

气动激光窗口真空密封原理及其分子互扩散方程*

程祖海 岳超瑜 李再光
(华中理工大学激光所, 武汉)

提要: 本文阐述了节流抽气式气动激光窗口 (TEALW) 的真空密封原理, 推导出了分子互扩散方程。依据此方程对 CO_2 激光器工作气体 He、 N_2 、 CO_2 、 O_2 的互扩散速率进行了计算, 所得曲线与实验数据能很好地吻合。

关键词: 气动激光窗口, CO_2 , 喷嘴

Air-sealing mechanism and the molecular interdiffusion equations of an aerodynamic laser window

Cheng Zuhai, Yue Chaoyu, Li Zaiquang

(Laser Institute, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan)

Abstract: Air-sealing mechanism are described and the molecular interdiffusion equations are derived in a throttle-exhausting aerodynamic laser window (TEALW). The diffusion rate of He, N_2 , CO_2 and O_2 in the active medium of the CO_2 laser used with TEALW were computed by of the equations. The theoretical curves computed are in good agreement with the experimental data.

Key words: CO_2 laser, aerodynamic window, vacuum sealing, interdiffusion rate

随着激光工业应用对 CO_2 激光器提出的高输出功率和高光束质量的要求, 激光输出窗口日益成为人们极为关注的技术关键之一。激光输出窗口承担着透过高功率激光束和实现真空密封两大任务, 因此必须具备真空密封性能好、通过激光功率高、安全使用寿命长和输出光束畸变小等特点。常用的晶体透射窗口, 虽然其真空密封性能很容易满足要求, 但晶体本身的热破坏阈值和热透镜效应, 限制了使用寿命和光束质量。本文报告的双腔节流抽气式气动激光窗口 (TEALW), 既有效避免了晶体激光窗口的不足, 又最大限度地克服了已有气动激光窗口真空密封性能不好的缺陷, 使之能在不向激光器内补充激光工作气体的前提下, 保证全封闭型 CO_2 激光器长期稳定的运行。

一、TEALW 的基本结构及其真空密封原理

如图 1 所示, TEALW 主要由相向流动的两个超音速喷嘴及抽气腔、调压腔和调压阀等

组成^[1]。

气动激光窗口工作时,环境大气一路经主喷嘴 1,另一路经调压阀 6 和节流喷嘴 3 进入抽

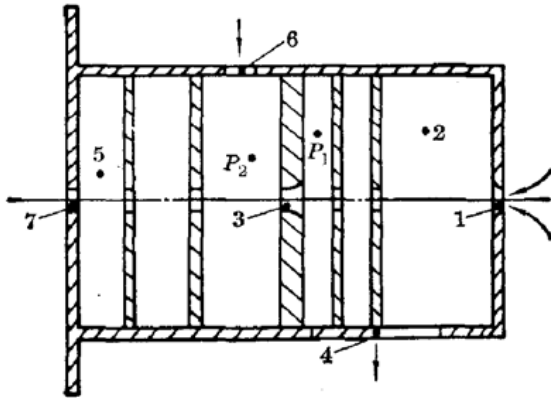


图 1 TEALW 结构示意图

1—主喷嘴; 2—抽气腔; 3—节流喷嘴; 4—抽气管;
5—调压腔; 6—调压阀; 7—密封交界面

气腔 2, 然后经排气管 4 被真空泵抽走。考查真空泵一个周期内的抽气微观过程可知, 真空泵的瞬时抽速具有周期脉动的特性, 因而导致抽气腔 2 内的气体静压也随之发生同频率的波动。这种压力波动的后果, 将可能破坏密封交界面 7 两边的压力平衡状态, 使气动窗口中的工作气体(一般为空气)漏入激光器腔内, 污染激光激活媒质。为了阻止这种因交界面两边压差的周期波动对激光工作气体的污染, 一般国外使用的气动激光窗口^[2], 采用向激光器内不断补充昂贵的激光工作气体, 使之定向地从激光器内向外流动, 以阻止外

界大气的侵入, 因而实际运行成本很高。我们依据气体动力学的上游禁讯原理, 在抽气腔与调压腔之间设置了一个与主喷嘴 1 相向流动的超音速喷嘴 3。喷嘴 3 的作用, 一则是阻止和减缓经主喷嘴 1 出射的高速气流直接冲入调压腔 5 内, 更主要是利用工作于超临界压比的超音速喷嘴下游的压力波动不可能越过音速面而逆流传播到喷嘴上游的上游禁讯原理, 隔离抽气腔 2 内因真空泵抽速波动引起的气流静压波动对喷嘴 3 上游的扰动, 以保持调压腔 5 内的压力稳定。改变调压阀 6 的辅助进气流量, 可以很方便地在较宽范围内调节调压腔 5 内的压力大小, 使之能与激光器内的压力精确平衡, 避免了环境大气漏入激光器内, 起到了晶体窗口所起的真空密封作用。所不同的是, TEALW 是依靠气体动力学原理, 在密封交界面 7 两边造成一种气体压力平衡状态, 在激光束的输出通道上并不存在任何固态物质, 因而完全根除了晶体窗口在通过高功率激光束时的炸裂和热变形现象, 使激光输出窗口的安全使用寿命和输出光束质量得到了根本的改善^[3]。

二、TEALW 中的分子微观过程

根据气体分子运动论, 气体的迁移方式主要有三种: 一是因气体压强分布不均匀引起的整体流动, 二是因气体温度分布不均匀产生的热传导过程, 三是因气体种类和浓度分布不均匀产生的分子互扩散运动。在 TEALW 中, 由于节流原理的成功使用, 完全消除了抽气腔超音速气流对激光器内混合气体的扰动影响, 在调压腔与激光器内的压力和温度保持平衡的条件下, 激光器内的气体成分变化, 完全由 TEALW 与激光器腔体交界面上的气体互扩散作用所决定。

由两种不同气体的互扩散过程可知, 单位时间内由内向外经过垂直于扩散面 A 的第一种气体分子数为

$$\uparrow dN'_1 = \frac{1}{3} \bar{c}_1 \lambda_1 \left(\frac{dn_1}{dz} \right) \cdot A = \frac{1}{3} \bar{c}_1 \lambda_1 N_0 \left(\frac{d\gamma_1}{dz} \right) \cdot A \quad (1)$$

同样, 单位时间内由外向内经过垂直于扩散面 A 的第二种气体分子数为

$$\downarrow dN'_2 = \frac{1}{3} \bar{c}_2 \lambda_2 N_0 \left(\frac{d\gamma_2}{dz} \right) \cdot A \quad (2)$$

式中, \bar{c}_1 、 \bar{c}_2 为第一、第二种气体分子的平均速度; N_0 为阿佛加德罗常数; γ_1 、 γ_2 为单位体积内所含第一、第二种气体的克分子数; z 为扩散长度; λ_1 、 λ_2 为第一、第二种气体分子的平均自由程, 且

$$\lambda_1 = \frac{1}{\pi \left[\sqrt{2} \sigma_1^2 \cdot \gamma_1 + \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right)^2 \cdot \gamma_2 \cdot \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1}} \right] \cdot N_0} \quad (3)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{\pi \left[\sqrt{2} \sigma_2^2 \cdot \gamma_2 + \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right)^2 \cdot \gamma_1 \cdot \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_2}} \right] \cdot N_0} \quad (4)$$

式中, σ_1 、 σ_2 为第一、第二种分子的平均直径; m_1 、 m_2 为第一、第二种分子的质量。

由于气体种类不同, \bar{c} 和 λ 也不相同, 因此在两种气体的扩散中, $\uparrow dN'_1 \neq \downarrow dN'_2$, 这将导致扩散面上存在有气体分子的单方向移动。这种单向移动的结果, 破坏了在扩散过程中扩散面两边的压力相等的条件, 为此, 在上述分子移动的过程中, 还必须伴随有气体分子的整体流动来抵消这种单方向移动:

$$dN = \frac{1}{3} N_0 \left(\frac{d\gamma_2}{dz} \right) \cdot (\bar{c}_2 \lambda_2 - \bar{c}_1 \lambda_1) \cdot A \quad (\gamma_2 > \gamma_1) \quad (5)$$

由于第一种和第二种气体分子的相对密度为 $\frac{\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2}$ 和 $\frac{\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2}$, 所以参加这个整体流动的第一种和第二种分子数目为

$$\uparrow dN''_1 = \frac{1}{3} N_0 \left(\frac{d\gamma_2}{dz} \right) (\bar{c}_2 \lambda_2 - \bar{c}_1 \lambda_1) \cdot \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2} \cdot A \quad (6)$$

$$\downarrow dN''_2 = \frac{1}{3} N_0 \left(\frac{d\gamma_2}{dz} \right) (\bar{c}_2 \lambda_2 - \bar{c}_1 \lambda_1) \cdot \frac{\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} \cdot A \quad (7)$$

因此, 单位时间内经过扩散面 A 分别向外、向内扩散的第一、第二种分子总数为

$$\uparrow dN_1 = \uparrow dN'_1 + \uparrow dN''_1 = \frac{1}{3} N_0 \left(\frac{d\gamma_1}{dz} \right) \left(\bar{c}_2 \lambda_2 \cdot \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2} + \bar{c}_1 \lambda_1 \cdot \frac{\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} \right) \cdot A \quad (8)$$

$$\downarrow dN_2 = \downarrow dN'_2 + \downarrow dN''_2 = \frac{1}{3} N_0 \left(\frac{d\gamma_2}{dz} \right) \left(\bar{c}_2 \lambda_2 \cdot \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2} + \bar{c}_1 \lambda_1 \cdot \frac{\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} \right) \cdot A \quad (9)$$

对于由 CO_2 、 N_2 和 He 组成的激光工作气体与由 N_2 和 O_2 组成的空气之间的分子互扩散过程, 我们可以依据上述两种不同气体分子的互扩散方程(8)、(9), 分别求出它们之间两两互扩散的扩散速率, 然后再叠加求得它们总的扩散速率。即

$$\uparrow dN_{\text{CO}_2} = \uparrow dN_{\text{CO}_2-\text{O}_2} + \uparrow dN_{\text{CO}_2-\text{N}_2} \quad (10)$$

$$\uparrow dN_{\text{He}} = \uparrow dN_{\text{He}-\text{O}_2} + \uparrow dN_{\text{He}-\text{N}_2} \quad (11)$$

$$\downarrow dN_{\text{O}_2} = \downarrow dN_{\text{O}_2-\text{CO}_2} + \downarrow dN_{\text{O}_2-\text{He}} + \downarrow dN_{\text{O}_2-\text{N}_2} \quad (12)$$

$$\downarrow dN_{\text{N}_2} = \downarrow dN_{\text{N}_2-\text{CO}_2} + \downarrow dN_{\text{N}_2-\text{He}} + \downarrow dN_{\text{N}_2-\text{N}_2} \quad (13)$$

若已知扩散面两边的气体成分和压力以及扩散长度和扩散面积, 可根据方程(10)~(13)求得各种气体的成分变化速率。我们计算了气体成分为 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:7:20$, 气压为 90 Torr 的 CO_2 激光器工作气体, 对应于不同扩散长度和不同扩散面积的 TEALW, 在密封交界

面两边的气体温度为 20°C 时, 由于互扩散作用引起的气体成分变化速率如图 2 所示。图中, 扩散速率以进入激光器内为正, 反之则为负。

对于由 CO₂、N₂ 和 He 三种气体组成的 CO₂ 激光器工作气体, CO₂、N₂ 和 He 都可以通过 TEALW 向激光器外扩散, 但空气中的 N₂ 浓度远较激光器内 N₂ 的浓度大, N₂ 的互扩散总趋势是通过 TEALW 由外向激光器内扩散。我们从图 2 中可以看出, 由于 He 的扩散速率远远大于 CO₂, 与 He 的扩散速率相比较, CO₂ 的扩散速率可忽略不计。因此可以认为, 激光器内工作气体通过 TEALW 向外的总扩散速率, 在数值上可近似等于 He 向外的扩散速率。

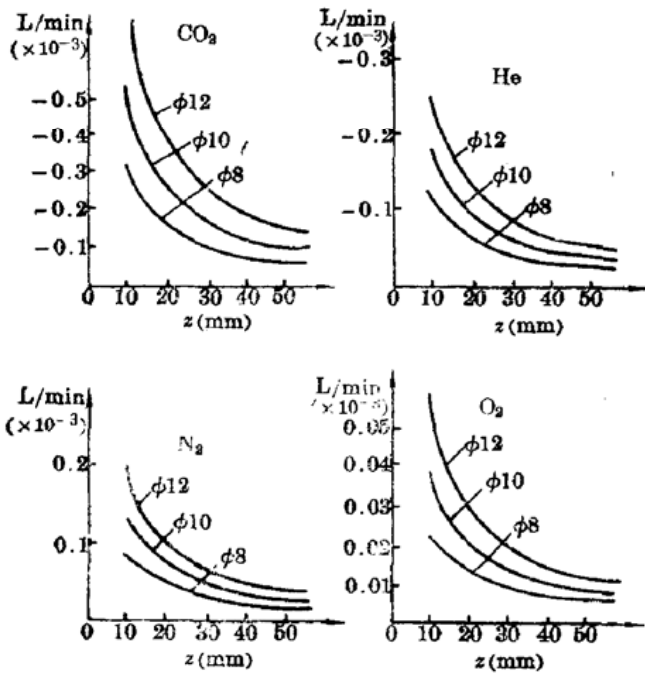


图 2 由于互扩散作用引起的气体成分变化速率理论计算曲线

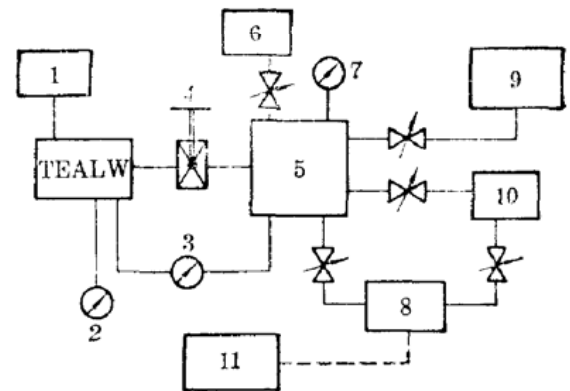


图 3 TEALW 真空泵密封性能实验装置原理图

1—真空泵; 2—真空表; 3—微压差计; 4—真空插板阀; 5—实验箱体; 6— α -真空计; 7—真空表; 8—真空取样器; 9—充气系统; 10—真空泵; 11—SP-2305 气相色谱仪

三、TEALW 互扩散作用的实验研究

为了便于与理论计算曲线进行比较, 我们利用图 3 所示的实验装置, 组装了几种不同扩散长度的实验气动激光窗口, 对 TEALW 的真空密封性能和互扩散速率进行了实验研究。

实验箱体 5 内部贮气体积为 40 L。实验开始前, 首先通过真空泵 10 将其抽至高真空, 然后通过充气系统 9 向实验箱体 5 内充入 90 Torr 的 CO₂:N₂:He=1:7:20 的 CO₂ 激光混合气体。启动真空取样器 8, 将取出的 90 Torr 激光气体, 采用特殊方法加压至 1 atm, 送入 SP-2305 气相色谱仪进行定量分析, 以确定该混合气体各组分的初始百分比含量。上述过程完成以后, 再启动 TEALW 上的抽气泵, 并调节调压阀的辅助进气流量, 使与 TEALW 和实验箱体 5 相连接的微压差计 3 处于平衡状态。开启真空插板阀 4, TEALW 便进入正常的工作状态。

当 TEALW 运行 30 分钟以后, 关闭真空插板阀 4, 停止抽气泵工作, 抽取实验箱体内的的工作气体再进行色谱定量分析。根据实验箱体的容积, TEALW 的有效工作时间和箱体内气体组分百分比含量的变化, 可求得通过 TEALW 密封交界面的各种气体互扩散速率。如前所

述, 由于实验箱体内激光工作气体向外扩散的总的扩散速率在数值上近似等于 He 向外的扩散速率, 且根据 TEALW 密封界面两边压强相等的前提, 这一扩散速率也应等于外界空气向实验箱体外的漏入速率。因此, 我们可以用 He 在 TEALW 工作过程中的百分比含量变化, 来确定 TEALW 的单向扩散总速率 α 。

$$\alpha = \frac{(n_{0\text{He}} - n_{t\text{He}}) \cdot V}{t} \quad (14)$$

式中, $n_{0\text{He}}$ ——TEALW 未工作前实验箱体中 He 的初始百分比含量; $n_{t\text{He}}$ ——TEALW 工作 t 分钟后实验箱体中 He 的百分比含量; V ——实验箱体容积, (L); t ——TEALW 有效工作时间 (min)。

表 1 是利用互扩散速率方程(10)至(13)对不同特征扩散长度, 不同扩散截面的 TEALW 单向扩散总速率的理论计算值与实验值的比较。从表 1 中我们可以看出, 利用气体分子运动论推导出的 TEALW 互扩散方程的理论计算数值与图 3 所示实验装置的实验结果能很好地一致。

表 1 TEALW 单向扩散速率的理论计算值与实验结果的比较

特征扩散长度 (mm)	He 的初始含量 (%)	30 分钟后 He 的 含量 (%)	TEALW 单向总扩散速率 (L/min)	
			理论计算值	实验值
$\phi 12 \times 14$	74	58.6	0.189	0.205
$\phi 10 \times 35$	71	66.6	0.0513	0.0587
$\phi 10 \times 47$	67.9	65	0.0382	0.0387
$\phi 9 \times 26 + \phi 11 \times 28$	70.3	67.6	0.0346	0.0360

四、TEALW 真空密封效果的实际考核

将上述特征扩散长度为 $\phi 9 \times 26 \text{ mm} + \phi 11 \times 28 \text{ mm}$ 的 TEALW 实际安装在 HGL-84 型 5k WCO₂ 激光器上进行了真空密封效果考核试验。被试验激光器具有横流电激励针板放电结构, 内部贮气体积约为 2m³, 工作气体为 90 Torr 的 CO₂:N₂:He=1:7:20 混合气体, 采用 45° 侧向输出正支共焦非稳腔将激光器箱体与本实验气动激光窗口连接为一体。气动激光窗口的最小通光孔径为 $\phi 5.5 \text{ mm}$, 配用 YZ-150 余摆线真空泵抽取气体。为了避免和消除激光器放电过程中等离子体化学反应对激光器内混合气体组成成分的附加影响, 试验是在激光器不放电的条件下进行的。在 TEALW 连续 10 小时的运转时间内, 使用 SP-2305 气相色谱仪每隔 2 小时对激光器内气体成分进行抽样分析, 所得激光器内气体成分气相色谱图如图 4 所示。

根据标气中气体组分所占成分百分比与色谱峰高的对应关系, 我们可以得到激光器不放电时, 激光器内混合气体组分的成分变化速率如图 5 所示。

从图 5 中各气体组分的成分变化速率扣除激光器本身固有的漏气因素 (实测为 3000 Torr·L/24 hr), 纯净由 TEALW 的气体互扩散作用造成的激光混合气体的平均变化速率为:

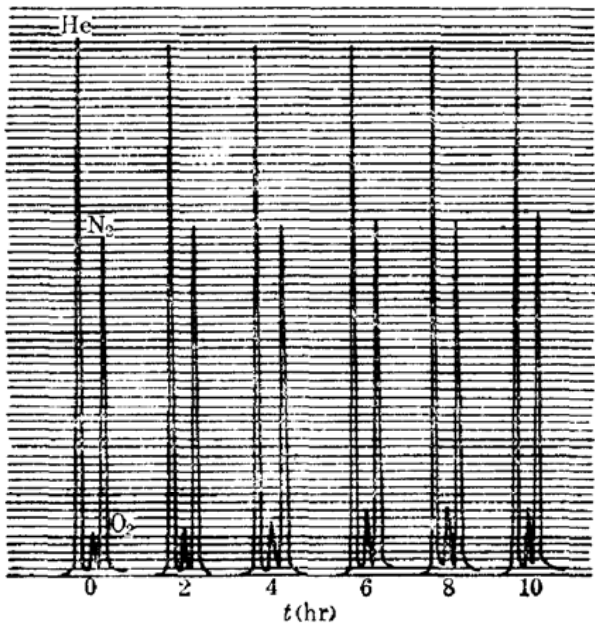


图4 每隔2小时取样的激光器工作气体气相色谱图

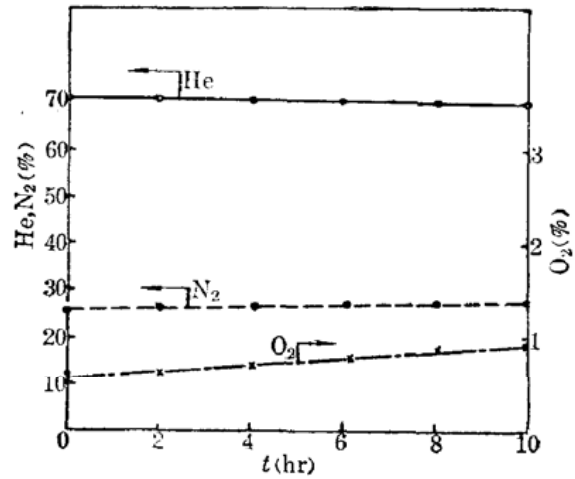


图5 激光器不放电时,使用TEALW的CO₂激光器内混合气体的成分变化速率

He的漏出速率: $5.4 \times 10^{-2} \text{ Torr} \cdot \text{L/s}$; N₂的漏入速率: $4.2 \times 10^{-2} \text{ Torr} \cdot \text{L/s}$; O₂的漏入速率: $1.1 \times 10^{-2} \text{ Torr} \cdot \text{L/s}$; CO₂的漏出速率可忽略不计。

这一实验结果表明,该气动激光窗口的实际漏气速率相当于 $5.4 \times 10^{-2} \text{ Torr} \cdot \text{L/s}$ 的固体窗口密封效果,因而完全可以适应于全封闭型CO₂激光器稳定运行。

参 考 文 献

- 1 程祖海 *et al.*, 中国专利, 85100826
- 2 E. D. Hoag *et al.*, U. S. P3851273
- 3 程祖海 *et al.*, 中国激光, 14(3), 172(1987)

更 正

本刊1989年第16卷第11期第675页上的标题应为“大功率倍频激光器打靶成功”,特此更正。

编 者