

基于加工表面完整性的TB6精铣参数优选*

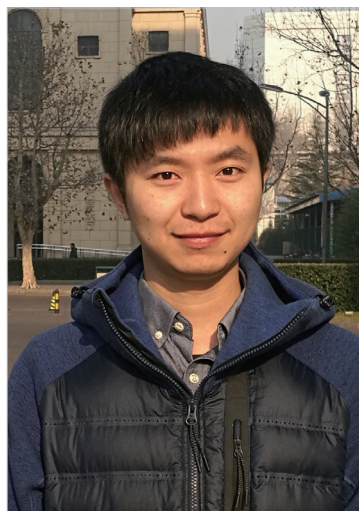
官椿明, 李 勋, 罗 扬, 牛永松

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

[摘要] TB6 高强度钛合金因其优良的比强度和热变形性能被广泛应用于航空领域, 是制造直升机旋翼系统主承力结构件和起落架的主要材料。为了使零件获得较佳的疲劳性能, 基于加工后的表面完整性指标对其精铣加工参数进行了优选。试验结果表明, 每齿进给量 f_z 对加工后的表面粗糙度 R_a 和表面残余压应力 σ_H 有较大影响, 随着每齿进给量 f_z 的不断增大, 表面粗糙度 R_a 近似线性增大, 表面残余压应力的幅值也随之增大; 线速度 v_c 主要影响加工表面显微硬化率, 显微硬化率随线速度的增大而降低; 径向切宽 a_e 对加工表面残余应力也有较大的影响, 随着 a_e 的增大, 加工表面残余压应力的幅值逐渐降低。因此, 从提高零件疲劳寿命的方面考虑, 在满足例如零件表面质量要求和生产效率等各项生产要求的前提下, 应尽可能降低铣削线速度, 减小径向切宽, 提高每齿进给量, 适当选择轴向切深。

关键词: 表面完整性; TB6 钛合金; 铣削; 参数优化; 疲劳寿命

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.1/2.055



官椿明

硕士研究生, 主要研究方向为难加工材料切削/磨削技术及其表面完整性。

TB6 高强度钛合金是制造直升机旋翼系统关键零部件的主要材料。利用 TB6 钛合金代替相同结构强度的 20CrMnSiA 和 TC4 材料可以使结构件重量分别降低 40% 和 20%^[1]。因此, TB6 钛合金广泛应用于航空承力结构件的制造。航空承力结构零件的失效形式 80% 以上是疲劳断裂, 而零件最终的表面完整性对其疲劳性能有很显著的影响^[2-3]。表面完整性包括表面粗糙度、表面加工硬化和表面残余应力、表面加工变质层等关键指标。美国学者的研究证明, 特定的条件下, 不同的表面完整性可以使零件的疲劳寿命相差 6 倍以上^[4]。

国内外研究者对加工工艺及参数对于表面完整性和疲劳寿命的影响都进行了较多的研究^[5-9]。研究成果充分说明, 除材料和试件的结构外, 精加工工艺及参数对零件的表面

完整性和疲劳寿命具有重要的影响。

针对 TB6 高强度钛合金而言, 铣削加工是一种在生产中应用较多的加工方法, 而精铣参数及工艺条件则是影响零件最终表面完整性指标的重要因素。周子同和李传奇等^[10-12]针对铣削加工参数对加工表面完整性指标的影响规律和机理进行了研究。Yao 等^[11,13]针对 TB6 铣削加工后的表面形貌及其对试件疲劳寿命的影响机理进行了研究, 认为表面粗糙度是影响试件疲劳寿命的主要因素, 而且利用基于表面等效应力集中系数的预测模型能够更准确地预测试件的疲劳寿命。以上研究成果说明, TB6 精铣参数对零件最终的表面完整性指标和疲劳寿命有直接影响, 而精铣加工参数的优选除了要满足零件的表面质量要求外, 还要保证零件的其他表面完整性指标, 如加工表

* 基金项目: 航空科学基金(2016E51039)。

面显微硬化率和表面残余应力等。

本文在深入研究 TB6 钛合金侧铣精加工参数对加工表面完整性指标影响规律的基础上,结合表面完整性指标对疲劳寿命的影响机理,在试验参数范围内,优选出一组适合 TB6 侧铣精加工的铣削参数,指导直升机 TB6 旋翼系统关键零件的实际生产。

试验材料及条件

试验材料为 TB6 钛合金,又称为 Ti1023,是一种典型的近 β 型钛合金,其化学成分和力学性能如表 1 和表 2 所示。

表1 TB6钛合金化学成分(质量分数) %

Al	V	Fe	Ti
2.6~3.4	9.0~11.0	1.6~2.2	余量

表2 TB6钛合金力学性能

抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ /%	收缩率 Ψ /%
1005	1035	6	64

试件的铣削加工在三轴立式加工中心上进行,其加工方式如图 1 所示。使用水基切削液进行润滑冷却;刀具为 WIDIA 整体硬质合金涂层铣刀,型号为 WIDIA-SC-FIN-5FL,刀具直径 $D=20\text{mm}$,刃数 $n_z=5$ 。

加工表面粗糙度采用 Taylor Hobson 轮廓仪进行检测,在铣削加

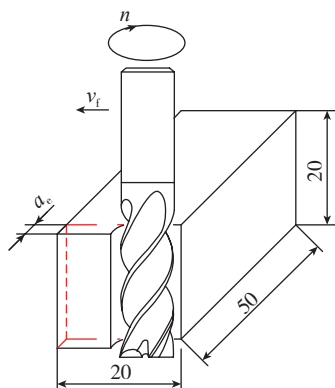


图1 侧铣加工示意图 (mm)

Fig.1 Diagram of side milling process (mm)

工表面上,沿进给方向上均匀测量 6 个点,取 6 个点的测量平均值为该铣削参数下的表面粗糙度值。

利用 PROTO 公司的 X 射线衍射仪,沿铣削进给方向对其加工表面残余应力进行检测。使用 HV-1000 维氏显微硬度计均匀检测加工表面上 10 个点的显微硬度,取其平均值作为该铣削参数下的显微硬度,并与材料基体硬度(HV372MPa)对比,得到加工表面的显微硬化率。

试验结果相关性分析

通过正交试验研究铣削参数对加工表面完整性的影响规律。正交试验参数及其加工后的表面完整性指标检测结果如表 3 所示,其中,线

速度 $v_c=n\pi D$, n 为主轴转速, D 为刀具直径。

在所有的侧铣试验中,轴向切深均为 $a_p=20\text{mm}$ 。使用 SPSS 统计分析软件,计算正交试验参数与试验结果之间的相关性系数,得到相关性系数矩阵如表 4 所示。

TB6 钛合金侧铣加工时,当铣削参数在 $v_c=20\sim 30\text{m/min}$, $f_z=0.05\sim 0.15\text{mm/z}$, $a_e=0.1\sim 0.5\text{mm}$ 范围内,加工后的表面粗糙度基本在 $R_a 0.2\sim 1.2\mu\text{m}$ 范围内,表面残余应力均为压应力,幅值在 $70\sim 170\text{MPa}$ 之间,加工表面的显微硬化率大约为 $5\%\sim 15\%$ 。结合铣削参数对表面完整性各指标的相关性系数,绘制柱状图,如图 2~4 所示。

表3 铣削正交试验参数及试验结果

序号	正交铣削参数			残余应力 σ_H /MPa	表面粗糙度 R_a / μm	显微硬化率 N /%
	线速度 v_c / ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	每齿进给量 f_z / ($\text{mm}\cdot\text{z}^{-1}$)	径向切宽 a_e /mm			
1	20	0.05	0.1	-83.2	0.2473	10.31
2	20	0.10	0.3	-122.6	0.7045	8.32
3	20	0.15	0.5	-127.8	1.2103	14.33
4	30	0.05	0.3	-166.4	0.3306	14.14
5	30	0.10	0.5	-89.9	0.8261	5.75
6	30	0.15	0.1	-156.0	1.1065	10.45
7	40	0.05	0.5	-75.7	0.3134	10.12
8	40	0.10	0.1	-148.3	0.6544	9.31
9	40	0.15	0.3	-146.9	1.1644	11.17

表4 相关性系数矩阵

相关性系数	线速度 v_c / ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	每齿进给量 f_z / ($\text{mm}\cdot\text{z}^{-1}$)	径向切宽 a_e /mm	残余应力 σ_H /MPa	表面粗糙度 R_a / μm	显微硬化率 N /%
线速度 v_c / ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	1.000	—	—	0.160	-0.011	-0.127
每齿进给量 f_z / ($\text{mm}\cdot\text{z}^{-1}$)	—	1.000	—	0.451	0.989	0.074
径向切宽 a_e /mm	—	—	1.000	-0.402	0.130	0.007
残余应力 σ_H /MPa	0.160	0.451	-0.402	1.000	—	—
表面粗糙度 R_a / μm	-0.011	0.989	0.130	—	1.000	—
显微硬化率 N /%	-0.127	0.074	0.007	—	—	1.000

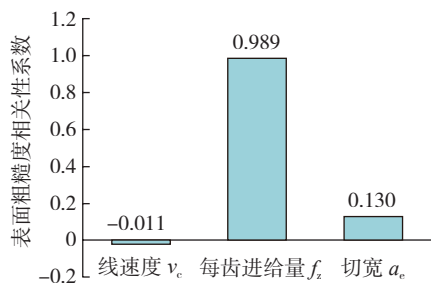


图2 铣削参数与表面粗糙度相关性系数
Fig.2 Correlation coefficient of milling parameters and R_a

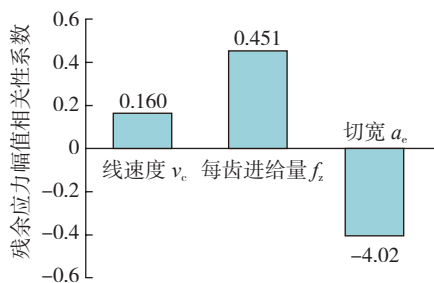


图3 铣削参数与表面残余应力相关性系数
Fig.3 Correlation coefficient of milling parameters and σ_H

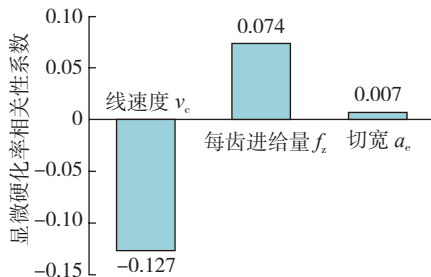


图4 铣削参数与显微硬化率相关性系数
Fig.4 Correlation coefficient of milling parameters and micro hardening rates

从图中可以看出铣削参数和表面完整性指标的相关性系数的大小,通过对比分析,可以得到如下结论:

(1) 铣削表面粗糙度 R_a 主要受每齿进给量 f_z 影响;

(2) 铣削表面残余应力 σ_H 主要受每齿进给量 f_z 和切宽 a_e 的影响;

(3) 铣削表面显微硬化率 N 主要受线速度 v_c 的影响。

铣削参数对试验结果的影响规律

1 每齿进给量 f_z

根据铣削参数与表面完整性各指标的相关性系数,开展每齿进给量 f_z 的单因素铣削试验,研究 f_z 变化对铣削表面残余应力 σ_H 和表面粗糙度 R_a 的影响规律。相应的每齿进给量 f_z 及其试验结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,当每齿进给量在 $f_z=0.05\sim 0.15\text{mm/z}$ 范围内变化时,铣削表面残余应力为压应力,且随着每齿进给量 f_z 的增大,残余压应力的幅值也逐渐增大。

当每齿进给量 f_z 增大时,切削刃单次切除的材料厚度增大,切削力增大,已加工表面材料的塑性变形和亚表面层的弹性变形增大,所以产生的表面残余压应力的幅值增大;另一方面,虽然增大每齿进给量 f_z 会导致切削区的温度略有升高,使加工表面残余应力向拉应力的方向变化,但这种趋势小于切削过程中加工表面弹性变形使表面残余应力向压应力增大方向发展的趋势。因此,在本试验参数范围内,随着每齿进给量 f_z 的增大,钛合金 TB6 铣削表面的残余压应力幅值增大。

每齿进给量 f_z 对铣削表面粗糙度 R_a 的影响试验参数和结果如图 6 所示。

由图 6 可知,当铣削线速度一定时,随着每齿进给量的增加,试件表面粗糙度呈单调趋势增大。无论铣削速度是 20m/min 、 30m/min 还是 40m/min 时,每齿进给量由 0.07mm/z 升高至 0.14mm/z 时,表面粗糙度均由 $R_a 0.5\mu\text{m}$ 升高到了 $R_a 1.4\mu\text{m}$ 。这是因为侧铣加工时,每齿进给量的增大会增加铣削加工残留面积的高度,从而使得表面粗糙度值增加。典型的侧铣微观形貌及典型粗糙度曲线如图 7 所示。

2 线速度 v_c

改变线速度 v_c 进行 TB6 铣削试验,研究 v_c 变化时铣削表面显微硬化率 N 的变化规律。线速度 v_c 对铣削表面显微硬化率 N 的影响试验参

数和试验结果如图 8 所示。

从试验结果可以看出, TB6 钛合金铣削表面,显微硬化率 N 随着线速度 v_c 的增大而减小。TB6 钛合金铣削过程中,加工表面材料发生弹塑性变形,组织发生滑移,使晶粒拉长和纤维化。随着线速度 v_c 增大,切削刃及后刀面与材料表面的接触时间缩短,后刀面对已加工表面的挤压和刮擦作用减弱,加工表面的塑性变形不能充分进行,因此,随着铣削线速度的增加,加工表面的显微硬化率逐渐减小。

3 径向切宽 a_e

开展切宽 a_e 的单因素铣削试验,考察 a_e 单调变化时,铣削表面残余应力 σ_H 的变化规律。切宽 a_e 对铣削表面残余应力 σ_H 的影响试验参数和试验结果如图 9 所示。

从试验数据可以看出, TB6 钛合金侧铣加工后的表面残余应力 σ_H

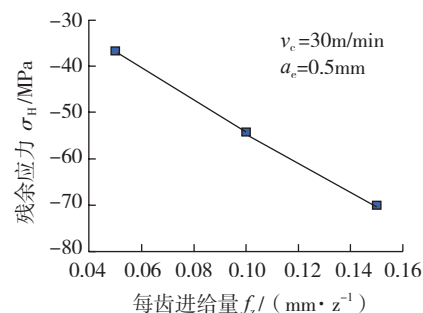


图5 每齿进给量对残余应力的影响曲线

Fig.5 Influence of feed per tooth on residual stress

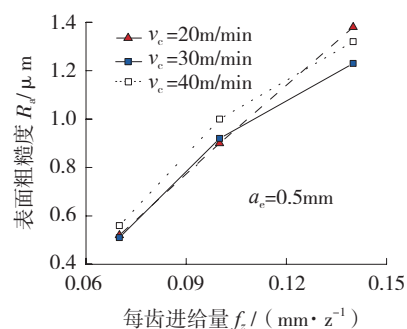


图6 线速度和每齿进给量对表面粗糙度的影响

Fig.6 Influence of cutting speed and feed per tooth on surface roughness

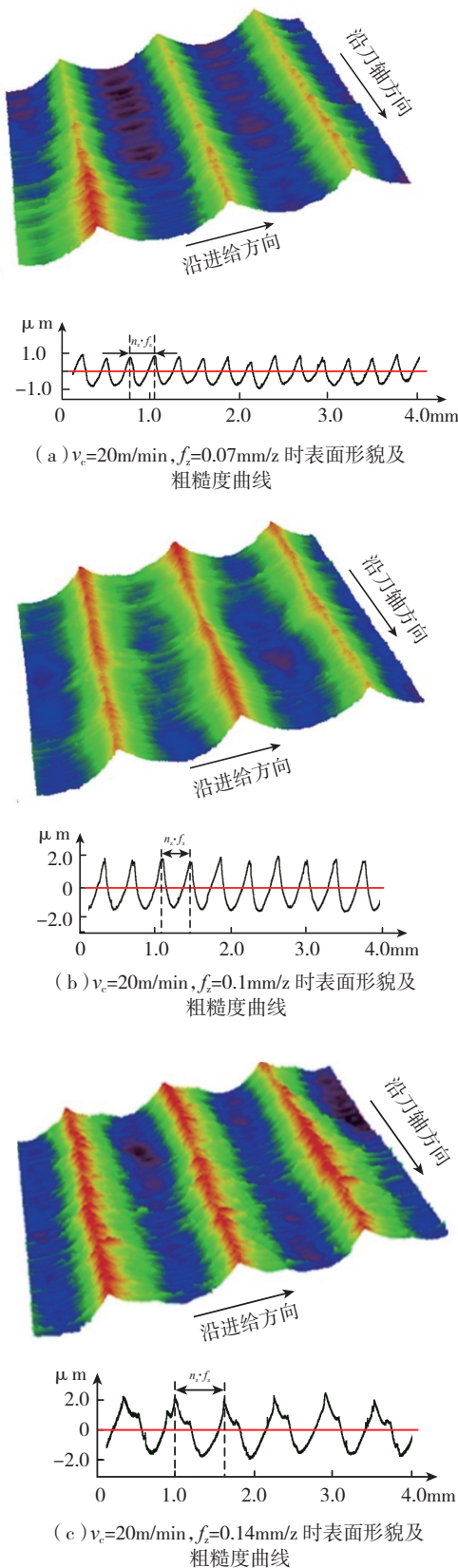


图7 加工表面微观形貌及典型粗糙度曲线
Fig.7 Surface micro topographies and typical surface roughness curves

为压应力,其幅值随着切宽 a_e 的增大而逐渐减小。金属切削区材料弹塑性变形、刀具后刀面对加工表面的挤压摩擦、切削区的温度等因素对加工后表面残余应力有直接影响。切宽 a_e 增大时,切屑厚度增大,切削产生的热量增多,同时,较厚的切屑阻碍了切削液进入切削区域,冷却效果减弱,切削区温度升高。因此,表面层在产生塑性变形的前提下,增大的热弹性变形在表面冷却后,减弱了加工表面形成残余压应力的能力,从而导致加工表面残余压应力的幅值逐渐减小。

结论

(1) 每齿进给量 f_z 对表面粗糙度和加工表面残余应力有较大的影响,随着每齿进给量 f_z 的不断增大,表面粗糙度 R_a 基本线性增大,表面残余压应力的幅值也随之增大。加工表面残余压应力能够提高零件的低周疲劳寿命,因此在满足设计零件表面粗糙度 R_a 设计要求的前提下,应尽量提高每齿进给量,从而增大铣削加工后的表面残余压应力的幅值,同时还能够提高铣削加工的效率。

(2) 线速度对铣

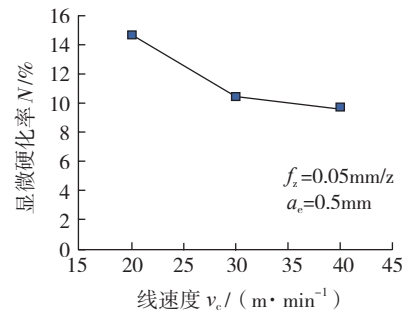


图8 线速度对显微硬化率的影响曲线
Fig.8 Influence of cutting speed on micro-hardening rate

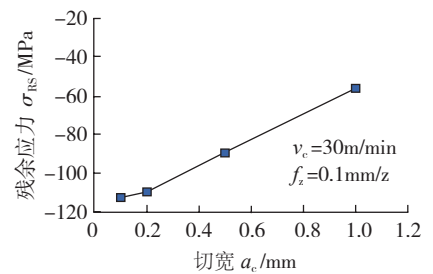


图9 切宽对残余应力的影响曲线
Fig.9 Influence of cutting width on residual stress

削加工后的表面显微硬化率有较大的影响,加工后表面的硬化现象能够提高零件的疲劳寿命,因此在可用的铣削参数范围内,应尽量降低侧铣加工时的线速度。在本文的试验参数范围内,线速度 v_c 应取 20m/min。

(3) 径向切宽 a_e 对加工表面残余应力有一定的影响,随着切宽的增加,加工后表面残余压应力的幅值逐渐减小,且减小的幅度较大。因此,在满足铣削加工工艺和生产要求的前提下,应尽量减小径向切宽 a_e 。

综上所述,在 TB6 材料零件的实际生产加工中,从提高零件疲劳寿命的方面考虑,在满足零件表面质量要求和各项技术要求的前提下,应尽可能降低铣削线速度,减小径向切宽,提高每齿进给量,适当选择轴向切深。

参考文献

[1] YAO C F, WU D X, JIN Q C, et al. Influence of high-speed milling parameter on 3D surface topography and fatigue behavior of TB6

- titanium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(3): 650-660.
- [2] 穆志韬, 曾本银, 金平, 等. 直升机结构疲劳[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- MU Zhitao, ZENG Benyin, JIN Ping, et al. Fatigue of helicopter structures[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [3] 陶春虎, 钟培道, 王仁智, 等. 航空发动机转动部件的失效与预防[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- TAO Chunhu, ZHONG Peidao, WANG Renzhi, et al. Failure analysis and prevention for rotor in aeroengine[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [4] SCHWACH D W, GUO Y B. A fundamental study on the iMPact of surface integrity by hard turning on rolling contact fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(12): 1838-1844.
- [5] LI W, GUO Y B, BARKEY M E. Tool wear influence on surface integrity and fatigue life of hard milled surfaces[C]. International Joint Tribology Conference, Los Angeles, 2011.
- [6] GAO Y K, LI X B, YANG Q X, et al. Influence of surface integrity on fatigue strength of 40CrNi2Si2MoVA steel[J]. Materials Letters, 2007, 61(2): 466-469.
- [7] JAVIDI A, RIEGER U, EICHLSEDER W. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(S10-11): 2050-2055.
- [8] ITOGA H, TOKAJI K, NAKAJIMA M, et al. Effect of surface roughness on step-wise S-N characteristics in high strength steel[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(5): 379-385.
- [9] KAWAGOISHI N, CHEN Q, KONDO E, et al. Influence of cubic boron nitride grinding on the fatigue strengths of carbon steels and a nickel-base superalloy[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 1999, 8(2): 152-158.
- [10] 周子同, 陈志同, 熊曦耀, 等. 钛合金 TB6 侧铣表面完整性试验[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(6): 849-854.
- ZHOU Zitong, CHEN Zhitong, XIONG Xiyao, et al. Experiment on surface integrity of side milling titanium TB6[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(6): 849-854.
- [11] 周子同, 崔季, 陈志同, 等. TB6 钛合金铣削表面完整性试验研究[J]. 航空制造技术, 2015(8): 66-69.
- ZHOU Zitong, CUI Ji, CHEN Zhitong, et al. Experimental research on surface integrity of tb6 titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(8): 66-69.
- [12] 李传奇. 铣削方式对钛合金 TB6 加工硬化影响研究[J]. 新技术新工艺, 2015(8): 98-101.
- LI Chuanqi. The research of milling pattern to work hardening of titanium alloy TB6[J]. New Technology & New Process, 2015(8): 98-101.
- [13] YAO C F, WU D X, TAN L, et al. Effects of cutting parameters on surface residual stress and its mechanism in high-speed milling TB6[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2013, 227(4): 483-493.

通讯作者: 李勋, 博士、副教授, 主要研究方向为高性能材料切削 / 磨削技术及其表面完整性, E-mail:lixunbuaa@163.com。

Milling Parameters Optimization for Finish Machining TB6 Based on Machined Surface Integrity

GUAN Chunming, LI Xun, LUO Yang, NIU Yongsong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] TB6 titanium alloy is widely used in aviation because of its high strength-to-weight ratio and extraordinary hot deformation behavior, which is the main material to manufacture the primary structure of helicopter rotor systems as well as the landing gears. To ensure the parts meet the requirement of fatigue properties, finish milling parameters have been optimized based on the integrity of machined surface. The experiment results show that feed per tooth f_z has an obvious influence on the roughness R_a and residual stress σ_H of the machined surface. When f_z increases, the surface roughness increases linearly. Meanwhile, the amplitude of the residual stress also increases with the increase of f_z . The micro-hardening rate is mainly effected by the cutting speed v_c . The increase of v_c leads to the decrease of the micro-hardening rate. On the other hand, it can be obtained that the cutting width a_c has a great influence on the machined surface residual stress. When a_c increases, the amplitude of surface residual stress reduces obviously. According to improving the fatigue properties, low cutting speed v_c , small cutting width a_c and high feed per tooth f_z should be adopted. At the same time, the appropriate cutting depth a_p can be utilized under the premise of meeting all the design requirements, such as the surface roughness and machining efficiency.

Keywords: Surface integrity; TB6 titanium ally; Milling; Parameters optimization; Fatigue life

(责编 谷雨)