

7075 铝合金弱刚性薄壁特征结构的铣削试验研究

刘启蒙,许金凯,于化东,于占江,李一全

长春理工大学

摘要: 通过考察 7075 铝合金试件的加工变形、残余应力、表面质量及边缘毛刺等试验现象,对薄壁特征结构的铣削加工特性进行试验研究。试验结果表明:在刀具切入与切出处,工件边缘有毛刺与粘屑现象;在同一切削用量下,随着壁厚的减小,薄壁变形逐渐增大;随着切削速度的逐渐增大,各尺寸的薄壁试件变形程度逐渐减小,边缘的毛刺与粘屑状况有所改善,但不能完全根除;随着进给速度的逐渐增大,各尺寸的薄壁试件变形逐渐增大,边缘的毛刺与卷边越明显;随着切削深度逐渐增大,各尺寸的薄壁试件变形逐渐增大,边缘的毛刺越明显;切削用量三要素中的切削深度对薄壁试件变形影响最大。

关键词: 弱刚性零件;薄壁特征结构;残余应力

中图分类号: TG501.2;TH161.14;TH161.3

文献标志码: A

Experimental Study on Cutting Characteristics of 7075 Aluminum Alloy Part with Thin Wall

Liu Qimeng, Xu Jinkai, Yu Huadong, Yu Zhanjiang, Li Yiquan

Abstract: Through investigating the deformation, residual stress, surface quality and burrs of the 7075 aluminum alloy specimen, the experimental study on the milling characteristics of thin-walled parts with weak rigidity are carried out. The test results show that there exist burrs and chip adhesion at part edges when milling in and out. Under the same cutting condition, with the decrease of the wall thickness, the deformation increases. With the increase of the cutting speed, the deformation also are decreased, the burrs and chip adhesion are reduced, can't be completely eradicated. With the increase of the feed rate, the deformation increases, and the burrs and edge rolls become more obvious. With the increase of the cutting depth, the deformation is increased, the burrs become more obvious. Among the three cutting parameters, the deformation can be affected most by the cutting depth.

Keywords: weak rigid part; thin-walled structure; residual stress

1 引言

弱刚性零件广泛应用于航空航天、电子器件以及轻量化武器装备等产品中,薄壁特征结构是其最

常见的特征之一,有很多因素影响其尺寸的加工精度。随着人们对微小型弱刚性零件的功能多样化、结构复杂度要求越来越高,如何实现适用于多种材料的复杂结构小型化零件的高精度、低成本加工成为微制造技术的关键。

在微铣削过程中,弱刚性薄壁零件的加工变形

基金项目:国家自然科学基金(51275056)

收稿日期:2017年4月

- [6]王涛.高体积分数的 SiC_p/Al 复合材料高速铣削基础研究[D].北京:北京理工大学,2015.
- [7]黄树涛,王泽亮,焦可如,等.高速正交切削 SiC_p/Al 复合材料的切屑形成及边界损伤真研究[J].人工晶体学报.2014,43(10):2717-2725.
- [8]Zhou L, Huang S T, Wang D, et al. Finite element and experimental studies of the cutting process of SiC_p/Al composites with PCD tools[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 52(5):619-626.
- [9]Gao C, Zhang L. Effect of cutting conditions on the serrated chip formation in high-speed cutting [J]. Machining Science and Technology, 2013, 17(1):26-40.
- [10]Tao Wang, Lijing Xie, Xibin Wang. Simulation study on de-

fect formation mechanism of the machined surface in milling of high volume fraction SiC_p/Al composite[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(5):1185-1194.

第一作者:孙素杰,硕士研究生,太原理工大学机械工程学院,030024 太原市

First Author: Sun Sujie, Postgraduate, College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

通信作者:董志国,副教授,太原理工大学机械工程学院,030024 太原市

Corresponding Author: Dong Zhiguo, Associate Professor, College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

一般分为热变形和应力变形两种。对于加工 7075 铝合金弱刚性零件,由于其导热性好、散热快,如选择合理的切削用量,热变形会很小。因此,影响 7075 铝合金弱刚性零件变形的的主要因素是应力变形。董辉跃等^[1]对施加残余应力、构建切削力模型、施加动态载荷以及材料去除等切削技术进行了深入研究。南京航空航天大学实验室针对切削加工变形进行了有限元模拟技术研究,考虑加工弱刚性零件让刀后的实际铣削力变化,研究人员根据实际加工过程分析了不同弱刚性零件的尺寸以及切削用量对切削试件的变形影响,并建立了可应用于实际生产的工艺文件。黄建安^[2]对典型材料复杂薄壁结构件的高速加工工艺进行了技术研究,分析了弱刚性零件在切削加工过程中的变形。该研究假设典型材料始终处在弹性变形区间内,数值模拟时考虑了在切削力作用下对薄壁的弹性变形,但忽略了初始残余应力以及切削热对薄壁试件变形的影响。大连理工大学王少红^[3]对航空零件加工过程中的残余应力、框体零件的切削加工、建模理论与方法、装夹以及切削过程中的变形问题进行了深入的研究。南京理工大学的邓文等^[4]对航空天线阵面弱刚性零件的切削变形进行了详细探索,研究了刀具与工件之间相互作用的力、装夹方式、残余应力对弱刚性零件切削变量的作用规律。

在微铣削加工过程中,由于切削刀具以及切削参数的减小,切削时会面临因微观尺寸效应导致的与传统切削有所不同的切削现象。在微切削加工过程中,受切削用量、切削刀具径向跳动、机床刚性等多因素的复杂影响,使现有切削理论及经验不能直接用于微切削加工。为了获得合理的切削用量和高精度的加工结果,需要对弱刚性零件进行实验研究。为此,本文针对 7075 铝合金弱刚性零件进行微铣削加工,研究切削用量和表面残余应力对薄壁特征结构变形和表面质量的影响规律。

2 试验方案

试验设备及仪器如表 1 所示。

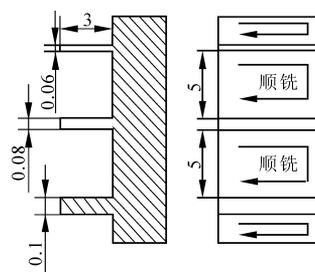
表 1 试验设备及仪器

序号	设备、仪器名称	使用功能
a	哈斯数控加工中心	铣削试件
b	超景深显微镜	测量薄壁变形量
c	电子显微镜	观察表面形貌
d	X 射线残余应力分析仪	检测薄壁表面残余应力

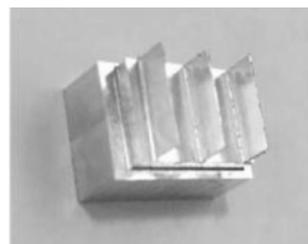
试验在 7075 合金试样上加工出厚度为 0.1mm、0.08mm、0.06mm 的薄壁,薄壁高度为 3mm,长为 8mm,结构尺寸及加工后的薄壁试件如图 1 所示。试验采用单因素试验法,试验安排见表 2。试验所用刀具为 $\phi 4$ 硬质合金 4 刃立铣刀。

表 2 单因素试验安排表

序号	加工要求	切削参数
1	要求薄壁厚 0.1mm、0.08mm、0.06mm, 长 8mm,高 3mm。	$v = 100, 115, 125 \text{ m/min}$
2		$F = 100, 150, 200 \text{ mm}^3/\text{min}$
3		$a_p = 25, 30, 35 \mu\text{m}$



(a) 结构尺寸



(b) 加工样件

图 1 薄壁特征结构几何尺寸及加工后样件

3 试验与结果分析

3.1 切削速度对铣削薄壁特征结构的影响

试验中,进给速度 $F = 100 \text{ mm}^3/\text{min}$ 、切削深度 $a_p = 25 \mu\text{m}$ 、切削速度 v 为变量。所测试验数据如表 3 和表 4 所示。

表 3 不同切削速度下的铝合金薄壁变形量

切削速度 v (m/min)	0.1mm 薄壁 变形量 Δ (μm)	0.08mm 薄壁 变形量 Δ (μm)	0.06mm 薄壁 变形量 Δ (μm)
100	31.14	38.78	61.65
115	28.51	32.71	48.20
125	21.99	23.05	43.43

表 4 不同切削速度下的铝合金薄壁表面残余应力

切削速度 v (m/min)	0.1mm 薄壁 残余应力 (MPa)	0.08mm 薄壁 残余应力 (MPa)	0.06mm 薄壁 残余应力 (MPa)
100	-133.6	-139.7	-145.1
115	-105.7	-106.2	-118.7
125	-95.5	-99.9	-103.5

切削速度 v 为变量的试验现象与试验结果分析如下:

(1)加工薄壁时,刀具切入与切出处,工件边缘有毛刺与粘屑现象(见图1)。

(2)随着切削速度 v 逐渐增大,3种厚度尺寸的薄壁变形程度逐渐减小(见图2),边缘的毛刺与粘屑有所改善,但并不能完全根除。其原因是随着主轴转速的增加,缩短了刀具与工件的接触时间,减小了铣削刀具与工件的摩擦,从而减小了铣削力和降低了切削热,使薄壁试件的变形减小。

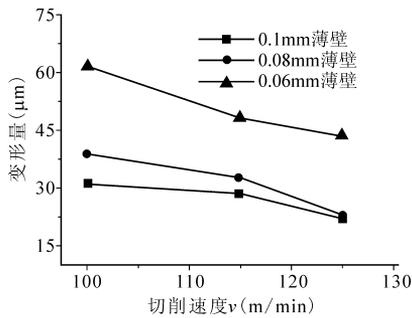


图2 切削速度与薄壁变形量的关系

(3)随着切削速度 v 逐渐增大,3种厚度尺寸的薄壁表面残余应力逐渐减小,如图3所示,在铣削过程中,随着切削速度的增大,铣削力减小,薄壁表面残余应力也就减小。对比图2可以发现,压应力越大,薄壁试件变形量越大。因此,残余应力的大小对薄壁试件的变形具有一定的影响。

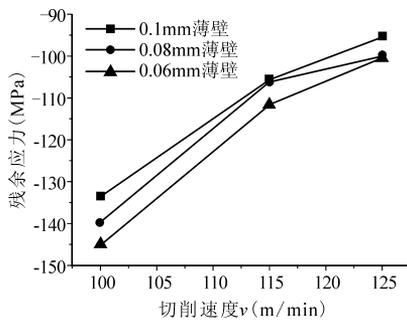


图3 切削速度与薄壁残余应力的关系

(4)对于同一切削用量,随着铣削壁厚减小,薄壁试件的变形逐渐增大(见图2)。当 $v = 100\text{m/min}$ 时,0.06mm厚的薄壁变形严重。虽然薄壁试件的变形量随着切削速度 v 的增大而越小,但变形量依然很大。

(5)随着切削速度 v 的增大,薄壁表面铣削层的刀痕越来越平缓,薄壁表面没有缺损,如图4所示。其原因可能是:在较高转速时,排屑顺利,没有切屑堆积现象;而在较低转速时,排屑不畅导致切屑粘结在铝合金薄壁分层表面处。

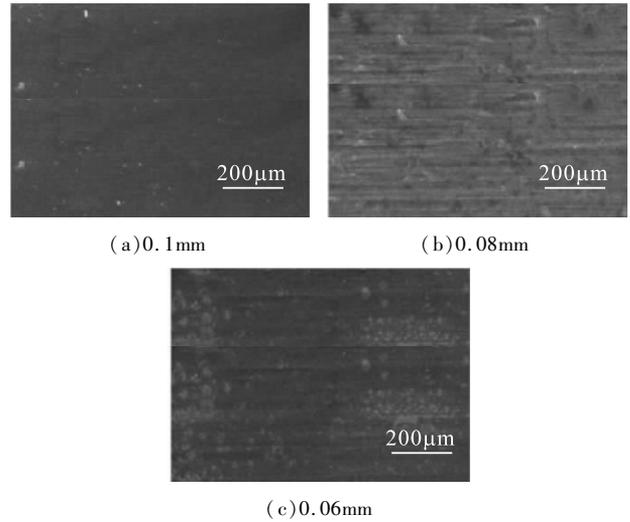


图4 $v = 125\text{m/min}$ 时的薄壁表面形貌

3.2 进给速度对铣削薄壁特征结构的影响

试验取切削速度 $v = 125\text{m/min}$ 、切削深度 $a_p = 25\mu\text{m}$ 保持不变,进给速度 F 为变量。所测试验数据如表5和表6所示。

表5 不同进给速度下的铝合金薄壁变形量

进给速度 F (mm/min)	0.1mm 薄壁 变形量 Δ (μm)	0.08mm 薄壁 变形量 Δ (μm)	0.06mm 薄壁 变形量 Δ (μm)
100	29.74	33.65	47.21
150	35.54	37.67	49.63
200	40.74	43.33	51.31

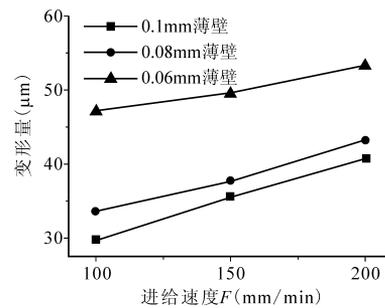


图5 进给速度与薄壁变形量的关系

表6 不同进给速度下的铝合金薄壁表面残余应力

进给速度 F (mm/min)	0.1mm 薄壁 残余应力 (MPa)	0.08mm 薄壁 残余应力 (MPa)	0.06mm 薄壁 残余应力 (MPa)
100	-102.1	-110.9	-143.5
150	-119.6	-136.2	-158.7
200	-133.6	-142.7	-185.1

进给速度 F 为变量的试验现象与结果分析如下:

(1)刀具切入与切出处,工件边缘毛刺与粘屑依然存在,与切削速度 v 为变量的情形大致相同。

(2)随着进给速度 F 逐渐增大,3种厚度尺寸的薄壁变形程度逐渐减小,如图5所示。虽然增大进给速度 F 会使刀具与工件的接触时间减小,但是产

生的切屑会增加,增大了铣削刀具与工件的摩擦,从而使铣削力增大和切削热增多,使薄壁试件的变形增大;

(3)随着进给速度 F 逐渐增大,3种厚度尺寸的薄壁表面残余应力逐渐增大,如图6所示。其原因是在铣削过程中,随着进给速度 F 增大,铣削力增大和切削热增多,薄壁表面残余应力提高。与图5对比发现,压应力越大,薄壁试件变形量越大。因此,残余应力的大小对薄壁试件的变形具有一定的影响规律。

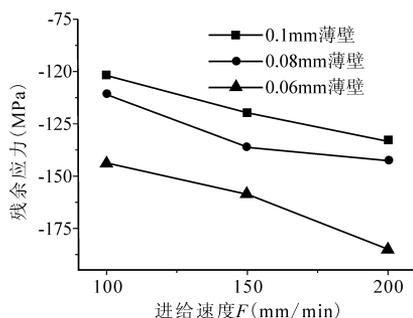


图6 进给速度与薄壁残余应力的关系

(4)对于同一切削用量,随着铣削的壁厚减小,薄壁试件变形逐渐增大(见图5)。当 $F = 200\text{m}/\text{min}$ 时,0.06mm厚的薄壁变形严重。随着进给速度 F 减小,铣削的薄壁试件虽然变形量减小,但是没有明显改善。如表5所示,0.06mm厚的薄壁变形幅度最大差值只有 $4\mu\text{m}$ 。

(5)随着进给速度 F 增大,薄壁表面铣削层刀痕越来越平缓,薄壁边缘无破损。其原因可能是较大的进给速度会使排屑顺利,减小了切屑与薄壁的摩擦,得到了较完好的表面质量,如图7所示。

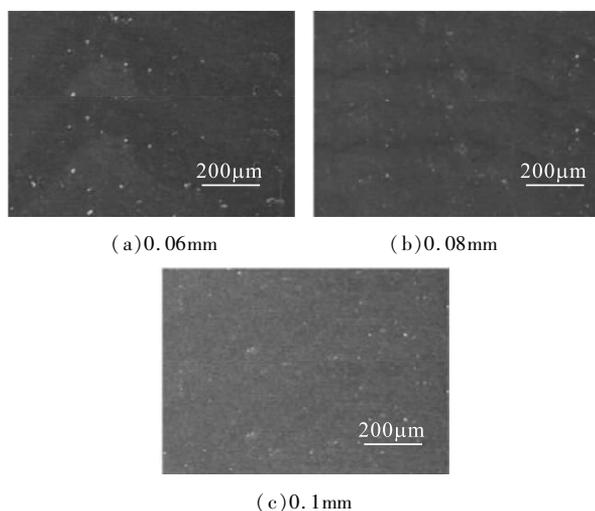


图7 不同进给速度下薄壁边缘及表面形貌

3.3 切削深度对铣削薄壁特征结构的影响

试验中切削速度 $v = 125\text{m}/\text{min}$ 、进给速度 $F =$

$100\text{m}/\text{min}$ 保持不变,切削深度 a_p 为变量。所测试验数据如表7和表8所示。

表7 不同切削深度下的铝合金薄壁变形量

切削深度 a_p (μm)	0.1mm薄壁变形量 Δ (μm)	0.08mm薄壁变形量 Δ (μm)	0.06mm薄壁变形量 Δ (μm)
25	29.74	33.65	49.65
30	38.97	39.84	52.33
35	48.44	49.33	60.31

表8 不同切削深度下的铝合金薄壁残余应力

切削深度 a_p (μm)	0.1mm薄壁残余应力 (MPa)	0.08mm薄壁残余应力 (MPa)	0.06mm薄壁残余应力 (MPa)
25	-98.1	-125.9	-143.9
30	-109.7	-130.1	-187.7
35	-126.0	-142.7	-199.3

切削深度 a_p 为变量的试验现象与试验结果分析如下:

(1)在刀具切入与切出时,工件边缘毛刺与粘屑依然存在,与切削速度 v 、进给速度 F 为变量的情形大致相同。

(2)随着切削深度 a_p 的逐渐增大,3种厚度尺寸的薄壁变形程度逐渐增大(见图8)。其原因是随着切削深度的变大,增大了刀具与工件的接触面积,材料去除率变大,产生的切屑也会增加。这不仅增大了刀具与工件的摩擦,还使铣削力变大及切削热增多,从而导致薄壁试件的变形增大。

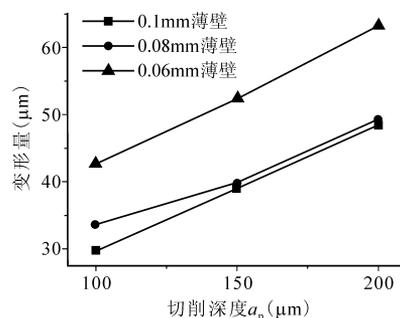


图8 切削深度 a_p 与薄壁变形量的关系

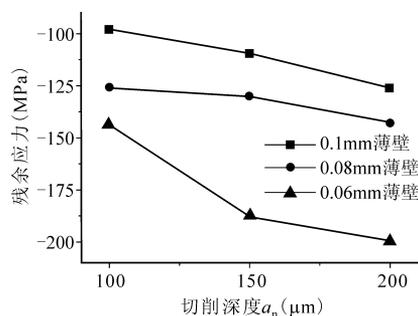


图9 切削深度 a_p 与薄壁表面残余应力的关系

(3)随着切削深度 a_p 的逐渐增大,3种厚度尺寸的薄壁表面残余应力逐渐增大(见图9)。其原因

是在铣削过程中,随着切削深度 a_p 的增大,铣削力变大及切削热增多,薄壁表面残余应力也会增大。与图8对比发现,压应力越大,薄壁试件变形量越大。因此,残余应力的大小对薄壁试件的变形具有一定的影响规律。

(4)对于同一切削用量,随着铣削的壁厚减小,薄壁试件变形逐渐增大,如图8所示。当 $a_p = 35\mu\text{m}$ 时,0.06mm厚的薄壁变形极其严重,在薄壁边缘有明显缺损。其原因是切削深度增大导致铣削力变大,切屑堆积并产生积屑瘤,使薄壁变形极其严重,出现过切导致薄壁残损(见图10)。

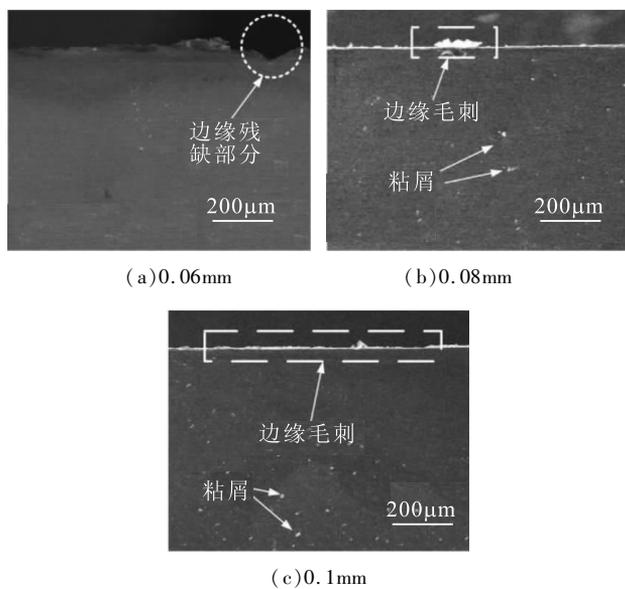


图10 $a_p = 35\mu\text{m}$ 下三种尺寸的薄壁形貌

4 结语

通过对7075铝合金薄壁结构开展铣削试验研究,考察加工过程中薄壁试件变形、残余应力、表面质量及边缘毛刺等相关试验现象,得出以下结论:

(1)加工薄壁时,刀具切入与切出处,工件边缘有毛刺的粘屑现象。

(2)随着切削速度的逐渐增大,对于不同薄壁厚度的薄壁件,其变形程度逐渐减小,边缘的毛刺与粘屑有所改善,但并不能完全根除。对于同一切削用量,随着壁厚的减小,薄壁变形逐渐增大。

(3)随着进给速度的逐渐增大,对于不同薄壁厚度的薄壁件,边缘的毛刺与卷边越明显。对于同一切削用量,随着壁厚的减小,薄壁变形逐渐增大。

(4)随着切削深度的逐渐增大,对于不同薄壁厚度的薄壁件,其变形逐渐增大,边缘的毛刺越明显。对于同一切削用量,随着壁厚的减小,薄壁变形逐渐增大。当 $v = 125\text{m}/\text{min}$ 、 $F = 100\text{mm}/\text{min}$ 、 $a_p =$

$35\mu\text{m}$ 时,0.06mm厚的薄壁变形严重且边缘残缺;当切削深度 $a_p = 25\mu\text{m}$ 时,薄壁变形有所改善,边缘无残缺部分,但变形程度仍然很大。

(5)切削参数中的切削深度对薄壁试件变形影响最大。

参考文献

- [1]董辉跃,柯映林. 铣削加工中薄壁件装夹方案优选的有限元模拟[J]. 浙江大学学报,2004,38(1):17-21.
 - [2]黄建安. 铝合金复杂薄壁构件高速加工工艺技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2008.
 - [3]王少红. 航空薄壁零件的铣削加工变形控制研究[D]. 大连:大连理工大学,2008.
 - [4]邓文,袁军堂. 铝合金复杂薄壁构件高速加工工艺研究[D]. 南京:南京理工大学,2009.
 - [5]钟小宏. 金属切削加工有限元仿真及薄壁件变形预测研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2012.
 - [6]G F Gao, B Zhao, F Jiao, et al. Research on the influence of the cutting conditions on the surface microstructure of ultra-thin wall parts in ultrasonic vibration cutting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1):66-70.
 - [7]S Ratchev, S Liu, W Huang, et al. Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts[J]. International Journal of Machine Tool & Manufacture, 2004, 44(15):1629-1641.
 - [8]Joseph R Davis. Machining of magnesium and magnesium alloys[J]. Machining ASM International, 1989:820-830.
 - [9]Recht R F. A dynamic analysis of high-speed machining[J]. Journal of Engineering for Industry, 1985, 107(4):309-315.
 - [10]Hschulz, M Kaufeld. High-speed milling of thin-walled components of aluminum and magnesium alloys[J]. European Production Engineering, 1988:4-48.
- 第一作者:刘启蒙,硕士研究生,精密制造及检测技术国家地方联合工程实验室,长春理工大学,130000 长春市
First Author: Liu Qimeng, Postgraduate, National Joint Engineering Laboratory of Precision Manufacturing and Testing Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China
- 通信作者:于化东,教授,精密制造及检测技术国家地方联合工程实验室,长春理工大学,130000 长春市
Corresponding Author: Yu Huadong, Professor, National Joint Engineering Laboratory of Precision Manufacturing and Testing Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China