

化学氧碘激光器的诊断*

王建祥 杜祥琬

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京8009信箱, 100088)

摘 要 将化学氧碘激光器(COIL)本身的诊断分述为流场特性诊断、气流混合诊断、增益介质诊断和光腔诊断, 系统讨论了各种诊断的要求, 并分别讨论了各种诊断的基本原理及方法。

关键词 化学氧碘激光器 诊断

ABSTRACT The diagnostics of the chemical oxygen-iodine laser (COIL) device are discussed systematically. It is divided into several diagnostic subsystems such as flow diagnostic, oxygen-iodine flow mixing diagnostic, gain medium diagnostic and resonator diagnostic. The requirement of every diagnostic parameter, their measurement principles and methods, are discussed systematically, some diagnostic examples are also given respectively.

KEY WORDS chemical oxygen-iodine laser, diagnostic

化学氧碘激光器已经发展多年, 但要达到实用化的阶段, 还需要进一步优化设计, 以减小体积, 提高效率, 增大功率并获得良好的光束质量。在这个过程中, 诊断技术必不可少。

化学氧碘激光器诊断是通过测量化学碘激光器运行的表象参数, 达到了解化学氧碘激光器的运行状况, 特别是其内部的实时信息, 以便弄清产生某种表象的内因, 从而进一步优化化学氧碘激光器的设计、运行。因此, 自化学氧碘激光器诞生以来, 它的诊断技术也在并行发展着。美国的化学氧碘激光器都有专门用作诊断的部件。

80年代末, 美国还研制了一台小型的化学氧碘激光器(RADICAL COIL)专门用来进行诊断和优化参数研究^[1]。最近美国又开始特别注重诊断技术的研究, 不过, 到目前为止, 还没有公开发表的系统讨论化学氧碘激光器诊断研究工作的文章。

1 化学氧碘激光器诊断的对象

高能激光系统的诊断实际上可分为两类: 激光光束诊断和激光器诊断。前者讨论高能激光器发射出的激光束的各种性能参数(如功率、波长、光束质量等)的诊断, 这种诊断可抛开具体的激光器技术, 因此各种高能激光系统的这类诊断技术基本上是相同的。事实上, 这类诊断技术已经发展完备, 形成了一套成熟的理论^[2]。而另一类诊断, 高能激光器本身的诊断, 讨论激光器各种部件/子系统运转状况的诊断技术。它关注各个部件的工作性能及各个子系统相关过程的细节情况, 以便维护和优化激光器的运行。每种激光器的这类诊断各有特色, 需要分别考虑。当然, 只有这两种诊断综合使用, 才能达到诊断的目的。本文的讨论主要局限于化学氧碘激光器的后一种类型的诊断。

连续波超音速化学氧碘激光器的工作原理见图1。单态氧发生器中, 氯气与过氧化氢碱溶

* 国家863激光技术领域资助项目。
1997年1月20日收到原稿, 1997年6月10日收到修改稿。
王建祥, 男, 1970年7月出生, 硕士, 助理研究员

液反应产生亚稳态的 $O_2(^1\Delta)$ ，它通过水蒸汽冷阱去掉大部分的水蒸汽后，在拉伐尔喷管内与此处注入的碘分子气流相混合， $O_2(^1\Delta)$ 中的能量通过一系列碰撞传给基态碘分子而最终得到激发态的碘原子 $I(P_{1/2}^2)$ 。在光腔中激发态碘原子 $I(P_{1/2}^2)$ 受激辐射而产生激光。

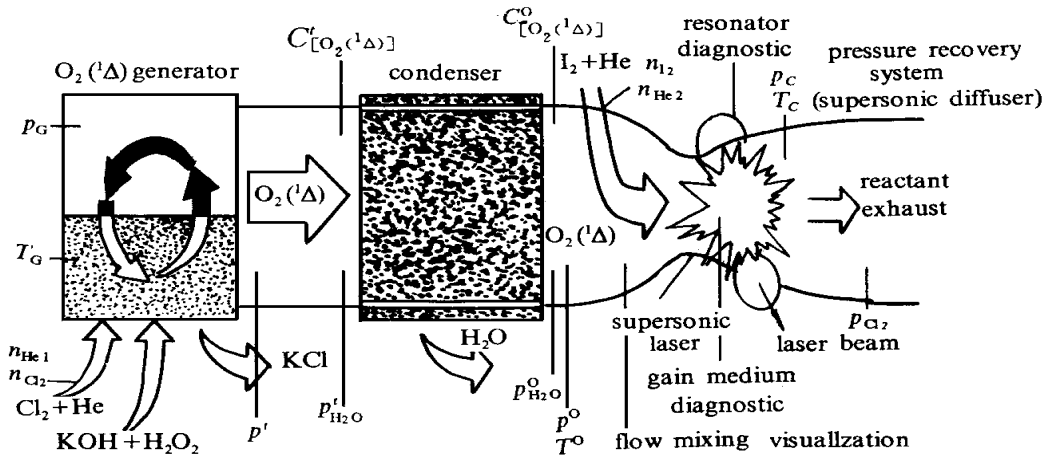


Fig 1 distribution of measured quantities

图1 超音速COIL被测量分布图

整个过程涉及的物理量繁多，但基本上分为两类：一类是系统/子系统评价参数，如系统的能量转化效率、能量提取效率与化学效率、 $O_2(^1\Delta)$ 发生器产率、冷阱效率和光学谐振腔效率等，它们是描述化学氧碘激光器的重要指标，但不能直接测量；另一类是激光器运行中的可控制操作的物理量。前者由后者决定并可通过后者表达，应从后一类物理量中挑选物理量作为诊断对象。实际上后一类物理量也并不都是相互独立的，需挑选那些较易于测量控制的作为独立量，其它物理量可通过它们表达出来。各独立量是单态氧发生器的工作温度 T_G 与压力 p_G ；主气流中，氯气罐出口处流量 n_{Cl_2} ，氦气出口处流量 n_{He_1} ；次气流入口处碘气、氦气流量 n_{I_2} ， n_{He_2} ；冷阱入口处总压 p' 、水蒸汽分压 $p_{H_2O}^0$ 及单态氧浓度 $C_{[O_2(^1\Delta)]}$ ；冷阱出口处总压 p^0 、温度 T^0 、水蒸汽分压 $p_{H_2O}^0$ 及单态氧浓度 $C_{[O_2(^1\Delta)]}$ ；光腔压力 p_C 、温度 T_C 及光腔内氯气分压 $p_{Cl_2}^0$ 。由这些独立量可以确定^[3]：冷阱入口与出口处水蒸汽流量、冷阱效率、光腔中未反应的氯气流量、单态氧发生器的产率、单态氧流率、基态氧摩尔流率、单态氧摩尔含量、总摩尔流量、化学效率和激光效率等物理量。

对各流场特性物理量的监测可基本确定激光器操作的主要特性。这种系统流场特性诊断还不能诊断涉及介质光学性质的物理量，如增益介质的小信号增益分布与气流流场折射率的不均匀分布，对它们的诊断应分开进行，称之为增益介质诊断。光腔部分是激光器中独立的部分，它的诊断也独立进行。另外氧碘气流混合技术是激光器运行的关键技术，对它要进行特别细致的诊断。由上述可以看出，激光器诊断被分成系统流场特性、氧碘气流混合、增益介质和光腔等子系统诊断。由此就可确定整个化学氧碘激光器的性能。

2 化学氧碘激光器的诊断技术

2.1 流场特性诊断

主要包括各部分温度、总压力、各输入口组份物质流量，特别是各组分物质浓度的测量。

(1) 温度、压力及流量。温度、压力及流量按图1标识分别用热电偶温度计、压电式或电容式压力传感器、自动流量计加以测量。不过, 碘分子气体的测量与控制稍微复杂一些, 这与碘分子气体的制备有关。碘分子的制备有多种方法, 一般采用碘池加热升华形成碘分子蒸气, 碘分子气体的饱和蒸气压与加热温度有一确定的关系。因此, 通过控制加热温度可控制碘分子气体的流量。按图2所示放置自动流量的控制计, 再加上微机控制的加热器, 可监控碘分子气体、氦气的流量。

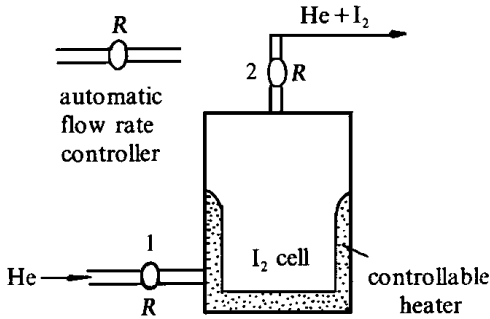


Fig 2 Controlling of flow rate of He and I₂
图2 碘池中He与I₂流量的控制

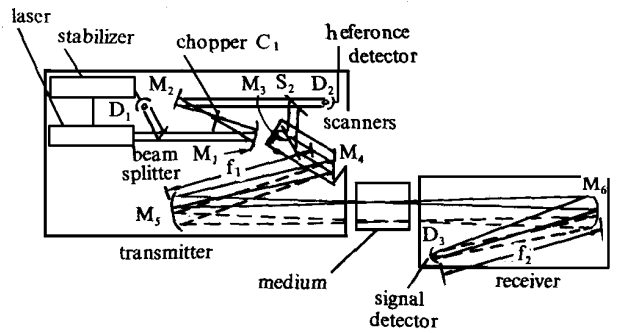


Fig 3 Example of a small gain diagnostic
图3 小信号增益诊断示意图

(2) 氯气浓度。光腔中未反应的氯气含量由紫外光吸收谱来确定。光源采用氙灯, 波长 $\lambda = 325\text{nm}$, 或者采用汞灯, 用滤波片取波长 $\lambda = 337\text{nm}$ 。这是氯气分子较强的吸收区。按照 Beer 定律^[4], $p_{\text{Cl}_2} = - (1/KL) \ln(I_a/I_0)$, 式中 L 是吸收区长度, I_0 是入射光强度, I_a 是透射光强度, K 是标定系数, 由已知的 p_{Cl_2} 来标定 K 。可采用一些措施增加吸收强度, 如增加吸收区长度 L , 或者用特殊的措施增加 I_a/I_0 的精度。

(3) 单态氧浓度。单态氧浓度的诊断也采用光谱吸收法, 一般有两种诊断方法。一种是直接测量单态氧在 $\lambda = 1.265\mu\text{m}$ 的自发辐射, 根据 Schiebe-Lomakin 公式确定浓度与吸收强度的关系^[5], $LgI = bLgC + Lga$, 其中 I 为自发辐射强度, C 为物质的浓度, b 为自吸收系数, a 为常数。不过, 待测的信号极弱, 需要极精密的测量, 给诊断带来很大困难。这种方法对 a, b 的标定误差很大。现在常采用吸收光谱法测定基态氧的浓度。由于通过测量剩余氯气的浓度而知道了总氧的尝试浓度。如果忽略其它激发态氧的浓度, 单态氧浓度可由总氧的浓度减去基态氧的浓度而得到。吸收光谱法测定基态氧的浓度仍然是依据 Beer 定律, 光源采用 AlGaAs 二极管激光器, 波长 $\lambda = 760\text{nm}$ 。由于这条谱线实际上是自旋禁戒的, 因此信号也极弱。可采用让探测光在光腔内多次反射的方法来增加吸收区长度 L , 从而增强吸收信号。目前, 还找不到更好的方法。

(4) 微量水蒸汽浓度。化学氧碘激光器诊断中另一个困难是微量水蒸汽浓度的诊断。目前较好的方法仍然是吸收光谱法。有两个波长可供选择: 一是 $\lambda = 2.6\mu\text{m}$, 为水的最强吸收波长; 二是 $\lambda = 1.39\mu\text{m}$, 水的较强的一个振动谱区。不过, 信号仍然极弱, 需采用特殊的技术。

2.2 氧碘气流混合诊断

拉伐尔喷管段氧碘混合的诊断具有特别重要的意义。因为单态氧与碘分子之间的共振传能过程非常快, 因而, 两种气流的混合过程实际上决定了增益介质激发态碘原子的产生状况。



气流混合诊断就是要把混合流场可视化, 来定性或定量观察混合过程。为使混合流场可视化, 现在最常用的方法是激光诱发荧光法(LIF)^[6], 也就是在一种组分中加入少量“种子”物质, 在混合前, 用一定波长的激光照射“种子”物质, 使其产生激发。激发态的“种子”物质会自发辐射出荧光, 探测混合过程中的荧光变化, 从而实现混合流场可视化。不过, 在氧碘气流混合流场中, 碘分子本身就是一种极好的荧光物质, 在单态氧与碘分子混合过程中, 单态氧把能量传给碘分子会形成中间产物 $I(B)$, 这个中间产物会发出在可见光波段的荧光。因此, 只需用功能强大的探测系统来捕获这些荧光, 并将这些数据送计算机处理, 就可以实时地将氧碘混合流场进行数值化成像。

2.3 增益介质诊断

增益介质的诊断主要是考察增益介质的小信号增益与气流流场不均匀性显示(折射率不均匀性)。小信号增益的测量一般直接利用小信号增益的定义, $g = (1/L) \ln(I/I_0)$, 其中, g 为小信号增益, 光强 I_0 足够小的探测光, 经过长为 L 的激活介质后, 光强为 I 。图3为用这种方法自动检测小信号增益二维空间分布^[7]的示意图。其中探测激光由小型化学氧碘激光器发射。激光通过50% 透过率的镜子分成两束。电动驱动镜面系统使探测光以适当频率和格式扫描增益介质。两个凹面镜 M_5, M_6 的作用是使光束扫描时, 光源与探测器都可固定。探测器 D_2 测量 I_0 , 探测器 D_1 测量 I , 测量数据由数据采集系统输入计算机。整个区域扫描完后, 可由计算机给出类似图4的增益分布图^[8]。

气流流场不均匀性显示的是沿激光谐振腔一光束路径积分的积分介质非共振折射率的二维空间分布。这个量描述介质不均匀所引起的光程差不均匀, 从而导致出射激光的相位不均匀, 它会严重影响激光的光束质量。

针对折射率不均匀的气流流场不均匀显示一般采用干涉测量法^[9]。该法是将一束平行光分成两束, 其中一束通过测试介质成为探测光束, 另一束作为参考光束, 然后两束光发生干涉。干涉条纹用光电探测器来接收并进行处理。为了在实验中实时显示气流流场的二维分布情况, 实验中应采用数字外差干涉仪^[10]。图5显示的是化学激光介质典型的数字外差全息干涉测量折射率图。

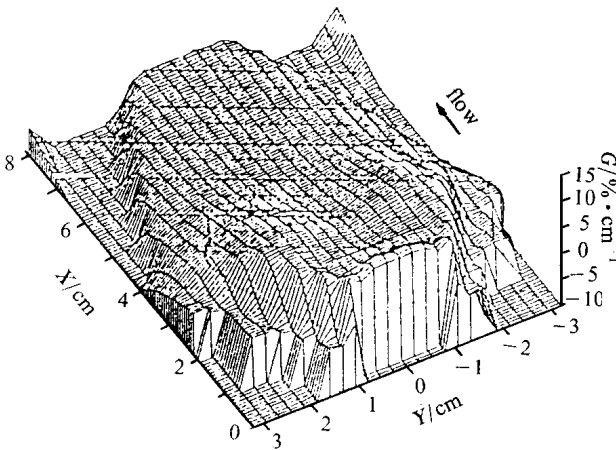


Fig 4 Spatial distribution of a small signal gain

图4 典型小信号增益空间分布图

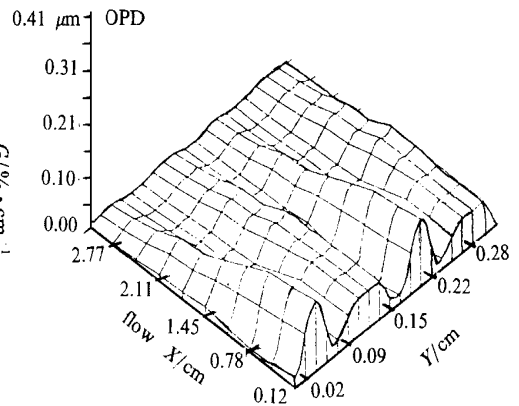


Fig 5 Flow field of chemical laser

图5 典型化学激光器气流流场

2.4 光学谐振腔诊断

光学谐振腔子系统由谐振腔反射镜、窗口、光学基座与辅助反射镜支架及相关硬件(用于调准等)组成。高辐照度载荷要求使用带有特殊介电膜层的反射光学系统。窗口用来隔离外界气压与工作低气压。光学基座为光学装置提供隔振能力,并将光学装置保持在适当的准直状态下。光学谐振腔子系统的诊断包括反射镜在辐照度载荷下的热变形的观测及反射镜在噪声下振动的诊断。热变形通常难以观测,可以考虑用全息干涉法测量。反射镜的运动用加速度表来观测。光学系统的准直状态希望能得以随时纠正,用自动对准传感器来测量抖动和硬件引起的光束漂移。国内已研究出用数控技术控制光腔准直性的技术,但还缺乏自动对准传感器技术与之配合。

上面,将氧碘激光器诊断分成了几大块,但实际上整个诊断是一个系统综合的过程。许多物理量需要同时测量,整个诊断系统最好用计算机整体加以控制。计算机进行实验数据的实时采集,并实时处理,计算出所有的物理量,并用图形直观给出某些处理结果。一些随时间和空间变化的物理量可及时显示其分布。最重要的是,诊断过程通常需要有目的地控制改变某些量的变化,观察变化的结果。这就需要激光器运行采用计算机控制技术,这是激光器自动化不可缺少的环节。另外,综合诊断还涉及各个诊断测量精度之间的合理匹配,这需要另外的文章加以讨论。

参考文献

- 1 Murdough M P and Helms C A. Stabilized iodine flow for long run time chemical oxygen-iodine lasers AD- A 257, 760, 1992
- 2 White F H and Neefham G A. *SPIE, Laser Diagnostics*, 1982, 343
- 3 Georges E et al. *SPIE, 8th international symposium on Gas Flow and Chemical Lasers*, 1990, 1397
- 4 张允武等编著. 分子光谱学. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1988. 9
- 5 张锐等编著. 原子光谱分析. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1991. 308
- 6 Jones Y D, Plummer D, Watkins L J and Hager G D. O₂-I Laser Mixing Studies Using LIF. AD- A 186 667, 1986
- 7 Otto W F et al. An automated gain measurement system for high-energy chemical lasers. *SPIE, Advances in laser technology (Emphasizing gaseous lasers)*, 1978, 138
- 8 Hartlove J S. Digital heterodyne holographic interferometry of flow fields, optics in four dimensions. ICO conf., Ensenada, Baja California, Mexico, August 4- 8, 1980
- 9 Goldstein Richard J. Fluid mechanics measurements. New York, Hemisphere Publishing Corporation, 1983. 377~ 422
- 10 Vest C M. Holographic interferometry. John Wiley & Sons, 1979

CHEMICAL OXYGEN- IODINE LASER DEVICE DIAGNOSTICS

Wang Jianxiang, Du Xiangwan

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing 100088

There are two kinds of diagnostics for chemical oxygen-iodine laser (COIL) system, laser device diagnostics and laser beam diagnostics. In this paper, we only discussed systematically the former which didn't refer to laser beam. We studied them in several diagnostic subsystems such as flow diagnostic, oxygen-iodine flow mixing diagnostic, gain medium diagnostic and resonator diagnostic. In flow diagnostic, we selected some special independent and easy measured variables from physical variables such as temperatures, pressures,

flow rates and densities of compositions to control and measure. From these diagnostics, we can obtain most of knowledge about performance evaluating parameters of CO₂ laser device system and subsystem. In oxygen-ion-dine flow mixing diagnostic, we indicated the mixing status by laser induced fluorescence. In gain medium diagnostic, we showed the spatial distribution of medium's small signal gain by a special device and measured the index of refraction gradients through the flow fields of chemical laser by an interferometer. And in resonator diagnostic, we are concerned about the collimation of lens system and the mirror deformation in resonator. During the experiment, the performance of CO₂ laser and all these diagnostics should be controlled by a computer, so we can get an immediate and comprehensive information about CO₂ laser. From these information, we can understand and then optimize the performance of the laser device.