

文章编号: 0258-7025(2008)08-1250-05

# 激光穿孔中辅助气体动力学性能分析

胡 俊 郭绍刚 罗 磊 姚振强

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

**摘要** 通过基于结果的自适应算法对激光穿孔过程中的撞击射流场结构进行了计算。辅助气体与工件之间相互作用的本质过程可以描述为轴对称撞击射流过程, 高压气体的轴对称撞击射流可以展示在高压状态下气体与工件之间的相互作用。气体射流与工件相互作用时, 入射斜波与正激波发生直接接触和非接触的两种不同状态, 分析了高压气体辅助激光切割第二个合理的加工区域的存在原因, 加工参数对切口中气体动力学性能的影响, 以及分析高压气体辅助加工能力随工件与喷嘴距离之间的关系。通常在入射斜波与正激波直接相互作用没有完成时, 质量流率随工件与喷嘴距离变大而剧烈衰减, 因此高压气体辅助激光切割时要尽可能保证工件与喷嘴的距离限定在合理的范围内。

**关键词** 激光技术; 激光穿孔; 撞击射流; 正激波; 动力学性能

中图分类号 TG 485 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083508.1250

## Dynamic Characteristic Analysis of Impinging Jet in Laser Drilling

Hu Jun Guo Shaogang Luo Lei Yao Zhenqiang

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract** The interaction of an impinging jet in laser drilling is carried out using an explicit, coupled solution algorithm with solution-based mesh adaptation. The essential process of gas jet-workpiece interaction can be described through the description of axisymmetrical impinging jet. It is completely shown that there are two states including contact and separation between the incident shock and the normal shock in gas jet-workpiece interaction. At the same time, this paper shows the reason for the existence of the second reasonable ranges of laser cutting. The effect of processing parameter on dynamic characteristic is analyzed, and this paper also analyzes the relationship between machining capacity of assist gas and standoff distance. The mass flow rate decreases rapidly with the increase of standoff distance before the end of direct interaction between the incident shock and the normal shock, so the standoff distance should be set in reasonable ranges.

**Key words** laser technique; laser drilling; impinging jet; coupled solution algorithm; dynamic characteristic

## 1 引 言

在切口没有形成之前, 必须在切割开始的部位加工一个通孔, 以引导辅助气体把熔融金属从工件的下部排出去, 这个过程称作穿孔。在实际的加工过程中, 穿孔的重要性往往被忽略, 因为在加工薄板时, 激光的能量很容易融化板材实现穿孔。其实, 穿孔是激光切割十分重要的过程, 而且随着板材厚度的增加, 穿孔越来越不稳定。在板厚超过 12 mm 的厚板切割中, 发生加工不良现象的 70% 起因于穿孔

不好。激光切割质量主要受激光束<sup>[1]</sup>、材料属性<sup>[2]</sup>以及辅助气体的影响, 其中辅助气体在激光切割或激光穿孔中起着至关重要的作用。一方面喷嘴出口的气体射流在切口中产生很强的剪切作用力, 熔融金属能否从切口排出主要取决于剪切作用力的大小; 另一方面辅助气体能够加速切口的冷却, 保证热影响区被控制在很小的范围, 为形成高质量的切割表面提供了先决条件。分析辅助气体与工件之间的相互作用有重要的现实意义。

收稿日期: 2007-08-07; 收到修改稿日期: 2007-10-29

基金项目: 上海市科学技术发展基金光科技重大专项(05DZ22003)和上海市科学技术发展基金登山计划(06DZ11418)资助项目。

作者简介: 胡 俊(1975—), 男, 安徽人, 副教授, 博士, 主要从事激光加工工艺与装备方面的研究。

E-mail: hujun@sjtu.edu.cn

辅助气体与工件之间相互作用的本质过程可以描述为轴对称撞击射流过程。轴对称撞击射流分析能够解释或预测激光穿孔过程中气体与工件的相互作用。

文献[3~5]分析了低压氧气和惰性气体在激光切割过程中与工件之间的相互作用。但是由于辅助气体的工作压力比较低,撞击射流场并没有形成复杂的间断结构。超音速流场分析结构的建立以及可视化技术的运用,推动了对激光切割过程中高压流场结构中复杂波面的研究。2001年, J. Duan等<sup>[6~8]</sup>研究了激光切割过程的解析关系描述和数学模型构造,分析了切割前端曲线的形成、切口中超音速流场以及切割参数对切割表面质量的影响,描述了超音速射流的激波结构。2002年, Ching-Chuan Mai等<sup>[9,10]</sup>对切割过程中喷嘴的自由射流和撞击射流进行了仿真分析,论述了自由射流时马赫盘的形成因素与撞击射流时马赫盘的偏移,分析了激光切槽过程中超音速流场的结构。2006年, Khan等<sup>[11]</sup>研究了激光打孔过程中气体动力学特性在从不通孔到通孔的过程中的复杂变化,详细展示了轴对称撞击射流在不同加工状态下的波面结构。

但是真正用轴对称撞击射流揭示激光切割过程中气体与切割前沿相互作用的是文献[12]。2000年, Chen等<sup>[12]</sup>通过试验仿真分析了激光加工中轴对称撞击射流的分析,展示了入射斜波与正激波直接作用和非直接作用两种射流结构,并分析了喷嘴和工件之间的距离大小对切口中动力学特性的影响,但是辅助气体压力也只是限于自由射流时不产生正激波的压力范围之内。高压气体自由喷射最显著的特点是流场中会形成激波结构,射流场中激波的种类和强弱主要取决于出口滞止压力与环境压力的比<sup>[13~16]</sup>。对于超音速射流,当压力比小于3~4,自由射流场中会产生普朗特-迈耶(Prandtl-Mayer)膨胀现象,主要是由于膨胀波撞击自由边界发生反射,之后与压缩波复合形成入射激波波前,反复膨胀与压缩形成钻石激波结构。当压力比大于3~4,流场结构中会出现正激波结构,称为马赫盘(MSD)<sup>[9]</sup>。

本文分析了高压气体的轴对称撞击射流,显示了在高压状态下气体与工件之间的相互作用,讨论了加工参数对切口中气体动力学性能的影响,研究了高压气体辅助加工能力随工件与喷嘴距离之间的关系,以指导切割参数的优化。为了保证气体压力在自由射流时能够形成正激波,以展示入射斜波与

正激波强烈的相互作用,辅助气体滞止压力 $P_e$ 取673 kPa,  $P_e$ 实际是出口绝对总压,忽略喷嘴中的能量损失就相当于滞止压力。

## 2 数值方法

### 2.1 主控方程

激光切割过程中气体与工件的相互作用采用轴对称撞击射流模型,流场主控方程描述为稳态可压缩雷诺平均 N-S 方程(RANS),在轴对称坐标系下,可以表示为

$$\frac{\partial E}{\partial x_i} + \frac{\partial F}{\partial x_j} = \frac{\partial E_v}{\partial x_i} + \frac{\partial F_v}{\partial x_j}, \quad (1)$$

这里

$$E = \begin{bmatrix} \rho u_i \\ \rho u_i^2 + p \\ \rho u_i u_j \\ \rho u_i \left( e + \frac{P}{\rho} \right) \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho u_j \\ \rho u_i u_j \\ \rho u_j^2 + p \\ \rho u_j \left( e + \frac{P}{\rho} \right) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$E_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{ii} \\ \tau_{ij} \\ u\tau_{ii} + v\tau_{ij} \end{bmatrix}, \quad F_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{ij} \\ \tau_{jj} \\ u\tau_{ij} + v\tau_{jj} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 $\rho$ 为密度, $p$ 为绝对静压, $u, v$ 为 $x_i, x_j$ 方向的速度, $e$ 为单位总能, $\tau_{ii}$ 和 $\tau_{jj}$ 为应力张量, $\tau_{ij}$ 为剪切张量。在轴对称坐标系中张量表示为

$$\tau_{ii} = \mu_{\text{eff}} \left\{ 2 \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \left[ \frac{1}{x_j} (x_j u_j) + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] \right\}, \quad (4)$$

$$\tau_{jj} = \mu_{\text{eff}} \left\{ 2 \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \left[ \frac{1}{x_j} (x_j u_j) + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] \right\}, \quad (5)$$

$$\tau_{ij} = \mu_{\text{eff}} \left( 2 \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (6)$$

式中 $\mu_{\text{eff}}$ 为有效黏度是湍流黏度, $\mu_t$ 和分子黏度 $\mu_{\text{mol}}$ 的和,表示为

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_{\text{mol}} \left[ 1 + \sqrt{\frac{C_\mu}{\mu_{\text{mol}}}} \frac{k}{\sqrt{\epsilon}} \right]^2, \quad (7)$$

式中 $C_\mu = 0.0845, k, \epsilon$ 为 RNG  $k-\epsilon$  模型中的参数, $k$ 为湍流动能, $\epsilon$ 为湍流动能耗散率<sup>[17]</sup>。

整个流场结构的计算是由 CFD 软件 Fluent 完成的,采用了基于雷诺平均的 N-S 方程的 RNG  $k-\epsilon$  模型,外流计算区域为10 mm×20 mm,初始网格长度取0.1 mm,采用基于结果的自适应网格重构技术以详细展示高压轴对称撞击射流复杂波面结构,并结合文献[18]对压力入口条件进行修正,准确反映喷嘴出口压力的不均匀分布。

### 2.2 算法的有效性验证

为了验证数值方法的有效性,把本文的数值结果和一些已有数据进行比较。图 1(a)为 Lamont 等<sup>[19]</sup>撞击射流结构示意图,(b)为仿真结果和试验数据的比较,可以看出仿真结果与试验结果吻合较好,可见本文的计算参数设定合理,结论分析有效。

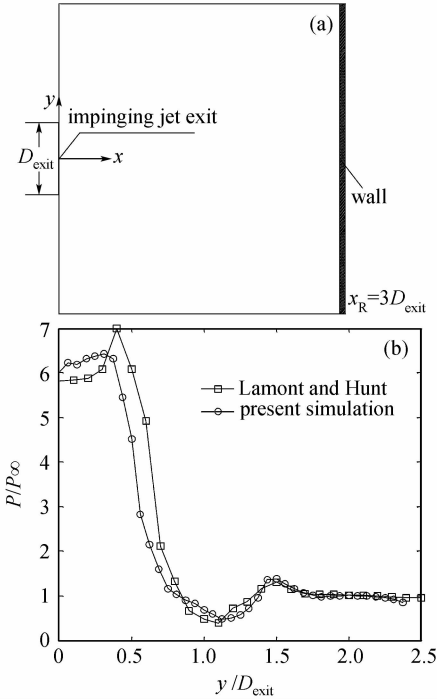


图 1 (a) 撞击射流结构示意图;

(b) 壁面压力值的比较 (y 轴正方向部分)

Fig. 1 (a) Sketch of the jet impingement; (b) comparison of wall pressures (positive direction of y axis)

## 3 数值仿真结果与分析

### 3.1 自由射流

自由射流的计算区域取从喷嘴出口延伸 10 mm

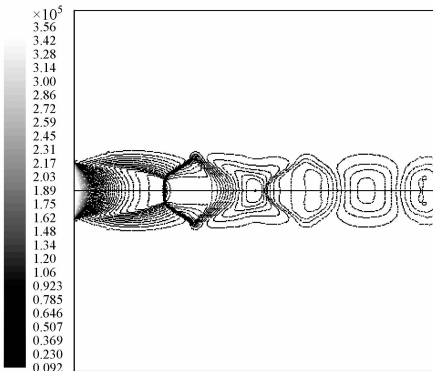


图 2 滞止压力为 673 kPa 时自由射流静压等值线

Fig. 2 Static pressure contours of free jet when stagnation pressure is 673 kPa

的范围,图 2 显示了工作压力为 673 kPa 的自由射流结构。能够清晰地看到出口附近的激波结构向下游传播,距喷嘴出口 2.5 mm 处有正激波结构,正激波将促使流场形成低压区。波后气体被高度压缩,速度急剧下降形成低速区,之后气体开始膨胀加速,如此反复直至压力稳定于环境压力。

### 3.2 撞击射流

撞击射流的模型结构如图 3 所示,喷嘴与工件之间的距离  $H$  取 0.5~5 mm,其余参数按文献[5]中的第一组参数选取:工件的厚度  $d = 1.5$  mm,喷嘴出口直径  $D = 1.5$  mm,孔直径  $d_h = 0.7111$  mm,工件通孔出口与入口的直径相等(都用  $d_h$  表示), $P_e$  表示出口滞止压力, $P_a$  表示环境压力,计算区域取喷嘴到工件之间区域和孔,以及孔出口延伸 6.5 mm 的范围。

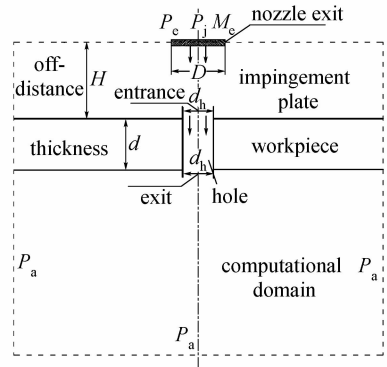


图 3 气体与工件相互作用示意图

Fig. 3 Schematic of gas-workpiece interaction

分析气体与加工工件之间的相互作用,主要分析气体在切口中的动力学特性。从某种程度上讲,熔化层金属的去除最终取决于切口中的质量流率和推进力,因此撞击射流动力学性能的好坏由切口中的质量流率  $m$  和推进力  $T$  决定。质量流率为

$$m = \int c_D P_e \sqrt{\left[ \left( \frac{2}{RT} \right) \left( \frac{r}{r+1} \right) \left( \frac{2}{r+1} \right)^{2/r-1} \right]} dA_{\text{entry}}, \quad (8)$$

流场中任一点的推进力为

$$T_i = (P_i - P_a + \rho_i V_i^2) A_i \cos \theta_i = (P_i - P_a + P_i k M_i^2) A_i \cos \theta_i, \quad (9)$$

定义  $T_i/A_i$  为推进力在任一点上的均值,称为推进力点值。同一过流截面上的推进力分布曲面主要取决于切口本身的几何条件和物理条件,因此中心轴线推进力点均值的大小可以反映过流截面上推进力的大小。中心轴线上推进力点值为

$$\bar{T}_{\text{axis}} = P_{\text{axis}} - P_b + P_{\text{axis}} k M_{\text{axis}}^2. \quad (10)$$

图 4 为激光切割过程中不同  $H$  值时的撞击射流静压等值线。图 4(a) 中进入切口中的质量流率为  $m_r = 1.278 \times 10^{-4}$  kg/s, 而在图 4(b) 中, 虽然工件后移 1 mm, 但是进入切口中的质量流率却为  $m_r = 2.675 \times 10^{-4}$  kg/s, 不仅没有下降反而上升。图 5 展示了不同  $H$  值下中心轴线上的压力和推力的分布情况。可以看到, 当  $H = 5.0$  mm 时, 切口中心线的压力和推力都明显大于  $H = 4.0$  mm 时的值。产生图 4, 图 5 这两种差别的本质原因在于工件上面正激波强度的不同, 气流通过的激波强度越大, 能量和动量损失越多, 波后的力学性能也越差, 激波的强度取决于压缩波被压缩的程度。图 4(a) 中可以明显看到两组入射斜波与正激波发生了直接接触, 实际上是入射斜波与射流撞击工件后反射形成的压缩波直接作用, 导致工件上面的正激波强度急剧增加。而在图 4(b) 中, 工件下移避开了入射斜波与压缩波发生直接相互作用, 工件上面的正激波强度较低, 因此使得  $H = 5.0$  mm 时切口中的动力学性能明显比  $H = 4.0$  mm 时好。

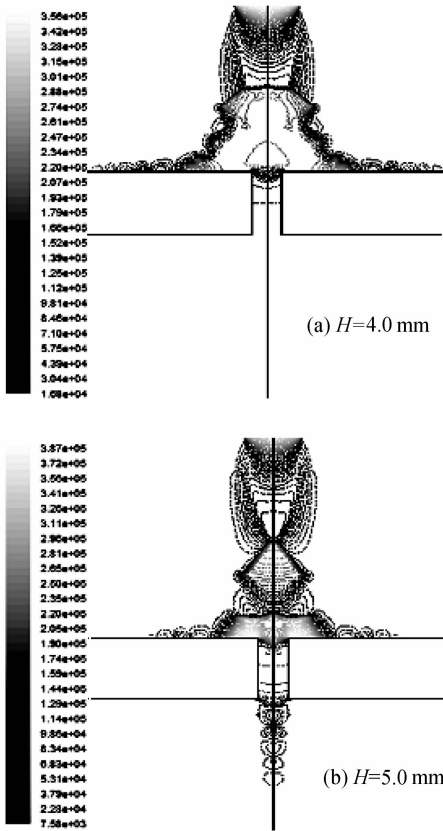


图 4 静压等值线分布

Fig. 4 Static pressure contours

图 6 显示了质量流率随喷嘴与工件距离之间的变化关系, 可以看到, 滞止压力  $P_0 = 673$  kPa 时质量

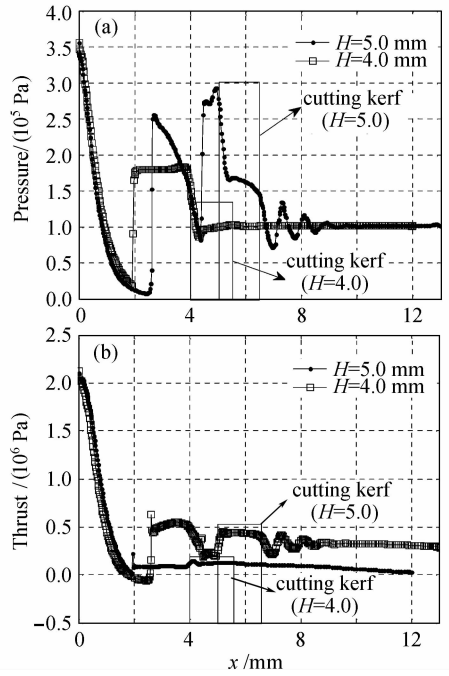


图 5 中心轴线上动力学特性比较。(a) 压力; (b) 推力  
Fig. 5 Comparison of dynamic characteristics in the axis  
(a) pressure; (b) thrust

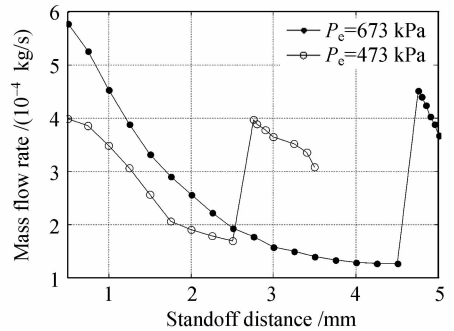


图 6 切口中的质量流率随喷嘴与工件距离的变化关系

Fig. 6 Mass flow rate versus standoff distance

流率在  $H = 4.75$  mm 时的突变, 滞止压力  $P_0 = 473$  kPa 时质量流率在  $H = 2.5$  mm 时的突变, 这些点实际是入射斜波与射流撞击工件后反射形成的压缩波直接作用的结果。因此对于高压气体, 避开入射斜波与正激波发生直接接触可以找到另一段合理的加工区域, 即第二加工区域, 与较低压力  $P_0 = 473$  kPa 的合理加工范围相比, 可知随着滞止压力的增加第二加工区域范围将越来越小。

### 4 结 论

通过基于结果的自适应算法对激光穿孔过程中的撞击射流结构进行计算, 展示了高压气体与工件的相互作用。结果表明, 工件上面的正激波强度是

造成气体能量损失的主要原因。当工件和喷嘴之间的距离在0.5~1.5 mm范围内,虽然不可避免入射斜波与正激波产生直接的相互作用,但是由于自由射流区没有获得发展,出口高压气体没有经过膨胀波区就直接作用于撞击射流区,使得撞击射流区形成高压区直接作用于切口中,没有形成严重压力能损失。但是当工件表面条件恶化时,必须寻找第二切割区域,特别在高压气体辅助穿孔时,由于熔融金属飞溅和反抛会损坏激光头,第二切割的研究变得尤为重要。这个区域的范围主要由压力决定,压力增大,范围越小。由于第二加工区域随着压力增大,与第一加工区域加工性能差别将越来越大,因此当压力超过某一值时第二加工区域将失去现实意义。

### 参 考 文 献

- Chen Jimin, Zuo Tiechuan. Effect of laser beam incident angle on laser cutting quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(11):1037~1040  
陈继民,左铁钊. 激光切割中入射角对切割质量的影响[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(11):1037~1040
- Li Xiangyou, Zeng Xiaoyan. Kerf roughness and quality control of laser precision cutting [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(2):176~180  
李祥友,曾晓雁. 激光精密切割不锈钢模板割缝质量控制[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(2):176~180
- W. O' Neill, J. T. Gabzdyl, W. M. Steen *et al.*. The dynamics behavior of gas jets in laser cutting [C]. *Proc. ICALEO'92*, 1992, Sec. B:449~458
- A. Ivarson, C. Magnusson. The role of oxygen pressure in laser cutting mild steels [J]. *J. Laser Appl.*, 1996, **8**(4):191~196
- A. D. Brandt, G. S. Settles. Effect of nozzle orientation on the gas dynamics of inert-gas laser cutting of mild steel [J]. *J. Laser Appl.*, 1997, **9**(3):269~277
- J. Duan, H. C. Man, T. M. Yue. Modelling the laser cutting process; Mathematical modelling of the cut kerf geometry for the laser fusion cutting of thick metal (I) [J]. *J. Phys. D*, 2001, **34**(14):2127~2134
- J. Duan, H. C. Man, T. M. Yue. Modelling the laser cutting process; distribution of supersonic gas flow field inside the cut kerf (II) [J]. *J. Phys. D*, 2001, **34**(14):2135~2142
- J. Duan, H. C. Man, T. M. Yue. Modelling the laser fusion cutting process; effects of various process parameters on cut kerf quality (III) [J]. *J. Phys. D*, 2001, **34**(14):2143~2150
- Ching-Chuan Mai, Jehnming Lin. Flow structures around an inclined substrate subjected to a supersonic impinging jet in laser cutting [J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, **34**(2):479~486
- Ching-Chuan Mai, Jehnming Lin. Supersonic flow characteristics in laser grooving [J]. *Optics & Laser Technology*, 2003, **35**(8):597~604
- A. H. Khan, W. O' Neill, L. Tunna *et al.*. Numerical analysis of gas-dynamic instabilities during the laser drilling process [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, **44**(7):826~841
- Kai Chen, Y. Lawrence Yao, Vijay Modi. Gas jet-workpiece interactions in laser machining [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2000, **122**(3):429~437
- H. C. Man, J. Duan, T. M. Yue. Behavior of supersonic and subsonic gas jets inside laser cut kerfs [C]. *Section B-ICALEO*, 1997, **83**:27~36
- H. C. Man, J. Duan, T. M. Yue. Dynamic characteristics of gas jets from subsonic and supersonic nozzles for high-pressure gas laser cutting [J]. *Opt. Laser Technol.*, 1998, **30**(3):497~509
- H. C. Man, J. Duan, T. M. Yue. Analysis of the dynamic characteristics of gas flow inside a laser cut kerf under high cut-assist gas pressure [J]. *J. Phys. D*, 1999, **32**(13):1469~1477
- K. Chen, Y. L. Yao, V. Mode. Numerical simulation of gas jet effects in laser machining [C]. *Section B-ICALEO*, 1998, 120~129
- FLUENT 6.3 User Guide [M]. USA, Fluent Inc., 2005
- Jinliang Xu, Chuangxin Zhao. Two-dimensional numerical simulations of shock waves in micro convergent-divergent nozzles [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, **50**(11-12):2434~2438
- P. J. Lamont, B. L. Hunt. The impingement of underexpanded axisymmetric jets on perpendicular and inclined flat plates [J]. *J. Fluid Mech.*, 1980, **100**(2):471~511