

# 钛合金薄壁件激光熔覆铣削再制造后的平面度变化

余芬, 张金, 王宁, 王涛

(中国民航大学航空工程学院, 天津 300300)

**摘要:** 对 TC4 合金薄壁件进行了激光熔覆铣削再制造, 采用 MATLAB 软件对测试数据进行拟合, 研究了熔覆轨迹( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  和  $90^\circ$ )以及后续铣削加工对薄壁件平面度的影响。结果表明: 采用  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  和  $90^\circ$  熔覆轨迹进行激光熔覆后, TC4 合金薄壁件的平面度较熔覆前的均有所提高, 且熔覆前后的平面度差值依次增大; TC4 合金激光熔覆层的硬度较基体的提高了 20%; 铣削加工后, 激光熔覆薄壁件的平面度进一步增大;  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $0^\circ$  熔覆轨迹薄壁件铣削加工后的平面度依次减小,  $0^\circ$  熔覆轨迹对钛合金薄壁件的再制造效果较好。

**关键词:** 钛合金; 激光熔覆; 铣削; 再制造; 平面度

中图分类号: TG166.5; TG659

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2020)11-0106-05

## Flatness Change of Titanium Alloy Thin-Walled Parts by Laser Cladding and Milling Remanufacturing

YU Fen, ZHANG Jin, WANG Ning, WANG Tao

(Aeronautical Engineering Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** Laser cladding and milling remanufacturing of TC4 alloy thin-walled parts was carried out, and the influence of cladding trajectory ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $90^\circ$ ) and subsequent milling on the flatness of thin-walled parts was studied by using MATLAB software to fit the test data. The results show that after laser cladding with  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $90^\circ$  cladding trajectories, the flatness of TC4 alloy thin-walled parts was improved comparing with that before cladding, and the flatness difference before and after cladding increased sequentially. The hardness of the TC4 alloy laser cladding layer was 20% higher than that of the matrix. After milling, the flatness of the thin-walled parts after laser cladding was further increased. The flatness of thin-walled parts with  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ , and  $0^\circ$  cladding trajectories decreased after milling, and the  $0^\circ$  cladding trajectory showed a better remanufacturing effect on titanium alloy thin-walled parts.

**Key words:** titanium alloy; laser cladding; milling; remanufacturing; flatness

## 0 引言

钛合金由于密度小、耐腐蚀性能和抗疲劳性能好等优点而广泛应用于航空航天领域<sup>[1]</sup>。航空业的飞速发展, 对飞行器的设计和制造性能提出了更高的要求<sup>[2]</sup>, 具有质量轻、比强度高等优点的钛合金薄壁件受到越来越多的关注<sup>[3]</sup>。典型的复杂薄壁

件——航空发动机叶片长期工作在高温、高压和高负荷的工作环境中, 叶片损伤在所难免。新叶片的更换将会极大地增加飞行器的日常维护和运营成本<sup>[4]</sup>, 因此对损伤的叶片进行再制造, 具有重要的社会和经济意义<sup>[5]</sup>。研究表明, 采用变换激光熔覆主要工艺参数的方式对航空发动机损坏叶片进行修复, 然后通过数控铣削进行减材复形加工, 可以取得良好的应用效果, 修复叶片的尺寸和粗糙度均满足技术文件要求<sup>[6]</sup>。

目前, 国内外学者对铣削加工工艺和激光熔覆层的制备工艺进行了诸多研究, 其中激光熔覆再制造技术常用于轴类等回转体零件。DENKENA

收稿日期: 2020-03-11; 修訂日期: 2020-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1633104); 中国民航大学  
波音基金资助项目(20190608)

作者简介: 余芬(1963—), 女, 辽宁本溪人, 教授, 硕士

通信作者: 王涛教授

等<sup>[7]</sup>对电子束焊接 TC4 合金铣削加工工艺参数进行研究,得到了铣削加工过程中控制残余应力的方法。NESPOR 等<sup>[8]</sup>对电子束焊接 TC4 合金铣削工艺参数进行优化,得到了对表面粗糙度影响较小的铣削工艺参数。韩玉勇等<sup>[9]</sup>采用改变扫描速度的方式对车床主轴进行激光熔覆再制造,并使用磨床对熔覆层进行加工,获得的再制造主轴完全符合设计尺寸要求。张富祯等<sup>[10]</sup>对 45 钢薄壁件的激光熔覆修复工艺参数进行优化,发现激光功率 600 W,扫描速度  $12 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,送粉速率  $1.2 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$  工艺下熔覆层硬度最高,基体表面可得到显著强化。王涛等<sup>[11]</sup>采用激光扫描轨迹和加工路径平行及垂直两种加工方式对 TC4 合金进行熔覆,研究了端铣后熔覆层的表面三维形貌,发现加工轨迹与激光扫描轨迹垂直时合金表面形貌较好。平面度为拟合区上下平行平面的最小包容宽度,用来控制被测实际平面的形状误差<sup>[12]</sup>。不同激光熔覆轨迹的热输入和熔覆层的铣削力都会使基体薄壁件的平面度发生变化,然而目前国内外学者对熔覆层进行铣削加工的研究相对较少。为此,作者对 TC4 合金薄壁件进行激光熔覆铣削再制造,研究了熔覆轨迹以及后续铣削加工对基体薄壁件平面度的影响,以便为薄壁件再制造过程中平面度的控制和工艺选取提供一定参考。

## 1 试样制备与试验方法

### 1.1 试样制备

以能够表征叶片基本特征的 TC4 合金悬臂薄壁零件作为基体,通过 DMU85 monoBlock 型五轴数控加工中心及传统铣削加工方法制备该零件,其顶面模拟叶片的叶尖部位,基座部分模拟叶片的叶根部位。基体薄壁件的形状、尺寸及装夹方式如图 1 所示。

采用 HFB-C50 型手持式激光清洗器将基体薄壁件的顶面清洗至呈现金属光泽,用酒精擦拭并吹干,以消除氧化层对后续试验的影响。激光熔覆用 TC4 粉末由宝鸡市海宝特种金属材料有限责任公司提供,粒径在  $75 \sim 150 \mu\text{m}$ ,化学成分如表 1 所示。

通过功率为 1 kW 的 Raycus-RFL-C1000 型激光器,沿与  $x$  方向成  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  的 3 个典型熔覆轨迹对薄壁件顶面进行激光熔覆,光斑直径约为  $1.8 \text{ mm}$ ,激光功率为  $800 \text{ W}$ ,扫描速度为  $8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,送粉盘转速为  $0.8 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,搭接率为 50%,熔覆方式为 YASKAWA-MH24 型机械臂带动的单道往复运动,激光熔覆装置如图 2 所示。为防止熔覆层氧化,熔覆试验均在充满氩气的保护箱中进行(箱

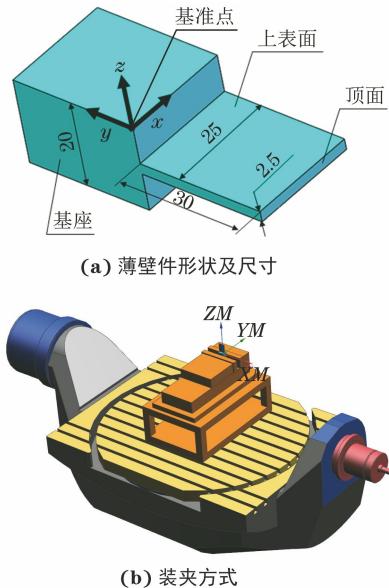


图 1 TC4 合金基体薄壁件的形状、尺寸及装夹方式示意

Fig. 1 Schematic of shape, size (a) and clamping method (b) of TC4 alloy substrate thin-walled part

表 1 TC4 合金粉末的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of TC4 alloy powder (mass) %

Al	V	Fe	O	C	H	N	Ti	余
6.0	4.0	0.3	0.2	0.1	0.015	0.05		

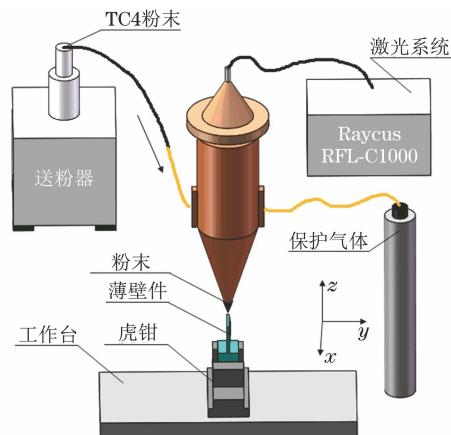


图 2 TC4 合金薄壁件激光熔覆装置示意

Fig. 2 Schematic of laser cladding device of TC4 alloy thin-walled part

内氧气含量小于  $57.1 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )。为使熔覆轨迹更为精确,需在保护箱内安装用于定向的虎钳,用激光头、水平仪和百分表对虎钳进行校正并加以固定,然后将基体薄壁件固定在虎钳上进行激光熔覆。图 3(a)为激光熔覆试验后 3 个典型熔覆轨迹的形貌,其中, a 为  $0^\circ$  熔覆轨迹, b 为  $45^\circ$  熔覆轨迹, c 为  $90^\circ$  熔覆轨迹。择优选择熔覆层几何尺寸相近的



图 3 激光熔覆轨迹和熔覆完成后薄壁件的宏观形貌

Fig.3 Macromorphology of laser cladding trajectories (a) and thin-walled parts after laser cladding (b)

3个薄壁件进行研究,以保证后续试验的准确性,熔覆层几何尺寸为 $25\text{ mm} \times 7\text{ mm} \times 3.5\text{ mm}$ ,如图3(b)所示,d为基体薄壁件。

## 1.2 试验方法

考虑到熔覆层 $y$ 向宽度为7 mm,而探针直径为3 mm,为使红外线测量传感器能探测到薄壁件表面,采用A轴(五轴加工中心绕 $x$ 轴转动)转动90°实现熔覆薄壁件的接触式测量,见图4,重复定位精度为 $\pm 0.001\text{ mm}$ 。通过DMU85 monoBlock五轴数控加工中心机床自带的TS649型红外线测量传感器(精度为0.001 mm)测量不同熔覆轨迹下薄壁件上表面和下表面 $z$ 方向的数值,测量方式为接触式测量。为减小二次装夹误差对测量结果的影响,铣削加工制备基体薄壁件以及测量熔覆后薄壁件的 $z$ 值时均采用同一测量基准点(图1中 $x$ , $y$ , $z$ 轴的交点)。考虑到基体薄壁件制备时侧铣切入和切出过程会有少量毛刺,因此 $x$ 方向测试位置取距离两端长度3.5 mm以上;由于熔覆层在基体薄壁件顶面,重力作用会导致没有固定边界束缚的熔池向两边流淌,为使激光熔覆和铣削加工后基体薄壁件上的相同测量位置形成对照,同时结合实际熔覆效果,设置 $y$ 方向测试初始位置距顶面2 mm以上;基体薄壁件为悬臂薄壁零件, $y$ 方向的变形大于 $x$ 方向的,因此在 $y$ 方向每隔2 mm设置一个测试点, $x$ 方向每隔3 mm设置一个测试点,共计70个点,如图4所示。

通过最小二乘法对测量得到的 $z$ 方向数据点 $(x_i, y_i, z_i)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )进行平面度拟合<sup>[13]</sup>,利用MATLAB中的优化工具箱得到0°,45°和90°3个熔覆轨迹对应的平面度拟合数据。

激光熔覆TC4合金层比基体薄壁件的硬度更高。在再制造铣削加工过程中,铣削工件材料硬度的提高将会直接导致铣削工件平面度的增大。前期

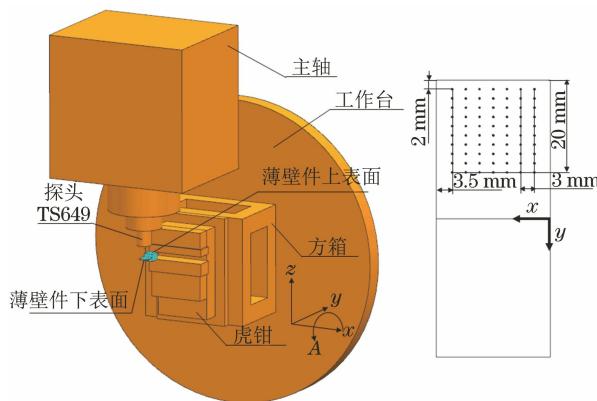


图 4 熔覆薄壁件在机测量和测试点位置示意

Fig. 4 Measurement method and positions of thin-walled part on machine

试验研究发现,在激光参数相同的条件下,熔覆轨迹的改变对熔覆层硬度影响很小。因此,选取熔覆轨迹角度为0°的薄壁件进行硬度测试。通过线切割机切取硬度试样(包括整个熔覆层、过渡区和基体),经镶嵌、抛光等工序后,利用HV-1000型显微硬度计测定抛光表面的硬度,加载载荷为200 N,保载时间为10 s。从熔覆层边缘向基体每隔100  $\mu\text{m}$ 取点测试,直至硬度稳定。

为满足高硬度熔覆层的铣削加工需求,将数控加工中心A轴恢复原位后,采用YG硬质合金铣刀(刃长20 mm,直径8 mm,螺旋角35°)对薄壁件熔覆层进行铣削加工。铣削加工的基准点仍采用图1所示的基准点。为保证熔覆层铣削深度一致,首先对熔覆层表面进行端铣得到平整顶部表面,然后采取侧铣方式,使用UG11.0平面铣命令,对0°,45°和90°3个方向的熔覆层分别进行铣削加工。铣削参数如表2所示,铣削加工方式见图5。切削模式选择往复,切削步距恒定为0.5 mm,以减少加工过程中的抬刀次数。按照上述方法测定铣削后基体薄壁件在 $z$ 方向数值的变化。

表 2 铣削参数

Table 2 Milling process parameters

铣削速度/ (m·min <sup>-1</sup> )	每齿 进给/mm	径向 切深/mm	轴向 切深/mm
120	0.05	0.5	7

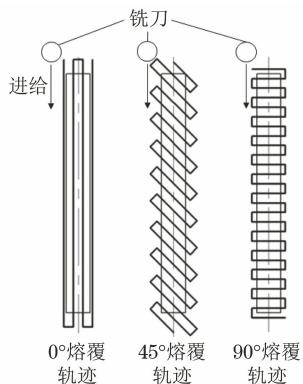


图 5 熔覆层铣削加工示意

Fig. 5 Schematic of cladding layer milling

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 熔覆轨迹对基体薄壁件平面度的影响

由图 6 可以看出,  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  激光熔覆轨迹下基体薄壁件的平面度均高于熔覆前的平面度, 这是由激光熔覆过程中热输入造成基体薄壁件变形所致。此外, 由于基体薄壁件制备时首先加工下表面, 后加工上表面, 后者几何尺寸与基座保持一致, 薄壁结构尚未形成, 因此激光熔覆前后基体薄壁件上表面的平面度均明显高于下表面的。考虑到传统铣削加工方法制备的基体薄壁件几何尺寸存在一定差异, 为减少制造误差对后续激光熔覆和铣削加工的影响, 对熔覆前后的平面度数据进行差值计算, 得到  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  熔覆前后上表面的平面度差值分别为

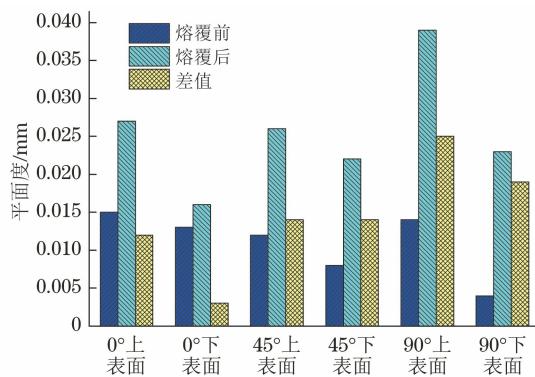


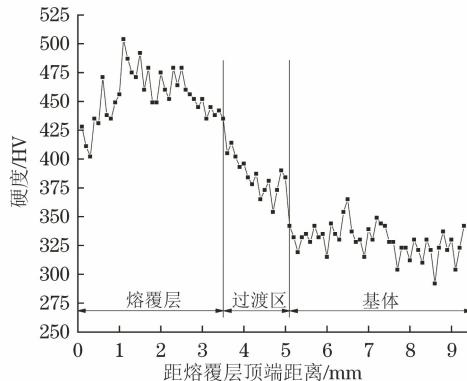
图 6 不同轨迹熔覆前后薄壁件的平面度及其变化量

Fig. 6 Flatness and its variation of thin-walled parts before and after cladding with different trajectories

0.012, 0.014, 0.025 mm, 下表面的平面度差值分别为 0.003, 0.014, 0.019 mm。可见  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  熔覆后基体薄壁件平面度变化依次增大。这是由于换向次数的增加导致激光熔覆轨迹变长, 激光能量对基体的热输入增加, 热应力增大, 进而导致基体变形增大。

### 2.2 熔覆后薄壁件的硬度

由图 7 可以看出,  $0^\circ$  熔覆轨迹下, 随着距熔覆层顶端距离的增加, 薄壁件硬度减小。与基体相比, 熔覆层表面硬度提高了约 20%, 这与文献[14]的研究结果相似。可见, 若采用铣削基体薄壁件的工艺参数对熔覆层进行铣削加工, 会使得熔覆层的铣削力增大<sup>[15]</sup>, 进而造成新生成平面整体平面度增大, 导致熔覆层修复部位不能满足零件互换性的使用要求。

图 7  $0^\circ$  熔覆轨迹下薄壁件硬度随距熔覆层顶端距离的变化曲线Fig. 7 Variation curve of hardness of thin-walled part vs distance from the top of cladding layer under  $0^\circ$  cladding trajectory

### 2.3 熔覆层铣削加工过程中的平面度变化

铣削加工后激光熔覆薄壁件的宏观形貌如图 8 所示, 可以看出其损伤部位铣削修复后的高度达 3 mm。结合图 3 可知, 熔覆轨迹为  $90^\circ$  的熔覆层左侧存在明显缺陷, 而熔覆轨迹为  $0^\circ$  和  $45^\circ$  的熔覆层左右两侧缺陷不明显。

由图 9 可以看出: 铣削加工使熔覆后基体薄壁件的平面度进一步增大;  $90^\circ$  熔覆薄壁件铣削加工后的平面度最大,  $45^\circ$  熔覆的次之,  $0^\circ$  熔覆的最小, 这是因为熔覆过程换向次数的增加使得熔覆层轨迹之间的孔隙增多, 沿同一铣削方向对熔覆轨迹为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  的熔覆层进行加工时, 侧铣铣削振动增大, 进而导致熔覆层铣削后平面度拟合数据增大。结合上述分析结果, 从实际生产角度考虑, 采用  $0^\circ$  熔覆轨迹对钛合金薄壁件进行修复时平面度最好, 铣削加工效果也更好。

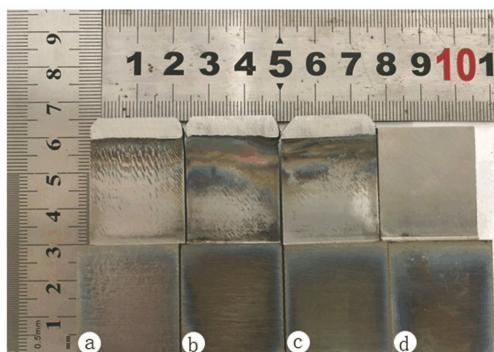


图 8 不同熔覆轨迹下薄壁件铣削加工后的宏观形貌

Fig. 8 Macromorphology of thin-walled parts under different cladding trajectories after milling

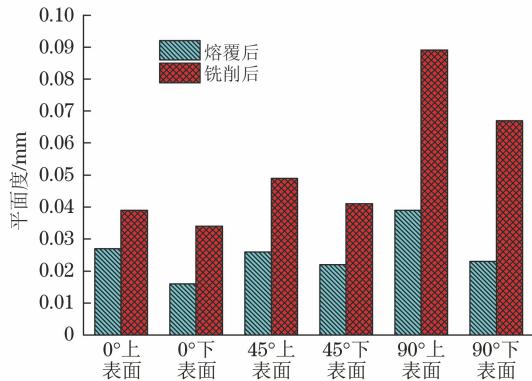


图 9 不同熔覆轨迹下薄壁件铣削前后的平面度

Fig. 9 Flatness of thin-walled parts under different cladding trajectories before and after milling

### 3 结 论

(1) 采用  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  熔覆轨迹进行激光熔覆后, TC4 合金薄壁件的平面度较熔覆前的均有所提高, 且熔覆轨迹角度越大, 基体薄壁件熔覆前后的平面度差值越大; 随着距熔覆层顶端距离的增加, 薄壁件硬度减小, TC4 合金激光熔覆层的硬度较 TC4 基体的提高约 20%。

(2) 铣削加工后, 激光熔覆薄壁件的平面度进一步增大;  $90^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $0^\circ$  熔覆轨迹薄壁件铣削加工后的平面度依次减小,  $0^\circ$  熔覆轨迹对损伤钛合金薄壁件的修复效果较好。

### 参考文献:

- [1] 崔常京, 杨璟, 陈群志, 等. 激光焊接对 TC4 钛合金静强度与疲劳性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2015, 39(1): 90-93.
- [2] PATNAIK A K, POONDLA N, MENZEMER C C, et al. Understanding the mechanical response of built-up welded beams made from commercially pure titanium and a titanium alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 590: 390-400.
- [3] NOVAKOV T. Computational analysis of micromachining Ti6Al4V titanium alloy [D]. West Lafayette: Purdue University, 2010.
- [4] 范永升, 黄渭清, 杨晓光, 等. 某型航空发动机涡轮叶片服役微观损伤研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(13): 122-128.
- [5] GULERYUZ H, CIMENOGLU H. Oxidation of Ti-6Al-4V alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 472(1/2): 241-246.
- [6] 孙红梅, 马海强. 某型发动机涡轮工作叶片阻尼叶冠激光熔覆修复工艺 [J]. 焊接技术, 2018, 47(11): 37-40.
- [7] DENKENA B, NESPOR D, BÖB V, et al. Residual stresses formation after re-contouring of welded Ti-6Al-4V parts by means of 5-axis ball nose end milling [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2014, 7(4): 347-360.
- [8] NESPOR D, DENKENA B, GROVE T, et al. Surface topography after re-contouring of welded Ti-6Al-4V parts by means of 5-axis ball nose end milling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(5/6/7/8): 1585-1602.
- [9] 韩玉勇, 鲁俊杰, 李剑峰, 等. 基于激光熔覆的车床主轴再制造 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 147-153.
- [10] 张富祯, 孙文磊, 王恪典, 等. 面向薄壁件的激光熔覆修复工艺参数优化研究 [J]. 表面技术, 2019, 48(1): 168-174.
- [11] 王涛, 李阳, 王宁, 等. 激光熔覆 TC4 钛合金加工轨迹对表面形貌的影响 [J]. 热加工工艺, 2019, 48(8): 138-141.
- [12] 罗钧, 王强, 付丽. 改进蜂群算法在平面度误差评定中的应用 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 422-430.
- [13] 王东霞. 特殊对象的测量数据误差处理与不确定度研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [14] 罗奎林, 郭双全, 何勇, 等. 激光熔覆修复航空发动机风扇机匣 TC4 钛合金静子叶片 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 141-146.
- [15] ZHAO Y H, SUN J, LI J F. Study on chip morphology and milling characteristics of laser cladding layer [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(5/6/7/8): 783-796.

欢 迎 来 稿

欢 迎 订 阅

欢 迎 刊 登 广 告