

# 基于轨迹变换法降低激光切割尖角“烧蚀率”研究

邓前松<sup>1</sup> 赵辰丰<sup>2</sup> 陈亮<sup>1</sup> 石明国<sup>1</sup> 杨卫红<sup>1</sup> 唐霞辉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)  
(<sup>2</sup>华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 针对常规的氧助激光切割带有尖角( $\leq 30^\circ$ )图形的中低碳钢板材过程中存在的尖角“烧蚀率”很高的问题, 采用 Rofin DC025 板条 CO<sub>2</sub> 激光切割机系统, 在优化的激光切割工艺参数的条件下, 通过轨迹变换的方法, 在 3 mm 厚的 A3 钢板上切割出多种带有尖角( $\leq 30^\circ$ )图形。系统研究了激光切割尖角图形的切割轨迹及参数对尖角“烧蚀率”的影响。结果表明, 采用圆心在所切割尖角角平分线上, 且通过该尖角顶点的圆形切割轨迹可大大降低激光切割尖角“烧蚀率”。且对于不同尖角大小( $\leq 30^\circ$ )该轨迹圆都存在一个最优补偿半径可把尖角“烧蚀率”控制在 10% 以内, 获得理想的切割效果。

**关键词** 激光技术; 尖角烧蚀率; 激光切割; 轨迹变换; 切割轨迹半径

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0803006

## Study on Reducing Apex Angle Burnt Rate during Laser Cutting Based on Path Transformation

Deng Qiansong<sup>1</sup> Zhao Chenfeng<sup>2</sup> Chen Liang<sup>1</sup> Shi Mingguo<sup>1</sup>

Yang Weihong<sup>1</sup> Tang Xiahui<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)  
(<sup>2</sup> College of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** Aiming at the problem of high apex angle burnt rate during laser cutting graphics with apex angle ( $\leq 30^\circ$ ) on mild or low carbon steel, the laser cutting experiments have been done on A3 steel board with the thickness of 3 mm by using Rofin DC025 slab CO<sub>2</sub> laser cutting system and the method of path transformation. At the same time, the key effects of temperature on apex angle burnt have been analyzed, and the influences of path transformation and its radius on apex angle burnt rate have been studied. The results show that the apex angle burnt rate has been greatly reduced under the condition of a special cutting path, which is a circle passing through the zenith of the apex angle and its centre locating on angle bisector. Meanwhile, the apex angle burnt rate can be controlled lower than 10% under the condition of a optimal circle radius for various apex angle.

**Key words** laser technique; apex angle burnt rate; laser cutting; path transformation; radius of cutting path

**OCIS codes** 140.3470; 140.3390; 140.6810

## 1 引 言

在激光切割由中等厚度低碳钢板加工成形的面板或模板过程中, 都或多或少存在一些带有尖角的

图形。而激光切割是典型的热加工, 故当激光切割尖角部位时, 由于热量的累积效应使得尖角部位的切割质量难以控制, 出现“烧蚀”的频率很高。而这

**收稿日期**: 2012-03-28; **收到修改稿日期**: 2012-05-08

**作者简介**: 邓前松(1977—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率气体 CO<sub>2</sub> 激光器及其应用等方面的研究。

E-mail: dqs961000@yahoo.com.cn

**导师简介**: 唐霞辉(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高功率气体 CO<sub>2</sub> 激光器及其应用等方面的研究。

E-mail: txh1116@hust.edu.cn

些尖角切割质量的好坏会大大影响整个面板或模板的加工质量<sup>[1~3]</sup>。

所谓“烧蚀率”是指激光切割大量相同图形(小孔或尖角等)过程中,由于切割工艺参数等原因导致该图形出现“烧蚀”质量缺陷的数量的概率统计。其测量方法是按所切割图形图纸尺寸要求和激光切割质量标准分别测量和统计出现“烧蚀”的图形个数和总的切割图形个数,两者之比即为“烧蚀率”。目前,通过优化激光切割工艺参数来降低尖角“烧蚀率”的方法国内外已有不少研究报道。文献[4~9]分别给出了通过改变激光切割功率、速度和辅助气的种类(如由氧气改为氮气或空气等)、激光波长(如波长从 $10.6\ \mu\text{m}$ 到 $1.064\ \mu\text{m}$ 或 $980\ \text{nm}$ )、激光波形(由连续到脉冲)、激光入射角度(由垂直入射到倾斜入射等)、喷嘴参数(如喷嘴类型、口径等)来降低尖角“烧蚀率”的工艺优化结果。

但通过采用切割轨迹变换的方法来降低激光切割尖角“烧蚀率”的工艺研究报道很少。为此,本文采用Rofin DC025型板条 $\text{CO}_2$ 激光切割系统,通过采用切割轨迹变换法对降低激光切割中厚钢板上带有尖角的图形的尖角“烧蚀率”进行了探讨。

## 2 实验设备及材料

激光切割系统采用武汉法利莱公司生产的平面激光切割系统,如图1所示。该系统由数控机床和激光器两部分组成,激光器为Rofin-Sinar公司的DC025型 $2500\ \text{W}\ \text{CO}_2$ 激光器,功率范围为 $250\sim 2500\ \text{W}$ ,既可连续工作,也可脉冲工作。聚焦后光斑直径为 $0.2\ \text{mm}$ ,使用的聚焦透镜焦距 $f=127\ \text{mm}$ ;切割喷嘴孔径为 $1.5\ \text{mm}$ ;切割辅助气体为氧气,切割时焦点位于工件表面下方约 $0.3\ \text{mm}$ 。



图1 Farley-Laserlab激光切割系统

Fig. 1 Farley-Laserlab laser cutting system

实验选用厚度 $3\ \text{mm}$ 的低碳钢板(A3),规格: $1000\ \text{mm}\times 1000\ \text{mm}$ ,本文除特别注明外,所有图线的加工材料均为A3。实验在保证切割图形中其他

普通图形(非尖角)尺寸精度和切割质量的前提下,选取经过优化的固定工艺参数通过改变激光切割尖角图形时的切割轨迹来降低尖角“烧蚀率”。实验在特定参数下利用数控机床控制其一次切割一组带有相同( $15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ )尖角但补偿轨迹圆半径各不相同的图案。用光学显微镜观察尖角断面形貌并照相。

## 3 切割实验结果

### 3.1 切割轨迹选择与设计

引起激光切割尖角烧蚀的原因是激光切割尖角长时间加热带来热量积聚所造成的。在保证切割图形尺寸精度和断面质量的前提下,尝试采用延长切割路径、增加局部切割金属质量和增大散热面积的方法以消耗过多的热量来达到降低尖角切割“烧蚀率”的目的。故提出了如图2所示的3种轨迹方案:矩形轨迹、三角形轨迹、圆形轨迹。

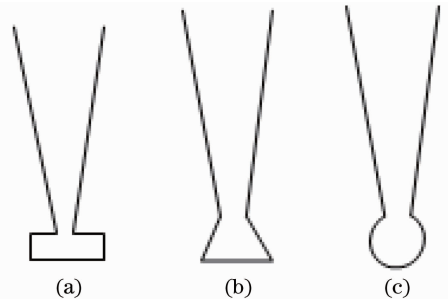


图2 轨迹方案图。(a)矩形轨迹;(b)三角形轨迹;  
(c)圆形轨迹

Fig. 2 Cutting path schemes. (a) Rectangular path;  
(b) triangle path; (c) circular path

对于矩形轨迹,在矩形边与原来的切割轨迹形成了新的锐角容易造成灼烧,另外矩形直角位置热量集中,造成整个矩形内部热量分布不均,易造成灼烧且灼烧区域分散造成切割区域扩大,难以保证尖角的尺寸精度,失去了精密切割的意义,故不准备采用矩形轨迹。同理,三角轨迹也存在矩形轨迹中的问题并且由于此轨迹中有两个锐角,故热量分布的不均匀性变大从而导致图形切割尺寸精度下降,所以也不予考虑。对于圆形轨迹,可以发现此轨迹与原切割轨迹成钝角,热量积聚效应变小,轨迹范围内热量呈对称分布,无分布不均的问题。

由分析可知,尖角处最合理的轨迹应为圆形轨迹。充分考虑切割图形的对称性、散热性、尖角局部温度分布均匀性、切割时切割速度的均匀性对切割图形尺寸精度和断面质量的影响,故采用如图3所

示的圆心在所切割尖角角平分线上,且通过该尖角顶点的圆形切割轨迹。图 3 中  $\theta$  为需要切割的角度,  $r$  为所设计切割轨迹圆的半径。且对于不同的  $\theta$ , 都存在一个最佳的  $r$  使得尖角“烧蚀率”降到最低,甚至完全消除尖角烧蚀。故设计了如图 4 所示的切割尖角轨迹。

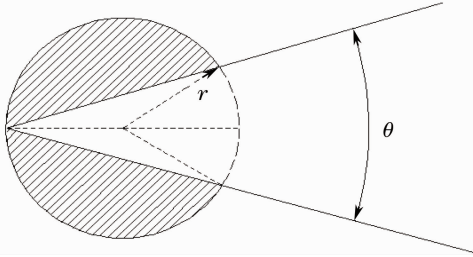


图 3 尖角轨迹

Fig. 3 Graphics of cutting path of apex angle

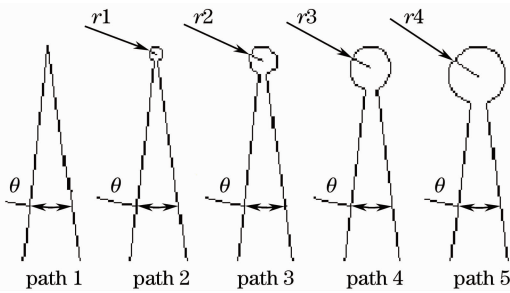


图 4 尖角切割轨迹示意图

Fig. 4 Figure of cutting paths of apex angle

### 3.2 切割工艺参数选择与设计

在激光切割工艺参数的选择过程中必须考虑激光切割过程中的各种物理效应,具体包含三类参数:材料参数、光束参数和切割工艺参数。在材料参数和光束参数都确定的条件下,切割工艺参数的选择主要依靠各种激光切割理论模型、反复多次具体切割实验和操作者的经验等。考虑到本文结论的通用

性,故实验材料选取应用激光切割最普遍的中低碳钢板,并采用常规氧助切割方式。依据本文实验条件,各参数如下:

1) 材料参数:牌号:A3(低碳钢板);厚度:3 mm;规格:1000 mm×1000 mm。

2) 光束参数:透射聚焦镜焦距:127 mm;焦点位置:在工件表面下方 0.3 mm 左右;喷嘴直径:1.5 mm;焦斑:0.2 mm;波长:10.6  $\mu\text{m}$ ;光束质量因子  $M^2=1.8$ 。

在上述材料参数和光束参数都确定的条件下,通过反复切割实验,得出优化切割工艺参数如下:激光功率  $P=1200\text{ W}$ 、切割速度  $v=2.5\text{ m/min}$ 、氧气压力  $P_0=3\times 10^4\text{ Pa}$ 。

### 3.3 实验结果统计

以下实验结果均是在前述实验条件下获得的。即在前述的材料参数、光束参数和切割工艺参数都固定的情况下,对每一个特定的切割尖角,通过改变尖角处补偿轨迹圆半径进行多次切割实验。实验中,通过改变数控激光切割程序来设置不同尖角处补偿轨迹圆半径,其从零开始,由 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 mm 等一直到 2.0 mm 变化,详见表 1~4。考察并统计相同切割尖角时每一种补偿半径切割尖角的“烧蚀率”。其中,表 1~4 分别统计了  $\theta=15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$  时部分“烧蚀率”随补偿半径大小的变化。图 5 反映了  $\theta$  不同时“烧蚀率”随补偿半径大小的变化趋势。图 6~9 则是  $\theta=15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$  时部分切割实物照片。实验结束后,取每一种尖角切割时,“烧蚀率”最小( $\leq 10\%$ )的一组对应的补偿圆半径作为最佳补偿半径的实验结果。则由图 5 可知,当  $\theta=15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$  时分别对应的最佳补偿圆半径分别为 0.5, 0.5, 0.6, 0.6 mm。

表 1  $\theta=15^\circ$  时不同补偿半径尖角烧蚀率统计

Table 1 Apex angle burnt rate of  $15^\circ$  angle for various optimal radii

Radius /mm	0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	2.0
Number of apex angle	40	40	40	40	40	40	40	40
Number of burnt apex angle	28	20	10	4	6	9	14	No apex angle
Apex angle burnt rate /%	70	50	25	10	15	22.5	35	

表 2  $\theta=20^\circ$  时不同补偿半径尖角烧蚀率统计

Table 2 Apex angle burnt rate of  $20^\circ$  angle for various optimal radii

Radius /mm	0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	2.0
Number of apex angle	40	40	40	40	40	40	40	40
Number of burnt apex angle	29	21	11	4	5	8	13	No apex angle
Apex angle burnt rate /%	72.5	52.5	27.5	10	12.5	20	32.5	

表 3  $\theta=25^\circ$ 时不同补偿半径尖角烧蚀率统计

Table 3 Apex angle burnt rate of  $25^\circ$  angle for various optimal radii

Radius /mm	0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	2.0
Number of apex angle	40	40	40	40	40	40	40	40
Number of burnt apex angle	30	22	12	5	4	7	12	No apex angle
Apex angle burnt rate /%	75	55	30	12.5	10	17.5	30	

表 4  $\theta=30^\circ$ 时不同补偿半径尖角烧蚀率统计

Table 4 Apex angle burnt rate of  $30^\circ$  angle for various optimal radii

Radius /mm	0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	2.0
Number of apex angle	40	40	40	40	40	40	40	40
Number of burnt apex angle	32	24	13	7	3	6	11	No apex angle
Apex angle burnt rate /%	80	60	32.5	17.5	7.5	15	27.5	

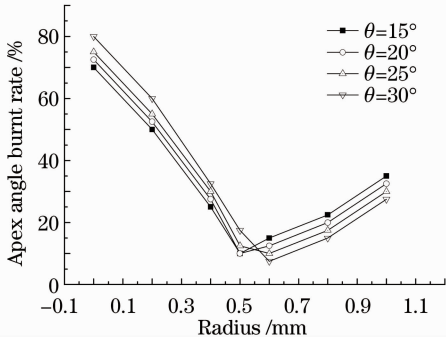


图 5  $\theta$  不同时不同补偿半径尖角“烧蚀率”趋势  
Fig. 5 Trend of angle burnt rate on various apex angles and optimal radii

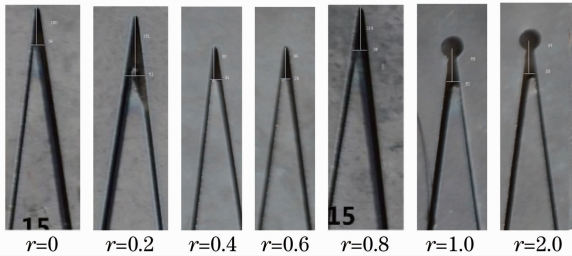


图 6  $\theta=15^\circ$ 时不同补偿半径尖角切割实物  
Fig. 6 Photos of cutting apex angle of  $15^\circ$  on various optimal radii

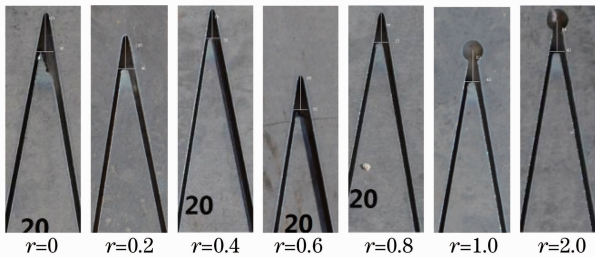


图 7  $\theta=20^\circ$ 时不同补偿半径尖角切割实物  
Fig. 7 Photos of cutting apex angle of  $20^\circ$  on various optimal radii

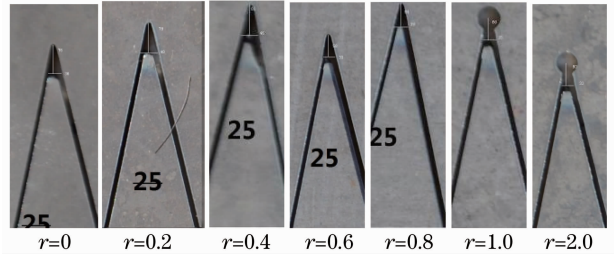


图 8  $\theta=25^\circ$ 时不同补偿半径尖角切割实物  
Fig. 8 Photos of cutting apex angle of  $25^\circ$  on various optimal radii

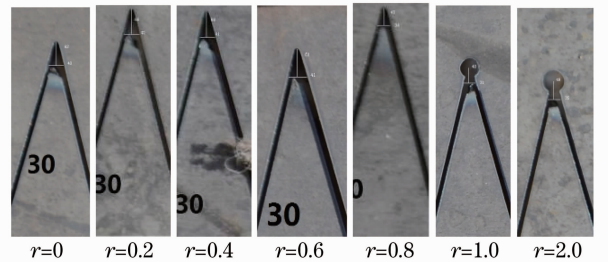


图 9  $\theta=30^\circ$ 时不同补偿半径尖角切割实物  
Fig. 9 Photos of cutting apex angle of  $30^\circ$  on various optimal radii

## 4 分析与讨论

### 4.1 激光切割过程中的能量分析

由文献[10~13]可知,氧助切割中加热金属至熔化甚至气化所切割金属的能量来源于激光辐照和氧气与金属发生的剧烈放热氧化反应,而能量的传输则主要依靠金属良好的导热性导致的热传导效应和少量的热对流和热辐射效应,而在此过程中,能量不可避免会损失一部分,氧助切割中能量的损失主要是氧气气流吹除液态金属熔渣带走的部分热量和切缝周围未熔化金属沿水平方向向切缝周围金属的热传导所造成的。在此过程中,激光和放热反应提供的能量始终等于所切割金属需要能量和能量传输



过程中的损失之和。据此得出结论：在材料参数和光束参数确定的条件下，氧助切割过程中，激光功率必有一个合适的值。过高会导致切缝烧蚀；过低则会导致切缝挂渣或切不透。而切割速度则决定单位时间单位长度材料能够获得的能量，同理，切割速度必有一个合适的值。过高会导致切缝挂渣或切不透；过低则会导致切缝烧蚀。至于氧气作用则有4个：除渣、保护镜片、喷嘴、发生放热反应帮助切割和冷却激光作用区。显然，氧气压力必有一个合适的值。过高会导致切缝烧蚀；过低则会导致切缝挂渣或切不透。

#### 4.2 圆形补偿轨迹的最优半径推导与计算

依据激光切割过程中总能量平衡方程的思路，通过采用图3所示的圆心在所切割尖角角平分线上，且通过该顶点的圆形切割尖角轨迹来控制尖角激光切割过程中的烧蚀率。在推导该补偿圆最优半径之前，特做如下假设：

1) 据实验结果判断，在补偿圆半径  $r \leq 2.0$  mm 的条件下，按正常轨迹切割尖角时所引起尖角烧蚀的过多热量全部贡献给多熔化部分金属质量，即如图3所示阴影部分金属质量。

2) 忽略切割过程中热对流和热辐射效应，考虑能量都以热传导方式传递。

3) 假设切割过程中由于轨迹延长消耗的能量和整个切割过程中氧气流带走的热量与切割过程中氧化反应放热基本抵消。

由面积计算公式，设图3中阴影部分面积为  $S$ ，则

$$S = \pi r^2 \left(1 - \frac{\theta}{180^\circ}\right) - r^2 \sin \theta. \quad (1)$$

同理，设阴影部分的钢板总质量为  $M$ ，则

$$M = \rho d S = \rho d r^2 \left[ \pi \left(1 - \frac{\theta}{180^\circ}\right) - \sin \theta \right], \quad (2)$$

式中  $\rho$  为钢板密度， $d$  为钢板厚度。

设加热到熔点后熔化该部分钢板所需要的能量

为  $Q_0$ ，则

$$Q_0 = cM(T - T_0) + qM, \quad (3)$$

式中  $c$  为钢材的比热容， $q$  为钢材熔化热， $T$  为钢材融化温度， $T_0$  为室温。

设激光提供的总能量为  $Q_1$ ，则

$$Q_1 = P \times \frac{2\pi r \times \left(1 - \frac{\theta}{180^\circ}\right)}{v}, \quad (4)$$

式中  $v$  为切割速度， $P$  为切割功率。

考虑激光波长、偏振态、焦点位置、切割材料表面温度等因素的影响，设钢板实际吸收功率为  $Q_a$ ，则

$$Q_a = Q_1 \times \eta, \quad (5)$$

式中  $\eta$  为特定激光波长下材料对激光的吸收率，在本文实验条件下， $\text{CO}_2$  激光波长  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ，激光焦点附近聚焦光斑直径  $D_f = 200 \mu\text{m}$ ，则  $\eta$  约为 40%<sup>[14~16]</sup>。

此外，设钢材氧化放热为  $Q_m$ ，则

$$Q_m = 2\pi r \times \left(1 - \frac{\theta}{180^\circ}\right) db\rho q', \quad (6)$$

式中  $b$  为激光切割割缝缝宽； $q'$  为钢的氧化热，取 Fe 三种氧化物的平均氧化热<sup>[15]</sup> 为 1503 J/kg，设单位时间内被氧气流带走的热量为  $Q_{out}$ ，则

$$Q_{out} = \rho_{O_2} \times \frac{2\pi r \left(1 - \frac{\theta}{180^\circ}\right)}{v} \times L c_{O_2} (T - T_0), \quad (7)$$

式中  $L$  为氧气流量， $\rho_{O_2}$  为氧气密度， $c_{O_2}$  为氧气的比热容。

由总能量平衡方程<sup>[16]</sup>，则令  $Q_0 + Q_{out} = Q_a + Q_m$ ，在前述的假设条件下，即有  $Q_{out} - Q_m = 0$  时，则可得

$$2\pi r \left(1 - \frac{\theta}{180^\circ}\right) \left[ \frac{P}{v} \eta - \frac{\rho_{O_2} L c_{O_2} (T - T_0)}{v} + db\rho q' \right] = \rho d [c(T - T_0) + q] \left[ \pi \left(1 - \frac{\theta}{180^\circ}\right) - \sin \theta \right] r^2$$

可解得

$$r = \frac{2\pi\eta \frac{P}{v} \left(1 - \frac{\theta}{180^\circ}\right)}{\rho d [c(T - T_0) + q] \left[ \pi \left(1 - \frac{\theta}{180^\circ}\right) - \sin \theta \right]} = \frac{2\eta \frac{P}{v}}{\rho d [c(T - T_0) + q]} \times \left[ 1 + \frac{\sin \theta}{\pi \left(1 - \frac{\theta}{180^\circ}\right) - \sin \theta} \right]. \quad (8)$$

在氧气压力一定 ( $3.0 \times 10^4$  Pa) 的条件下，综合考虑激光功率、切割速度对切割质量的影响引入激光切割线能量输入的概念：

$$J = P/v. \quad (9)$$

本文实验条件下，代入几种典型激光切割工艺参数到(8)式进行计算，则可得常见  $J$  值所对应的最佳补偿圆半径如表5所示。

表 5 典型  $P/v$  值和尖角对应的最佳补偿圆半径  
Table 5 Optimal radius for various  $P/v$  and apex angles

Apex angle / (°)	Laser specific energy / (kJ/m)	Radius / mm
15	18	0.316
	24	0.422
	28.8	0.506
	30	0.527
	36	0.633
	48	0.843
20	18	0.328
	24	0.437
	28.8	0.525
	30	0.547
	36	0.656
	48	0.875
25	18	0.341
	24	0.455
	28.8	0.546
	30	0.569
	36	0.682
	48	0.910
30	18	0.356
	24	0.474
	28.8	0.569
	30	0.593
	36	0.712
	48	0.949

图 10 反映了最佳补偿圆半径随切割线能量  $J$  和尖角  $\theta$  的变化趋势。从图中可以看出,对于某种确定厚度的钢板,在氧气压力一定 ( $3 \times 10^4$  Pa) 的条件下,当切割线能量  $J$  取值一定时,对应不同的  $\theta$ ,则有适当的  $r$  使得尖角恰好不被烧蚀,此时,尖角“烧蚀率”可控制在较小范围内,且随着尖角度数的增加,最佳补偿圆半径  $r$  缓慢增大,但基本保持不

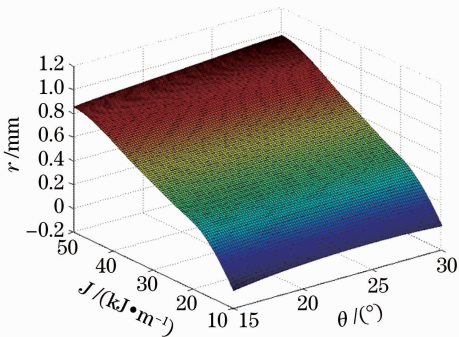


图 10 不同激光能量  $P/v$  和不同尖角所对应的最佳补偿圆半径

Fig. 10 Optimal radius on various laser specific energy and various apex angles

变;当  $\theta$  不变时,随着切割线能量  $J$  值的增加,最佳补偿圆半径  $r$  逐渐增大,且增长趋势相对较快。此外,当角度足够大时,则不需要补偿,此时,半径为零。

将本文切割工艺参数(激光功率  $P=1200$  W、切割速度  $v=2.5$  m/min、氧气压力  $P_0=3 \times 10^4$  Pa)代入(9)式中计算得出切割线能量  $J=28.8$  kJ/m,对照表 5 可知,当  $\theta=15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$  时,对应的最佳补偿圆半径  $r$ (此时“烧蚀率”最低)分别为 0.506, 0.525, 0.546, 0.569 mm,与实验结果 0.5, 0.5, 0.6, 0.6 mm 略有出入,基本吻合。分析其原因,可能是由于实验中的测量误差、偶然的干扰因素(如功率、气压波动和喷嘴挂渣程度等)等造成的,需进一步探索。

需要说明的是上述经验公式只是在特定的条件下求得的,需做更多的实验和分析,把激光加工中的各项工艺参数及材料的系数都考虑进去,建立一个广泛意义上的公式,真正对验证理论模型有用处,同时对最佳补偿半径可进行更为简捷和准确的计算。

## 5 结 论

针对常规的氧助激光切割带有尖角 ( $\leq 30^\circ$ ) 图形的中低碳钢板材过程中存在的尖角“烧蚀率”很高的问题,系统研究了激光切割尖角图形的切割轨迹及参数对降低尖角“烧蚀率”的影响。得到了如下结论:

1) 在常规的氧助激光切割带有尖角 ( $\leq 30^\circ$ ) 图形的中低碳钢板材过程中,在优化的激光切割工艺参数的条件下,采用圆心在所切割尖角角平分线上,且通过该尖角顶点的圆形切割轨迹可大大降低激光切割尖角“烧蚀率”。

2) 当激光切割线能量取值一定时,对于不同尖角 ( $\leq 30^\circ$ ) 都存在一个最佳补偿半径可把尖角“烧蚀率”控制在 10% 以内,获得理想的切割效果。随着尖角度数的增加,该半径略有增加,但基本保持不变;而当尖角度数不变时,随着切割线能量值的增加,该半径快速增大。此外,当角度足够大时,则不需要补偿,此时,半径为零。

## 参 考 文 献

1 Liu Donghua. Laser cutting[J]. Laser Journal, 1992, 13(4): 207~213  
刘东华. 激光切割[J]. 激光杂志, 1992, 13(4): 207~213  
2 Li Xiangyou, Zeng Xiaoyan, Huang Weiling. Status and prospect of precision laser machining[J]. Laser Journal, 2000, 21(5):

- 1~3  
李祥友, 曾晓雁, 黄维玲. 激光精密加工技术的现状和展望[J]. 激光杂志, 2000, **21**(5): 1~3
- 3 Yang Yimin. Applications of precision machining with Nd:YAG laser[J]. *Lasers and Infrared*, 1997, **27**(6): 333~336  
杨逸民. 脉冲 Nd:YAG 激光在精密加工中的应用[J]. 激光与红外, 1997, **27**(6): 333~336
- 4 Li Xiangyou, Zeng Xiaoyan, Liu Yong *et al.*. Study of YAG laser cutting process with stainless steel sheet[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(12): 1125~1129  
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
- 5 Li Yousheng. Study on laser deep hole drilling [J]. *Laser Technology*, 1998, **22**(2): 36~40  
李又生. 深孔激光加工研究[J]. 激光技术, 1998, **22**(2): 36~40
- 6 N. Rajaram, J. Sheikh-Ahmad, S. H. Ceraghi. CO<sub>2</sub> laser cut quality of 4130 steel[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, **43**(4): 351~358
- 7 Li Shuyu, Tian Xinguo, He Jingdi *et al.*. Laser cutting flow curve of automatic flow control valves[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1003008  
李淑玉, 田新国, 贺敬地等. 自动流量平衡阀过流曲线激光切割工艺[J]. 中国激光, 2011, **38**(10): 1003008
- 8 Zhu Hu, Fu Jianhui, Liu Zhijun. Generation of 5-axis laser cutting path based on STL model[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 863~867  
朱虎, 扶建辉, 刘志军. 基于 STL 模型的五轴激光切割轨迹生成[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 863~867
- 9 Dang Dongxian, Sheng Xiaojun, Hu Jun *et al.*. Effect of standoff distance on flow field of assist gas in cutting slot in laser cutting [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2625~2631  
党东显, 盛晓军, 胡俊等. 喷嘴工件距对激光切缝中气体流场的影响[J]. 中国激光, 2010, **37**(10): 2625~2631
- 10 Zheng Qiguang. *Laser Advanced Manufacture* [M]. Wuhan: Press of Huazhong University of Science and Technology, 2002. 25~27  
郑启光. 激光先进制造技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002. 25~27
- 11 Liang Yaorong. Study of correlation between material surface temperature and laser average power and cutting speed [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 1996, **32**(6): 17~19  
梁耀荣. 激光加工温度与激光功率及加工速度关系的研究[J]. 航空精密制造技术, 1996, **32**(6): 17~19
- 12 S. L. Chen, W. M. Steen. The theoretical investigation of gas assisted laser cutting[C]. *SPIE*, 1992, **1722**: 221~230
- 13 H. Kaebnick, A. Jeromin, P. Mathew. Adaptive control for laser cutting using frequency analysis[J]. *Annals of the CIRP*, 1998, **47**(1): 137~140
- 14 H. Cheng, W. O'Neill. The effects of power rippling on CO<sub>2</sub> laser cutting[J]. *Opt. Technology*, 1997, **29**(3): 125~134
- 15 W. O'Neill, W. M. Steen. A three dimensional analysis of gas entrainment operating during the laser cutting process [J]. *J. Phys. D*, 1995, **28**(1): 12~18
- 16 A. Kratky, D. Schuocker, G. Liedl. Processing with kW fiber lasers-advantages and limits[C]. *SPIE*, 2009, **7131**: 71311X

栏目编辑: 宋梅梅