

CO₂ 激光辐射谱线的大气衰减特性

饶瑞中* 王俊波 乐时晓

(成都电讯工程学院)

提 要

我们于1986年8月在成都市实地测量了CO₂激光辐射00[°]1—10[°]0和00[°]1—02[°]0振动带内40条谱线在大气中的衰减。文中给出了各谱线衰减系数的一般值并描述了衰减特征。在八月份成都地区的特定条件下,水蒸汽的吸收和气溶胶粒子的吸收与散射构成了衰减的主要部分。测得的各谱线的衰减系数可为CO₂激光的大气应用提供有益的参考。

一、引 言

CO₂激光的实际大气传播特性的研究在较长的时间内主要集中于00[°]1—10[°]0振动带的P(20)谱线。近几年,人们已在实验室对二氧化碳气体、臭氧以及水蒸汽、空气中的污染气体等对CO₂激光辐射谱线的吸收作了比较广泛的研究^[1],但有关实际大气对CO₂激光辐射谱线的衰减的研究为数极少。

1978年,美国的Hanley等人在白沙靶场作了包括He—Ne, Nd—YAG, DF, 和CO₂等激光在内的大气透射率测量^[2],该实验证实了实际大气中存在对CO₂激光辐射的强吸收峰。从所给的结果来看,实验环境水汽分压强最高只到1440Pa,大气中的气溶胶粒子极少。

为了探索CO₂激光辐射在实际大气中的传播规律,并为CO₂激光的大气应用提供有益的基础数据,我们于1986年8月在成都市东郊实地测量了CO₂激光辐射中40条谱线在大气中的衰减。实验系统中使用声光调制器分束以监测激光的输出功率,消除了输出功率起伏的影响。实验的气候特点是:四川盆地的相对湿度大,八月份气温高。

二、衰 减 机 理

一般天气情况下,空气中的各种气态、固态、液态物质可以归纳为气体分子和气溶胶粒子。它们对激光辐射的吸收和散射构成了激光辐射的衰减,衰减系数可记为

1987年3月25日收到,1987年7月29日收到修改稿。

* 饶瑞中同志现在中国科学院安徽光学精密机械研究所二室工作。

$$\alpha(\lambda) = \alpha_{\text{M}}(\lambda) + \alpha_{\text{aM}}(\lambda) + \alpha_{\text{SA}}(\lambda) + \alpha_{\text{aA}}(\lambda) \quad (1)$$

式中, $\alpha_{\text{M}}(\lambda)$ 、 $\alpha_{\text{aM}}(\lambda)$ 、 $\alpha_{\text{SA}}(\lambda)$ 、 $\alpha_{\text{aA}}(\lambda)$ 分别是波长为 λ 时的分子散射系数、分子吸收系数、气溶胶散射系数和气溶胶吸收系数。

1. 分子散射

CO_2 激光辐射的 $00^\circ 1 - 10^\circ 0$ 和 $00^\circ 1 - 02^\circ 0$ 振动带内的谱线的波长位于 $9 - 11\mu\text{m}$ 范围内。在此波长内, 分子散射系数为 10^{-7}km^{-1} 量级^[1], 比较其它因素引起的衰减完全可以忽略。

2. 分子吸收

分子吸收包括分立谱线吸收和连续吸收两种, 有关机理已有较为完善的理论分析^[4, 5]。研究表明, 空气中吸收 CO_2 激光辐射的气体主要是 CO_2 气体和水蒸汽。由于 CO_2 气体的吸收跃迁与 CO_2 激光辐射跃迁具有密切的关系, 其吸收表现为分立谱线吸收。水蒸汽的吸收主要是连续吸收, 但存在对个别谱线的吸收峰^[6]。

对于 $00^\circ 1 - 10^\circ 0$ 振动带的 $P(20)$ 支线, 广泛采用的计算空气中 CO_2 气体与水蒸汽吸收的经验公式为^[7, 8]

$$\alpha_{\text{CO}_2}(10.59) = 1.44 \times 10^{-2} \left(\frac{295}{T} \right)^{1.5} \exp \left(- \frac{2233}{T} \right) \quad (\text{km}^{-1}) \quad (2)$$

$$\alpha_{\text{H}_2\text{O}}(10.59) = 7.68 \times 10^{-2} p_{\text{H}_2\text{O}} (P + 193 p_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (\text{km}^{-1}) \quad (3)$$

式中 P 是大气压强 (Pa), T 是大气热力学温度 (K), $p_{\text{H}_2\text{O}}$ 是水蒸汽分压强 (Pa), $p_{\text{H}_2\text{O}}$ 与温度 $t(^{\circ}\text{C})$, 相对湿度 R , H , (%) 的关系为^[8]

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = 6.03 \times R \cdot H \cdot \times 10^{\frac{7.45t}{235+t}} \quad (\text{Pa}) \quad (4)$$

3. 气溶胶粒子的吸收和散射

若单位体积大气中, 半径位于 $(r, r+dr)$ 的气溶胶粒子数为 $N(r)dr$, 则气溶胶粒子的消光系数 $\alpha_A(\lambda)$ [等于 $\alpha_{\text{SA}}(\lambda) + \alpha_{\text{aA}}(\lambda)$] 为

$$\alpha_A(\lambda) = \int_0^\infty N(r) Q_A(r, \lambda) \pi r^2 dr \quad (5)$$

$$Q_A(r, \lambda) = Q_{\text{SA}}(r, \lambda) + Q_{\text{aA}}(r, \lambda) \quad (6)$$

式中 $Q_A(r, \lambda)$, $Q_{\text{SA}}(r, \lambda)$, $Q_{\text{aA}}(r, \lambda)$ 分别为半径是 r 的粒子对波长为 λ 的光的消光效率、散射效率和吸收效率。

空气中气溶胶粒子的尺度接近于 CO_2 激光的波长, 可用 Mie 理论的近似结果分析其吸收和散射^[10], 即

$$Q_A(r, \lambda) = 2 - 4e^{-\rho \cos \beta} \left(\frac{\cos \beta}{\rho} \right) \sin(\rho - \beta) - 4e^{-\rho \cos \beta} \left(\frac{\cos \beta}{\rho} \right)^2 \cos(\rho - 2\beta) + 4 \left(\frac{\cos \beta}{\rho} \right)^2 \cos(2\beta) \quad (7)$$

$$Q_{ad}(r, \lambda) = 1 + \frac{e^{-4xn'}}{2xn'} + \frac{e^{-4xn'} - 1}{8x^2n'^2} \quad (8)$$

式中 $x = 2\pi r / \lambda$, $\rho = 2x(n-1)$, $\text{tg} \beta = n' / (n-1)$, n 和 n' 是气溶胶粒子的折射率实部和虚部, 它由组成气溶胶粒子的各组分的复折射率共同决定^[11], 并受大气湿度的影响^[12], 在我们的分析计算中, n 和 n' 按陆地气溶胶模型取自文献 [10].

(7)、(8)两式是 Mic 理论在 $\rho \leq 5(n-1)$ 时的近似解, 当不满足上述条件时, 须作如下修正^[12],

当 $5(n-1) < \rho \leq 4.08$ 时,

$$\begin{bmatrix} Q'_A(r, \lambda) \\ Q'_{ad}(r, \lambda) \end{bmatrix} = \left(1 + \frac{n-1}{n} \cdot \frac{\rho}{4.08} \right) \begin{bmatrix} Q_A(r, \lambda) \\ Q_{ad}(r, \lambda) \end{bmatrix} \quad (9)$$

当 $\rho > 4.08$ 时

$$\begin{bmatrix} Q''_A(r, \lambda) \\ Q''_{ad}(r, \lambda) \end{bmatrix} = \left(1 + \frac{n-1}{n} \cdot \frac{4.08}{\rho} \right) \begin{bmatrix} Q_A(r, \lambda) \\ Q_{ad}(r, \lambda) \end{bmatrix} \quad (10)$$

三、实验系统

实验系统包括发射和接收两部分, 光在大气中的传播距离为 350m, 距地面高度 35m, 有高低起伏的下垫面(房屋). 图 1 为系统方框图.

在发射端, 所用的 CO₂ 激光器可选出 00°1'—10°0' 和 00°1'—02°0' 振动带内的 40 条谱线, 输出光经声光调制器分束并调制成交流信号, 其中被衍射的一束光用来监测激光输出功率, 经探测器探测并由放大器放大, 再由无线电遥测发射机发往接收端, 经 A/D 转换器转化为数字信号输入计算机.

另一束光用于传播, 通过大气后, 被光学天线汇聚到热释电探测器上转化为电信号, 然后经放大器放大, 由 A/D

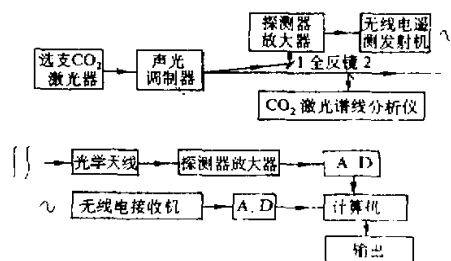


图1 实验系统方框图

转换器转化为数字信号输入计算机, 两路信号经计算处理, 实时获得激光的衰减情况. 全反射镜 2 可以旋转, 它的功能是: 当把它置于—特定位置时, 用于传播的光束射入 CO_2 激光谱线分析仪, 这样就可监视激光谱线; 当它偏离此位置后, 光束即可正常传播.

在测量谱线衰减的同时, 我们还记录了几种气象参数, 并用十八道光学粒子计数器测量大气气溶胶粒子的谱分布 $N(r)$. 整个实验过程中, 温度为 $19^\circ\text{C} - 36^\circ\text{C}$, 相对湿度在 $40\% - 96\%$ 内变化. 气压较低且变化较小, 月末略为升高, 最低时为 $94.53 \times 10^3\text{Pa}$, 最高时为 $95.86 \times 10^3\text{Pa}$. 实验期间曾遇雨天.

四、实验结果分析

我们自 8 月初到 8 月末共测量了 CO_2 激光辐射 $00^\circ 1 - 10^\circ 0$ 和 $00^\circ 1 - 02^\circ 0$ 振动带中 P 支和 R 支四组约 40 条谱线的衰减. 图 2 至图 5 分别是这四组谱线衰减系数的典型数据的图示. 实验期间, 前三组谱线的衰减各自的相互关系稳定, 而第四组有不规则的变化.

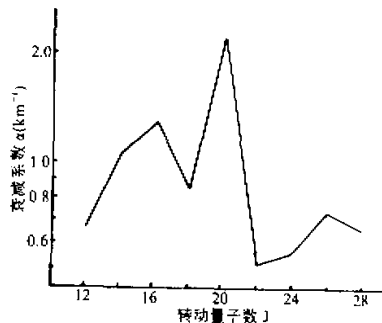
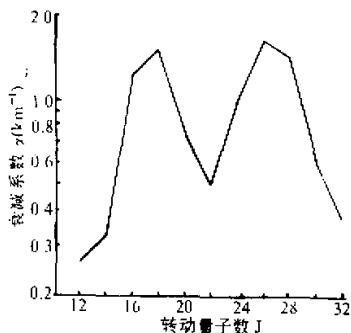


图 2 $00^\circ 1 - 10^\circ 0$ 带 P 支谱线的典型衰减系数 图 3 $00^\circ 1 - 10^\circ 0$ 带 R 支谱线的典型衰减系数

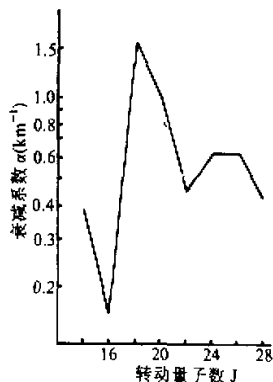
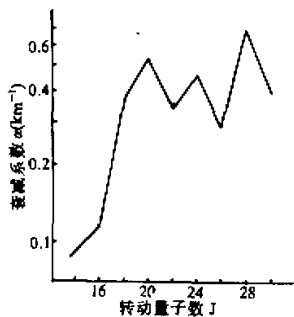


图 4 $00^\circ 1 - 02^\circ 0$ 带 P 支谱线的典型衰减系数 图 5 $00^\circ 1 - 02^\circ 0$ 带 R 支谱线的典型衰减系数

从测定的衰减系数(见图 2 至图 5)可知,谱线衰减具有下述特征: 00 °1 — 10 °0 带中, $P(22)$ 在其附近的谱线中衰减为最小, 而 $P(18)$ 和 $P(26)$ 的衰减达到极大; 在此带中, $R(20)$ 具有远大于其它谱线的衰减, 这与文献 [2] 和 [6] 中的结论一致. 在 00 °1 — 02 °0 带中, $P(28)$ 的衰减在其 P 支中为最大; 此带的 R 支中, 由于各谱线衰减的相互关系不稳定, 没有明显的特征, 其原因有待进一步分析.

排除雨天情况, 平均一般天气情况下各谱线的衰减系数, 可得 1986 年 8 月成都地区 CO₂ 激光辐射谱线的大气衰减平均值, 列于表 1.

表 1 CO₂ 激光辐射谱线的平均衰减值(成都, 1986 年 8 月)

谱 线	00 °1 — 02 °0		00 °1 — 10 °0	
	$\lambda (\mu\text{m})$	$\alpha (\text{km}^{-1})$	$\lambda (\mu\text{m})$	$\alpha (\text{km}^{-1})$
R (28)	9.229	0.73	10.195	0.70
R (26)	9.239	0.82	10.207	0.80
R (24)	9.250	1.10	10.220	0.59
R (22)	9.260	0.88	10.233	0.58
R (20)	9.271	1.07	10.247	2.32
R (18)	9.282	1.04	10.260	0.72
R (16)	9.293	0.32	10.275	1.05
R (14)	9.305	0.39	10.298	0.96
R (12)	9.317	0.15	10.304	0.62
P (12)	9.448		10.513	0.20
P (14)	9.504	0.16	10.532	0.41
P (16)	9.519	0.22	10.551	1.00
P (18)	9.536	0.30	10.571	1.18
P (20)	9.552	0.70	10.591	0.92
P (22)	9.569	0.66	10.611	0.56
P (24)	9.586	0.70	10.632	0.65
P (26)	9.603	0.53	10.653	1.20
P (28)	9.621	0.87	10.675	1.05
P (30)	9.639	0.46	10.696	0.54
P (32)	9.657		10.719	0.42

利用实验过程中同时记录的气象参数和气溶胶粒子谱 $N(r)$, 按前述的公式计算了各种消光因素对 00 °1 — 10 °0 振动带 $P(20)$ 谱线衰减, 并与实验结果作了比较.

表 2 列出了 $00^{\circ}1 - 10^{\circ}0$ 带 $P(20)$ 支线十五组数据中符合较好的九组数据, 其它数据符合较差的原因主要是高湿度条件下粒子的折射率指数的不准确造成, 有关气溶胶粒子的消光特性的全面分析正在进行中。

测量过程中, 由于各谱线组两端的谱线功率较低, 其测量误差较其它稍大, 整个实验数据最大相对误差不大于 18%, 对大于 1.0km^{-1} 的衰减值, 误差小于 8%。

表 2 $00^{\circ}1 - 10^{\circ}0$ 带 $P(20)$ 的衰减系数的测量值与分析计算值的比较

组 次	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$T(^{\circ}\text{C})$	32	32	31.5	31	32	27	32	25.5	31.5
$P(\text{Pa})$	9.46×10^4	9.46×10^4	9.47×10^4	9.49×10^4	9.50×10^4	9.50×10^4	9.46×10^4	9.50×10^4	9.50×10^4
$R \cdot H, (\%)$	55	59	58	80	59	78	59	85	60
α_{CO_2}	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.09	0.08	0.09
$\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$	0.38	0.43	0.39	0.68	0.43	0.42	0.43	0.42	0.42
α_A	0.17	0.24	0.24	0.24	0.29	0.72	0.39	0.36	0.30
$\alpha_{\text{分析}}$	0.64	0.76	0.72	1.01	0.81	1.22	0.91	0.86	0.81
$\alpha_{\text{测量}}$	0.62	0.75	0.80	1.08	0.87	1.36	0.95	0.84	0.79
η^*	3.2%	1.3%	10.0%	6.5%	6.9%	10.3%	4.2%	2.4%	2.5%

$$* \alpha_{\text{分析}} = \alpha_{\text{CO}_2} + \alpha_{\text{H}_2\text{O}} + \alpha_A (\text{km}^{-1}), \quad \eta = |\alpha_{\text{分析}} - \alpha_{\text{测量}}| / \alpha_{\text{测量}}$$

五、结 论

CO_2 激光辐射谱线的大气衰减主要来自分子吸收与气溶胶粒子的吸收与散射, 分子吸收包括 CO_2 、水蒸汽的峰值谱线吸收和水蒸汽的连续吸收, 四川盆地的高相对湿度、八月份的高温度决定了水蒸汽的吸收和气溶胶粒子的衰减, 在 CO_2 激光辐射谱线的大气衰减中占主导地位, 水蒸汽的连续吸收、气溶胶粒子的消光随波长的变化缓慢变化, 而水蒸汽、二氧化碳的吸收峰和分立谱线吸收决定了谱线间衰减的相对差异, 温度、湿度、气溶胶粒子谱分布的变化决定了衰减在不同时刻的变化。

$00^{\circ}1 - 10^{\circ}0$ 带的 $P(22)$ 在其附近的谱线中衰减为最小, 它比 $P(20)$ 平均小 0.4km^{-1} , 因此, 用它作为 CO_2 激光大气通讯的光源为宜, $00^{\circ}1 - 10^{\circ}0$ 带的 $R(20)$ 和 $00^{\circ}1 - 02^{\circ}0$ 带的 $P(28)$ 的衰减较其附近的谱线大得多, 由于它们位于水蒸汽的吸收峰, 因此, 可作为水蒸汽及有关的差分吸收激光雷达系统的光源, 其它数据可为 CO_2 激光的大气应用, 确定 $9 - 11\mu\text{m}$ 范围内的大气衰减提供参考。

本课题得到中国科学院基金 [(82) 技准字 364 号] 的资助。

参 考 文 献

- [1] Tuer, T. W., J. Mudar, J. R. Freeding and G. H. Lindquist, 1980. Atmospheric effects on low-power laser beam propagation. Final report SAM-TR-80-51 under contract F33615-78-C-0627. AD-A095383 (NTIS).
- [2] Hanley, S. T., J. A. Dowling, R. F. Horton, et al., 1980. Atmosphere transmission measurement at White Sands Missile Range. NRL report 8422, AD-A092445.
- [3] Penndorf, R., 1957. Table of refractive index for standard air and the Rayleigh scattering coefficient for the spectral region between 0.2 and 20 μm and their application to atmospheric optics. *J. Opt. Soc. Amer.*, **47**, 176—183.
- [4] Kneizys, F. X., S. A. Clough and E. P. Shettle, 1983. Atmospheric attenuation of laser radiation. In: *Proceedings of SPIE*, Vol. 410, *Laser beam propagation in the atmosphere* (J. C. Leader Ed.), 13—20. SPIE, Washington.
- [5] Hohn, D. H., W. Steffens and A. Kohnle, 1985. Atmospheric IR propagation *Infrared Phys.*, **25**, No. 1/2, 445—456.
- [6] Shumate, M. S., R. T. Menzies, J. S. Margolis and L. G. Rosengren, 1976. Water vapor absorption of carbon dioxide laser radiation, *Appl. Opt.*, **15**, No. 10, 2480—2488.
- [7] Duley, W. W., 1983. *Laser processing and analysis of materials*, Plenum Press, New York, 366pp.
- [8] McCoy, J. H., D. B. Rensch and R. K. Long, 1969. Water vapor continuum absorption of carbon dioxide laser radiation near 10 μ , *Appl. Opt.*, **8**, No. 7, 1471—1478.
- [9] Jessen, W., 1976. Variations in absolute humidity as influencing atmospheric infrared transmission. *Infrared Phys.*, **16**, No. 5, 561—567.
- [10] Chu, T. S. and D. C. Hogg, 1968. Effects of precipitation on propagation at 0.63, 3.5, and 10.6 microns, *Bell Syst. Tech. J.*, **47**, 724—759.
- [11] Fitzgerald, J. W., 1984. Effect of relative humidity on the aerosol backscattering coefficient at 0.6943- and 10.6 μm wavelengths, *Appl. Opt.*, **23**, No. 3, 411—418.
- [12] Hodges, J. A., 1972. Aerosol extinction contribution to atmospheric attenuation in infrared wavelengths. *Appl. Opt.*, **11**, No. 10, 2304—2310.