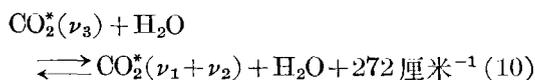
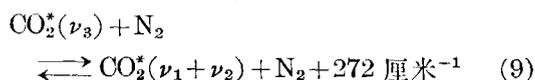
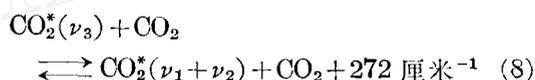


图1 $\text{CO}_2\text{-N}_2$ 激光体系能级图

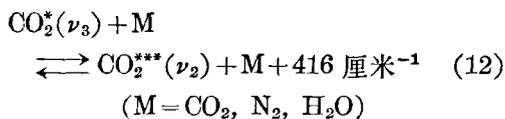
分子内 $V\text{-}V$ 交换:



其中 * 表示振动能量子;括号内为 CO_2 分子振型。能量差取自平动或转动。

式和图中只列出体系最低的几个振动能级。若采用振动能量的弛豫方程来描述体系,则可将所有同类型过程的效果包括进去^[20];而若采用只考虑最低能级的粒子数方程来描述弛豫过程,就会带来一些误差,但对我们感兴趣的温度($<1500 \text{ K}$),这种近似尚可允许。

分子体系的弛豫机制是一个十分复杂的问题,Herzfeld 曾用 SSH 理论^[5]对 CO_2 体系作过详细的理论计算^[21],给出了各种可能过程的跃迁几率。但实验表明,SSH 理论有很大局限性。而从实验上难于直接测定各种振动态之间的跃迁几率,许多人正致力于用激光的方法来间接地确定弛豫机制。对于 $\text{CO}_2(\nu_3 \rightarrow \nu_1\nu_2)$ 的分子内 $V\text{-}V$ 交换,我们采用了 $\nu_3 \rightarrow \nu_1 + \nu_2$ 的机制。[1]采用的是 $\nu_3 \rightarrow 3\nu_2$ 机制

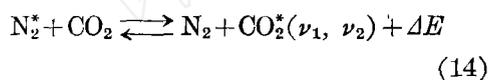


可以证明, 在取 $\text{CO}_2(\nu_1)$ 与 (ν_2) 振型平衡的条件下, (8)~(10)的速率与(12)的速率有简单的换算关系^[22]

$$\begin{aligned} & K [\text{C3}(1 \rightarrow 0), \text{C2}(0 \rightarrow 3); \text{M}] \\ & = \frac{(1 - e^{-\theta_1/T})^2}{1 - e^{-\theta_1/T}} \\ & \times K [\text{C3}(1 \rightarrow 0), \text{C1}(0 \rightarrow 1), \\ & \quad \text{C2}(0 \rightarrow 1); \text{M}] \quad (13) \end{aligned}$$

θ_i 为振动特征温度。因此我们只给出了 (8)~(10)反应的速率。

对实验数据的分析表明



的速率在误差范围内为 0^[23]。我们便略去了它。

微量水对 $\text{CO}_2\text{-N}_2$ 体系的弛豫有大的影响, 但由于实验上的困难、理论的不完善和水的作用的复杂性, 使加水后的弛豫机制至今不清楚。归结起来有两种看法: 一是 CO_2^* 和 N_2^* 与水分子 $V\text{-}V$ 交换, 然后 $\text{H}_2\text{O}^*(\nu_2)$ 再 $V\text{-}T$ 消激发(可参见[1]); 另一是将水分子作为 CO_2^* , N_2^* 的 $V\text{-}T$ 或 $V\text{-}V$ 消激发的碰撞伴侣。我们采用后者。可以证明, 若 $\text{H}_2\text{O}^*(\nu_2)V\text{-}T$ 消激发速率极快, 在弛豫的过程中总可认为水的振型与平动是平衡的, 那么这两种看法的效果是等同的。

三、实验和数据处理

研究振动弛豫的实验方法有多种, 最常见的有激波管(压缩流), 激光荧光, 激光光声, 超声, 激波管膨胀流, 碰撞管等。

弛豫速率是一种描述分子振动能级特性的微观数据, 无法由实验直接测定。实验上测得的都是体系某些宏观物理量, 它们与内部自由度的弛豫过程有密切关系。需要通过

一定的理论分析, 将实验数据(如衰减常数或总弛豫时间)与某些过程的弛豫速率联系起来, 并求得它们。显然, 速率的精度除了取决于实验外, 也与数据的处理有关。

多原子分子的 $V\text{-}T$ 速率多年来都采用 Schäfer 公式^[24]

$$\tau_1 = \tau_{11} \times \frac{C_1}{\sum_i C_i} \quad (15)$$

其中下标 1 表示“控制弛豫速率”的那个振型; C_i 为振动比热。研究表明^[22], 这公式只在体系内 $V\text{-}V$ 速率远大于“控制速率”的 $V\text{-}T$ 速率时才近似成立, 而实际上 $V\text{-}V$ 速率常并不很大, 采用 Schäfer 公式会带来误差, 在比热比较小时尤其如此。但在 CO_2 体系中这个误差不太大。

$V\text{-}V$ 速率的处理是近些年才发展起来的。在纯 CO_2 和 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 混合物的情况下, Taylor、Bitterman 对激波管实验^[25], Rosser 等对激光荧光实验^[23, 26], 由测得的衰减常数 k 用下式换算成速率系数

$$K [\text{C3}(1 \rightarrow 0), \text{C2}(0 \rightarrow 3); \text{M}] = \frac{k}{2b} \quad (16)$$

我们基于普遍形式的弛豫方程^[20], 对弛豫机制作了分析, 并解弛豫方程组得到^[22]

$$K = \frac{kK [\text{C2}(1 \rightarrow 0); \text{C}] - k^2(1+c)}{\left\{ \begin{array}{l} K [\text{C2}(1 \rightarrow 0); \text{C}] b \\ -k(a+b+bc) \end{array} \right\}} \quad (17)$$

其中

$$a = \frac{9e^{2\theta_1/T}}{2(e^{\theta_2/T} - 1)(e^{\theta_1/T} - 1)} \quad (18)$$

$$b = \frac{1 - e^{-\theta_1/T}}{(1 - e^{-\theta_1/T})^3} \quad (19)$$

$$c = \frac{2e^{-\theta_1/T}(1 - e^{-\theta_1/T})^2}{e^{-\theta_2/T}(1 - e^{-\theta_1/T})^2} \quad (20)$$

按[20], 我们将 Taylor、Bitterman 公式中的因子 2 吸收到 K 中去了。在(17)式中若认为 $K [\text{C2}(1 \rightarrow 0); \text{C}] \gg k$, 即可化成(16)式。这正是 Taylor、Bitterman 和 Rosser 等采用的近似: 认为 $\text{CO}_2(\nu_2)$ 总与平动保持平衡。采

表 1 最佳拟合式系数

过程	速率	X	A	B	C	D	温度范围
(1) CO ₂ (ν ₂ →T) - CO ₂	K	T ^{-1/3}	-7.22788741	-77.0945460	203.852916	0	150~7000
(2) CO ₂ (ν ₂ →T) - N ₂	K	T ^{-1/3}	-9.18704456	-42.4606794	46.4011141	0	150~1500
(3) CO ₂ (ν ₂ →T) - H ₂ O	K	T ^{-1/3}	-9.827809	-25.22533	125.6784	0	300~1000
(4) N ₂ (V→T) - N ₂	K	T ^{-1/3}	-5.38873	-139.0598	88.50646	1412.096	240~4700
(5) N ₂ (V→T) - CO ₂	K	T ^{-1/3}	-5.38873	-139.0598	88.50646	1412.096	240~4700
(6) N ₂ (V→T) - H ₂ O	K	T ^{-1/3}	-10.9754595	-21.7181799	0	0	290~3000
(7) CO ₂ (ν ₃) → N ₂	K	10 ⁻² ·T	-12.0624762	-0.098057182	5.539994 × 10 ⁻³	-6.277332 × 10 ⁻⁵	150~2600
(8) CO ₂ (ν ₃ →ν ₁ +ν ₂) - CO ₂	K _{TB}	T ^{-1/3}	-9.25923236	-4.69327095	-470.105702	1930.79807	150~1600
	K	T ^{-1/3}	-9.7767526	2.92317157	-504.993077	1978.16692	150~1600
(9) CO ₂ (ν ₃ →ν ₁ +ν ₂) - N ₂	K _{TB}	T ^{-1/3}	5.61975614	-347.252296	2057.64553	-4233.96898	160~1600
	K	T ^{-1/3}	7.42712139	-390.990028	2387.44778	-5029.38366	160~1600
(10) CO ₂ (ν ₃ →ν ₁ +ν ₂) - H ₂ O	K _{TB}	T ^{-1/3}	-14.1877762	38.1508547	-159.940244	0	300~1000
	K	T ^{-1/3}	-13.8868956	33.8333884	-144.499031	0	300~1000
(11) CO ₂ (ν ₁ →2ν ₂) - CO ₂	慢K	T	-13.07233	0.00137333	0	0	300~1000
	快K	认为 K=1.25 × 10 ⁻¹¹ , 且不随温度改变					
(11) CO ₂ (ν ₁ →2ν ₂) - N ₂	一种认为与 CO ₂ (ν ₁ →2ν ₂) - CO ₂ 的速率近似相等						400
	另一种认为是 CO ₂ (ν ₁ →2ν ₂) - CO ₂ 的速率的 0.46 倍						400
(11) CO ₂ (ν ₁ →2ν ₂) - H ₂ O	缺乏数据						

用(16)得到的速率将在数值和温度关系上都带来误差。CO₂-N₂混合物中要复杂一些,需将 CO₂(ν₃→ν₁, ν₂) 速率和 CO₂(ν₃) → N₂ 速率同时求出,他们也采用了类似的近似,同样带来了误差。本文给出了两种公式处理的结果。

本文中速率 K 的单位为厘米³/分子·秒,关于 K 与跃迁几率 P 的关系,将各种弛豫实验数据换算成 K 的公式和使用的物理常数(均见[1])。

四、弛豫速率数据

由于振动弛豫时间短,对实验的要求(如杂质含量)又较苛刻,所以测得的实验数据常有较大误差,有时可达一、二个数量级。

• 4 •

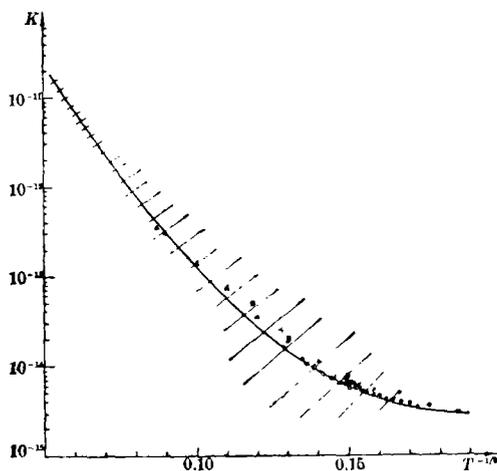


图 2 CO₂(ν₂-T) - CO₂ 速率

///-[1]; ▲-[27]; +-[28]; ■-[29];
□-[30]; △-[31]; ○-[33]; ●-[34];
×-[35]

根据对实验精度和数据可靠性的分析, 对不同作者的各种数据点给以一定的权重, 再用加权的 最小二乘法 (计算在国产的 TQ-16 电子计算机上进行), 将数据的最佳拟合整理成

$$\log_{10} K = A + BX + CX^2 + DX^3 \quad (21)$$

的形式。按照 Landau-Teller 和 SSH 理论, 一般将 X 取作 $T^{-1/3}$, 在高温下 $\log_{10} K$ 应与 $T^{-1/3}$ 成直线关系。

最佳拟合的系数见表 1。图 2 至图 10 是速率系数与温度的关系图解。

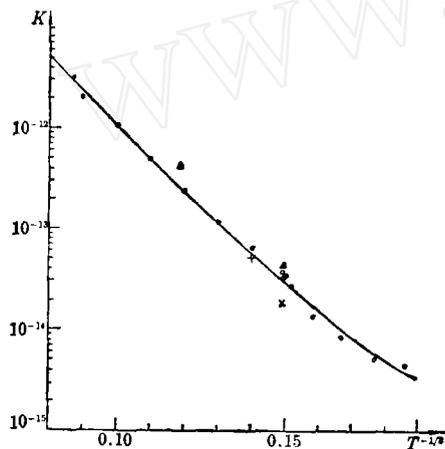


图 3 $\text{CO}_2(\nu_2 \rightarrow T) - \text{N}_2$ 速率

●—[27]; △—[36]; ▲—[37]; +- [38];
×—[39]; □—[40]; ○—[41]

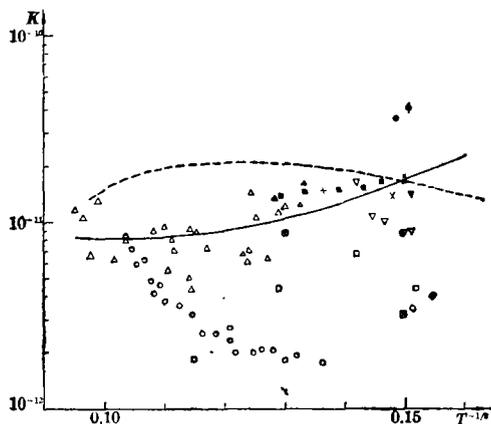


图 4 $\text{CO}_2(\nu_2 \rightarrow T) - \text{H}_2\text{O}$ 速率

⊙—[39]; ■—[42]; △—[43]; ○—[44]; ⊠—[45];
●—[46]; ▼—[47]; □—[48]; ◇—[49]; ▽—[50];
⊕—[51]; ◆—[52]; ◆—[53]; ▲—[54]; +- [55];
×—[56]; --- [57]

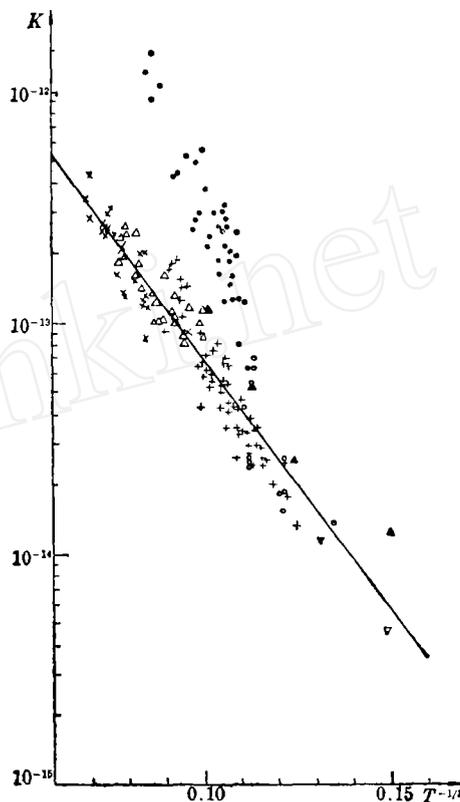


图 5 $\text{N}_2(\nu \rightarrow T) - \text{H}_2\text{O}$ 速率

●—[25]; ○—[59]; △—[60]; ▽—[61];
×—[62]; ▼—[63]; ▲—[64]; +- [65]

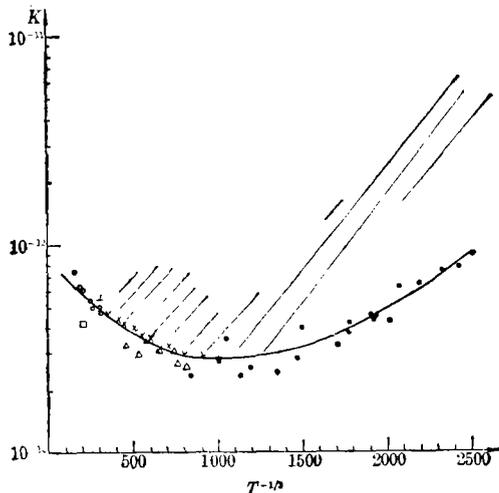


图 6 $\text{CO}_2(\nu_3) \rightarrow \text{N}_2$ 速率

×—[23]; ///—[25]; △—[44]; +- [67];
▲—[68]; ○—[69]; ●—[70]; □—[71]

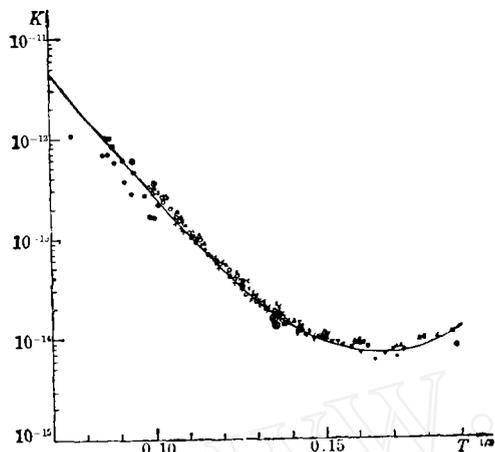


图7 $\text{CO}_2(\nu_3 \rightarrow \nu_1 + \nu_2) - \text{CO}_2$ 速率

○—[23]; ◆—[68]; ■—[70]; ▼—[71]; ⊕—[72];
 +- [73]; ●—[74]; ⊗—[75]; □—[76]; ×—[77];
 △—[78]; ◆—[79]; ▲—[80]; ▽—[81]; ◇—[82]

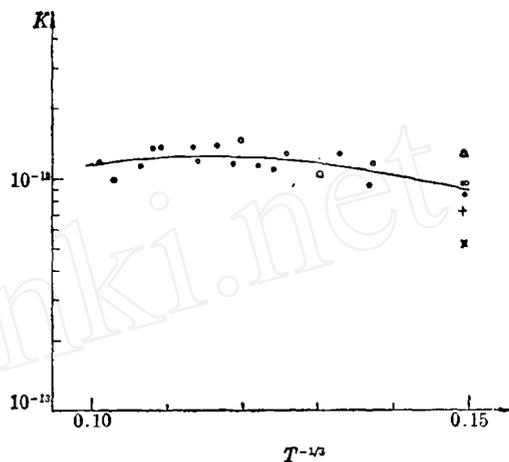


图9 $\text{CO}_2(\nu_3 \rightarrow \nu_1 + \nu_2) - \text{H}_2\text{O}$ 速率

●—[26]; □—[83]; +- [84];
 ○—[85]; ×—[86]; △—[87]

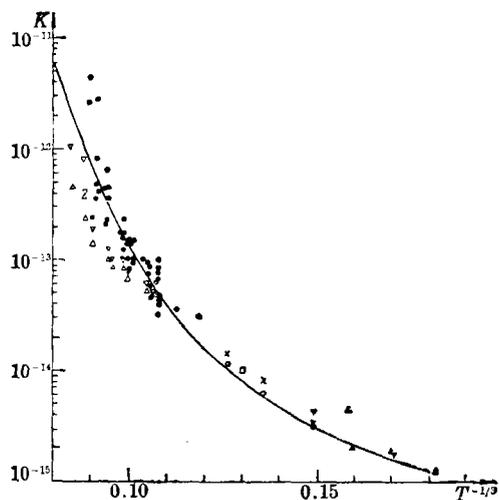


图8 $\text{CO}_2(\nu_3 \rightarrow \nu_1 + \nu_2) - \text{N}_2$ 速率

○—[23]; ● [25]; +- [40]; △—[69, $\delta=2$];
 ▽—[69, $\delta=3$]; ▲—[70]; ■—[71]; ×—[72];
 ▼—[77]; □—[83]

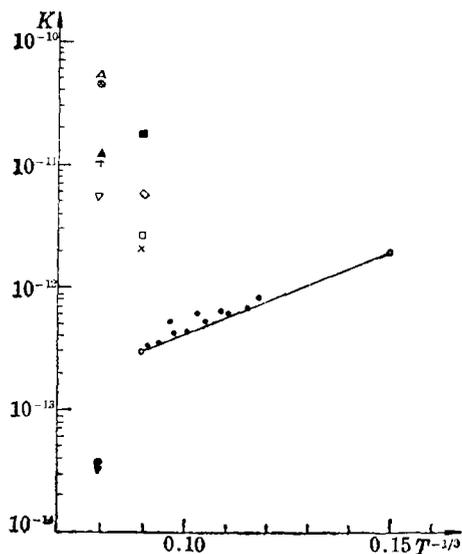


图10 $\text{CO}_2(\nu_1 \rightarrow 2\nu_2) - \text{CO}_2$ 速率

●—[44]; ▲—[88]; ◇—[90]; □—[90, $M=\text{N}_2$];
 △—[91, 快速率]; ▽—[91, 慢速率]; ▼—[92]; ■—
 [93, $M=\text{CO}_2, \text{N}_2$]; ×—[94]; +- [95]; ⊗ [96];
 ⊕—[97]; ○—[99]

Anderson 在他的简化弛豫模型和线性的弛豫方程基础上, 考察了各种弛豫速率的不准确性对 GDL 性能的影响^[18]。认为影响最大的是 (3), (10), (6), (9) 等几个反应。

参 考 文 献

- [1] Taylor R. L., Bitterman S.; *Rev. Mod. Phys.*, 1969, **41**, No. 1, 26.
- [2] 严海星, 陈丽吟; «力学学报», 1978, No. 4, 274.
- [3] Clarke J. F., McChesney M.; *Dynamics of Relaxing Gases*, 2ed ed., Butterworths, London (1976); Clarke J. F.; *Rep. Prog. Phys.*, 1978, **41**, No. 6, 807.
- [4] McGowan J. Wm. (ed.); *Adv. Chem. Phys.*, 1975, **28**, Interscience, New York.
- [5] Herzfeld K. F., Litovitz T. A.; *Absorption and Dispersion of Ultrasonic Waves*, Academic Press, New York (1959).
- [6] Moore C. B. (ed.); *Chemical and Biochemical Applications of Lasers*, 1~3, Academic Press, New York (1974~1977).
- [7] Tardy D. C., Rabinovitch B. S.; *Chem. Rev.*, 1977, **77**, No. 3, 369.
- [8] Кондратьев В. Н., Никитин Е. Е.; *Кинетика и механизм газофазных реакций*, Наука, Москва (1974).
- [9] Cottrell T. L., McCoubrey J. C.; *Molecular Energy Transfer in Gases*, Butterworths, London (1961).
- [10] Ступеченко Е. В. и др., *Релаксационные процессы в ударных волнах*, Наука, Москва (1965).
- [11] Burnett G. M., North A. M. (ed.); *Transfer and Storage of Energy by Molecules 2: Vibrational Energy*, Wiley-Interscience, (1969).
- [12] Levine R. D., Jortner J.; *Molecular Energy Transfer*, Wiley, London (1975).
- [13] Lambert J. D.; *Vibrational and Rotational Relaxation in Gases*, Oxford Univ. Press (1977).
- [14] Rich J. W., Treanor C. E.; *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 1970, **2**, 355.
- [15] Moore C. B.; *Adv. Chem. Phys.*, 1973, **23**, 41.
- [16] Гордиец и др.; *УФН*, 1972, **108**, № 4, 655.
- [17] Gait P. D.; *Annu. Rep. Chem. Soc. (London)* **73**, Section A, (1976) 5.
- [18] Anderson J. D. Jr., *AIAA J.*, 1974, **12**, No. 12, 1699; 亦见 AD-A015790 (1974); *AIAA Paper* 74~176.
- [19] Brunner M. J.; AD-783218, (1974).
- [20] 严海星; «激光», 1979, **6**, No. 10, 1.
- [21] Herzfeld K. F.; *J. Chem. Phys.*, 1967, **47**, No. 2, 743.
- [22] 严海星; «力学学报», 1980, No. 3, 319.
- [23] Rosser W. A., Jr. *J. Chem. Phys.*, 1969, **50**, No. 11, 4996; *J. Chem. Phys.*, 1971, **54**, No. 9, 4131.
- [24] Schäfer K.; *Z. Phys. Chem.*, 1940, **B46**, 212; 亦见[9] pp 26~29.
- [25] Taylor R. L., Bitterman S.; *Proc. 7th Shock Tube Symp.*, (1969), 577; *J. Chem. Phys.*, 1969, **50**, No. 4, 1720; 亦见[1].
- [26] Rosser W. A. Jr., Gerry E. T.; *J. Chem. Phys.*, 1969, **51**, No. 5, 2286.
- [27] Simpson C. J. S. M., Chandler T. R. D.; *Proc. Roy. Soc.*, 1970, **A317**, No. 1529, 265.
- [28] Shields F. D.; *J. Acoust. Soc. Am.*, 1970, **47**, No. 5, pt. 2, 1262.
- [29] Bass H. E.; *J. Chem. Phys.*, 1973, **58**, No. 11, 4783; *J. Chem. Phys.*, 1973, **58**, No. 9, 3837.
- [30] Слободская П. В.; *Опн. и спект.*, 1973, **34**, № 4, 678.
- [31] Cannemeijer F., De Vries A. E.; *Physica*, 1973, **64**, No. 1, 123.
- [32] Eckstrom D. J., Bershader D.; *J. Chem. Phys.*, 1970, **53**, No. 7, 2978.
- [33] Allen D. C. *et al.*; *Chem. Phys. Lett.*, 1977, **45**, No. 1, 183.
- [34] Lepoutre F. *et al.*; *Chem. Phys. Lett.*, 1977, **48**, No. 3, 509.
- [35] Babino A.; Thèse, Paris VI (1976). 转引自[33].
- [36] Shields F. D. *et al.*; *J. Chem. Phys.*, 1973, **38**, No. 9, 3837.
- [37] Merrill K. M., Anne R. C.; *J. Chem. Phys.*, 1969, **51**, No. 2, 844.
- [38] Bauer H. J., Schotter R.; *J. Chem. Phys.*, 1969, **51**, No. 8, 3261.
- [39] Huetz-Aubert M., Chavalier P.; *Adv. Mol. Relax. Processes*, 1970, No. 2, 101.
- [40] Cannemeijer F. *et al.*; *Physica*, 1974, **74**, 196.
- [41] Simpson C. J. S. M., Gait P. D.; *Chem. Phys. Lett.*, 1977, **47**, No. 1, 133.
- [42] Lewis J. W. L., Lee K. P.; *J. Acoust. Soc. Am.*, 1965, **38**, No. 5, 813.
- [43] Buchwald M. I., Bauer S. H.; *J. Phys. Chem.*, 1972, **76**, No. 22, 3108.
- [44] Bulthuis K.; *J. Chem. Phys.*, 1973, **58**, No. 12, 5786; *Chem. Phys. Lett.*, 1978, **21**, No. 2, 415.
- [45] Read A. W.; *Progr. Reaction Kinetics*, 1965, **3**,

- 303; 亦见 [39].
- [46] Cheo P. K.; *Bull. Am. Phys. Soc.*, 1968, **13**, 207; 亦见 [1].
- [47] Eucken A., Becker R.; *Z. Phys. Chem.*, 1935, **27B**, 235. 转引自 [1].
- [48] Eucken A., Numann E.; *Z. Phys. Chem.*, 1937, **36B**, 163. 转引自 [1].
- [49] Van Itterbeek A. *et al.*; *Physica*, 1939, **6**, 511. 转引自 [1].
- [50] Van Itterbeek A., Mariens P.; *Physica*, 1940, **7**, 125. 转引自 [1].
- [51] Smiley E. F., Winkler E. H.; *J. Chem. Phys.*, 1954, **22**, 2018. 转引自 [1].
- [52] Knudsen C. V. O., Fricke E.; *J. Acoust. Soc. Am.*, 1940, **12**, 255. 转引自 [1].
- [53] Metter I. M.; *Phys. Z. Sowjetunion*, 1937, **12**, 233. 转引自 [1].
- [54] Higgs R. W., Torborg R. N.; *J. Acoust. Soc. Am.*, 1967, **42**, 1038. 转引自 [1].
- [55] Pielemeier W. H.; *J. Acoust. Soc. Am.*, 1943, **15**, 22. 转引自 [1].
- [56] Gutowski F. A.; *J. Acoust. Soc. Am.*, 1956, **28**, 478. 转引自 [1].
- [57] Sharma R. D.; *J. Chem. Phys.*, 1971, **54**, 810.
- [58] Benson S. W., Børend G. C.; *J. Chem. Phys.*, 1966, **44**, No. 470, 4247.
- [59] Huber P. W., Kantrowitz A.; *J. Chem. Phys.*, 1947, **15**, No. 5, 275.
- [60] von Rosenberg C. W. Jr., *et al.*; *J. Chem. Phys.*, 1972, **56**, No. 7, 3230.
- [61] Evans L. B.; *J. Acoust. Soc. Am.*, 1972, **51**, No. 1, pt. 2, 409.
- [62] Center R. E., Newton J. E.; *J. Chem. Phys.* 1978, **68**, No. 8, 3327; 亦见 1975, **62**, No. 6, 2187.
- [63] Piercy J. E.; *J. Acoust. Soc. Am.*, 1971, **49**, 110(a). 转引自 [62].
- [64] Whitson M. E., McNeal R.; *J. Chem. Phys.*, 1977, **66**, No. 6, 2696.
- [65] Зув А. П., Ткаченко Б. К.; *Изв. ВУЗ: Физика*, 1978, №6, 84.
- [66] Sharma R. D., Brau C. A.; *J. Chem. Phys.*, 1969, **50**, No. 2, 924.
- [67] Henri G. *et al.*; *C. R.*, 1971, **272B**, No. 19, 1139.
- [68] Christophe B. M., Offenberger A. A.; *Can. J. Phys.*, 1972, **50**, No. 4, 363.
- [69] Sato Y., Tsuchiya S.; *J. Phys. Soc. Jap.*, 1972, **33**, 1120; 亦见 *Chem. Phys. Lett.*, 1970, **5**, 293.
- [70] Inoue G., Tsuchiya S.; *J. Phys. Soc. Jap.*, 1975, **39**, No. 2, 479.
- [71] Bass H. E., Hoffman S. D.; *J. Chem. Phys.*, 1977, **67**, No. 12, 5966,
- [72] Rao Y. V. C. *et al.*; *Chem. Phys. Lett.*, 1972, **17**, No. 4, 531.
- [73] Stephenson J. C., Moore C. B.; *J. Chem. Phys.*, 1970, **52**, No. 5, 2333.
- [74] Seery D. J.; *J. Chem. Phys.*, 1972, **56**, 631.
- [75] Gower M. C., Carswell A. I.; *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21**, No. 11, 556.
- [76] Hinchey J. J.; УАС. 转引自 [43].
- [77] Бирюков А. С. и др., *ЖПС*, 1972, **16**, 249.
- [78] Henri G. *et al.*; *C. R.*, 1972, **274B**, No. 7, 482.
- [79] Alexander J. A. F. *et al.*; *Proc. Phys. Soc. Ser. 2*, 1968, **1**, No. 6, 1225.
- [80] Starr D. F., Hancock J. K.; *J. Chem. Phys.*, 1975, **63**, No. 11, 4730.
- [81] Lepoutre F. *et al.*; *Chem. Phys. Lett.*, 1977, **43**, No. 3, 509.
- [82] Chakroum A. *et al.*; *C. R.*, 1975, **281B**, No. 1, 29.
- [83] Henderson M. C. *et al.*; *J. Acoust. Soc. Am.*, 1969, **45**, No. 1, 109.
- [84] Moore C. B. *et al.*; *J. Chem. Phys.*, 1969, **46**, No. 11, 4222.
- [85] Heller D. F., Moore C. B.; *J. Chem. Phys.*, 1970, **52**, No. 2, 1005.
- [86] Бирюков А. С. и др., *ЖЭТФ*, 1970, **59**, 1513.
- [87] Cheo P. K.; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1968, **QE-4**, No. 10, 587.
- [88] Rhodes C. K. *et al.*; *J. Chem. Phys.*, 1968, **48**, 5730.
- [89] Sharma R. D.; *J. Chem. Phys.*, 1968, **49**, No. 11, 5195.
- [90] Stark E. E. Jr.; *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23**, No. 6, 335.
- [91] DeTemple T. A. *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **22**, No. 8, 349.
- [92] Rosser W. A., Jr. *et al.*; *J. Chem. Phys.*, 1972, **57**, No. 10, 4153.
- [93] Jacobs R. R. *et al.*; *Phys. Rev.*, 1975, **A-11**, 54.
- [94] Швед Г. М., *Опт. и спект.*, 1976, **41**, №5, 882.
- [95] Douglas-Hamilton D. H. *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**, No. 8, 3566.
- [96] Manes K. R., Seguin H. J.; *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**, No. 12, 5073.
- [97] Murray E. R. *et al.*; *J. Chem. Phys.*, 1975, **62**, No. 2, 388.
- [98] Seeber K. N.; *J. Chem. Phys.*, 1971, **55**, 5077.
- [99] Marriott R.; *Proc. Phys. Soc. Lond.*, 1964, **84**, 877; 1966, **88**, 83.