

文章编号: 1001—4322(2000) s0—0010—05

射流式 $O_2(^1\Delta)$ 发生器射流破断长度测量*

吴宝根¹, 李旭昌¹, 卢锡年¹, 蒋筱筠¹,
李富岭², 陈文武², 桑凤亭², 杨伯龄²

(1 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2 中国科学院大连化学物理研究所, 大连 110 信箱 116023)

摘要: 实验研究了甘油-水溶液通过用不同加工方法和不同喷管长度/直径比的喷管形成射流的破断长度。射流的行为与喷管内是层流还是湍流的流动状态关系极大。当射流速度比较大时, 喷管的缺陷如进口出口的毛刺和流道壁的粗糙度是诱发湍流使射流破断的主要原因。这些结果对化学氧碘激光的射流式 $O_2(^1\Delta)$ 发生器的喷管设计和制造提供了有价值的参考。

关键词: 液体射流; 射流破断长度; $O_2(^1\Delta)$ 发生器

中图分类号: TN 248. 5; O 353. 5 **文献标识码:** A

在化学氧碘激光器中, $O_2(^1\Delta)$ 发生器是提供激光介质能源的装置。目前,产生 $O_2(^1\Delta)$ 的方法大都采用 Cl_2 气与过氧化氢碱溶液(BHP)在气液两相界面的化学反应释放出气态的 $O_2(^1\Delta)$ 。已经发展了鼓泡式、转盘式、射流式和均匀液滴等形式的 $O_2(^1\Delta)$ 发生器,其中后两种形式发生器的 Cl_2 的利用率和 $O_2(^1\Delta)$ 的产额最高^[1],被认为是第三代高效 $O_2(^1\Delta)$ 发生器。

为提高发生器单位体积液体(BHP)流的表面积,射流孔径和间距在加工允许条件下应尽可能小。由于毛细射流的表面张力不稳定性,喷管内的流动状态和环境气流的气动力作用等因素,最后导致射流的破断而形成不连续的液滴。因此,射流式和均匀液滴式发生器的结构基本上是一样的,所不同的是射流式发生器要求产生尽可能长的完整射流,以获得最大的液体柱的表面积;而均匀液滴式发生器是利用表面张力的不稳定性,人为加一扰动,控制液滴尺寸以获得尽可能大和稳定的表面积。

最近C. C. Frank和W. O. Schall^[2]针对射流式 $O_2(^1\Delta)$ 发生器的应用,详细论述了与射流的破断有关的流体力学问题,并用甘油-水溶液代替BHP液,用CCD拍摄射流破断过程,给出不同喷管长度/孔径比的射流破断长度。因为他们所用的CCD电子快门只有 10^{-4} 秒,不足以“冻结”液滴的运动,照片不很清楚。本文采用短脉冲频闪光源和高倍照相机,测量了用不同加工方法、不同流道长度/直径比的喷管产生的射流的破断长度。同时也用压电方法外加声振动产生均匀液滴。为研制实用型 $O_2(^1\Delta)$ 发生器提供可行依据。为实验方便,大部分实验是用单孔喷管,工作液体选用与BHP液粘性相近的甘油-水溶液。

1 毛细射流的破断机制及破断长度

受压液体从喷管流出,达到一定速度就形成连续的柱状射流。射流表面在液体凝聚力和散开力的竞争作用下会产生振荡和扰动。在适当条件下,这种振荡被放大造成液柱破断成滴。

影响射流破断有多种因素。如液体在喷管流道内是层流还是湍流,在流道内的速度分布,在喷管进口、出口加工的粗糙度和毛刺等缺陷引起的扰动及外界的振动等。还与液体的粘性、表面张力和射流的环境气体的气动力相互作用有密切关系,使射流破断成因变得十分复杂。在文献[3, 4]详细讨论了上述各种因素对射流破断的影响。射流的破断长度与上述因素的关系可用文献[4]的图2-10的射流的稳定性曲线来表示。从图中可以看出,层流区可以得到最大的完整射流长度。

Rayleigh对非粘性层流射流由于表面张力不稳定性引起射流破断的分析,依然是射流破断分析的

* 收稿日期: 2000-08-20; 修订日期: 2000-10-20
基金项目: 国家863激光技术领域资助课题(863-410-4-02, 05)
作者简介: 吴宝根(1939-), 男, 研究员, 主要研究方向为氧流光学和光束质量测量。

理论基础。Rayleigh 指出: (1) 对任何非轴对称扰动, 毛细射流都是稳定的; (2) 对轴对称扰动, 射流是否稳定取决于扰动波长是否大于或小于未受扰动液柱的周长, 只有当波长大于周长时, 才出现不稳定。不稳定波以指数形式 $e^{\omega t}$ 增长, ω 与扰动波数的关系 (色散关系) 为

$$\omega^2 = \left(\frac{\sigma}{\rho_l r_0^3}\right) \frac{I_1(k)}{I_0(k)} k (1 - k^2) \quad (1)$$

式中 α ρ_l 为液体的表面张力和密度, r_0 为未扰动的射流的半径, $k = 2\pi r_0/\lambda$ 为规一化波数, I_n 是第一类修正 Bessel 函数。不难求出, 当 $k = 0.697$ 时, ω 有最大值 $\omega_{\max} = 0.97 \sqrt{(\sigma/\rho_l d^3)}$, d 为喷管孔径。可以证明, 当有几个波长的扰动时, 最大的扰动将占优势。若初始扰动振幅为 δ_0 , 在破断的时间 t_b 有 $r_0 = \delta_0 \exp(\omega_{\max} t_b)$, 则破断长度为

$$L_b = U t_b = \frac{U}{\omega_{\max}} \ln \frac{d}{2\delta_0} = 1.03U \ln \left(\frac{d}{2\delta_0}\right) \left(\frac{\rho_l d^3}{\sigma}\right)^{1/2} = 1.03dW e^{1/2} \ln \frac{d}{2\delta_0} \quad (2)$$

式中 $W e$ 是 Weber 数, $W e = \rho U^2 d/\sigma$

因为初始扰动是个未知量, 因此无法用 (2) 式来计算破断长度。但从式中可以看出, 对无粘流体, 破断长度与射流速度 U 和孔径 $d^{3/2}$ 成正比。

Weber 考虑到粘性作用, 在没有气体阻力情况下, 破断长度为

$$L_b = U \ln \left(\frac{d}{2\delta_0}\right) \left[\left(\frac{\rho_l d^3}{\sigma}\right)^{1/2} + \frac{3\mu d}{\sigma} \right] = dW e^{1/2} (1 + 3Oh) \ln \left(\frac{d}{2\delta_0}\right) \quad (3)$$

式中 Oh 是 Ohnesorge 数, $Oh = \mu/\sqrt{\rho\sigma d}$, 对粘性液体, 破断长度与 d 成正比。从公式 (3) 还可以看出破断长度与液体的粘性系数 μ 和表面张力 σ 之间的关系^[5]。

从这些色散曲线, 我们计算出液滴尺寸。如对无粘液体, 在 $k = 0.697$ 时有最大的增长率, 可以算出最可几波长 $\lambda_{\text{opt}} = 2\pi r_0/0.697 = 4.507d$, 这就是液滴的平均距离, 由体积守恒算出液滴的直径为 $1.89d_0$ 。

如果从喷管出口的流动是湍流, 我们称之为湍流射流。由于湍流各速度分量的随机涨落, 在光照下可以看出其表面有许多褶皱, 这与层流射流的光滑表面形成鲜明对照。

2 实验装置

实验装置如图 1。工作液体用体积比 1:1 的甘油水溶液, 密度为 $1.13\text{g}/\text{cm}^3$, 粘性系数为 $6.12 \sim 7.62$ 厘泊, 其值在温度 $-19 \sim -23$ 的 BHP 液的粘性系数 $5.6 \sim 10.4$ 厘泊范围内。压缩空气将贮液罐内的液体经过滤器泵浦到压力室, 用压力表指示压力。改变压力可以得到不同速度的射流。

为拍摄射流和液滴清晰的放大照片, 我们用脉冲半宽度为 $6.5\mu\text{s}$ 的频闪灯 (丹麦 B&K 公司 4911 型 Motion Analyzer) 照明, 相机用放大倍数可调的瑞士 (W. LD HEERBRUGG, M 32) 照相机。在射流和相机之间放一毛玻璃使光照均匀。频闪灯、玻璃板和照相机同步升降, 可拍摄不同位置的射流形态, 位置用标尺指示。频闪灯用 4Hz 的正弦波同步触发, 相机快门为 $1/4$ 秒。为研究不同加工方法和不同长度孔径比的喷管射流的破断长度, 我们做了以下几种喷管:

(1) 机床钻孔: 在厚度为 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0mm 的铝板上用高速钻床钻 $\phi 5 \sim 1.0\text{mm}$ 的孔。用读数显微镜测量孔径和观察孔壁是否光滑, 进出口有无毛刺, 但粗糙度无法定量描述。

(2) 电火花加工: 在 1.0, 1.5 和 3.0mm 的不锈钢板上用电火花加工 $\phi 5 \sim 0.8\text{mm}$ 小孔, 在显微镜下观察, 表面粗糙度优于机加工。

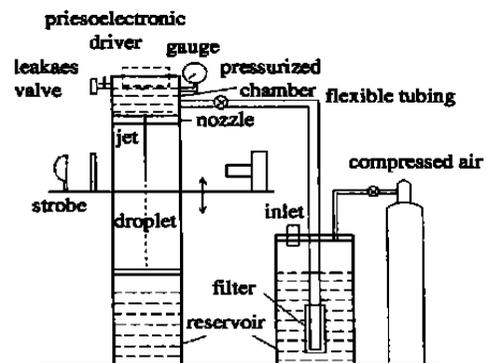


Fig 1 Sketch of the experimental setup

图 1 实验装置示意图

(3) 抛光孔: 用现成的拉丝模具, 孔内径为 ϕ 3~0.5mm, 孔壁用金钢砂研磨抛光, 孔壁光亮。

(4) 不锈钢管: 用冷拉不锈钢注射针管, 外径 ϕ 7mm, 内径 ϕ 4.5mm, 取长度为 14.3 和 8.0mm。

把压力室的顶部密封盖板换成压电驱动器, 本装置又可作为均匀液滴发生器。压电驱动器采用中科院声学所研制的大功率水下扬声器。音频信号经功率放大器和阻抗匹配器升压来驱动扬声器。驱动频率和振幅均可调节。

3 实验结果与讨论

3.1 射流平均速度

测量 Δt 时间间隔内的体积流量 Q , 可以得到平均速度 $\bar{U} = Q / A \Delta t$ 。因为喷管流道长度 L 与孔径 d 之比 L/d 不是很大, 管内流动速度还没有完全发展到均匀分布。假定速度剖面是抛物线型, 管中心的最大速度为 U_0 , 则平均速度 $\bar{U} = U_0/2$ 。射流一出喷管口, 没有管壁约束, 速度很快地弛豫到均匀速度剖面, 这种弛豫过程, 对射流破断有影响。

如果在喷管进口与出口的压差为 $\Delta p = p - p_0$ (p_0 是环境压力), 对理想无粘性流体, 管内无压力损失, 则 $\Delta p = \rho U^2/2$ 。实际上在喷管流道内由于液体的粘性阻力, 出口的速度与压差的关系可用下式表示

$$U = C_D \sqrt{2\Delta p / \rho} \quad (4)$$

C_D 为喷管流道的流量系数 (discharge coefficient), $C_D < 1$ 。

实验测得三种喷管不同 L/d 的平均射流速度与压差的关系如图 2 所示。各喷管之间的速度差别仍然是十分明显的。管壁抛光的拉丝模孔喷管流量系数最大, 而不锈钢管, 流量系数最小。

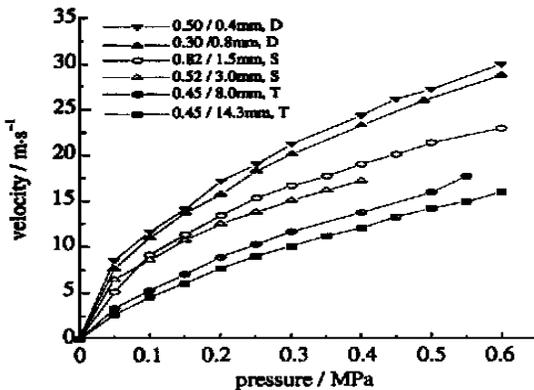


Fig. 2 Jet velocity vs pressure D-polished draw hole,

S-electrosparking, T-stainless steel tube

图 2 三种喷管的射流速度与压力的关系

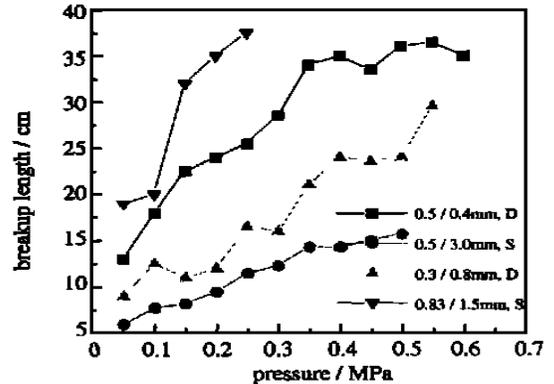


Fig. 3 Jet breakup length vs pressure for the nozzle with

smooth wall D-polished draw hole, S-electrosparking

图 3 两种光滑壁喷管的射流破断长度与压力的关系

3.2 破断长度

理想的射流形态应该是从出口流出有一段表面光滑的完整液柱。由于扰动放大, 逐渐变成有腰有鼓的波浪结构, 然后末端变成细丝韧带, 最后脱离液柱形成液滴。从出口到第一断开处的长度被称为射流的破断长度。流道壁有光滑表面的喷管如抛光的拉丝模喷管和用电火花加工的喷管产生的射流都有这样的特征。但也出现这样的情况, 射流在某处断开后, 又出现分段的液柱, 最后才成滴。这时我们给出破断长度的范围。最难确定的是湍流射流, 没有明显的柱滴分界, 射流呈麻花的扭曲状, 开始形成的液滴也不规则, 这时我们只能根据射流的形态, 确定一合适的破断范围。

(1) 拉丝模抛光孔和电火花加工孔

图 3 表示了这两种壁面光滑喷管的射流破断长度与压力的关系。这两种喷管的破断长度随射流速度增加而增加; 射流孔径加大, 破断长度也增加, 其趋势与理论预言一致。

(2) 不锈钢管喷管

两种长度的不锈钢喷管在压力小于 0.6 MPa 时, 速度不超过 15m/s, 雷诺数 $Re < 1200$, 应该在层流

范围,但测得的破断长度均不超过10cm。长8mm 喷管射流的速度是提高了,但破断长度没有明显增加,估计是由于管两端有毛刺干扰流场所致。不同压力出口处的射流形态如图4。

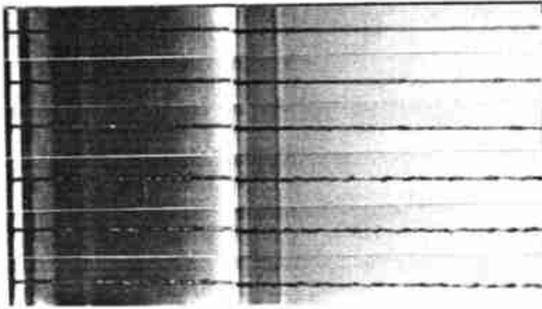


Fig 4 Photographs of glycerin-water jet for $\phi 45\text{mm}$, $L = 14.3\text{mm}$ stainless steel tube at the pressure of 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 MPa from up to down
图4 $\phi 45\text{mm}$, $L = 14.3\text{mm}$ 不锈钢管甘油水射流照片

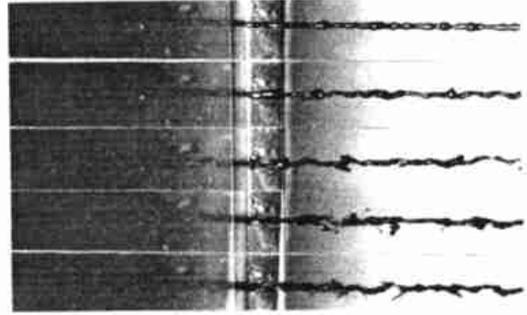


Fig 5 Photographs of glycerin-water jet for $\phi 10\text{mm}$, $L = 10\text{mm}$ machine drilled orifice at the pressure of 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 MPa from up to down
图5 $\phi 10\text{mm}$, $L = 10\text{mm}$ 机械钻孔喷管甘油水射流照片

(3) 机床钻孔喷管

我们做了四种板厚度(3.0, 5.0, 7.0和10.0mm), 每种厚度二种孔径, 为加工方便, 厚板的孔径为0.78mm和1.0mm。如对 $\phi 0\text{mm}$ 孔, 压力为0.2MPa时, 由于喷管壁面粗糙, 射流呈现湍流射流的特征, 如图5。在压力为小于0.1MPa时, 射流表面光滑, 破断长度长, 随着压力的增加, 破断长度反而减小。相同板厚, 孔径大, 破断长度长。

3.3 均匀液滴的产生

如前所述, 射流在外界各种因素作用下必然破断成滴。一般情况下, 液滴间距是孔径的4.5倍, 液滴直径为孔径的1.89倍。用压电振荡外加一固定频率的强扰动, 迫使射流按固定频率振荡, 形成等距和尺寸相同的液滴。为增加表面积, 可以外加高频率的扰动, 得到间距短和小直径的液滴。只要液滴的半径小于1.5倍射流半径时, 液滴的面积就大于液柱面积。图6是 $\phi 5\text{mm}$ 的拉丝模喷管, 压力为0.2MPa和扰动频率9.6kHz条件下, 自喷管出口(0~9.5cm是光滑粹液柱)9.5cm到27.5cm甘油/水射流从光滑液柱到破断成滴全过程的照片。改变频率, 形成不同液滴尺寸和间距的均匀液滴, 图7从上到下为扰动频率分别为6.5, 5.4, 4.6, 3.8, 2.85kHz的甘油/水射流在刚破断处的照片。从照片中可以看出, 频率越高, 液滴间距小, 频率与波长的乘积等于射流速度。

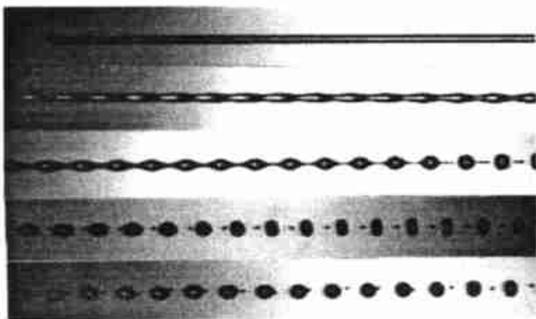


Fig 6 Evolution from jet to droplet of glycerin-water jet disturbed by 9.6 kHz piezoelectric driver
图6 在9.6kHz压电驱动下拉丝模孔甘油水射流离喷管出口9.5~27.5cm射流演化过程

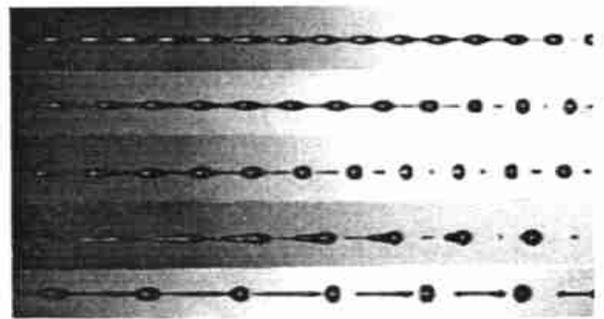


Fig 7 Photographs near the breakup position of glycerin-water jet at the different driven frequencies from up to down, the frequency is 6.5, 5.4, 4.6, 3.8, 2.85 kHz
图7 在不同驱动频率下拉丝模孔喷管甘油水射流在破断处的照片

4 结论

理论上讲, 在射流速度不是很高时, 只要喷管流道内是层流就可以得到较长的完整射流, 并且射流

的破断长度与射流速度成正比, 实际观测与理论预言接近。但在实践中, 喷管的加工很难满足理论的要求, 湍流的诱发使射流的行为复杂化, 很难精确地定量描述, 破断长度也没有规律。从我们实验中可以得出如下几点结论:

(1) 为获得长的完整射流, 首先要保证喷管内的流态是层流。这就要求喷管加工内壁尽可能的光滑, 喷管入口不能有台阶和毛刺以诱发湍流;

(2) 对层流射流, 射流破断长度与射流速度成正比。为提高射流速度, 喷管的流道长度/直径比应尽可能小, 以减小流体粘性引起的压力损失;

(3) 射流的破断长度与喷管孔径成比例。因此, 喷管孔径不能太小, 这与提高单位体积流体表面积矛盾, 需折衷选择;

(4) 外加高频声扰动, 可控制液滴尺寸, 有助于消除子液滴。

我们的实验是在静止大气压环境下进行的。实际的 $O_2(^1\Delta)$ 发生器是在低气压和气体流动中的环境。有关在流动气体中射流的行为还需进一步研究。

致 谢 本研究工作是李富岭研究员建议并大连化物所给予经费支持。力学所申仲翰研究员给予很大帮助。作者一并衷心表示感谢。

参考文献:

- [1] 庄 琦, 等 短波长化学激光[M] 北京: 国防工业出版社, 1997, 59~ 68
- [2] Frank C C, Schall W O. Fluid M echanic Investigations for $O_2(^1\Delta)$ Jet Generators[A]. SPIE[C], 1995, **2502**: 297~ 303
- [3] Lefebvre A H. A tom ization and Sprays[M] New York, Hemisphere, 1989, 37~ 59
- [4] Giffen E, Muraszew A. The A tom ization of L iquid Fuels[M] New York, Wiley, 1953
- [5] Goedde E F, Yuen M C. Experiments on L iquid Jet Instability[J]. *J Fluid M ech*, 1970, **40**(3): 495~ 511.

Measurement of jet breakup length for jet $O_2(^1\Delta)$ generator

WU Bao-gen¹, LI Xu-chang¹, LU Xi-nian¹, JIANG Xiao-jun¹,
LI Fu-ling², CHEN Wen-wu², SANG Feng-ting², YANG Bo-lin²

(1. Institute of M echanics, Chinese A cademy of Science, Beijing 100080, China;

2. Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese A cademy of Science, P. O. Box 110, Dalian 116023, China)

ABSTRACT: The breakup lengths of jets for glycerine and water solution emerged from the nozzles with the various passage/diameter ratio, and different manufacture methods, were experimentally investigated. The behavior of a jet depends dramatically on the flow state, laminar or turbulent, in the nozzle. The turbulence induced by the defects of nozzle, such as the burr at the inlet and outlet, and the roughness of the wall, is the main cause to decrease the length of intact jet. These results may be helpful to design and manufacture an appropriate nozzle of the jet $O_2(^1\Delta)$ generators for CO L.

KEY WORDS: liquid jet; breakup length of jet; $O_2(^1\Delta)$ generator