

航空发动机叶段类静子辊轧叶片 加工工艺

李深亮¹, 乔思佳², 姜绍西¹, 王志勇¹

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司叶片加工厂, 沈阳 110043;
2. 中国人民解放军驻黎明航空发动机有限责任公司军代表室, 沈阳 110043)

[摘要] 航空发动机叶段类静子叶片两端无安装板, 只有一段空间曲面的叶身型面, 后续与其他零组件焊接组合后形成扇形段。某发动机叶段类静子叶片为 GH4169 合金, 具有型面曲率变化大、前弯后掠、大扭角、进排气边缘成瘦腰形且进、排气边缘厚度差异大等特点。针对叶段类叶片的结构特点, 采用精密冷辊轧+数控砂带磨+非接触式测量的工艺方法, 工艺过程主要包括辊轧坯料的平板制坯、辊轧模具的设计制造与检测、进排气边缘 R 的数控砂带磨削以及白光测量机对叶片进行全型面测量的工艺方法。采用该工艺方法生产的叶片可以满足几何精度的要求, 而且具有优异的组织性能。

关键词: GH4169 合金; 精密冷辊轧; 辊轧模具; 数控砂带磨削; 白光测量

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.15.040



李深亮

高级工程师, 主要研究方向为航空发动机高压压气机叶片的辊轧成形技术、叶身型面的数字化检测技术。研究成果获得中航工业科技进步二等奖, 获得授权的发明专利 20 余项。

航空发动机叶片制造技术是透平机械制造业中最复杂的技术之一, 也是机械制造业中涉及专业领域非常广泛的一种制造技术^[1]。因此, 叶片制造技术的水平在一定程度上反映了发动机制造技术的水平。

叶片制造采用无余量精密辊轧及其毛料精密成形技术, 由于其制造成本低、生产效率高以及可实现产品的组织性能较常规制造工艺更为优异等特点, 作为叶片制造的先进技术倍受发达国家的重视^[2]。

20 世纪俄罗斯“萨留特”、“彼尔姆”等企业最早改装了辊轧机床并进行了钢和铝合金叶片的冷轧研究, 随后所实现的辊轧技术使叶片轧制工艺得到了广泛的工程应用; 美国通用电气和“阿夫克”公司, 都有在专用设备上由冷轧工艺制取叶片的报道^[3]。目前, 俄罗斯“萨留特”、“彼尔姆”等企业采用无余量精密技术

进行高温合金高压压气机叶片生产, 型面轧制后满足精度要求。

国内沈阳黎明公司采用无余量精密辊轧工艺对压气机不锈钢叶片、高温合金叶片生产的工程应用至今已有几十年的历史。该公司从 20 世纪 70 年代一直采用“挤压毛料-精密辊轧-形变处理”工艺生产不锈钢叶片至今, 保证了发动机服役条件下的长寿命与高可靠性要求^[4]。为满足叶片无余量精密轧制工艺需要, 黎明公司所拥有的高刚性窄台面轧机, 使轧辊、辊轧模具、叶片具有运动同步性, 并具备预载过盈轧制的调整功能, 保证了叶片精密辊轧工艺过程的适用性。

叶片的原材料为 GH4169 合金的冷轧板材, 根据整个叶型截面中最大的截面厚度, 再增加相应的变形系数确定冷轧板材的厚度规格。叶片加工的主要工艺流程为板料毛坯一

外轮廓加工—粗轧叶身型面—软化
热处理—精轧叶身型面—去除边缘
余量—数控砂带磨—白光测量。

精轧坯料的设计

设计粗轧坯料的目的是保证叶片精轧过程中叶片的各部位有较均匀的轧制变形量,避免在轧制过程出现欠压、开裂、侧弯等现象,同时降低精轧坯料制备的难度。

精轧坯料的设计采用全截面等比例变形余量的平板状坯料,其设计方法包括如下步骤:

(1)在叶身选择计算截面,其截面间距通常取 5~10mm,将全部截面的进排气边缘 R 中心的连线转成平行状态,如图 1 所示。

(2)绘制叶型截面中弧线,获取叶型法向厚度^[5]。绘制计算截面叶型的中弧线如图 2 所示,将中弧线 1 进行定距等分并确定等分点 O_1, O_2, \dots, O_n , 等分点间距 $S=1.5\sim 3.0\text{mm}$ 。通过每个等分点绘制中弧线的法向线,获取叶型法向厚度(图 3)。

(3)平直叶型盆面。在等分叶型中弧线之后的叶型截面内,逐点绕等分点将中弧线近似于展平,如图 4 所示。

基于上述中弧线展平后,再将纺锤形转换成盆面平板状叶型,如图 5 所示。

(4)截面余量的设计。对叶片截面以等比余量加放方式进行余量设计,形成精轧坯料的截面,将所有计算截面完成后,将原有截面距按等比例余量的压缩系数进行缩短计算,根据截面数据与截面距,构建完成精轧坯料。精轧坯料同样采用辊轧工艺进行加工,即粗轧叶身型面工序,该方法可以较好地降低制坯难度,提高坯料精度。

辊轧模具的设计

叶片的辊轧过程在 JQ71 型轧机

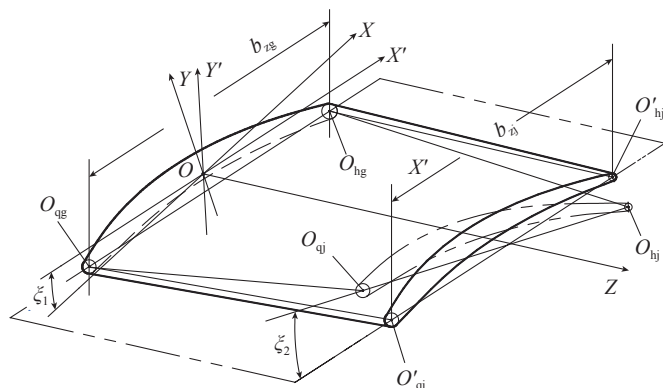


图1 调整进排气边缘 R 中心的连线平行示意图

Fig.1 Parallel schematic diagram for adjusting the connection of R center at inlet and exhaust edge

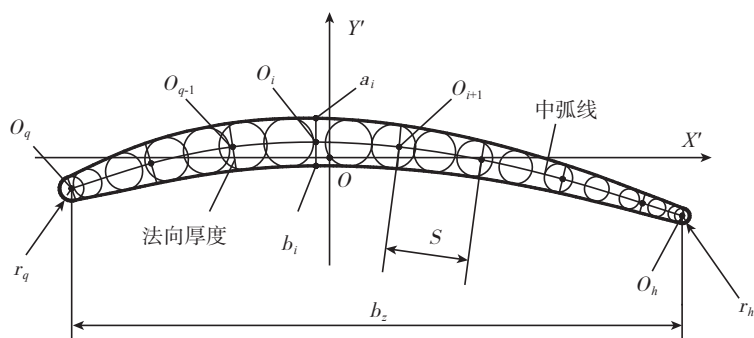


图2 绘制叶型中弧线示意图

Fig.2 Schematic diagram of blade's mean camber line

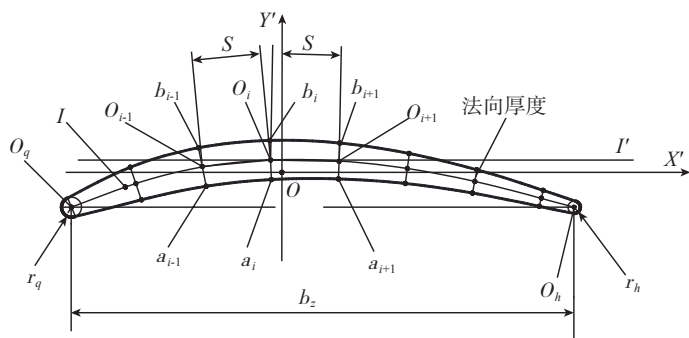


图3 叶型中弧线与其法向叶型厚度示意图

Fig.3 Schematic diagram of blade's mean camber line and its normal thickness

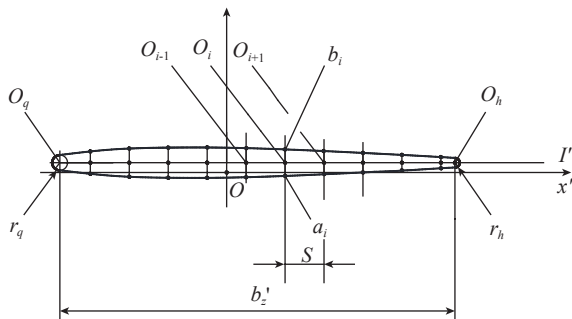


图4 叶型中弧线展平示意图

Fig.4 Schematic diagram of flattening blade's mean camber line

上进行,如图6所示,其辊轧模具的外轮廓按照轧机的安装要求设计,其轧模型面的设计过程大致分为以下5步^[6]。

1 叶片辊轧方向与旋转中心的确定

在叶片轧制过程中,叶型最大厚度处是轧制过程中流动阻力最小的部位,也是金属最易流动的方向,因此依据叶型厚度最大值的分布来确定辊轧叶片的轧制方向。在选择旋转中心时,要考虑到叶片型面上各点在轧制过程中盆、背两侧面相对于旋转中心的平衡。

2 进排气边缘的处理

叶片瘦腰型的边缘增大了辊轧模进排气边缘的处理难度。开式辊轧在辊轧过程中叶片展长的同时也伴随着展宽发生。因此,辊轧模具的边缘就需要进行型面的延伸处理。在满足叶片辊轧变形量、型面尺寸的同时,重要的是要保证边缘的光顺以及与叶身型面良好的衔接。

辊轧模的工作型面要比叶片型面于进、排气边每面加宽1.5~2.0mm,如图7所示。

3 进排气边缘分模与仓部

对辊轧模的型腔设计,还包括了与进、排气边缘延伸型面相接的桥部与仓部,如图8所示。

4 截面间角度的计算

对辊轧模的设计,正确建立叶片叶型截面间距与辊轧模相对应的截面距角度数尤为重要。如图9所示,辊轧模截面距角度数相对于轧模前端面的位置角 α_{wi} 为:

$$\alpha_{wi} = \frac{(l_i - l_0)}{\pi \cdot R_g (1 + S)} \times 180$$

式中, α_{wi} 为辊轧模对应叶片叶型截面位置角; l_i 为从叶片中心线位置的榫头底面至叶片截面间的距离,mm; l_0 为叶片中心线位置的榫头底面至辊轧起始截面间的距离,mm; R_g 为辊轧模节圆半径,mm; S 为前滑系数,取 $S=0、3\%、6\%$ 。

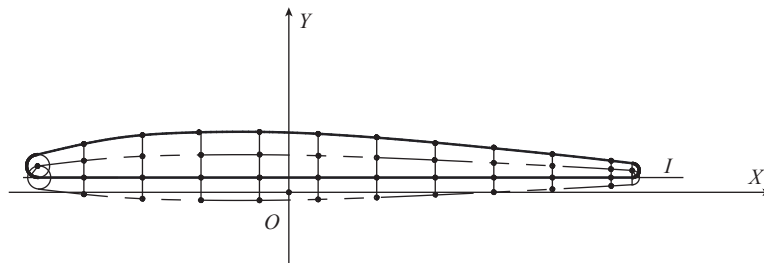


图5 叶盆平面平直示意图

Fig.5 Schematic diagram of flattening the concave of blade

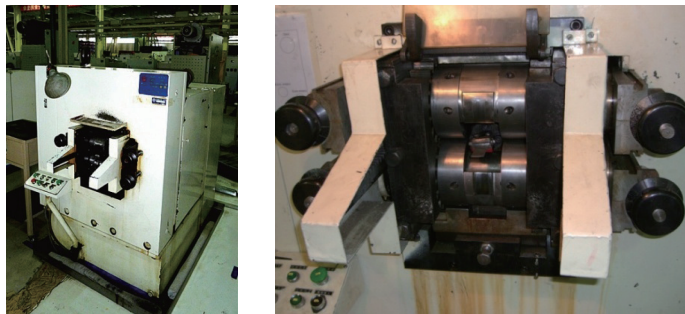


图6 JQ71型叶片辊轧机

Fig.6 JQ71 blade roll mill

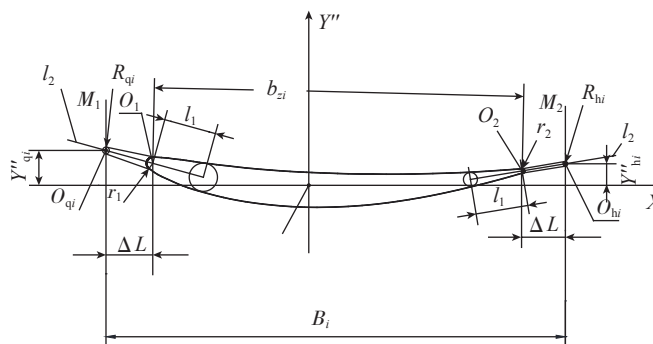


图7 辊轧模工作型面进排气边缘中心位置形成示意图

Fig.7 Schematic diagram of the center position of the inlet and exhaust edge of the rolling die working profile

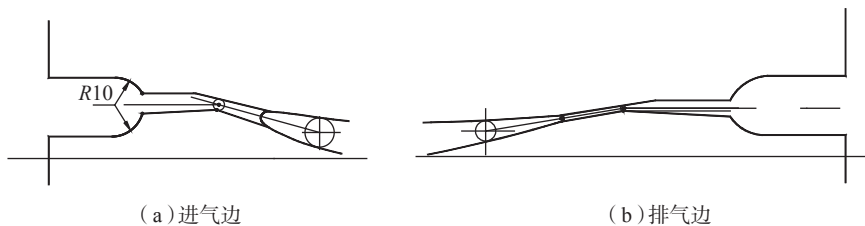


图8 辊轧模型腔进排气边缘桥部与仓部形成示意图

Fig.8 Schematic diagram of rolling model cavity inlet and exhaust edge bridging and warehouse forming diagram

5 叶片辊轧模具的补偿设计

叶片辊轧模具的补偿设计是叶片辊轧成型的核心技术,由于叶片存在型面弯角以及进排气边倾角变化

异常且呈现端弯与弓背的复杂叶型,按正常的叶片设计数据输入所形成的模具型面所轧制的叶片会出现明显的端弯区域背向增厚、排气边叶型

反弹、平直段盆向弯曲等问题。

目前国内一些院所开展的辊轧模拟仿真与生产实际偏离较大,无法用于指导辊轧模具设计。对此,根据多年实际轧制经验进行补偿设计后,再根据模具实际轧制结果进行2~3轮的迭代是目前获得辊轧模具型面数据较可行的方法,如图10所示。其补偿设计的方法有3种。

5.1 端弯区域背向增厚

叶片端弯区域是指分别靠近叶根和叶尖部位的E、F端弯区域,位于该区域的叶型截面于进气边一侧至排气边缘的叶型逐渐偏离K平面。沿叶型背向区域的增厚见图B₂-B₂、C₂-C₂切面所示,于边缘的增厚量通常为 $\delta_{b2}=0.10\sim 0.35\text{mm}$,而且随着端弯角度 α 的增大而加大。

导致叶片端弯区域的背向增厚,如D-D切面位置所示的轧模受力状

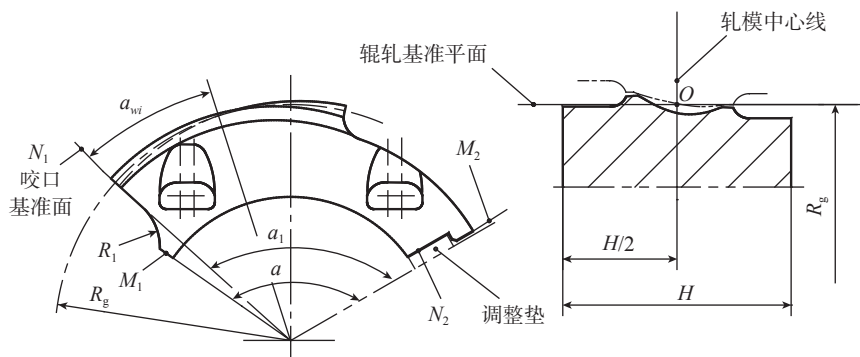


图9 辊轧模上位置角度表达示意图

Fig.9 Schematic diagram of rolling die position angle

况有关。对存在端弯的叶片于端弯区域的轧制成形过程,上下轧模咬合之间存在一平行于辊轧基准平面的作用力 N_D ,该力作用到 $O'X'$ 轴向的分力 N_X 会产生轧辊轴系的轴向窜动;作用到 $O'Z'$ 轴向的分力 N_Z 会产生上下承力主齿轮啮合及其传动系统、轧模的压紧等窜动,由此产生叶片端

弯区域的背向增厚。

消除或减少叶片端弯区域背向增厚现象的方法是轧模型腔设计过程中对E、F端弯区域的盆面保持原始形状不变的情况下,背面按抵消增厚量的反向设计。

5.2 排气边叶型反弹

叶片排气边叶型反弹,是指经

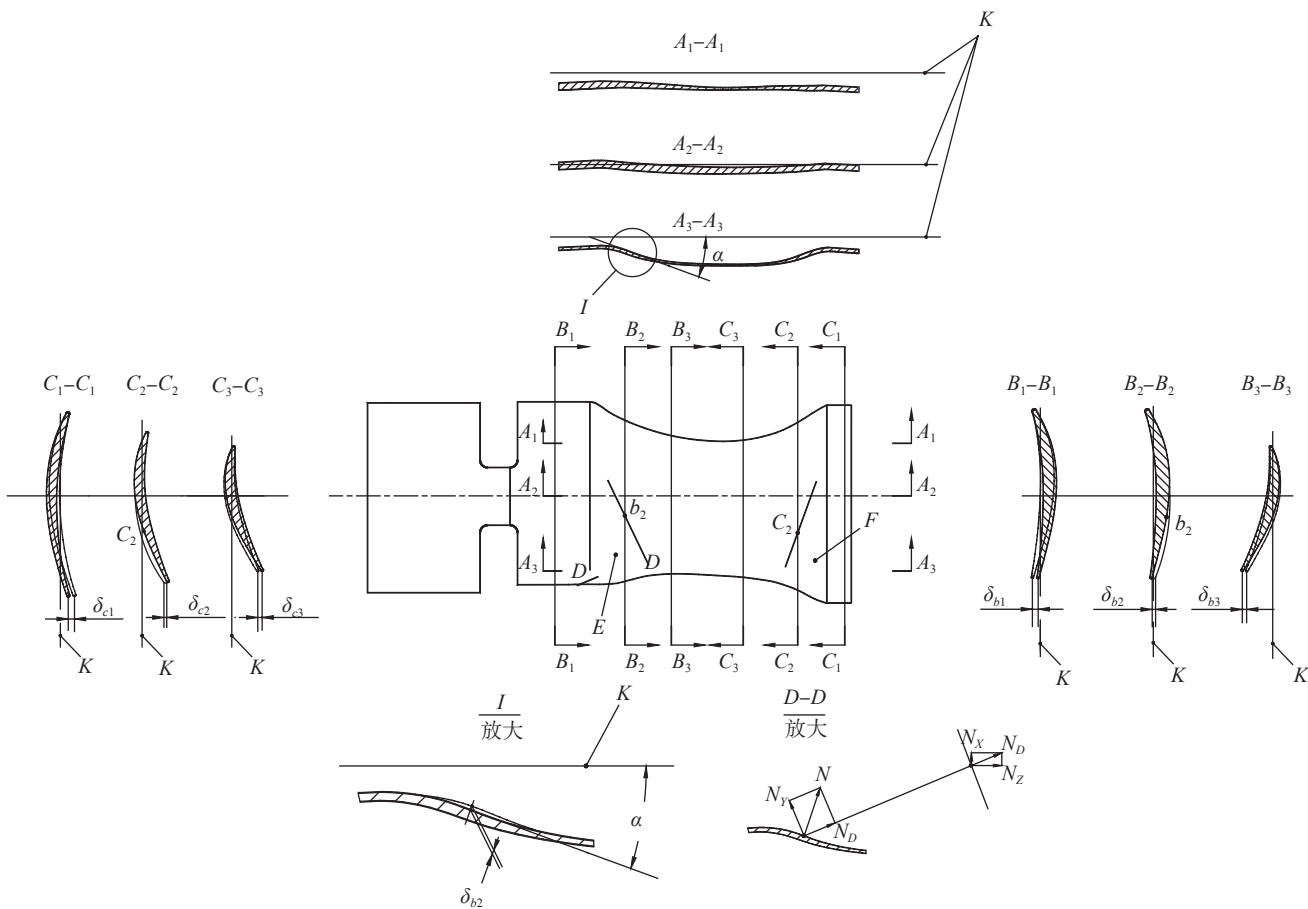


图10 叶片轧制常见变形示意图

Fig.10 Schematic diagram of common deformation of blade rolling

轧制后的叶片叶身中部截面排气边一侧产生偏向背面的扭转回弹,见 B_3-B_3 、 C_3-C_3 切面所示,其回弹量 δ_{b3} (δ_{c3})=0.05~0.20mm 之间,而且随着端弯角度 α 的增大而加大。

导致排气边叶型偏向背面反弹的原因,同样是由于大端弯的叶型存在,导致叶根、叶尖截面与叶身中部截面的排气边倾角变化大,易产生叶型反弹现象。

消除或减少以上回弹现象的方法是在轧模型腔设计过程中对产生回弹区域的盆背型面采用抵消回弹的反向设计。

5.3 直段叶型盆向弯曲

叶片直段叶型盆向弯曲是指经轧制后的叶片位于端弯一侧的根部与尖部两端平直段叶型,沿叶身纵向偏向盆面的拱形倾斜,见 B_1-B_1 、 C_1-C_1 切面所示,其弯曲量 δ_{b1} (δ_{c1})=0.10~0.20mm 之间,而且伴随端弯角度 α 的增大而加大。

对直段叶型盆向弯曲的产生,也是由于大端弯的叶型存在,叶根、叶尖截面与叶身中部截面的排气边倾角变化大,导致位于排气边一侧的背面轧模辊径较盆面轧模辊径要大,轧模背面向着盆面不对称作用力的存在所产生的扭转变形是主要成因;叶身中部截面排气边一侧产生偏向背面的扭转回弹等,也会加剧直段叶型向着盆面弯曲的形成。

消除或减少以上直段叶型向着盆面弯曲的方法是轧模型腔设计过程中对产生弯曲的盆背型面按抵消回弹的反向设计。最终成型的辊轧模具如图 11 所示。

叶片型面及进排气边缘磨抛

辊轧完成后的叶片,经过切边工序去除辊轧过程中产生的展宽和展长,采用自适应加工技术进行进排气边缘 R 的成型和叶片叶身型面的抛光加工^[7]。采用数控砂带进行叶片叶身型面的抛光加工分为两个过程:

型面局部超差点的去除、型面进排气边 R 加工和表面修光。

1 磨削原理及设备

砂带式抛光^[8]是以砂带作为磨具对工件进行磨削加工的方式。是借助黏附于砂带上的磨料层所形成的锋利微刃切入工件并去除工件材料而实现磨削加工的过程。

数控带式抛光是将叶片固定在机床工作台的转轴上,通过数控驱动叶片和磨削砂带,实现多轴联动的全自动叶片抛光过程。数控带式抛光机对叶片实现自动抛光的空间联动。对叶片数控砂带抛光过程,由六轴联动生成叶型曲面,实现在砂带宽度范围内与曲面拟合而不产生干涉、过切等。

图 12 为 SANMOHIDA 公司提供双工位多轴数控砂带叶片磨削加工 2MGY5540C-2M 型设备。

2 编程软件系统

该设备配套专用的编程软件为 TBGS 软件,可根据叶片型面理论模型,自行选取磨削区域和磨削方案。主要完成根据叶片模型生成数控加工代码、模拟仿真以及向数控砂带磨床传输数控代码的任务。

TBGS 应用 VISUAL C++ 编程工具并基于 Spatial 公司 ACIS 开发的砂带磨削加工软件系统, ACIS 是面向对象软件技术的三维几何造型引擎,具有很强的几何建模能力以及几何数据处理能力,在 ACIS 平台上研究的该加工软件具有精度高、效率高、系统稳定等特点。该软件系统主要功能:

(1) 导入由其他 CAD 软件如 Pro/E、UG 等生成的叶片 3D 实体模型文件,文件格式符合 IGES 等标准。

(2) 导入叶片曲面网格点坐标的文本文件,由本软件系统自动生成叶片曲面模型。

(3) 根据用户指定的定位基准、加工路径策略,计算生成满足精度要求的六轴刀位点。

(4) 根据刀位点和叶片模型,应用 CAD 技术进行磨削加工仿真;

(5) 根据刀位点进行后置处理,生成适合设备的程序文件。

根据“型面去余量一边倒圆角一型面修光”对模型进行相应的处理,分为型面去余量、型面修光,如图 13 所示。

为了更加准确地选取加工位置,



图11 叶片辊轧模具
Fig.11 Blade roll die



图12 数控砂带磨机床
Fig.12 CNC belt grinding machine

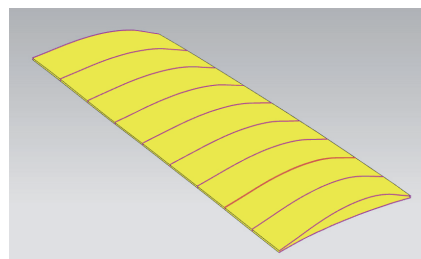


图13 磨削模型构建
Fig.13 Construction of the grinding model

将盆背两面的叶型分开,并将进排气边缘处的模型裁剪掉,方便单独选取。并且将界面线加入到模型中,使选取超差截面时更加直观。

3 叶片砂带磨削加工参数研究

(1)砂带选择。磨削采用3M公司的砂带有3种^[9]:红色尼龙砂带、A6专用砂带和蓝色尼龙砂带,规格为:2450mm×5mm的环形砂带。根据不同砂带的特点,对“型面去余量一边缘倒圆角一型面修光”进行砂带的选择。

红色尼龙砂带硬度较强,基底耐水性能较高,加工效率高,但表面效果一般,用于去除型面超差点,并且加入冷却液提高砂带使用寿命。

A6专用砂带是一种磨料类似于金字塔的砂带,基底耐水性能低,对棱边的加工效率极高,用于边缘倒圆角。

蓝色尼龙砂带硬度低,对型面余量影响较少,但是加工后表面效果佳,可以有效提高叶身表面粗糙度。

(2)加工参数。加工过程中,需要对进给速度、磨削压力、磨削趟数、主轴转速等参数进行优化。在兼顾加工质量和加工效率的同时确定较优化加工参数。某级静子叶片高点磨削、磨削进排气边缘R和型面上光所使用的参数见表1。磨削后的叶片如图14所示。

叶片型面的测量

1 测量设备

叶片的型面测量使用德国温泽公司生产的MAXOS/CORE型点光源多轴高速白光叶片测量机^[10](图15)。该测量方式的白光点测头直接以光点对物体表面进行采点,不存在因接触式测量测头半径补偿而造成的测量失真^[11];白光点测头的光点直径可小至35μm,能够测量到叶片表面小的几何特征,最大限度降低了叶片实测表面的失真度;测量速度快,由高精度旋转头控制定位的白光

测头的采点速度可达4200点/min。

2 测量过程

叶片的型面测量采用专用夹具和标准件相结合的方式对叶片的

定位和坐标系的建立,编制测量程序。其测量过程包括:

(1)测量准备工作。白光测量机运行前,检查并清洁设备后,进行

表1 某级静子叶片数控砂带磨削工艺参数

工步	工部内容	砂带类型	磨削压力 / N	砂带进给 / (r·min ⁻¹)	速度进给 / (mm·min ⁻¹)
1	型面局部高点 (去除量不大于0.03mm)	红色尼龙带	12.5	1490	360
2	进排气边缘R加工	A6专用砂带	11.5	1080	360
3	叶片盆背面上光	蓝色尼龙带	12.5	1080~1275	360

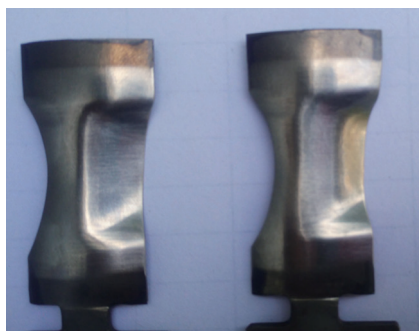


图14 磨削完成后的叶片
Fig.14 Blade after grinding

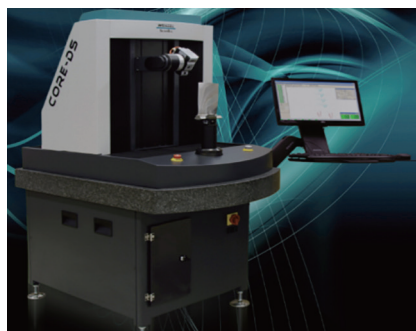


图15 CORE-DS型白光测量机
Fig.15 CORE-DS white light measuring machine

Operator	Part Number	Date	Machine
...

Process	AS	AS	AS	AS	AS	AS
GRINDING	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
...

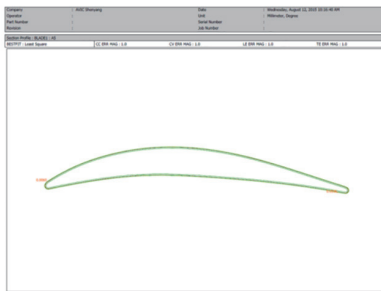
Section	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
...

Parameter	Lower TOL	Upper TOL	Measured	Actual	Offset
...

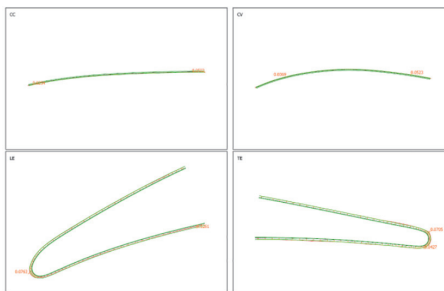
Section	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
...

(a) 型面全部截面报告信息

(b) 单截面报告信息



(c) 单截面整体图形信息



(d) 单截面分段图形信息

图16 白光测量报告

Fig.16 White light measurement report

测量前设备的校准。校准过程分为测头校准和转台校准两部分。

(2) 理论数据模型准备。测量前应准备测量所需的叶片理论模型, OpenDIMS 软件可识别 IGES、STEP 等通用 CAD 数据格式。准备的理论模型在建模坐标系里的位置和方向应与实际叶片装夹在夹具上的位置和方向保持一致。在软件中选择 MENU → ImprotCAD → IGES 选择对应的 “*.IGES” 文件导入模型。

(3) 测量机参数设定。在进行编程和测量之前应对测量机参数进行设定, 包括测头运动和扫描的速度、加速度, 测头摆动的角度范围, 光的强度等。

(4) 测量坐标系 MCS 建立。使用测量标准件, 根据标准件设定的特征通过 3-2-1 法建立坐标系。建立坐标系过程需进行重复迭代, 直至偏差小于收敛标准。

(5) 测量路径规划原则。测量路径规划应在安全的前提下, 使测头以最短的时间到达下一个测点, 减少空运动行程, 提高测量效率。

(6) 扫描测量点密度要求。在叶片型线曲率较大处扫描测量点密度高, 曲率较小处扫描测量点密度低。对于前后缘变化剧烈的区域, 应密集采点, 以确保测量的数据与实体的符合。

(7) 生成截面测量路径。将导入的 IGES 和创建的平面进行求交计算, 得出所需的轮廓线。在特征操作区中选择截面的测量方式, 设定测量参数, 生成测量程序。

(8) 生成 DMIS 程序。软件将设定测量参数、创建坐标系、创建测量程序以及测量完成之后的数据分析和公差设定等操作都自动转换成 DMIS 语句, 写入到 DMIS 程序中, 操作完成后只需要将光标切换到需要执行的程序首行, 执行 GO 命令即可。

(9) 波纹度测量。叶片的波纹

度扫描, 过程与轮廓扫描类似。截取时将横向截面改为纵向截面, 截取出的截面线即为需测量的波纹度线。

(10) 测量数据评定原则。根据设计方法和测量要求, 选用与设计相统一的评价方法来进行误差评定。通常选用最小二乘法对测量点进行拟合, 实现测量点与理论截面的误差分析和判定。

(11) 测量公差的设定。在叶片评价模块中设置整个叶片的各项测量项目的公差, 对测量完成的数据按照给定的公差进行拟合评价, 确定叶片的测量结果和状态, 输出报告。测量结果的报告形式如图 16 所示。

叶片性能检查

叶片金相组织检查如图 17 所示。辊轧静子叶片的性能指标数据见表 2。

结论

采用精密冷辊轧 + 数控砂带磨 + 非接触式测量的工艺方法进行叶段类静子叶片生产, 提高了叶片的加工精度和质量, 方法可行:

(1) 精轧坯料的等比例余量设计方法简化了坯料结构, 降低了制备的难度, 叶片的组织性能满足设计文件的要求;

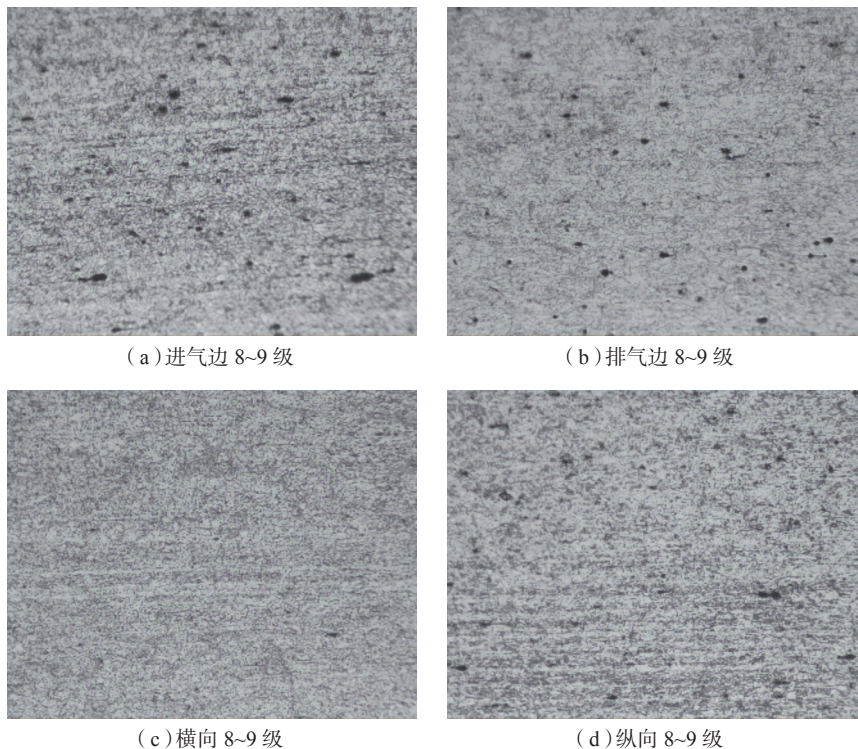


图17 辊轧叶片的晶粒度检查

Fig.17 Grain size inspection of rolled blades

表2 GH4169合金辊轧静子叶片力学性能表

指标	室温性能				持久性能			
	σ_v /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	Ψ /%	HRc	温度 / $^{\circ}$ C	σ /MPa	t/h
实测	1400	1300	23	—	47	650	690	93:19
	1420	1290	23	—	47	650	690	93:19
要求	≥ 1200	≥ 850	≥ 5	—	38~48	650	690	≥ 20

注:持久性能每隔 8h 增加 35MPa 至断。

(2) 辊轧模具设计过程中的优化及误差补偿技术,提高了辊轧模具的精度水平,满足叶片的轧制需求;

(3) 数控砂带磨削技术解决了进排气边缘 R 加工的技术难题,消除了叶片手工抛光带来的质量波动,提升了叶片加工质量;

(4) 叶片非接触式测量解决了接触式三坐标在大扭角叶片测量过程中产生的余弦误差问题,提高了叶片的测量质量。

参考文献

- [1] 王聪梅. 航空发动机典型零件机械加工[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014.
- WANG Congmei. Aeroengine typical parts machining[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014.
- [2] ALBRO H L. The fabrication of small gas turbine compressor blades by precision rolling[J]. Metallurgist, 2017, 61: 5-6.
- [3] 《透平机械现代制造技术丛书》编委会. 叶片制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- Turbine machinery modern manufacturing technology series editorial board. Blade manufacturing technology[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [4] 姜绍西, 李深亮. 叶片辊轧模具的设计方法[J]. 科技创新与应用, 2017(10): 158.
- JIANG Shaoxi, LI Shenliang. Blade rolling die design method[J]. Technological Innovation and Application, 2017(10): 158.
- [5] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 压气机[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
- Aero engine design manual chief editorial board. Aero engine design manual: compressors[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001.
- [6] 乌·姆·列别捷夫, 施·德·科什廖夫, 乌·恩·罗戈仁. 塑性变形法制造叶身无余量燃气轮机发动机叶片[M]. 牛玉华, 译. 莫斯科: 军事出版社, 1984.
- М·ЛЕБЕДЕВ, ШИ-ДЕ-КОСЛЕВ, У·ЕН·ЛО ГЕРЕИ. Plastic deformation method for manufacturing blade less gas turbine engine blades[M]. NIU Yuhua translated. Moscow: Military Press, 1984.
- [7] ZHANG Y, CHEN Z T, NING T. Reverse modeling strategy of aero-engine blade based on design intent[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(9-12): 1781-1796.
- [8] 黄云, 黄智. 现代砂带磨削技术及工程应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2009.
- HUANG Yun, HUANG Zhi. Modern abrasive belt grinding technology and engineering application[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2009.
- [9] 3M 公司. 3M™Cubitron™II 产品—砂带[EB/OL]. [2018-05-28]. https://www.3m.com.cn/3M/zh_CN/company-cn/.
- 3M Corporation. 3M™Cubitron™II product-abrasive belt[EB/OL]. [2018-05-28]. https://www.3m.com.cn/3M/zh_CN/company-cn/, 2018-05-28.
- [10] 温泽. 新一代光学扫描系统 CORE D[EB/OL]. [2018-05-28]. <http://www.wenzel-cmm.cn/model/ProductShow.aspx?ProductID=179&TypID=90>.
- WENZEL. New generation optical scanning system CORE D[EB/OL]. [2018-05-28]. <http://www.wenzel-cmm.cn/model/ProductShow.aspx?ProductID=179&TypID=90>.
- [11] 王森安. 接触式三坐标测量透平叶片精度问题与解决方案[J]. 航空制造技术, 2013, 53(17): 67-69.
- WANG Miaoan. Non-contact CMM for precision of turbine blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 53(17): 67-69.

通讯作者: 李深亮, E-mail: ls1111.m@163.com。

Research on New Manufacturing Process of Stator Blade Segments of Aero-Engine

LI Shenliang¹, QIAO Sijia², JIANG Shaoxi¹, WU Zhiyong¹

(1. Blade Processing Plant, AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China;

2. Military Representative Office of Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

[ABSTRACT] The stator blade segments of aero-engine only process complex surface without double-ended platform, which are welded with other components subsequently. A typical stator blade segment high-temperature alloy GH4169 is featured with abrupt change in curvature, bowed & twisted surface, and obvious change in leading & trailing edge radius. A machining approach for the workpiece using the technique of precision rolling, CNC abrasive belt grinding and non-contact detection was proposed. The detailed process mainly includes the flat slab of rolling blank, the design-manufacture-detection of rolling die, the CNC abrasive belt grinding of leading & trailing edge, and white-light interference measurement of blade surface. The blades produced by this process can meet the requirements of geometric accuracy and have excellent microstructure and properties.

Keywords: GH4169; Precision rolling; Rolling mold; CNC abrasive belt grinding; White-light interference measurement

(责编 大漠)