

文章编号: 0258-7025(2008)11-1789-06

# 激光切割气体出口马赫数对马赫盘的影响

胡 俊 邱明勇 郭绍刚

(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** 建立了自由射流模型, 采用了可压缩流体轴对称 N-S 方程和 RNG  $k-\epsilon$  模型, 重点分析了出流为欠膨胀波时的马赫盘(MSD)结构。对出口静压为  $6.145 \times 10^5$  Pa 的自由喷射外流场进行数值仿真, 描述了不同出口马赫数时的射流场结构, 分析了马赫盘与喷嘴出口马赫数之间的关系, 揭示了随着出口马赫数的增加, 马赫盘的宽度呈现出收敛趋势, 表明超音速喷嘴设计在保证常用工作压力时不出现过膨胀的情况下应当适当提高出口马赫数。揭示了实际切割过程中, 随着出口马赫数不断增大, 马赫盘将收敛于一固定位置。对求解模型进行流场可视化对比验证, 证明了仿真结果的准确性和结论分析的有效性。

**关键词** 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/CJL20083511.1789

## Effect of Gas Outlet Mach Number on Mach Shock Disk in Laser Cutting

Hu Jun Qiu Mingyong Guo Shaogang

(The State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, School of Mechanical Engineering,  
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract** The structure of Mach shock disk (MSD) is analysed emphatically by constructing free jet model, adopting compressible liquid axial symmetric N-S equation and RNG  $k-\epsilon$  model. Through the numerical simulation of free jet outer flow field under the outlet static pressure of  $6.145 \times 10^5$  Pa, the paper describes the jet structures of different outlet Mach numbers, analyses the relation between MSD and outlet Mach number of nozzles. It reveals that the width of MSD presents convergent trend with the increasing of Mach number, and indicates that the outlet Mach number should be improved properly by ensuring disappearance of overexpanding waves under the working pressure. It is illuminated that the Mach number will be convergent to a fixed position with the increasing of outlet Mach number. The veracity of simulation results and the validity of conclusion analysis are proved by contrasting validating of flow field visualization to the solved model.

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

### 1 引 言

激光切割质量主要受激光束、材料属性、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都起着至关重要的作用, 辅助气体压力与气体流动特性是影响切割质量和切割效率的重要因素<sup>[1~3]</sup>。当气流出口滞止压力与环境压力之比小于 3~4, 自由射流场中会产生普朗特-迈耶膨胀现象, 也被称为钻石激波结构; 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>[4~6]</sup>。在进行高压气体切割时流场中更容易形成马赫盘, 且气流出口马赫数会影响马赫盘的位置, 进而显著

影响激光切割质量和切割效率。

研究者对激光切割过程中高压流场结构中复杂波面进行了一定的研究。J. Duan 等<sup>[7~9]</sup>构造了激光切割过程的解析关系和数学模型, 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, 特别对超音速射流的激波结构进行了详细的描述。Ching-Chuan Mai 等<sup>[10,11]</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, 重点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, 并完成了对激光开槽过程中超音速流场结构的分析。Jehming Lin 等<sup>[12]</sup>

收稿日期: 2008-09-10; 收到修改稿日期: 2008-10-10

基金项目: 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, 博士, 副教授, 主要从事激光加工工艺与装备方面的研究。E-mail: hujun@sjtu.edu.cn

对包含凝固金属颗粒的超音速流场结构进行了简化构造,并对简化结构进行了数值仿真。F. Quintero 等<sup>[13]</sup>分析了激光束与喷嘴不同轴时的超音速流场结构,并对马赫盘的形成与弯曲作出了构造性分析。Srdja Zekovic 等<sup>[14]</sup>对四组合喷嘴的流场结构进行了仿真分析和试验验证。以上研究成果,都是从不同层面反映喷嘴结构和加工参数对流场中压缩波波面的影响,并未对激光切割过程中高压气体流场结构的马赫盘进行完整的描述。

本文建立了自由喷射边界与马赫数、马赫盘前后流场之间的解析关系,对出口静压为  $6.145 \times 10^5$  Pa,出口马赫数不同的自由喷射外流场进行数值仿真,并对仿真结果进行对比验证,揭示了马赫盘与喷嘴出口马赫数之间的关系。

## 2 解析模型建立与分析

根据气体流动理论,出口压力与滞止压力之间的关系满足

$$P_e = \left(1 + \frac{k-1}{2} M_e^2\right)^{-[k/(k-1)]} P_0, \quad (1)$$

式中  $P_0$  为滞止压力,  $P_e$  为出口静压,  $M_e$  为出口马赫数。

流场中要产生稳定的激波面,滞止压力必须大于  $1.893 \times 10^5$  Pa。激波实际上是流场中的强间断,使流场产生间歇的密度波,使高压辅助气体的压力能不能有效转化为动能。虽然国内外许多学者都试图通过构造超音速喷嘴<sup>[15]</sup>来消除强激波的影响,但是不论那一种喷嘴都只对设计压力以内的压力入流起作用,而当滞止压力大于设计压力时流场特性还会严重恶化<sup>[5]</sup>。当  $P_e \ll P_b$  或  $P_e \gg P_b$  时( $P_b$  为背压),出口射流场中不但存在强斜激波,而且存在正激波。对于过膨胀波,正激波也出现在两个强激波之间,形成于喷嘴出口处,因此在激光切割实际操作过程是不可能消除这种强间断结构。对于欠膨胀波,正激波将出现在两个强斜激波之间,形成于压缩波的收敛处,是组正激波。通常情况下,切割过程中射流场出口处是欠膨胀波,而且通过改进喷嘴与工件位置关系,可以减小强激波的影响<sup>[5]</sup>。

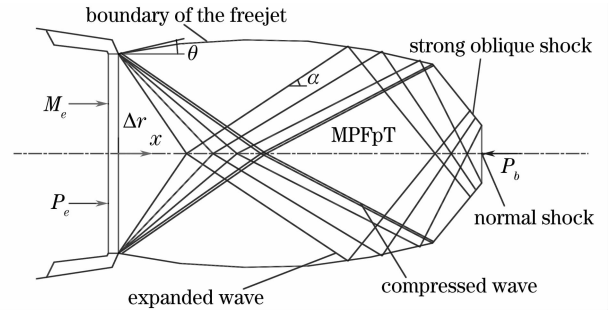


图1 超音速射流场分析结构

Fig. 1 Analytic structure of supersonic jet flow

出口气体形成正激波的解析作用模型,可由图1表示。当出口静压大于背压时,喷射气体发生径向膨胀,直至出口压力减小到背压,从而形成连续的膨胀扇,扇区包含在与自由边界成角的轮廓线内。整个膨胀过程可以认为是等熵过程,由于膨胀区的压力小于自由边界压力,膨胀波将发生反射,形成两族压缩波。整个过程可以由作用关系式表示

$$d\theta = \pm \frac{\sqrt{M^2 - 1} dM}{M \{1 + [(K-1)/2] M^2\}}, \quad (2)$$

$$\frac{dr}{dx} = \tan(\theta \pm \alpha), \quad (3)$$

$$\alpha = \arctan[(M^2 - 1)^{-1/2}], \quad (4)$$

$$\theta_i - \theta_{i-1} = \pm (\omega_i - \omega_{i-1}), \quad (5)$$

$$\omega_i = \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \arctan\left(\sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \sqrt{M_i^2 - 1}\right) - \arctan(\sqrt{M_i^2 - 1}), \quad (6)$$

式中  $\alpha$  为马赫角,  $\theta$  为轮廓流线角,  $\omega_i$  为第  $i$  点的普朗特-迈耶膨胀角,  $r, x$  为除以出口直径  $w$  的无量纲坐标。射流场中任一点马赫数由  $M_i$  由牛顿-辛普森算法确定<sup>[8]</sup>,根据等熵关系可以由马赫数表示流场中任一点的  $P_i, \rho_i, T_i$ ,表示关系为

$$\frac{P_i}{P_0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M_i^2\right)^{-[k/(k-1)]}, \quad (7)$$

$$\frac{r_i}{r_0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M_i^2\right)^{-[k/(k-1)]}, \quad (8)$$

$$\frac{T_i}{T_0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M_i^2\right)^{-1}, \quad (9)$$

斜激波前后的气体参数满足方程为

$$M_2^2 \sin^2(\beta - \delta) = \frac{M_1^2 \sin^2 \beta + 2/(k-1)}{[2k/(k-1)] M_1^2 \sin^2 \beta - 1}, \quad (10)$$

$$P_2/P_1 = [2k/(k+1)] M_1^2 \sin^2 \beta - (k-1)/(k+1), \quad (11)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{[(k+1)/2] M_1^2 \sin^2 \beta}{[(k-1)/2] M_1^2 \sin^2 \beta + 1}, \quad (12)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\{1 + [(k-1)/2]M_1^2 \sin^2 \beta\} \{[2k/(k-1)]M_1^2 \sin^2 \beta - 1\}}{[(k+1)^2/(2k-2)]M_1^2 \sin^2 \beta}, \tag{13}$$

$$\frac{P_{02}}{P_{01}} = \frac{\left\{ \frac{[(k+1)/2]M_1^2 \sin^2 \beta}{[(k-1)/2]M_1^2 \sin^2 \beta + 1} \right\}^{k/(k-1)}}{[2k/(k+1)]M_1^2 \sin^2 \beta - (k-1)/(k+1)^{1/(k-1)}}, \tag{14}$$

数字标号 1,2 表示斜激波作用波前和波后的状态参量。显然,正激波前后的状态参量比,也可以由(10)~(14)式表示,只不过气体入流方向与激波的夹角  $\beta=90^\circ$ 。

### 3 数值仿真的有效性验证

基于雷诺平均的 N-S 方程的 RNG  $k-\epsilon$  模型,采用 CFD 软件 Fluent 完成对高压气体作用下流场结

构的模拟计算。为了验证数值方法的正确性,与文献[4]中的可视化流场进行比较。由图 2 和 3 可以看出,可视化流场选择滞止压力为  $15 \times 10^5$  Pa,马赫数为 1 时的射流场结构,与仿真结果吻合较好。可见选择基于雷诺平均的 N-S 方程的 RNG  $k-\epsilon$  模型,使用于对超音速自由射流场的计算,参数设定合理,结论分析有效。

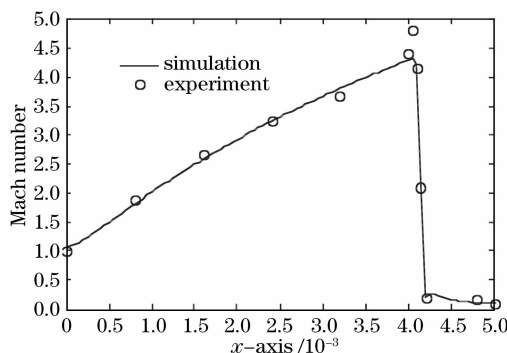
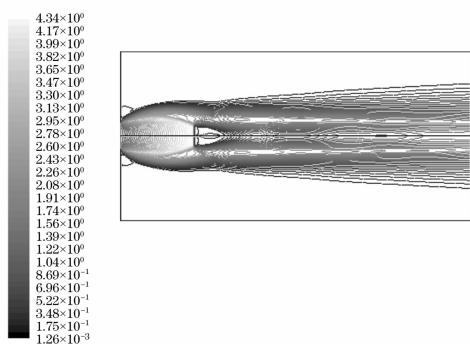


图 2 轴向马赫分布的仿真与试验结果比较

Fig. 2 Comparison of simulation and experimental result for Mach distribution of the central axis

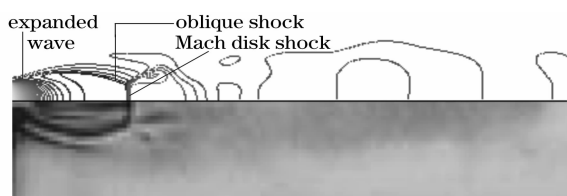


图 3 可视化流场与仿真结果比较

Fig. 3 Comparison of the flow visualization and simulation result

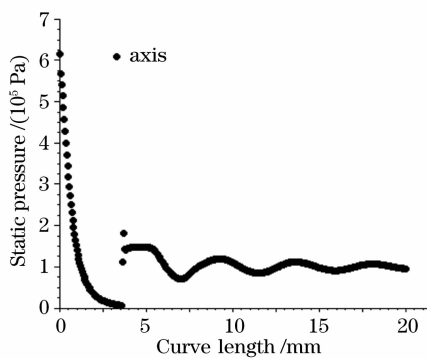
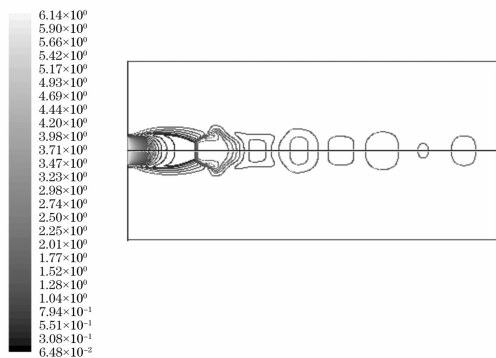


图 4 静压为  $6.145 \times 10^5$  Pa,马赫数 1 的压力等值线与轴线上的压力分布

Fig. 4 Pressure contours and pressure distribution of axis, static pressure is  $6.145 \times 10^5$  Pa and Mach number is 1

为  $115 \times 400$ , 结合文献[14]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。出口马

赫数分别设定为 1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2, 仿真结果如图 4~图 9 所示。

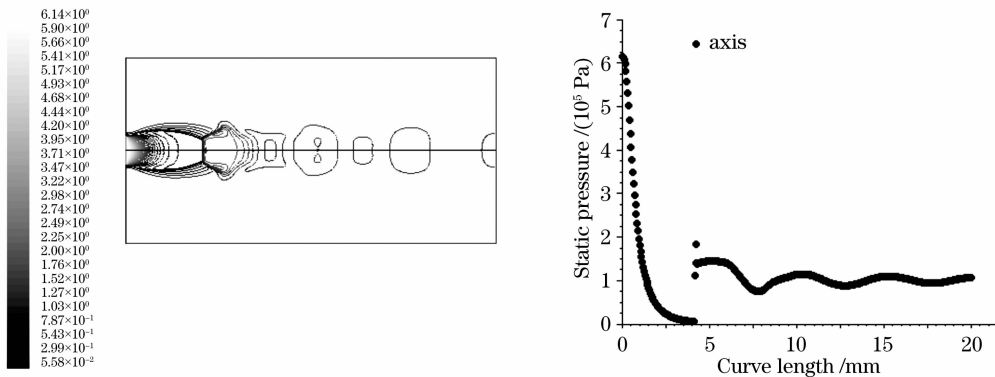


图 5 静压为  $6.145 \times 10^5$  Pa, 马赫数 1.2 的压力等值线与轴线上的压力分布

Fig. 5 Pressure contours and pressure distribution of axis, static pressure is  $6.145 \times 10^5$  Pa and Mach number is 1.2

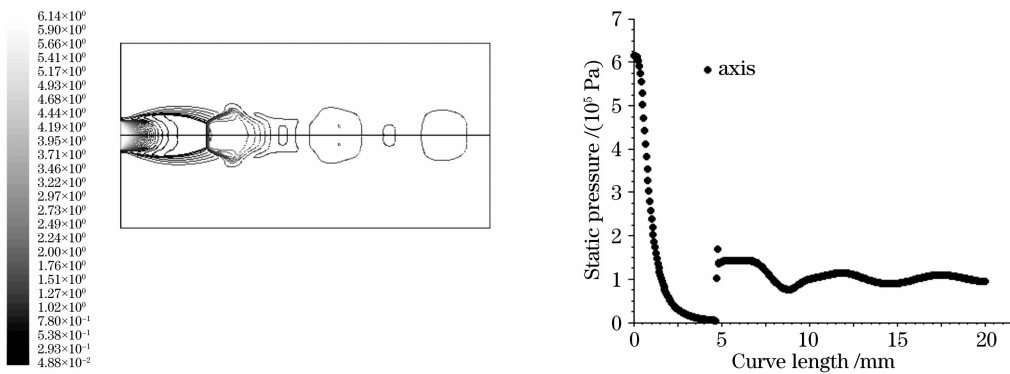


图 6 静压为  $6.145 \times 10^5$  Pa, 马赫数 1.4 的压力等值线与轴线上的压力分布

Fig. 6 Pressure contours and pressure distribution of axis, static pressure is  $6.145 \times 10^5$  Pa and Mach number is 1.4

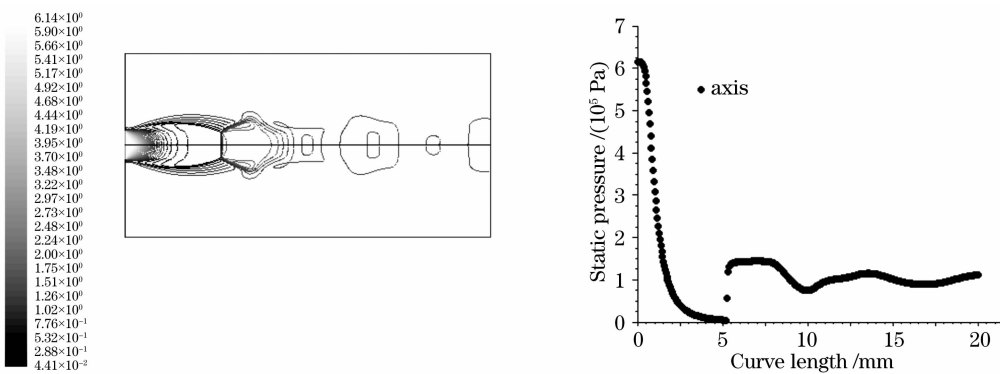


图 7 静压为  $6.145 \times 10^5$  Pa, 马赫数 1.6 的压力等值线与轴线上的压力分布

Fig. 7 Pressure contours and pressure distribution of axis, static pressure is  $6.145 \times 10^5$  Pa and Mach number is 1.6

图 4~图 9 可以看出马赫盘出现的位置随马赫数的增大而不断后移, 而且正激波的强度不断增加。从图 10 和图 11 可以看出, 在仿真的马赫数范围内 (1~2), 随着出口马赫数的增加, 马赫盘与喷嘴出口的距离和正激波的强度呈加速增加的趋势, 但是马赫盘的宽度呈现减小的趋势。因此在使用超音速喷嘴进行激光切割过程中, 如果限制了喷嘴与工件之

间的距离, 而且工作压力超过了设计压力<sup>[15]</sup>, 为了减小激波的影响可以适当提高出口马赫数。

从(2)~(6)式, 可知出口马赫数不断增大时, 马赫盘将收敛于一固定位置。实际上, 在出口静压为  $6.145 \times 10^5$  Pa, 马赫数为 2 时, 根据方程(1)可知, 需要给喷嘴提供  $30 \times 10^5$  Pa 以上的压力才能使马赫盘收敛于一固定位置, 激光切割不太可能用这么

高的压力。

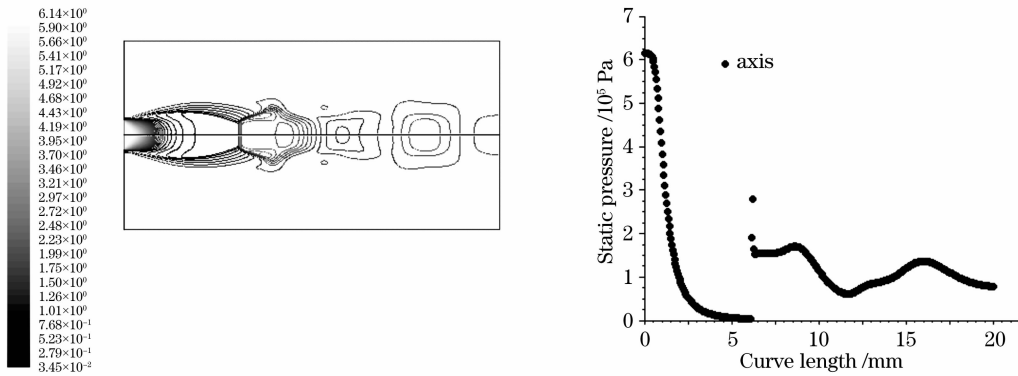


图 8 静压为  $6.145 \times 10^5$  Pa, 马赫数 1.8 的压力等值线与轴线上的压力分布

Fig. 8 Pressure contours and pressure distribution of axis, static pressure is  $6.145 \times 10^5$  Pa and Mach number is 1.8

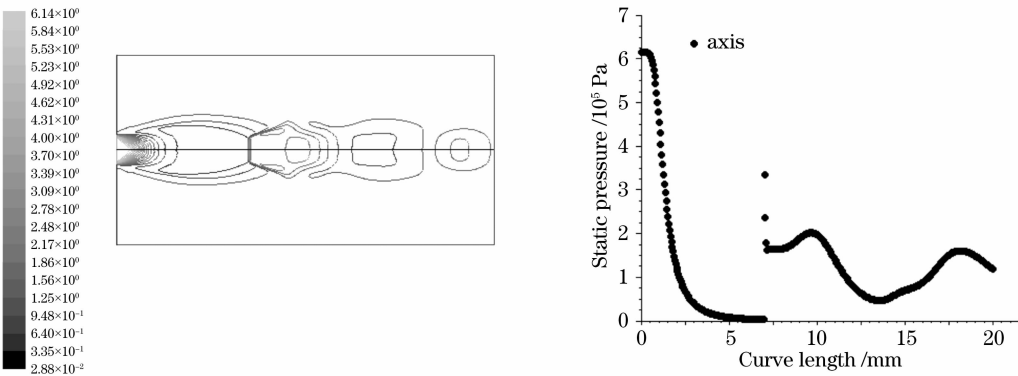


图 9 静压为  $6.145 \times 10^5$ , 马赫数 2 的压力等值线与轴线上的压力分布

Fig. 9 Pressure contours and pressure distribution of axis, static pressure is  $6.145 \times 10^5$  Pa and Mach number is 2

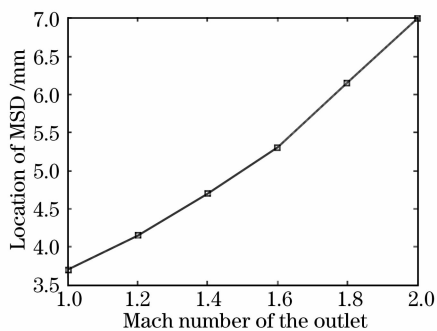


图 10 马赫盘位置与马赫数的关系

Fig. 10 Relationship between the location of MSD and Mach number

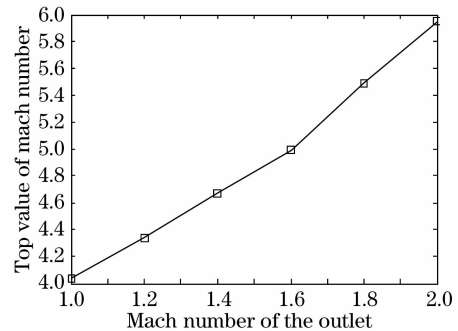


图 11 马赫峰值与出口马赫数的关系

Fig. 11 Relationship between top value of mach number and Mach number

### 5 结 论

从对出口静压为  $6.145 \times 10^5$  Pa, 马赫数为 1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2 时的射流场计算结果, 可以得出以下结论:

- 1) 在一定范围内, 马赫盘出现的位置随马赫数的增大而不断后移, 而且正激波的强度不断增加。
- 2) 计算结果表明, 随着出口马赫数的增加, 马

赫盘的宽度呈现出收敛趋势。因此在超音速喷嘴的设计中, 在保证常用工作压力不出现过膨胀的情况下应适当提高出口马赫数。

- 3) 实际切割过程中, 马赫数不可能无限增加, 因此马赫盘的位置不可能无限后移。随着出口马赫数不断增大, 马赫盘将收敛于一固定位置。

## 参 考 文 献

- 1 Liao Jianhong, Meng Hongyun, Wang Hongwei. Investigation and applications of fiber laser precision cutting system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(1): 133~136  
廖健宏,蒙红云,王红卫. 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): 133~136
- 2 Hu Jun, Guo Shaogang, Luo Lei *et al.*. Dynamic characteristic analysis of impinging jet in laser drilling[J]. *Chin. J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1250~1254  
胡俊,郭绍刚,罗磊等. 激光穿孔中辅助气体动力学性能分析[J]. 中国激光, 2008, **35**(8): 1250~1254
- 3 Li Xiangyou, Zeng Xiaoyan. Kerf roughness and quality control of laser precision cutting[J]. *Chin. 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
- 4 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]. *Optics & Laser Technology*, 1998, **30**: 497~509
- 5 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: Appl. Phys.*, 1999, **32**(13): 1469~1477
- 6 Kai Chen, Y. Lawrence Yao, Vijay Modi. Numerical simulation of oxidation effects in the laser cutting process[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 1999, **15**(11): 835~842
- 7 J. Duan, H. C. Man, T. M. Yue. Modelling the laser fusion cutting process: I. Mathematical modelling of the cut kerf geometry for the laser fusion cutting of thick metal[J]. *J. Phys. D*, 2001, **34**(14): 2127~2134
- 8 J. Duan, H. C. Man, T. M. Yue. Modelling the laser fusion cutting process: II. Distribution of supersonic gas flow field inside the cut kerf[J]. *J. Phys. D*, 2001, **34**(14): 2135~2142
- 9 J. Duan, H. C. Man, T. M. Yue. Modelling the laser fusion cutting process: III. Effects of various process parameters on cut kerf quality[J]. *J. Phys. D*, 2001, **34**(14): 2143~2150
- 10 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**(6): 479~486
- 11 Ching-Chuan Mai, Jehnming Lin. Supersonic flow characteristics in laser grooving[J]. *Optics & Laser Technology*, 2003, **35**(8): 597~604
- 12 Shih-Lung Lin, Jehnming Lin. Flow characteristics and micro-scale metallic particle formation in the laser supersonic heating technique[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(1): 53~60
- 13 F. Quintero, J. Pou, J. L. Fernandez *et al.*. Optimization of an off-axis nozzle for assist gas injection in laser fusion cutting[J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2006, **44**(11): 1158~1171
- 14 Srdja Zekovic, Rajeev Dwivedi, Radovan Kovacevic. Numerical simulation and experimental investigation of gas-power flow from radially symmetrical nozzles in laser - based direct metal deposition[J]. *International J. Machine Tools & Manufacture*, 2007, **47**(1): 112~123
- 15 H. C. Man, J. Duan, T. M. Yue. Design and characteristic analysis of supersonic nozzles for high gas pressure laser cutting[J]. *J. Materials Processing Technology*, 1997, **63**(1~3): 217~222