

文章编号 1004-924X(2014)05-1150-07

冷轧生产线硅钢激光辅助切割有限元模拟

辛立军*, 王智勇

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

摘要:研究了激光加热辅助圆盘剪高速切割技术,以解决现有冷轧生产线硅钢切边技术存在的微裂纹、应力、毛刺和边浪等问题。建立了激光加热温度场有限元分析模型,根据生产线上圆盘剪加工的实际过程,探讨了数值模拟中热源的加载形式,研究了激光对板材进行辅助加热时各个工艺参数如激光功率、光斑尺寸以及激光入射角度对切割工艺的影响,并通过实验对工艺参数进行了优化。最后,进行了验证实验。实验结果显示:当激光加热点运动至圆盘剪刀口位置时,温度为 100 °C 左右,此时材料硬度降低到原有硬度的 70%~80%,降低了切削力,减少了圆盘剪的磨损,可有效提高圆盘剪的寿命。

关键词:激光辅助切割;硅钢;高速切割;有限元模拟

中图分类号:TG485 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142205.1150

Laser assisted cutting of silicon steel on cold rolling production line

XIN Li-jun*, WANG Zhi-yong

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

* Corresponding author, E-mail: zywang@bjut.edu.cn

Abstract: Laser assisted trimmer side cutting technology was studied to overcome the problems such as micro cracks, stress, burrs and edge waves existing in a cold rolling production line of silicon steel side cutting. A finite element analysis model for the laser heating temperature field was established, the loading form of a heating source was determined and influences of various processing parameters like laser powers, spot sizes, and laser incident angles on laser assisted heating sheet materials were discussed according to the actual process of a cold rolling production line. These processing parameters were optimized in experiments. It is proved that the temperature is about 100 °C when the laser heated spot is moved to the blade position of trimmer. At this time, the hardness of the material drops to 70% to 80% and the cutting forces is declined. As a result, the wear of cutting trimmer is reduced and the life of the cutting trimmer is improved effectively.

Key words: laser assisted cutting; silicon steel; high speed cutting; finite element analysis

1 引言

硅钢具有良好的磁性能和较高硅含量,是制

造变压器、继电器等机电产品和电子产品的重要材料^[1-2]。在硅钢加工中,采用圆盘剪进行精整工序切边时^[3-4],由于刃口直接作用在硅钢上,切口边缘存在微裂纹、应力以及毛刺和边浪等问

收稿日期:2013-06-05;修订日期:2013-07-18.

基金项目:国家科技重大专项资助项目(No. 2010ZX04013-052)

题^[5-9]。刃口是直接和硅钢接触并完成切割的工具,经过长时间切割势必产生磨损,同时由于刀片制造质量问题和工况不确定性,极易产生崩刃现象^[10-12]。更换刀具一般需要1~2 h,这会致使生产中中断,从而影响生产效率。

用激光辅助圆盘剪高速切割可以增大圆盘剪刀口的寿命,提高生产效率。在实际生产线上,圆盘剪直径通常为300 mm,切割时激光不能垂直入射到圆盘剪刀口切割部位,要倾斜入射到切割部位,但入射角度不能太大,否则反射严重(一般 $<15^\circ$)。本文利用有限元法分析了激光辐照加热位置(以下简称为加热点)与实际圆盘剪刀口剪切位置(以下简称剪切点)的关系。并根据各加工参数对温度场的影响优化了加工工艺,以满足硅钢生产线高达300 m/min的运行速度的加工需求。

2 实验材料与设备

实验选用的试样材料是宝钢公司生产的硅钢板(冷轧),板厚为0.3 mm,其化学成分如表1所示。

表1 硅钢化学成分

Tab. 1 Composition of silicon steel (%)

化学元素	C	Si	Mn	S	P
质量分数	0.06	3-5	0.15	0.25	0.03



图1 实验用激光器

Fig. 1 Lasers used in experiments

如图1所示,激光辅助高速切割实验采用的激光器为自主研发的HPDL-2000大功率半导体激光器,其波长为940/980 nm双波长,最大功率为2 000 W,激光头尺寸为530 mm×140 mm×130 mm,焦距为300 mm,聚焦光斑尺寸为1.2 mm×1.2 mm。

3 有限元模型建立

3.1 单元选择

单元类型选择六面体八节点的SOLID70。

3.2 网格划分

激光切割是一个温度随时间和空间急剧变化的过程,在光斑周围的各个空间位置存在着强烈的温度梯度,因此要求温度场的模拟精度较高,即在模拟温度场时温度梯度变化大的地方网格尺寸、时间步长要尽可能小。激光加热区域是温度变化较大的区域,该区域及其附近区域的网格应细密一些。为了增加求解效率及精度,在加热区域划分致密的单元网格,而在远离加热区域的地方,温度梯度变化相对较小,划分较粗的网格。网格划分方法如图2所示。

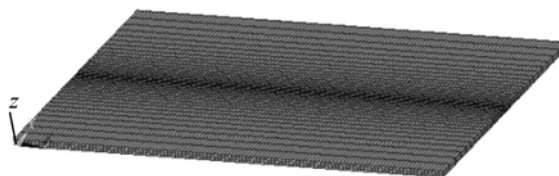


图2 网格划分方法

Fig. 2 Method for element meshing

3.3 边界条件处理

为了使得每一节点的热平衡方程具有唯一解,需要附加一定的边界条件和初始条件。ANSYS的热分析边界条件或初始条件分为6种:温度、热流率、对流、热流密度、热辐射率和生热率。激光在加热过程中采用两种边界条件——热流密度和对流。

激光照射前,材料内各点的初始温度设置为室温。因为激光光斑直径为毫米量级,所以可以将模型边缘看作无限远,其温度保持在室温不变。温度场的初始条件为:

$$T(x, y, z, 0) = T_0. \quad (1)$$

硅钢表面吸收激光能量后,由于热传导作用,吸收的能量会向周围传导和扩散,热传导方程为:

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} n_x + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} n_y + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} n_z = q_s(x, y, z, t), \quad (2)$$

式中: k , T , t , q_s 分别代表导热系数、温度场分布函数、传热时间以及热流密度, n_x , n_y , n_z 为边界外法线方向的列向量。

同时,被加热硅钢也会与环境发生辐射换热,其表达式为:

$$-k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x - k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y - k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = \sigma \epsilon ((T + 273)^4 - (T_a + 273)^4). \quad (3)$$

式中: T_a 为绝对温度; σ 为 Stefan-Boltzmann 常量, 约为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C}^4)$; ϵ 为物体辐射率, 或者称为黑度, 它的数值处于 $0 \sim 1$ 。在实际使用中, 对流和辐射换热边界往往同时存在。

加热硅钢板时, 只有激光光束作为加热热源, 所以在设置激光切割模型中, 将激光热载荷以热流密度的形式加载在光斑作用区域。光斑形状为矩形光斑, 且能量分布均匀, 则热源分布为:

$$q_v(x, y, z) = \frac{Q \cdot A}{a \cdot b}, \quad (4)$$

式中: Q 为激光能量, A 为吸收系数, a, b 分别为光斑的长度和宽度。

为了不损坏硅钢表面的绝缘层, 要求加热温度不高于 600 C 。

4 模拟结果

4.1 激光加热中心温度场

图 3 为 $P=500 \text{ W}$, $v=200 \text{ m}/\text{min}$ 时激光加

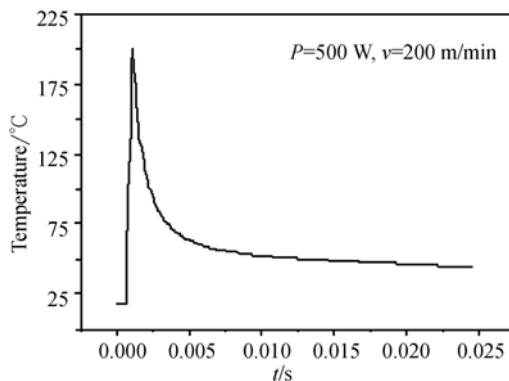


图 3 激光加热中心温度场变化曲线

Fig. 3 Curve of temperature distribution on heating center

热中心温度场分布图。由图可以看出, 激光照射区的最高温度可以达到 210 C 左右, 但是由于热传导, 激光加热区域的瞬态温度变化很快, 经过大约 2 ms 左右的时间, 温度降为 77 C 。由此可知, 激光加工温度场比较陡峭, 冷却过程很快。

4.2 硅钢表面与背面温度

由于工件(即硅钢)运行速度很快, 高达 $300 \text{ m}/\text{min}$; 激光加热及冷却的速度也很快, 2 ms 内即能完成一次升温降温过程, 因此需要考虑硅钢板的“热透”问题, 即硅钢板正面背面温度的一致性问题。

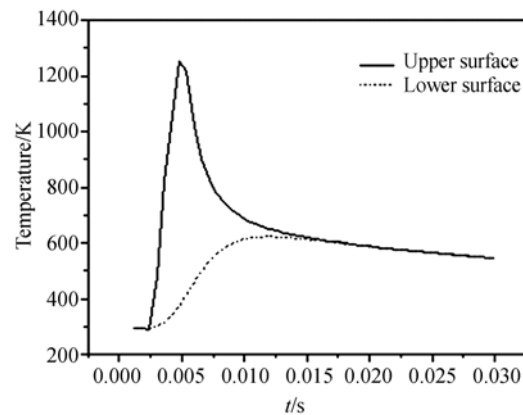


图 4 硅钢板表面温度分布图

Fig. 4 Temperature distribution of silicon steel plane surface

图 4 为 $P=2000 \text{ W}$, $v=200 \text{ m}/\text{min}$ 时的模拟结果。由图中可以看出, 在激光作用下, 上表面的温度上升很快, 大约 $1 \sim 2 \text{ ms}$ 就达到了最高温度; 随后迅速降温, 整个作用时间大约为 10 ms 。作用时间变长主要由于扫描速度 v 变小的原因。相对上表面, 下表面温度上升较缓, 大约 10 ms 的时间达到最大值, 随后缓慢下降。从激光辐照温度上升开始, 大约经过 15 ms 的时间, 上下表面的温度趋于一致。此时, 硅钢片正面和背面的温度场分布均匀, 硅钢片“热透”。

采用红外测温仪分别在距离加热点 20 mm (降温时间为 5 ms) 和 40 mm (降温时间为 10 ms) 处采集上、下表面的加热数据, 得到 20 mm 处上、下表面温度分别为 $403, 301 \text{ C}$; 40 mm 处分别为 $315, 308 \text{ C}$, 此时硅钢片上下表面温度接近一致。

4.3 工艺参数对温度场的影响

4.3.1 激光功率

在其他实验条件不变的情况下, 激光加热

点的中心温度要保持在 600 °C 左右, 激光功率随扫描速度的增加而增加, 模拟结果如图 5 所示。通过线性拟合可知, 两者的变化规律接近线性关系。

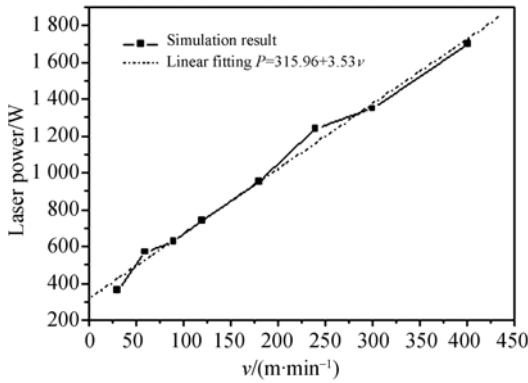


图 5 激光功率随速度变化曲线

Fig. 5 Curves of laser power versus speed

4.3.2 光斑尺寸

图 6 为等比例改变光斑大小时, 上表面的温度变化。从图中可以看出, 在功率 $P=750\text{ W}$ 和扫描速度为 30 m/min 下, 随着光斑尺寸的增加, 上表面的最高温度下降很快; 当光斑尺寸增大 1 倍, 为 $2.4\text{ mm}\times 2.4\text{ mm}$ 时, 表面的最高温度只有 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。图 7 为表面最高温度及平衡温度与光斑尺寸的关系。由图可以看出, 尽管光斑尺寸的改变对表面最高温度 T_{max} 的影响很显著, 但是, 对表面平衡温度的影响却很小, 当光斑尺寸为 $12\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 时, 两个温度都为 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。

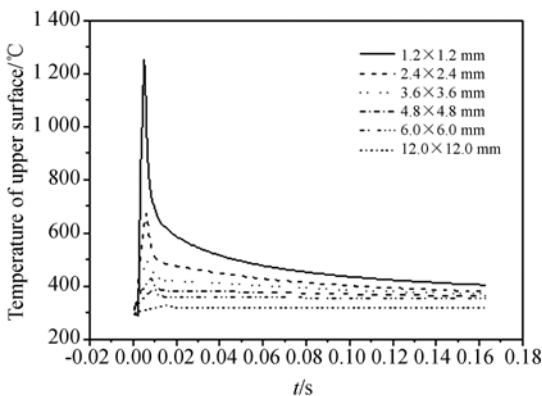


图 6 等比例变化光斑大小时上表面的温度变化规律

Fig. 6 Temperature variation of upper surface versus spot size changed by equal proportion

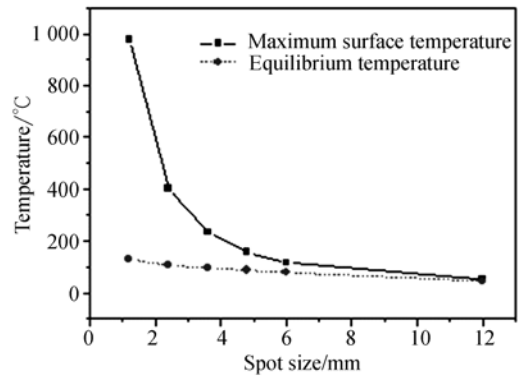


图 7 表面最高温度及平衡温度与光斑大小的关系

Fig. 7 Variations of maximum surface temperature, equilibrium temperature with spot size respectively

4.3.3 加热点与剪切点距离

图 8 为相同功率下, 激光加热点 T_{max} 和剪切点温度 T_{cut} 随速度的变化曲线。由图可以看出, 硅钢的运动速度对激光加热点的温度 T_{max} 影响很大, 加热点温度随硅钢运动速度的增加下降得很快, 幅度高达 $323\text{ }^\circ\text{C}$; 但在距离激光加热点 150 mm 处的剪切点, 由于温度场已经扩散均匀, 速度对温度的影响很小, 曲线平缓, 降温幅度仅为 $46\text{ }^\circ\text{C}$ 。

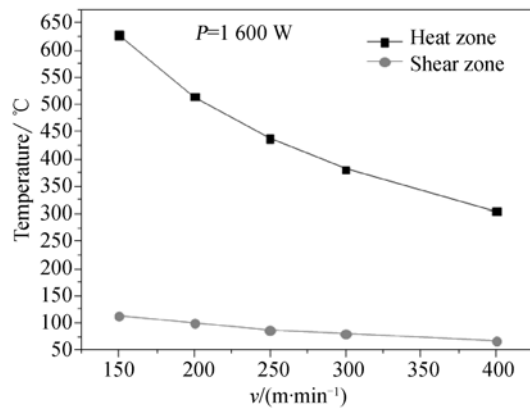


图 8 激光加热点和剪切点温度随速度变化曲线

Fig. 8 Temperature variations of heated zone and shear zone versus speed

上述变化是因为在低速条件下, 随着激光加热时间的增加, 加热点的热积累增多, 温度场下降幅度变得缓慢。当硅钢轧制速度为 150 m/min 时, 每点加热时间为 0.68 ms ; 当速度为 400 m/min 时, 加热时间仅为 0.255 ms 。因此, 低速时的激光加热点温度高于高速时的加热点温度。

对于剪切点来说,硅钢以 150 m/min 和 400 m/min 的速度运动,激光加热点运动到达剪切点的时间分别为 26.7 ms 和 10.012 5 ms。由于温度场在 2 ms 左右快速冷却,随后扩散趋于均匀,十几毫秒和几十毫秒的差异并不大。此外,由于低速下加热点的热积累高,所以低速下剪切点温度略高于高速下的温度。

表 2 为 $P=1\ 600\ \text{W}$,加热点和剪切点相距 150 mm 时测得的数据。

表 2 加热点和剪切点温度测量结果

Tab. 2 Temperatures of heated zone and shear zone ($^{\circ}\text{C}$)

速度/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	加热点温度	剪切点温度
150	630	110
200	510	96
250	412	78
300	348	51

由实验结果可以看出,加热点和剪切点的温度随扫描速度的变化趋势与模拟结果一致;但实验得到的温度略低于模拟温度,这是由红外测温仪的测温位置误差所致。

4.3.4 激光入射角度

为了保证激光加热点和圆盘剪剪切点之间的距离尽可能小,激光不是始终垂直入射。图 9 为激光垂直入射和倾斜 45° 斜入射时激光加热点和剪切点温度的变化规律。由图可以看出,倾斜入射时激光加热点和剪切点的温度都高于垂直入射时。这是因为倾斜入射时,激光光斑变大,在倾斜 45° 入射时,激光光斑变为 $1.70\ \text{mm} \times 1.2\ \text{mm}$,在相同速度下每点的加热停留时间比垂直入射时。当速度为 400 m/min,垂直入射每点的加热时

间为 0.18 ms,而倾斜 45° 入射每点的加热时间为 0.255 ms。加热时间越大,材料热积累越大,因此斜入射时激光加热点和剪切点温度均高于垂直入射。

由于倾斜入射时吸收率变化,模拟中 $A=0.45$ 的取值并不精确,实际值 <0.45 ,因此加热温度与垂直入射差别不大,在 $10\ ^{\circ}\text{C}$ 以内。

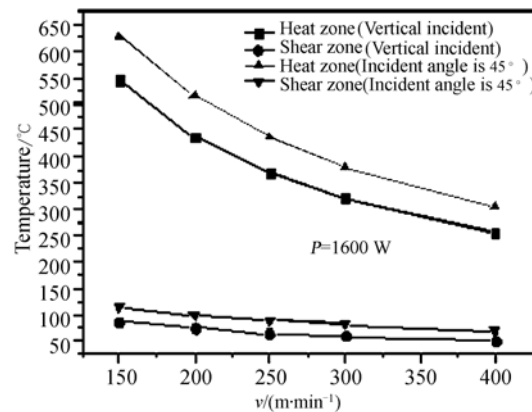


图 9 入射角度对激光加热点和剪切点温度影响

Fig. 9 Influence of incident angles on temperatures of heated zone and shear zone

5 实验验证

采用红外线测温仪测量加热数据,红外测温仪的响应时间为 2 ms,量程为 $75 \sim 700\ ^{\circ}\text{C}$ 。剪切点到加热点的距离为 150 mm。

由于生产线上硅钢的运行速度在 $30 \sim 280\ \text{m}/\text{min}$,在保证加热点温度不超过 $600\ ^{\circ}\text{C}$,不影响材料性能的前提下,根据模拟结果和前期试验结果优化工艺参数。表 3 为测得的剪切点温度,由表可以看出硅钢剪切点位置的温度约在 $90 \sim 110\ ^{\circ}\text{C}$ 。

表 3 激光辅助加热实验结果

Tab. 3 Test results of laser assistant heating ($^{\circ}\text{C}$)

试验参数	2 000 W	1 500 W	1 200 W	900 W	600 W	450 W
速度	280 m/min	200 m/min	120 m/min	90 m/min	60 m/min	30 m/min
剪切点温度	93	88	95	97	95	107

6 激光辅助加热对圆盘剪的影响

在激光加热辅助圆盘剪的切割过程中,圆盘剪刀口磨损时的切削力不仅受切削用量的影响,

还受工件软化程度的影响。切削区温度是反映工件软化程度的参数。

金属材料的硬度随温度的升高而下降,并可根据 Ito 和 Shishokin 给出的硬度-温度关系式进行计算。

$$\log H = \log A - BT = \log A - K \frac{T}{(T_m)^n}, \quad (5)$$

式中: H 为布氏硬度; A 为本质硬度, 即 H 在 $T=0\text{K}$ 时的硬度; B 为硬度热系数, $B=1.92 \times 10^{-3}$; K, n 为常数。

体积磨损量为:

$$W_v = K \cdot \frac{N \cdot L}{H}, \quad (6)$$

式中: H 为布氏硬度, N 为作用力, L 为切削距离, K 为磨损系数。由式(6)可知, 体积磨损量与切削长度、法相载荷成正比, 与材料硬度成反比。经计算, 在激光辅助加热温度为 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 左右时, 其硬度约为室温下硬度的 $70\% \sim 80\%$, 磨损量的降低可以有效提高圆盘剪寿命。

7 结 论

为了提高硅钢的生产效率, 增大圆盘剪的使

用寿命, 本文采用激光辅助圆盘剪进行硅钢加工。首先对激光加热点和剪切点的温度场及其影响因素进行了模拟分析, 并通过实验对模拟结果进行了验证。实验结果表明, 在其他实验条件不变的情况下, 保持激光加热点的中心温度为 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 生产线上激光功率随硅钢轧制速度的增加而线性增加。

为了不烧损硅钢表面, 加热点的温度不能高于 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 。激光加热属于快热快冷过程, 在 2 ms 内完成一次升温降温过程。激光加热点温度很快降低到 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。剪切点温度的实验结果与模拟结果相吻合, 为 $90 \sim 110\text{ }^\circ\text{C}$ 。在激光辅助加热温度为 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 左右时, 其硬度约为室温下硬度的 $70\% \sim 80\%$, 此时磨损量降低, 圆盘剪寿命提高。本研究为激光辅助圆盘剪高速切割技术在硅钢加工中的应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 洪蕾, 米承龙, 陈武柱. 旋转气流控制激光切割硅钢新技术[J]. 机械工程学报, 2008, 44(7): 215-220.
HONG L, MI CH L, CHEN W ZH. New technology of laser cutting silicon steel controlled by rotating gas flow [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(7):215-220. (in Chinese)
- [2] 沈维. 冷轧取向硅钢概述[J]. 特殊技术, 2008, 14(1):66-69.
SHEN W. Introduction to oriented electric steel [J]. *Special Steel Technology*, 2008, 14(1):66-69. (in Chinese)
- [3] 冶金工业部有色金属加工设计研究院. 板带车间机械设备设计(下册)[M]. 北京:冶金工业出版社, 1983:172-191.
Institute of Nonferrous Metal. Ministry of Metallurgical Industry [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1983:172-191. (in Chinese)
- [4] SANKEVICH V P. Rotary disk shears with mechanized trimming adjustment [J]. *Metallurgist*, 2007, 14(3):186-187.
- [5] 邹家祥. 轧钢机械[M]. 北京:冶金工业出版社, 1989:115.
ZOU J X. *Rolling Machine [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1989:115. (in Chinese)*
- [6] 徐进, 陈再枝. 模具材料应用手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2001.
XU J, CHEN ZH J. *Application Manual of Die Materials [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2001. (in Chinese)*
- [7] 陈涛, 吴初练, 郑广贤. 武钢硅钢切边圆盘剪的修复优化[J]. 武钢技术, 2013, 53(3):53-56.
CHEN T, WU CH L, ZHENG G X. WISCO silicon steel trimming disk shears repair optimization [J]. *WISCO Technology*, 2013, 53(3):53-56. (in Chinese)
- [8] 李文翼. 冷轧板带切边浪形的成因分析和改进途径[J]. 宝钢技术, 2004, 4:1-4.
LI W Y. Cause analysis and improvement of cold strip's trimmed waves [J]. *Baosteel Technology*, 2004, 4:1-4. (in Chinese)
- [9] 黄生银, 甄圣明. 冷轧圆盘剪切边过程中常见问题处理[J]. 江苏冶金, 2008, 36(6):62-63.
HUANG SH Y, ZHEN SH M. Common problem treatment in the disc shear edge process of cold rolling [J]. *Jiangsu Metallurgy*, 2008, 36(6):62-63. (in Chinese)

- [10] 赵敏, 王文合. 圆盘剪 H13 剪刀裂纹、崩刃原因分析及改进措施[J]. 天津冶金, 2008, 1:37-39.
ZHAO M, WANG W H. Analysis and improvement of blade cracking and breaking for H13 disk shear [J]. *Tianjin Metallurgy*, 2008, 1: 37-39. (in Chinese)
- [11] 王训宏, 李有元, 王快社, 等. 80 kg 级 TRIP 钢带圆盘剪剪切工艺[J]. 轧钢, 2009, 26(3):71-72.
WANG X H, LI Y Y, WANG K SH, *et al.*. Cutting technology of disc shear for 80 kg grade TRIP steel plate [J]. *Steel Rolling*, 2009, 26(3):71-72. (in Chinese)
- [12] 马瑞杰, 艾晶, 郑祥臣. 圆盘剪剪切原理的探讨及剪刀崩刃的分析[J]. 冶金设备, 2012, 1:43-46.
MA R J, AI J, ZHENG X CH. Cutting principle of rotary side trimming shear and analysis of blade fracture [J]. *Metallurgical Equipment*, 2012, 1: 43-46. (in Chinese)

作者简介:



辛立军(1982—), 女, 河北唐山人, 博士, 主要从事激光材料加工及光学系统设计的研究。E-mail: eva3456@163.com



王智勇(1970—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光器研制、激光设备及激光工艺的研究。E-mail: zywang@bjut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)