

切削参数对 Ti-6Al-4V 锻件与粉末冶金工件表面粗糙度的影响对比

孙富建¹ 屈盛官² 邓朝晖¹ 李小强²

(1 湖南科技大学智能制造研究院,湘潭 411201)

(2 华南理工大学机械与汽车工程学院,广州 510641)

文 摘 表征了已加工 Ti-6Al-4V 锻件和粉末冶金工件表面形貌,利用正交回归试验得到了两种材料表面粗糙度值的数学模型,经过显著性检验两个数学模型能够准确地预测表面粗糙度值变化趋势。结果表明,Ti-6Al-4V 锻件表面出现了进给划痕、切屑碎片和表面撕裂缺陷,粉末冶金材料表面出现了除了进给划痕、切屑碎片和撕裂外的微孔隙缺陷;两种工件表面粗糙度值均受到进给量的影响程度最大,同时粉末冶金材料内部残余微孔隙的存在导致切削速度对其表面粗糙度值的影响程度比较大。

关键词 Ti-6Al-4V,锻件,粉末冶金材料,表面形貌,表面粗糙度

中图分类号: TG506.9

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2017.06.010

Comparative on Influence of Cutting Parameters on Surface Roughness of Ti-6Al-4V Forging and Powder Metallurgy Workpieces

SUN Fujian¹ QU Shengguan² DENG Zhaohui¹ LI Xiaoqiang²

(1 Intelligent Manufacturing Institute of HNUST, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

(2 School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641)

Abstract In this paper, surface morphologies of Ti-6Al-4V forging and powder metallurgy workpieces were characterized, surface roughness mathematical models of the two machined workpieces were developed using orthogonal regression test, and the significances of the mathematical models were verified, the surface roughness mathematical models could predict the surface roughness changing trends. The experimental results showed that feed scratch, chip fragment and surface tearing defects appeared in the machined Ti-6Al-4V forging surface, while micro-void defect was formed in the machined powder metallurgy material surface apart from the feed scratch, chip fragment and surface tearing defects. The influence of feed rate on the surface roughness of both workpieces is greatest, and the existence of internal micro-void of Ti-6Al-4V powder metallurgy material led influence of cutting speed greater.

Key words Ti-6Al-4V, Forging, Powder metallurgy material, Surface morphology, Surface roughness

0 引言

钛合金零件的难加工降低了其生产效率,粉末冶金工艺能够减少、甚至无需机械切削加工^[1],因此其应用能够明显提高钛合金零件的生产效率,降低生产成本。粉末冶金工艺的技术特点导致粉末冶金材料具有不同于常规工艺方法制备材料的属性,如不能达到完全致密化,内部存在残余微孔隙;以 Ti-6Al-4V 合金为例,显微结构常为粗大的 α 相和少量的 β 相

组成^[2]。然而粉末冶金技术难以制备较大工件,目前对于粉末冶金材料切削加工性能的研究鲜见。

工件表面粗糙度作为材料切削加工性能的重要指标之一,受到切削参数的影响,对工件表面粗糙度的研究能够全面地了解材料的切削加工性能^[3],同时工件表面粗糙度的研究对提高钛合金工件的服役寿命起到重要的作用^[4]。本文对比分析 Ti-6Al-4V 锻件的表面形貌和表面粗糙度,深入研究 Ti-6Al-4V

收稿日期:2017-03-02;修回日期:2017-06-23

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目(17C0639)

第一作者简介:孙富建,1986年出生于,博士,研究方向:精密制造技术与计算机应用。E-mail: lancesfj@126.com

合金粉末冶金材料的表面形貌和表面粗糙度,为 Ti-6Al-4V 粉末冶金材料的实际加工生产应用提供理论和技术指导。

1 试验

1.1 材料与仪器设备

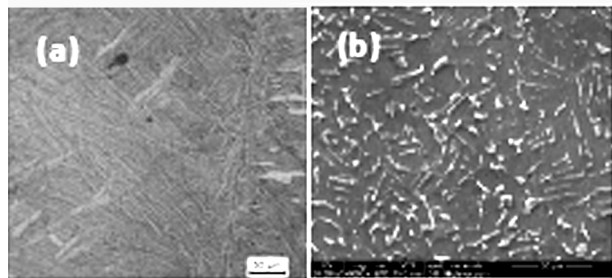
利用热等静压工艺制备 $\Phi 40\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ Ti-6Al-4V 粉末冶金材料 (PMM) 棒材。Ti-6Al-4V 锻件 (FM) 与 PMM 的力学性能见表 1,其微观组织结构见图 1。FM 的微观结构为网篮组织,热等静压工艺过程中较高的温压导致预合金粉末中的马氏体相全部转化为较为粗大的 α 相和少量的晶间 β 相,并且由于热等静压材料不能达到完全致密化,因此材料内部存在一定含量的残余微孔隙。

CKA6150i 数控车床,大连机床厂制造;Nova Nanosem 扫描电子显微镜和手持式 TR200 粗糙度测量仪,均为荷兰生产。

表 1 Ti-6Al-4V FM 和 PMM 的力学性能

Tab.1 Mechanical properties of Ti-6Al-4V FM and PMM

材料	拉伸强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度(HV)
FM	902	853	7.52	347.4
PMM	930	845	19	337.1



(a) Ti-6Al-4V FM (b) PMM

图 1 Ti-6Al-4V FM 和 PMM 的显微组织结构

Fig.1 Microstructure of Ti-6Al-4V FM and PMM

1.2 试样制备

Ti-6Al-4V 预合金粉末作为原材料,选用同时升温升压的热等静压参数 $930\text{ }^\circ\text{C}/120\text{ MPa}/3\text{ h}$ 来制备 $\Phi 40\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的 PMM 棒材。超细颗粒硬质合金粉末作为制备刀具基体的原材料,选用化学气相沉积

法制备刀具表面的涂层材料 (AlTi)N,刀杆为 MCL-NR2020K12,切削过程中刀具的几何角度为前角 -6° 、后角 5° 、主偏角 95° 和副偏角 5° 。

1.3 试验方法

采用无润滑、无冷却切削 FM 和 PMM 工件,建立表面粗糙度经验公式,采用三因素三水平 $L_9(3^4)$ 的正交试验(表 2)。

表 2 正交试验因素水平表

Tab.2 Orthogonal test factor level table

水平	切削速度/ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	进给量/ $\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$	切削深度/mm
1	30	0.05	0.5
2	50	0.10	1.0
3	70	0.15	1.5

1.4 表面测试与表征

在切削速度 60 m/min 、进给量 0.10 mm/r 和切削深度 1.0 mm 参数下切削两种材料,利用电火花切割已加工工件制备 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的已加工工件表面形貌试样,扫描电子显微镜被用来表征已加工工件的表面形貌,手持式 TR200 粗糙度测量仪测量已加工工件的表面粗糙度。

2 结果与讨论

2.1 工件表面形貌

FM 工件的表面形貌如图 2 所示。在其材料切削过程中,工件表面可能出现进给划痕、切屑碎片和撕裂缺陷。进给划痕是切削本身的原理导致因而无法避免,并且随着进给量的增加进给划痕会变得更加明显^[5]。钛合金较低的热导率导致切削过程形成较高的切削温度,高切削温度引起材料的化学活性提高,当形成的切屑从刀具前刀面流过时工件材料粘结在刀具上。在切削过程中已加工工件表面与刀具刀尖、副切削刃产生一定的相互作用,引起刀具上的工件材料被撕裂,在已加工工件表面形成如图 2(b)所示的切屑碎片缺陷。另外,当已加工工件表面与刀具刀尖、副切削刃相互作用时,刀具也可能撕裂已加工工件表面,从而在已加工工件表面形成如图 2(c)所示的撕裂缺陷。

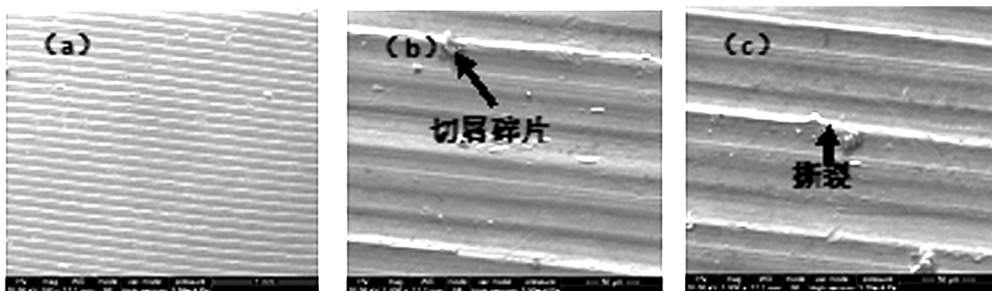


图 2 已加工 Ti-6Al-4V FM 的表面形貌

Fig.2 Surface morphology of machined Ti-6Al-4V FM

由于 PMM 的不完全致密化导致其内部存在一定含量的残余微孔隙。已加工 Ti-6Al-4V PMM 工件表面形貌如图 3 所示。在 PMM 切削时,在已加工

工件表面不仅会出现进给划痕、切屑碎片和撕裂缺陷,而且还会由于微孔隙的存在而引起的微孔隙缺陷。

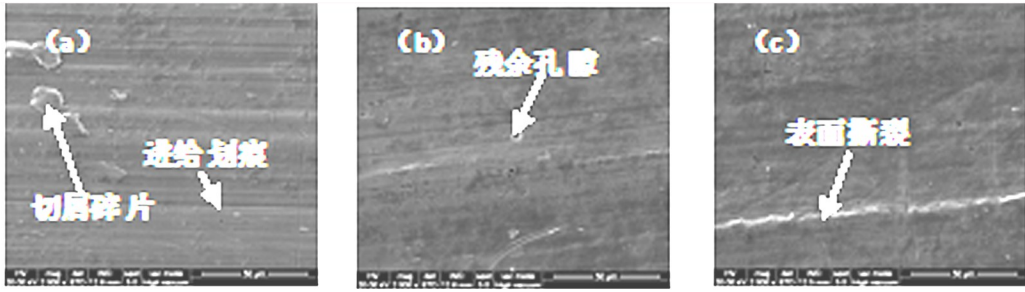


图 3 已加工粉末冶金工件的表面缺陷

Fig.3 Surface defects of machined PMM workpiece

2.2 工件表面粗糙度的数学模型

根据工件表面粗糙度与切削速度、进给量和切削深度间的关系,工件表面粗糙度可用下式表示^[6]:

$$Ra = C v^p f^q a_p^m \quad (1)$$

式中, C 为修正系数, p, q, m 为常数。

为了把式(1)线性化,对其左右两边求对数,可以得到方程:

$$\ln Ra = \ln C + p \ln v + q \ln f + m \ln a_p \quad (2)$$

令 $y = \ln Ra$, $\beta_0 = \ln C$, $\beta_1 = p$, $\beta_2 = q$, $\beta_3 = m$, $x_1 = \ln v$, $x_2 = \ln f$, $x_3 = \ln a_p$, 得到线性方程:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \quad (3)$$

2.2.1 FM 工件表面粗糙度数学模型建立

FM 工件表面粗糙度正交试验结果见表 3。

表 3 FM 表面粗糙度的正交试验结果

Tab.3 FM surface roughness of orthogonal test results

切削速度/ $m \cdot \min^{-1}$	进给量/ $mm \cdot r^{-1}$	切削深度/mm	粗糙度/ μm
30	0.05	1.0	0.7768
30	0.10	1.5	1.1376
30	0.15	0.5	1.9602
50	0.05	1.5	0.6404
50	0.10	0.5	1.8490
50	0.15	1.0	1.8952
70	0.05	0.5	0.8495
70	0.10	1.5	1.0080
70	0.15	1.0	1.9428

利用 MATLAB 软件编程计算,求出模型中相关参数,建立 FM 工件表面粗糙度的数学模型:

$$Ra = 2.5495 v^{-0.0008} f^{0.8235} a_p^{-0.3187} \quad (4)$$

由 FM 工件表面粗糙度的数学模型可知,进给量的增加引起切削力和切削温度的增加量较大,从而导致进给量的增加对 FM 表面粗糙度的影响作用最大^[7];FM 表面粗糙度值随着切削速度和切削深度的

增加而均出现减小趋势。

为了验证 FM 表面粗糙度的数学模型是否能够准确地预测表面粗糙度值的变化情况,需要对数学模型进行显著性检验。回归模型的 $F=37.0934$, 相关系数 $R=0.9783$, 残余方差 $\sigma^2=0.0026$, 因此 FM 表面粗糙度回归模型的精度较高。

2.2.2 PMM 工件表面粗糙度数学模型建立

PMM 工件表面粗糙度的回归试验结果见表 4。利用 MATLAB 软件编程计算,得到其表面粗糙度的数学模型:

$$Ra = 3.9813 v^{-0.2801} f^{0.9536} a_p^{-0.1379} \quad (5)$$

表 4 PMM 工件表面粗糙度的正交试验结果

Tab.4 Orthogonal test results of surface roughness of PMM workpiece

切削速度/ $m \cdot \min^{-1}$	进给量/ $mm \cdot r^{-1}$	切削深度/mm	粗糙度/ μm
30	0.05	1.0	0.6393
30	0.10	1.5	0.9878
30	0.15	0.5	1.2620
50	0.05	1.5	0.5290
50	0.10	0.5	0.8083
50	0.15	1.0	1.3283
70	0.05	0.5	0.3454
70	0.10	1.5	0.6390
70	0.15	1.0	1.7074

从式(5)可以得到,表面粗糙度值随着进给量的增加而增加,随着切削速度和切削深度的增加而降低。其中由于进给量的增加使得切削力和切削温度的增加幅度最大,使得刀具的磨损量较高,从而引起表面粗糙度值受到进给量的影响作用最大。对于 PMM 而言,内部存在的残余微孔隙使形成的切屑背面出现一定量的微孔隙,在切屑与刀具前刀面的相互作用下,使得切屑背面的微孔隙撕裂刀具前刀面上黏

结的工件材料,降低了刀具前刀面积屑瘤的高度,从而会引起切屑与刀具前刀面间的摩擦作用增强,提高了切削过程中的切削温度,提高了工件材料的高温软化率,从而引起切削速度对工件表面粗糙度的影响作用增加。

对 FMM 工件表面粗糙度的显著性检验如下:回归模型的 $F=10.2507$,相关系数 $R=0.9274$,残余方差 $\sigma^2=0.0108$,PMM 工件表面粗糙度值可以用式(5)进行预测。

3 结论

(1)FM 工件表面出现了进给划痕、切屑碎片和表面撕裂缺陷,PMM 内部残余微孔隙的存在导致已加工工件表面出现了除进给划痕、切屑碎片和表面撕裂之外的微孔隙缺陷。

(2)利用正交回归试验建立了 FM 和 PMM 已加工工件表面粗糙度的经验公式,并对其数学模型进行了显著性检验。两种材料已加工工件表面粗糙度值的数学模型显著性高,回归拟合程度高,回归误差较小,均可以准确地预测以加工工件表面粗糙度值的变化趋势。

(3)FM 和 PMM 工件表面粗糙度值均随着切削速度和切削深度的增加而增加,随着进给量的增加而降低。对比切削速度对 FM 表面粗糙度值的影响,PMM 工件表面粗糙度值受到切削速度的影响程度较小。

参考文献

- [1] ROBERT-PERRON E, BLARIS C, THOMAS Y, et al. An integrated approach to the characterization of powder metallurgy components performance during green machining[J]. Materials Science and Engineering, 2005, 402(1/2): 324-334.
- [2] XU L, GUO R P, BAI C G, et al. Effect of hot isostatic pressing conditions and cooling rate on microstructure and properties of Ti-6Al-4V alloy from atomized powder[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2014, 30(12): 1289-1295.
- [3] SUN J, GUO YB. A comprehensive experimental study on surface integrity by end milling Ti-6Al-4V[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(8): 4036-4042.
- [4] RAMESH S, KARUNAMOORTHY L, PALANIKUMAR K. Measurement and analysis of surface roughness in turning of aerospace titanium alloy (gr5) [J]. Measurement, 2012, 45(5): 1266-1276.
- [5] GINTING A, NOUARI M. Surface integrity of dry machined titanium alloy[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49(3/4): 325-332.
- [6] DABNUM M A, HASHMI M S, EI-BARADIE M A. Surface roughness prediction model by design of experiments for turning machinable glass-ceramic (Macor) [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164-165(15): 1289-1293.
- [7] DA SILVA R B, VIEIRA J M, CARDOSO R N, et al. Tool wear analysis in milling of medium carbon steel with coated cemented carbide inserts using different machining lubrication/cooling systems[J]. Wear, 2011, 271(9/10): 2459-2465.