

# 激光切割中离轴量影响气体动力学性能的研究

孙凤<sup>1\*</sup>, 宋园园<sup>1</sup>, 赵庆龙<sup>1</sup>, 王思航<sup>1</sup>, 佟玲<sup>1</sup>, 单光坤<sup>1</sup>, 张晓友<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

<sup>2</sup>日本工业大学机械工程系, 日本 东京 345-8501

**摘要** 在激光切割中,辅助气体须与激光束轴线同轴,以确保在每个切割方向上都具有相同的切割质量。但研究发现,辅助气体与激光束轴线处于某种离轴(即不同轴)状态时,可有效提高切割效率,但离轴量对切割过程的影响机理尚不明确。建立了包含切缝的离轴激光切割三维对称模型,采用有限元方法对以氮气为辅助气体的激光切割过程进行数值模拟。通过改变离轴量,分析了辅助气体的气流场结构,研究了离轴量对激光切割过程中辅助气体动力学性能的影响;同时,对不同离轴量下的激光切割仿真模拟结果进行比较和分析,明确了离轴量对激光切割的影响机理,并进行了切割实验验证。结果表明:离轴量会影响辅助气体的动力学性能,合适的离轴量可有效提高激光的切割质量。

**关键词** 激光技术; 激光切割; 离轴量; 数值模拟; 辅助气体; 切割质量

中图分类号 TG485

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0402003

## Influence of Off-Axis Amount on Dynamics Performance of Gas in Laser Cutting Process

Sun Feng<sup>1\*</sup>, Song Yuanyuan<sup>1</sup>, Zhao Qinglong<sup>1</sup>, Wang Sihang<sup>1</sup>,  
Tong Ling<sup>1</sup>, Shan Guangkun<sup>1</sup>, Zhang Xiaoyou<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China;

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Japan University of Technology, Tokyo 3458501, Japan

**Abstract** In laser cutting, the auxiliary gas and laser beam axis are typically coaxially arranged to ensure the same cutting quality in each cutting direction. It is found that when the axes of the auxiliary gas and laser beam are not coaxial (i. e., in an off-axis state), the cutting efficiency can be effectively improved. However, the influence mechanism of off-axis state on the cutting process remains unclear. This study established a three-dimensional symmetrical model of off-axis laser cutting with cut slits and simulated the laser cutting process with nitrogen as the auxiliary gas using the finite element method. By changing the off-axis amount, the structure of the airflow field structure of the auxiliary gas is analyzed, meanwhile, the influence of the off-axis amount on the dynamic performance of the auxiliary gas was investigated during the laser cutting process. In addition, the influence mechanism of the off-axis amount on the laser cutting was clarified by analyzing the simulation results, and it was verified in a cutting experiment. Results show that the off-axis amount affects the dynamic performance of the auxiliary gas, and the appropriate off-axis amount can effectively improve the quality of laser cutting.

**Key words** laser technique; laser cutting; off-axis amount; numerical simulation; auxiliary gas; cutting quality

**OCIS codes** 140.3390; 140.3460; 160.3900

## 1 引言

激光切割技术具有柔性好、噪声低、精度和效率

高等优势,已成为切割加工行业重要的技术手段,被各国广泛研究和使用的<sup>[1]</sup>。激光切割就是用高功率密度的激光束直接照射被切材料表面,使切割材料在

收稿日期: 2019-08-01; 修回日期: 2019-08-31; 录用日期: 2019-11-19

基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”(XLYC1802077)、辽宁省高等学校创新人才支持计划(LR2017036)、辽宁省博士启动基金(20170520177)、沈阳市科技计划项目(Z17-5-067)

\* E-mail: sunfeng@sut.edu.cn

激光的照射下熔化,再通过辅助气体对切割材料进行吹蚀产生孔,随着激光的移动,最终完成切割任务<sup>[2]</sup>。激光切割是在辅助气体与激光束相互作用下完成的,辅助气体在此过程中起到了关键作用:一方面,金属材料被激光束照射后熔化,在高压辅助气流的作用下,大部分熔融金属被吹走<sup>[3]</sup>,减少了切口的挂渣;另一方面,切口在辅助气体作用下迅速冷却,为形成质量较高的切割端面提供了重要条件。可见,分析辅助气体与工件之间的相互作用具有重要意义。

部分学者研究分析了气流场:Duan 等<sup>[4]</sup>通过研究切割过程中的空气动力学,得到了切缝中的气流场会影响切割质量这一结论;Kovalev 等<sup>[5]</sup>对厚板切割中的气流分离进行了数值仿真,并对仿真结果进行了验证,结果表明,气流会直接影响切面质量;邱明勇等<sup>[6]</sup>和杨丽<sup>[7]</sup>先对不同形状的喷嘴产生的气流场进行了仿真,然后对气流的速度和压力分布进行了对比,阐释了喷嘴形状对气流场的影响;沈义平等<sup>[8]</sup>根据空气动力学原理,利用流体力学模拟设计并制作了简易 laval 喷嘴,获得了更好的喷嘴出口气流形态,提高了中厚板铝合金的切割质量。

谭向虎等<sup>[9-10]</sup>对激光切割过程进行了数值模拟,并通过改变辅助气体的种类、气压及激光功率的大小,分析了切割表面的质量,为提高切割质量和优化切割工艺提供了参考。张立鑫等<sup>[11]</sup>通过创建激光切割平面三维对称撞击射流模型,研究了激光切割工艺参数对辅助气体流场的作用,为选择合适的工艺参数提供了支撑。

部分学者研究了其他工艺参数对切割质量的影响:陈聪等<sup>[12]</sup>首先研究了激光功率、切割速度等对切割质量的影响规律,优化了工艺参数,使切割质量更高,最后建立了数学模型,模型的预测值和实测值比较吻合;冯巧波等<sup>[13]</sup>研究了激光切割工艺参数对切缝质量的影响,并得出了激光切割 1 mm 厚 304 不锈钢板的最佳工艺参数。

但是传统的激光切割在冷却之后易形成条纹,不仅会影响切割效率和质量,还会耗费大量的能量。为了改善激光切割的效率和质量,部分学者开始对变角度离轴切割进行研究。Quintero 等<sup>[14-16]</sup>对激光束的轴线与喷嘴轴线不同轴的气流场结构进行了分析研究,结果发现,当激光束的中心轴线与喷嘴的中心轴线成一定夹角时,可在一定程度上提高切割质量和效率。为了进一步改善激光切割质量,一种离轴式激光切割方法被提了出来,并且 Zhang 等<sup>[17]</sup>和孙凤等<sup>[18]</sup>设计了可与传统激光切割机床连接的

高速度、高精度电磁驱动器,用以控制激光束轴线和辅助气体轴线的相对位移。此外,孙凤等<sup>[19]</sup>还提出了相应的控制策略,通过实验分析了驱动器的轨迹跟踪特性,并评估了其定位性能。

目前,还未见辅助气体轴线与激光束轴线不同轴对气流场结构影响的研究报道,因此,本文建立了离轴式激光切割的有限元模型,通过有限元软件进行模拟,研究了离轴量在激光切割过程中对辅助气体动力学性能的影响,并对仿真结果进行了比较分析,最后进行了切割实验验证。

## 2 离轴激光切割原理与几何模型的建立

### 2.1 离轴激光切割原理

离轴激光切割是指在激光束相较于辅助气体前置一定距离的情况下,聚焦在工件表面,使材料受热熔化,熔融物在辅助气体的作用下被吹走,从而形成较窄的切缝,完成切割。图 1 所示为离轴激光切割过程示意图。

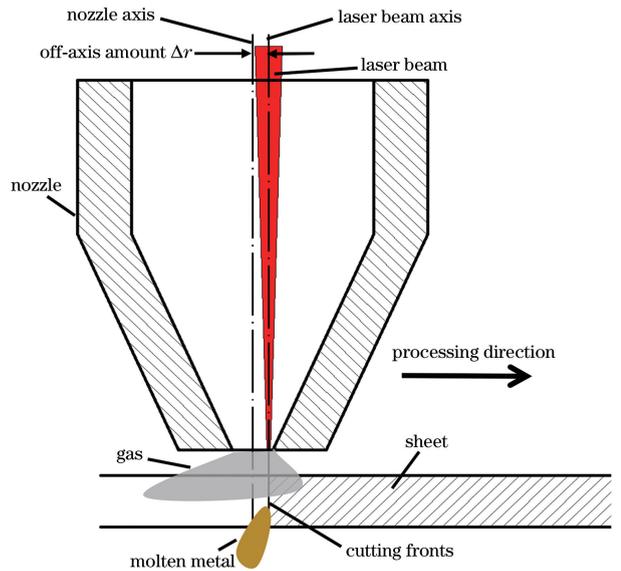


图 1 离轴激光切割过程示意图

Fig. 1 Diagram of off-axis laser cutting process

### 2.2 有限元建模

#### 2.2.1 流体力学主控方程

辅助气体与切割材料之间的相互作用可以用雷诺平均 N-S(RANS)方程来描述,即

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) =$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] +$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}), \quad (2)$$

式中： $u_i, u_j, u_l$  表示略去平均符号后的雷诺平均速度分量； $\rho$  为密度； $p$  为气体压力； $u'_i, u'_j$  为脉冲速度分量； $t$  为时间； $\mu$  为动力黏度； $\delta_{ij}$  为克罗内克张量的分量；附加项  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  为雷诺应力。雷诺应力的计算公式为

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}, \quad (3)$$

式中： $\mu_t$  为湍流黏度； $k$  为湍动能； $u_k$  为平均速度的分量。

### 2.2.2 建立离轴切割模型的假设

离轴激光切割过程中有两相流的相互作用，过程复杂，要准确描述整个过程是有难度的。所以，在能得到相对可靠结果的情况下可以做出恰当的假设，以描述整个切割过程。本文对模型做出以下假设：

1) 对已有的实验进行观察分析，可以得到切割前沿的倾斜角度很小，不会超过光斑直径与工件厚度之比，所以本模型中将此倾斜角度忽略<sup>[20]</sup>；

2) 在离轴切割过程中，由于辅助气体轴线与激光束轴线不同轴，但是随着激光束的移动，工件的切割前沿一直在变化，因此，在离轴切割模型中假设切割前沿是与激光束轴线重合的；

3) 在离轴激光切割过程中，切割位置的材料主要以熔融的方式被去除，而熔融物的温度未达到加工材料的沸点，所以本文在模型中不考虑气化以及等离子效应<sup>[21]</sup>。

### 2.2.3 建立几何模型及网格划分

如图 2 所示为三维激光切割 2 mm 厚低碳钢板的示意图，图中喷嘴出口到工件上表面的距离为 1 mm。如图 3 所示为 1/2 喷嘴结构，其与实际喷嘴形状相同，喷嘴的物理参数如表 1。根据图 2 和图 3 的结构尺寸，本文采用有限元分析软件 Fluent 进行二维仿真分析。为方便计算，假设在计算域内流体域充满的是辅助气体，并且将喷嘴出口中点设为原点。

在有限元软件模块中建立二维仿真模型，然后将其导入 Meshing 中进行网格划分，采用四边形网格，网格尺寸为 0.2 mm，共有 358291 个节点。由于本文主要研究气流场的变化，所以只选取了喷嘴及工件附近的网格，且将工件的网格隐藏，如图 4 所示。

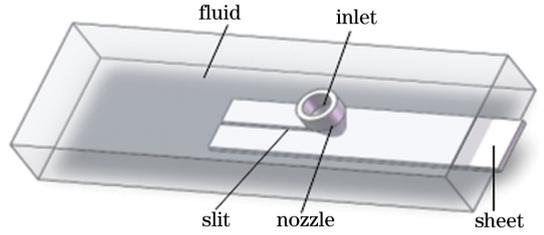


图 2 激光切割示意图

Fig. 2 Schematic of laser cutting

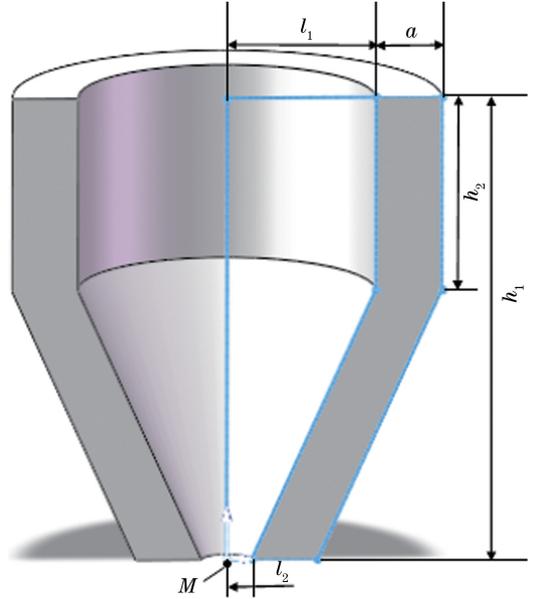


图 3 喷嘴结构

Fig. 3 Nozzle structure

表 1 喷嘴模型的物理参数

Table 1 Physical parameters of nozzle model

Parameter	Description	Value / mm
$l_1$	Nozzle inlet radius	4.50
$l_2$	Nozzle outlet radius	0.75
$h_1$	Nozzle length length	14.40
$h_2$	Stable section length	6.00
$a$	Nozzle shell thickness	2.00
$M$	Origin point	—

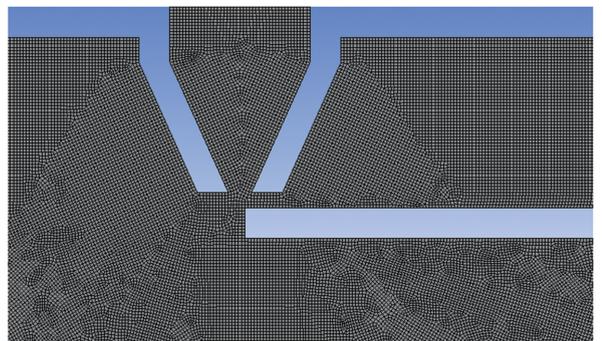


图 4 网格模型

Fig. 4 Grid of model

### 3 离轴激光切割的仿真结果

#### 3.1 离轴激光切割仿真参数的设定

为了使仿真结果能更好地接近于实际效果,仿真中用到的物理参数基于实际物理参数而设定。表 2 是离轴切割仿真参数,表 3 是固态和液态低碳钢的物理参数

表 2 离轴切割仿真参数

Table 2 Simulation parameters of off-axis cutting

Physical parameter	Value
Sheet thickness /mm	2
Initial temperature of sheet /K	300
Nitrogen purity /%	99.9
Specific heat capacity of nitrogen / $[J \cdot (kg \cdot K)^{-1}]$	1.038
Thermal conductivity of nitrogen / $[W \cdot (m \cdot K)^{-1}]$	0.0242
Viscosity of nitrogen / $(Pa \cdot s)$	$1.663 \times 10^{-5}$

表 3 固态和液态低碳钢的物理参数

Table 3 Physical parameters of solid and liquid mild steel

Material property	Solid	Liquid
Density / $(kg \cdot m^{-3})$	7850	6980
Specific heat capacity / $[J \cdot (kg \cdot K)^{-1}]$	477	748
Thermal conductivity / $[W \cdot (m \cdot K)^{-1}]$	78.2	10
Melting temperature /K	1700	—
Heat transfer coefficient / $[W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1}]$	30	—

#### 3.2 离轴量对气体动力学性能的影响

##### 3.2.1 离轴量对气流速度和压力的影响

图 5 和图 6 所示分别为在 0.6 MPa 入口压力及不同的离轴量( $\Delta r$ )下,气流沿切割前沿的速度分布等值图( $y=0$  平面)和速度分布曲线,切割方向沿  $x$  轴正方向。

由图 5 可知:随着离轴量增大,气体流动更为规律,在工件底部,气体流线方向几乎与工件垂直,在靠近切缝前沿区域,高速气体所占区域增大。

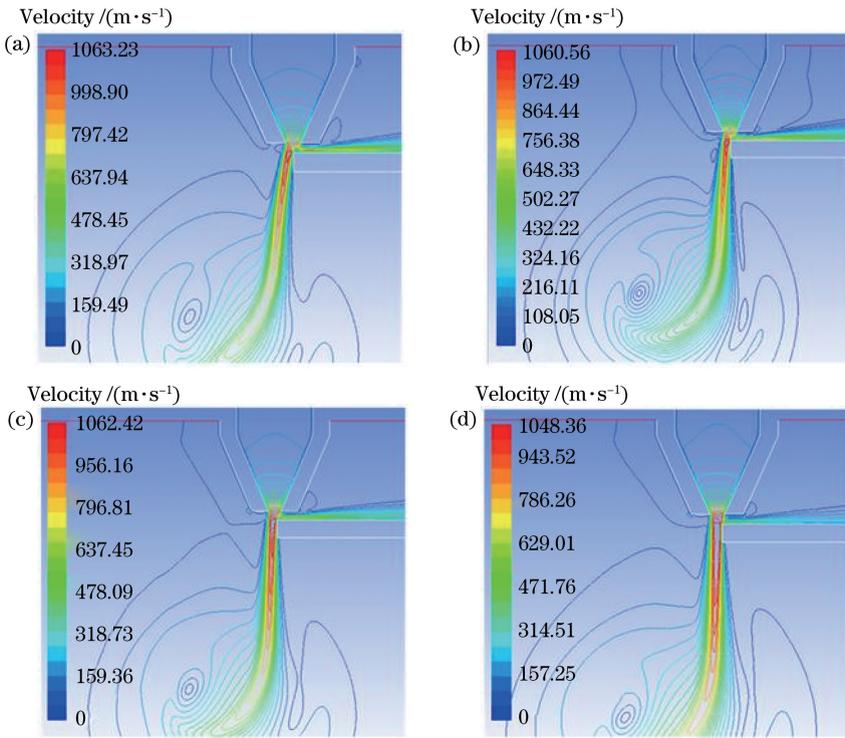


图 5 不同离轴量下气流沿切割前沿的速度分布等值图。(a)  $\Delta r=0$  mm; (b)  $\Delta r=0.1$  mm; (c)  $\Delta r=0.3$  mm; (d)  $\Delta r=0.5$  mm

Fig. 5 Equivalent graphs of velocity distribution of air flow along cutting front at different off-axis amounts.

(a)  $\Delta r=0$  mm; (b)  $\Delta r=0.1$  mm; (c)  $\Delta r=0.3$  mm; (d)  $\Delta r=0.5$  mm

由图 6 可知:当  $\Delta r=0$  mm 时,喷嘴出口速度为 731.46 m/s;当  $\Delta r=0.1, 0.3, 0.5$  mm 时,对应的喷嘴出口速度分别为 755.19, 824.07, 901.82 m/s。由于在喷嘴出口( $z=0$  mm)处,喷嘴壁面对气流的束缚突然消失,且辅助气体轴线与切割前沿有一定

距离,因此增大了辅助气体对切割材料作用的速度。因此,随着离轴量增大,气体在切割前沿上端的速度也会增大。然而在切缝中,随着气体在切缝前沿的作用点到喷嘴的距离增大,气体的速度慢慢减小,当  $\Delta r=0$  mm 时,气体的速度为 11.58 m/s,当  $\Delta r=$

0.1, 0.3, 0.5 mm 时, 速度分别为 27.53, 39.89, 49.03 m/s。可见, 气体进入切缝后, 虽然速度变化缓慢, 但随着离轴量增大, 切割前沿上的气流速度也有所增大。切缝底部气流速度变化趋于平缓, 这有利于气流的扩散。

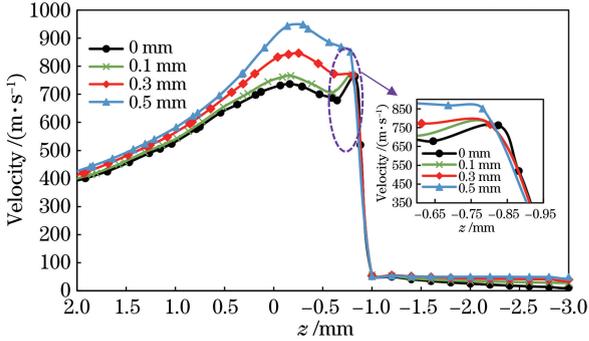


图 6 不同离轴量下气流沿切割前沿的速度分布曲线图  
Fig. 6 Velocity distribution curves of air flow along cutting fronts at different off-axis amounts

在 0.6 MPa 入口压力下及不同的离轴量下, 气流沿切割前沿的压力分布曲线如图 7 所示, 在喷嘴出口 ( $z=0$  mm) 处, 由于气流的扩散, 压力下降; 在气体到达切割前沿上部 ( $z$  在  $-0.8 \sim -1.2$  mm 范围内) 后, 气流受到压缩, 压力增大; 气体进入切缝 ( $z$  在  $-1.2 \sim -3$  mm 范围内) 后, 气流扩张, 压力减小, 形成低压区域, 压力变化慢慢趋于平缓。当  $\Delta r = 0$  mm 时, 切缝前沿上部低压区域的压力为  $-0.347$  MPa, 而  $\Delta r = 0.1, 0.3, 0.5$  mm 时, 压力分别为  $-0.351, -0.257, -0.099$  MPa, 切缝前沿上部的压力总体上呈下降趋势, 表明离轴距离增大可使气体扩散得更充分, 同时高速气流也作用在切缝中, 所以气流吹除金属熔融物的能力增强。

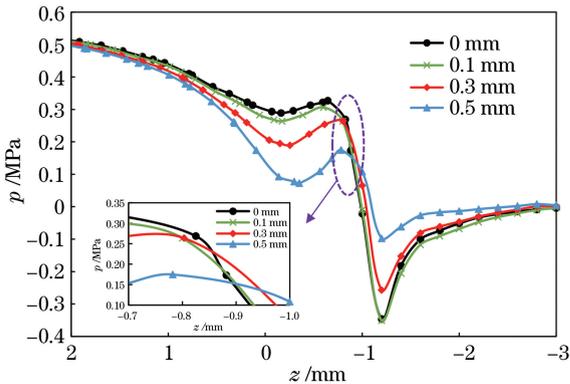


图 7 不同离轴量下气流沿切割前沿的压力分布曲线图  
Fig. 7 Pressure distribution curves of air flow along cutting fronts at different off-axis amounts

### 3.2.2 离轴量对气流剪切力分布的影响

图 8 所示为在 0.6 MPa 入口压力下气流的剪切

力沿切割前沿的分布曲线图, 可以看出, 剪切力作用的位置受到压力和速度的影响。在切割前沿上部 ( $z$  在  $-1 \sim -1.2$  mm 范围内), 剪切力较大, 此时有利于氮气将熔融层向下吹动; 气流进入切缝后, 剪切力下降, 直至切缝前沿底端才有上升的趋势。当  $\Delta r = 0$  mm 时, 气体在切割前沿底部的剪切力为 80.90 Pa; 当  $\Delta r = 0.1, 0.3, 0.5$  mm 时, 对应的剪切力分别为 296.18, 642.59, 1003.88 Pa。可见, 随着离轴量增大, 剪切力也有所增大, 但是, 在  $\Delta r = 0.5$  mm 时, 剪切力在切割前沿底部的方向发生了改变, 成为向上的方向, 这样会使气流出现逆流动, 从而将部分金属熔渣带回到工件上, 进而影响了切割质量。

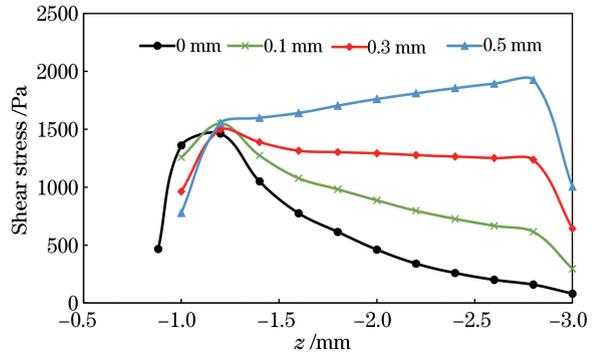


图 8 不同离轴量下气流沿切割前沿的剪切力分布曲线图  
Fig. 8 Shear stress distribution curves of air flow along cutting fronts at different off-axis amounts

## 3.3 喷嘴出口到工件表面的距离 $H$ 在离轴切割时对气流场的影响

### 3.3.1 $H$ 对气流速度和压力分布的影响

当离轴量为 0.3 mm, 入口压力为 0.6 MPa 时, 在不同的  $H$  下, 气流沿切割前沿的速度分布等值图 ( $y=0$  平面) 以及速度、压力分布曲线如图 9 和图 10 所示, 切割方向沿  $x$  轴正方向。

结合图 9 和图 10 可知: 在离轴条件下, 随着  $H$  变大, 气流扩散得更加充分, 所以在喷嘴出口的位置高速低压区域显著增大, 而且气流最大速度值变大; 进入切缝后,  $H=1.0$  mm 时的气流速度保持在较高的水平; 随着  $H$  增大, 气流压力基本一致, 没有太大变化。因此  $H$  的变化对切缝中熔融金属的作用效果相差不大, 但是相比之下,  $H=1.0$  mm 时气流可以更好地作用在熔融物上。

### 3.3.2 $H$ 对气流剪切力分布的影响

当离轴量为 0.3 mm, 入口压力为 0.6 MPa 时, 在不同的  $H$  下气流沿切割前沿的剪切力分布曲线如图 11 所示, 可知: 在切割前沿上部, 剪切力随着  $H$

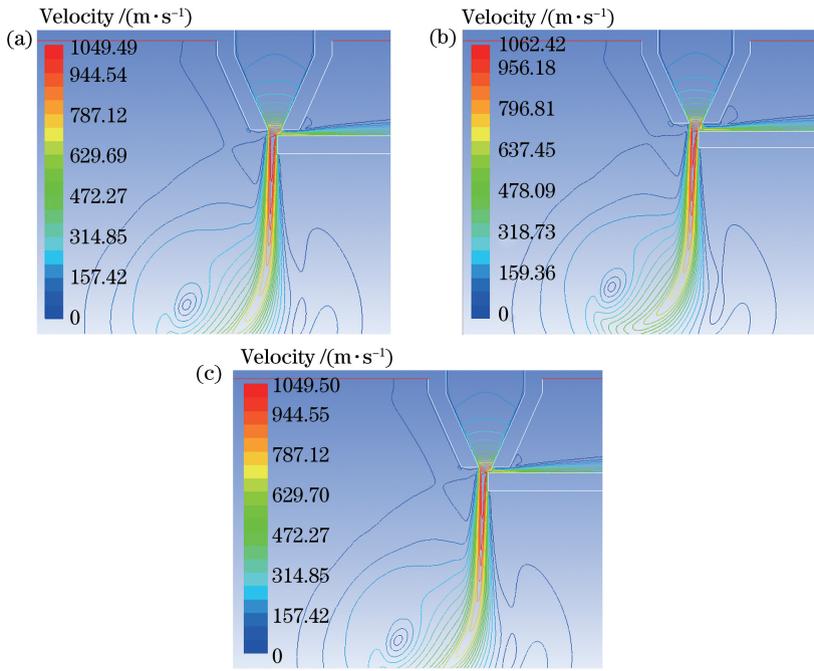


图 9 不同的  $H$  下, 气流沿切割前沿的速度分布等值图。(a)  $H=0.7$  mm; (b)  $H=1.0$  mm; (c)  $H=1.3$  mm  
Fig. 9 Equivalent graphs of velocity distribution of air flow along cutting front at different  $H$  values.

(a)  $H=0.7$  mm; (b)  $H=1.0$  mm; (c)  $H=1.3$  mm

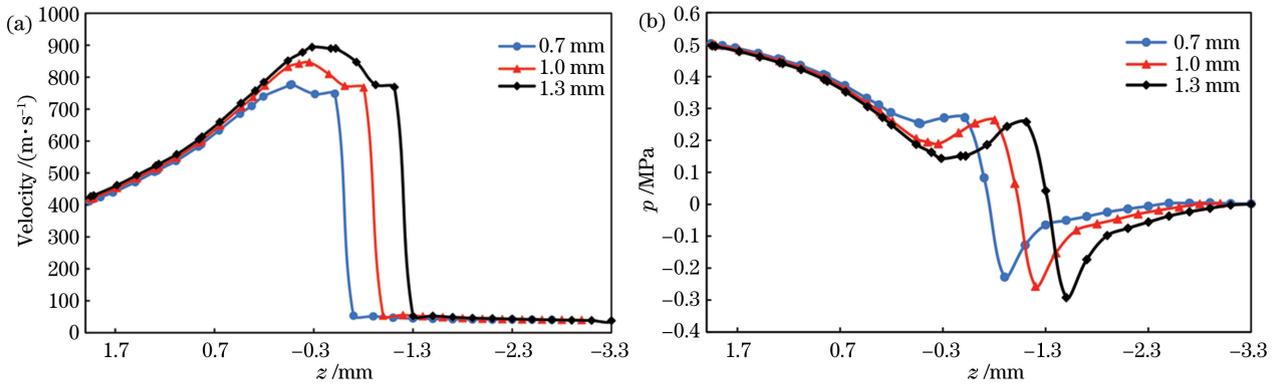


图 10 不同的  $H$  下, 气流沿切割前沿的速度分布和压力分布曲线图。(a) 速度分布; (b) 压力分布  
Fig. 10 Velocity and pressure distribution curves of air flow along cutting front at different  $H$  values.

(a) Velocity distribution; (b) pressure distribution

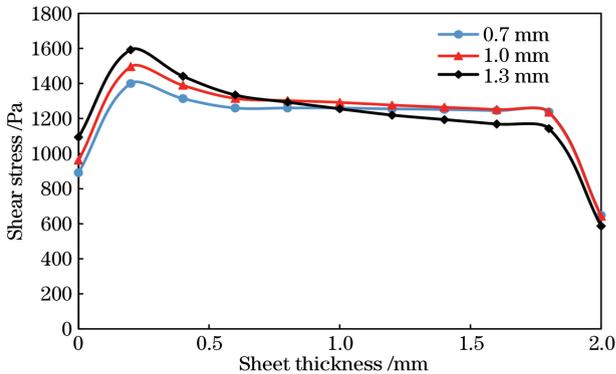


图 11 不同的  $H$  下, 气流沿切割前沿的剪切力分布曲线图  
Fig. 11 Shear stress distribution curves of air flow along cutting front at different  $H$  values

的增大而增大; 当钢板厚度为  $0.7 \sim 1.1$  mm 时,  $H=1.0$  mm 时的剪切力较大; 在切割前沿下部,  $H=1.3$  mm 时的剪切力最小。因此, 在离轴切割过程中, 选择  $H=1.0$  mm 更有利于挂渣的吹除。

#### 4 切割实验验证

使用 K-800-13M 型 YAG 激光切割机(最大输出功率为 800 W)进行切割实验, 采用圆锥型喷嘴, 激光电流为 190 A, 频率为 210 Hz, 脉宽为 0.8 ms, 辅助气体为氮气, 切割 2 mm 厚的低碳钢板。首先在不同的离轴量下进行切割实验, 其他切割参数保持不变, 表 4 所示为离轴切割低碳钢

板的实验条件。受喷嘴直径的影响,将离轴量取值范围 0~0.3 mm 作为实验条件。然后,在相同的离轴量(0.3 mm)条件下,选择不同的  $H$  进行切割实验。

实验完成后,采用 VHX-900f 激光显微镜对试样进行测量:一是测量切缝宽度,结果取平均值;二是测量切割后切缝处残留的挂渣到切割材料下表面的距离,测量结果取平均值作为挂渣高度。

表 4 离轴切割低碳钢板的实验条件

Table 4 Experimental conditions for off-axis cutting of mild steel sheet

Gas pressure at inlet /MPa	Cutting speed $v$ / ( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )	Nozzle diameter $d$ /mm	Distances from nozzle outlet to workpiece surface $H$ /mm
0.6	200	1.5	1

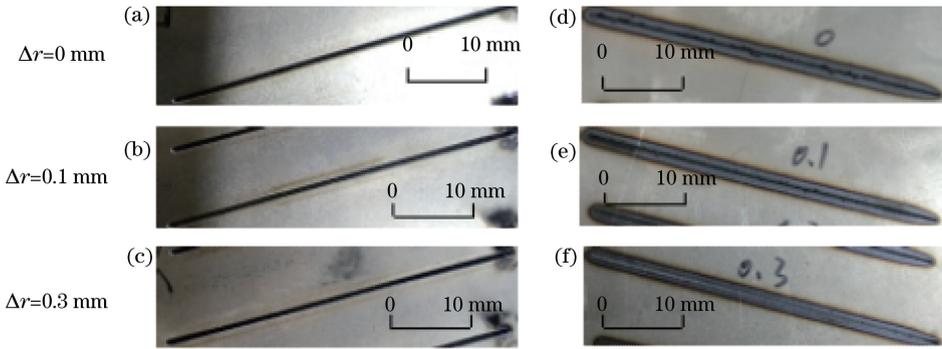


图 12 不同的离轴量下切缝正面和背面的宏观形貌。(a)~(c)正面;(d)~(f)背面  
Fig. 12 Macroscopic morphology of front and back faces of cut slit at different off-axis amounts.

(a)-(c) Front; (d)-(f) back

图 13 给出了离轴量对挂渣量的影响,可以看出,随着离轴量增大,挂渣的平均长度减小。由于离轴量增大,大部分气体进入到切缝中,辅助气体能更有效地作用在切缝内部;同时,气流对切割前沿产生的剪切力足以迅速吹除熔融金属,从而使得挂渣减少,切割质量更高。

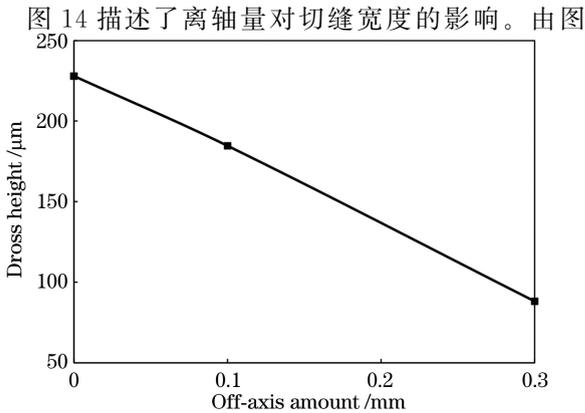


图 13 离轴量对挂渣量的影响

Fig. 13 Influence of off-axis amount on slag hanging quantity

#### 4.1 离轴量对切割质量影响的实验分析

图 12 为不同离轴量下切缝正面和背面的宏观形貌,可以看出:在其他实验条件相同的情况下,同轴和离轴切割的切缝正面都成形良好,背面有不同程度的挂渣,且挂渣成颗粒状粘附在切口边缘;同轴切割时,挂渣较多,随着离轴量增大,挂渣减少。在保持其他切割参数相同的情况下,剪切力随着离轴量的增大而增大,有利于切割前沿底端金属熔渣的吹除。

14 可以看出,随着离轴量增大,上下表面切缝宽度呈下降的趋势。同轴切割时,激光束切割工件的同时辅助气体能对切缝进行迅速冷却。结合前文分析可知,当离轴切割时,随着离轴量增大,剪切力增大,金属熔渣被及时吹除,使其无法向切缝侧面的工件继续传热,从而在一定程度上减小了工件继续熔化的可能,使切缝宽度变窄。

#### 4.2 $H$ 对切割质量影响的实验分析

当离轴量为 0.3 mm 时,不同的  $H$  下切缝正面和背面的宏观形貌如图 15 所示,可以看出,在保持其他切割参数相同的情况下,改变喷嘴出口到工件表面的距离,除打孔阶段外,稳定切割阶段切缝的正面形状良好,背面都有少许挂渣,挂渣的分布情况不同; $H=0.7$  mm 和  $H=1.3$  mm 时的挂渣较明显,有大颗粒挂渣粘附在工件下表面。

图 16、17 分别为  $H$  对切缝宽度和挂渣量的影响。由图 16 可知:工件上下表面的切缝宽度相差不大,但  $H=1.0$  mm 时的切缝宽度较窄。

由图 17 可知挂渣平均高度受  $H$  的影响较大,

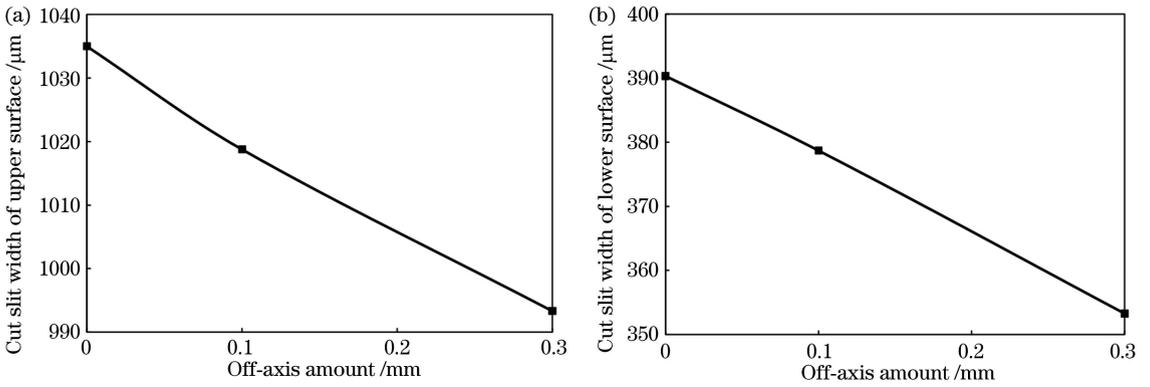


图 14 离轴量对切缝宽度的影响。(a)上表面切缝宽度;(b)下表面切缝宽度

Fig. 14 Influence of off-axis amount on width of cut slit. (a) Cut slit width of upper surface; (b) cut slit width of lower surface

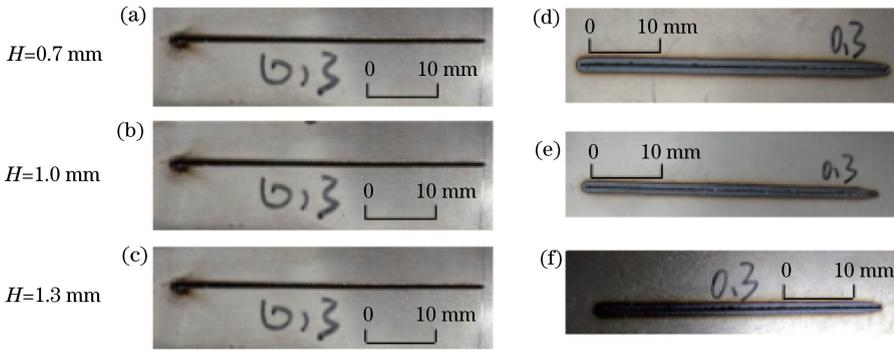


图 15 不同的  $H$  下,切缝正面和背面的宏观形貌。(a)~(c)正面;(d)~(f)背面

Fig. 15 Macroscopic morphology of the front and back faces of cut slit at different  $H$  values. (a)-(c) Front; (d)-(f) back

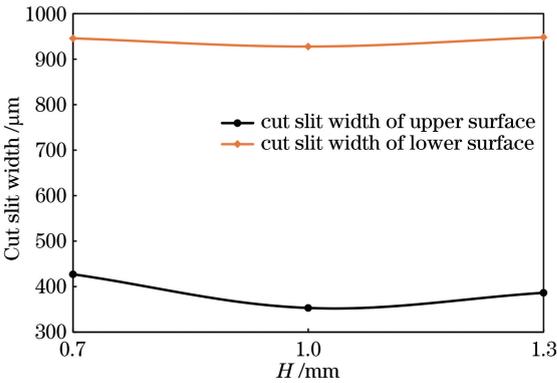


图 16  $H$  对切缝宽度的影响

Fig. 16 Influence of  $H$  on the width of cut slit

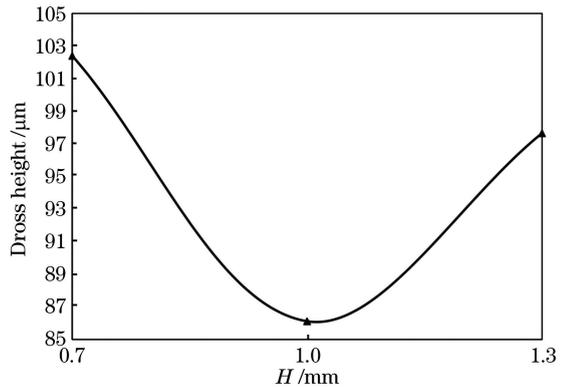


图 17  $H$  对挂渣量的影响

Fig. 17 Influence of  $H$  on slag hanging quantity

$H=1.0$  mm 时,挂渣的平均高度较小,说明此时工件的切割质量较高。结合  $H$  对气流剪切力的影响分析可知,虽然  $H=1.3$  mm 时在切割前沿上部气体的剪切较大,但是在切缝中  $H=1.0$  mm 时的气流有较大的剪切力,此时可以把大部分的熔融物及时吹除,从而提高切割质量。

## 5 结 论

用有限元分析软件建立了切割过程中辅助气体

和切缝之间相互作用的模型,通过对比分析不同离轴量下切割的仿真结果可以发现,离轴量增大,切缝中气体的压力、速度和剪切力都有所增大,这表明切割过程中的气流场在一定程度上受到离轴量的影响。

通过分析剪切力在切割前沿分布的仿真结果可以发现,离轴量并不是越大越好。对于切割 2 mm 厚的低碳钢,当离轴量为 0.5 mm 时,在切割前沿底端的剪切力的方向会改变,不利于液态金属熔渣的吹

除;当离轴量选取 0.3 mm 时,气体的动力学性能最好,切割质量也相对更好。

本文对离轴距离为 0.3 mm 时不同  $H$  下的气流场进行了仿真,分析仿真结果发现, $H$  对气流的速度和剪切力稍有影响。与  $H=0.7$  mm 和  $H=1.3$  mm 相比, $H=1.0$  mm 时的气体动力学性能较好,更有利于切割质量。

改变离轴量切割低碳钢板的实验结果表明,在保持其他切割参数相同的情况下,在一定范围内随着离轴距离的增大,挂渣量减小,工件表面切缝宽度减小。这一实验结果与仿真结果相符,表明离轴量影响了切割过程中辅助气体的动力学性能,合适的离轴量可以改善切割质量。

在离轴条件下通过改变喷嘴出口到工件表面的距离进行了切割实验验证,结果表明:当喷嘴出口到工件表面的距离为 1.0 mm 时,切缝较窄,挂渣量较少,此时的切割质量较好。因此,选择  $H=1.0$  mm 即可。

### 参 考 文 献

- [1] Yuan W, Li Z G, Cai Y G. Simulation of ANSYS-based laser cutting temperature field[J]. Journal of Changchun University (Natural Science Edition), 2013, 23(12): 1561-1564.  
袁伟, 李占国, 蔡云光. 基于 ANSYS 的激光切割温度场仿真[J]. 长春大学学报(自然科学版), 2013, 23(12): 1561-1564.
- [2] Yan C, Li L J, Li J, et al. Review of surface quality study on laser sheets cutting[J]. Laser Technology, 2005, 29(3): 270-274.  
鄢铨, 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.
- [3] Hua Y Q, Chen R F, Zhang Y K, et al. Comparison inspection and control methods of surface quality of laser cutting[J]. Heat Treatment of Metals, 2001, 26(11): 25-27, 40.  
花银群, 陈瑞芳, 张永康, 等. 激光切割表面质量比照判别与控制方法[J]. 金属热处理, 2001, 26(11): 25-27, 40.
- [4] Duan J, Man H C, Yue T M. Modelling the laser fusion cutting process: II. Distribution of supersonic gas flow field inside the cut kerf [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 34(14): 2135-2142.
- [5] Kovalev O B, Yudin P V, Zaitsev A V. Modeling of flow separation of assist gas as applied to laser cutting of thick sheet metal [J]. Applied Mathematical Modelling, 2009, 33(9): 3730-3745.
- [6] Qiu M Y, Hu J, Yao Z Q. Effect about assemble nozzle's internal figure parameters to jet field [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(5): 1296-1301.  
邱明勇, 胡俊, 姚振强. 会聚型喷嘴内部形状参数对射流流场的影响[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1296-1301.
- [7] Yang L. Numerical simulation and application research of the gas flow field in laser cutting auxiliary nozzles[J]. Journal of Bengbu College, 2013, 2(3): 7-10.  
杨丽. 激光切割辅助复合喷嘴气体流场的数值模拟研究[J]. 蚌埠学院学报, 2013, 2(3): 7-10.
- [8] Shen Y P, Chen C, Gao M, et al. Technological characteristics in fiber laser cutting of medium-thickness aluminum alloy sheet [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0102008.  
沈义平, 陈聪, 高明, 等. 光纤激光切割中厚铝合金板工艺特性研究 [J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0102008.
- [9] Tan X H, Wang W, Shan J G, et al. Numerical simulation on dynamic performance of assistant gas during laser cutting process [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(5): 25-28, 98.  
谭向虎, 王威, 单际国, 等. 激光切割过程辅助气体动力学性能的数值模拟 [J]. 焊接学报, 2012, 33(5): 25-28, 98.
- [10] Wen P, Wang W, Tan X H, et al. Numerical simulation of effect of laser power and assistant gas on laser cutting ability [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(4): 57-60.  
温鹏, 王威, 谭向虎, 等. 激光能量和辅助气体对切割能力影响的数值模拟 [J]. 焊接学报, 2013, 34(4): 57-60.
- [11] Zhang L X, Li Q. Influence of laser cutting parameters on auxiliary gas flow field [J]. Machinery & Electronics, 2019, 37(2): 18-21.  
张立鑫, 李玺. 激光切割参数对辅助气体流场影响研究 [J]. 机械与电子, 2019, 37(2): 18-21.
- [12] Chen C, Gao M, Gu Y Z, et al. Study on fiber laser cutting of aluminum alloy sheet [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 0603004.  
陈聪, 高明, 顾云泽, 等. 光纤激光切割铝合金薄板工艺特性研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0603004.
- [13] Feng Q B, Zhao W C, Li Y B. Effect of process parameters on laser cutting quality for stainless steel sheets [J]. Machine Design & Research, 2017, 33(6): 118-121.  
冯巧波, 赵旺初, 李永兵. 工艺参数对不锈钢薄板激光切割质量的影响 [J]. 机械设计与研究, 2017, 33(6): 118-121.

- [14] Quintero F, Pou J, Lusquiños F, et al. Quantitative evaluation of the quality of the cuts performed on mullite-alumina by Nd:YAG laser [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 42(3): 327-340.
- [15] Quintero F, Pou J, Lusquiños F, et al. Laser synthesis of amorphous Si-Al oxide nanowires under atmospheric conditions[J]. *Applied Surface Science*, 2005, 247: 631-635.
- [16] Quintero F, Pou J, Fernández J L, et al. Optimization of an off-axis nozzle for assist gas injection in laser fusion cutting[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44(11): 1158-1171.
- [17] Zhang X, Shinshi T, Fukuoka T, et al. Development of a 2-DOF controlled magnetic drive actuator for laser beam cutting [J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2013, 7(3): 448-457.
- [18] Sun F, Zhou X, Tong L, et al. Experimental analysis of trajectory tracking characteristics of laser focus control magnetic driver[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2018 (11): 67-70.
- 孙凤, 周雪, 佟玲, 等. 激光焦点控制磁力驱动器轨迹跟踪特性实验分析[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2018(11): 67-70.
- [19] Sun F, Zhang Q, Xu F C, et al. Analysis of fuzzy PID control characteristics on electromagnetic actuator for laser optical path control [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(2): 430-441.
- 孙凤, 张琪, 徐方超, 等. 激光光路控制电磁作动器的模糊PID控制特性分析[J]. *兵工学报*, 2019, 40 (2): 430-441.
- [20] Zhang Z X. The analysis of gas flow field in oxygen-assisted laser cutting of thick mild steel [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012: 19.
- 张卓贤. 中厚板氧化助熔激光切割辅助气体流场分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2012: 19.
- [21] Powell J, Petring D, Kumar R V, et al. Laser-oxygen cutting of mild steel: the thermodynamics of the oxidation reaction [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 42(1): 015504.