

转板式单重态氧发生器的实验研究*

李富岭 刘万发 陈 方 李 彬 陈文武 宋雪琴 吴树源
吕国胜 邵明君 杨柏龄 庄 琦

(中科院大连化学物理研究所, 大连 116023)

摘 要 实验研究了转板式 $O_2(^1\Delta)$ 发生器 Cl_2 利用率, $O_2(^1\Delta)$ 产率依赖于其他工作参数变化的规律, 并进行了综合分析, 给出了发生器中 Cl_2 的最佳工作分压约为 $2.13kPa$ 。

关键词 化学氧碘激光器 转板式 $O_2(^1\Delta)$ 发生器

ABSTRACT In this paper, the relationships of utilization of Cl_2 and $O_2(^1\Delta)$ yield versus SOG total working pressure are studied experimentally. Simple theoretical analysis indicates that the optimum Cl_2 partial pressure is about $2.13kPa$

KEY WORDS COIL, rotating disk SOG

0 引 言

化学氧碘激光器进行超音速运转的关键在于研制可高压工作的单重态氧发生器(简称SOG), 高压工作的SOG意味着在相对比较高的发生器工作压力下保持高的 $O_2(^1\Delta)$ 产率(包括 $O_2(^1\Delta)$ 分压, $O_2(^1\Delta)$ 百分含量)和高的氯利用率。

设计可高压工作的SOG, 首先要了解控制氯利用率和SOG产率的因素。具体的研究表明 Cl_2 利用率主要由发生器总的反应表面积控制, 大的反应表面积对氯的吸收有利。而 $O_2(^1\Delta)$ 在发生器中的脱活过程主要由 $O_2(^1\Delta)$ 的自脱活过程所控制, 其压力效应很显著, 即在高压下, 其脱活过程进行很快。要保持高的 $O_2(^1\Delta)$ 产率, 就要求 $O_2(^1\Delta)$ 在发生器中停留的时间越短越好, 即希望SOG气体通道体积越小越好。兼顾氯的高吸收效率和 $O_2(^1\Delta)$ 高产率, 要求发生器的设计既要保证相对大的反应表面积, 又要保证尽量小的发生器体积, 二者综合作用的结果表明: 设计高效高压发生器的关键是提高发生器的比表面积, 其定义为发生器单位体积内的反应截面。

到目前为止, 最实用的可高压工作的高效SOG是转板式 $O_2(^1\Delta)$ 发生器^[2], 其主要结构和反应过程是在一定长度的腔体内平行排列着一定数量、一定间距、可旋转的不锈钢圆板, 腔体下部盛有碱性过氧化氢溶液(简称BHP), 随着转板的转动, Cl_2 通过转板间隙与附着在转板表面的BHP液膜发生反应, 生成 $O_2(^1\Delta)$ 。

本文主要实验研究了转板发生器 Cl_2 利用率, $O_2(^1\Delta)$ 产率依赖于发生器工作压力变化规律, 并进行了综合分析, 给出了发生器中 Cl_2 的最佳工作分压约为 $2.13kPa$ 。

1 SOG 参数测试系统

气流中残余 Cl_2 含量以及 $O_2(^1\Delta)$ 产率在发生器出口的测量池中进行测量。

残余 Cl_2 分压测量主要采用 Cl_2 在氙灯325nm处的吸收光谱测量^[3]。我们改进了原有的测

* 国家863激光技术领域资助课题。
1996年7月30日收到原稿, 1997年4月11日收到修改稿。
李富岭, 男, 1963年出生, 副研究员。

试技术^[3], 依据 CO L 的结构特性, 设计建立了与 CO L 一体化的残余 Cl₂ 测量仪(以下称在线测试仪), 其性能和结构特点将在另文中讨论。O₂(¹Δ) 分压是用量热法^[4]标定的本征 Ge 探测器通过测量来自 O₂(¹Δ) 1270nm 的辐射信号进行测量的。

Cl₂ 利用率和 O₂(¹Δ) 百分含量分别定义如下:

$$U_{Cl_2} = 1 - [(N + 1)p_r/p_g] \quad (1)$$

$$\eta = p_\Delta/[p_g/(N + 1) - p_r] \quad (2)$$

其中 U_{Cl_2} , η 分别为 Cl₂ 利用率和 O₂(¹Δ) 百分含量, p_g 为 SOG 总压, N 为氦氯摩尔流量比, p_r 为残余氯分压, p_Δ 为测试池中 O₂(¹Δ) 分压。

我们在小流量下对两次不同时间进行的实验结果进行了比较, 结果如表 1 所示。实验结果表明测试系统的重复性是好的。同时, 我们在 $m_{Cl_2} = 450 \text{ mmol/s}$ 和发生器工作压力为 4.0 kPa, 6.7 kPa 的条件下, 测量得到 Cl₂ 利用率分别为 87%、94%。

表 1 实验结果

Tab 1 The Experimental Results

No.	p_g/kPa	$p_\Delta/\text{a u}$	p_r/kPa	$U_{Cl_2}/\%$
9600506	4.0	11.8	0.45	87.0
	4.0	11.2	0.45	87.0
	4.0	10.6	0.45	87.0
9600508	4.0	10.6	0.45	87.7

当 Cl₂ 流量相对较小时, BHP 中 O₂H⁻ 离子的消耗可以忽略, 此时, Cl₂ 利用率可以表示为:

$$U_{Cl_2} = 1 - \exp(-\beta\sigma\tau) \quad (3)$$

式中 σ 为发生器的比表面积, β 为发生器的表面反应速率, 当 O₂H⁻ 离子的消耗可以忽略时为一常数, τ 为 Cl₂ 在发生器中停留时间。当 Cl₂ 摩尔流量不变时, 由标准气态方程可知, 下式成立:

$$\tau = p_g \quad (4)$$

因此, 对发生器工作压力分别为 4.0 kPa, 6.7 kPa 两种情况, Cl₂ 利用率之间的关系可以表示为

$$p_g/p_g' = \ln(1 - U_{Cl_2})/\ln(1 - U_{Cl_2}') \quad (5)$$

式中, U_{Cl_2} 对应于 $p_g = 4.0 \text{ kPa}$ 时的 Cl₂ 利用率, U_{Cl_2}' 对应于 $p_g = 6.7 \text{ kPa}$ 时的 Cl₂ 利用率, 将 U_{Cl_2}' 的实测值代入(5)式中经计算得到, $p_g = 4.0 \text{ kPa}$ 时 Cl₂ 利用率 U_{Cl_2} 约为 83%, 计算值同实测值基本一致。结果表明, 我们所采用的改进的残余氯在线测试仪是可信的。

2 转板式 SOG 的实验研究

本文, 我们主要研究了转板式 SOG 在额定 Cl₂ 流量和未加载气的情况下, U_{Cl_2} 以及 O₂(¹Δ) 产率依赖于发生器工作压力 p_g 的关系。

图 1 为 Cl₂ 的利用率依赖于发生器工作压力的变化。实验结果表明, Cl₂ 利用率随发生器工作压力的提高而提高, 其主要原因在于 Cl₂ 在发生器中的停留时间随发生器工作压力的提高而延长, 增强了 Cl₂ 的吸收过程。图 2, 3 为 O₂(¹Δ) 分压以及百分含量依赖于发生器工作压力的变化规律, 可以看出 O₂(¹Δ) 分压依赖于发生器工作压力存在最大值。这一现象表明, 影响 O₂

(¹Δ) 摩尔浓度有二个因素: 1) 当压力提高时, O₂(¹Δ) 的摩尔浓度有增大的趋势; 2) 同时, 由于压力的提高, 导致 O₂(¹Δ) 碰撞脱活过程的加剧, 又使 O₂(¹Δ) 摩尔浓度朝减小的方向发展。二者综合作用的结果, 导致 O₂(¹Δ) 摩尔浓度与发生器工作压力之间存在一最佳关系。这一问题我们已在文献[5]中给出了理论上的阐述。同时, 随着发生器工作压力的提高, O₂(¹Δ) 的脱活过程加剧, 因此, O₂(¹Δ) 产率的百分含量将下降。转板发生器典型的实验结果可参见文献[2]。

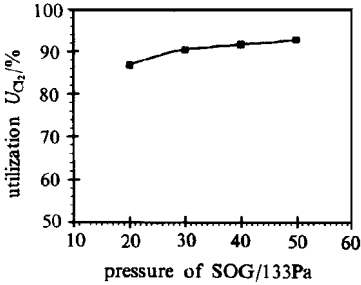


Fig 1 The relationship of Cl₂ utilization with the pressure of SOG

图 1 氯气利用率与激发态氧发生器工作压力的关系

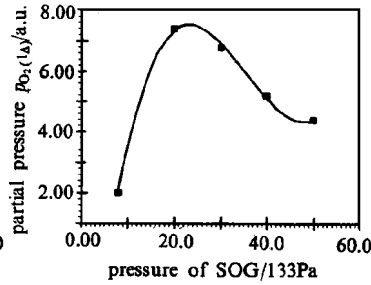


Fig 2 The relationship of partial pressure of singlet oxygen with the pressure of SOG

图 2 激发态氧分压与激发态氧发生器工作压力的关系

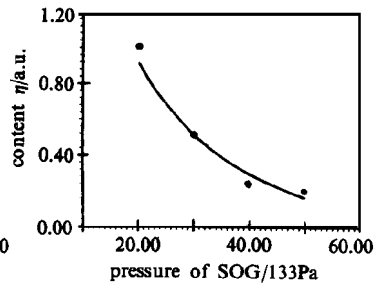


Fig 3 The relationship of content of singlet oxygen with the pressure of SOG

图 3 激发态氧百分含量与激发态氧发生器工作压力的关系

3 SOG 最佳工作压力的确定

在 CO L 中, O₂(¹Δ) 作为储能体, 储存在 O₂(¹Δ) 中可以用来作为激光输出的体积比能量可以表示为:

$$\epsilon = h\nu_a p_{O_2} (\eta - \eta_h) / RT \tag{7}$$

其中, $h\nu = 1.51 \times 10^{19} \text{J}$ 为 $1.315 \mu\text{m}$ 光子的能量, p_{O_2} 为氧的总压力, N_a 为 Avogadro 常数, η_h 为满足碘原子反转所需要的 O₂(¹Δ) 的百分含量阈值, 理论上^[6]:

$$\eta_h = [1 + 1.484 \exp(400/T)]^{-1} \tag{8}$$

对式(7)的进一步研究表明^[6], CO L 存在一最佳工作压力 p_{opt} , 其满足:

$$(1 - \alpha p_{opt} \tau) \exp(-\alpha p_{opt} \tau) - \eta_h / \eta_0 = 0 \tag{9}$$

η_0 为发生器 O₂(¹Δ) 的百分含量。令 $x = \alpha p_{opt} \tau$, 则式(9)变为:

$$(1 - x) \exp(-x) - \eta_h / \eta_0 = 0 \tag{10}$$

进一步研究^[6]表明, p_{opt} 与 O₂(¹Δ) 分压取最大值时所对应的系统压力 p_M 之间存在以下关系:

$$p_{opt} = x p_M \tag{11}$$

因此, 如果通过实验测量 O₂(¹Δ) 分压随总压的变化规律, 可以确定 O₂(¹Δ) 分压的最大值所对应的系统总压 p_M , 进而由关系式(11)确定系统的最佳工作压力。

依据以上的讨论以及前述的实验结果, 我们初步估计了发生器的最佳工作压力。由实验结果(如图 2 所示)可知, 在总压为 2.7kPa 时, O₂(¹Δ) 的分压取最大值, 即 $p_M = 2.7 \text{kPa}$ 。另依据实际的工作条件^[2], 按照关系式(10), 我们计算得到, $x \approx 0.8$, 进而求得发生器 Cl₂ 的最佳工作压力约为 2.13kPa。由于实际操作的 CO L, 其氮氯比约为 4 : 1, 而氮气对 O₂(¹Δ) 产量以及 Cl₂

利用率的影响不大^[7], 因此, 我们估计目前这种结构参数的转板式 SOG 的最佳工作压力约为 11kPa 左右, 这一结果同美国的实验条件基本一致^[8]。

参考文献

- 1 Harpole GM et al A IAA paper 92-3005, presented at the 23rd Plasma Dynamics and Lasers Conference, 1992
- 2 陈方, 宋雪琴等 强激光与粒子束, 1997, 9(1): 17~ 22
- 3 张允禄等 应用激光, 1995, 15(5): 222
- 4 宋雪琴等 分析仪器, 1987, (4)
- 5 李富岭 强激光与粒子束, 1994, 6(1): 125
- 6 李富岭 量子电子学, 1990, 7(2): 152
- 7 Kwirandt G R et al SPIE, 1995, 2502: 331
- 8 Truesdell K A et al 25th A IAA Plasma Dynamics and Lasers Conference, 1994

EXPERIMENTAL STUDY OF ROTATING DISK TYPE SOG AND DETERMINATION OF OPTIMUM WORKING PRESSURE

Li Fuling, Liu Wanfa, Chen Fang, Li Bin, Chen Wenwu, Song Xueqin, Wu Shuyuan,
Lü Guosheng, Shao Mingjun, Yang Bailing, Zhuang Qi
Dalian Institute of Chemical Physics, Academia Sinica, Dalian 116023

Chemical Oxygen Iodine Laser (COIL) is developed in recent years. Out of its very special characters, such as short wavelength, high operating efficiency, high output power, COIL is promising candidate for industrial application.

The key point for supersonic COIL is to manufacture a singlet oxygen generator (SOG) operating in high pressure range with high Cl_2 utilization and high $\text{O}_2(^1\Delta)$ yield.

Rotating disk generator just satisfies this demand. It is necessary to determine the optimum operation condition.

In this paper, we studied experimentally the relationship of Cl_2 utilization and $\text{O}_2(^1\Delta)$ yield versus other working condition, such as disk rotating rate, total working pressure. By simple theoretical analysis, we obtained that the optimum Cl_2 partial pressure is about 2.13kPa.