

新一代航空发动机 转子叶尖高速磨复合加工技术

New Generation of High-Speed Grinding Technology for Aeroengine Rotor Tip

沈阳黎明航空发动机制造公司 翟 淳 刘丛辉



面对航空工业的快速发展,新一代航空发动机转子装配结构已完全有别于一、二代发动机,对转子叶片叶尖磨削也提出了更高的要求。近年来,随着三代发动机批量生产,其整体制造技术水平得到了较大的提升,但与国际先进航空发动机制造企

业相比,个别制造工艺仍存在较大差距,高速叶尖磨工艺就是其中一例。目前,采用高速叶尖磨进行发动机各类转子叶片叶尖的粗精加工、在线检测及在线去除毛刺已是国外航空发动机制造公司和维修公司普遍应用的工艺技术。某型发动机高压压气机转子因其转子叶片与鼓筒的周向装配结构不同于任何机种的轴向燕尾方式,其叶片与榫槽的配合间隙较大,高出其他机种5倍以上,在叶片活动量要求较大的情况下,磨削叶片外径保证其公差及径向跳动要求是一直以来追求的目标,转子结构及技术要求见图1。多年来,为使其叶片在拉伸状态下进行磨削,采取每片叶

片安装在模拟盘上,用螺钉逐个顶起叶片,使用普通改制设备低速对各级模拟盘进行磨削的工艺方法,不但生产效率低,而且质量状态不稳定,无法满足设计要求。采用高速磨及在线测量新工艺技术是转子提高叶片外径磨加工效率、提升质量水平最有效的方法。高速叶片叶尖磨削工艺,通过高速的工件转速,使转子叶片在高速条件下获得足够大的离心力,具有大活动量的叶片在贴紧鼓筒榫槽的状态下进行磨削与在线测量,磨削后的外径尺寸与工作状态保持一致,是保障发动机性能,使压气机转子在最小的工作间隙下确保发动机耗油率所实施的重要工艺手段。

片安装在模拟盘上,用螺钉逐个顶起叶片,使用普通改制设备低速对各级模拟盘进行磨削的工艺方法,不但生产效率低,而且质量状态不稳定,无法满足设计要求。采用高速磨及在线测量新工艺技术是转子提高叶片外径磨加工效率、提升质量水平最有效的方法。高速叶片叶尖磨削工艺,通过高速的工件转速,使转子叶片在高速条件下获得足够大的离心力,具有大活动量的叶片在贴紧鼓筒榫槽的状态下进行磨削与在线测量,磨削后的外径尺寸与工作状态保持一致,是保障发动机性能,使压气机转子在最小的工作间隙下确保发动机耗油率所实施的重要工艺手段。

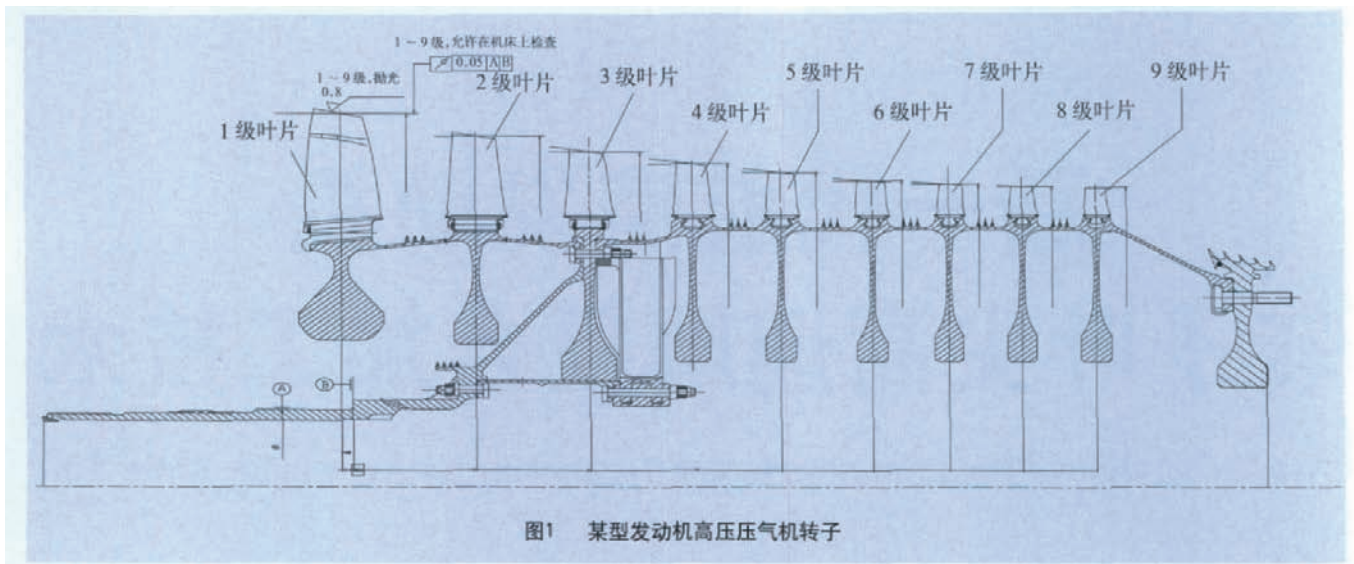


图1 某型发动机高压压气机转子

高速叶尖磨设备工程应用特点

高速叶尖数控磨床型号为DANTIP R3 1500/2000,磨削工件转速最高可达4000r/min,符合压气机转子各级叶片处于向外拉紧状态加工叶尖尺寸的技术要求。采用GE/Fanuc Series 16i CNC控制系统,其测量系统为DAN-BTM725非接触式测量系统,用以在线测量各级叶片的外径尺寸,并将每次测量的各级、每片叶片的外径尺寸以数据和图形的方式显示出来,提供的LVDT Probe测量系统用来对转子的非叶

表1 高速叶尖磨床的主要性能参数

性能参数	数值
工作台中心高	850 mm
支撑间距	(650 ~ 2000) mm
磨削直径	$\phi 300 \sim \phi 1370$ mm
最大磨削长度	2000mm
最大零件重量	1500kg
砂轮线速度	(33 ~ 60) m/s
工件转速	(100 ~ 4000) r/min
非接触测量系统测量范围	R120 ~ R725mm
跟踪测量的每级叶片数	(1 ~ 160) 片
空调控制温度	(20±5) °C
去毛刺刷轴速度	(800 ~ 1900) r/min

片表面进行测量。高速叶尖磨床具有砂轮自动修整功能,能通过程序设定砂轮自动修整时间。高速叶尖磨床提供的吸尘装置、标准空调系统,分别用以吸收磨削时产生的碎屑以及控制防护罩内温度,确保测量结果精确。高速叶尖磨设备属复合加工机床(见图2),其主要性能参数见表1。

转子高速叶尖磨工艺设计应用方案

高速叶尖磨工艺设计具有3种含义:一是转子叶片以拉伸状态下进行高速磨削的高效加工技术;二是以工序集中为原则的复合加工技术;三是实现在线检测的测量技术。

1 高速叶尖磨削的高效加工技术

数控高速叶尖磨削工艺已完全颠覆了原普通车改制磨床进行磨削叶片外径的工艺,其技术主要通过合理的工艺设计、正确的装夹方式、高效的磨削参数来体现。

(1) 工艺设计。

数控高速叶尖磨对磨削工件的自身不平衡量有较高要求,超过设定值即报警中断磨削,因此,转子叶尖在高速磨削前需采取一系列平衡工艺对

转子进行预先动平衡,经过试验,转子预先平衡的最终不平衡量控制在25g·cm以内。1、2级叶片外径余量较大,安排一次粗磨工序,其工艺流程见图3。

(2) 装夹方式。

为保证磨削后1~9级叶片的叶尖相对基准跳动在0.05mm以内,采取转子基准与工装基准过盈配合的液压工装,通过控制与转子配合的前后液压夹盘工装径向跳动不大于0.01,经0.2MPa压力的气密性检查,使转子与夹具紧密配合,达到转子设计基准与机床加工基准紧密贴合的精确定位。并经过多次试验



图2 高速叶尖磨设备复合加工机床

加工验证,用检查篦齿盘处48个螺母限力30N·m和机座处螺母限力60N·m来保证转子能够安全地进行磨削工作。

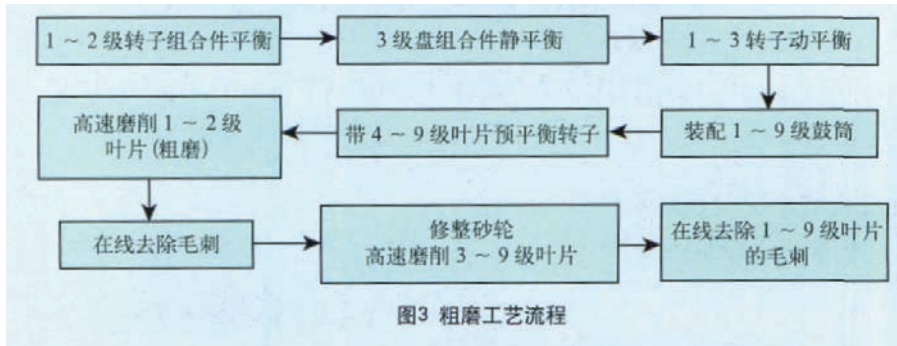
(3) 磨削参数。

设置磨削参数有3个关键点：一是选用的转速，能够保证磨削叶片在拉伸状态下（即叶片处于工作位置）磨削；二是因转子叶片材料为钛合金，选用的磨削参数要保证在高速磨削后叶片无灼伤；三是高速磨削过程的稳定性。3个关键点相互制约，需一并试验解决。

通过大量试验研究验证了转子

过程的一个永恒主题，高速叶尖磨在一台设备、同一基准下完成了叶片外径磨削、尖边去除毛刺、在线实测外径多种加工与测量要求，用一次装夹实现了多工序的复合加工，大大缩短转子加工生产周期，提高转子叶片外加工质量。

对1~9级转子叶片，采取逐级磨削，逐级去除毛刺的方法，通过摸



转速、叶片外径尺寸余量的大小、叶片角度以及磨削过程产生的毛刺都对磨削的稳定性及钛合金叶片灼伤有影响，为将这些影响减少到最小，采取分级设置转速，不同磨削阶段设定不同的进给倍率、停留时间，不同级叶片设定不同参数、粗磨预留0.2~0.3mm余量、去除毛刺后再进行叶片外径的精磨等方法，确定的高速磨削工艺参数见表2。

2 以工序集中为基础的复合加工技术

提高生产效率是零件切削加工

和大量试验，确定了高速磨削转速及去除毛刺转速（见表2），并达到粗糙度为 $0.8\mu\text{m}$ 的要求。

3 在线检测技术

发动机转子叶片外径磨削的在线检测是通过磨削程序的编制进行控制的，对1~9级转子叶片采取逐级逐片磨削以达到图纸规定尺寸和角度，采取非接触式测量系统实时在线跟踪、监控、测量磨削叶片外径值的方法进行在线测量，测量精度为0.001mm。叶片外径角度由砂轮头架转动相应角度后，再给以适当的径

向距离补偿来保证，这种在线测量能最大限度的消除重复定位误差，加工精度更易获得保证。

高速叶尖磨与在线测量技术应用评价

为了验证高速叶尖磨削技术应用结果的正确性，将在高速磨削的各级叶片分别采用模拟盘与三坐标测量进行对比试验，试验结果表明，经高速磨后在线测量的叶片外径在满足设计要求尺寸的情况下，各片叶片直径差为0.007mm，模拟盘上测叶片外径各片直径差为0.024mm，三坐标测量各片叶片外径差0.0074mm。通过对其他各级叶片试验数据对比分析，在模拟盘和三坐标上测量用高速叶尖磨床磨削的叶片外径数值均满足设计给定的尺寸公差带要求，且高速叶尖磨床上在线测量数据精度比模拟盘和三坐标上测量数据精度高。高速叶尖磨床磨削叶片外径的准确性，充分肯定了其加工精度和测量精度。

结束语

采用转子叶片外径高速磨削、在线去除毛刺与在线测量解决新一代发动机转子叶片外径磨削加工，攻克了多年来设计提出的转子叶片需在工作位置拉伸状态下进行磨削难点的同时，有效地克服了反复装配叶片、磨削叶片及去除毛刺耗时多、叶尖尺寸检测存在误差等问题，且这种复合加工工艺技术大大减少工作定位次数、缩短加工过程、提高了生产效率及产品质量。这表明基于工序集中的复合加工技术是提升新一代发动机制造水平的一个重要手段，也是国际先进制造技术发展的趋势。这一复合、高效的加工方法可在中航工业的军机及民机企业内得以应用，但需从工件的结构设计和加工经济性等方面综合考虑。

（责编 岩石）

表2 磨削转速与去除毛刺转速

叶片级数	工件转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	砂轮线速度 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	毛刺刷转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
1级	1615	33	1500
2级	1725	33	1500
3级	1800	33	1500
4级	1850	33	1500
5级	1900	33	1500
6级	1950	33	1500
7级	1975	33	1500
8级	2000	33	1500
9级	2000	33	1500