钛合金 TB6 铣削加工硬化实验

周子同 陈志同 蒋理科

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191) (中航工业 昌河飞机工业(集团)有限责任公司, 景德镇 333000)

李秀琴

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 研究了使用涂层硬质合金刀具对钛合金 TB6 进行端铣加工时,铣削参数以及刀具后刀面磨损量对加工硬化(表面硬化率、硬化层深度以及硬化层硬度分布)的影响,以弄清 TB6 铣削硬化现象及机理. 结果表明,在实验参数范围内,刀具无磨损的情况下,硬化率基本保持在 107% ~112% 范围内,硬化层深度范围为 18 ~36 μm;铣削速度增加时,加工硬化程度会有较为明显的降低现象,而进给量与切深对加工硬化的影响并不明显;刀具磨损对加工硬化的影响较为显著,后刀面磨损量低于 0.2 mm 时,硬化层深度随着磨损增加从 30 μm 增加至 55 μm,而后刀面磨损量为 0.35 mm 时,硬化层深度达到了 130 μm. 刀具磨损后在加工表面下较浅位置出现软化区域,而且随着磨损量的增加,软化越来越明显.

关 键 词: TB6; 显微硬度; 加工硬化; 表面完整性; 微观组织

中图分类号: TH 161$^+$.14

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2014)01-0135-06

Experiment on work hardening of milling TB6

Zhou Zitong Chen Zhitong

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

Jiang Like

(Changhe Aircraft Industries Group Co., Ltd., Aviation Industry of China, Jingdezhen 333000, China)

Li Xiuqin

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

Abstract: How the tool wear and milling parameters influence the work hardening in the process of face milling TB6 was studied to figure out the principles of work hardening. The results show that among the parameters selected in the experiments, the work hardening degree ranges from 107% to 112% and the depth of work hardening ranges from 18 μm to 36 μm. The work hardening degree decreases with the increasing of velocity of milling, while the changes of feed and depth of cut show no obvious impacts on it. The amount of flank wear(V_B) influences the work hardening a lot. The depth of work hardening changes from 30 μm to 55 μm, when V_B increases from 0 to 0.2 mm, while it increases to 130 μm when V_B reaches to 0.35 mm. The material softens not deep below the surface and it is more apparent when V_B is increasing.

Key words: TB6; microhardness; work hardening; surface integrity; microstructure

收稿日期: 2013-03-20; **网络出版时间**: 2013-06-03 16:47

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130603.1647.002.html

作者简介: 周子同(1990 -),男,山西长治人,硕士生,nanhangtonger@163.com.

钛合金因具有强度高、耐蚀性好、耐热性高等特点,在航空、航天等工业部门中的应用越来越广泛,用于制作飞机和发动机中的主要构件. 但是,钛合金的工艺性能差,切削加工困难. 同时,由于钛的化学活性大,在高的切削温度下,很容易吸收空气中的氧和氮形成硬而脆的外皮;切削过程中的塑性变形也会造成表面硬化.

加工硬化现象一般对提高零件疲劳寿命会带来有利影响,但硬化程度超过一定范围时不仅会降低零件的疲劳强度,而且能加剧刀具磨损,是切削钛合金时一个很重要的特点. 为了尽可能研究透彻加工硬化的产生机理以及加工硬化对疲劳强度的影响,最终提高零件的寿命,对加工硬化的研究是非常必要并且迫切的.

文献[1]研究了在线速度为 10 m/min、进给量为 0.1 mm/r、切深为 0.7 mm 的条件下对某 γ 相钛合金进行车削的表面完整性,得出了硬度最大值出现在表面并且硬化层在表面下 100 μm 内的结论. 文献[2]研究了高速铣削参数对 TC4 钛合金表面完整性的影响,指出铣削速度从 113 m/min 增加到 301 m/min 时,硬化深度随铣削速度的升高而减小,而当铣削速度升高到 377 m/min 时,硬化深度略有增大. 文献[3]对 TC21 进行了铣削加工,考察了加工硬化随进给量及切深的变化趋势,认为进给量及切深对 TC21 硬化率及硬化深度影响并不明显. 文献[4]研究发现,使用更低线速度或者加工过程中使用冷却液时会使硬化率提高. 文献[5]通过非涂层和涂层刀具干铣钛合金 Ti-6242S 实验得到结果:在切削参数相同条件下,非涂层刀具磨损后,工件表面硬度增大值稍有降低,但会增加硬化层硬度峰值,并且会略微增加硬化深度.

国内外学者对钛合金的表面完整性已经进行的一些研究,对 TB6 材料的研究有一定的参考价值,但对 TB6 材料铣削加工硬化的研究仍然欠缺. 本文将对加工参数与 TB6 加工硬化现象进行研究,为 TB6 铣削加工过程提供依据与方法.

1 加工硬化含义及评价标准

文献[6]首先引入了表面完整性的概念,将它定义为在机械加工过程中或者其他表面处理过程中产生的表面强化状态. 加工硬化是加工表面层的物理力学性能,是表面完整性的重要指标之一.

在机械加工过程中金属表面层发生塑性变形,在塑性变形作用下使金属强化的现象称为加工硬化. 在金属塑性变形过程中,金属晶粒发生滑移,晶格发生畸变,晶粒形状及尺寸发生变化,并形成结构.

根据位错理论,塑性变形时金属的强化在于位错集中在滑移线的附近[7]. 由于位错周围为弹性应力场,所以对下一步的塑性变形必须比非强化金属有更大的应力. 加工硬化会导致金属密度和塑性变形程度成比例地降低,并且导致金属变形阻力增大,塑性降低,硬度增高.

加工硬化通常以硬化层深度 h_d 和硬化程度 N 表示. h_d 是指已加工表面至未硬化处的垂直距离,硬化程度 N 是已加工表面的显微硬度值对原始显微硬度的百分数[8].

$$N = \frac{H}{H_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中,H 为已加工表面的显微硬度,GPa;H_0 为原基体金属的显微硬度,GPa.

2 TB6 钛合金铣削加工硬化实验

2.1 试件材料

试件材料为 TB6 合金,又称 Ti-1023. Ti-1023 是一种典型的近 β 型钛合金,名义成分为 Ti-10V-2Fe-3A1,化学成分组成如表 1 所示[9].

表 1 TB6 钛合金的化学成分 %

合金元素	Al	V	Fe	Ti
质量分数	2.6~3.4	9.0~11.0	1.6~2.2	余量

TB6 合金具有比强度高、断裂韧性好、淬透截面大、各向异性小和耐腐蚀能力强等诸多优点. 该合金最高工作温度可达 320 ℃,适宜生产锻件、板材和型材. 另外,TB6 的拉伸强度和疲劳性能与飞机结构件常用结构钢 30CrMnSiA 一致,在飞机机身、机翼、起落架结构中替代与 30CrMnSiA 相同强度的结构钢可减重 40%,在制造飞机机体和起落架等大型承力构件中替代 Ti-6A1-4V 可实现 20% 的减重.

2.2 实验设备

TB6 试件经过线切割制成截面为正方形的长方体,尺寸为 20 mm × 20 mm × 30 mm. 由于线切割过程中可能存在一些误差,要求在实验之前使用直角尺检验各样件,选出合格样件进行实验.

试件的铣削加工是在三轴立铣床上进行,刀片为山特维克 TiAlN 涂层硬质合金方肩立铣刀,刀尖圆弧半径为 R3.0~3.2 mm,刀盘直径50 mm,型号为 R390-50Q22-17L.

样件加工之后的研磨与抛光使用了 UNIPOL-

802 研磨抛光机,硬度测试使用了 FM-800 显微维氏硬度计.

2.3　实验参数选取

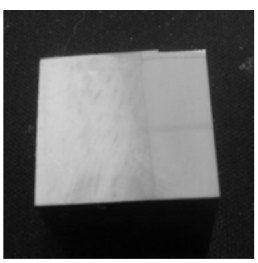
为了研究 TB6 铣削参数对加工硬化的影响,考虑线速度(V_c)、进给量(f_z)与切深(a_p)3 个因素,每个因素选取 3 个水平. 为了最终可以选出对加工硬化影响最大的因素,1 ~ 9 组切削参数由等水平正交表 L9(3^3)确定. 同时,添加 4 组数据与正交表中数据组合可获得单因素与加工硬化的影响.

另外,为了研究刀具后刀面磨损对加工硬化的影响,在铣削参数为 V_c = 60 m/min,f_z = 0.12 mm/齿,a_p = 0.2 mm 的条件下,使用后刀面磨损量(V_B)分别为 0.1,0.2 和 0.35 mm 的刀片对样件进行加工,然后测量表面硬化率及硬化层深度的变化.

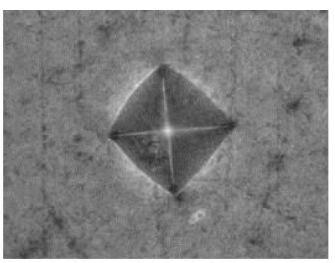
2.4　实验过程

在三轴立铣床上使用山特维克刀片对样件进行端铣,铣削方式为顺铣,采用冷却液进行冷却. 铣削完成之后,在每个样件的加工表面测出表面硬度值,以便获得表面硬化率数值.

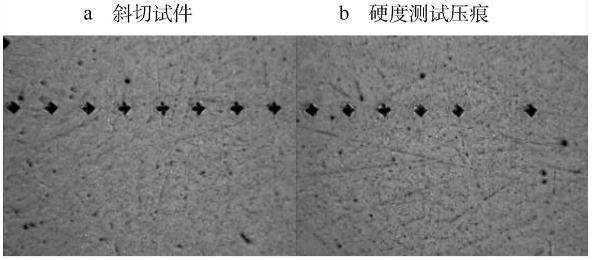
由于 TB6 硬化层较浅,所以采用斜切法对样件进行处理:在已加工表面上,距边缘 5 ~ 10 mm 处研磨出与加工面有 2°夹角的斜面. 采用粗磨、精磨、抛光的方式逐步研磨,使研磨面不产生加工硬化层. 为了尽可能使测试结果更准确,需要保证斜面与已加工面之间的交角不产生圆角. 斜切研磨之后的试件如图 1a 所示. 在已抛光表面进行硬度测试的压痕如图 1b 所示.



a　斜切试件



b　硬度测试压痕



c　硬度测试整体压痕

图 1　硬度测试实验图像

使用 FM-800 显微维氏硬度计对试件进行硬度测试,硬度测试的加载载荷为 0.981 N,保荷时间选为 10 s[11]. 实验中测得 TB6 基体硬度值为 370 ~ 378 Hv. 在斜切面上从分界线开始逐点测量,直至硬度值降低至 370 ~ 378 Hv 并且不再超出此范围. 通过斜切面上第 n 个压痕与第 1 个压痕之间的距离 S_n 与角度关系,则可求得第 n 个压痕与表面的垂直距离,从而可得出硬化层深度 h_d. 对硬化层测试的整体压痕分布如图 1c 所示.

为了观察切削加工之后的表面层特性,沿着铣削速度方向对试件截面进行切割,并且对切割面进行研磨、抛光、腐蚀等流程,然后在 1 000 倍光学显微镜下对试件观察拍照,可以得到表层组织的金相照片.

3　实验结果及分析

3.1　铣削参数与加工硬化之间的关系

通过实验得出正交实验结果,实验参数及实验结果如表 2 所示.

表 2　实验参数及结果

序号	参数			N/%
	V_c/(m·min^{-1})	f_z/(mm·齿$^{-1}$)	a_p/mm	
1	30	0.04	0.2	111.90
2	30	0.08	0.6	112.48
3	30	0.12	1	111.35
4	60	0.04	0.6	108.95
5	60	0.08	1	110.08
6	60	0.12	0.2	112.50
7	90	0.04	1	107.12
8	90	0.08	0.2	110.08
9	90	0.12	0.6	108.65
10	30	0.08	0.2	112.24
11	30	0.08	1	110.16
12	90	0.08	1	107.84
13	30	0.04	1	110.53
14	120	0.08	1	109.37
15	150	0.08	1	109.57

通过第 5、第 11 和第 12 组数据可得到线速度对表面硬化率的影响曲线,通过第 3、第 11、第 13 组数据可以得出进给对表面硬化率的影响曲线,通过第 2、第 10、第 11 组数据可得到切深对表面硬化率的影响曲线,结果见图 2.

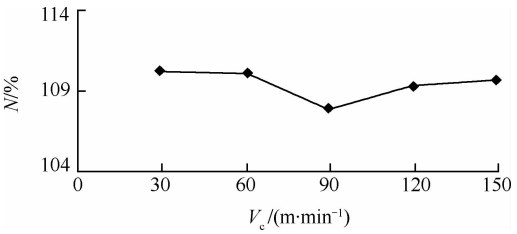
从图 2 可以看出,线速度从 30 m/min 升高到 60 m/min 时硬化率略有下降,而再升高到 90 m/min 时则出现较为明显的下降. 这是在较低的切削速度范围内,随着切削速度的增加,塑性变形速度增大,第 1 变形区变窄,材料的塑性下降,而且切削速度增高会缩短后刀面与材料的接触时间,使加工硬化来不及充分进行;此外,切削速度的增加,又会使切削温度增加,使软化进行得较为充分,这些影响都会使加工硬化程度随线速度增加

而逐步降低.

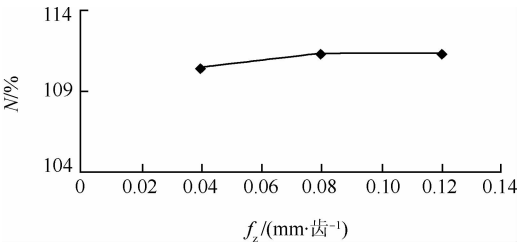
然而随着线速度上升到 150 m/min,硬化率又略微上升,这是因为加工过程中变形速度超过弱化速度时,弱化来不及充分进行,而当切削温度超过相变点 A_{cs}时,表面层组织将产生相变,如遇急速冷却,则成为淬火组织,使加工硬化随切削速度的增加而增加.

随着每齿进给量从 0.04 mm 升高到0.12 mm,表面硬化率略微增加,这是因为增加进给量会使切削力及塑性变形区范围增大,会导致加工硬化程度的加大.

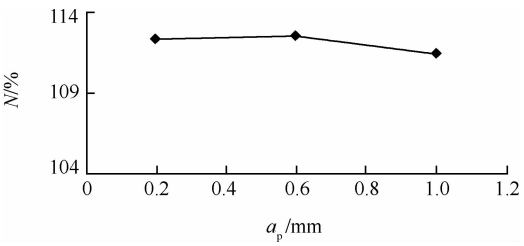
另外,由图 2c 可以看出,在线速度和进给量保持不变的情况下,切深对硬化率的影响并不明显.



a 切削速度-表面硬化率



b 进给量-表面硬化率



c 切深-表面硬化率

图 2 切削参数对表面硬化率的影响曲线

3.2 硬化层深度曲线

通过斜切法测得表 2 中 1 ~ 9 组硬化层硬度分布曲线如图 3. 由于斜切面上第 1 点处于分界线处,硬度值无法准确测得,所以第 1 点均从3 μm 开始. 从图中可以看出,最大硬度值基本上都出现在加工表面附近,随着距表面深度的增大,硬度值逐步下降. 硬化层深度大体在 18 ~ 36 μm的范围内变化,说明使用无磨损的新刀片对 TB6 进行铣削加工时,硬化并不严重.

钛合金加工硬化层深度较小,这与其切削加工时的自发淬火及材料的导热性密切相关. 通常高锰钢、淬硬钢等经过淬火组织会变成硬度较高的马氏体组织,而钛合金经过低温淬火,所得马氏体硬度不高,强化效果小,此外由于其导热系数较低,热量驻于近表层,所以得到的硬化层深度较小.

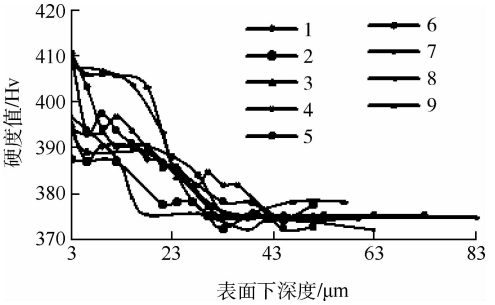


图 3 切削参数对表面硬化率的影响曲线

3.3 刀具后刀面磨损对加工硬化的影响

硬化层深度与后刀面磨损量之间的关系如图 4 所示. 从图中可以看出,新刀加工出的样件硬化层深度约为 30 μm;当 V_B 达到 0.1 mm 时,硬化层深度提高到 45 μm 左右;V_B 达到 0.2 mm 时,硬化层深度提高到 55 μm 左右;而当 V_B 达到 0.35 mm 时,硬化层大幅增加至约 130 μm.

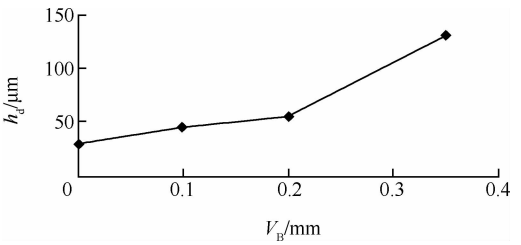


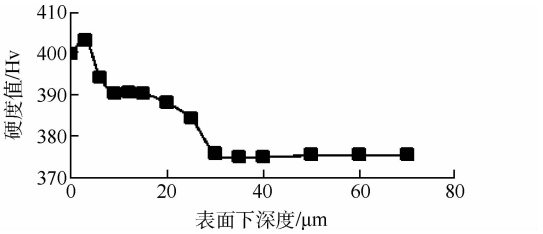
图 4 后刀面磨损量对硬化层深度影响曲线

图 5 为不同后刀面磨损量的刀具对硬化层深度的影响曲线. 可见,刀具磨损对硬化层的变化影响比较明显,随着 V_B 的增加,硬化层深度也在不断增加.

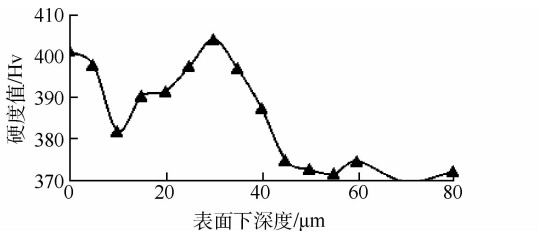
随着刀具磨损的增加,切削刃变钝,使试件在被加工过程中受到挤压的作用增大,在切削区被加工材料的变形也随之增加,会增大硬化层深度;另外,刀具与切屑以及磨损后的刀具后刀面与已加工表面的摩擦也会增大,也会使切削热增加,同样会增大硬化影响层深度. 刀具磨损初期,温度增加比较平缓,到了后期则比较显著[11],所以刀具从无磨损到磨损量为 0.1 mm 和 0.2 mm 使硬化层增加比较缓慢,当磨损量达到 0.3 mm 时,硬化层会急剧增加.

从图 5 中可以看出,$V_B = 0$ 时,加工表面下硬度随着距表面距离的增加基本处于缓慢下降状态;$V_{Bmax} = 0.1$ mm 时,在表面下 10 μm 处出现了

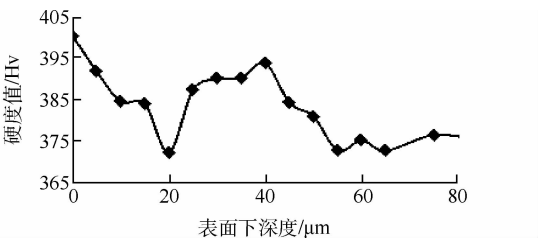
一个波谷,硬度值为 383 Hv,随后在 30 μm 处又达到一个峰值,随后再次缓慢下降到基体硬度后趋于稳定;V_{Bmax} = 0.2 mm 时,在表面下 20 μm 处出现波谷,硬度值为 375 Hv,在 40 μm 处达到峰值,随后缓慢下降;V_{Bmax} = 0.3 mm 时,表面下 20 μm 处同样出现硬度值为 375 Hv 的波谷,然后在 68 μm处出现一个硬度值达到 407 Hv 的波峰,之后硬度值缓慢下降.



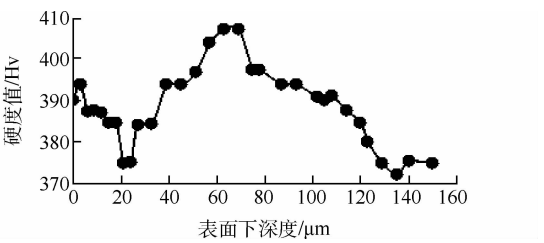
a　V_B = 0



b　V_B = 0.1 mm



c　V_B = 0.2 mm



d　V_B = 0.35 mm

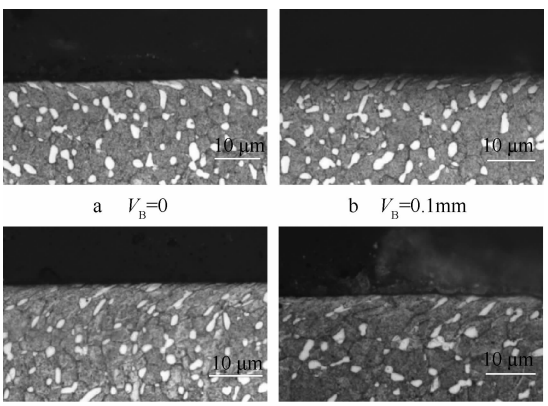
图 5　不同磨损量下硬化层分布曲线

由于在靠近表面的位置,晶粒的滑移、拉长与破碎更加剧烈,会引起试件在表面附近硬度偏大.另外,在切削过程中,切削热会使钛合金表层金属出现软化现象,由于钛合金较差的导热性,热量就会在距表层较浅的深度处被保留一段时间,会使该深度处的硬度值下降.随着刀具磨损量的增加,切削热也随之迅速增加,最终导致硬化深度曲线出现越来越明显的波谷.

表面加工硬化一般可以防止裂纹产生并阻止已有裂纹的扩展,对提高疲劳强度有利;但表面硬化增加到一定程度时,表面塑性变形层在循环加载和高温作用下会加速扩散进程,进而使金属表面层软化和损失其承载能力.所以工厂在实际加工过程中,需要严格控制刀具磨损,尽量避免使用后刀面磨损量超过 0.2 mm 的刀具对钛合金进行加工.

3.4　表层微观组织

V_B 分别为 0,0.1,0.2 和 0.35 mm 时表层组织的金相照片,如图 6 所示.从金相照片中可以清晰看出,试件已加工表层晶粒发生了拉伸和滑移.而且当刀具磨损加剧时,试样表层的钛合金晶粒扭曲程度更加明显,晶粒扭曲层深度也随着加深.



a　V_B=0　　b　V_B=0.1mm

c　V_B=0.2 mm　　d　V_B=0.35 mm

图 6　不同磨损量下表层微观组织

4　结　论

通过对 TB6 钛合金铣削参数对加工硬化影响的研究,可以得出如下结论:

1) TB6 铣削端铣加工过程中,会产生加工硬化.刀具无磨损的情况下,硬化率基本保持在 107% ~ 112% 范围内,硬化层深度范围为 18 ~ 36 μm,加工硬化并不严重.

2) 铣削速度由 30 m/min 增加到 90 m/min 时,加工硬化程度会有较为明显的降低现象,而继续增加到 150 m/min 时,加工硬化程度再次增加;进给量由 0.04 mm 逐步升高到 0.12 mm 时,表面硬化程度会有略微提高,而切深量不同时,加工硬化程度的变化并不明显.

3) 刀具磨损对加工硬化的影响较为显著,后刀面磨损量从 0 增加到 0.2 mm 时,硬化层深度从 30 μm 增加至 55 μm,而后刀面磨损量为 0.35 mm 时,硬化层深度达到了 130 μm.

4) 刀具经过一定磨损后,在表面下较浅位置会出现软化区域,随着磨损量增大,软化区域更加明显.

5）从金相照片可以看出，试件已加工表层晶粒发生了拉伸和滑移. 并且刀具磨损加剧时，试样表层的钛合金晶粒扭曲程度更加明显，晶粒扭曲层深度也随着加深.

参考文献（References）

[1] Mantle A L, Aspinwall D K. Surface integrity and fatigue life of turned gamma titanium aluminide[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 72(3): 413 – 420

[2] 杨振朝，张定华，姚倡锋，等. 高速铣削速度对 TC4 钛合金表面完整性影响机理[J]. 南京航空航天大学学报，2009，41(5)：644 – 648
Yang Zhenchao, Zhang Dinghua, Yao Changfeng, et al. Influence mechanism of milling speed on TC4 titanium alloy surface integrity in high-speed milling[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(5): 644 – 648(in Chinese)

[3] 杨波. 新型钛合金切削加工表面完整性及切削参数优化研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2010：37 – 40
Yang Bo. Surface integrity and cutting parameters optimization in machining of new titanium alloys[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010: 37 – 40(in Chinese)

[4] Umbrello D, Pu Z, Caruso S, et al. The effects of cryogenic cooling on surface integrity in hard machining[J]. Procedia Engineering, 2011, 19: 371 – 376

[5] Ginting A, Nouari M. Surface integrity of dry machined titanium alloys[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(3): 325 – 332

[6] Field M, Kahles J F. Review of surface integrity of machined components [J]. Annals of the CIRP, 1971, 20(2): 107 – 108

[7] 付浩. 基于位错理论的疲劳裂纹扩展特性研究[D]. 长沙：长沙理工大学，2010：7 – 10
Fu Hao. Study on fatigue crack propagation based on dislocation theory[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2010: 7 – 10(in Chinese)

[8] 陈日耀. 金属切削原理[M]. 北京：机械工业出版社，2002：150 – 152
Chen Riyao. Principles of metal cutting[M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 150 – 152(in Chinese)

[9] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册，第四卷：钛合金，铜合金[M]. 北京：中国标准出版社，2001：255 – 259
Editorial Board of China Aeronautical Materials Handbook. China aeronautical materials handbook, volume fourth: copper alloy, titanium alloy[M]. Beijing: China Standard Press, 2001: 255 – 259(in Chinese)

[10] 韩德伟. 金属硬度检测技术手册[M]. 长沙：中南大学出版社，2003：107 – 109
Han Dewei. Manual testing technique of metal hardness[M]. Changsha: Central South University, 2003: 107 – 109(in Chinese)

[11] 罗汉兵. 钛合金高速铣削刀具失效及加工表面质量实验研究[D]. 山东：山东大学，2011：36 – 37
Luo Hanbing. Experimental investigation on tool failure and machined surface quality for high speed milling[D]. Shandong: Shandong University, 2011: 36 – 37(in Chinese)