

文章编号: 0258-7025(2009)04-1005-06

# 两种激光切割超音速喷嘴结构设计 与辅助气体流场分析

胡 俊 邱明勇 姚振强

(上海交通大学机械与动力工程学院机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

**摘要** 对简易折线缩放喷嘴和基于霍耳(Hall)设计方法的复杂喷嘴外流场中压力分布,以及马赫盘位置变化等特性进行了分析。详细比较了这两种喷嘴气流场动力学性能之间的差别,揭示了两种喷嘴动力学性能的差别随工作压力增加越来越小的趋势。分析表明在高压状况下为减少激光切割的成本,用简易折线结构超音速喷嘴替代复杂流线结构喷嘴是可行的。

**关键词** 激光技术; 激光切割; 超音速喷嘴; 流场分析; 流体动力学

**中图分类号** TG485 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20093604.1005

## Structural Design and Assist Gas Flow Analysis of Two-Laser Cutting Supersonic Nozzles

Hu Jun Qiu Mingyong Yao Zhenqiang

(*School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, State Key Laboratory  
of Mechanical System and Vibration, Shanghai 200240, China*)

**Abstract** The characteristics of the pressure distribution and Mach disk position are analyzed for simple nozzle and complicated nozzle based on Hall design method, and the difference of dynamic characteristic of gas flow is compared particularly. The trend is revealed that the difference of dynamic characteristic between the two nozzles becomes smaller with the increase of working pressure. It is demonstrated that using the simple structure nozzle to replace the complicated flow line structure nozzle is feasible for decreasing the cost of laser cutting under the high pressure condition.

**Key words** laser technique; laser cutting; supersonic nozzle; flow analysis; hydrokinetics

### 1 引 言

激光切割具有切割范围广、切割速度快、切缝窄、切割质量好、热影响区小、加工柔性大等优点<sup>[1]</sup>。激光切割中辅助气体的作用因切割板材种类的不同而有所不同,切割有色板如不锈钢或铝板,一般采用氮气作为辅助气体,起到冷却及保护作用;而碳钢切割使用氧气,起到冷却及加速燃烧加速切割的目的<sup>[2]</sup>。喷嘴作为激光束和辅助气体的排出通道,其内部形状结构及其产生的流场特征是影响激光切割质量和效率的关键因素之一。

研究表明<sup>[3]</sup>,在激光功率一定时,要提高切割厚板的速度,就必须提高喷嘴的供气压力。亚音速喷嘴结构出口处的气流速度不可能超过声速,因此一般情况下认为高压辅助气体的出口流速等于声速。这种情况下,理论上讲,当出口总压力与环境压力之比大于 3~4 时,喷射流场中会产生正激波。因此对于高压辅助气体而言,往往有一部分压力能不能完全转化为气流的动力学能。更重要的是,喷嘴射流场中会形成激波,造成辅助气体压力能的大量损失。此外,波后的气体经常处于紊流状态,而且不断膨胀

收稿日期: 2008-04-23; 收到修改稿日期: 2008-07-17

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)资助课题。

作者简介: 胡俊(1975-),男,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

加速,进入切口后,气流的动力学性能的稳定性和均匀性都大大降低,致使切割质量严重恶化。随着激光切割板材厚度的增加,要把熔融金属尽快地从切口排出,必须不断增加辅助气体压力。为了使高压辅助气体更好地用于激光切割,必须设计超音速喷嘴,依靠喷嘴的结构消除流场中的激波,实现超音速出流,使压力能完全转化为速度能,工作压力大于设计压力时,出口气流仍然均匀,切缝中具有较大的气流密度和推进力。

## 2 两种喷嘴的结构

根据缩放喷管理论,超音速喷嘴必须是先收缩后发散型喷管,由三个部分组成:收缩段(亚音速)、喉部(临界速度)和扩散段(超音速)。在实际超音速喷嘴中为了降低紊流度,在收缩段之前有一段稳定段。因此,超音速喷嘴包括四部分:稳定段、收缩段、喉部和超音速扩散段,如图1所示。根据喷嘴中空气流动原理<sup>[4~6]</sup>,使气流场获得最大膨胀角而且不带有压缩波的理想结构,这个角近似为普朗特-迈耶膨胀角(Prandtl-Meyer Angle)的一半。虽然这是非粘性气体超音速喷嘴的近似,但却是实现拉瓦尔(Laval)结构喷嘴喉部设计的重要理论依据。文献<sup>[7~9]</sup>是运用特征线法设计超音速喷嘴的典型,并根据激光切割实际情况的要求减小喷嘴长度,而特征线法主要考虑理想气体的动力学特性,没有考虑粘性作用。刘建华等<sup>[10,11]</sup>结合特征性设计思想,提出了一种设计超音速拉瓦尔喷嘴的新方法。根据可压缩附面层理论,对喷嘴结构进行修正,这种喷嘴一方面考虑了随气流的流动附面层的增厚,避免了因波系形状引起喷嘴出口气流的不均匀,另一方面避免了附面层减小有效的位流面积,保证了出口马赫数。

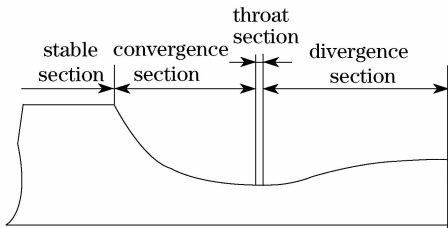


图1 超音速喷嘴的结构

Fig. 1 Structure of supersonic nozzle

本文对收敛段均采用维多辛基斯曲线的两种超音速喷嘴出口气体动力学性能进行了仿真分析。其中一种喷嘴(简易喷嘴)的发散段采用简易折线,另一种喷嘴(复杂喷嘴)发散段分两段。第一段由等熵条件下的普朗特-迈耶膨胀线确定,第二段按照简

化霍耳(Hall)设计方法采用大直径圆弧使曲线斜率减小至0。通过比较分析,找出两种喷嘴气流场动力学特性的差别随工作压力的变化规律。

### 2.1 复杂喷嘴的结构设计

如图2所示,复杂喷嘴收敛段形状采用维多辛基斯曲线状,保证流经喉部声速等值线垂直轴线,而且能在加速过程中尽可能消除回流,使气流加速达到音速,同时又保持流动的均匀与出流流线平行。喷嘴平行段,其直径 $D_0$ 依赖于喉部直径 $D_c$ ,其关系描述为

$$D_0 = D_c \left[ \frac{1}{M_0} \left( \frac{1 + 0.2M_0^2}{1.2} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中 $M_0$ 为收敛段入口马赫数,一般选择 $M_0 = 0.02 \sim 0.1$ , $k$ 为绝热系数,双原子气体为 $k = 1.4$ ,多原子气体为 $k = 5/3$ 。平行段长度 $L_0$ 。理论上是越长越好,但是通常受激光焦距的影响,一般长度 $L_0$ 取10倍喉部直径 $D_c$ 。喷嘴喉部最小直径由设计压力与环境压力定压比决定,喉部截面直径 $D_c = 1.43 \sqrt{V/(P_0 + 1)}$ ,其中 $V$ 为标准状况下切割气体的容积流, $P_0$ 为收敛段进口处气体压力。喷嘴发散段的设计分为两部分,其中第一段由等熵条件下的普朗特-迈耶膨胀线确定,第二段按照简化Hall设计方法采用大直径圆弧使曲线斜率减小至0,一般定义圆弧直径大于圆弧所在管部直径的3倍以上为大直径圆弧。第一段位于喉部与第二段之间,两段光滑连接,如图3所示。第一段,其形状曲线如图4所示,有

$$\frac{R}{R_c} = 1 + x \tan \alpha - A \tan \alpha \cdot$$

$$\arctan \left[ \frac{x/R_c}{A} + 0.03 \left( \frac{x}{A} \right)^4 \right], \quad (2)$$

$$A = \frac{2}{\pi} \left[ \cot \alpha - 3.686 \sin \frac{\alpha}{2} - \frac{0.48}{\sin(\alpha/2)} + 0.0048 \right], \quad (3)$$

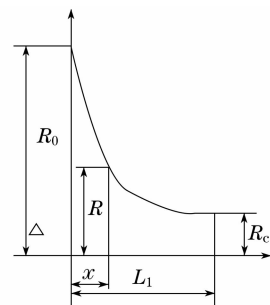


图2 收敛段曲线

Fig. 2 Curve of convergence section

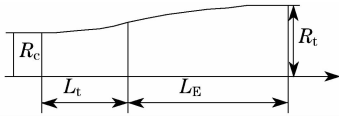


图 3 发散段曲线

Fig. 3 Curve of divergence section

式中  $\alpha$  为曲线任一点  $x$  处的切线与  $x$  轴的夹角。 $x$  轴是喷嘴的中心轴线,  $\alpha$  最大值在  $[9^\circ, 16^\circ]$  之间。此时最大值处  $x=L_t$ , 即发散段第一段结束。 $\alpha$  在  $x=L_t$  处的具体大小由发散段出口直径与第二段曲线的连接关系确定。第二段由大直径圆弧使  $\alpha$  由最大值过渡为 0, 此时直径  $R_T=4\sim 5D_1$ , 由数值方法优化获得。

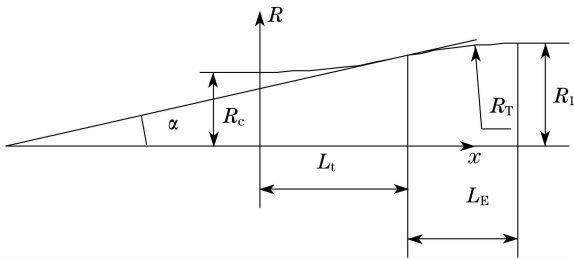


图 4 发散段第一部分曲线

Fig. 4 Curve of the first part of divergence section

### 2.2 简易折线喷嘴的结构设计

简易折线缩放喷嘴收敛段也采用维多辛基斯曲线, 和复杂喷嘴一致。发散段采用直线段代替复杂曲线, 其结构如图 5 所示。这种较简单的设计虽然会对发散段流场产生不良影响, 但是这种结构使得超音速喷嘴的加工得以实现。因此能够见到产品化的超音速喷嘴多为这种简易的折线结构。

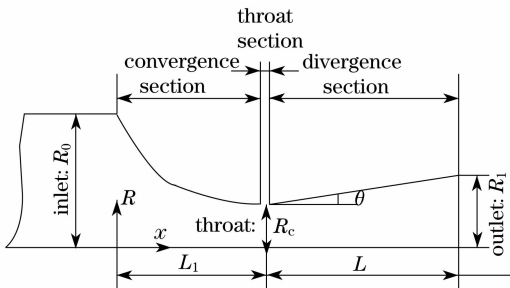


图 5 简易直线喷嘴的结构

Fig. 5 Structure of simple nozzle

### 3 算法的有效性验证

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  $10\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ , 初始网格长度取  $0.1\text{ mm}$ , 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。为了验证数值方法的有效性, 把本数值方法的结果和一些历史数据比较。图 6 是仿真结果和 Iwamoto<sup>[12]</sup> 实验数据的比较, 可以看出仿真结果与实验结果吻合得很好, 而近壁面处的误差主要源于实验结果和仿真结果是在不同的收敛状态下进行提取的。实验过程中撞击避免是动态的反复振荡过程, 而仿真过程确是稳定的静态作用过程。可见本文选择基于雷诺平均的 N-S 方程的 RNG  $k-\epsilon$  模型, 使用于对轴对称撞击射流的计算, 参数设定合理, 结论分析有效。

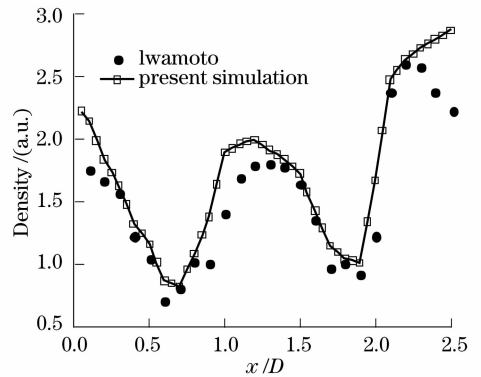


图 6 撞击射流中心轴线上的密度分布实验与仿真比较

Fig. 6 Comparison of computed and measured densities along an impinging jet axis

### 4 两种喷嘴马赫盘位置变化比较

如图 7 所示, 喷嘴 1L 和 2L 为简易折线结构的喷嘴, 喷嘴 1Z 和 2Z 为复杂结构的喷嘴。两种喷嘴的喉部直径均取  $1.2\text{ mm}$ , 第一组喷嘴出口直径为  $1.3\text{ mm}$ , 第二组出口直径取  $1.6\text{ mm}$ 。

图 8 显示了喷嘴 1Z 滞止压力为  $1\times 10^6\text{ Pa}$  时的外流结构密度等值线, 图中标注了流场中的关键结构以及特征波面, 包括马赫盘 (Mach disk)、桶状激波 (Barrel shock)、反射激波 (Reflected shock) 以及滑移线 (Slip line)<sup>[7]</sup>。

图 9 显示了喷嘴 1L 滞止压力为  $1\times 10^6\text{ Pa}$  时的外流结构密度等值线, 和图 8 相比, 两种喷嘴的流场从典型结构和特征波面上看没有明显的差别, 只是图 9 中喷嘴 1L 的马赫盘位置有少量的后移。

### 5 两种喷嘴外流场中压力分布的比较

第一组喷嘴 1L 和 1Z, 滞止压力  $P_0$  分别选取  $8.1\times 10^5\text{ Pa}$  和  $1.01\times 10^6\text{ Pa}$ , 环境压力  $P_a$  选取大气压力。超音速喷嘴在大于或等于设计压力的范围

内出口马赫数是固定的,被称为设计出口马赫数,主要取决于出口直径与喉部直径。第一组喷嘴的出口马赫数为  $M_e = 1.5$ 。对第二组喷嘴 2L 和 2Z,滞止

压力分别选取  $1.01 \times 10^6 \text{ Pa}$  和  $1.62 \times 10^6 \text{ Pa}$ ,环境压力也选取大气压力,第二组喷嘴的出口马赫数为  $M_e = 2.0$ 。

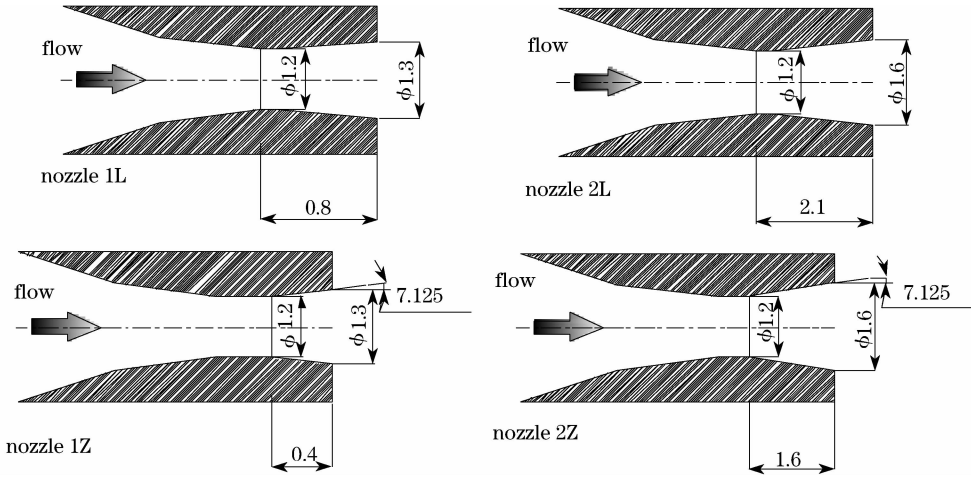


图 7 两种喷嘴的几何结构

Fig. 7 Geometrical structures of two types of nozzles

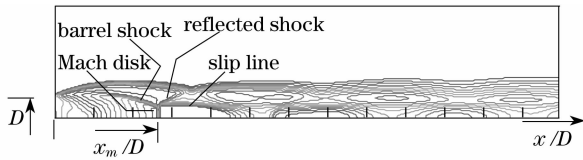


图 8 密度等值线(喷嘴 1Z)

Fig. 8 Density contours (nozzle 1Z)

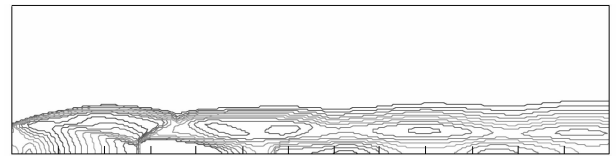


图 9 密度等值线(喷嘴 1L)

Fig. 9 Density contours (nozzle 1L)

为了对不同的压力做统一比较,采用文献[13]的方法,把流场中的压力转化为皮托管压力,转化关系为

(4)式表示了马赫盘的位置  $x_m$  与出口直径  $D$  的关系。式中  $P_e$  的值可以根据文献[13]的实验方法求得,也可以采用数值仿真,取中心轴线与出口交点值,  $P_b$  指背压。

$$\frac{x_m}{D} = \sqrt{\frac{\gamma}{2} \frac{P_e}{P_b} M_d^2}, \quad (4)$$

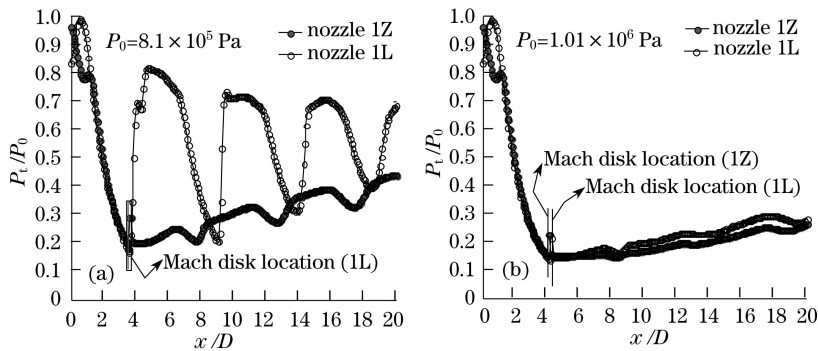


图 10 两种喷嘴 1L 和 1Z 中心轴线上的皮托管压力分布

Fig. 10 Pitot pressure distributions along the center line for nozzles 1L and 1Z

图 10(a) 和 (b) 中显示了喷嘴出口总压或喷嘴  $P_0$  分别为  $8.1 \times 10^5 \text{ Pa}$  和  $1.01 \times 10^6 \text{ Pa}$  时,第一组的两种喷嘴外流场中心轴线上的皮托管压力分布。这组喷嘴的设计压力为  $3.72 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,计算喷嘴都

处于欠膨胀状态。

从图 10(a) 可以看出,复杂结构喷嘴 1L 外流场没有产生马赫盘,处于钻石波结构,而折线结构喷嘴 1Z 却产生了马赫盘。马赫盘将使射流气体撞击工

件上表面将发生反射,在固体表面上方不远处将产生一个滞止区域,迫使气体由超音速流急剧下降至亚音速流,这将严重影响切口中气体的动力学作用。气体射流经过马赫盘进入切口中,气体处于欠膨胀状态,沿切口将形成一组明显的膨胀波。同时,气体射流在进入切口时将会发生阻塞,致使一部分气体改变流向,由轴向变为径向,入流气流将变得紊乱,同时这种紊乱将导致进入切口中的气流变得更不稳定。可以看出,此时复杂结构喷嘴 1L 动力学作用要明显优越于折线结构喷嘴。

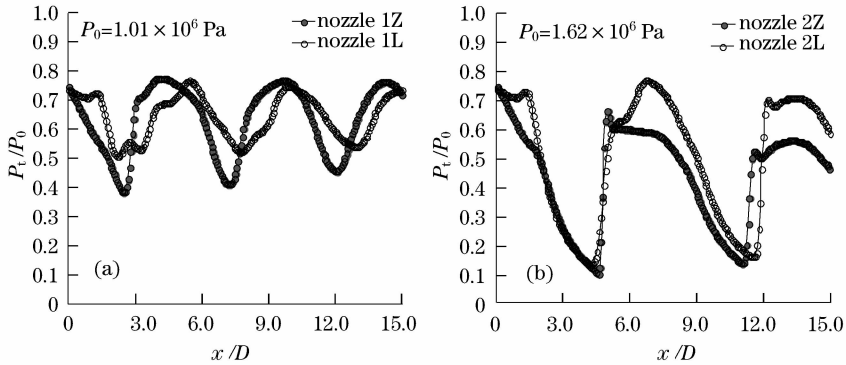


图 11 两种喷嘴 2L 和 2Z,中心轴线上的皮托管压力分布

Fig. 11 Pitot pressure distributions along the center line for nozzles 2L and 2Z

图 11(a)和(b)中显示了喷嘴出口总压  $P_0$  分别为  $1.01 \times 10^6$  Pa 和  $1.62 \times 10^6$  Pa 时,第二组两喷嘴外流场中心轴线上的皮托管压力分布。可以看出当滞止压力  $P_0$  为  $1.01 \times 10^6$  Pa 时,复杂结构喷嘴 2L 和折线结构喷嘴 2Z 都没有形成马赫盘,外流场同时处于钻石波结构。复杂结构喷嘴 2L 第一波系的动力学特性优于折线结构喷嘴。但是当滞止压力增大到  $1.62 \times 10^6$  Pa 时,两组喷嘴的动力学作用差别越来越小,甚至第一波系的动力学作用已经没有明显的区别。

## 6 结 论

设计压力为  $3.72 \times 10^5$  Pa,当工作压力不小于设计压力时,随着工作压力的增加,特别是工作压力达到设计压力的 3 倍左右或者更高时,两种喷嘴动力学特性的差别越来越小。因此在工作压力达到设计压力的 3 倍左右或者更高时,折线结构的超音速喷嘴代替复杂结构喷嘴是可行的。

从两种喷嘴的外流场中压力分布以及马赫盘位置变化等特性的分析中,可以知道两种喷嘴气流场动力学特性之间的差别随工作压力的增加越来越小。这种变化趋势将支持在设计压力为  $3.72 \times 10^5$  Pa 时,

图 10(b)两种喷嘴外流场中都产生了马赫盘,折线结构喷嘴 1Z 马赫盘的位置要更接近喷嘴,但是此时复杂结构喷嘴 1L 动力学作用与折线结构喷嘴的差别已经不明显。如果此时继续增加压力,两种喷嘴之间的差别将再次缩小。

特别当两种喷嘴的流场中都出现马赫盘后,除了马赫盘位置稍有不同外,流场中皮托管压力分布几乎完全相同,甚至有大量重合,可见随着滞止压力的增加两种结构喷嘴的动力学作用差别越来越小,以至于此时可以用折线结构超音速喷嘴替代复杂结构喷嘴。

工作压力达到设计压力的 3 倍左右或者更高时,简易折线结构超音速喷嘴可以替代复杂结构的复杂流线形喷嘴,以减少激光切割的成本。

## 参 考 文 献

- Liao Jianhong, Meng Hongyun, Wang Hongwei *et al.*. Investigation and applications of fiber laser precision cutting system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 135~138
- 廖健宏, 蒙红云, 王红卫等. 光纤激光精密切割系统的研制及其应用[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 135~138
- Hong Lei, Mi Chenglong, Liu Dejin. Laser cutting special steel sheet controlled by rotating gas flow[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 543~548
- 洪蕾, 米承龙, 柳德金. 旋转气流控制激光切割特种钢薄板[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 543~548
- 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
- I. M. Hall. Transonic flow in two-dimensional and axially-symmetric nozzles[J]. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 1962, **15**(4): 487~508
- K. Foelsch. The analytical design of axially symmetric laval nozzle for a parallel and uniform jet[J]. *Journal Aerospace Sciences*, 1994, **16**(3): 161~166
- W. T. Lord. A theoretical study of annular supersonic nozzles[J]. *Aeronautical Research Council Reports and Memoranda*, 1961, **3227**: 1~30
- H. C. Man, J. Duan, T. M. Yue. Design and characteristic analysis of supersonic nozzles for high gas pressure laser cutting[J]. *Journal of Material Processing Technology*, 1997, **63**(1~3): 217~222

- 8 B. A. Ward. Supersonic characteristics of nozzles used with laser for cutting [J]. *Laser Institute of America*, 1985, **43**(1): 94~101
- 9 R. Edler, P. Berger. New nozzle concept for cutting with high power lasers [C]. *Proc. of the Laser Materials Processing Symposium ICALEO'91*, 1992, **74**: 253~262
- 10 Liu Jianhua, Chen Yijian, Duan Jun. Design of supersonic nozzles for laser cutting[J]. *Laser Technology*, 2000, **24**(1): 46~49  
刘建华, 陈一坚, 段 军. 激光切割超音速喷嘴设计[J]. *激光技术*, 2000, **24**(1): 46~49
- 11 Chen Yijian, Liu Jianhua, Hu Xiyuan. Summary of laser cutting nozzles and analysis of flow field[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 1999, **36**(2): 17~20  
陈一坚, 刘建华, 胡席远. 激光切割喷嘴及流场分析综述[J]. *宇航材料工艺*, 1999, **36**(2): 17~20
- 12 J. Iwamoto. Impingement of under-expanded jets on a flat plate [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1990, **112**(7): 179~184
- 13 H. Katanoda, Y. Miyazato, M. Masuda *et al.*. Pitot pressure of correctly-expanded and underexpanded free jets from axisymmetric supersonic nozzles[J]. *Shock Waves*, 2000, **10**(2): 95~101