

航空叶片制造工艺及坐标检测方法分析

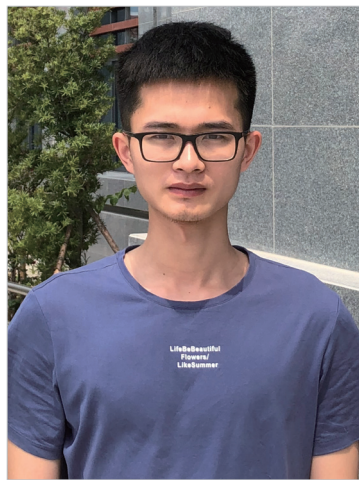
俞 辉,王振忠

(厦门大学航空航天学院,厦门 361005)

[摘要] 以当前航空发动机制造现状为研究对象,简要概述电解加工、数控加工、精密锻造及超塑性成形等叶片主流加工工艺及其制造关键性技术,并引出发动机叶片制造过程的测量手段。阐述三坐标测量过程中叶片坐标定位、测量轨迹规划及点云降噪的实现方法;简要分析了激光测头安装精度、激光投射角度、测量景深等对激光扫描法测量精度的影响。对航空叶片精密制造工艺及与之相适应的高效精密检测技术快速发展具有一定指导意义。

关键词: 发动机叶片; 制造工艺; 坐标检测; 激光扫描; 数据采集

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.09.064



俞 辉

硕士研究生,研究方向为航空发动机核心元件精密加工及测量技术、机电一体化。

航空发动机作为飞机主要动力源,具有十分复杂的机械结构及制造工艺,其核心部件当属压气机叶片,叶片的制造质量可直接影响发动机服役性能和寿命^[1]。当前,航空发动机叶片的制造手段主要有超塑性成型/扩散连接、数控加工、精密锻造

等^[2-4],但所有制造工艺均无法做到一步到位的加工效果,需结合配套的检测工艺来指导后续加工。航空叶片检测手段主要包括接触式和非接触式两大类^[5],对叶片检测设备及算法的研究已经成为航空发动机制造的关键。

本文阐述当前航空发动机叶片的主要加工工艺及目前测量手段的关键技术并分析其各自优缺点。

发动机叶片制造工艺

鉴于航空发动机叶片的高强度工作及特殊的工作环境,高温合金、钛合金、复合材料等高强度材料得到了大量使用^[6],保证了发动机性能及寿命,同时也带来了加工性能上的难题。航空发动机叶片制造工艺种类繁多,主要包括电解加工、数控加工、精密锻、铸造等,下面结合航空发动机压气机叶片工作需求阐述主流金属叶片加工关键技术及存在的缺陷。

1 电解加工

电解加工是基于确定的阴极形

状、尺寸使阳极溶解成型的加工手段。从20世纪70年代起,随着电解工艺的发展,电解工艺被广泛应用于叶片制造业^[7]。国内多采用双阴极逼近电解加工压气机叶片,如图1所示,将叶片毛坯固定,叶背、叶盆阴极同时向毛坯逼近,电解同时整体成型叶片型面及缘板。双阴极逼近电解的工艺避免了刀具与叶片之间的挤压,可有效防止叶片变形及应力产生。但由于叶片型面扭曲程度大,电极与叶片之间的流场、电场分布呈不规则分布,给电极设计带来了很大的困难,通常使用有限元等软件分析叶片、电极间多场耦合情况。Wang等^[8]根据时间函数计算钝化电流对电流效率的影响,并取得良好成效。朱顺康等^[9]提出等入流角流场概念,在流场中将各流道沿入流方向延伸形成等入流角场,使电解液均匀流入,提升了流场稳定性。Zhu等^[10]阐述了电解加工过程中电解液压力对阴极变形的影响,提出利用W型流道来减小电解液压力,并将仿真结果同实

际加工结果对比,证明 W 型流道对叶片电解加工中薄电极的变形抑制具有良好的作用效果。刘嘉等^[11]在二维电解流场中引入辅助流场,有效抑制二维流场因流场突变而引起的流场缺陷,提高流场一致性的同时有效保证加工重复精度。

叶片电解加工有效解决了叶片材料难加工问题,但电解过程的多场耦合及流场分布问题是影响叶片加工精度及效率提升的主要障碍,南京航空航天大学朱荻等学者开展了深入的研究并取得了丰硕成果。

2 数控加工

航空发动机叶片的数控加工是利用铣刀或砂轮等刀具轮廓包络叶片曲面并去除材料的加工形式,是常见的叶片加工手段,其中包括工件装夹、轨迹规划、数控程序、检测方法等部分。

随着高速、超高速切削技术的发展,钛合金、高温合金等难加工材料的硬、黏刀等加工特性得以改善^[12]。高速、超高速切削采用大切削速度、小切削深度、小进给加工工件,有效改善切屑生成形态,同时单元切屑可带走大量切削热,避免使加工过程处于“死谷”,刀具寿命大幅提高^[13]。随着切削速度的进一步提高,切削力下降,加工表面质量提高,生产效率大幅提升。

由于航空发动机叶片型面复杂,通常需要依赖五轴联动加工中心^[14],国外五轴联动叶片加工中心比较知名的厂商有瑞士的威力铭-马黛尔(Willemin-Macodel)、德国的哈缪尔(Hamuel)、意大利的法拉利(C.B.Ferrari)等,国内5轴联动叶片加工中心的研制成功打破了国外对叶片5轴数控加工机床的垄断,极大改善了我国航空发动机自主制造能力。叶片5轴联动加工在机床控制及编

程上较为复杂,尤其在整体叶盘等复杂件的加工中需要专业编程人员规划路径并编写数控程序,在前期准备时间上耗时较长。国内在叶片数控加工技术引进初期,由于对变形规律、工艺编排、刀具磨损规律等经验的不足,叶片数控加工常留有0.1~0.2 mm的铣削余量,最终依靠砂轮、砂带等磨抛工艺去除余量,并因此引入了多次装夹及测量误差,严重影响加工效率及质量。陈亚莉等综合考虑工艺、夹具、数控加工模型等因素影响,实现了叶片小余量铣削,产品合格率由20%提升至75%以上,刀具寿命显著提升,为精密铣削叶片批量生产提供了技术基础^[15]。

针对大推力发动机叶片,需保证叶片表面光滑过渡。硬件上需保证加工系统传动平稳,进给准确,以减小加工颤振;同时也可采取主动抑制方式,利用软件预测加工过程振动

频域分布,并附加人为振动抑制颤振。目前时域仿真法和解析法^[16-17]是获得加工振动频域分布图的主要方法;软件上需保证叶片型面设计光滑,常利用NURBS曲线设计、规划加工路径^[18],因此在叶片加工系统中多集成有基于NURBS曲线的CAD/CAE系统(图2)。

3 精密锻造

精密锻造是利用精密模具及高精度锻压工具锻造发动机叶片的加工工艺,同时需依赖配套检测、辅助工序。精密锻造发动机叶片余量小,型面流线过渡平滑,可有效提升叶片承载能力,同时有效提升发动机整体服役时间及寿命^[19]。

精锻叶片表面余量小,但由于锻造过程模具与材料之间的挤压效应严重,同时由于叶片型面的特殊构造,在冷却过程中难以避免会产生应力。因此,在锻造过程前需对锻造过

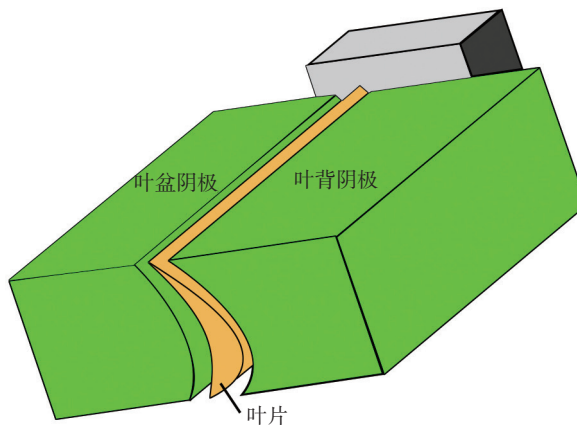


图1 双阴极逼近电解示意图

Fig.1 Schematic of double cathode approximation electrolysis

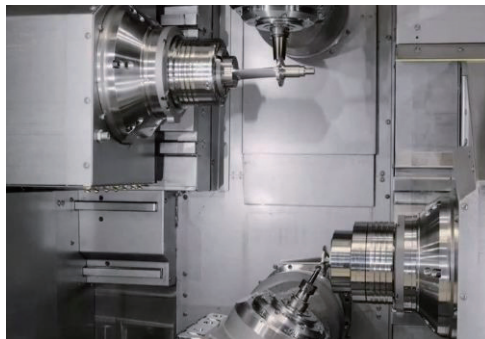


图2 叶片5轴铣削加工

Fig.2 Five-axis blade machining

程变形程度、变形温度、冷却速度进行完整规划,同时对锻压设备稳定性、模具精度、检测精度提出了较高要求。精锻过程材料温度场、流动应力、流动方式相互作用且相互影响,通常需要通过求解热力学耦合方程确定温度场及应力作用结果。Oden等^[20]提出热加工变形及热耦合数值模拟方法;王中原等^[21]验证了始锻温度对叶片应力场与应变场分布均匀性影响规律并以此获得性能更优的精锻叶片。为获得性能良好的叶片精密锻造叶片通常在特殊部位留有锻造余量,需利用机械加工方式去除余量,例如阻尼台、前后缘等。

综上所述,精密锻造叶片工序简单,去除余量小,强度高,但在配套设施上具有较高要求。

4 超塑性成形/扩散连接

超塑性成形/扩散连接是利用塑性优越的材料产生大程度塑性形变,再利用较小压力及较低温度使多块超塑性成形材料间原子扩散连接成型的工艺。早期发动机叶片多采用实心结构,随着航空业发展,发动机性能的提升复合了叶片刚度、气动效率、涵道比、比重量等要求,使得发动机叶片成型技术不断朝空心、宽弦等方向发展,超塑性成形/扩散连接工艺以其对空心宽弦叶片制造优越的普适性得到广泛关注。

Rolls-Royce公司在钛合金风扇叶片上不断创新,现已发展至第3代钛合金风扇叶片,该叶片采用桁条结构代替蜂窝结构,在实际工作过程中桁条参与承受载荷,相对蜂窝结构,在相同载荷下可降低15%叶片质量^[22]。目前我国哈尔滨工业大学、南京航空航天大学、北京航空制造工程研究所、西北工业大学等院校均有开展超塑性成形/扩散连接课题,已经取得较大进展^[23-25],但制件在复杂程度、成本、效率、质量控制方面与国外相比仍存在差距。

超塑性成形扩散连接中需经过

多重热循环,冷却过程中应变速率及冷却速率无法准确控制,使得叶片毛坯热应力释放与重新分布不均匀而导致变形。因此,通常在超塑性成形扩散连接后仍需对叶片进行检测、再加工等工序。

发动机叶片检测手段

综合前述航空发动机金属叶片制造工艺,大都无法做到零余量,尤其对于精密铸/锻造、超塑性成形/扩散连接工艺,由于应变的不确定性,导致叶片成型重复性较差,必须具备配套的测量手段来确定后续机械加工余量。国内众多知名高校积极开展专用叶片型面点云坐标信息测量设备的研发,但均处于实验室阶段,成熟产品鲜有报道,如何快速并有效获取叶片型面信息仍是目前中国航空工业所面临的一大难题。

叶片面型测量是利用测量设备获取叶片型面点云坐标信息的方法,目前叶片测量存在的难点有:

(1)可靠性。叶片粗糙度、型面曲率分布,检测环境等均会对测量结果产生较大影响,单频数测量可能存在结果失真,然而在大批量叶片生产过程中通常不会对同一个加工件进行多次测量,因此具备高可靠性的测量方式才能保证测量过程高效、有序进行。

(2)测量精度。叶片测量是反映加工精度的评判手段,对质量要求较高的叶片则需要匹配更高精度级别的测量手段,航空发动机叶片测量误差要求通常控制在1~10 μm 之间。

(3)测量效率。叶片通常都以批量生产,庞大的叶片数量需匹配高速的测量手段,影响测量效率的因素主要有搬运、装夹、测量工时等,合理有效的工艺规划是提高叶片测量效率的重要保障之一。

(4)测量数据处理。因叶片型面(薄壁、宽弦、弯掠)复杂,伴随庞大的叶片数量带来了数据处理的问题,

叶片测量数据包含定位、降噪、模型匹配等步骤,如何有效且快捷地提取叶型、弦长、前缘后缘半径等参数是评判测量数据处理算法优劣性的重要标准。

根据测量器件是否与叶片接触可分为接触式、非接触式2大类,其中接触式主要有三坐标测量机法、标准样板法等;非接触式主要有光学法、声学法、电磁法等。下面简要阐述当前主流叶片检测手段及各自优缺点。

1 三坐标测量机

三坐标测量机是典型的接触式测量设备,测量方式为将测量头固定于测量机末端,当探针沿着叶片表面划过时,由测量头内部元件采集探针反馈的压力信号转换为电信号,从而获取叶片表面轮廓信息。三坐标检测具有适用性强、适用面广、检测快速、结果准确等优点,在叶片生产企业得到广泛应用。近年来,随着我国航空工业的发展,三坐标测量机在叶片生产主机厂家逐渐得到普及。

三坐标测量机测量叶片关键性技术包括叶片坐标定位、测量轨迹规划、点云降噪等。

(1)叶片坐标定位。叶片点云定位指测量得到的点云与参考点云之间的位置、姿势之间的空间关系的确定。定位质量的优劣直接影响测量点云匹配精度及重要参数提取质量,是三坐标高效、准确测量的重要前提。目前点云匹配主要通过ICP(iterative closest point)^[26]算法及遗传算法^[27]匹配位姿。ICP通过不断迭代最近点的方式对齐测量点云及参考点云,具有通用性高的特点,同时可省略特征提取等步骤,但对初值选取的偏差过大可能导致匹配结果局部过优,结果不尽人意。遗传算法具备更强的全局搜索能力,但初始种群及遗传参数的设置对结果影响较大,可能最终导致定位匹配结果不收敛或收敛缓慢。

叶片测量点云及参考点云的精确匹配作为叶片测量重要步骤,其算法上仍需要进一步改进,从而保证匹配质量及效率的提升。

(2) 测量轨迹规划。叶片测量轨迹规划策略在影响测量效率的同时还可能致数据的有效性降低^[28],其关键在于关键点选取及干涉问题。目前叶片测量轨迹规划主要采用七段等高截面测量的方式,由于叶片型面曲率变化较大,需尽量保证测点分布自适应叶片型面曲率变化率,通常采用弦高公差法,通过对相邻测量之间的弦高阈值来确定实际测点的间距,从而保证采点密度与叶片曲率匹配度,但该方式容易导致在平坦区域采点过于稀疏,因此通常在最大采点间隙上附加步长阈值。蔺小军等^[28]提出了根据叶型面轮廓度误差评定叶片型面精度的方法,可获得更贴合实际叶片型面的型线,更有利于提取叶片型面重要参数,对叶片测量效率、质量的提升具有重要意义。

叶片测量干涉问题影响叶片测量策略的可行性,在轨迹规划初期必须考虑测头与叶片发生碰撞的可能性,并对测头位姿的选择上进行调整。

(3) 点云降噪。点云降噪的目的在于对测量点云进行去噪、平滑处理,使得测量点云更加符合实际叶片型面。测量过程中由于测头、环境、机器精度等影响难免使测量数据掺杂噪声及偏差,若不对测量数据进行后续处理容易导致测量结果严重偏离实际值。点云数据降噪手段主要包括直接观察法、距离判别法、角度阈值法、弦高阈值法^[29]等。直接判别法根据点云数据与参考点云对比,利用肉眼剔除“坏点”,该方法操作简单,对设备要求不高,但剔除效果较差,无法完整去除数据中的“坏点”;距离判别法利用拟合曲线与点之间的距离作为判别依据,若距离超过设定阈值,则认为该点为“坏点”;

角度阈值法利用相邻三点形成的角度作为判别依据,当角度大于阈值角度时,则认为角点为“坏点”,该方法容易受到叶片型面及采样间距的影响,稳定性较差;弦高阈值法利用相邻三点组成的三角形高线作为判别依据,当弦高大于阈值时认为该点为“坏点”。上述去噪方法均对局部噪声信号的去噪具有一定效果,但在点云全局平滑上的作用较小,因此有学者结合测点邻域及滤波的方法处理点云数据^[30],该方法能准确地识别特征点和噪点,保证点云数据特征的完整性的同时全局平滑数据曲线。

三坐标测量法具有较高精度,但三坐标测量只可获取部分截面轮廓数据,并由专用曲面造型软件获取最终型面,若造型算法与叶片型面不匹配,同样会造成测量精度下降,失去三坐标测量机的精度优势。而若增加测量截面数量,则会导致测量效率降低。因此,测量路径规划质量对三坐标叶片测量质量的影响同样十分重大。国外很多叶片测量轨迹规划软件表现突出,RATIONAL DMIS 可智能测量叶片指定部位截面,界面友好且操作简洁;PC-DMIS Pro 软件具有强大的向导功能,可帮助用户快速寻找测量工件的最佳方法;雷尼绍 APEXBlade 软件包极大简化了连续五轴扫描路径的生成,并可自动确定叶片最佳五轴滑行扫描路径。国内对该领域尚处于起步阶段,部分研究机构在该领域虽已崭露头角,但在功能完善及使用便捷性上仍有很大发展空间。

2 激光扫描法

激光扫描法利用激光投射与三角测量原理,将激光光束投射到叶片表面,并由 CCD (Charge-Coupled Device) 相机接收激光束,根据投射接收光束之间的三角关系获取表面三维数据。激光扫描法是典型的非接触式测量手段,其精度相对接触式测量低,一般可达到 $1\sim 50\ \mu\text{m}$;激光测量可避免测量设备与工件直接接

触而导致测头磨损;激光测头可固定在四坐标测量机或四轴联动机床上使用,可实现叶片在位测量,避免重复定位导致加工精度下降。但激光扫描测量受到激光测头安装精度、激光投射角度、测量景深等因素影响。

(1) 激光测头安装精度。激光测量不同于接触式测量,在理想测量状态下光斑空间位置可由安装位姿几何关系计算,但实际安装过程容易产生偏差,如图 3 所示,当激光测头位姿偏离理想位置时,表现为光斑偏离计算位置,测量值为偏离光斑处的型面几何值。

(2) 激光投射角度。三角激光测量传感器通常为直射激光测头,测量过程中入射激光与被测表面垂直,若二者存在一定倾斜角度,呈现在 CCD 成像面上为接收光斑偏移。现有激光测头大部分在算法上集成了对倾斜角度误差的补偿,但在单一位姿的叶片测量中倾斜角度通常超过激光测头允许的最大值,因此有学者对此类问题提出了多位姿测量方案的研究,保证利用最少的位姿完成叶片测量。Spyrid 等^[31]讨论了叶片检测规划总体策略,利用规划策略确定待测曲面上每个测量点的可达锥交集,并获取最少数量的测头位姿;王福海^[32]利用聚类算法聚类整片叶片测量需要的位姿,并结合采点策略获

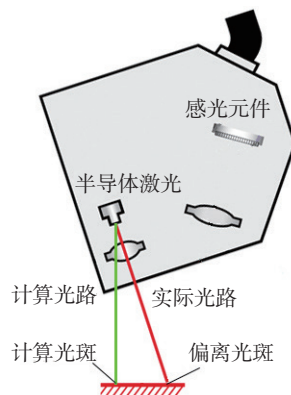


图3 激光测头安装误差示意图
Fig.3 Schematic of laser probe installation error

取叶片表面点云。

(3) 测量景深。由于叶片属于大扭转量自由曲面, 必须考虑在激光测头量程内的干涉问题, 现有激光测头种类繁多, 部分长距测头可保证叶片完整测量, 例如雷尼绍 LK-G500/505 测头最大测量距离可达 1m, 但测量精度远无法达到测量要求, 因此在针对不同叶片测量的测头选取上需因地制宜。

3 结构光测量技术

结构光测量法是利用投射光束经过光栅投射到叶片上形成结构光的技术。在结构光测量中, 叶片表面空间深度信息被结构光编码成为条纹图, 由图像采集设备采集条纹图信息, 最后根据曲面与图像采集设备之间的空间关系计算叶片型面信息^[33]。

结构光法具有光路简单、精度高、提供全场信息、易于实现自动化等特点, 在三维自由曲面测量上得到广泛应用。结构光根据投影方式不同可分为点结构光、线结构光与面结构光, 点结构光测量范围小, 精度尚不如激光测量; 线结构利用 CCD 相机采集经过叶片表面调制的结构光条, 调制光条包含了叶片空间信息, 通过坐标变换得到叶片型面坐标; 随着逆向工程的发展, 现已发展成为面结构光测量方式, 利用光栅条纹投射到叶片表面, 由双目 CCD 采集光栅条纹图案, 并通过光栅条纹图案灰度值解算叶片型面点云空间坐标^[34]。虽然面结构光可获得大视场叶片型面空间点云信息, 但同样具有很多光学测量共同存在的问题, 例如物象线性关系影响、系统像差影响、光吸收影响、叶片粗糙度影响等。随着神经网络对非线性问题求解的发展, 光学测量系统普遍存在的缺陷正逐渐被改善, 结构光测量凭借其光路简单、视场范围大等优势正体现出光明的应用前景。

结论

文中总结分析了航空叶片电解

加工、数控加工、精密锻、铸造等制造工艺的技术特点, 并对现阶段主流的接触式和非接触式检测技术做了对比。阐述目前叶片三坐标测量机测量难点及关键技术, 激光扫描法误差来源及测量精度影响因素; 分析结构光测量法非线性误差来源并展望非线性误差补偿的可能性。

可以预见, 航空叶片越来越高的精密制造工艺必定要求与之相适应的高效精密检测技术快速发展。因此随着精密传感和智能化技术发展, 配备光学非接触式和坐标接触式多传感器测头复合的检测方式以及智能化在线检测反馈技术等将有较好的应用潜力。

参考文献

[1] 李海宁, 赵赟, 史耀耀, 等. 航空发动机风扇/压气机叶片制造关键技术[J]. 航空制造技术, 2013, 56(16): 34-37.

LI Haining, ZHAO Yun, SHI Yaoyao, et al. Key technology of NC machining for aeroengine fan/compressor blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(16): 34-37.

[2] 杨金发, 张军, 李家永, 等. 航空发动机先进数控加工技术应用分析[J]. 金属加工(冷加工), 2015(11): 3-6.

YANG Jinfa, ZHANG Jun, LI Jiayong, et al. Analysis of advanced numerical control machining technology of aeroengine[J]. Metal Working, 2015 (11): 3-6.

[3] 刘维伟, 张定华, 史耀耀, 等. 航空发动机薄壁叶片精密数控加工技术研究[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(3): 329-331.

LIU Weiwei, ZHANG Dinghua, SHI Yaoyao, et al. Study on net-shape NC machining technology of thin-blade of aeroengine[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2004, 23(3): 329-331.

[4] 任军学, 冯亚洲, 米翔畅, 等. 航空发动机精锻叶片自适应数控加工技术[J]. 航空制造技术, 2015, 58(22): 52-55.

REN Junxue, FENG Yazhou, MI Xiangchang, et al. Adaptive techniques in CNC machining of aeroengine precision forging blades[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(22): 52-55.

[5] 彭志光. 基于改进凸包算法的叶片型面检测[D]. 长沙: 华中科技大学, 2012.

PENG Zhiguang. The blade surface inspection based on the improved convex hull algorithm[D]. Changsha: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

[6] EYPASCH E, WILLIAMS J I, WOODDAUPHINEE S, et al. Application and development of composite materials for new generation of civil aircraft engines[J]. Aeronautical Science & Technology, 2012, 82(2): 216-220.

[7] 徐正扬. 发动机叶片精密电解加工关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.

XU Zhengyang. Key technologies research on precision turbine blade ECM[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.

[8] WANG L, ZHU D. Shape evolution and prediction of three dimensional workpieces in electrochemical machining[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2005(S3): 241-246.

[9] 朱顺康, 刘嘉, 朱荻. 发动机叶片电解加工等入流角流场设计与试验研究[J]. 电加工与模具, 2016(3): 27-32.

ZHU Shunkang, LIU Jia, ZHU Di. Design and experimental investigation on flow field with equivalent inflow angles in ECM of turbine blades[J]. Electromachining & Mould, 2016(3): 27-32.

[10] ZHU D, ZHU D, XU Z Y. Optimal design of the sheet cathode using W-shaped electrolyte flow mode in ECM[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(1-4): 147-156.

[11] 刘嘉, 徐正扬, 万龙凯, 等. 整体叶盘叶型电解加工流场设计及实验[J]. 航空学报, 2014, 35(1): 259-267.

LIU Jia, XU Zhengyang, WAN Longkai, et al. Design and experiment of electrolyte flow mode in electrochemical machining of blisk[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(1): 259-267.

[12] LI A, CHEN X, WANG D. Experimental investigation on chip morphologies in high-speed dry milling of titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(9-12): 933-942.

[13] LIST G. Cutting temperature prediction in high speed machining by numerical modelling of chip formation and its dependence with crater wear[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012, 55(3): 1-9.

[14] 丰海聪. 航空发动机叶片五轴联动数控铣削加工方法及软件开发[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2011.

FENG Haicong. Five axes NC milling

method and software development of aeronautical blade[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2011.

[15] 陈亚莉, 李美荣, 宋成. 压气机叶片型面精密数控铣加工技术应用研究[J]. 航空发动机, 2016, 42(4): 93-97.

CHEN Yali, LI Meirong, SONG Cheng. Investigation on precision NC milling technology of compressor blade surface[J]. Aeroengine, 2016, 42(4): 93-97.

[16] MANN B P, BAYLY P V, DAVIES M A, et al. Limit cycles, bifurcations, and accuracy of the milling process[J]. Journal of Sound & Vibration, 2004, 277(1-2): 31-48.

[17] INSPERGER T, MANN B P, STÉPÁN G, et al. Stability of up-milling and down-milling, part I: alternative analytical methods[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(1): 25-34.

[18] 乐英, 王颖. 基于 NURBS 插补算法的汽轮机叶片数控加工[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(1): 78-81.

LE Ying, WANG Ying. NURBS interpolation algorithm for turbine blade in NC machining[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2017(1): 78-81.

[19] 余江山. 高温合金叶片精锻成形研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2008.

YU Jiangshan. Research on precision forging of high temperature alloy blade[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2008.

[20] ODEN J T, BHANDARI D R, YAGAWA G, et al. A new approach to the finite-element formulation and solution of a class of problems in coupled thermoelastoviscoplasticity of crystalline solids[J]. Nuclear Engineering & Design, 1973, 24(3): 420-430.

[21] 王中原, 齐广霞. TC11 钛合金叶片精锻过程三维热力耦合有限元模拟[J]. 沈阳理工大学学报, 2011, 30(5): 86-90.

WANG Zhongyuan, QI Guangxia. Research on 3D coupled thermo-mechanical FEM simulation of TC11 alloy blade precision forging process[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2011, 30(5): 86-90.

[22] 李杰, 巨亚斌. 遑达 XWB 发动机的创新性技术和市场前景预测[J]. 江苏航空, 2012(4): 58-61.

LI Jie, JU Yabin. Trent XWB engine's innovative technology and market prospects forecast[J]. Jiangsu Aviation, 2012(4): 58-61.

[23] 孙超. TC4 钛合金中空叶片扩散连接-超塑成形技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

SUN Chao. DB-SPF technology of hollow blade for TC4 titanium alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[24] 于卫新, 李森泉, 胡一曲. 材料超塑性和超塑成形/扩散连接技术及应用[J]. 材料导报, 2009, 23(11): 8-14.

YU Weixin, LI Miaoquan, HU Yiqu. Superplasticity and application of superplastic forming/diffusion bonding technology[J]. Materials Review, 2009, 23(11): 8-14.

[25] 张学学. TC4 多层板超塑成形/扩散连接试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

ZHANG Xuexue. Experiment investigation for multi-sheet superplastic forming/diffusion bonding structure of TC4 Titanium Alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.

[26] BESL P J, HASEGAWA O. A method for registration 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1992, 14(2): 193-200.

[27] 吴广宽, 席光, 梁武科, 等. 基于自适应遗传算法的叶片铸件最佳匹配问题求解[J]. 铸造技术, 2006, 27(2): 101-104.

WU Guangkuan, XI Guang, LIANG Wuke, et al. New approach for blade roughcast optimal matching based on self adapting genetic algorithm[J]. Foundry Technology, 2006, 27(2): 101-104.

[28] 蔺小军, 单晨伟, 王增强, 等. 航空发动机叶片型面三坐标测量机测量技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(1): 125-131.

LIN Xiaojun, SHAN Chenwei, WANG Zengqiang. Measurement techniques of coordinate measuring machine for blade surface of aero-engine[J]. Computer Integrated Manufacturing

Systems, 2012, 18(1): 125-131.

[29] LEE K H, WOO H, SUK T. Data reduction methods for reverse engineering[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(10): 735-743.

[30] 张毅, 刘旭敏, 隋颖, 等. 基于 K-近邻点云去噪算法的研究与改进[J]. 计算机应用, 2009, 29(4): 1011-1014.

ZHANG Yi, LIU Xumin, SUI Ying, et al. Research and improvement of denoising method based on K-neighbors[J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(4): 1011-1014.

[31] SPYRIDIS A J, REQUICHA A A G. Accessibility analysis for the automatic inspection of mechanical parts by coordinate measuring machines[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1990: 1284-1289.

[32] 王福海. 航空叶片激光扫描测量规划与适应性修形技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.

WANG Fuhai. Research on measurement planning of laser-scanning and adaptive geometric modification for aero-engine blades[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

[33] 万美婷. 基于面结构光的航空发动机叶片三维测量研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.

WAN Meiting. The three-dimensional measurement research of aero-engine blade based on surface structured light[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2012.

[34] 叶海加, 陈罡, 邢渊. 双目 CCD 结构光三维测量系统中的立体匹配[J]. 光学精密工程, 2004, 12(1): 71-75.

YE Haijia, CHEN Gang, XING Yuan. Stereo matching in 3D measurement system using double CCD structured light[J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(1): 71-75.

通讯作者: 王振忠, 博士、副教授, 研究方向为先进光学制造、精密加工装备及工艺技术、机电一体化、精密测量, E-mail: wangzhenzhong@xmu.edu.cn.

Analysis of Manufacturing Technology and Coordinate Measuring for Aeronautical Blade

YU Hui, WANG Zhenzhong

(College of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

[ABSTRACT] In this paper, the current manufacturing status of aero-engine blades is taken as the research object. We made a brief overview of ECM, CNC machining, precision forging, the key technologies and measurement methods used in manufacturing of aero-engine blades. The implementation of coordinate positioning, measurement trajectory planning and noise reduction of coordinate measurement is also considered. And then we analyze the influence of laser probe installation accuracy, laser projection angle, depth of field on laser scanning measurement, which has certain guiding significance to the development of precision manufacturing and efficient testing technology of aero-engine blades.

Keywords: Aero-engine blade; Manufacturing process; Coordinate measurement; Laser scanning; Data acquisition

(责编 大漠)

(上接第51页)

Research on Shrinkage Rate Prediction Method of Casting Based on BP Neural Network

TIAN Guoliang, BU Kun, QIU Fei, ZHANG Xiandong, ZHANG Yali, REN Shuaijun

(The Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] In the design process of die cavity of investment casting, the inaccurate enlarged die cavity that based on shrinkage rate can lead the die need mold-repair for many times. As an initial study, a shrinkage rate prediction method of typical structure casting in the solidification process is proposed in this article. The method can provide a way of thinking for shrinkage rate prediction of casting. As BP neural network has strong fault tolerance and robustness function. Thus, the mapping model between geometric parameters that attach to the structure and shrinkage rate is built based on BP neural network. As there is no determination criterion for the number of the hidden layer neurons of the BP neural network in different cases, thus, the influence of the number of neurons in the hidden layer on the accuracy of modeling is researched. The result is that for the typical structure casting, when the number of neurons in the hidden layer is three, the mapping model has the least prediction error. In this case, the shrinkage rate average deviation of the predicted and measured values is 0.09%. The mapping model can better realize shrinkage rate prediction of the casting in solidification process.

Keywords: Shrinkage rate; BP neural network; Prediction method; Structure; Casting

(责编 大漠)

(上接第63页)

[ABSTRACT] Scanning electron microscopy was employed to investigate the aging precipitation behavior of beta process TC17 titanium alloy. Tensile properties and fracture toughness were used to characterize the effect of different aging treatment on mechanical property. The results show that the secondary α phase was nucleated, precipitated and grew on the β phase matrix. The fraction of secondary α phase and tensile strength decreased, secondary α phase did not diffuse and fracture toughness increased with the increase of aging temperature after solution in two phase region. The tensile strength linearly decreased, plasticity reduced and fracture toughness linearly increased. The secondary α phase was acicular after aging in a short time at 630°C. The thickness of secondary α phase (d) was coarsened from 42nm to 138nm and fraction (ω_a) decreased from 12.6% to 4.5% which can increase the tensile strength, reduce the plasticity and fracture toughness. The relationship between the tensile strength R_m and the thickness and fraction of secondary α phase was $R_m = 1.01\omega_a - 0.95d + 1274.1$.

Keywords: TC17 titanium alloy; Aging temperature; Aging time; Secondary α phase; Mechanical property

(责编 大漠)