

文章编号: 0253-2239(2008)03-0522-06

底部气流对 CO₂ 激光切割硅钢切口质量的影响

洪 蕾¹ 米承龙¹ 李力钧²

(¹ 上海海事大学机械系, 上海 200135; ² 湖南大学机械系, 湖南 长沙 410082)

摘要 激光切割相对冲压及线切割工艺具有自由度大、加工效率高、不会影响铁心质量等优点,但由于残渣及切口粗糙问题一定程度上影响了激光切割硅钢片的质量和范围。通过采用在工件底部增设辅助侧吹喷嘴,控制熔渣流向,保证成品切割质量激光切割工艺,试验证明,合理控制工艺参量,可获得良好效果。利用有限元法进一步对工件底部气流状况进行了数值模拟,分析了流动过程中在不同的角度和流速下光斑移动和气流场变化的情况,初步确定工件底部侧吹气流以 20°吹入的辅助侧吹工艺,为进一步合理控制熔渣流向获得光滑的精细切口提供了实践和理论依据。

关键词 激光技术; 氧助激光切割; 侧吹气流; 硅钢片; 熔渣

中图分类号 TG485 **文献标识码** A

Influence of Gas Flow under Workpiece in CO₂ Laser Cutting Silicon Steel

Hong Lei¹ Mi Chenglong¹ Li Lijun²

(¹ Mechanical Engineering Department, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China)
(² Mechanical Engineering Department, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract Compared with the traditional blanking technology such as punching and linear cutting, the laser cutting technology has many advantages. For example, it has large freedom and high working efficiency. It will not cause such problems that will affect the quality of iron core as injuries of insulation, extrusion of edge, and so on. But during the laser cutting process, the generation of dross and the rough cutting edge limit its application. A new laser cutting technology is proposed which uses an additional nozzle under the workpiece to form lateral gas flow and control the flowing direction of the slag gas. The experiments prove that glossy and dross-free kerfs are obtained by controlling the technical parameters reasonably. The gas flow under the workpiece is simulated by finite element method (FEM). The variety of pneumatic fields when the additional nozzle is in different angle and flow velocity is analyzed, and the nozzle angle of 20° is preferred, which provide experimental and academic basis for controlling the flowing direction of the slag gas and achieving glossy kerfs.

Key words laser technique; laser cutting aided by oxidation reaction; lateral gas flow; silicon steel sheet; molten slag

1 引 言

硅钢片是制造变压器、继电器等机电和电子产品的重要材料^[1]。激光切割相对冲压及线切割工艺具有自由度大、加工效率高、不会影响铁心质量等优点。激光切割普通碳钢薄板工艺已近成熟,切口质量可得到较好控制。但是对于含有较高 Si、Cr、Ni 等合金元素的硅钢,常规氧助激光切割工艺容易产

生挂渣和飞渣现象^[2,3],切口大而粗糙,无法在精细切割领域广泛应用。采用高压高纯度氮气或惰性气体辅助激光切割工艺造成切割效率降低和生产成本提高,影响其广泛工业应用。所以如何解决去渣问题对于激光精细切割技术有重要意义。本试验目的在于通过在工件底部增设辅助侧吹喷嘴,控制熔渣流向,调整工艺参量,保证成品切割质量,实现高效

收稿日期: 2007-07-11; 收到修改稿日期: 2007-10-09

基金项目: 上海市高等学校科技发展基金重点项目(07ZZ101)、上海市科技启明星项目(07QA14027)和上海市重点学科建设项目(T0601)资助课题。

作者简介: 洪 蕾(1972—),女,浙江人,副教授。主要从事激光加工技术方面的研究。E-mail: leihong@cle.shmtu.edu.cn

高质量激光切割硅钢片。

2 试验装置

激光切割设备采用 Trumpf TC L 4030 CO₂ 激光切割机,激光器输出光束直径为 10 mm TEM₀₀ 的激光束,输出功率为 1800~4000 W 可调。采用飞行光路系统,经计算机数控(CNC)控制焦点,最大切割速度可达 85 m/min,位移精度为 0.02 mm。使用 127 mm 聚焦镜,焦点光斑直径为 0.1 mm,吹气喷嘴直径为 2 mm。

试验所用工件材料选用 0.5 mm 厚, Si 含量为 2.7% 的硅钢片,其它元素含量见表 1。

表 1 硅钢片的化学成分(质量分数)

Table 1 Composition of silicon sheet (mass fraction)

Element	Content	Element	Content
Si	2.7	S	0.02~0.03
C	0.04~0.55	P	0.03~0.04
Mn	0.03~0.06		

3 激光切割硅钢片工艺试验

3.1 底部侧吹熔渣激光切割硅钢片工艺试验方法

氧助激光切割工艺中,氧化反应供给的热量约为激光切割所需总能量的 2/3 以上^[4,5],切割所需激光功率大幅度降低,这是比较惰性气体或氮气辅助切割的最大优势。但在切割硅钢片过程中由此产生大量具有较大粘滞系数,不易被普通喷嘴辅助切割气体吹除的 SiO₂ 和铁硅氧化物杂质。因此,试验采用氧助激光切割,在同轴辅助切割气体之外,在工件底部增设侧吹除渣装置,形成侧吹气流控制熔渣流向,保证成品切割质量,既利用氧化反应放热提供的大量热源以降低激光功率,又获得了理想的精细切口,实现高效高质量激光切割硅钢片。

试验研究表明:常规激光切割过程中采用的同轴气流,用来将氧化熔融物吹离切口,同轴气流穿过切割缝隙并通过切割板料时,突然的拐角使得部分气流产生了向外回旋,该部分气流推动部分熔融的残渣粘接在板料的切缝旁边,如图 1 所示。

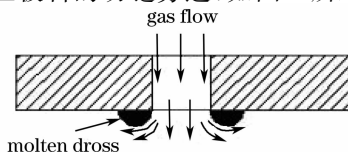


图 1 激光同轴切割产生的回旋气流与残渣

Fig. 1 Rotating gas flow and molten dross in traditional laser cutting process

传统喷嘴在较高供气压力下喷射出的气流紊度大,在气体流场中会产生激波^[4,5]。如果喷嘴和工件表面之间存在正激波,在喷嘴和工件表面之间的流场中将产生涡流,其旋转方向和切缝中的熔化金属及碎屑排出的方向相反,使得熔化金属及碎屑排出变得困难。

采用纵列喷嘴切割法^[3]或拉伐儿喷嘴切割法^[4]增加了切缝气流的流速,可迅速将熔融的残渣吹除,但是气流再大也会在底部形成回旋气流,无法完全避免残渣粘接在底板上。而底部侧吹除渣法是通过额外设置在板材底部的侧向熔渣喷嘴,使工件底部能形成稳定的层流,从而推动熔渣向一侧移动,控制粘渣流向,直接吹除挂在底板上成品部分的粘渣。

此方案基于下述思想:在激光切割中往往存在两个性质截然相反的部分,一部分是有用的零件切口部分材料,另一部分是切下的废料。因此熔渣喷嘴的作用是将所有产生的熔渣吹向废料一侧,如图 2 所示,熔渣喷嘴细节图如图 3 所示。

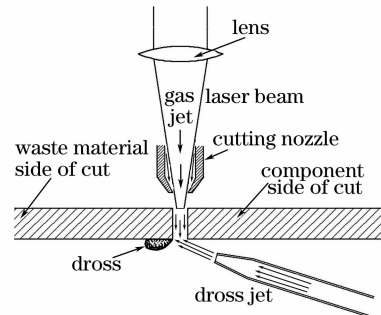


图 2 底部侧吹方案原理图

Fig. 2 Principle of lateral gas flow under workpiece

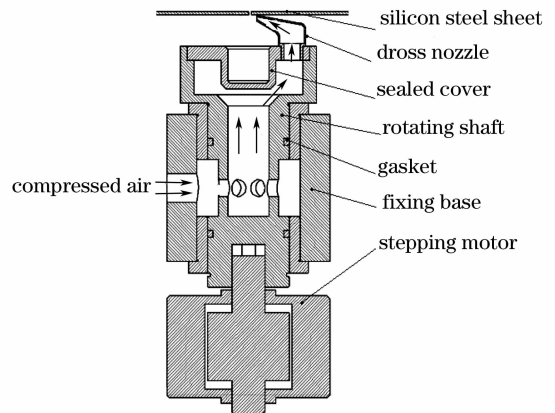


图 3 熔渣喷嘴细节图

Fig. 3 Detail of the dross nozzle

3.2 试验结果与讨论

试验证明,在此装置作用下,氧化反应生成的熔融态氧化物杂质可最大限度地被吹向指定方向。试

验中同轴辅助切割气体为氧气,气体压力降低为 100 kPa,熔渣喷嘴气体采用压缩空气,压力为 300 kPa,喷嘴角度与工件底面成大约 20° 。当激光功率为 400 W,切割速度为 3 m/min 时,熔渣完全吹向了废料部分而获得光滑的无熔渣的零件部分,如图 4 所示,此时在同样的切割条件下,试件某一段切缝采用熔渣喷嘴而获得良好的切割效果,没有熔渣喷嘴时的切割效果就很不理想。此外,当喷嘴角度与工件底面大约为 5° 和 45° 时,其他切割工艺参

量不变,切口质量的改善不明显。由此可见,在发生氧化反应生成熔渣同时,合理控制工件底部气流,可以有效去除熔渣。

从图 4 可见,底部侧吹可以将熔渣吹向一侧,但熔渣仍然留在钢板上。因此所采用的底部侧吹喷嘴除渣装置在数控工作台控制下,具备二维运动功能。当切割一定的图案时,熔渣喷嘴可适时调整位置,将熔渣吹向废料一侧。

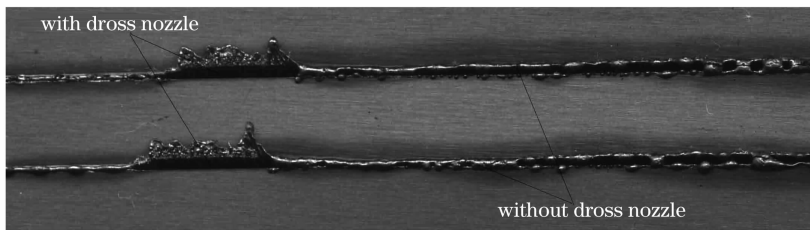


图 4 试件切口照片($\times 5$)

Fig. 4 Photograph of specimen ($\times 5$)

当 TEM₀₁ 模式激光切割 0.5 mm 硅钢片时,用高压高纯氮气作为辅助切割气体切断材料所需要激光功率为 800 W,用氧气时所需要的功率为 500 W,而采用底部侧吹装置时所需要的功率仅为 400 W,而且切割速度大幅度提高,从 1 m/min 到 3 m/min。具体参量见表 2。

表 2 激光功率和切割速度随辅助气体改变参量

Table 2 Change of laser power and cutting speed with aiding cutting gas

	N ₂	O ₂	O ₂ + dross nozzle
Cutting speed / (m/min)	1	1.5	3
Laser power / W	800	500	400

激光切割的明显优势之一是其柔性,可以切割任何平面复杂形状。采用底部侧吹喷嘴除渣装置,激光切割机受数控工作台的控制,激光喷嘴与熔渣喷嘴在工作过程中初步实现了同轴、同步,激光切割与残渣的吸附不受激光切割路径的影响。但是在激光切割钢板时要求在底部同一位置加侧吹装置并保证切割时同步将削弱其柔性,对于简单形状的切缝较为有利。为在目前大量使用的标准激光切割机上推广使用,仍需进一步改进设计,增强其柔性。

4 数值模拟分析

激光切割过程中,材料在激光的高温辐照下成为具有一定粘性的熔融流,并具有层流和紊流两种流动形态特征。一直以来人们普遍认为,激光功率

和切割速度等工艺参量是影响加工质量的主要因素^[5~7]。但是,研究表明^[8],加工过程的外部干扰,例如辅助气流的扰动、加工环境气流的变化、加工表面的变化等,都可能成为引起紊流形成的直接原因,而紊流的形成又直接导致多种类型加工表面质量的形成,最终影响了工件的表面质量。因此,一方面要根据有关数学模型,合理选择激光功率和切割速度等工艺参量,尽可能增加材料对能量的吸收利用率;另一方面尽可能保证相对稳定的加工环境,减少干扰源,减少或降低熔化切割过程中引发猝发现象的各种因素,避免发生紊流过程。

通常用雷诺数来判断层流和湍流^[9]。当雷诺数小于 2000 时,圆管内的流动是层流;大于 4000 时为湍流;介于两者之间时,则处于由层流向湍流转变的不确定状态。在激光切割中,喷嘴直径大于切口直径。其气流作用区域为切口长方形和半圆形相交。对于这种截面形状,当量直径可按截面积的四倍和截面周长之比计算^[10]。经计算,标准状态下气体密度为 1.225 kg/m³,气体平均速度为 4.915~58.976 m/s,动力粘度 $\mu=1.7894 \times 10^{-5}$ kg/(m·s)。取激光喷嘴直径为 1~1.5 mm,切缝宽度为 0.1~0.5 mm,面积为 0.2628~0.7676 mm²,切面周长为 1.257~3.57 mm,得到的雷诺数范围为 70~3472。

由此可知,在切割缝里的气流处于层流或者由层流向湍流转变的不确定状态。这种层流和湍流的出现都是随机的,切割断面瞬时的流速呈现相当复

杂的状况,切割得到的平面不平整,呈现无规则的条纹,存在大量熔渣。

激光切割中同轴气流的吹入和底部气流的吸出都是控制边界层分离的手段,同时也对边界层流动的稳定性有影响。一般来说^[11],气流的吹入促使区域流体不稳定,而气流的吸出增加区域气体流动的稳定性。所以所设计的结构,一方面,能够增加气体在切割区域的流动压力,使气体流动稳定在某一稳定状态,避免局部气压增高,发生气流密度场的变化而导致激光切割区域功率的变化;另一方面可根据有关气流模拟,合理选择激光功率和切割速度,尽可能实现加工过程的稳定,减少猝发现象,以获得切割面平整、光滑、无裂纹,切割下表面无熔渣附着的成品。

选用 RNG k-ε 湍流模式来封闭 N-S 方程,利用有限元法对底部的气流进行模拟^[9]。网格采用非结构网格。

可压缩的二维轴对称流动满足柱坐标系下的 N-S 方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E_u}{\partial x} + \frac{\partial F_u}{\partial r} - \frac{\partial E_v}{\partial x} - \frac{\partial F_v}{\partial r} + \frac{H}{r} = 0,$$

式中 $Q = (\rho, \rho u, \rho v, e)^T$, E_u, F_u 分别为两个坐标方向的无粘通量, E_v, F_v 分别为两个坐标方向的粘性通量, H 为源项, F_u, E_v, F_v 和 H 的具体定义见文献^[12]。

利用有限元分析软件 ANSYS 进行气流场的模拟。各种不同情况下计算条件取为一致,计算域的入

流边界取在喷嘴的上游,计算域的入口采用入流条件,给定总压、总温和速度的总方向,出口采用出流条件,给定环境压力、对称轴处采用轴对称条件,人工边界用无反射边界,固壁处采用无滑移边界条件^[13]。

当保护气体的流动维持在层流状态时。一方面可以获得对挂渣清除的最好效果,另一方面可以最大程度地减少因为侧吹而增加同轴喷嘴气体压力。因此,通过数值模拟,可以求解出在层流状态、对气流场密度梯度进行仰制的最佳方案,从而获得最佳的侧吹气流角度、方向和最佳气流量,获得最佳的无挂渣效果。

当同轴气流量为 10 L/min,底部侧吹喷嘴的气流量为 30 L/min,选取三组喷嘴与水平方向不同角度的情况进行模拟,研究各种情况下气体扰流的气流场气动参量的影响。图 5、图 6 和图 7 分别表示喷嘴角度与水平方向夹角 α 为 5°、20°和 45°的情况。

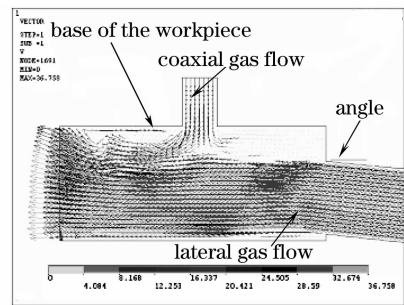


图 5 5°时的整体效果图

Fig. 5 Simulation result of the angle about 5°

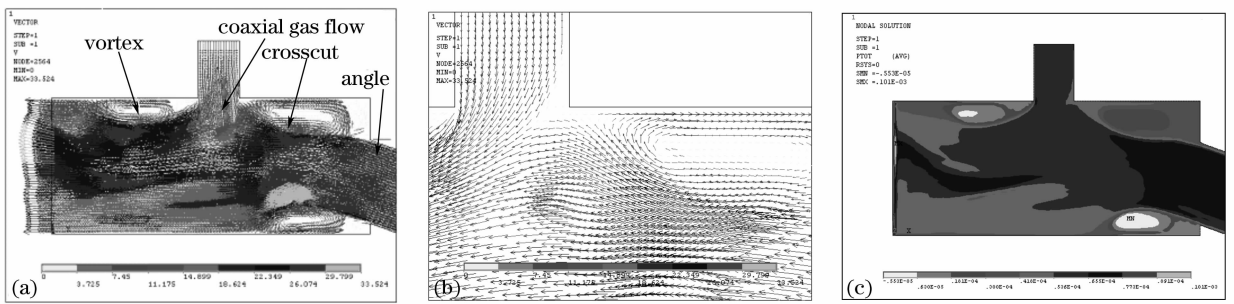


图 6 (a) 20°时的整体效果图, (b)除渣部分局部放大图, (c) 整体压力图

Fig. 6 (a) Simulation result of the angle about 20°, (b) local details, (c) pressure cloud image

图 5 中由于大部分气流几乎与切割面相切,气流从底部吹过,真正起作用的气流量很少,因而不能很好的将底部的渣子吹走,低部两边的挂渣都比较严重。

如图 6(a),底部侧吹气流与同轴气流发生对撞。部分喷嘴气流形成水平的横切气流,同时在同轴气流的左边有涡流的形成,造成左边残渣堆积。

在右边产生了稳定的横切气流,其推力将残渣移掉。

将部分局部细节放大如图 6(b)所示,向下的同轴气流与向左的侧吹气流的对撞,使右边产生稳定的横切气流,推动残渣与母材分离。从图 6(c)整体压力图可见,此时对同轴气流的逆推影响比较小,不增加对上部的压力,不会造成气体压力较高时在喷嘴前方的工件表面上气流密度梯度场的存在。

通过 ANSYS 模拟,可以清楚看到,当侧吹气流以 20° 吹入时,实际作用时气流不是简简单单的形成向左的层流,由于同轴气流的存在,使侧吹的部分气流还形成向右的沿底部的横切气流,这部分气流处于层流状态,能够完全除掉残渣。根据模拟图,假设其直径为 0.25 mm 的圆管,经计算,其雷诺数为 992,因此底部气流为层流状态。

图 7(a)中,虽然在右边也形成了稳定层流,但是由于侧吹气流与对同轴气流的激烈逆推作用,会推动底部的残渣往上运动,使燃烧产物沾污光学镜片。除此之外,还会增加喷嘴前方的气压,使这个地方的气流不均匀,熔融区域的气流不稳定。

由前文可知,未采用底部侧吹时在熔融区域得到的雷诺数范围为 $70\sim 3472$,刚好有时会处于不确

定的层流向湍流转变。底部气流的逆推作用,会增大这种不确定性的概率,引起气流由层流向湍流的转变,影响切割质量。

由底部进入切缝的来流速度会使局部的雷诺数发生较大变化,同轴氧气流以 $12\sim 25$ m/s 的速度从切口出来,侧吹气流是同轴气流的 3 倍,故进入底部的侧吹气流的雷诺数为 $2119\sim 4415$ 。当边界层雷诺数达 2000 时,流动开始不稳定,对于随机的微小扰动,开始出现不稳定波,不稳定波不断的向上游传播。当边界层雷诺数达 4000 时,金属的熔融物处于不稳定的流动状态,使之弯曲和出现拐点,并引起流速和压强出现三维脉动。湍流随主流向上游扩展,最后整个熔化面被湍流占据,成为充分发展的湍流。

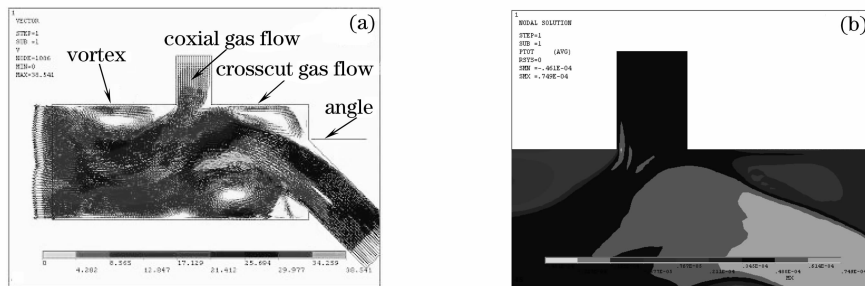


图 7 (a) 45° 时的整体效果图, (b) 整体压力图

Fig. 7 (a) Simulation result of the angle about 45° , (b) pressure cloud image

如果气体压力过高时,会造成喷嘴前方的工作表面产生气流密度梯度场的不稳定,对切割质量也造成影响。从图 7(b)压力图中也可以看到,在喷嘴上方已经有一部分的高压气体。

因此,从上述气流场模拟图中可以看出,只有喷嘴角度与水平成 20° 左右时,在底部可以获得层流状态,一方面可以有效地去除残渣,另一方面逆推气流作用很小,对上面的气流压力影响较小,避免密度梯度的形成,有利于保证切割的稳定。当喷嘴几乎水平放置时,气流对上部的压力几乎没有影响,但是不能形成稳定向后的横切气流,不能有效去渣。当角度不断变大时,横切气流也表现明显,但是气流的逆推作用比较大,造成上部气压不稳定,影响切割。

5 结 论

激光切割时只需要定位而不需要夹紧划线等准备工序,因而硅钢片无机械应力;激光切割工艺不会造成硅钢片表面上绝缘损伤,边缘挤压,不会影响铁心质量;同时专业测试结果表明^[14]:采用激光切割工艺与冲压工艺,硅钢片磁性不变。因此激光切割硅

钢片工艺较传统制造硅钢片工艺有其特有的优势。

采用底部侧吹气流控制激光切割硅钢片具有显著效果^[15]。对于不锈钢等特种钢材薄板激光切割,由于产生熔渣机理类似,因此具有同样效果;对于普通碳钢板,当板厚增加时,挂渣现象变得严重起来,大量熔化材料必须被喷射出来,因此此工艺方法也适用于切割厚的普通碳钢。

参 考 文 献

- Zhu Qifan, Gao Weiguo. Analysis of failure of the cold press dies for silicon steel plates[J]. *J. Wuhan Automotive Polytechnic University*, 2002, **22**(2): 22~25
朱起凡,高为国. 硅钢片冷冲模的失效分析[J]. 武汉汽车工业大学学报, 2000, **22**(2): 22~25
- Yan Cuo, Li Lijun, Li Juan *et al.*. Review of surface quality study on laser sheets cutting[J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(3): 270~274
鄢 铿,李力钧,李 娟等. 激光切割板材表面质量研究综述[J]. 激光技术, 2005, **29**(3): 270~274
- Liu Jianhua, Chen Yijian, Duan Jun. Design of supersonic nozzles for laser cutting[J]. *Laser Technology*, 2000, **24**(1): 46~50
刘建华,陈一坚,段 军等. 激光切割超音速喷嘴设计[J]. 激光技术, 2000, **24**(1): 46~50
- John Powell. *CO₂ Laser Cutting* [M]. London: Springer-Verlag,

- 1993
- 5 Chen Kexin, Mei Yanbiao, Liao Jianhong. Laser cutting of aluminium plate used for dashboard[J]. *Applied Laser*, 1998, **18**(1): 33~34
陈可心,梅宴标,廖健宏等. 仪表铝面板的激光切割[J]. *应用激光*, 1998, **18**(1): 33~34
- 6 Zhang Yongqiang, Wu Yanhua, Chen Wuzhu *et al.*. On-line method for evaluation of laser cutting quality[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1580~1584
张永强,吴艳华,陈武柱等. 激光切割质量的在线评价方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1580~1584
- 7 Wei Xueqin, Zheng Qiguang, Wang Honghai *et al.*. Effects of laser beam fluctuation on thermal interaction between laser and material[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(2): 206~210
魏学勤,郑启光,汪洪海等. 激光输出不稳定性对激光与物质热作用的影响[J]. *光学学报*, 1999, **19**(2): 206~210
- 8 Zhou Yan, Liu Xiaosheng. Quality analysis of laser cutting with abrupt theory[J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, **14**(6): 519~523
周 岩,刘晓胜. 猝发理论在激光切割质量分析中的探讨[J]. *中国机械工程*, 2003, **14**(6): 519~523
- 9 Wu Ziniu. *Fundamental of Computational Fluid Mechanics* [M]. Beijing: Science Press, 2001. 42~44
吴子牛. 计算流体力学基本原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 42~44
- 10 Lu Huilin, Zhao Guangbo, Bie Rushan. Experimental research and computer simulation of gas-solid two-phase flow in a riser [J]. *J. Engineering Thermophysics*, 1999, **20**(5): 627~631
陆慧林,赵广播,别如山等. 管内气固两相流动的试验和模拟计算[J]. *工程热物理学报*, 1999, **20**(5): 627~631
- 11 Zhu Ziqiang. *Application of Computational Fluid Mechanics* [M]. Beijing: Beijing Aerospace Press, 1997. 33~35
朱自强. 应用计算流体力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1997. 33~35
- 12 Xiao Zhixiang, Li Fengwei, E Qin. Applications of turbulence models in simulation of complex flows [J]. *J. Northwestern Polytechnical University*, 2003, **20**(4): 335~340
肖志祥,李凤蔚,鄂 秦. 湍流模型在翼身组合体流场数值模拟中的应用研究[J]. *西北工业大学学报*, 2003, **20**(4): 335~340
- 13 T. J. Poisot, S. K. Lele. Boundary conditions for direct simulations of compressible viscous flow[J]. *J. Computational Physics*, 1992, **101**: 104~129
- 14 Measurement Report: magnetic field measurement of silicon steel sheet. Measurement Laboratory, Shanghai Baosteel Industry Inspection Corp, Report Number: 20030426001
检测报告: 硅钢片磁场检测. 上海宝钢设备检测公司检测实验室, 报告编号: 20030426001
- 15 Jianhua Yao, Zhimin Fang, Wei Zhang *et al.*. Study of technique and performance of laser beam welding for W18Cr4V and 65Mn [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(1): 39~42