

激光铣削对激光熔覆成形件的整形机理和实验研究

杜秋 杭小琳 王明娣 孙立宁

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

摘要 激光熔覆成形高性能薄壁金属零件时,由于熔覆层凹凸不平和挂渣导致成形件表面精度差,甚至后续成形困难,往往需要在成形过程中或成形后辅助机械铣削加工和抛光处理。但是成形件因急冷凝固,表面硬度很高,加工非常困难;形状复杂的零件机械加工更需多次装夹,加工时间长,有时要占整个制造周期的60%以上。为此提出了一种基于激光铣削的光内送粉激光熔覆复合精确快速成形新方法,采用激光铣削对激光熔覆成形件进行熔覆层的精密整形,该方法相比于传统的激光熔覆大大提高了成形件表面的成形质量,从而实现薄壁金属零件的精确成形。该方案避免了可能需要的机械精整加工,缩短了加工时间,降低了加工成本。

关键词 激光技术;复合精确成形;激光铣削;激光熔覆;实验研究

中图分类号 V261.8

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.101403

Mechanism and Experimental Study of Laser Milling on Laser Cladding Parts

Du Qiu Hang Xiaolin Wang Mingdi Sun Lining

School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract The forming of thin-walled parts by laser cladding results in creation of uneven cladding layers that manifests itself in poor surface. Furthermore, it makes follow-up forming difficult. In this case, it becomes necessary to conduct auxiliary mechanical milling and polishing. However, laser forming is one quench solidification process that results in high hardness which makes machining of these hardened surfaces impractical. In addition, if the shape of parts is complex, the finishing machining operations will require multiple jigs and fixture setups which are time consuming and highly inefficient. In fact, the finishing machining operations can account for more than 60% of the entire manufacturing cycle. To overcome the difficulty, a new composite precision rapid prototyping method is proposed. This new method is based on machining the cladding part by laser milling. The proposed high performance and precise approach results in greatly improved surface quality, as measured by surface morphology, as opposed to the traditional laser cladding forming. Furthermore, it will eliminate the need for the post processing and reduce the processing time and ultimately the processing cost of the part.

Key words laser technique; composite precision forming; laser milling; laser cladding; experimental study

OCIS codes 140.3325; 060.3510; 140.3390; 140.6810

1 引言

激光金属直接制造(LDMM)技术可实现对零件外形尺寸、微观结构和组织性能的柔性控制,因此得到了广泛的关注^[1-4]。激光金属直接成型过程中的工艺参数较多,任何工艺参数的不确定都会使成形表面凹凸不平^[5-6],若不能得到控制,多层堆积后表面凹凸不平,将严重影响成形质量,甚至使后续成形无法继续进行。为了保证成形质量,国内外许多学者致力于成形过程的闭环控制研究,钟敏霖等^[7-9]通过对熔覆层高度的实时测量,控制送粉量等参数实现闭环控制来消除凹凸不平现象,Bi等^[10]采用基于路径的闭环功率控制方法提高了薄壁零件的成形精度。上述方法仍然是基于分层切片轮廓轨迹熔融堆积,然后快速冷凝得到金属零

收稿日期: 2015-04-02; 收到修改稿日期: 2015-05-12; 网络出版日期: 2015-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(51205266)、苏州市基础研究计划-工业部分(SYG201326)

作者简介: 杜秋(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光复合加工技术方面的研究。E-mail: 771660775@qq.com

导师简介: 王明娣(1975—),女,硕士,教授,主要从事激光加工方面的研究。

E-mail: wangmingdi@suda.edu.cn(通信联系人)

件,因此仍然会存在基于分层制造带来的台阶效应,且表面精度达不到传统机械加工的要求^[11]。针对这些问题,国内外学者提出将金属零件直接快速制造与机械铣削相结合的复合工艺^[12-15],在成形过程中或成形后辅助机械铣削加工和抛光处理,在一定程度上提高了成形件的表面质量和精度;但是成形件因急冷凝固,表面硬度很高,加工非常困难;形状复杂的零件机械加工更需多次装夹,加工时间长,有时要占整个制造周期的60%以上。本文基于激光熔覆增材堆积与激光铣削减材相结合的思想,对铁基熔覆件表面进行激光铣削实验,探讨了用激光铣削方式减少熔覆时产生凹凸不平的可行性。

2 激光铣削熔覆层的整形机理

2.1 单点凹坑激光铣削模型

脉冲激光器以间歇性打点的方式对材料表面进行加工。图1所示为单脉冲激光作用于熔覆件表面时形成的单点凹坑及发生的物理现象。在单脉冲入射激光能量下,激光沉积能量高于烧蚀移除金属材料的激光能量的最小值,材料表面的温度上升,达到熔点温度时,累积热能形成熔化潜能,固态转化成液态,当温度超过材料的气化点时,材料发生蒸发,形成高压蒸气,此时靶材继续吸收热能,金属蒸气膨胀,以较高的压力从液相底部携带液相材料猛烈喷出,形成靶材的飞溅,材料得到烧蚀去除,形成单点凹坑,在此过程中将看到火光四溅;金属材料的铣削过程大致分为蒸发、蒸气膨胀以及陷坑的压力扩展、熔化。

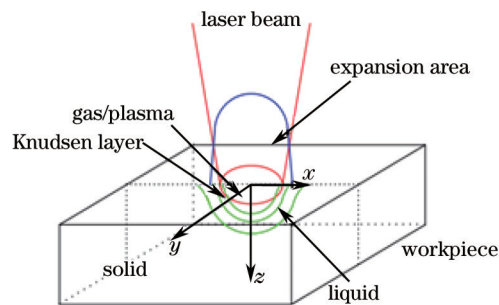


图1 单脉冲激光铣削模型

Fig.1 Laser milling model of single pulse

2.2 单道激光铣削模型

在铣削过程中,铣削的形成主要是以激光单脉冲作用形成的凹坑部分重叠来完成的^[16]。激光铣削熔覆层形成单道铣削表面时,靶材表面形成鱼鳞状金属层叠。其模型如图2所示,熔池表面有熔融金属和微量的气化蒸气,蒸气膨胀时形成压力,蒸气压力迫使熔融金属沿凹形坑壁流动。由于熔融金属的流动,下一个脉冲激光辐照靶材金属表面时,上一个凹形坑陷被覆盖,形成金属固熔。而且此时的金属表面受上一个脉冲的热扩散作用,初始温度从接近熔点的温度开始。

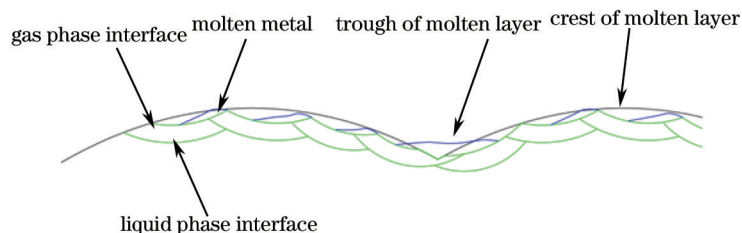


图2 单道激光铣削模型

Fig.2 Laser milling model of single track

对于激光熔覆靶材,由于其本身制造工艺缺陷,熔覆层表面不平整,有明显的凹谷及凸峰,同时,又有部分未被熔融的金属粉末黏结在熔覆层的表面,影响激光熔覆层表面质量。针对熔覆层的不平整,进行激光铣削微整形。在不平整的激光熔覆件表面,激光辐照靶材表面时发生气化和熔化。在同一离焦量下,熔覆层表面的高低起伏会影响熔覆层的气化和液化界面。在辅助气体和蒸气压力的作用下,熔融的液体金属从后一个脉冲区域流向前一个脉冲区域,使熔覆件表层的凸峰处渐趋平整;而熔覆凹谷处,在重力及蒸气压力的作用下,液体金属沿凹坑壁流动补偿凹谷,从而实现激光熔覆件表面的整形。

3 实验设备与方法

实验所用设备为苏州天弘激光有限公司生产的TH-LWY激光金属焊机/切割机,其激光源为Nd:YAG,波长为1064 nm,透镜焦距为110 mm,聚焦光斑直径最小为0.2 mm,激光最大平均功率为300 W,重复频率范围为1~100 Hz,脉冲宽度范围为0.1~10 ms,行程可达500 mm×500 mm。

加工试样选用单层F313铁基熔覆件,基板厚度为8 mm的304不锈钢,熔覆层厚度为2 mm,在熔覆件表面铣削3 mm×3 mm的正方形。实验通过改变激光铣削工艺参数来探讨影响铣削质量的规律。由于激光熔覆本身工艺的影响,熔覆件纵向与横向的差异较大,将分别考虑激光熔覆件的纵向及横向质量,纵向以粗糙度来衡量不同工艺参数激光铣削的表面质量好坏,横向以平整度来衡量不同工艺参数激光铣削的表面质量好坏。其中纵向为与激光熔覆扫描同向,横向为与激光熔覆扫描方向垂直。对熔覆件表面进行大面积铣削时,为了得到好的表面粗糙度,脉冲光斑需存在一定的重叠率。重叠率是指两个脉冲光斑重叠部分与光斑大小的比值,实验中所用激光器在焦点位置光斑的理论值为0.2 mm,但由于发散角的存在,实际测量的光斑最小直径为0.25 mm,为了保证光斑重叠,实验中不同光斑之间的点间距设定为0.2 mm。

铣削熔覆层表面的激光工艺参数如表1所示。所用辅助气体为氩气,气压约为0.3 MPa;激光平均功率为60~100 W,脉宽为1~3 ms,离焦量为-2~1 mm;分别固定其中两个工艺参数,改变另外一个参数,单层铣削熔覆层表面,确定36组实验,实物图如图3所示。

表1 单层铣削粗糙度及平整度结果

Table 1 Results of roughness and smoothness in single-layer milling

Influence factors	Power /W	Pulse width /ms	Defocusing amount /mm	Roughness / μm	Smoothness /mm
1		1		1.506	0.043
2		2		1.571	0.045
3	60	3		1.346	0.048
4		1		1.725	0.03
5		2		1.705	0.04
6	80	3	0	1.566	0.033
7		1		2.14	0.02
8		2		2.036	0.03
9	100	3		1.838	0.03
10		1		1.091	0.044
11		2		1.016	0.045
12	60	3		1.141	0.05
13		1		1.48	0.035
14		2	-1	1.592	0.04
15	80	3		1.627	0.045
16		1		1.767	0.02
17		2		1.91	0.03
18	100	3		2.094	0.03
19		1		1.081	0.045
20		2		0.92	0.05
21	60	3		1.024	0.05
22		1		1.093	0.04
23		2	-2	0.606	0.045
24	80	3		1.121	0.05
25		1		1.609	0.03
26		2		0.99	0.035
27	100	3		1.771	0.04
28		1		1.323	0.05
29		2		1.146	0.055
30	60	3		1.344	0.06
31		1		1.604	0.035
32		2	1	1.353	0.04
33	80	3		1.693	0.05
34		1		1.843	0.025
35		2		1.824	0.03
36	100	3		1.858	0.03



图3 边长为3 mm的正方形铣削面

Fig.3 Square milling faces with side length of 3 mm

4 实验结果与分析

4.1 工艺参数对铁基熔覆件表面粗糙度的影响

不同工艺参数铣削得到的熔覆件表面粗糙度值如表1所示;图4给出了不同激光铣削参数下熔覆件表面粗糙度的变化规律。

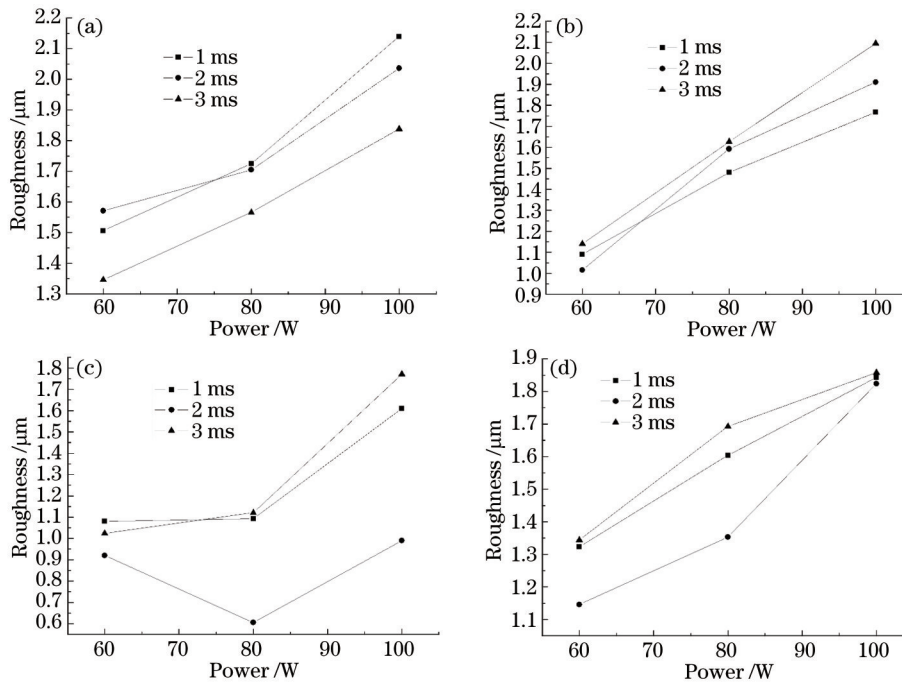


图4 不同离焦量下平均功率和脉宽与表面粗糙度的关系。(a) 0 mm; (b) -1 mm; (c) -2 mm; (d) 1 mm

Fig.4 Relationship between average power, pulse width and surface roughness under different defocusing amounts.

(a) 0 mm; (b) -1 mm; (c) -2 mm; (d) 1 mm

从图4中可以看出,在这4种离焦量中,随着平均功率的增大,由于能量密度变大,靶材表面的粗糙度基本呈上升趋势,即表面质量随着平均功率的增大而变差。原因是平均功率高时,能量密度较高,在靶材表面形成的凹坑较深,反而不利于靶材表面的修整。

脉宽与表面粗糙度之间的关系有3种趋势:1) 离焦量为零时,粗糙度基本是随着脉宽的增大而变小的,此时,脉宽增大时,长脉宽使熔池长期处于沸腾状态,使熔融物质流淌,有利于表面质量的修整;2) 离焦量为-1 mm时,粗糙度随着脉宽的增大而增加,此时,脉宽增大,靶材表面长期处于沸腾状态,熔池中喷溅的物质较多,影响表面成形;3) 离焦量为-2 mm及1 mm时,粗糙度随脉宽增大先减小后增大,此时,脉宽增大,靶材表面长期处于沸腾状态,有利于表面质量的修整,但随着脉宽的继续增大,熔池中喷溅的物质较多,影响表面成形。

综上所述,表面粗糙度最小值出现在离焦量为-2 mm的低功率区域;离焦量为零时,表面粗糙度整体偏大,原因是此时焦点的能量高,单脉冲形成的凹坑较深,重叠时对表面粗糙度造成不好的影响。而正负离焦时,辐射到靶材表面的能量相对平缓,使靶材上形成的单孔锥度小,有利于靶材表面的修整。

4.2 工艺参数对铁基熔覆件表面平整度的影响

不同工艺参数铣削得到的熔覆件表面平整度值如表1所示;图5所示为不同激光铣削参数下熔覆件表面平整度的变化规律。

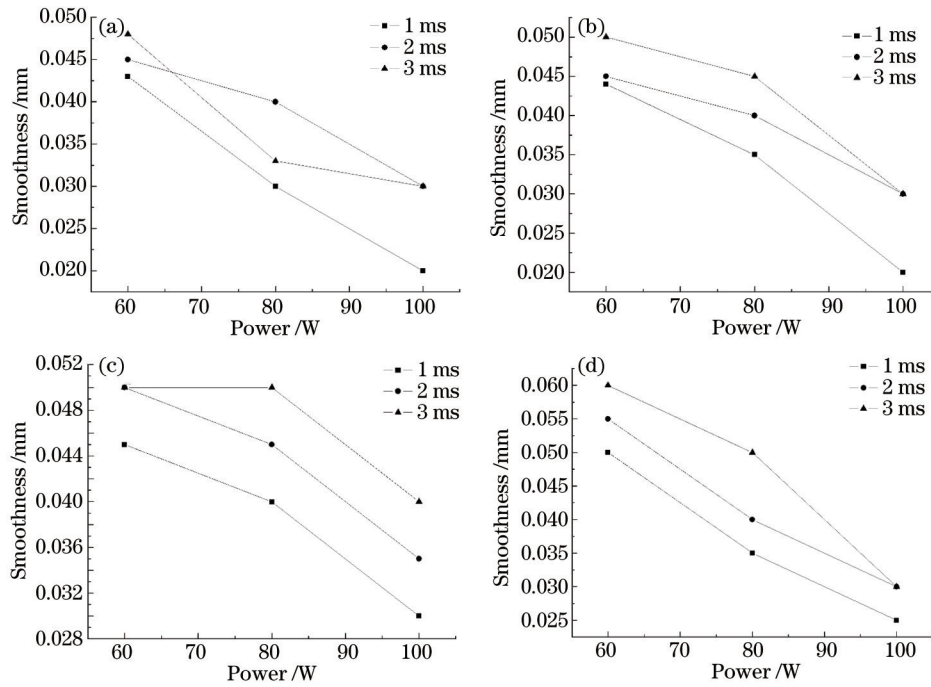


图5 不同离焦量下平均功率和脉宽与表面平整度的关系。(a) 0 mm; (b) -1 mm; (c) -2 mm; (d) 1 mm

Fig.5 Relationship between average power, pulse width and surface smoothness under different defocusing amounts.

(a) 0 mm; (b) -1 mm; (c) -2 mm; (d) 1 mm

从图5可以看出,4种离焦量条件下,横向平整度随着平均功率的增大明显变好。原因在于平均功率高时,峰值功率较大,靶材上凸起的峰吸收的能量较高,熔渣的流动及少量气化使靶材表面更加趋于平整。

在4种离焦量条件下,表面平整度整体上随着脉宽的增大而变差。原因主要是脉宽增大,峰值功率降低,能量密度分布趋于平缓,靶材上凸起的峰熔融及气化部分减少,从而使熔渣的流动及气化减少,不利于熔覆层凸峰的修整。

离焦量越大,表面平整度反而越差。图5中离焦量为零时,表面平整度最好,离焦量为-1 mm及1 mm时次之,离焦量为-2 mm时平整度最差。原因是离焦量大时,辐射到熔覆件表面的能量密度分布平缓且偏小,能熔融的靶材物质较少,凹坑边缘有塌边,对熔覆层凸峰修整量较少。而离焦量小时,能量密度集中,熔融靶材物质多,能够较好地改善靶材表面平整度。

5 结 论

1) 在添加材料结合去除材料加工方式的指导思想下,提出了一种基于激光铣削的光内送粉激光熔覆复合精确快速成形新方法,利用激光铣削实现熔覆层精确整形,从而实现金属零件的直接复合精确成形。

2) 初步探索了激光铣削对激光熔覆成形件的整形机理并做了相关实验研究,结果表明通过激光铣削可明显提高熔覆件表面的精度,表面粗糙度值最小可达 $0.606 \mu\text{m}$,平整度最小也能达到 0.02 mm ,相比原熔覆件,表面成形质量得到明显改善。对比铣削前后的熔覆面可以看出,采用激光铣削后的表面质量明显优于未铣削时的表面质量,结果证明用激光铣削的方式降低熔覆成形时产生的凹凸不平是可行的,为直接快速制造表面质量好的金属零件探索了新的有效途径。

参 考 文 献

- Do Xuantuoi, Li Dichen, Zhang Anfeng, *et al.*. Numerical experimental investigation on the epitaxial growth of columnar crystal in laser metal direct forming of DZ125L super-alloy[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0603008.
Do Xuantuoi, 李涤尘, 张安峰, 等. 激光金属直接成形 DZ125L 高温合金柱状晶连续生长的数值模拟与实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0603008.
- Zhang Anfeng, Li Dichen, Lu Bingheng. Research progress in laser direct metal rapid prototyping technology[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2007, 30(5): 68-72.

- 张安峰, 李涤尘, 卢秉恒. 激光直接金属快速成形技术的研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2007, 30(5): 68-72.
- 3 Sun Daojin, Liu Jichang, Li Qindong. Phase-field method simulation of microstructure evolution at the bottom of melt pool in coaxial laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0403005.
孙道金, 刘继常, 李钦栋. 激光熔覆纯镍熔池底部组织生长的相场法模拟[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0403005.
- 4 Gao Shiyu, Li Jian, Li Chenguang, *et al.*. Research on the variation regularity of single laser tracks cross-section morphology during laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0503010.
高士友, 李健, 李臣光, 等. 激光熔覆单道沉积轨迹横截面形貌变化规律研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0503010.
- 5 Guo Shirui, Chen Zhijun, Zhang Qunli, *et al.*. Effects of different pressures on laser cladding special powder prepared by gas atomization[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0603001.
郭士锐, 陈智君, 张群莉, 等. 不同压力对气雾化激光熔覆专用合金粉末的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0603001.
- 6 Wang Wei, Cai Lei, Yang Guang, *et al.*. Research on the key parameters of powder-feeding nozzle for laser cladding forming[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 021402.
王维, 才磊, 杨光, 等. 激光熔覆成形送粉喷嘴关键参数的探究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 021402.
- 7 Mazumder J, Dutta D, Kikuchi N, *et al.*. Closed loop direct metal deposition: Art to part[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 34(4-6): 397-414.
- 8 Ning Guoqing, Zhong Minlin, Yang Lin, *et al.*. Research about close-loop control system during laser direct manufacturing metallic components[J]. Applied Laser, 2002, 22(2): 172-176.
宁国庆, 钟敏霖, 杨林, 等. 激光直接制造金属零件过程的闭环控制研究[J]. 应用激光, 2002, 22(2): 172-176.
- 9 Tan Hua, Chen Jing, Yang Haiou, *et al.*. Real-time sensing and closed-loop control of laser rapid forming process[J]. Applied Laser, 2005, 25(2): 73-76.
谭华, 陈静, 杨海鸥, 等. 激光快速成形过程的实时监测与闭环控制[J]. 应用激光, 2005, 25(2): 73-76.
- 10 Bi G J, Gasser A, Wissenbach K, *et al.*. Characterization of the process control for the direct laser metallic powder deposition[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(6): 2676-2683.
- 11 Song Y A, Park S, Choi D, *et al.*. 3D welding and milling: Part I - a direct approach for free form fabrication of metallic prototypes[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(9): 1057-1062.
- 12 Amon C H, Beuth J L, Weiss L E. Shape deposition manufacturing with microcasting: Processing, thermal and mechanical issues[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1998, 120(3): 656-665.
- 13 Akula S, Karunakaran K P. Hybrid adaptive layer manufacturing: An intelligent art of direct metal rapid tooling process[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2006, 22(2): 113-123.
- 14 Zhang Haiou, Xiong Xinhong, Wang Guilan, *et al.*. Direct manufacturing technology of metal parts by hybrid plasma deposition shaping and milling finishing[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 120(20): 1863-1866.
张海鸥, 熊新红, 王桂兰, 等. 等离子熔积成形与铣削光整复合直接制造金属零件技术[J]. 中国机械工程, 2005, 120(20): 1863-1866.
- 15 Song Y-A, Park S. Experimental investigations into rapid prototyping of composites by novel hybrid deposition process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 171(1): 35-40.
- 16 Zhu Yinbo. Experimental and Simulation Study of Pulsed Laser Milling on Ceramic Materials[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010: 1-71.
朱银波. 陶瓷材料脉冲激光铣削成形实验及模拟研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010: 1-71.

栏目编辑: 吴秀娟