

# 旋转气流控制激光切割硅钢新技术\*

洪蕾<sup>1</sup> 米承龙<sup>1</sup> 陈武柱<sup>2</sup>

(1. 上海海事大学物流工程学院 上海 200135;

2. 清华大学机械工程系 北京 100084)

**摘要:** 针对目前激光切割工艺的缺点, 提出采用氧辅助激光切割以降低所需激光切割功率, 通过在工件底部加设旋风除渣器, 形成旋转气流控制熔渣流向以去除熔渣的激光切割硅钢新技术。采用 CO<sub>2</sub> 激光器, 对 0.5 mm 厚度硅钢片进行切割试验, 试验结果表明, 通过旋转气流主动控制, 当气流处于层流状态时, 可在较低激光切割功率时获得光滑的精细切口。利用有限元法对工件底部气流状况进行数值模拟, 验证了旋转气流的工作规律, 能为合理控制熔渣流向提供理论依据。

**关键词:** 氧助激光切割 旋转气流 硅钢片 熔渣

中图分类号: TG 485

## New Technology of Laser Cutting Silicon Steel Controlled by Rotating Gas Flow

HONG Lei<sup>1</sup> MI Chenglong<sup>1</sup> CHEN Wuzhu<sup>2</sup>

(1. Logistics Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135;

2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract:** In order to avoid the demerits of currently main laser cutting technology, a novel method of laser cutting silicon steel by using a cyclone slag separator put under the workpiece that will form rotating gas flow to control the direction of the flowing slag gas is presented. Laser cutting of 0.5 mm silicon steel sheet with CO<sub>2</sub> laser is experimentally studied. The experiments prove that glossy and dross-free cutting kerfs can be obtained under lower laser cutting power when the gas flow is laminar flow in the tube controlled by rotating gas flow. The gas flow acting under the workpiece is simulated by finite element method (FEM). The operating law of the rotating gas flow is verified by ANSYS, which provide academic basis for controlling the flowing direction of the slag gas reasonably.

**Key words:** Oxygen-aided laser cutting Rotating gas flow Silicon steel sheet Molten slag

## 0 前言

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。传统硅钢片制造工艺经过剪裁、冲压叠装将会产生内应力, 从而使晶粒变形, 导致磁导率下降, 比铁损增加<sup>[1]</sup>。激光切割是一种非接触式的加工方式, 加工过程无冲击, 不存在刀具磨损和断裂, 没有材料受力变形等问题。采用激光切割硅钢片技术, 可以简化冲片模具, 减少生产工序, 降低生产成本, 易于实现生产过程自动化。

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; 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的降低和生产成本的提高, 影响其广泛工业应用。因此, 高效高质量激光切割硅钢等特种钢材是一个诱人的并亟待解决的问题。

为解决常规采用氧气和氮气辅助激光切割特种钢材不足, 许多学者对一些特种钢的激光切割进行了研究, 提出了不同的解决方案<sup>[2-4]</sup>。研究表明, 采用层叠切割法<sup>[2-3]</sup>, 通过提高熔融体流动性来提高熔融产物的流出速度, 可以改善激光切口质量; 采用纵列喷嘴切割法<sup>[3]</sup>和超声速拉伐尔喷嘴切割法<sup>[4]</sup>, 通过提高喷嘴压力而又避免形成正激波, 增加对熔渣的气流吹力, 改善切割质量。这些方法都

\* 上海市高等学校科技发展基金重点(07ZZ101)、上海市科技启明星(07QA14027)和上海市重点学科建设(T0601)资助项目。20070816 收到初稿, 20080410 收到修改稿

有一定的局限性,如层叠切割法造成材料的额外浪费;纵列喷嘴切割法无法得到完全无粘渣的切割板材;拉伐尔喷嘴形状复杂,加工困难,对加工精度要求高,加工成本比传统喷嘴高。旋转气流激光切割硅钢片工艺试验目的在于通过在工件底部增设旋风除渣器,形成旋转气流控制熔渣流向以去除熔渣的激光切割工艺,实现高效高质量激光切割硅钢片。

## 1 旋转气流激光切割试验装置

激光切割设备采用 Trumpf TC L 4030 CO<sub>2</sub> 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 1.8~4.0 kW 可调。采用飞行光路系统,经计算机数控(Computer number control, 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。为确保吹气的稳定性,高压气体先经一组气体过滤器及调压阀先行降压,进入吹气喷嘴前再经一由 CNC 程式控制的电控调压阀,使吹气与激光的输出达到最佳同步。

试验所用工件材料选用 0.5 mm 厚, Si 的质量分数为 2.7% 的硅钢片,其化学成分见下表。

表 硅钢片的化学成分 %

| 元素   | Si  | C         | Mn        | S         | P         |
|------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 质量分数 | 2.7 | 0.04~0.55 | 0.03~0.06 | 0.02~0.03 | 0.03~0.04 |

## 2 旋转气流激光切割硅钢片工艺试验

### 2.1 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<sup>[5-6]</sup>,切割所需激光功率大幅度降低,但在切割硅钢片过程中由此产生大量具有较大的粘滞系数,不易被普通喷嘴辅助切割气体吹除的 SiO<sub>2</sub> 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,在工件底部加设旋风除渣器,形成旋转气流控制熔渣流向以去除熔渣的激光切割工艺,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。

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数是影响加工质量的主要因

素<sup>[5,7-8]</sup>。但是,文献[9]表明,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和加工表面的变化等,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数,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  $Re$  来判断层流和湍流<sup>[10]</sup>。当  $Re < 2\ 000$  时,圆管内的流动是层流; $Re > 4\ 000$  时,圆管的流动是湍流;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<sup>[11]</sup>。经计算,标准状态下,气体密度  $1.225\text{ kg/m}^3$ ,气体的平均速度  $4.915 \sim 58.976\text{ m/s}$ ,动力粘度  $\mu = 1.789\ 4 \times 10^{-2}\text{ g/(m}\cdot\text{s)}$ 。取激光的喷嘴直径为  $1.0 \sim 1.5\text{ mm}$ ,切缝宽度为  $0.1 \sim 0.5\text{ mm}$ ,面积为  $0.262\ 8 \sim 0.767\ 6\text{ mm}^2$ ,切面周长为  $1.257 \sim 3.570\text{ mm}$ ,得到的雷诺数范围为  $70 \sim 3\ 472$ 。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,切割面存在大量熔渣。

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<sup>[12]</sup>,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。

试验采用氧助激光切割,在同轴辅助切割气体之外,在工件底部加设旋风除渣器,形成旋转气流的除渣法。试验工作原理如下:在氧助激光切割过程中,氧化反应释放出大量热量,熔融态泡沫性低密度反应生成物在反应热源及激光热源的共同作用下,可保持较长的时间,此时通过设置在工件底部的旋风除渣器,形成强烈的旋转气流,利用

由此产生的巨大离心力, 对物料起到强烈的冲刷作用, 消除粘渣现象。此时既可阻碍等离子体的产生, 又可减少工件上方气流压力, 避免密度气流场的变化, 最终将泡沫性残渣快速、干净地清除而获得良好的切割质量。图 1 所示为旋风除渣器工作原理图。

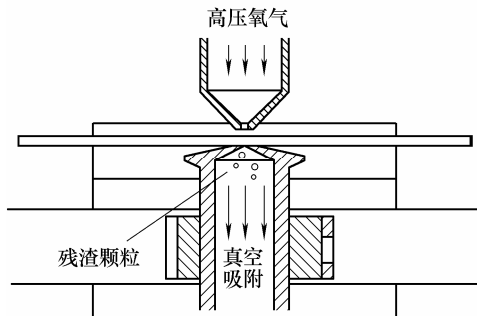


图 1 旋风除渣器工作原理图

在上部同轴喷嘴氧气流将泡沫性的残渣吹向底部的过程中, 由于旋风除渣器的吸口紧贴在工件底部, 生成的残渣在强大的旋转气流作用下无法粘附在切缝周边。同时由于泡沫性残渣中含有氧气等气体, 其受气流影响更为显著, 这对于残渣的清除更为有利。

## 2.2 试验结果与讨论

图 2 所示为旋风除渣器的结构示意图, 包括一置于常规激光切割设备的激光喷嘴 3 下方的旋转气流引导装置 6, 此装置包括一顶部设有一除渣吸口的中空锥体 5, 并通过夹持器 1 与激光喷嘴的运动机架 4 连接, 以保持激光喷嘴 3 与中空锥体 5 的除渣吸口同轴设置, 并在切割过程保持同步运动, 并紧贴待切割的薄钢板 2 底部。中空锥体 5 下部连接两通排灰管 7, 此排灰管的另一端连接旋转气流制造器(步进电动机带动一高速旋转风机, 图中未示出)。

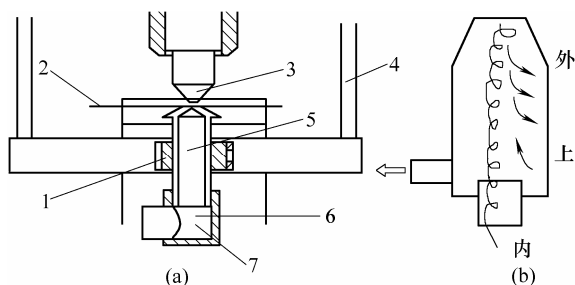


图 2 旋风除渣器结构示意图

1. 夹持器 2. 待切割薄钢板 3. 激光喷嘴 4. 运动机架
5. 中空锥体 6. 旋转气流引导装置 7. 排灰管

将待切割的薄钢板 2 置于激光喷嘴 3 和旋转气流引导装置 6 之间, 当工件底部熔渣吸口气流以

12~25 m/s 的速度由进气管进入旋转气流引导装置 6 时, 气流将由直线运动变为圆周运动。旋转气流的绝大部分沿器壁直圆筒体呈螺旋形向下, 朝中空锥体 5 流动, 通常称此为外旋气流。含渣气流在旋转过程中产生离心力, 将密度大于气体的渣粒甩向器壁。渣粒一旦与器壁接触, 便失去惯性力而靠入口速度的动量和向下的重力沿壁面下落, 进入排灰管 7。旋转下降的外旋气流在到达锥体时, 因圆锥形的收缩而向除尘器中心靠拢, 其切向速度不断提高。当气流到达中空锥体 5 下端某一位置时, 即以同样的旋转方向从中空锥体 5 中部, 由下而上继续做螺旋形流动, 即内旋气流。最后净化气经排气管排出器外, 一部分未被捕集的渣粒也由此迷失。自进气管流入的另一小部分气体, 则向中空锥体 5 顶盖流动, 然后沿排气管外侧向下流动, 当到达排气管下端时, 即反转向上升的中心气流一同从排气管排出, 分散在这一部分上旋气流中的渣粒也一同被带走, 因此在除渣器上口也不存在挂渣粘附的问题。

采用旋风除渣器, 激光切割机受 CNC 工作台的控制, 激光喷嘴与旋风除渣器的吸口在工作过程中实现了同轴、同步, 激光切割与残渣的吸附不受激光切割路径的影响, 从而此技术具有通用性。

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的被吹除。试验中同轴辅助切割气体为氧气, 气体压力降低为 300 kPa, 熔渣喷嘴气体采用压缩空气, 压力为 100 kPa。当激光功率为 500 W, 模式为 TEM01, 焦点位于工件上表面, 切割速度为 3 m/min。图 3 为工作中的装有旋风除渣器的切割装置照片。

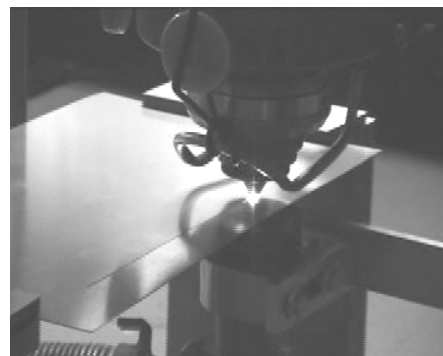


图 3 工作中的装有旋风除渣器的切割装置照片

切口区域范围在工件上部没有变化, 底部为旋风除渣器的吸口, 此孔直径与同轴喷嘴一致, 其气流作用区域范围没有发生变化, 但是气流速度发生了明显的变化, 当气流以 12~25 m/s 的速度由进气管进入旋风除渣器, 切口区域雷诺数范围为 706~

1 471, 气流在切口区域处于层流状态。所以通过加设旋风除渣器明显的改善了气流状态, 改进了切割质量。图 4 为采用常规激光切割工艺获得的切口, 图 5 为采用旋风除渣器后获得的切口, 其表面光滑, 质量较高。

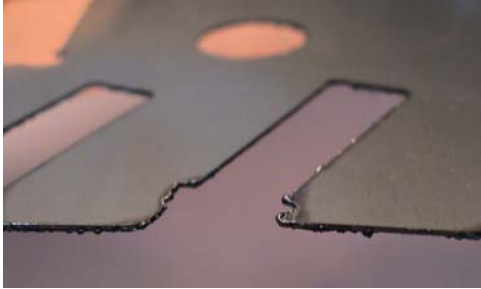


图 4 采用常规激光切割工艺获得的切口

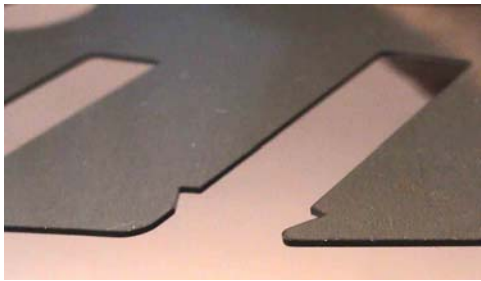


图 5 采用旋风除渣器后获得的切口

### 3 旋转气流激光切割数值模拟分析

为深入研究旋风转气流的工作过程, 首先需要对旋转气流内单相流体的湍流流动情况作细致分析。为便于问题的解决, 在建立单相流体数学模型之前, 对实际使用的旋转气流作了一些简化<sup>[11]</sup>。

(1) 单相流体为不可压缩空气, 即密度为常数。

(2) 不考虑由于流体与壁面的摩擦而产生的热效应。

(3) 入口气体的流速均匀, 流动处于湍流状态。

(4) 假设流场恒温, 不考虑能量传递。

(5) 假设残渣以极小的颗粒存在, 旋转气流入口的气体流速均匀, 颗粒进口速度等于气体相的流速, 且均匀分布于入口, 对气流的流动不会造成影响相当于气流运动。

在圆柱坐标系下, 稳态的气体湍流流动控制方程组可以表示为如下通用形式

$$\frac{\delta}{\delta x}(\rho u \phi) + \frac{1}{r}(r \rho v \phi) + \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta \theta}(\rho w \phi) = \frac{\delta}{\delta \theta} \left( \Gamma_x \frac{\delta \phi}{\delta x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} \left( r \Gamma_r \frac{\delta \phi}{\delta r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta \theta} \left( \frac{\Gamma_\theta}{r} \frac{\delta \phi}{\delta \theta} \right) + s_\phi$$

式中  $\rho$ ——气体密度

$\phi$ ——求解变量

$r$ ——管半径

$u, v, w$ ——轴向、径向和切向气体流动速度

$\Gamma_x, \Gamma_r, \Gamma_\theta$ ——轴向、径向和切向扩散系数

$s_\phi$ ——源项

各变量具体的表达式、模拟旋转气流的雷诺应力模型的模型系数和常数的取值参考文献[13]。

根据模拟对象的结构特点和模拟目的, 为了看清其除渣的过程, 故而在网格划分采用均匀划分。对于气体相控制方程的离散问题, 采用控制容积积分法。

边界条件的处理方式对方程组的求解非常重要, 对旋转气流控制其设定的边界条件如下所述。

(1) 进口条件。设定气体的进口速度为常量, 均匀流动; 湍动能  $k$  按进口平均动能的 1% 计算; 湍动能耗散率  $\varepsilon$  按湍动能生成量等于耗散量确定。

(2) 出口条件。出口边界参数的确定方式采用局部单向化假设; 由质量守恒条件, 出口速度根据内点速度外推求得。

(3) 壁面条件。满足无滑移条件。

在实际的试验和模拟中, 采用  $D=100$  mm、长度为 250 mm 的模型, 空气的进口密度为  $1.225$   $\text{kg}/\text{m}^3$ , 进口气流流速  $20.0$   $\text{m}/\text{s}$ , 恒定温度为  $298$   $\text{K}$ , 动力粘度  $\mu=1.7894 \times 10^{-2}$   $\text{g}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。模拟用三维形状和尺寸可参见图 6。考虑到模拟的方便和加载速度, 在本次模拟中对其模型进行了一些简化。

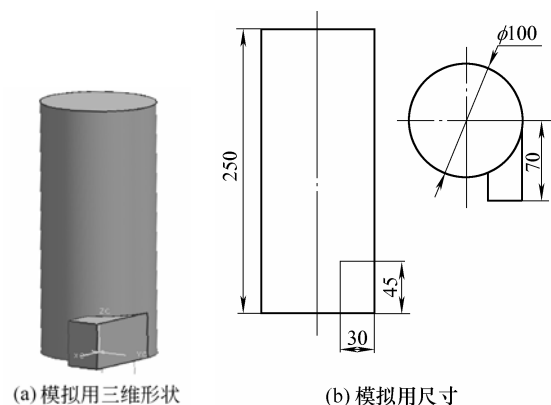


图 6 模拟用三维形状图和尺寸图

通过模拟发现, 高速气流从同轴气流出来后, 进入控制管顶部, 从上面起开始加速运动, 其速度是入孔速度的 1.5~2.0 倍。气流进入旋风控制管的筒体之后, 沿筒壁周向运动, 速度有所降低。在进

入主流之前, 旋转气流与后续进入的气流存在一个碰撞、汇合的过程, 两股气流的碰撞不可避免地在内筒的贴壁区域造成局部涡流, 气流速度明显降低, 在上部会形成乱流, 扰乱了局部的流场。在上端由于存在一个气流碰撞、汇合的过程, 在上入口段速度就有些分布不均匀。

在模拟得到的旋转气流场中, 切向速度占主导地位, 并由内向外递增。含在气流中的颗粒在切向气流的带动下做高速旋转运动, 并因离心力的作用, 被甩向外壁, 在壁面和旋转轴心切向速度几乎为零。因此, 合理设计各管道参数, 调整旋转气流流速等, 可以针对激光切割过程中不同的熔渣生成情况有效除渣。

#### 4 旋转气流激光切割问题与讨论

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<sup>[14]</sup>: 采用激光切割工艺与冲压工艺, 硅钢片磁性能不变。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。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。

#### 5 结论

(1) 试验采用氧辅助切割以降低所需激光切割功率, 除同轴辅助切割气体之外, 在工件底部加设旋风除渣器, 形成旋转气流控制熔渣流向以去除熔渣的激光切割工艺。

(2) 试验证明, 合理控制工艺参数, 在大幅度降低切割功率同时, 形成的旋转气流可以有效的去除熔渣, 获得光滑切口。

(3) 利用有限元法对旋风除渣器内部气流状况进行了数值模拟, 验证了旋转气流工作规律, 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。

#### 参 考 文 献

- [1] 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.  
ZHU Qifan, GAO Weiguo. Analysis of failure of the cold press dies for silicon steel plates [J]. Journal of Wuhan Automotive Polytechnic University, 2000, 22(2): 22-25.
- [2] 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.  
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.
- [3] 王家金. 激光加工技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 1992.  
WANG Jiajin. Laser materials processing technology [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1992.
- [4] 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.  
LIU Jianhua, CHEN Yijian, DUAN Jun, et al. Design of supersonic nozzles for laser cutting [J]. Laser Technology, 2000, 24(1): 46-50.
- [5] JOHN Powell. CO<sub>2</sub> laser cutting [M]. London: Springer-Verlag, 1993.
- [6] 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.  
CHEN Kexin, MEI Yanbiao, LIAO Jianhong, et al. Laser cutting of aluminium plate used for dashboard [J]. Applied Laser, 1998, 18(1): 33-34.
- [7] ABDULHAD E, PELLETIER J M, LAMBERTIN M. Development in laser cutting of steel: analytical modeling and experimental validation of the metallurgical effects[J]. SPIE, 1997, 3097: 299-311.
- [8] KAEBERNICK H, JEROMIN A, MATHEW P. Adaptive control for laser cutting using frequency analysis [J]. Annals of the CIRP, 1998, 47(1): 47-53.
- [9] 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.  
ZHOU Yan, LIU Xiaosheng. Quality analysis of laser cutting with abrupt theory [J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(6): 519-523.
- [10] 吴子牛. 计算流体力学基本原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001.  
WU Ziniu. Fundamental of computational fluid mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2001.

- [11] 陆慧林, 赵广播, 别如山, 等. 管内气固两相流动的实验和模拟计算[J]. 工程热物理学报, 1999, 20(5): 627-631.  
LU Huilin, ZHAO Guangbo, BIE Rushan, et al. Experimental research and computer simulation of gas-solid two-phase flow in a riser [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1999, 20(5): 627-631.
- [12] 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.  
ZHU Ziqiang. Application of computational fluid mechanics[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1997.
- [13] 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]. 计算物理, 2003, 20(4): 335-340.  
XIAO Zhixiang, LI Fengwei, E Qin. Applications of turbulence models in simulation of complex flows [J]. Chinese Journal of Computation Physics, 2003, 20(4): 335-340.
- [14] 上海宝钢设备检测公司检测实验室. 硅钢片磁场检测[R]. 20030426001.  
Measurement Laboratory, Shanghai Baosteel Industry Inspection Corp. Magnetic field measurement of silicon steel sheet[R]. 20030426001.
- 
- 作者简介: 洪蕾, 女, 1972 年出生, 博士, 副教授。主要从事激光加工的研究工作。  
E-mail: juhonglei@yahoo.com