

## 激光与光电子学进展

不同工艺参数下超高功率激光切割 304 不锈钢  
厚板断面质量研究石新升<sup>1,2,3</sup>, 张毫杰<sup>1,2,3</sup>, 葛鸿浩<sup>1,2,3</sup>, 蔡亮<sup>4</sup>, 程德志<sup>4</sup>, 张群莉<sup>1,2,3</sup>, 吴让大<sup>4</sup>, 姚建华<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>浙江工业大学激光先进制造研究院, 浙江 杭州 310014;<sup>2</sup>浙江工业大学机械工程学院, 浙江 杭州 310014;<sup>3</sup>高端激光制造装备省部共建协同创新中心, 浙江 杭州 310014;<sup>4</sup>奔腾激光(浙江)股份有限公司, 浙江 温州 325000

**摘要** 为探究厚板激光切割过程中工艺参数对切割断面质量的影响,使用奔腾激光自主研发的 30000 W 超高功率光纤激光切割机对 40 mm 厚 304 不锈钢进行四因素、五水平正交试验,分析残差结果,得到各工艺参数对切割断面指标(上下切缝宽度、垂直度以及上部、中部、下部板材粗糙度值)的影响规律。结果表明:上下表面切缝宽度影响主次为离焦量、辅助气压、激光功率、切割速度;垂直度影响主次为切割速度、离焦量、激光功率、辅助气压;粗糙度影响主次为激光功率、离焦量、辅助气压、切割速度。残差分析结果表明,超高功率激光切割 40 mm 厚 304 不锈钢优化工艺参数如下:激光功率为 20000 W、切割速度为 200 mm/min、辅助气压为 18 bar、离焦量为 +11 mm。

**关键词** 超高功率; 厚板; 正交试验; 工艺参数; 断面质量

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222991

Research on Section Quality of 304 Stainless Steel Thick Plate Cut by  
Ultra-High Power Laser Under Different Process ParametersShi Xinsheng<sup>1,2,3</sup>, Zhang Haojie<sup>1,2,3</sup>, Ge Honghao<sup>1,2,3</sup>, Cai Liang<sup>4</sup>, Cheng Dezhi<sup>4</sup>,  
Zhang Qunli<sup>1,2,3</sup>, Wu Rangda<sup>4</sup>, Yao Jianhua<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014,  
Zhejiang, China;<sup>2</sup>College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, Zhejiang, China;<sup>3</sup>Collaborative Innovation Center of High-End Laser Manufacturing Equipment, Hangzhou 310014,  
Zhejiang, China;<sup>4</sup>Penta Laser (Zhejiang) Co., Ltd., Wenzhou 325000, Zhejiang, China

**Abstract** In order to explore the influence of technological parameters on the cutting section quality in the process of thick plate laser cutting, the 30000 W ultra-high power fiber laser cutting machine independently developed by Penta laser was used to carry out four factors and five levels orthogonal tests on 304 stainless steel with a thickness of 40 mm, and the residual results were analyzed. The influence law of each process parameter on the cutting section index (upper and lower slit width, perpendicularity and the roughness value of the upper, middle and lower plates) was obtained. The results show that the influence of slit width on the upper surface is defocus amount, auxiliary gas pressure, laser power, and cutting speed. The influence of perpendicularity is cutting speed, defocus amount, laser power, and auxiliary gas pressure. The primary and secondary effects of roughness are as follows laser power, defocus amount, auxiliary gas pressure, and cutting speed. The results of the residual analysis show that the optimized process parameters of ultra-high power laser cutting 304 stainless steel with 40 mm thickness are as follows laser power 20000 W, cutting speed 200 mm/min, auxiliary gas pressure 18 bar, and defocus amount +11 mm.

**Key words** ultra-high power; thick plate; orthogonal test; process parameters; section quality

收稿日期: 2022-11-08; 修回日期: 2022-12-30; 录用日期: 2023-02-06; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 浙江省“尖兵”研发攻关计划(2022C03021)

通信作者: \*lam@zjut.edu.cn

## 1 引言

随着科技发展,厚板材逐渐应用在桥梁、甲板、模具等领域。传统切割方法如等离子切割、火焰切割,在厚板切割方面应用广泛<sup>[1]</sup>。但随着激光器功率的增大,激光切割逐步应用到厚板切割领域。激光切割是利用聚焦后的高功率密度激光束照射工件,使被照射的材料迅速熔化、气化、烧蚀或达到燃点,同时借助与光束同轴的高速气流吹除熔融物质,实现将工件割开的一种热加工工艺<sup>[2]</sup>。激光切割是一个多因素相互耦合、相互影响的复杂过程,需通过逐步试验探究其工艺参数。影响切割质量的主要工艺参数为激光功率、切割速度、气体压力、离焦量。激光切割效率很高,随着板厚的增大,表面粗糙度、缝宽、锥度等指标逐渐变差,探究合理的切割工艺参数成为当下厚板切割的主要研究方向<sup>[3]</sup>。

目前,国内外许多学者针对激光切割工艺进行研究。如王利民等<sup>[4]</sup>采用高功率光纤激光对 15 mm 厚 2A12 铝合金开展了激光切割工艺试验,系统研究了离焦量、切割速度、辅助气压、激光功率等参数对切割质量的影响。华中科技大学邓前松等<sup>[5]</sup>系统研究了激光功率、切割速度和氧气压力对切割质量的影响,分析了切割前沿温度分布对切割质量的决定作用,解决了中厚钢板小圆孔的高功率 CO<sub>2</sub> 激光切割时存在的切割质量差的问题。长安大学的刘晨璐等<sup>[6]</sup>利用正交试验法建立三因素、三水平正交试验,建立激光切割工艺参数与质量指标的回归模型,验证了回归模型的可靠性。上海交通大学的冯巧波等<sup>[7]</sup>采用 YAG 激光切割机对薄板不锈钢进行切割试验,分析工艺参数对挂渣量、切缝宽度、断面粗糙度的影响规律,并使用正交试验得出 1 mm 厚不锈钢板材的最佳切割工艺。Pocorni 等<sup>[10-11]</sup>

研究了光纤激光器在激光切割过程中切割前沿的形态,并利用高速成像技术研究了切割时切割前沿的流体动力学,探究切割前沿熔融液体流动对断面粗糙度影响。

早期的激光切割技术在切割 15 mm 厚度以上的板材时,切割速度明显下降,伴随着切边条纹和粘渣现象,切割缝质量无法与其他传统行业相比,随着激光器的发展,切割板材厚度逐渐增大,国内外学者也逐渐聚焦于厚板激光切割的研究。如华中科技大学的魏言峰等<sup>[8-9]</sup>采用单因素试验法研究工艺参数对 Q345 碳钢的影响因素,探究出 20 mm 碳钢的最佳切割工艺,分析切割断面组织及性能。Shin 等<sup>[12]</sup>研究大功率激光切割废弃核设备,成功使用 10 kW 激光器切割 150 mm 厚度核设备。Levichev 等<sup>[13]</sup>对厚板切割过程中的热积累做了试验探究,发现热积累是影响切割断面质量的重要因素,并提出了优化方法。但是厚板领域的超高功率激光切割技术并未成熟,探索厚板材激光切割工艺参数具有减少二次加工的重大实际意义。

本文采用 40 mm 厚 304 不锈钢板材,奔腾公司自主研发 30000 W 超高功率激光器进行切割试验,分析厚板激光切割过程中工艺参数对切割断面质量(如断面粗糙度、缝宽、垂直度)的影响规律,对结果进行残差分析并得出 40 mm 厚 304 不锈钢切割的最优工艺参数。

## 2 试验方法与工艺参数

### 2.1 试验材料和设备

本文试验使用材料为 40 mm 厚 304 不锈钢,其化学成分如表 1 所示。设备采用奔腾激光(浙江)有限责任公司自主研发的 30000 W 超高功率光纤激光器,如图 1 所示。

表 1 304 不锈钢化学成分表

Table 1 Chemical composition of 304 stainless steel

Material	Mass fraction / %								
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N	Fe
304	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	8.00-10.50	0.10	Bal.

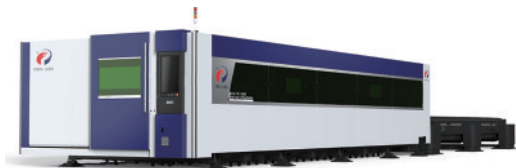


图 1 30 kW 超高功率激光切割数控机床

Fig. 1 30 kW ultra-high power laser cutting CNC machine tool

使用线切割机切割样品,样品经磨制与抛光处理。使用景通 VMS260A 三目体式显微镜拍摄缝宽、电子游标卡尺测量锥度,采用数值方法计算切割断面粗糙度,整合并分析数据。

### 2.2 激光切割特点与原理

激光切割技术是激光技术在工业中的主要应用,已成为当前工业加工领域应用最多的激光加工方法,占整个激光加工业的 70% 以上<sup>[14]</sup>。激光切割是利用聚焦的高功率密度激光束照射工件,在超过激光阈值的激光功率密度前提下,激光束的能量以及活性气体辅助切割过程所附加的化学反应热能全部被材料吸收,由此引起激光作用点的温度急剧上升,达到沸点后材料开始气化,并形成孔洞,随着光束与工件的相对运动,最终使材料形成切缝,切缝处的熔渣被一定的辅助气体吹除。如图 2 所示。

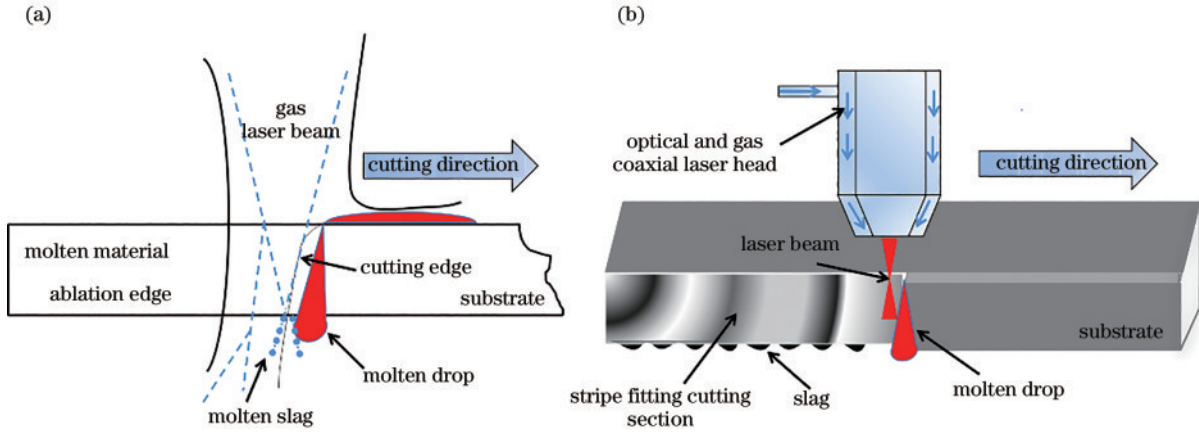


图2 激光切割区。(a)激光切割区示意图;(b)激光切割区原理图

Fig. 2 Laser cutting area. (a) Schematic diagram of laser cutting area; (b) principle diagram of laser cutting area

激光切割工艺有以下优点<sup>[15]</sup>:

- 1) 切割质量好。由于激光光斑小、能量密度高、切割速度快,激光切割能够获得较好的切割质量。
- 2) 切割效率高。由于激光的传输特性,激光切割机一般配有多台数控工作台,整个切割过程可以全部实现数控。操作时,只需改变数控程序,就可适用不同形状零件的切割,既可进行二维切割,又可实现三维切割。

- 3) 非接触式切割。激光切割时与工件无接触,不存在工具的磨损。加工不同形状的零件,不需要更换“刀具”,只需改变激光器的输出参数。因此,激光切割逐渐代替传统切割方法,成为当今主流的切割工艺。

### 2.3 激光切割断面质量评价

激光切割中缺陷主要有重铸层、刮渣和波浪条纹等<sup>[16]</sup>。激光切割切口质量要素如图3所示,主要包括切缝宽度、表面粗糙度、锥度等方面。

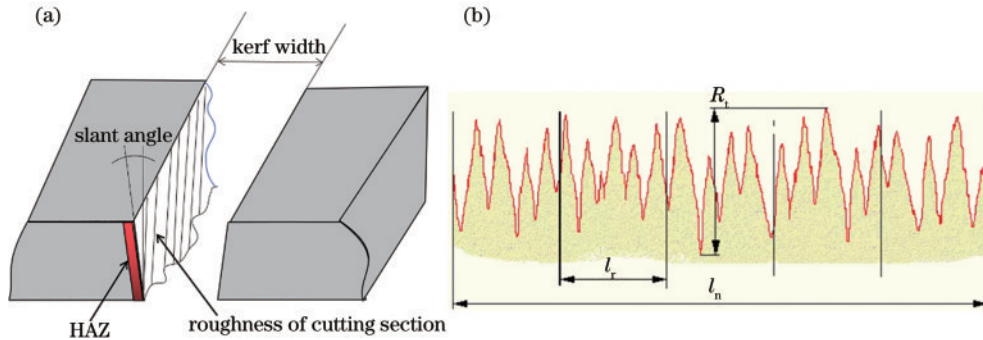


图3 切割质量评价。(a)切缝宽度、锥度示意图;(b)表面粗糙度示意图

Fig. 3 Cutting quality evaluation. (a) Schematic diagram of slit width and taper; (b) surface roughness diagram

#### 1) 切缝宽度

激光切割金属材料的切缝宽度,跟光斑直径有很大关系,在切割厚板时,上表面切缝宽度较大。厚板切割时会采用一定的离焦量,上表面的激光的功率密度较小,中间部位激光功率密度最大,下部分激光功率密度逐渐减小,导致厚板侧面切缝的宽度一般呈现先减小后增大的趋势。

#### 2) 表面粗糙度

激光切割表面粗糙度大小几乎和板厚的平方成正比,若不考虑板厚的影响,切割表面粗糙度和工艺参数相关性较大。计算公式表示为

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx, \quad (1)$$

式中: $y(x)$ 为表面轮廓上各点到中线距离; $l$ 为测量区

域长度。

当切割表面粗糙度值较小时采用 $R_a$ 表示。由于板材的厚度较大,因此测量区域长度 $l$ 和表面轮廓上各点到中线距离 $y(x)$ 较大,板材下部切割面粗糙度较大,因此使用 $R_r$ (波峰和波谷之间的最大距离)表示,虽不能精确量化地反映出切割表面粗糙度,但能表示其切割表面粗糙度变化趋势。

#### 3) 锥度

激光切割金属材料时,其切口形成的机理不同,切割面形状也不同。锥度 $m$ 的另一表达方式为倾斜角,切割面锥度大小与功率密度、切割速度、焦点位置等工艺参数有关,随着板材厚度的增大,锥度 $m$ 逐渐减小。

锥度 $m$ 的计算公式为

$$m = \frac{D-d}{l}, \quad (2)$$



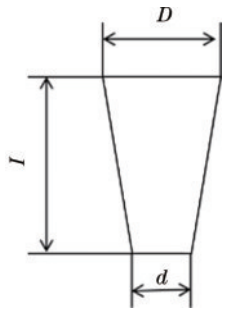


图4 锥度示意图

Fig. 4 Schematic diagram of taper

式中： $D$ 为上表面切缝宽度； $d$ 为下表面切缝宽度； $l$ 为板材厚度。

### 2.4 试验工艺参数及试验方案

#### 2.4.1 试验工艺参数

激光切割是个多因素相互耦合的过程,本研究采用正交试验法,进行多因素下的试验探究。本试验中,考察的主要参数有:激光功率、切割速度、气体压力、离焦量。参数对加工质量的影响相互耦合,如激光功率与切割速度共同控制对加工板材的能量输入,工艺参数对切割断面质量的影响相对复杂<sup>[17]</sup>。将断面粗糙度、锥度、缝宽作为因变量,设计四因素、五水平正交试验,探索 40 mm 厚板材工艺参数对切割断面的影响规律,其中,切割气体为氮气、光斑尺寸 1 mm、喷嘴距离 0.3 mm、喷嘴尺寸 5.0 mm。试验工艺参数如表 2 所示。

#### 2.4.2 试验方案

采用上述不同的工艺参数在 800 mm × 800 mm 的 304 不锈钢板材上进行切割,切割方案如图 5 所示,进行 5 次切缝长度为 20 mm 的切缝试验,切缝之间留出一定的间距,沿着切缝切下试样,便于进行切缝宽度的测量,切割试验完成后,使用景通 VMS260A 三目体式显微镜对缝宽进行测量,采用线切割将试样逐一切开,用上下切缝宽度对切口锥度进行计算,使用景通 VMS260A 三目体式显微镜拍摄出断面轮廓图,使用 Photoshop 提取断面轮廓图中形貌轮廓,将所得形貌轮廓图导入 Auto CAD 中,采用比例尺对轮廓内最大峰谷高度  $R_a$  进行测量,获得断面粗糙度。

## 3 试验结果形貌分析

根据正交试验表,对 304 不锈钢板材进行切割,其试样正面如图 6(a)所示,可以看出,切缝较为平直,缝宽变化较为明显。侧面切缝如图 6(b)所示。

由图 6(a)可知,切缝宽度有明显变化,激光切割路径由边缘部位进入,此时切缝较窄,由于切割过程没有预置打孔,初始阶段存在“匙孔”。继续切割进入基材,切缝变宽,激光切割过程对板材有预热作用,下部材料吸收的热量越多,切割越容易,导致切缝从边缘到结束有逐渐增大趋势,最终趋于固定值<sup>[17]</sup>。随着切割

表 2  $L_{25}(4^5)$  正交试验表

Table 2 Orthogonal test table of  $L_{25}(4^5)$

Level	Laser power / W	Cutting speed / (mm·min <sup>-1</sup> )	Auxiliary gas pressure /bar	Defocus amount / mm
1	10000	200	12	7
2	10000	275	14	9
3	10000	350	16	11
4	10000	425	18	13
5	10000	500	20	15
6	12500	200	12	7
7	12500	275	14	9
8	12500	350	16	11
9	12500	425	18	13
10	12500	500	20	15
11	15000	200	12	7
12	15000	275	14	9
13	15000	350	16	11
14	15000	425	18	13
15	15000	500	20	15
16	17500	200	12	7
17	17500	275	14	9
18	17500	350	16	11
19	17500	425	18	13
20	17500	500	20	15
21	20000	200	12	7
22	20000	275	14	9
23	20000	350	16	11
24	20000	425	18	13
25	20000	500	20	15

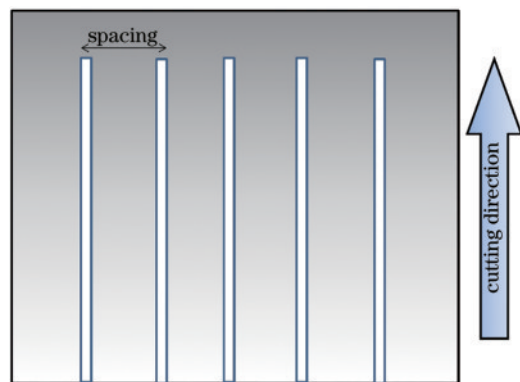


图5 切割试验方案

Fig. 5 Cutting test scheme

速度的变化,单位时间内输入到基材的能量也会改变,切缝宽度随之改变。

由图 6(b)可知,切缝上中下三部分呈现不规则分布。厚板切割切缝由上到下呈现“增大-减小-增大”的趋势,热量首先集中于上部,上部熔融板材在高压氮气

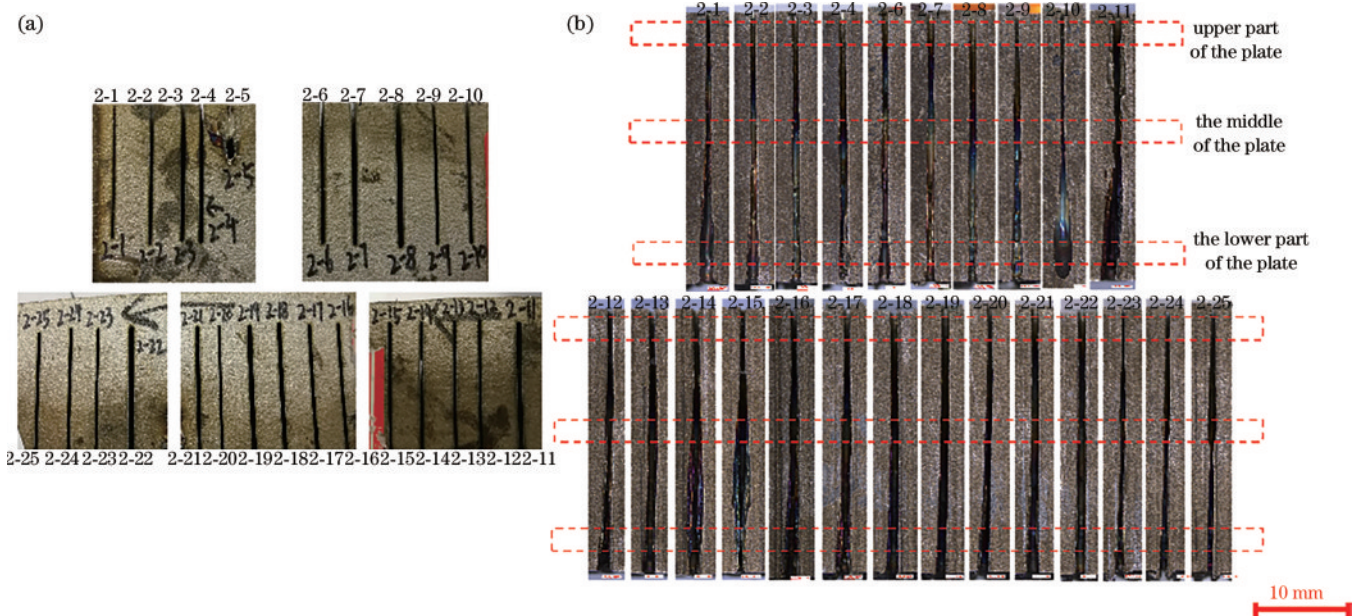


图 6 宏观形貌图。(a)切割试样正面图；(b)切割试样侧面图

Fig. 6 Macro topography. (a) Front view of cut sample; (b) side view of cut sample

的辅助下很快被吹除,中部区域的气体流速较小,且热量比上部区域小,中部熔融板材在重力的作用下聚集到下部板材,形成热积累,导致下部板材吸收热量更多,下部区域缝宽更宽<sup>[17]</sup>。

厚板激光切割截面存在分层现象,靠近上表面区域,激光切割热输入量充足,足够将板材熔化,辅助气体足以将熔渣吹除,上表面区域呈现亮银色光泽,较为光滑,质量最好。中下部区域表面呈现条纹状,略微偏斜,当辅助气体经过切缝时,到达中部区域,压强降低且形成涡流,不易吹除熔渣,且厚度方向温度传递滞后,熔融液滴未及时吹除而冷却形成液滴状金属附着,割缝间隔较窄,导致切割面下部形成热积累变色<sup>[18]</sup>。

缝宽、垂直度、粗糙度测量值如表 3 所示。由表 3 可知:上表面缝宽最大值为 2-22 试样,达到了 1.2118 mm,上表面缝宽最小值为试样 2-11,为 0.5750 mm;下表面缝宽最大值为试样 2-16,达到了 1.5803 mm,最小值为试样 2-25,为 0.7803 mm;垂直度最大值为试样 2-16,达到了 0.7868 mm,最小值是试样 2-8,为 0.0005 mm。板材上部粗糙度最大为试样 2-25,达到了 0.1785 mm,上部粗糙度最小为试样 2-21,为 0.0929 mm;板材中部粗糙度最大值为 0.4414 mm,为 2-1 号试样,最小值为试样 2-25,为 0.2134 mm;板材下部粗糙度最大值为 0.5189 mm,为 2-18 号试样,最小值为 2-3 试样,为 0.1953 mm。

表 3 L<sub>25</sub>(4<sup>5</sup>)正交试验测量表  
Table 3 L<sub>25</sub>(4<sup>5</sup>) orthogonal test scale

Experimental group	Upper surface slit width /mm	Lower surface slit width /mm	Perpendicularity / mm	Upper roughness /mm	Middle roughness /mm	Lower roughness /mm
2-1	0.5898	1.4432	0.8535	0.1723	0.4414	0.3821
2-2	0.7575	1.3069	0.5494	0.1210	0.3324	0.3134
2-3	0.8656	1.0326	0.1670	0.0972	0.2523	0.1953
2-4	0.9885	1.3546	0.3661	0.1239	0.3228	0.2593
2-5	Not cutting through					
2-6	0.8430	1.3391	0.4961	0.1237	0.2843	0.1964
2-7	1.0171	1.1725	0.1554	0.1108	0.2804	0.2866
2-8	1.1589	1.1594	0.0005	0.1202	0.2745	0.2385
2-9	0.6021	1.0700	0.4679	0.1523	0.3445	0.2534
2-10	Not cutting through					
2-11	0.5750	1.3300	0.7550	0.1712	0.3042	0.3519
2-12	0.7108	1.2520	0.5413	0.1093	0.2969	0.4746
2-13	0.7820	1.2628	0.4808	0.1745	0.2382	0.2639

续表

Experimental group	Upper surface slit width /mm	Lower surface slit width /mm	Perpendicularity / mm	Upper roughness /mm	Middle roughness /mm	Lower roughness /mm
2-14	0.8740	0.9900	0.1160	0.1422	0.2777	0.2954
2-15	0.9305	1.1643	0.2338	0.1465	0.2142	0.2473
2-16	0.7935	1.5803	0.7868	0.1300	0.2862	0.3403
2-17	0.8930	1.3122	0.4192	0.0936	0.3013	0.3816
2-18	1.0555	1.3893	0.3338	0.1246	0.3393	0.5189
2-19	1.1915	1.0980	0.0935	0.1658	0.2494	0.4223
2-20	0.6498	1.3058	0.6560	0.0956	0.3106	0.4352
2-21	1.0150	1.5536	0.5386	0.0929	0.2940	0.3036
2-22	1.2118	1.5338	0.3220	0.1210	0.2872	0.3682
2-23	0.6650	0.9790	0.3140	0.1365	0.3344	0.3407
2-24	0.7702	0.7940	0.0238	0.2074	0.3334	0.3752
2-25	0.8083	0.7803	0.0280	0.1785	0.2134	0.2597

## 4 分析与讨论

### 4.1 工艺参数对切割断面质量的影响

#### 4.1.1 工艺参数对切缝宽度的影响

影响切缝宽度的主要因素是激光器光斑直径大小,此外,还与单位时间内热输入量有关。本次研究所用板材较厚,需要考虑切缝内部复杂的空气动力学<sup>[19]</sup>。

由于切割间隔较小,板材略微变形,忽略异常数据

点,工艺参数对表面缝宽的影响如图 7 所示,下表面缝宽度大于上表面切缝宽度。由于板材较厚,辅助气体在切缝内部的复杂涡流导致切缝呈现不规则趋势,热输入量累积到板材下部,增加了下部板材的熔化,导致下表面切缝大于上表面切缝。激光功率影响热输入量,辅助气压影响切缝内部的空气动力<sup>[20]</sup>,但激光功率及辅助气压对于板材上表面切缝宽度影响较小。切割速度对上表面切缝无明显影响。离焦量增大,光斑直径变大,此时热输入量足够,在切透情况下,上表面切

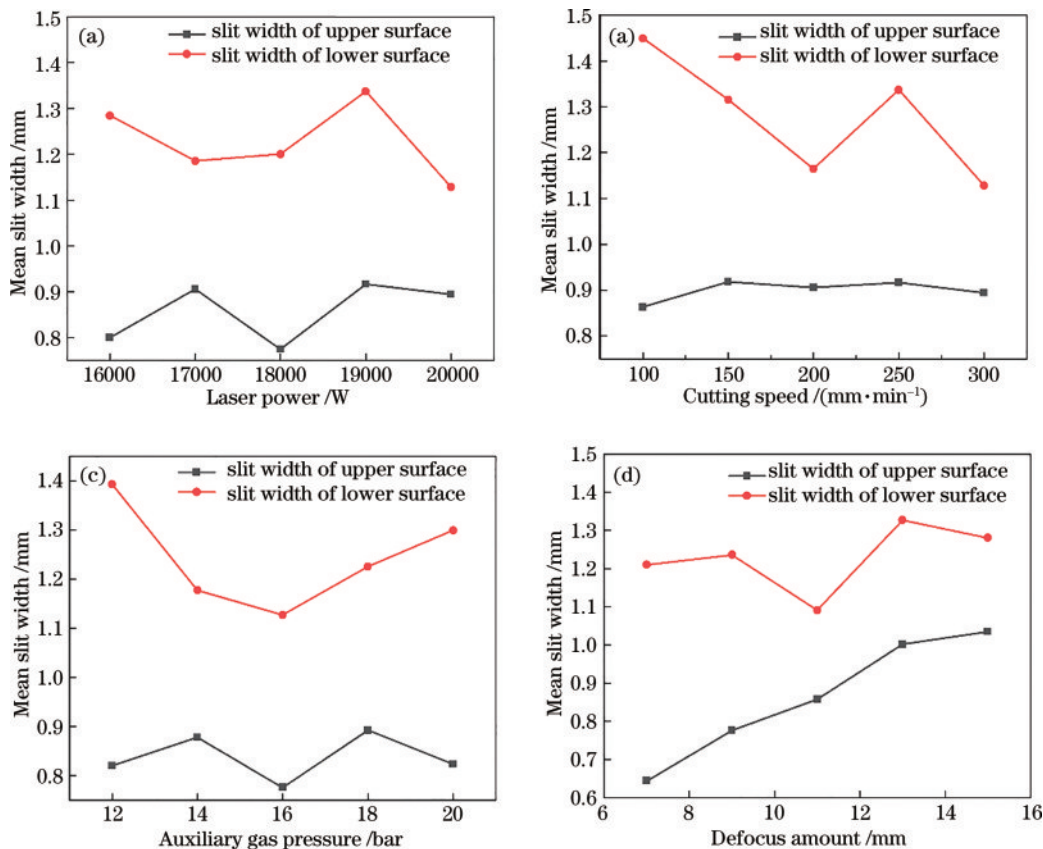


图 7 工艺参数对切缝宽度影响。(a)激光功率;(b)切割速度;(c)辅助气体气压;(d)离焦量

Fig. 7 Influence of process parameters on slit width. (a) Laser power; (b) cutting speed; (c) auxiliary gas pressure; (d) defocus amount



缝逐步增大。

下表面切缝宽度与切缝内部气流状态和热输入量大小有直接关系。从图 7(a)可以看出,下表面缝宽呈现先减小后增大趋势。当激光功率增大时,单位面积的热输入量增大,板材较厚,辅助气体吹除存在滞后性,增大激光功率,熔融金属增多,温度传导存在滞后性,辅助气体吹除不及时,在重力作用下,熔融金属受辅助气压冷却效果附着板材下部,板材下部切缝减小。进一步增大激光功率,熔融金属增多,热输入量足够,下部切缝增大。由图 7(b)可知,切割速度作用机制与激光功率相似,随着切割速度的增大呈现下降趋势,激光功率热输入量足够,速度较小时,板材熔融过多,形

成较大切缝,随着速度逐渐升高,单位时间内热量输入降低,切缝降低。由图 7(c)可知,辅助气压对下表面切缝影响呈现先减小后增大趋势,气压增大到适当值,切缝内部对熔融金属的吹除能力和冷却能力匹配恰好,缝宽最小,继续增大气压,冷却能力与吹除能力不相匹配,导致切缝进一步增大。由图 7(d)可知,离焦量对下表面切缝影响为缓增趋势,板材上部热量输入足够,板材下部受热直径变大,切缝宽度增大。

#### 4.1.2 工艺参数对垂直度的影响

锥度值变化较小,因此采用国际标准 ISO9013 标准方法,用垂直度可更为直观地表达切割断面的垂直情况。垂直度与上下切缝有关,如图 8 所示。

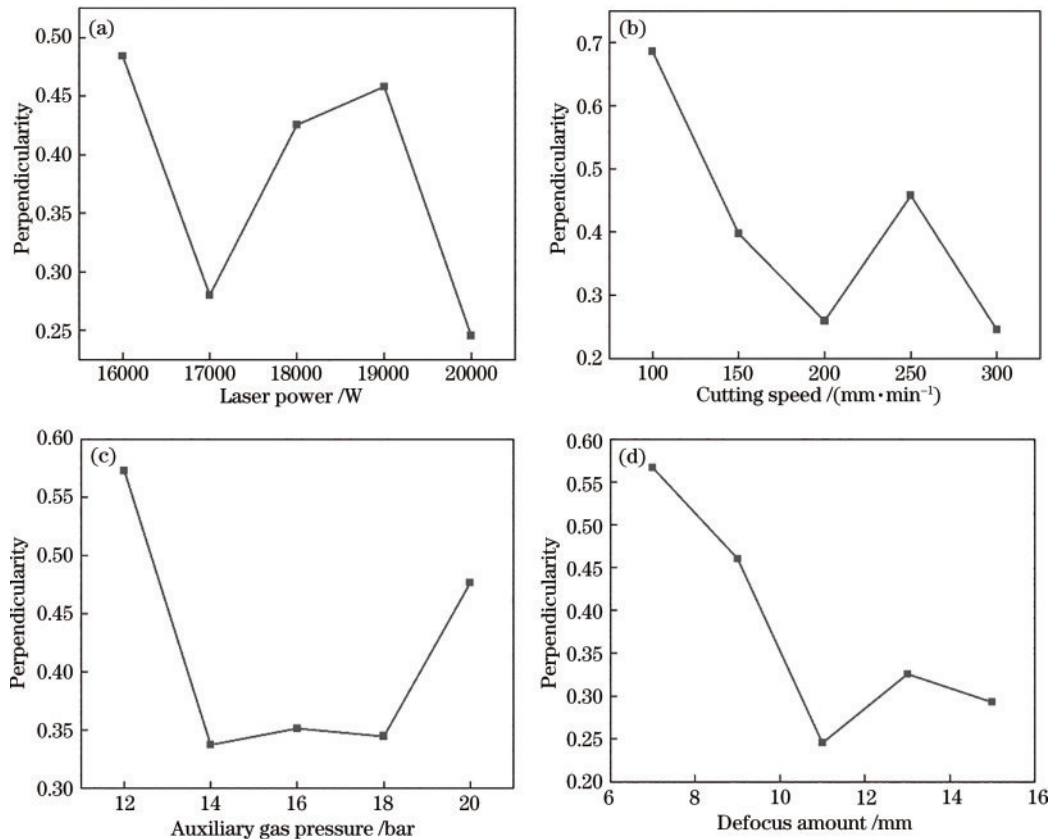


图 8 工艺参数对垂直度影响。(a)激光功率;(b)切割速度;(c)辅助气体气压;(d)离焦量

Fig. 8 Influence of process parameters on perpendicularity. (a) Laser power; (b) cutting speed; (c) auxiliary gas pressure; (d) defocus amount

激光功率和垂直度的关系如图 8(a)所示,激光功率与切割速度对垂直度的影响呈现出先减小后增大趋势,切割速度和激光功率对垂直度作用机制相似,均为改变单位时间内热输入量大小。当增大激光功率或降低切割速度时,单位时间热输入量增大,板材熔化,持续增大激光功率和继续降低切割速度,热输入量继续增大,板材熔融较多,气体吹除存在滞后性,导致板材上下板材熔融相差较大,垂直度增大。由图 8(c)可知,垂直度随着辅助气压的增大呈现出先减小后增大趋势,辅助气体增大,切缝内部对熔融金属的吹除能力增强,熔融金属被吹走,继续增大气压,辅助气体对熔融金属的冷却能力增强,气压强度不足以将过多熔融

金属及时吹走,导致垂直度增大。由图 8(d)可知,垂直度随着离焦量的增大,呈现先减小后增大趋势。离焦量的增大,单位时间内热输入量降低,下部板材吸收热量较多,垂直度较低,继续增大离焦量,下部板材吸收热量较少,上部板材影响不大,垂直度值增大。

#### 4.1.3 工艺参数对粗糙度的影响

本研究所采用的试样板材厚度为 40 mm,板材较厚导致切割断面中下部随熔融金属的流动呈现出周期性条纹状沟壑,粗糙度值较大,使用激光共聚焦仪器无法测得实际粗糙度值,因此使用  $R_t$  表示切割断面的质量。如图 9 所示,直观地表示出工艺参数和粗糙度之间的关系。

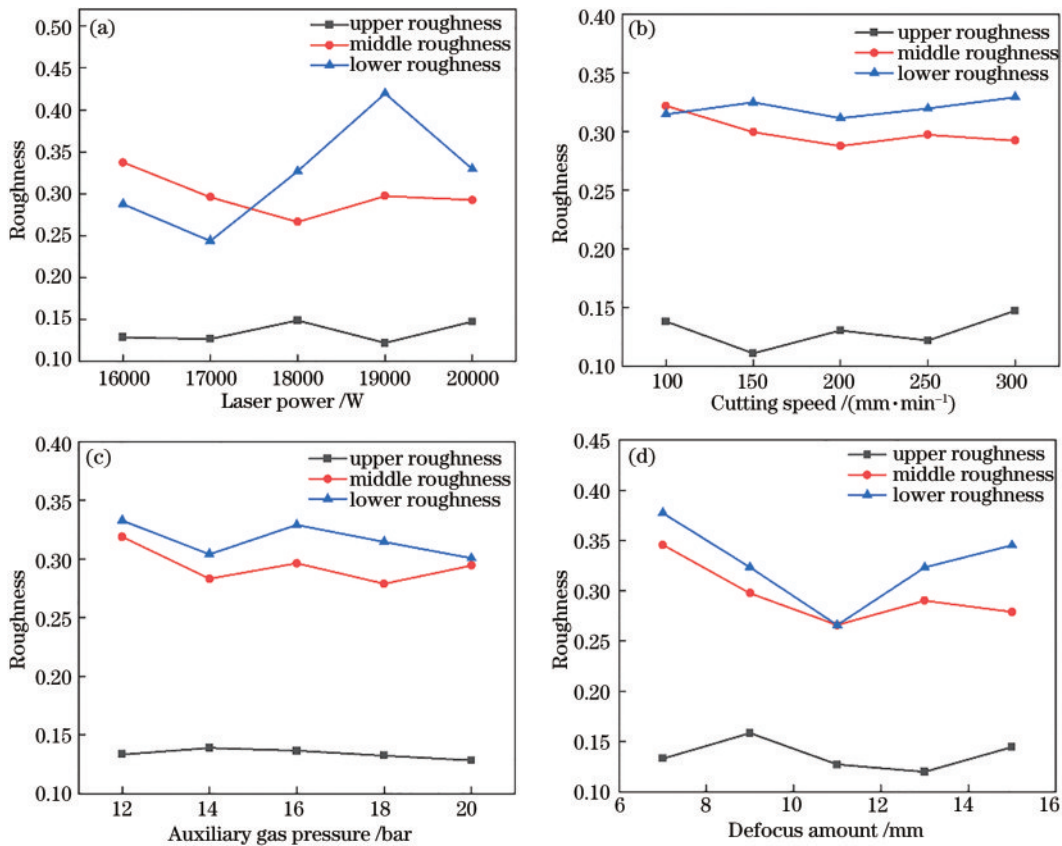


图9 工艺参数对粗糙度影响。(a)激光功率;(b)切割速度;(c)辅助气体气压;(d)离焦量

Fig. 9 Influence of process parameters on roughness. (a) Laser power; (b) cutting speed; (c) auxiliary gas pressure; (d) defocus amount

由于板材较厚,忽略热积累导致的微变形。由图9可知,下部板材处粗糙度值最大,中部板材粗糙度次之,上部板材粗糙度值最小。激光切割过程中,热量输入由上表面开始,热输入和热传导均存在滞后性,由于切缝内部复杂的空气动力学,熔融金属在重力作用下下移,经辅助气体冷却附着在壁面上,形成条纹状沟壑,切割面粗糙度增大<sup>[21]</sup>。

由图9(a)、(b)可知,上部板材粗糙度值随着激光功率和切割速度的增大呈现先减小后增大趋势。当激光功率和切割速度较小时,上部板材单位时间内吸收热量增大,辅助气体及时吹除熔融金属,上部板材粗糙度降低。继续增大激光功率和切割速度,单位时间内熔融金属增多,吹除不及时,导致粗糙度升高。由图9(c)、(d)可知,上部板材粗糙度随辅助气压及离焦量的改变,无明显变化。

由图9可知,板材中部粗糙度值变化较为明显。由图9(a)、(b)可知,板材中部粗糙度随着激光功率和切割速度的增大呈现先减小后增大趋势。激光功率和切割速度增大,热输入量增多,熔融金属得以维持液体状态,被及时吹除,粗糙度值降低,继续增大激光功率和切割速度,熔融金属增多,吹除存在滞后性,粗糙度值增大。由图9(c)可知,板材中部粗糙度值随辅助气体压力的增加呈现先减小后增大趋势。辅助气压增大,增加吹除能力,持续增大,增强冷却能力,粗糙度增

大。由图9(d)可知,中部板材粗糙度随离焦量的增大呈现先减小后增大趋势,离焦量改变光斑直径及功率密度,增大离焦量,熔融金属减少,及时吹除熔融金属,板材中部粗糙度降低,继续增大离焦量,熔融金属进一步减少,热量传导存在滞后,粗糙度变大。

由图9可知,板材下部粗糙度值最大。由图9(a)、(b)可知,激光功率和切割速度对板材下部粗糙度的影响相似,激光功率增大及切割速度降低,热输入量增大,熔融金属热吸收量足够,被及时吹除,粗糙度值减小,继续增大激光功率或降低切割速度,熔融金属增多,辅助气体吹除滞后,熔融金属附着板材下部,粗糙度值增大。由图9(c)可知,下部粗糙度随辅助气压的增大呈现下降状态,是由于辅助气压增大,吹除能力增强,粗糙度值得以降低,继续增大辅助气压,冷却效果增强,板材下部粗糙度值增大。由图9(d)可知,下部板材粗糙度随离焦量的增大呈现先减小后增大。离焦量改变光斑直径及功率密度,降低功率密度,熔融金属相对较少,得以吹除,粗糙度值降低,持续降低功率,熔融金属量随之降低,中部板材熔融金属在重力作用下冷却附着在下部板材,粗糙度值增大。

#### 4.2 切割断面指标极差分析

为了探究工艺参数对切割断面质量的影响,使用极差分析法分析各个因素的影响力大小,选择上表面缝宽、垂直度以及中部粗糙度作为观察指标<sup>[22-23]</sup>。



4.2.1 切缝宽度极差分析表

探究工艺参数之间对于切割断面质量指标的影响,对切割断面质量指标进行极差分析,确定 40 mm

厚板切割较优工艺参数。激光功率、切割速度、辅助气体压力以及离焦量对上表面切缝宽度的极差分析结果如表 4 所示。

表 4 上表面切缝宽度极差分析  
Table 4 Range analysis of slit width on upper surface

Factor	Laser power (A)	Cutting speed (B)	Auxiliary gas pressure (C)	Defocus amount (D)
$K_1$	0.80035	0.86326	0.81995	0.64350
$K_2$	0.90528	0.91804	0.87750	0.77580
$K_3$	0.77446	0.90540	0.77554	0.85678
$K_4$	0.91666	0.91666	0.89200	1.00132
$K_5$	0.89406	0.89406	0.82303	1.03430
Range	0.11631	0.05340	0.11646	0.39080
Primary and secondary relation	D>C>A>B			
Optimal horizontal solution	$A_3B_1C_3D_1$			

从表 4 可以看出,对于上表面切缝宽度影响主次为 D(离焦量)>C(辅助气压)>A(激光功率)>B(切割速度),而最优水平解为  $A_3B_1C_3D_1$ 。

力,激光功率、切割速度、辅助气体压力以及离焦量对垂直度的极差分析结果如表 5 所示。

4.2.2 垂直度极差分析表

探究工艺参数之间对于切割断面质量指标的影响

从表 5 可以看出,对于垂直度影响主次为 B(切割速度)>D(离焦量)>A(激光功率)>C(辅助气压),而最优水平解为  $A_5B_3C_4D_3$ 。

表 5 垂直度极差分析  
Table 5 Perpendicularity range analysis

Factor	Laser power (A)	Cutting speed (B)	Auxiliary gas pressure (C)	Defocus amount (D)
$K_1$	0.48400	0.68600	0.57303	0.56654
$K_2$	0.27997	0.39746	0.33736	0.46020
$K_3$	0.42538	0.25922	0.35144	0.24526
$K_4$	0.45786	0.45786	0.34454	0.32554
$K_5$	0.24528	0.24528	0.47663	0.29275
Range	0.23872	0.44072	0.23567	0.32128
Primary and secondary relation	B>D>A>C			
Optimal horizontal solution	$A_5B_3C_4D_3$			

4.2.3 中部粗糙度极差分析表

激光功率、切割速度、辅助气体压力以及离焦量对板材中部粗糙度极差分析结果如表 6 所示。

从表 6 可以看出,对于粗糙度影响主次为 A(激光功率)>D(离焦量)>C(辅助气压)>B(切割速度),而最优水平解为  $A_3B_3C_4D_3$ 。

表 6 中部粗糙度极差分析  
Table 6 Range analysis of middle roughness

Factor	Laser power (A)	Cutting speed (B)	Auxiliary gas pressure (C)	Defocus amount (D)
$K_1$	0.33723	0.32202	0.31872	0.34556
$K_2$	0.29592	0.29964	0.28294	0.29755
$K_3$	0.26624	0.28774	0.29618	0.26580
$K_4$	0.29736	0.29736	0.27876	0.29014
$K_5$	0.29248	0.29248	0.29450	0.27882
Range	0.07099	0.03428	0.03996	0.06674
Primary and secondary relation	A>D>C>B			
Optimal horizontal solution	$A_3B_3C_4D_3$			

对比表 4~6 可知,对于切割断面指标:上表面缝宽、垂直度及中部粗糙度,三组最优参数不完全相同,

获得最佳上表面切缝宽度的组合为  $A_3B_1C_3D_1$ ,获得最佳垂直度值的为  $A_5B_3C_4D_3$ ,获得最佳中部粗糙度值的

为  $A_3B_3C_4D_3$ , 三组参数对切割断面质量的影响各不相同。对比表 4~6 中极差值发现, 表 5 中极差  $R$  值较大, 这表明, 工艺参数对于垂直度的影响程度上表面缝宽及中部粗糙度的影响程度大得多, 因此, 最优参数解为  $A_3B_3C_4D_3$ 。基于最优参数  $A_3B_3C_4D_3$  (激光功率为 20000 W, 切割速度为 200 mm/min, 辅助气压为 18 bar, 离焦量为 +11 mm) 对 40 mm 厚 304 不锈钢板进行切割, 分析切割断面指标, 其上下表面切缝、垂直度及粗糙度值同比较小, 切割质量较高。

## 5 结 论

为了探究超高功率厚板激光切割工艺参数对切割断面的影响规律, 使用 40 mm 厚 304 不锈钢板材, 30000 W 超高功率激光器进行四因素、五水平正交切割试验。分析了工艺参数对切割断面指标的影响规律, 得出以下结论:

1) 激光功率和离焦量对上表面切缝影响较大, 随着激光功率和离焦量的增大, 上表面切缝增大。上表面切缝与切割速度无明显关系, 但随离焦量增大而增大。下表面切缝宽度随激光功率、切割速度及辅助气压的增大, 呈现先减小后增大趋势, 随离焦量增大呈现缓增趋势。

2) 对垂直度影响最大的因素是切割速度。切割速度、激光功率、辅助气压及离焦量增大, 垂直度呈现先减小后增大趋势。

3) 对粗糙度影响最大的是激光功率和离焦量, 切割速度和辅助气压对粗糙度影响次之。上部粗糙度随激光功率及切割速度的增大呈现先减小后增大趋势, 辅助气压及离焦量对上部粗糙度影响较小。中部粗糙度随激光功率、切割速度、辅助气压及离焦量的增大呈现先减小后增大趋势。下部粗糙度随激光功率、切割速度及离焦量的增大呈现先减小后增大趋势, 随辅助气压增大而逐渐减小。

4) 试验结果表明, 超高功率激光切割 40 mm 厚度 304 不锈钢板材的最佳工艺参数为激光功率为 20000 W, 切割速度为 200 mm/min, 辅助气压为 18 bar, 离焦量为 +11 mm。在此工艺参数下, 可得到较好的切割质量。

## 参 考 文 献

- [1] 张世凭, 唐先春, 丁义超. 特种加工技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2014: 153-154.  
Zhang S P, Tang X Q, Ding Y C. Special processing technology[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2014: 153-154.
- [2] 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.  
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.

- [3] 李祥友, 曾晓雁, 刘勇, 等. 激光精密切割不锈钢薄板的工艺研究[J]. 中国激光, 2001, 28(12): 1125-1129.  
Li X Y, Zeng X Y, Liu Y, et al. Study of YAG laser cutting process with stainless steel sheet[J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(12): 1125-1129.
- [4] 王利民, 汤超, 卢才璇, 等. 高功率激光切割 15 mm 厚 2A12 铝合金工艺研究[J]. 应用激光, 2021, 41(5): 1017-1024.  
Wang L M, Tang C, Lu C X, et al. Research on high power laser cutting technology of 15 mm thick 2A12 aluminum alloy[J]. Applied Laser, 2021, 41(5): 1017-1024.
- [5] 邓前松, 唐霞辉, 秦应雄, 等. 中厚钢板小圆孔的高功率  $CO_2$  激光切割工艺研究[J]. 激光技术, 2008, 32(5): 554-557.  
Deng Q S, Tang X H, Qin Y X, et al. Technological study on high power  $CO_2$  laser cutting of small hole on middle-thick steel plates[J]. Laser Technology, 2008, 32(5): 554-557.
- [6] 刘晨璐, 宋绪丁, 万一品. 激光切割参数对 304 不锈钢薄板切割质量的影响研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(13): 146-149.  
Liu C J, Song X D, Wan Y P. Research on influence of laser cutting parameters on cutting quality of 304 stainless steel sheet[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(13): 146-149.
- [7] 冯巧波, 赵旺初. 304 不锈钢激光切割加工表面质量的研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(12): 296-298.  
Feng Q B, Zhao W C. Study on surface quality of 304 stainless steel in laser cutting process[J]. Coal Technology, 2017, 36(12): 296-298.
- [8] 魏言峰, 胡崇镜, 王春明, 等. Q345 碳钢超高功率激光切割工艺研究[J]. 应用激光, 2021, 41(1): 22-27.  
Wei Y F, Hu C J, Wang C M, et al. Research on ultra-high power laser cutting process of Q345 carbon steel[J]. Applied Laser, 2021, 41(1): 22-27.
- [9] 胡崇镜, 魏言峰, 王春明, 等. 万瓦级光纤激光切割 2A12 铝合金中厚板工艺研究[J]. 应用激光, 2020, 40(6): 1092-1098.  
Hu C J, Wei Y F, Wang C M, et al. Study on technology in 10 kW fiber laser cutting of 2A12 medium-thickness aluminum alloy plate[J]. Applied Laser, 2020, 40(6): 1092-1098.
- [10] Pocorni J, Powell J, Deichsel E, et al. Fibre laser cutting stainless steel: fluid dynamics and cut front morphology[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 87: 87-93.
- [11] Pocorni J, Powell J, Frostevarg J, et al. The geometry of the cutting front created by Fibre and  $CO_2$  lasers when profiling stainless steel under standard commercial conditions [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 103: 318-326.
- [12] Shin J S, Oh S Y, Park S, et al. Underwater laser cutting of stainless steel up to 100 mm thick for dismantling application in nuclear power plants[J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 147: 107655.
- [13] Levichev N, Costa Rodrigues G, Vorkov V, et al. Coaxial camera-based monitoring of fiber laser cutting of

- thick plates[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 136: 106743.
- [14] 刘顺洪. 激光制造技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011: 280-285.  
Liu S H. Laser materials processing[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2011: 280-285.
- [15] 任宁. 激光切割钕铁硼磁性材料数值模拟与实验研究[D]. 太原: 中北大学, 2020: 15-20.  
Ren N. Numerical simulation and experimental study of laser cutting NdFeB magnetic materials[D]. Taiyuan: North University of China, 2020: 15-20.
- [16] 孙健峰, 张庆茂, 杨洲, 等. 316L 不锈钢光纤激光切割工艺优化研究[J]. 应用激光, 2016, 36(1): 72-77.  
Sun J F, Zhang Q M, Yang Z, et al. Research on optimization of fiber laser cutting technology of 316L stainless steel[J]. Applied Laser, 2016, 36(1): 72-77.
- [17] 俞昊. 火焰切割割缝宽度的实验与数值模拟研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017: 45-50.  
Yu H. Experiments and numerical simulation about the gap width of flame cutting[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017: 45-50.
- [18] 王京京. 厚板激光熔化切割过程数值模拟[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014: 37-46.  
Wang J J. Numerical simulation of the process of laser melting and cutting thick plate[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014: 37-46.
- [19] 陈乐. 中厚板氧助激光切割数值仿真与实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014: 69-80.  
Chen L. Simulation and experimental analysis of laser-oxygen cutting of thick mild steel plate[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014: 69-80.
- [20] Jarosz K, Ukar E, Krödel A, et al. Laser ablation and processing of polycrystalline cubic boron nitride cutting tool material[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118(3): 785-800.
- [21] Saternus Z, Piekarska W, Kubiak M, et al. Numerical modeling of cutting process of steel sheets using a laser beam[J]. MATEC Web of Conferences, 2019, 254: 08004.
- [22] Kheloufi K, Amara E, Benzaoui A. Optimization of the laser cutting process in relation to maximum cutting speed using numerical modeling[J]. 2017, 38(3/4/5/6): 127-136.
- [23] Darwish M, Mrňa L, Orazi L, et al. Numerical modeling and Schlieren visualization of the gas-assisted laser cutting under various operating stagnation pressures [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 147: 118965.