

TC4 钛合金材料采用金刚石砂轮磨削时的工艺参数优化

Optimization of Technological Parameters of TC4 Titanium Alloy by Diamond Grinding Wheel

中航工业北京航空制造工程研究所 韩野 崔海军

[摘要] 钛合金材料在航空器和发动机中的应用极为广泛,涡扇发动机中低压压气机静子叶片基本由钛合金材料制成,由于钛合金的磨削性能较差,对选用金刚石砂轮进行钛合金材料磨削时的主要工艺影响因素(如进给速度、磨抛深度等)进行了试验分析,优选出更适用于金刚石砂轮磨削钛合金的工艺参数,该参数不仅能够用于自研的双面仿形抛修设备,还可以对其他型号磨床磨削钛合金材料时的工艺参数选择提供指导。

关键词: 金刚石砂轮 钛合金材料 进给速度 磨抛深度

[ABSTRACT] Titanium alloy is widely used in aircraft and engine. Low pressure compressor stator blades in turbofan engine are basically made of titanium alloy. Due to the poor grinding performance of titanium alloy, the experimental analysis about main technological influence factors (such as feed speed, grinding depth) of grinding titanium alloy by diamond wheel is carried out in this paper. The parameters of grinding titanium alloy by diamond wheel are optimized. The parameters can not only be used in independent manufacturing double-sided copying trimming equipment, but also can provide guidance for other types of grinding machines while selecting technological parameters of grinding titanium alloy.

Keywords: Diamond grinding wheel Titanium alloy Feed speed Grinding depth

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.11.124

叶片是航空发动机中非常重要的一类零件,对发动机的性能起着关键的作用。航空发动机的叶片主要包括钛合金或树脂基复合材料的风扇叶片、钛合金和高温合金的压气机叶片、高温合金的涡轮叶片等多种类型。就轴流式发动机而言,叶片制造工作量占整机制造工作量的 1/3。由于航空叶片的加工制造对航空发动机十分重要,加之叶片形状不规则,尺寸计算复杂,与普通零件有很大差异^[1],因此叶片制造工艺成为发动机制造工艺中一个专业化很强的分支。研究叶片制造工艺,发展叶片制造技术对我国的航空工业,乃至机械制造工业的许

多部门都有重要意义。

随着航空发动机叶片气动性能水平的不断提升,机械加工中对叶片表面质量的要求越来越高,磨抛加工技术作为控制零件表面质量的关键一环,受到越来越广泛的重视。发动机叶片在使用中,由于工作环境恶劣、承载复杂,发生许多起关键部位断裂的事故,分析其原因多为表面存在加工质量问题。加工中采用磨抛加工工序能决定叶身的制造技术水平,甚至直接决定着整个叶片产品的最终加工质量,进而影响到航空发动机的使用性能。钛合金材料具有优良的性能,比如它的密度比钢要小,而它的比强度又比钢要高,在航空航天领域得到越来越广泛的应用,常用作叶片的加工制造。钛合金材料受热情况下稳定性好,高低温状态都表现出优异的性能,但其化学性质活泼,易与刀具材料发生化学反应、导热系数和弹性模量不高,属于典型的难加工材料^[2]。实际生产中,钛合金零件精密磨抛加工存在诸多困难,这也引起了制造业发达国家对零件的磨抛加工技术的重视。我国制造的产品在与国外发达国家竞争时,多数是因为产品的表面质量差,无法和国外产品相抗衡而失去市场地位。

磨抛工艺技术是指以砂轮为工具,先进行较大余量的磨削,再进行精密抛光的复合工艺,与砂带磨削的区别在于能够用同一个砂轮完成磨削和抛光两种工艺,并能够实现一定曲率半径的叶盆和叶背的加工。此技术在航空发动机中主要的应用对象为钛合金压气机叶片。

钛合金的外观近似于钢,呈银灰色,具有光泽。按照相组成进行分类,钛合金可分为:α 钛合金、近 α 钛合金、β 钛合金、近 β 钛合金及(α+β)钛合金。航空工业中使用较多的是(α+β)型钛合金,其中添加有 2%~10%的 β 稳定元素,常用的牌号有 TC4 (Ti-6Al-4V)和 TC11 (Ti-6.5Al-3.5Mo-0.25Si-2Zr-0.25Fe)等。相关研究数据表明,钛合金在航空航天工业上的使用总量所占钛合金总产量的比例已经达 70% 以上,由此可见,钛合金主要应用在对零件表面质量要求极高的航空航天工业领域^[3]。随着钛合金在军事工业中大量、广泛的应用,钛合金材料的制造水平已是衡量一个国家军事实力、综合国力的重要指标之一。但钛合金属于一种典

型的难加工材料,磨抛加工时面临诸多问题:

(1) 砂轮易粘附,钛合金中的 Cr、Ti、Co 等化学元素在磨抛过程中与砂轮表面磨粒形成强烈的粘附作用;

(2) 磨抛力大,明显高于磨抛普通碳钢时的磨抛力,导致砂轮磨耗大;

(3) 磨抛温度高,钛合金磨屑易粘附于磨粒顶部,使摩擦系数增大,磨抛功率增加,钛合金本身导热系数又低(TC4的导热系数为 8.79~12.98 W/(m·℃)),磨削弧区温度高,容易造成零件加工表面烧伤、龟裂,零件表面完整性变差,表面质量不易保证^[4];

(4) 钛合金化学活性高,易导致砂轮的氧化磨损和扩散磨损,降低砂轮寿命。

钛合金叶片实际磨抛加工中遇到的主要问题是由于缺乏对磨抛加工过程的优化,包括砂轮选型、筛优工艺参数以及改善冷却润滑条件等,导致磨抛温度高、工件表层极易发生烧伤,砂轮堵塞、钛屑粘结严重,工件表面加工质量较差。磨抛加工产生大量热,钛合金磨屑遇到高温时非常容易发生氧化。钛合金的氧化物大量粘附在砂轮的表面,若砂轮容屑空间小,磨粒锋利度差,致使磨粒表面粘附了钛合金,当这些磨粒再次参加磨削时,由于钛合金粘附物也参加了磨抛加工,更加剧砂轮的堵塞磨损,不断重复这样一个恶性循环,结果就导致砂轮磨抛性能变差,钛合金零件的表面质量变差。开展钛合金材料磨抛加工试验,寻求性能优良的磨抛工具和最优的加工参数以保证航空发动机叶片等飞机零件制造质量是生产中待解决并有着重大实际意义的。

超硬磨料是指金刚石和立方氮化硼以及以这两种磨料为主的混合磨料。与刚玉和碳化硅等普通磨料相比,具有硬度高、强度高、颗粒形状好、导热性良好和热膨胀系数低等特点,尤其是磨削能力强,是非常优异的磨削材料。超硬磨料制成的磨具磨削性能突出,与普通磨料磨具相比,具有硬度高、耐磨损、形状尺寸保持性好以及长时间保持磨粒微刃锋利性等优点^[5]。

钛合金等难加工材料的广泛使用给磨削加工提出了更新和更高的要求,即零件不但要有较高的尺寸精度和形状精度,而且要有较高的磨削加工表面完整性^[6]。在这种情况下,采用刚玉普通磨料砂轮已很难满足要求,而超硬磨料代替刚玉(Al₂O₃)则取得了较好的经济效果。特别是在加工钛合金时,由于超硬磨料比刚玉锋利,表现出了一系列优越性。它不仅能提高生产率,有利于严格控制工件的形状和尺寸精度,还能有效地提高工件的磨削质量,显著提高磨削试件的加工表面完整性,因而可以提高零件的疲劳强度,延长使用寿命,增加工作可靠性。

本文仅针对使用金刚石超硬磨料砂轮进行 TC4 钛

合金材料磨抛时的工艺参数选择和优化进行分析说明。试验前确定的预计技术指标为:磨抛后需要达到的表面粗糙度为 $R_a 0.8 \mu\text{m}$ 。

1 磨抛工艺试验所采用的系统

在 TC4 钛合金磨抛工艺试验中,采用了难加工材料磨削加工试验系统,该系统包括难加工材料测试分析系统、加工工具(砂轮)测试分析系统以及磨削加工过程测试分析系统,可对难加工材料磨削加工性能进行全面、系统评估,并能根据要求优化出适宜的磨削加工工艺参数。

主要试验设备和测试仪器可以分为磨削工艺试验设备、磨削动态过程信号采集系统、表面完整性测试分析系统等。

其中磨削工艺试验设备主要包括高速平面精密磨床、卧式数控平面磨床;磨削动态过程信号采集系统主要包括信号采集设备(主要有 PC 和信号采集卡)、磨削力测量系统(主要有 KISTLER 9272 压电式测力仪、KISTLER 5070A 电荷放大器以及相应的数据采集与处理系统)、磨削温度测量系统(主要有热电偶快速标定装置和计算机采集分析系统)。

磨抛工艺试验的整体路线如图 1 所示,该路线图不仅适用于钛合金材料的磨削,也适用于其他材料的磨削,同时还适用于砂轮材料的选择,是磨抛工艺试验时选用的普遍路线。

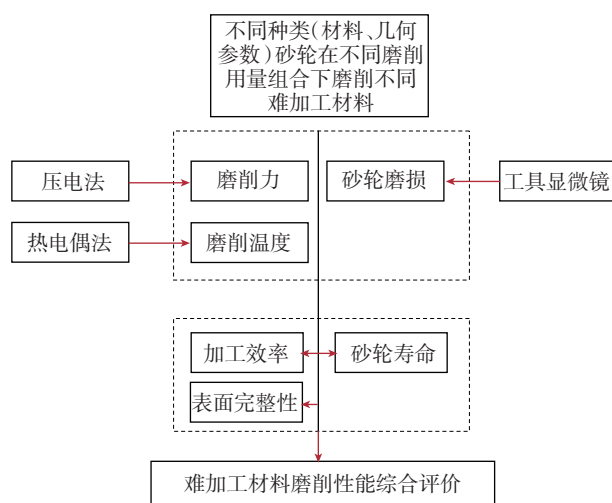


图1 磨削工艺试验的整体技术路线图
Fig.1 Overall technical roadmap of grinding process test

2 金刚石砂轮磨抛钛合金试验

2.1 试验条件

本试验旨在研究树脂结合剂金刚石砂轮(参数见表 1)磨抛加工钛合金 TC4 性能。磨抛用量参数见表 2,磨抛用量的选择范围通过相关文献和前期工艺试验确定。

表1 金刚石砂轮参数

项目	规格/mm	磨料	粒度	结合剂	浓度/%	最高线速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
参数	$\phi 350 \times 10 \times \phi 127$	金刚石	80#	树脂	75	35

表2 磨抛用量参数

项目	值
砂轮线速度 $v_s / (\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	25、35
工件速度 $v_w / (\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	2~10
磨抛深度 a_p / mm	0.005~0.05

2.2 磨抛温度分析

图 2、3 分别为磨抛过程稳定时不同砂轮线速度下磨抛温度与进给速度、磨抛深度的关系。由图 2、3 可知，磨抛温度随着进给速度、磨抛深度的增大而增大，随着砂轮线速度的增大而减小。试验工艺条件范围内，工件加工面未发生烧伤时，该砂轮磨抛加工 TC4 最大材料去除率为 $2000\text{mm}^3/\text{min}$ (v_w 为 $10\text{m}/\text{min}$, a_p 为 0.02mm , v_s 为 $25\text{m}/\text{s}$)，磨抛温度变化范围为 $225\sim 323^\circ\text{C}$ 。

该砂轮新修后在 v_w 为 $10\text{m}/\text{min}$, a_p 为 0.02mm , v_s 为 $25\text{m}/\text{s}$ 的用量条件下，磨抛加工 TC4 后表面粘附钛屑形

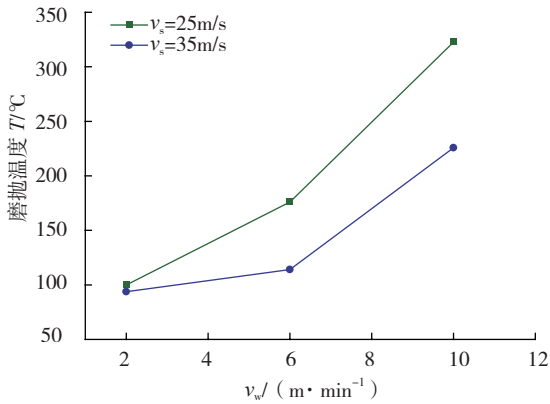


图2 进给速度对磨抛温度的影响 ($a_p=0.02\text{mm}$)

Fig.2 Effect of feed speed on grinding temperature ($a_p=0.02\text{mm}$)

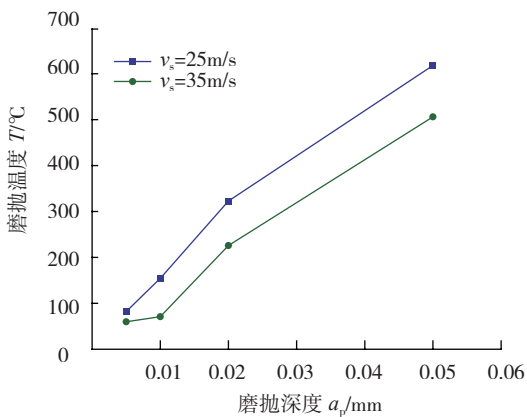


图3 磨抛深度对磨抛温度的影响 ($v_w=10\text{m}/\text{min}$)

Fig.3 Effect of grinding depth on grinding temperature ($v_w=10\text{m}/\text{min}$)

貌。砂轮表面有部分磨粒出现磨耗平台，并已粘附少量钛屑。

2.3 单位宽度磨抛力分析

图 4、5 为进给速度和磨抛深度对单位宽度磨抛力的影响。由图 4、5 可以看出，单位宽度磨抛力随着进给速度、磨抛深度的增大而增大，随着砂轮线速度的增大而减小。试验工艺条件范围内，砂轮线速度分别为 $25\text{m}/\text{min}$ 、 $35\text{m}/\text{min}$ ，磨抛深度为 0.02mm 时，工件加工面未发生烧伤时，单位宽度法向磨抛力和切向磨抛力变化范围分别为 $1.24\sim 16\text{N}/\text{mm}$ 和 $0.62\sim 7\text{N}/\text{mm}$ 。根据磨除工件材料体积与砂轮磨损体积之比，计算出树脂结合剂金刚石砂轮磨抛加工钛合金 TC4 磨抛比约为 6。

磨抛比即磨削比，是指工件材料的磨除量与砂轮的磨损量的比值^[7]。磨抛比越大，说明砂轮的磨损越少，使用时间越长，使用成本越低，采用单一砂轮时所需进行的补偿越小，从而使得磨抛精度更高。

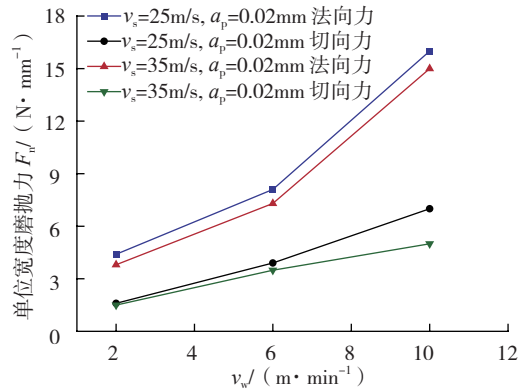


图4 进给速度对单位宽度磨抛力的影响

Fig.4 Effect of feed speed on grinding force of unit width

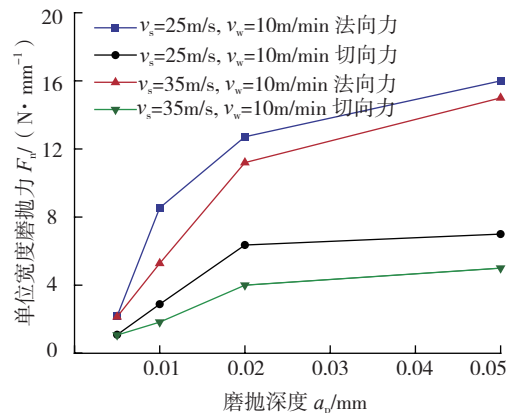


图5 磨抛深度对单位宽度磨抛力的影响

Fig.5 Effect of grinding depth on grinding force of unit width

2.4 表面粗糙度分析

通过磨抛获得优良的表面完整性，是保证钛合金零件加工质量的技术关键。评定表面完整性的指标有很多，这里选择表面粗糙度作为评定钛合金磨抛表面完整性的评定指标^[8]。图 6、图 7 分别是进给速度和磨抛

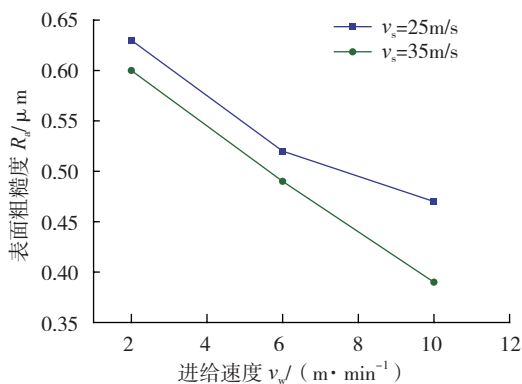


图6 进给速度对表面粗糙度的影响 ($a_p=0.02mm$)
Fig.6 Effect of feed speed on surface roughness ($a_p=0.02mm$)

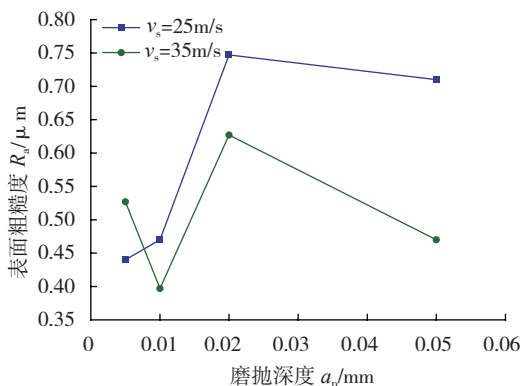


图7 磨抛深度对表面粗糙度的影响 ($v_w=10m/min$)
Fig.7 Effect of grinding depth on surface roughness ($v_w=10m/min$)

深度对工件表面粗糙度的影响。由图6可知,工件表面粗糙度值随着进给速度、砂轮线速度增大而减小, R_a 值均小于 $0.8 \mu m$ 。由图7可知,工件表面粗糙值随着磨抛深度的增大,在小范围里波动,并且 R_a 值都不大于 $0.8 \mu m$ 。

2.5 试验验证

根据前期锻造钛合金材料的工艺试验的结果,选择出适当的工艺参数对模拟叶片进行磨抛效果验证试验。选用的金刚石砂轮的参数如表3所示。

表3 选用的金刚石砂轮的参数

项目	规格/mm	磨料	粒度	结合剂	浓度/%	磨削线速度 / ($m \cdot s^{-1}$)
参数	$\phi 150 \times 10$	金刚石	80#	树脂	75	25

磨削时采用的工艺参数主要为:进给量为 $0.02mm$,砂轮线速度为 $25m/s$ 。表面粗糙度试验结果:磨削后叶身部分的表面粗糙度略有不同,表面粗糙度的数值范围低于 $0.65 \sim 0.71 \mu m$;叶身被磨削部分无烧伤,无变色。

精度试验结果:叶身型面与理论数值的偏差范围为 $-0.059 \sim +0.035mm$;叶片磨削部分无烧伤,无变色。

试验证明,通过工艺技术的深入研究,采用金刚石砂轮进行钛合金叶片磨抛,效果能够满足相关技术要求。

3 结论

针对钛合金材料磨削后表面粗糙度要达到 $0.8 \mu m$ 的技术要求,采用树脂结合剂金刚石砂轮进行钛合金 TC4 磨抛试验,用于选择和优化工艺参数,经试验和分析后得到以下结论。

(1)磨抛温度随着进给速度、磨抛深度的增大而增大,随着砂轮线速度的增大而减小。试验工艺条件范围内,工件加工面未发生烧伤时,该砂轮磨抛加工 TC4 最大材料去除率为 $2000mm^3/min$,此时磨抛温度变化范围为 $225 \sim 323^\circ C$ 。

(2)单位宽度磨抛力随着进给速度、磨抛深度的增大而增大,随着砂轮线速度的增大而减小。试验工艺条件范围内,工件加工面未发生烧伤时,单位宽度法向磨抛力和切向磨抛力变化范围分别为 $1.24 \sim 16N/mm$ 和 $0.62 \sim 7N/mm$ 。树脂结合剂金刚石砂轮磨抛加工钛合金 TC4 的磨抛比约为 6。

(3)工件表面粗糙度值随着砂轮线速度、进给速度的增大而减小,随着磨抛深度的增大在小范围里波动,且 R_a 值均小于 $0.8 \mu m$ 。

(4)综合考虑磨抛比,材料去除率以及表面粗糙度等因素,树脂结合剂金刚石砂轮磨抛加工钛合金 TC4 推荐用量为 $v_s=25m/s$, $v_w=10m/min$, $a_p=0.02mm$ 。

根据工艺试验的结果,可以确定金刚石砂轮能够满足钛合金材料磨削后的预定技术指标。经在双面仿形抛修设备上的验证试验后,确定推荐的磨抛工艺参数稳定、有效。

参考文献

- [1] 《航空制造工程手册》总编委会.航空制造工程手册—特种加工分册.北京:北京航空工业出版社,1996.
- [2] Davim J P. Surface integrity in machining. London: Springer-voelag, 2010.
- [3] 唐昆. TC4 钛合金高效深磨工艺试验研究及其磨削质量预测[D].长沙:湖南大学,2007.
- [4] 姚福生,郭重庆.先进制造技术.北京:清华大学出版社,2003.
- [5] 张红霞,陈志同,陈五一,等.金刚石滚轮修整效果与修整机理.北京航空航天大学学报,2008,34(7):816-820.
- [6] 冯喜荣.用金刚石砂轮磨削金属陶瓷.磨料磨具与磨削,1994(4):20-21.
- [7] 霍文国,徐九华,傅玉灿,等.超硬磨料砂轮干式磨削 Ti6Al4V 合金的表面完整性研究,山东大学学报(工学版),2012,43(3):100-103.
- [8] 盛晓敏,邓朝晖.先进制造技术.北京:机械工业出版社,2000.

(责编 叶枫)