

文章编号: 0258-7025(2009)05-1233-06

激光切割超音速喷嘴的流场特性

阮鸿雁¹ 吕建军¹ 杨波² 王霄¹ 刘会霞¹

(¹ 江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013; ² 江苏昆山富士康电子有限公司, 江苏 昆山 215316)

摘要 为了得到具有优良的射流流场激光喷嘴,设计了一种组合型超音速喷嘴,建立了该喷嘴计算流体力学(CFD)分析所需的控制方程。其中湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 方程,计算网格采用三角形非结构网格。基于有限体积法对控制方程进行离散并采用耦合式求解器求解。利用 SIMPLEC 算法解决速度与压力耦合问题,进而实现对喷嘴流场分析。分析结果表明超音速喷嘴最佳入口压力就是其设计压力(7×10^5 Pa),此时其射流流场特性最好,适合于高速、大厚度激光切割。将 CFD 分析结果与已有纹影图实验方法的结果进行对比,发现二者具有较好的一致性,证明了 CFD 方法的可行性。

关键词 激光技术; 激光切割; 超音速喷嘴; 计算流体力学; 流场分析

中图分类号 TN249; TG485 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093605.1233

Analysis of Flow Field for Supersonic Nozzle in Laser Cutting

Ruan Hongyan¹ Lü Jianjun¹ Yang Bo² Wang Xiao¹ Liu Huixia¹

(¹ School of Mechanical Engineering Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)
(² Jiangsu Kunshan Foxconn. Ltd., Kunshan, Jiangsu 215316, China)

Abstract In order to obtain excellent gas jet from laser's nozzle, a combinatorial supersonic laser jet cutting nozzle is designed. The control equation for computational fluid dynamics (CFD) is also derived, where standard $k-\epsilon$ model is used for onflow. Using triangle unstructured grid for computing, applying finite volume algorithm to discretizing the control equation, the equation is solved by coupling solver. Velocity and pressure coupling problem is solved by applying SIMPLEC algorithm, and further more the jet field analysis is fulfilled. The analysis indicate that the optimum pressure-inlet is its designed pressure (7×10^5 Pa), under which the jet field performs best and so it can be sufficiently applied to cut thick workpiece with high velocity. Comparing the results of CFD analysis with that of image lab obtained, it is found that the two results have a quite good consistency. Thus, the CFD analyzing method is proved practical.

Key words laser technique; laser cutting; supersonic nozzle; computational fluid dynamics; gas field analysis

1 引 言

影响激光切割效率和质量的因素很多,其中切割头中喷嘴的形状及其产生的流场特性是影响激光切割效率和质量的关键因素之一^[1,2]。为了提高切割效率和质量必须严格设计喷嘴的形状,并对其产生的流场进行深入的研究。传统的激光切割喷嘴大部分都是平行型、圆锥型和会聚型,这些类型的气道是亚超音速或近超音速型,在切割厚板材时,这些喷嘴需工作在较高的辅助气体压力下,这时喷嘴流场会产生激

波现象,对切割质量和切割速度产生不良影响^[1~4]。现已证明,具有良好的空气动力学特性的超音速喷嘴是解决这一问题的一种新方法^[2,5~8]。它们更适合于高压辅助气体进行厚板的高速激光切割。国际上许多学者已尝试设计这类新型的超音速喷嘴^[9~12]。对于激光切割喷嘴切割性能的研究主要通过纹影图和压力测定这两种实验研究方法来进行^[6,13~21]。但在设计阶段通过计算机仿真^[22]来分析模拟所设计的激光切割喷嘴的流场特性和切割性能,从而进一步对喷嘴进行优化设计,当前研究的还很少。

收稿日期: 2008-05-22; 收到修改稿日期: 2008-08-26

作者简介: 阮鸿雁(1961—),男,副教授,主要从事流体力学传动与控制、激光加工与数值模拟等方面的研究。

E-mail: jianjun_lvzjy@126.com

本文用计算流体动力学(CFD)分析软件 Fluent 对所设计的一种组合型超音速喷嘴进行流场特性分析,为超音速喷嘴的优化设计提供依据。

2 超音速喷嘴的建模

为了使出口射流具有大的动量、好的均匀度、整洁的边界以及小紊流度低能量损耗,超音速喷嘴的每一部分必须严格以空气动力学为基础正确设计计算。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)和扩散区(超音速)。然而,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,超音速喷嘴应包括四部分:稳定段 L_0 , 收缩段 L_1 , 喉部, 扩张段 L_2 , 如图 1 所示(入口直径 $D_0=4.8$ mm, 出口直径 $D_1=1.6$ mm, 稳定段 $L_0=13$ mm, 收缩段 $L_1=10$ mm, 扩张段 $L_2=2.9$ mm, 总长=26 mm)。稳定段的长度 L_0 取决于实际情况,收缩段设计成维托辛斯基曲线,喉部直径的范围一般在1.0~2.5 mm之间,扩张段曲线利用 Foelsch(富尔士)方法设计。本文研究分析的超音速喷嘴的设计压力为 7×10^5 Pa,设计出口马赫数 Ma 为 2,喉部马赫数 Ma 为 1,气体比热 k 为 1.4。

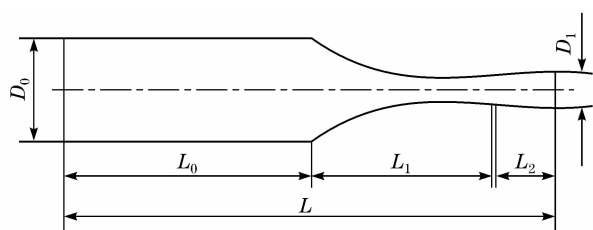


图 1 超音速喷嘴示意图

Fig. 1 Sketch map of supersonic nozzle

利用 Pro/E 进行喷嘴三维建模,Pro/E 模型的参数化功能,大大方便了对出口马赫数不同要求的喷嘴进行系列化设计,其轮廓图及三维模型如图 2 所示。

3 控制方程

超音速喷嘴进行数值分析时采用的控制方程为连续方程

$$\partial(\rho)/\partial t + \partial(\rho u_i)/\partial x_i = 0,$$

动量方程(Navier-Stokes 方程)

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j} \right) + S_i,$$

其他变量的输运方程

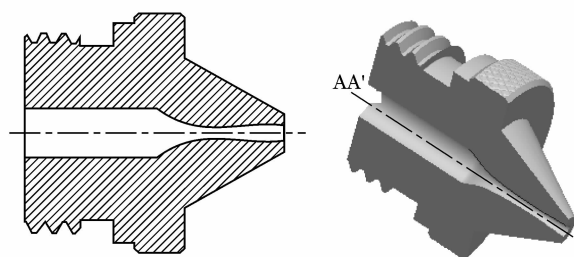


图 2 超音速喷嘴示意图

Fig. 2 Schematic of supersonic nozzle

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} - \rho \overline{u_j \phi'} \right) + S.$$

湍流粘度 μ_t 可以表示为 k 和 ϵ 的函数,即

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon},$$

式中, C_μ 为经验常数。

湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 方程, k 和 ϵ 是两个基本未知量,与之相对应的运输方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k, \\ \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \cdot \\ &\quad (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon, \end{aligned}$$

式中, G_k 为由平均速度梯度引起的湍流动能 k 的产生项, G_b 为由于浮力引起的湍流动能 k 的产生项, Y_M 代表可压湍流中脉动扩张的贡献, $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ 和 $C_{3\epsilon}$ 为经验常数, σ_k 和 σ_ϵ 分别为与湍流动能 k 和耗散率 ϵ 对应的普朗特(Prandtl)数, S_k 和 S_ϵ 为用户定义的源项。

4 数值计算与求解方法

基于有限体积法对控制方程进行离散,采用耦合式求解器求解,利用 SIMPLEC 算法解决速度与压力的耦合问题进而对流场进行数值计算。近壁区采用标准壁面函数法进行处理。计算域的入口取在喷嘴的上游,网格采用三角形非结构网格,喷嘴出口附近网格进行了加密。计算域入口采用入流条件,给定总压、总温和速度方向;出口采用出流条件,给定环境压力;喷嘴轴线处采用轴对称条件;人工边界采用无反射边界条件,如图 3 所示。

5 超音速喷嘴射流特征的数值计算结果与分析

为了获得较高的切割速度和较好的切割质量,

要求喷嘴所产生的流场在工件表面上的切割压力尽可能地高且随喷嘴和工件表面之间的距离的变化波动要小。在流场中最好不存在激波或在供气入口压

力很高时才产生激波,同时流场紊流要小。

设计超音速拉瓦尔喷嘴(Laval Nozzle)是为了获得超音速气流,并且喷嘴出口的气流均匀一致、边界整齐、紊流度小,流场中不存在激波。

5.1 压力与速度分布

对于超音速喷嘴,研究了入口压力在设计压力周围变化时对出口射流的影响,对设计压力为 7×10^5 Pa的超音速喷嘴其出口射流在入口压力分别为 3×10^5 Pa, 5×10^5 Pa, 7×10^5 Pa和 9×10^5 Pa时的出口射流的静压和速度分布如图4~7所示。

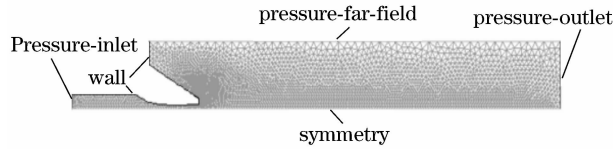


图3 超音速喷嘴计算域的网格划分及边界类型

Fig.3 Computational domain of supersonic nozzle mesh and boundary type

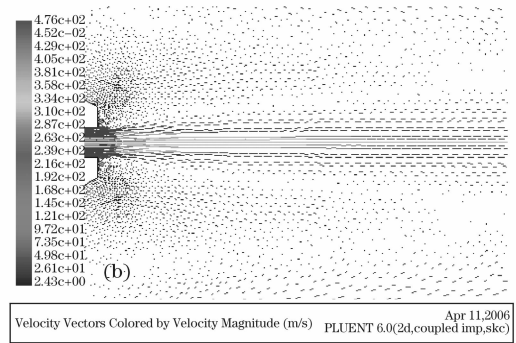
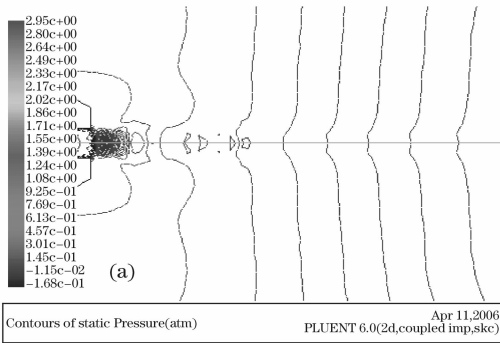


图4 $P_0 = 3 \times 10^5$ Pa 时超音速喷嘴出口的射流特性 (a)射流的静压分布; (b)射流的速度分布

Fig.4 Configuration of gas jet from supersonic nozzle tip for 3×10^5 Pa jet pressure

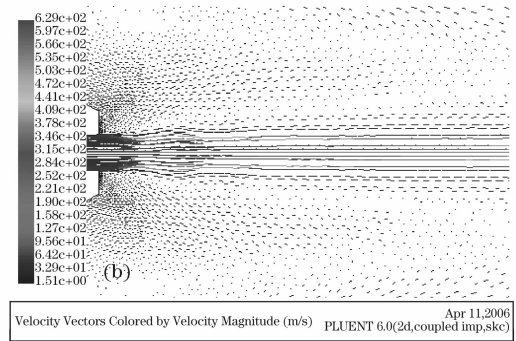
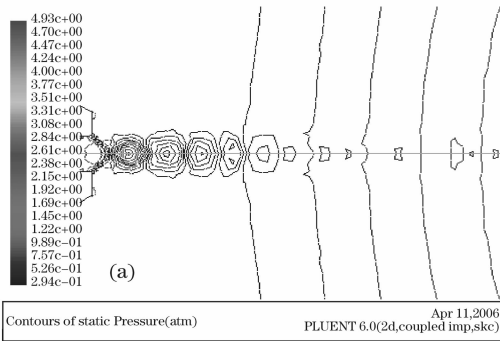


图5 $P_0 = 5 \times 10^5$ Pa 时超音速喷嘴出口的射流特性

Fig.5 Configuration of gas jet from supersonic nozzle tip for 5×10^5 Pa jet pressure

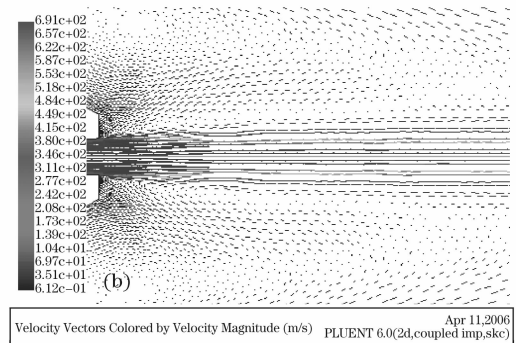
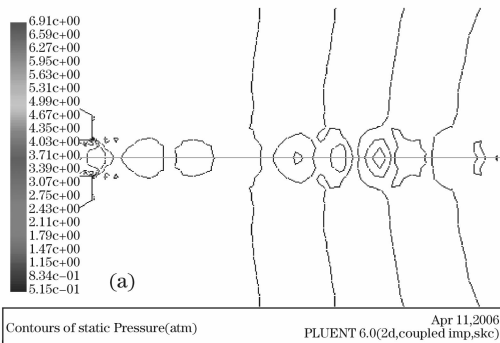


图6 $P_0 = 7 \times 10^5$ Pa 时超音速喷嘴出口的射流特性

Fig.6 Configuration of gas jet from supersonic nozzle tip for 7×10^5 Pa jet pressure

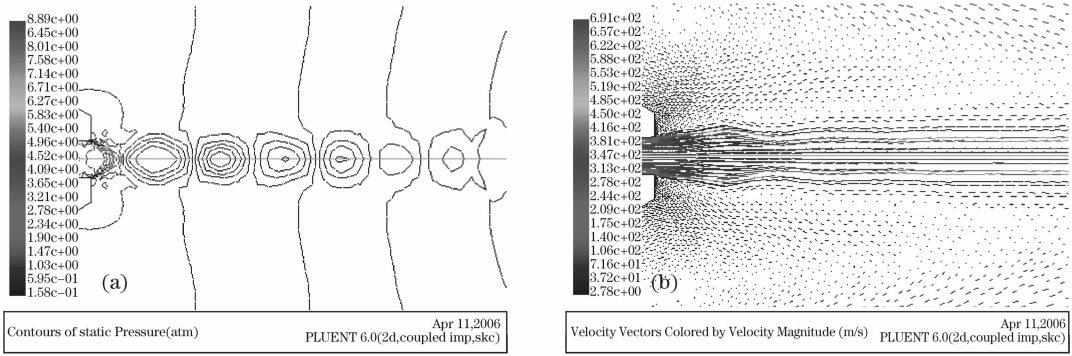


图 7 $P_0=9 \times 10^5$ Pa 时超音速喷嘴出口的射流特性

Fig. 7 Configuration of gas jet from supersonic nozzle tip for 9×10^5 Pa jet pressure

随着入口压力的变化,超音速喷嘴轴线上出口射流速度和压力分布如图 8,图 9 所示。

压力值快速上升,上升以后,中心线压力又开始下降并小于出口压力。随着工作压力 P_0 的增加,气流方向与中心线最大夹角有所减小,喷嘴出口气体射流的速度将会有显著增加,并最终到达设计的马赫数。 $P_0=3 \times 10^5$ Pa 时,喷嘴出口射流速度均匀,与轴线夹角较大,且速度值较小; $P_0=5 \times 10^5$ Pa 时,气体射流的中心线速度仍然保持和轴线平行,气流方向与中心线最大夹角有所减小,速度大小也有所增加。中心线压力分布从出口压力值快速下降。入口压力 P_0 值越高,中心线压力下降得就越大。下降以后,中心线压力又开始上升并大于出口压力。

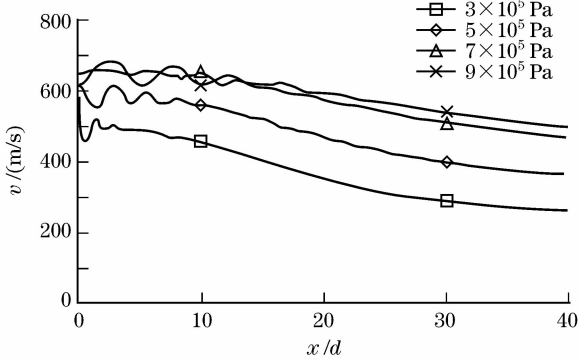


图 8 不同入口压力下超音速喷嘴轴线上出口射流的速度分布

Fig. 8 Centerline axial velocity distribution of gas jet from supersonic nozzle tips for different pressure-inlet

$P_0=7 \times 10^5$ Pa 时,气体射流膨胀准确,射流边界与喷嘴轴线平行,几乎不存在激波现象,气体射流轴向上的速度和静压分布最为稳定,射流速度到达设计的马赫数。

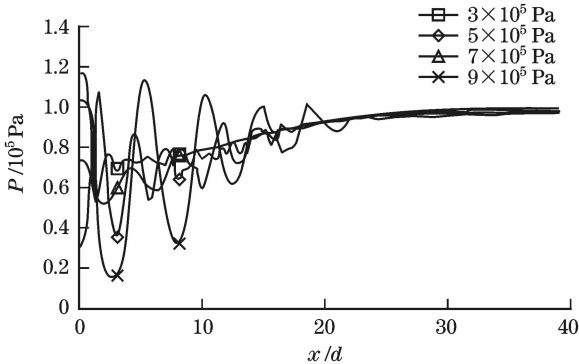


图 9 不同入口压力下超音速喷嘴轴线上出口射流的静压分布

Fig. 9 Centerline axial static pressure distribution of gas jet from supersonic nozzle tips for different pressure-inlet

从图 4~9 中可以看出对于设计压力为 7×10^5 Pa 的超音速喷嘴,当入口压力 $P_0 < 7 \times 10^5$ Pa 时,喷嘴射流为过膨胀气体 ($P_e < P_b$),射流必须转向内,到达另一侧边界后被反射;中心线压力从出口

当入口压力大于设计压力 7×10^5 Pa 时,喷嘴射流为未充分 ($P_e < P_b$) 膨胀气体射流,超音速喷嘴射流的速度并不增加,而速度方向和喷嘴轴线的最大夹角不断增加,气体紊流度增加。中心线压力从出口压力值快速下降,下降以后,中心线压力又开始上升并大于出口压力。

总之,对于设计压力为 7×10^5 Pa 的超音速喷嘴,喷嘴压力入口偏离设计压力值越大,气体流场就越紊乱,激波宽度越大,喷嘴轴线上的射流速度和静压力的波动越大;而入口压力为设计压力时其射流流场特性最好,因此对于已经设计好的超音速喷嘴其最佳入口压力就是其设计压力。

5.2 数值计算与实验结果对比

为了验证数值方法的正确性,与文献[22]中的实验结果进行比较。超音速喷嘴在入口压力分别为 7×10^5 Pa 和 15×10^5 Pa,出口马赫数为 2 的纹影图[22]和数值计算结果的比较如图 10 和图 11 所示。

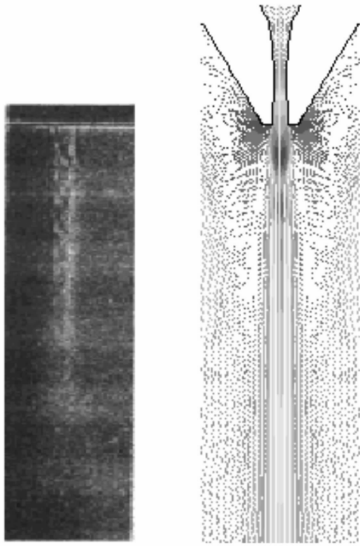


图 10 $P_0 = 7 \times 10^5$ Pa 设计压力为 7×10^5 Pa 时, 超音速喷嘴射流纹影图和数值计算结果对比

Fig. 10 Comparison of shadowgraph of the gas jet and numerical simulation result from supersonic nozzle for $P_0 = 7 \times 10^5$ Pa and design pressure of 7×10^5 Pa

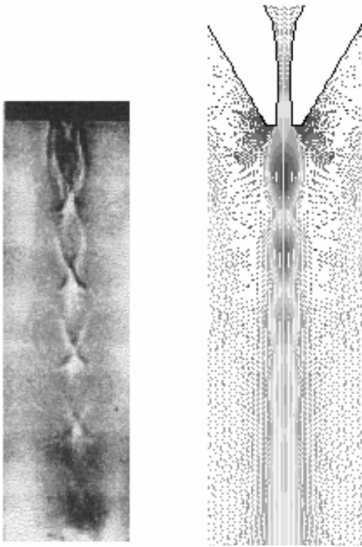


图 11 $P_0 = 15 \times 10^5$ Pa 设计压力为 7×10^5 Pa 时, 超音速喷嘴射流纹影图和数值计算结果对比

Fig. 11 Comparison of shadowgraph of the gas jet and numerical simulation result from supersonic nozzle for $P_0 = 15 \times 10^5$ Pa and design pressure of 7×10^5 Pa

对比得知 Fluent 计算和纹影图实验方法的结果取得良好的一致性, 并且表明超音速喷嘴其最佳入口压力就是其设计压力, 说明本文的数值分析是可行的。

6 结 论

利用 Fluent 计算超音速喷嘴的射流流场, 在此

基础上对高入口压力条件下喷嘴射流流场特性做了对比研究, 对于在设计压力工作下的超音速喷嘴流场特性总结如下:

1) 出口射流保持较好的平行射流边界。设计的超音速喷嘴气体射流的最大平均轴向动量大于亚音速气体射流。

2) 气体射流在压力、动量及密度分布方面具有良好的均匀性。由此可以推断喷嘴具有较大的平衡位置变动范围, 较强的去除熔渣的能力。去除熔渣的能力提高使得气体消耗量降低, 从而提高激光切割的质量和效率。

3) 为了保持 $P_e = P_b$, 入口压力 P_0 也必须固定为设计压力值。任何给定压力值较大的偏离设计压力都会导致气体射流特性的恶化。

总之, 喷嘴内部形状及其入口压力对其射流特性具有重要影响, 本文所设计的超音速喷嘴在设计压力下工作, 其出口马赫数等于理论值, 其射流边界整齐, 气流动量高, 流速、压力及密度分布均匀, 有利于提高激光切割的能力、效率和质量, 并降低切割成本, 适合高速、大厚度及三维激光切割。

参 考 文 献

- 1 H. C. Man, J. Duan, T. M. Yue. Dynamic characteristics of gas jets from subsonic and supersonic nozzle for high pressure gas laser cutting[J]. *Optics & Laser Technology*, 1998, **30**: 497~509
- 2 H. C. Man, J. Duan, T. M. Yue. Design and characteristic analysis of supersonic nozzle for high gas pressure laser cutting [J]. *Journal Materials Processing Technology*, 1997, **63**: 217~222
- 3 Chen Yijian. A study on design of the supersonic nozzles for laser cutting and cutting technology[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 1999
陈一坚. 激光切割超音速喷嘴设计及切割工艺研究[D], 武汉: 华中理工大学, 1999
- 4 Fieret, M. J. Terry, B. A. Ward. Over view of flow dynamics in gas-assisted laser cutting[C]. *SPIE*, 1987, **801**: 243~250
- 5 Chen Yijian, Liu Jianhua, Hu Xiyuan. Summary of laser cutting nozzles and analysis of flow field [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 1999, (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]. *宇航工艺材料*, 1999, (2): 17~20
- 6 Doris Leidinger, Dieter Schuäcker. Investigations of the gas flow of conic cylindrical and supersonic nozzles in a laser cut kerf[C]. *SPIE*, 1995, **2502**: 577~582
- 7 He Xinmin. Selfimprove cutting nozzle for high efficiency[J]. *Steel Construction*, 1997, **12**(3): 57~58
贺新民. 自制高效割嘴[J]. *钢结构*, 1997, **12**(3): 57~58
- 8 H. C. Man, J. Duan, T. M. Yue *et al.*. Design of supersonic nozzle for laser cutting with high pressure gas[C]. *Section B-ICALEO*, 1997: 118~127
- 9 K. Chen, Y. L. Yao, V. Mode. Gas dynamic effects on laser cut quality[C]. *Section C-ICALEO*, 1999
- 10 W. Masuda, E. Moriyama. Aerodynamic characteristic of under

- expanded coaxial impinging jets[C]. *JSMEIntSerB*1994; AIAA-79-1526
- 11 Gaurav Singhal, P. M. V. Subbarao, R. Rajesh *et al.*. Realization of an advanced nozzle concept for compact chemical oxygen iodine laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**:577~585
- 12 W. Masuda, E. Moriyama. Aerodynamic characteristics of under expanded coaxial impinging jets[C]. *JSME Int JSerB*, 1994; AIAA-79-1526
- 13 J. Duan, H. C. Man, T. M. Yue. Behaviour of supersonic and subsonic gas jets inside laser cut kerfs[C]. *Section B-ICALEO*, 1997:27~36
- 14 Hideyuki Horisawa, Takashi Fushimi, Takuya Takasaki *et al.*. Flow characterization in laser cutting kerf[C]. *CLEO/Pacific Rim'99/P1*. 19:358~359
- 15 Hideyuki Horisawa, Takashi Fushimi, Takuya Takasaki *et al.*. Impinging jet characterization in a laser cut kerf[C]. *SPIE*, 2000, **3888**:644~653
- 16 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: Appl. Phys.*, 2001, **34**:2135~2142
- 17 Yu. G. Zhulev, A. G. Nalivaiko. Gas assisted gas flow in a laser cut simulator[C]. *SPIE*, 1998, **3688**:152~156
- 18 Aron D. Brandt, Steven D. Scroggs. Effect of nozzle orientation on the gas dynamics of inert-gas laser cutting of mild steel[C]. *Proceedings of ICALEO*, 1996-Section C:10~17
- 19 C. H. Sipavichyus, P. Vaitiekunas, E. Milutis. On determination of critical characteristics and supersonic nozzle in a laser cutting[C]. *SPIE*, 1996, **2713**:259~266
- 20 J. Duan, H. C. Man, 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**:1469~1477
- 21 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**:479~486
- 22 A. Ward. Supersonic characteristics of nozzles used with laser for cutting [C]. *Proceedings of the medicine & Biology Symposium, ICALEO'84 Boston, MA, USA 1985*, 43:91~101