

# 激光切割铝合金吸收率试验研究

侯红玲, 解玉坤, 赵晋平

(陕西理工学院, 陕西 汉中 723003)

**摘要:** 目的 提高高反射率材料铝合金对激光的吸收率。方法 基于热平衡原理, 搭建了一种激光吸收率测试试验台, 并对 1.2 mm 厚 2A12 硬铝合金试样表面采用了无光漆、炭素墨汁、普通墨汁、石墨等 4 种不同的表面涂层处理方法, 用 CO<sub>2</sub> 脉冲激光发射器进行了定点照射测试, 通过 K 型热电偶测得铝合金试样的温度变化, 间接获得了其吸收率的大小。结果 试验数据表明, 在一定工艺参数下, 随着激光功率或扫描时间的增加, 所有试样的表面温度整体均呈上升趋势。在四种不同的表面处理方法中, 无光漆处理后的铝合金试样吸收率最高, 吸收率比原始表面提高了 40%, 并将这一结论用于工程实践加工, 加工后的试样切割面光滑, 刮渣尺寸小, 表面质量高。结论 该吸收率测试装置及表面处理方法, 可成功地改善材料对激光的吸收率。

**关键词:** 吸收率; 表面工艺; 激光; 切割质量; 2A12 铝合金; 高反射率

**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)10-0193-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.10.030

## Experimental Research on Absorptivity of Aluminum Alloy Cut by Laser

HOU Hong-ling, XIE Yu-kun, ZHAO Jin-ping

(Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723003, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the absorptivity of the high reflectivity material aluminum alloy by laser cutting. Based on the principle of thermal equilibrium, a test stand for laser absorptivity was set up. Such four different coating treatment methods as lusterless paint, carbolic ink, common ink and graphite were applied on the surface of 1.2 mm thick 2A12 aluminum alloy samples. CO<sub>2</sub> pulse laser emitter was used for the test of fixed point irradiation. The temperature change of aluminum alloy samples was measured with K-type thermocouple, based on which the amount of its absorptivity was indirectly obtained. Test data showed that under certain technological parameters, with the increase of laser power or scanning time, the surface temperature of all samples was integrally increased. Among the four different surface treatment methods, the absorptivity of the aluminum alloy treated with lusterless paint was the highest, which was increased by 40% compared with the original surface. After this conclusion was applied to engineering practice, the test-piece cutting surface was smooth after machining. The slag size was small and the surface quality was high. In conclusion, this absorptivity tester and surface treatment method can successfully im-

收稿日期: 2016-03-26; 修订日期: 2016-06-09

**Received:** 2016-03-26; **Revised:** 2016-06-09

**基金项目:** 2014 年度陕西省科技厅科研计划基金项目 (2014JM7268); 2014 年陕西省教育厅科学研究计划项目 (14JK1147); 2015 陕西理工学院研究生基金项目 (SLGYCX1532)

**Fund:** Supported by 2014 in Shaanxi Province Science and Technology Plan Project(2014JM7268);2014 the Provincial Department of Education Science Research Project of Shaanxi Province(14JK1147);Graduate Fund Project(SLGYCX1532)

**作者简介:** 侯红玲 (1976—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为精密加工技术及设备和数控技术及应用。

**Biography:** HOU Hong-ling (1976—), Female, Associate professor, Master's tutor, Research focus: precision machining technology, equipment and numerical control technology.

prove the absorptivity of the material to the laser.

**KEY WORDS:** absorptivity; surface process; laser; cutting quality; 2A12 Al-alloy; high reflectivity

激光是 20 世纪人类最伟大的发明之一,已广泛应用于汽车、电子、电器、航空、冶金、机械制造等国民经济重要部门。激光切割技术是一种摆脱传统的机械切割、热处理切割的全新切割法,具有热变形小、切割精度高、噪声小、无污染、易于实现自动切割等突出优点,容易达到更高的切割精度、更低的表面粗糙度、更灵活的切割方法和更高的生产效率,是现今人们所掌握的各种切割技术中最好的切割方法<sup>[1]</sup>。尽管激光切割有诸多优势,但对于具有高反射率的材料,如铝合金<sup>[2-3]</sup>,对于激光束能量的吸收率较低,激光切割质量难以控制,容易出现热致微裂纹、挂渣、条纹等现象,直接影响切割缝表面质量、尺寸精度以及力学性能等。如何提高金属表面对激光辐照能量的吸收率,从而使宝贵的激光能量得到充分的利用,是众多学者和工程技术人员关注的重点。

目前对激光切割铝合金的研究大多集中在工艺参数对切割质量的影响方面<sup>[4-5]</sup>。也有学者研究了材料表面吸收特性<sup>[6-8]</sup>对吸收率的影响和材料表面物理形貌<sup>[9-10]</sup>对吸收率的影响,研究表明金属表面涂覆适当的涂料是一种使吸收率增大的有效方法。目前,几乎没有现成的测量吸收率的装置,无法知道高反射率材料表面处理前后对吸收率的影响差别。本文搭建一种激光吸收率测试平台,以 2A12 铝合金为例,根据热平衡原理,方便地测量出了不同涂层的高反射率材料对吸收率的影响,通过试验探索了激光吸收率提高的方法。

## 1 铝合金激光切割工艺试验设计

### 1.1 试验测试基础

2A12 铝合金的密度小,强度高,导电导热性能仅次于银、铜和金。当激光照射金属材料试样表面时,试样吸收部分激光能量后温度升高。由德鲁特-辛涅尔的金属光学特性理论可知,金属的吸收能力随温度的增加呈近似线形提高<sup>[11]</sup>。所以测试金属的温度变化,可间接反映其吸收能力。

构建图 1 所示的测试原理,选择 CO<sub>2</sub> 激光器为

光源,对试样进行定点扫描照射,通过热电偶测得试样表面温度。

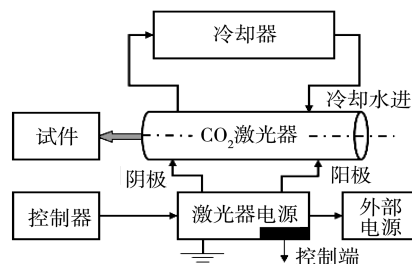


图 1 吸收率测试原理

Fig.1 Test principle of absorptivity

对测试试样进行激光定点照射时,温度场在  $x$  和  $y$  方向上基本保持不变,试样厚度仅为 1.2 mm,所以可认为整个试样的温度和表面温度近似相等,只要测得表面温度值即可测得材料的激光吸收率。

### 1.2 试验测试原理

在图 1 中,当激光束扫描照射试样时,试样吸收部分激光能量后温度升高,这部分被吸收的能量与激光输出能量的比值即可认为是材料的吸收率。在短时间内不考虑热量损失,依据热平衡原理及热平衡方程可得:

$$\alpha \cdot n \cdot E = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (1)$$

式中:  $E$  为单脉冲能量,  $n$  为脉冲个数,  $n \cdot E$  即为激光发生器的输出能量;  $c$  为试样比热容;  $m$  为试样质量;  $\Delta T$  为温升;  $\alpha$  为吸收率,则  $\alpha$  可以表示为:

$$\alpha = \frac{c \cdot m \cdot \Delta T}{n \cdot E} \quad (2)$$

式(2)中的激光发生器输出能量  $n \cdot E$  可以理解为激光发射功率  $P$  在一定时间段内  $t_0$  的积累,因此吸收系数的表达式也可变形为:

$$\alpha = \frac{c \cdot m \cdot \Delta T}{n \cdot E} = \frac{c \cdot m \cdot \Delta T}{P t_0} = \frac{c \cdot m \cdot (T_1 - T_0)}{P t_0} \quad (3)$$

式中:  $P$  为激光功率;  $t_0$  为试样上的激光扫描时间;  $T_1$  为  $t_0$  时刻试样的温度;  $T_0$  为试样的初始温度。

因此理论上讲,只要测出试样表面在  $t_0$  时间内的温度变化,就可以间接获得该试样激光切割时的吸收率大小。但试样吸收的能量一部分转换为内部

热量，另一部分通过辐射散发掉，所以试验测得的吸收能力比实际小。由于散发掉的热量对激光加工过程无影响，所以本试验不考虑热辐射，只研究最终被吸收的热量对激光切割的影响。

1.3 吸收率测试平台搭建

1.3.1 测试平台搭建

根据图 1 所示的测试原理，建立一种激光束能量吸收率的测试试验平台（图 2），对铝合金激光束能量吸收率进行测试。CO<sub>2</sub> 激光器为光源，激光管长度为 1.25 m，输出功率为 40 W，光斑直径为 6~8 mm，波长为 10.6 μm。

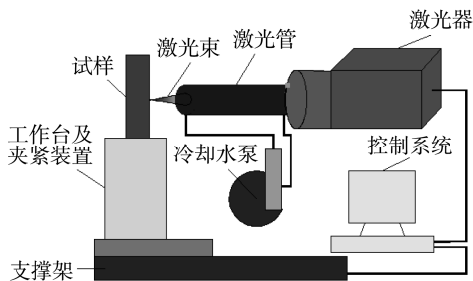


图 2 吸收率测试试验装置示意  
Fig.2 Test device of absorptivity

1.3.2 热电偶测温原理

热电偶测温时由热电偶、连接导线及显示仪表三部分组成。试验时，将热电偶的热端与试样粘结，冷端经铜导线与显示仪表连接，构成测温系统。由中间导体定律可知，铜导线连接热电偶冷端到仪表读取数值时，在导线与热电偶连接处不会产生接触电势，即不会产生附加误差，因而测量获得的热量就是试样吸收的激光热量。

1.3.3 试样安装

将测试试样固定在绝缘支架夹紧装置上，并在

试样的背面中间位置贴 2 个 K 型热电偶，该热电偶位置与激光管激光束等高。用 Satlon D-3/606 温升胶水固定热电偶，确保接触的良好性，以备测定激光加热时试样在测定点的温度变化。试验过程中用多功能万用表测试温度的变化。

1.3.4 测试过程

测试时，连接外部电源，打开冷却水泵，使激光管进行水循环冷却，然后根据测试所需的激光功率大小调整控制系统，并选定时间进行激光定点照射，激光管发射出来的激光束照射在试样表面，详细记录测试仪器所测得的温升数据。

2 铝合金表面处理试样制备

材料选用 2A12 硬铝合金，其成分（以质量分数计）为：Si≤0.50%，Cu 3.8%~4.9%，Mg 1.2%~1.8%，Zn≤0.30%，Mn 0.30%~0.9%，Ti≤0.15%，Ni≤0.10%，Fe 0.000%~0.500%，Fe+Ni 0.000%~0.500%，余量为 Al。采用剪板机加工一批试样，尺寸为 70 mm×40 mm×1.2 mm，进行吸收率测试。

由于铝合金对波长 10.6 μm 的 CO<sub>2</sub> 激光在常温下的反射率很高，使激光利用率很低。有研究表明金属表面进行涂层处理，可以有效增加表面对激光的吸收率<sup>[12-14]</sup>。为了提高铝合金对激光的吸收率，在测试试验之前，对金属表面进行“黑化”预处理。

将加工好的试样用丙酮和无水乙醇清洗，然后水洗，干燥，称量。将试样分为 5 组，每组 3 个试样，其中一组试样表面不进行任何处理用以对比，其余 4 组分别采用喷涂无光漆、石墨、碳素墨汁、普通墨汁进行表面涂黑。试样如图 3 所示。

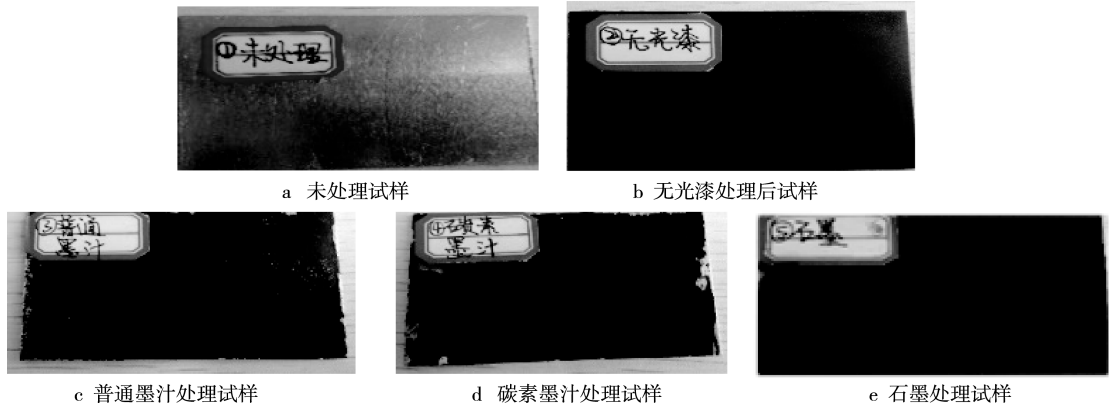


图 3 表面处理试样  
Fig. 3 Surface treated sample

对涂层材料进行称量,间接获得涂层厚度,如表 1 所示。

表 1 铝合金表面处理方法  
Tab.1 Surface treatment method of aluminum-alloy

涂层类别	名称	涂层质量/g
1	表面未处理	0
2	无光漆	0.109
3	普通墨汁	0.091
4	碳素墨汁	0.096
5	石墨	0.074

3 结果及分析

3.1 表面温度变化

试验中用波长为 10.6 μm 的 CO<sub>2</sub> 激光发生器对表 1 中 5 种表面处理后的 1.2 mm 厚 2A12 铝合金进行定点照射试验,测试扫描时间、激光功率对其吸收能力的影响,对其中一组试样的测量数据进行处理,结果如图 4—5 所示。

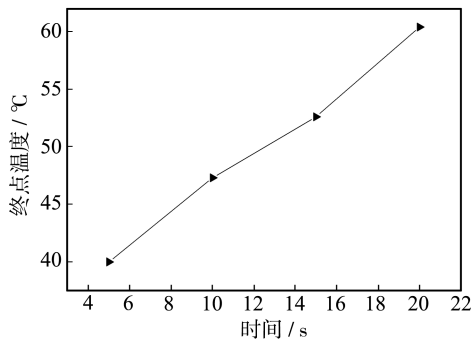


图 4 温度与随扫描时间  
Fig.4 Temperature changes with scanning time

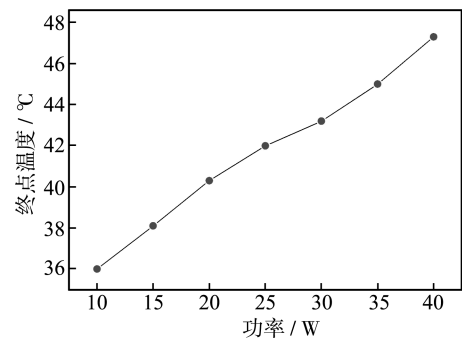


图 5 温度与激光功率  
Fig.5 Temperature changes with laser power

由图 4—5 可知,试样表面温度随扫描时间的增加而增加,随激光源功率的增大而增加。为了进一步找出吸水性能好的处理方法,对四种表面处理试样,分别按扫描时间间隔 5 s 和激光功率间隔 5

W 进行多次测量,记录表面温度,数据处理结果如图 6—7 所示。

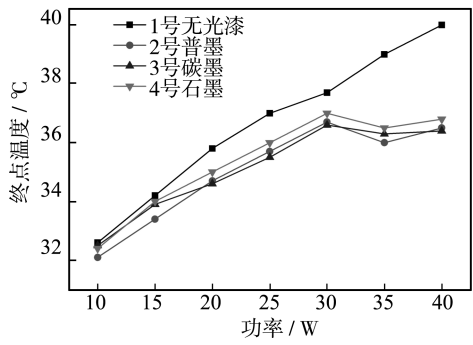


图 6 四种试样表面温度与功率关系曲线  
Fig.6 Relationship between surface temperature and power

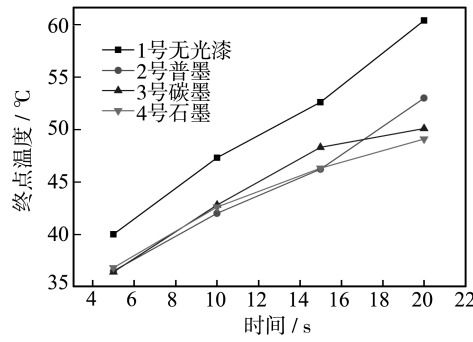


图 7 四种试样表面温度与扫描时间关系曲线  
Fig.7 Relationship between surface temperature and scanning time

从曲线图 6—7 可以看出,四种表面处理方法中,表面喷涂无光漆的试样的表面温度变化最显著,对激光的吸收性较好,其余三种有变化,但不显著,变化趋势一致。

3.2 吸收率变化

设定激光功率  $P=20\text{ W}$ ,测试时间  $t=10\text{ s}$  时,在以上参数不变的情况下,将四种表面处理后的试样各取 3 个,分别测得表面温度,计算的吸收率结果见表 2。可知三次重复性实验的标准偏差最大仅为 0.865%,而相对偏差最大仅为 2.02%。

表 2 试验测得吸收率  
Tab.2 The measured absorptivity %

材料状态	表面未处理	无光漆	碳素墨汁	普通墨汁	石墨
吸收率 $\alpha$					
1	10.31	50.05	42.33	41.86	37.51
2	9.93	49.18	41.68	43.59	38.62
3	10.14	48.53	42.94	42.73	38.31
标准偏差	0.19	0.623	0.630	0.865	0.573
相对偏差	1.88	1.26	1.49	2.02	1.50

4 试验结论应用

4.1 切割试验对比

通过试验测试分析,可知用黑色无光漆处理表面后的试样对激光的吸收较高,是四种表面处理方式中效果最佳的一种。为了验证上述结论,用黑色无光漆处理后的铝合金试样和表面未处理的试样均在激光切割机上进行切割试验,尺寸为 1000 mm×500 mm×2.5 mm,对比切割后试样的表面质量和精度,如图 8 所示。



图 8 切割试样切缝及挂渣对比  
Fig.8 Comparison of cutting specimen

从图 8a 和 8b 可以清晰地看出切缝的差异,表面未处理的试样,切缝处存在明显的挂渣,用黑色无光漆处理后的试样切口质量好,挂渣尺寸小,精度高。从图 8c 也可看出,表面未处理的试样拐角

处挂渣明显,而经过处理后的试样拐角光滑。

4.2 切缝精度对比

铝合金在激光切割过程中以熔化为主,在辅助气体的作用下形成了切割纹理及挂渣现象<sup>[14]</sup>。为了进一步量化对比切缝精度,利用 TR210 粗糙度仪测量切缝质量,并通过全自动视频测量仪 JVC300T,分别测得两种不同表面试样的表面粗糙度值和切缝挂渣尺寸值如表 3 所示。可以看出,经过表面处理后的激光切割试样,表面精度高,残留在切缝边缘的挂渣尺寸较小。这一结论为将激光技术应用到高反射率材料切割中提供了技术指导和依据。

表 3 表面粗糙度及尺寸  
Tab.3 Surface roughness and hanging slag size

类型 试样	表面未处理		表面无光漆处理	
	粗糙度	挂渣尺寸	粗糙度	挂渣尺寸
1	2.095	0.988	1.352	0.661
2	2.621	0.793	1.814	0.493
3	2.519	0.873	1.609	0.574

5 结论

- 1) 针对高反射率材料,搭建了一种激光吸收率测试平台,可以有效获得高反射率材料对激光的吸收率大小。
- 2) 通过试验探索了提高激光吸收率的表面处理方法,该方法经济易行,可以推广到工程应用。

参考文献

[1] PANDEY A K, DUBEY A K. Multiple Quality Optimization in Laser Cutting of Difficult-to-laser-cut Material Using Grey-fuzzy Methodology[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65(1—4): 421—431.

[2] 王续跃, 孟庆轩, 康仁科, 等. 气熔比法铝合金薄板激光切割试验研究分[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 48—52.

WANG Xu-yue, MENG Qing-xuan, KANG Ren-ke, et al. Experiments of Laser Cutting of Aluminum Alloy Sheet Based on Vaporization- Melt Ratio Controlled Method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(10): 48—52.

[3] 刘治国, 李旭东, 穆志韬. 基于腐蚀等级的机场环境下

- 航空铝合金材料疲劳性能研究[J]. 机械强度, 2014, 36(2): 310—314.
- LIU Zhi-guo, LI Xu-dong, MU Zhi-tao. Research on Fatigue Property Aeroaluminum Alloy in Air Port Environment Based on Corrosion Grade [J]. Journal of Mechanical Strength, 2014, 36(2): 310—314.
- [4] 黄志国. 工艺参数对激光切割 1060 铝板切割质量的影响[J]. 焊接技术, 2015, 44(6): 32—35.
- HUANG Zhi-guo. Influence of the Process Parameters on the Laser Cutting Quality of 1060 Aluminum Plate[J]. Welding Technology, 2015, 44(6): 32—35.
- [5] MICHAEL U. Laser Cutting Aluminum Sheet [J]. Industrial Laser Solutions, 2008, 23(9): 8—10.
- [6] LI J M, WANG C M, YAN F, et al. Study on Microstructure and Mechanical Properties of 6005a Joint in Laser Mig-Hybrid Welding [J]. Laser Technology, 2014, 38(6): 733—737
- [7] 张光钧. 激光热处理吸收涂层的研究[J]. 金属热处理, 2000(8): 3—5.
- ZHANG Guang-jun. Study on Coating Materials for Absorption of Laser in Laser Heat Treatment[J]. Heat Treatment of Metals, 2000(8): 3—5.
- [8] 程传新, 崔博, 张海燕. 激光模切的扫描算法研究[J]. 包装工程, 2014, 35(17): 107—111.
- CHENG Chuan-xin, CUI Bo, ZHANG Hai-yan. Scanning Algorithm of Laser Die-cutting[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(17): 107—111.
- [9] 陈君, 张群莉, 姚建华. 金属材料的激光吸收率研究[J]. 应用光学, 2008, 29(5): 793—798.
- CHEN Jun, ZHANG Qun-li, YAO Jian-hua, et al. Study on Laser Absorptivity of Metal Material[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(5): 793—798.
- [10] 寇玉洁, 张盼盼, 牛永安, 等. 耐磨涂层用 SiC/PI 复合薄膜的碳化研究[J]. 表面技术, 2014, 43(2): 42—48.
- KOU Yu-jie, ZHANG Pan-pan, NIU Yong-an, et al. Study on the Structure of SiC/PI Composite Film and Its Performance in Carbonization Process[J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 42—48.
- [11] 沃道瓦托夫 B. II. 维依可著. 激光在工艺中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980.
- WODOUGWATOV B. II. Application of Laser Technology in the Process[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1980.
- [12] 孙同坤, 李伟, 阴士健, 等. 金属表面涂层对 CO<sub>2</sub> 激光的吸收率[J]. 应用激光, 1982: 35—36.
- SUN Tong-kun, LI Wei, YIN Shi-jian, et al. The Absorption Rate of the Metal Surface Coating on the CO<sub>2</sub> Laser [J]. The Application of the Laser, 1982: 35—36.
- [13] 郭晓琴, 李晓玲, 张颂阳. 激光表面原位合成 TiB<sub>2</sub>/Cu 复合涂层的性能[J]. 铸造技术, 2011, 32(7): 958—960.
- GUO Xiao-qin, LI Xiao-ling, ZHANG Song-yang. Properties of Insitu TiB<sub>2</sub>/Cu Composite Coating by Laser Cladding[J]. Foundry Technology, 2011, 32(7): 958—960.
- [14] 陈菊芳, 王江涛, 周金宇. 镁合金表面激光熔覆技术的研究进展[J]. 激光技术, 2015, 39(5): 631—636.
- CHEN Ju-fang, WANG Jiang-tao, ZHOU Jin-yu. Research Progress of Laser Cladding on Magnesium Alloy Surface[J]. Laser Technology, 2015, 39(5): 631—636.
- [15] 彭玉海, 侯红玲, 张晖, 等. 激光切割对飞机蒙皮材料力学性能的影响分析[J]. 机械强度, 2015, 37(3): 435—439.
- PENG Yu-hai, HOU Hong-ling, ZHANG Hui, et al. Analysis of the Effect on the Mechanical Properties of the Laser Cutting Aircraft Skin[J]. Journal of Mechanical Strength, 2015, 37(3): 435—439.