

精密锻造技术专题

高性能整体叶盘制造技术研究进展

罗皎, 李淼泉

(西北工业大学 材料学院, 西安 710072)

摘要: 整体叶盘是先进大推力航空发动机的一种新型结构部件, 它的应用对于提高发动机性能、简化结构、降低重量、提高可靠性等具有重要的作用。主要介绍了航空发动机整体叶盘的先进制造加工技术, 综述了采用精密锻造技术、精密铸造技术、线性摩擦焊接技术、数控铣削加工技术和电解加工技术制造整体叶盘的国内外研究现状与各项技术的优缺点, 并展望了我国高性能整体叶盘先进制造技术的发展方向。

关键词: 航空发动机; 整体叶盘; 精密制造; 微观组织; 性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.06.001

中图分类号: TG316

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2015)06-0001-07

A Review on the Manufacturing Technology of High Property Blisk

LUO Jiao, LI Miao-quan

(School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT: Blisk was a new integrated structure of blades and disk actually used in the aero-engine of high thrust-weight ratio, and the structure form was beneficial to reduce the number of parts and weigh which greatly improved the engine performance and reliability. The paper introduced advanced manufacturing technologies for the blisk, and reviewed the recently development and their merits and drawbacks of precision forging technology, precision casting technology, linear friction welding technology, NC milling technology, and electrochemical machining technology used to manufacture the blisk, and finally analyzed the development tendencies of the blisk manufacturing technology in our countries.

KEY WORDS: aero-engine; blisk; precision manufacturing; microstructure; mechanical property

国外先进大推力发动机的风扇、压气机、涡轮上都大量采用了整体叶盘, 例如 F119-PW-100, F100-PW-229A, XTC67/1 核心机、F414-GE-400, F110-GE-129R, GESFAR 试验风扇、EJ200 等军用高性能发动机, 以及 BR715, P. A. T 验证核心机、基准发动机等民用发动机上都成功应用了整体叶盘结构。根据美国国防部的高性能涡轮发动机技术(IHPTET)的第3阶

段计划, 到2020年, 战斗机上的发动机涡轮将全部采用整体叶盘结构。

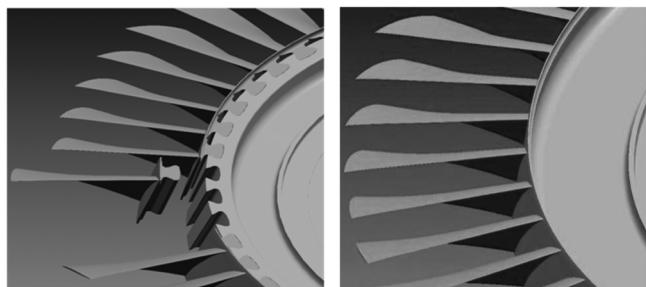
图1所示为航空发动机盘与叶片结构示意图。与传统的分离榫槽结构相比, 整体叶盘将发动机转子的叶片和轮盘设计成一体, 省去了传统连接的榫头、榫槽及锁紧装置, 使发动机整体结构大为简化, 结构质量减轻, 零件数量减少, 并且消除了榫头与榫槽间

收稿日期: 2015-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(51205318); 西北工业大学中央高校基本科研业务费专项资金(2012KJ02002)

作者简介: 罗皎(1981—), 女, 四川南充人, 博士, 副教授, 主要研究方向为精密塑性加工理论与技术。

的气流损失,提高了气动效率;同时,避免了由于装配不当造成的磨蚀,尤其避免了榫头和榫槽间的微动磨损,使发动机的工作寿命和安全可靠性大大提高^[1]。因此,研制航空发动机用高性能整体叶盘是新一代飞行器发展的重要方向,而发展高性能整体叶盘制造技术,已经成为发展先进大推力发动机关键件制造技术的重大而迫切的需求。



a 分离榫槽结构

b 整体叶盘结构

图1 航空发动机盘与叶片结构示意图

Fig. 1 Illustrations of the mechanical attachment blade-disk (a) and of a blisk (b) of aircraft engine

然而,整体叶盘结构复杂,通道窄、叶片薄、弯扭大、易变形,材料多为钛合金、高温合金等高性能金属材料 and 钛基、钛铝化合物等先进复合材料^[2],其综合制造技术属国际性难题,因此,如何发展优质、高效、低成本的整体叶盘制造技术是我们目前面临的挑战。文中综述了近年来国内外整体叶盘的先进制造加工技术与研究现状,通过对国内外研究现状的梳理和总结,作者就整体叶盘的各种制造方法提出了自己的见解,并展望了我国高性能整体叶盘的先进制造技术的发展方向。

目前,整体叶盘制造技术主要有以下5种:(1)精密锻造技术;(2)精密铸造技术;(3)线性摩擦焊接技术;(4)数控铣削加工技术;(5)电解加工技术。近年来,国内外学者对上述各个方面开展了一些研究工作,取得了一定进展,分述如下。

1 精密锻造技术

整体叶盘多采用精密锻造作为制坯手段,精密锻造零件的尺寸精度可以达到 $\pm(0.1 \sim 0.25)$ mm,表面粗糙度可以达到 $0.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$ ^[3]。美国GE公司已用等温锻造技术制造出了带叶片的压气机双性能整体叶盘转子,材料利用率提高4倍^[4]。孟庆通等人^[5]采用等温锻造工艺生产出金属流线分布合理,组织、性

能满足要求的TC17合金整体叶盘。郭鸿镇等人^[6-7]采用可控应变等温锻造的方法,研制出了组织和力学性能满足要求的TC17合金双性能整体叶盘(图2),整体叶盘不同部位的微观组织如图3所示。由图3可以看出,盘体部位为网篮组织,叶片部位为等轴细晶组织;叶片的室温力学性能为: $R_m = 1220 \text{ MPa}$, $A = 14\%$, $Z = 32\%$;轮盘室温力学性能为: $R_m = 1180 \text{ MPa}$, $A = 9.5\%$, $Z = 33\%$;叶片 400°C 力学性能为: $R_m = 1000 \text{ MPa}$, $A = 12\%$, $Z = 37\%$;在室温、440 MPa应力条件下高周疲劳性能可达到 10^7 以上,轮盘部位断裂韧性达到了 $57.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 。杨艳慧等人^[8]基于有限元数值模拟,探索了TC11合金整体叶盘锻件组织均匀性的评价方法。采用精密锻造作为制坯手段制造整体叶盘的方法,锻后叶盘坯料均未成形出叶片形状,叶片形状还需由后续机加工保证,因此采用精密

图2 TC17合金双性能整体叶盘等温模锻件^[6]

Fig. 2 Dual property blisk of TC17 alloy after isothermal forging

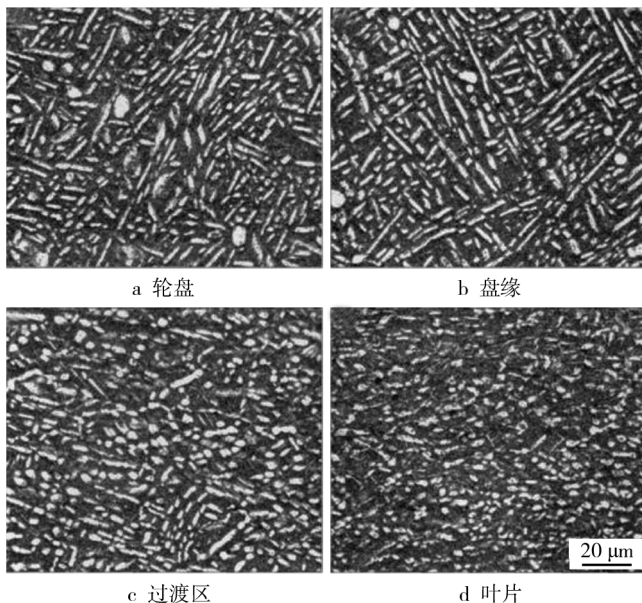
图3 TC17合金双性能整体叶盘不同部位的微观组织^[6]

Fig. 3 Microstructures of different position on dual property blisk of TC17 alloy

锻造制坯与数控加工复合制造整体叶盘的方法,尽管可以节省贵重金属材料、减少难加工材料的机械加工余量,提高整体叶盘的疲劳强度、使用寿命,但是机加工会切断锻造流线,影响整体叶盘的使用可靠性。

2 精密铸造技术

精铸整体叶盘主要用于直升机和起动机等小型发动机上。20世纪60年代,美国采用普通真空精密铸造方法制造了整体叶盘,这种普通铸造的整体叶盘在轮盘区域形成粗大晶粒,叶片区域形成较细的等轴晶粒。20世纪70~80年代末,美国Howmet公司成功开发了Grainex(GX)细晶铸造工艺,并结合热等静压技术(HIP),成功解决了整体叶盘轮盘晶粒粗大的问题^[9]。Kaufman^[10]采用GX铸造工艺与HIP方法制造了Mar-M-247合金整体叶盘,并对整体叶盘的拉伸、高低周疲劳性能等进行了测试,测试结果如表1所示。2002年,Bhaumik等人^[11]研究了Mar-M-247合金整体叶盘在持久试验过程中叶片后缘失效的原因,该整体叶盘也采用精密铸造技术制造。随着航空发动机推重比的不断提高,涡轮的进口温度和转数越来越高,普通均质整体叶盘已不能满足先进发动机的使用要求,因此,美国开展了具有定向叶片和等轴细晶轮毂的整体叶盘铸造工艺研究,成功实现了基于Mar-M-247、CM681定向合金材料的双性能整体叶盘铸造。整体叶盘的叶片为定向柱晶,具有较好的冷热疲劳性能,低周疲劳和抗振动疲劳性能适合于高温下工作,轮盘为等轴细晶粒,具有较好的低周疲劳,拉伸性能适合于中低温下使用^[12]。中航工业北京航空材料研究院以整体细晶工艺铸造了外廓尺寸达380 mm的整体叶盘,叶片晶粒度达ASTM3—5级,叶盘轮毂

晶粒度达ASTM2—3级。该研究院还通过控制整体叶盘叶片凝固结晶过程的温度场,形成定向结晶温度梯度,并复合GX工艺,实现了整体叶盘叶片为定向柱晶、轮盘为等轴细晶的新突破^[13]。定向柱晶叶片/等轴晶轮盘的双性能整体叶盘如图4所示。采用精密铸造技术制造整体叶盘也可以节省贵重金属材料,但是这种方法制造的叶盘性能较低。

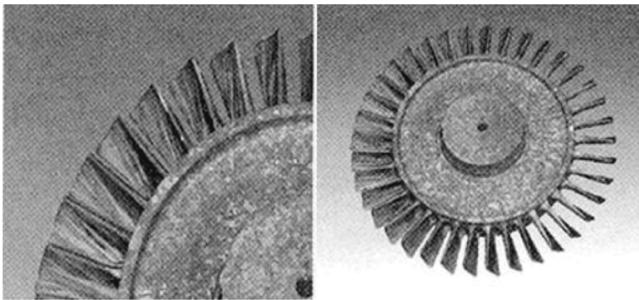


图4 定向柱晶叶片/等轴晶轮盘的双性能整体叶盘^[13]

Fig.4 Double-property of integral turbine wheel with DS blades and GX turbine hub and rim

3 线性摩擦焊接技术(LFW)

线性摩擦焊接技术最早出现于1969年英国的一项发明专利^[14]。20世纪80年代,英国剑桥焊接研究所研制了线性摩擦焊机,英国Rolls-Royce公司和德国MTU公司推动和发展了这种新设备和新技术,2000年开始用于EJ200和F119等发动机部分整体叶盘的制造。F119的2、3级风扇和6级高压压气机以及EJ200发动机的3级低压压气机的整体叶盘都是线性摩擦焊接技术成功应用的顶级标志。而且,英国Rolls-Royce公司和德国MTU公司已用线性摩擦焊接技术成功制造了宽弦空心风扇叶片整体叶盘^[15],并为JSF的发动机提供线性摩擦焊接技术制造的整体叶盘。图5为线性摩擦焊接过程中零件运动的示意图。德国MTU公司采用线性摩擦焊接技术制造了Ti6246合金双性能整体叶盘,其焊接接头热影响区微观组织的照片如图6所示,由图可以看出,热影响区的微观组织较细;焊接区室温力学性能为 $R_m = 1030 \text{ MPa}$, $A = 19\%$,在室温、800 MPa应力条件下的高周疲劳性能可达到 6×10^6 以上, $K_{IC} = 15 \sim 45 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ^[16]。Ma等^[17—18]研究了Ti-6Al-4V合金和镍基高温合金线性摩擦焊接后接头处的微观组织,并对Ti-6Al-4V合金焊接接头处的冲击韧性和断口形貌进行了分析,Ti-6Al-4V合金焊接接头处的微观组织照片如图7所示。

表1 Mar-M-247合金整体叶盘拉伸性能测试结果^[10]

Table 1 Tensile test results of Mar-M-247 blisk

测试温度/ 度/F	$\sigma_{0.2}$ /ksi	σ_b /ksi	$\delta/\%$	$\Psi/\%$
室温	124.7	143.4	5.9	7.1
400	117.6	143.3	6.5	7.3
1000	121.3	152.0	8.1	10.4
1200	118.2	150.8	7.2	10.5
1400	117.2	145.1	4.3	7.4
1600	103.6	127.1	6.6	6.9
1800	61.2	82.7	6.4	8.6
1900	43.2	59.1	8.3	9.8

Buffa 等人^[19]采用试验与数值模拟相结合的方法,研究了 AA2011-T3 铝合金线性摩擦焊接过程中的剪切系数。采用线性摩擦焊接技术制造整体叶盘可以节约大量贵金属,具有热影响区晶粒尺寸细小、可制造大尺寸整体叶盘的优点;而且也可用该技术将叶片与用不同材料制造的轮盘焊接在一起充分挖掘转子结构材料的性能潜力,以获得最佳的减重效果。但是采用该技术焊接的叶盘,叶片在叶盘上的位置和扭角不能保证完全一致,该加工方法也存在周期长,残余应

力大,且焊接精度和焊缝质量影响整体叶盘的质量和可靠性等问题。

4 数控铣削加工技术

国外早期制造叶片数较少的小型 and 中型整体叶盘(如 T700 发动机叶盘)较多采用该技术,即将锻坯铣削加工成整体叶盘^[16]。现在大直径、叶片数多的整体叶盘,如英国 Rolls-Royce 公司的 BR715 的风扇后两级增压压气机、EJ200 中的两种整体叶盘也使用了这种加工方法^[2]。美国 GE 和 PW 公司等均采用五坐标数控加工技术开展了整体叶盘研制,充分利用数控加工具有快速反应和可靠性高的特点,保证了整体叶盘型面精度^[20]。近年来,国内外许多学者围绕刀具轨迹计算、通道特征分析等基础问题开展了大量研究,其研究成果对于抑制颤振、提高成形零件精度和表面质量、延长刀具使用时间提供了理论依据。Calleja 等人^[21]建立了 Inconel718 合金整体叶盘机加工过程中切削力的计算模型,采用该模型可准确预测机加工过程中的切削力,该研究为确定刀具的最佳切触位置、减少总切削力和抑制颤振奠定了基础。Zhao 等人^[22]设计了基于扩展状态观测器(ESO)的自适应滑动模式控制系统(ASMC),该系统用于控制五坐标数控加工机床 A 轴的位置精度。图 8 为传统的 PID 控制和自适应滑动模式控制五坐标数控加工机床 A 轴,整体叶盘的成形表面质量对比情况,由图 8 可以看出,通过自适应滑动模式控制系统可提高整体叶盘的成形精度和表面质量。Meng 等人^[23]优化了铣削整体叶盘叶片侧边时的筒形铣刀尺寸,以避免工具轴与相邻叶片之间的干扰。任军学等人^[24]提出了一种整体叶盘复合制造工艺方案及五坐标数控加工关键技术,包括叶盘通道分析与加工区域划分,最佳刀轴方向的确定与光顺处理,通道的高效粗加工技术,型面的精确加工技术,加工变形处理和叶片与刀具减震技术等。此外,中国燃气涡轮院针对五坐标数控加工中心加工整体叶盘叶片表面质量差的问题,提出一套利用 UG 软件自身功能光顺曲线和曲面的方法,使造型曲面的光顺度得到大幅提高,从整体叶盘数控加工工艺源头上保证了加工质量。北京航空制造工程研究所利用通用软件、通用设备对小扭转叶片整体的盘体、叶片、根部过渡区的数控加工工艺、设计和数控程序进行了研究。目前,国内数控加工的整体叶盘已经应用到 WS-500 发动机上,该方法已在型号研制中得

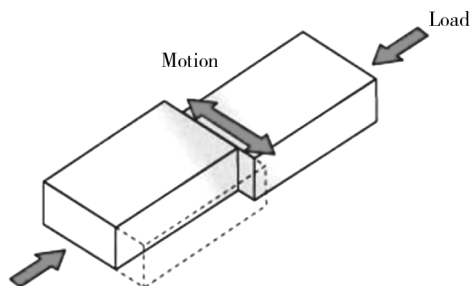


图 5 线性摩擦焊接过程中零件运动示意图

Fig. 5 Illustration of the motion of the parts in the linear friction welding process

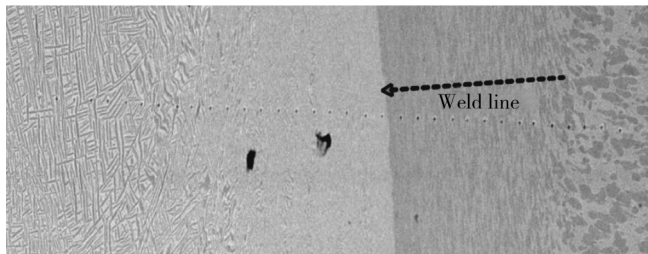


图 6 焊接接头热影响区的微观组织(右边是叶片,左边是轮盘)^[16]

Fig. 6 Microstructure in the weld and heat affected zone. Blade (Ti-6246) at the right side and disk (Ti-6246) at the left

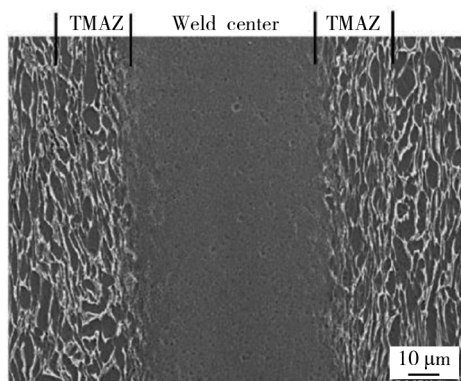


图 7 线性摩擦焊接头的微观组织^[17]

Fig. 7 Microstructure of LFW Ti-6Al-4V joint

到成功,但采用该方法从整体叶盘毛坯到叶盘零件的制造过程中,材料切除率超过 90%,材料利用率较低,机加工量大,周期长,切断了金属流线,影响了整体叶盘的使用性能。

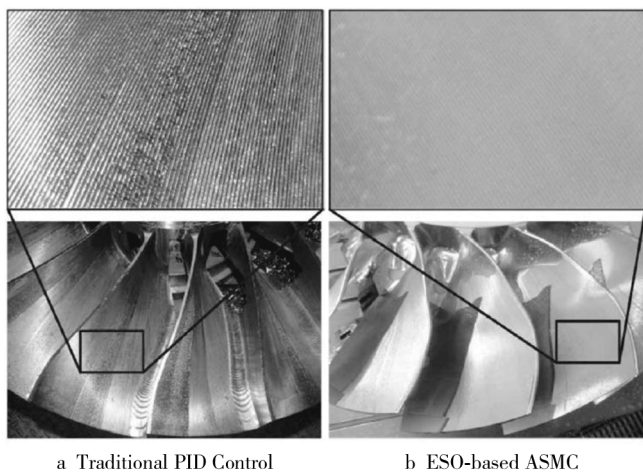


图8 整体叶盘的成形表面情况^[22]

Fig. 8 Processing effect of blisk

5 电解加工技术

电解加工是基于金属在电解液中电化学溶解的原理达到去除材料的目的的一种特种加工技术。它具有阴极无耗损、加工表面质量好、生产效率高、无残余应力等诸多优点,在航空、航天尤其是整体叶盘制造领域得到了广泛的应用^[25]。美国 GE 公司采用该技术加工了 T700 的钢制整体叶盘、F22 的 GE37/YF120 发动机钛制整体叶盘及 F414 发动机的高温合金整体叶盘^[26],与原先用五坐标数控铣削叶片方法相比,加工时间减少了 50% ~ 85%,还可避免在叶片加工中产生残余应力。电解加工分粗加工和精加工两道工序,加工出的叶型厚度公差为 $+0.10\text{ mm}$,型面公差为 $+0.10\text{ mm}$ 。德国 MTU 公司应用精密振动电解加工技术制造了 EJ200 的镍基高温合金整体叶盘,叶盘直径为 650 mm ,电解加工后叶型达到了最终精度,不需要进行后续修整。荷兰 Philips Aerospace 公司计划采用电解加工直径达 1.1 m 的整体叶盘,用于联合攻击机(JSF)项目的 F136 发动机中,这是目前军机中的整体叶盘^[27]。近年来,国内外针对工具阴极进给方向优化设计、通道可加工性等问题开展了大量研究。Klocke 等人^[28-29]采用光学原位测量方法记录了电解加工制造镍基高温合金整体叶盘去除材料的过程,并建立了相应的模型。朱荻等人^[30-33]开展了精密电解

加工工具阴极设计、电场流场仿真与控制、高频及窄脉冲电解加工和加工过程检测与控制等研究工作,图 9 为移动密封阴极的流场模型仿真结果,由图 9 的仿真结果可以看出,移动密封阴极消除了叶尖区流道突变,遏制了电解液分流,显著提升了叶尖区域电解液的流速,使整体叶盘电解加工流场稳定性进一步提升。此外,利用自行研制的整体叶盘电解加工平台开展工艺实验,首次实现了叶片电解精加工,不再需要后续人工精修,保证了产品质量并降低了劳动成本。这些研究成果有利于提升加工稳定性、提高加工精度和表面质量,但该方法还仅限于可展直纹曲面的加工,材料利用率也较低。

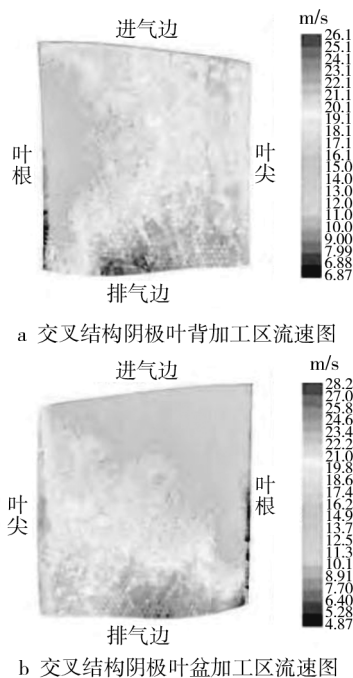


图9 移动密封阴极的流场^[33]

Fig. 9 The flow field with slip seal structure cathode

6 其他加工技术

近年来,电火花加工技术、激光快速成形技术、电子束焊接技术也被用于制造整体叶盘。Liu 等人^[33]采用五轴数控电火花加工技术制造了整体叶盘,并优化了电极进给路径。该技术的加工精度和加工稳定性较高,但加工速度慢,表面有再铸层,且由于电极损耗影响成型精度,需经常更换电极或采取其他措施,这使得加工速度更慢、加工成本更高,所以,一般仅应用于带冠整体叶盘及小型翼型叶轮等极难加工结构的试验性加工^[27]。吕日红等人^[35]采用激光快速成形技术研制了 TC11 合金四级风扇整体叶盘,该盘最大

外径为 666 mm, 叶盘叶片数量为 32 片, 叶片弦宽为 75 mm, 叶身高为 106 mm, 叶片间流道最小宽度为 19 mm。该毛坯已具备叶片、流道和轮盘的雏形, 外形接近最终零件形状, 叶片角向位置固定, 单边加工余量为 5 mm, 室温抗拉强度为 $R_m = 1044$ MPa, 500 °C 抗拉强度为 $R_m = 705$ MPa。采用该技术制造整体叶盘具有提高材料利用率、减少制造时间和减低制造成本等优势, 但是其性能较低。中航工业黎明航空发动机有限责任公司对 TC4 整体叶盘电子束焊接工艺中的变形控制方法进行大量研究, 提出了综合应用焊接工艺优化、刚性固定、真空热处理和电子束局部加热相结合的变形控制方法, 并通过相关试验有效地控制了焊接变形, 实现了电子束焊接整体叶盘结构的制造^[36]。电子束焊接整体叶盘技术由于其较高的稳定性, 在国内整体叶盘制造领域已得到广泛应用, 而其局限性在于只适宜于钛合金叶盘的焊接工艺, 对高温合金整体叶盘焊接存在较大的技术缺陷, 尚需要进行更为深入的研究。

7 结论与展望

随着现代航空飞行器的迅猛发展, 发动机推重比不断提高, 迫切要求航空发动机关键件制造朝着精确成形、轻量化、高性能、短流程、低成本方向发展。整体叶盘具有结构重量轻, 可显著提高发动机工作效率、可靠性等的优点, 已经成为先进大推力航空发动机的关键部件。但是, 整体叶盘结构复杂, 其材料大都十分昂贵, 使用环境往往处于极端苛刻。因此, 不断发展整体叶盘高性能精确成形制造新原理新技术已经成为国民经济发展和国防建设的重大需求。高性能整体叶盘制造技术的重点发展方向包括:

1) 发展适用于 SiC 陶瓷基复合材料、C/C 复合材料和金属复合材料整体叶盘的高性能精确制造新工艺。

2) 发展多场、多尺度、多功能仿真建模技术, 实现制造、组织和性能一体化模拟和仿真优化。

3) 零件性能与制造工艺的一体化设计、数字化与智能化, 发展制造全过程组织、形状、尺寸和质量精确控制方法。

参考文献:

[1] 张海艳, 张连峰. 航空发动机整体叶盘制造技术国内外

发展概述[J]. 航空制造技术, 2013(23): 38—41.

ZHANG Hai-yan, ZHANG Lian-feng. Development Overview of Aeroengine Integral Blisk and Its Manufacturing Technology at Home and Abroad[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(23): 38—41.

[2] 王增强. 航空发动机整体叶盘加工技术[J]. 航空制造技术, 2013(9): 40—43.

WANG Zeng-qiang. Machining Technology of Aeroengine Blisk[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(9): 40—43.

[3] 黄春峰. 现代航空发动机整体叶盘及其制造技术[J]. 航空与航天, 2007(4): 1—8.

HUANG Chun-feng. Modern Aeroengine Integral Blisk and Its Manufacturing Technology[J]. Aerospace Journals, 2007(4): 1—8.

[4] GORMAN M D. Dual-property Alpha-beta Titanium Alloy Forgings: USA, US5795413[P]. 1996-12-24.

[5] 孟庆通, 庞克昌, 王晓英. 钛合金整体叶盘等温锻造技术[J]. 上海钢研, 2006(2): 16—18.

MENG Qin-tong, PANG Ke-chang, WANG Xiao-yin. The Isothermal Forging Technology of Titanium Alloy Blisk[J]. Journal of Shanghai Iron and Steel Research, 2006(2): 16—18.

[6] 郭鸿镇, 姚泽坤, 魏迎光, 等. 等温精密锻造技术的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): 570—576.

GUO Hong-zhen, YAO Ze-kun, GUO Yin-guang, et al. Research Progress of Isothermal Precision Forging Technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(1): 570—576.

[7] 王宝善, 段辉, 甄晓辉, 等. TC17 合金双性能整体叶盘模锻件的研制[J]. 锻造与冲压, 2011(2): 38—43.

WANG Bao-shan, DUAN Hui, ZENG Xiao-hui, et al. The Manufacturing of Die Forgings for Dual Property Blisk of TC17 Alloy[J]. Forging & Metalforming, 2011(2): 38—43.

[8] 杨艳慧, 刘东, 罗子健. TC11 钛合金整体叶盘锻件组织均匀性评价方法[J]. 航空材料学报, 2012, 32(1): 25—29.

YANG Yan-hui, LIU Dong, LUO Zi-jian. Evaluation of Microstructure Homogeneity in TC11 Titanium Alloy Blisk Forging[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 32(1): 25—29.

[9] 汤鑫, 曹腊梅, 李爱兰, 等. 高温合金整体叶轮铸造技术的研究进展[J]. 航空材料学报, 2005, 25(3): 57—62.

TANG Xin, CAO La-mei, LI Ai-lan, et al. Development of Casting Technology Superalloy Integral Turbine Wheels[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2005, 25(3): 57—62.

[10] KAUFMAN M. Properties of Cast Mar-M-247 for Turbine Blisk Applications[J]. Superalloys, 1984: 43—52.

- [11] BHAUMIK S K, BHASKARAN T A, RANGARAJU R, et al. Failure of Turbine Rotor Blisk of an Aircraft Engine[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2002, 9: 287—301.
- [12] 汤鑫, 曹腊梅, 盖其东, 等. 高温合金双性能整体叶盘铸造技术[J]. *航空材料学报*, 2006, 26(3): 93—98.
TANG Xin, CAO La-mei, GAI Qi-dong, et al. Double-properties Casting Technology for Superalloy Integral Turbine Wheels[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006, 26(3): 93—98.
- [13] 曹腊梅, 汤鑫, 张勇, 等. 先进高温合金近净形熔模精密铸造技术进展[J]. *航空材料学报*, 2006, 26(3): 238—243.
CAO La-mei, TANG Xin, ZHANG Yong, et al. Progress of Advanced Near Net-shape Investment Casting Technology of Superalloys[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006, 26(3): 238—243.
- [14] KAUZLARICH J J, MAURYS R R. Reciprocating Friction Bonding Apparatus; USA, US3420428[P]. 1969-01-07.
- [15] 史耀耀, 段继豪, 张军峰, 等. 整体叶盘制造工艺技术综述[J]. *航空制造技术*, 2012(3): 26—31.
SHI Yao-yao, DUAN Ji-hao, ZHANG Jun-feng, et al. Blisk Disc Manufacturing Process Technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012(3): 26—31.
- [16] GARCÍA A M M. Blisk Fabrication by Linear Friction Welding[M]. *Advances in Gas Turbine Technology*, 2011.
- [17] MA T J, LI W Y, YANG X W. Impact Toughness and Fracture Analysis of Linear Friction Welded Ti-6Al-4V Alloy Joints[J]. *Materials and Design*, 2009, 30(6): 2128—2132.
- [18] MA T J, YAN M, YANG X W, et al. Microstructure Evolution in a Single Crystal Nickel-based Superalloy Joint by Linear Friction Welding[J]. *Materials and Design*, 2015, 85: 613—617.
- [19] BUFFA G, CAMMLERI M, CAMPANELLA D, et al. Shear Coefficient Determination in Linear Friction Welding of Aluminum Alloys[J]. *Materials and Design*, 2015, 82: 238—246.
- [20] LO C C. Efficient Cutter-path Planning for Five-axis Surface Machining with a Flat-end Cutter[J]. *Computer-Aided Design*, 1999, 31: 557—566.
- [21] CALLEJA A, FERNÁNDEZ A, CAMPA F J, et al. Reliable Manufacturing Process in Turbine Blisks and Compressors[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 63: 60—66.
- [22] ZHAO P B, SHI Y Y. Adaptive Sliding Mode Control of the A-axis Used for Blisk Manufacturing[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, 27(3): 708—715.
- [23] MENG F J, CHEN Z T, XU R F, et al. Optimal Barrel Cutter Selection for the CNC Machining of Blisk[J]. *Computer-Aided Design*, 2014, 53: 36—45.
- [24] 任军学, 张定华, 王增强, 等. 整体叶盘数控加工技术研究[J]. *航空学报*, 2004, 25(2): 205—208.
REN Jun-xue, ZHANG Ding-hua, WANG Zeng-qi, et al. Research on the NC Machining Technique of Blisk[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2004, 25(2): 205—208.
- [25] 孙伦业, 徐正扬, 朱荻. 叶盘通道径向电解加工的流场设计及试验[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(3): 95—100.
SUN Lun-ye, XU Zheng-yang, ZHU Di. Flow Field Design and Experimental Investigation of Radial Electrochemical Machining of Blisk Channels[J]. *Journal of South China University of Technology (Nature Science Edition)*, 2013, 41(3): 95—100.
- [26] MANN B, JÜRGEN KRAUS D, ERWIN BAYER D. An Integrated Cost-effective Approach to Blisk Manufacturing[C]. *Proceedings of 17th Symposium on Air Breathing Engines*, Martin MTU Aero Engines, Munich, Germany. ISA-BE, 2005: 2—9.
- [27] 张明岐, 傅军英. 高温合金整体叶盘精密振动电解加工方法的应用分析[J]. *航空制造技术*, 2009(22): 26—29.
ZHANG ming-qi, FU Jun-yin. Application Analysis of Precise Vibrating Electrochemical Machining in High-temperature Alloy Disk[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2009(22): 26—29.
- [28] KLOCKE F, ZEIS M, HERRIG T, et al. Optical in Situ Measurements and Interdisciplinary Modeling of the Electrochemical Sinking Process of Inconel 718[J]. *Procedia CIRP*, 2014, 24: 114—119.
- [29] KLOCKE F, ZEIS M, HARST S, et al. Modeling and Simulation of the Electrochemical Machining (ECM) Material Removal Process for the Manufacture of Aero Engine Components[J]. *Procedia CIRP*, 2013, 9: 265—270.
- [30] XU Z Y, XU Q, ZHU D, et al. A High Efficiency Electrochemical Machining Method of Blisk Channels[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2013, 62: 187—190.
- [31] ZHU D, ZHU D, XU Z Y, et al. Trajectory Control Strategy of Cathodes in Blisk Electrochemical Machining[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, 26(4): 1064—1070.
- [32] 徐庆, 朱荻, 徐正扬. 整体叶盘通道电解加工流场的均匀性[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(6): 7—12.
XU Qin, ZHU Di, XU Zheng-yang. Uniformity of Flow Field in Electrochemical Machining of Blisk Tunnel[J]. *Journal of South China University of Technology (Nature Science Edition)*, 2011, 39(6): 7—12.

ferent Hammer and Feed Influence on Carbide[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2012.

- [41] 樊黎霞,赵轲,董雪花. 身管径向锻造过程的塑性应变分析与锻造比研究[J]. 精密成形工程, 2014, 6(1): 1—8.
FAN Li-xia, ZHAO Ke, DONG Xue-hua. Study on Plastic Strain and Forging Ratio in Radial Forging Process of Barrel [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(1): 1—8.
- [42] 王连东,高权德,梁晨,等. 径向精密锻机 V 字锥形锤砧锻造分析及数值模拟[J]. 机械工程学报, 2011, 47(20): 146—151.

WANG Lian-dong, GAO Quan-de, LIANG Chen, et al. Deformation Analysis and Numerical Simulation of V-shaped Cone Anvil Forging in the Fine Forging Machine[J]. Journal of Mechanical and Engineering, 2011, 47(20): 146—151.

- [43] 张超,赵升吨,董渊哲,等. 矿用液压软管接头芯子径向锻造工艺的研究[J]. 精密成形工程, 2015, 7(2): 30—34.
ZHANG Chao, ZHAO Sheng-dun, DONG Yuan-zhe, et al. Research of Radial Forging Process for Inner Sleeve of Hydraulic Hose Coupling Using in Mine Industrial[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(2): 30—34.

(上接第 7 页)

- [33] 刘嘉,朱栋,万龙凯,等. 整体叶盘电解加工移动密封阴极设计与试验[J]. 中国机械工程, 2014, 25(14): 1847—1851.
LIU Jia, ZHU Dong, WANG Long-kai, et al. Design and Experiments of Slip Seal Structure Cathode in ECM of Blisk [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(14): 1847—1851.
- [34] LIU X, KANG X, ZHAO W, et al. Electrode Feeding Path Searching for 5-axis EDM of Integral Shrouded Blisks[J]. Procedia CIRP, 2013, 6: 107—111.
- [35] 吕日红,樊国福,夏峥嵘,等. TC11 钛合金整体叶盘应用

3D 激光快速成形技术研究[J]. 新技术新工艺, 2014(13): 24—27.

- LYU Ri-hong, FANG Guo-fu, XIA Zheng-rong, et al. Research on Application of 3D Laser-rapid Prototyping of TC11 Titanium Alloy Blisk [J]. New Technology & New Process, 2014(13): 24—27.
- [36] 曲伸. 电子束焊接 TC4 整体叶盘结构的变形控制[J]. 航空制造技术, 2009(23): 91—97.
QU Shen. Deformation Control of EBW of TC4 Blisk [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(23): 91—97.

(上接第 16 页)

- [49] TUPPEN S J, BACHE M R, VOICE W E. A Fatigue Assessment of Dissimilar Titanium Alloy Diffusion Bonds[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(6): 651—658.
- [50] KUNDU S, SAM S, MISHRA B, et al. Diffusion Bonding of Microduplex Stainless Steel and Ti Alloy with and without Interlayer: Interface Microstructure and Strength Properties [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45(1): 371—383.
- [51] BASUKI W W, AKTAA J. Process Optimization for Diffusion Bonding of Tungsten with EUROFER97 Using a Vanadium Interlayer [J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, 459: 217—224.
- [52] ZHOU X, LIU Y, YU L, et al. Uniaxial Diffusion Bonding of CLAM/CLAM Steels: Microstructure and Mechanical Performance [J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, 461: 301—307.
- [53] LI S X, XUAN F Z, TU S T. Fatigue Damage of Stainless Steel Diffusion-Bonded Joints [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 480(1): 125—129.
- [54] LI S X, XUAN F Z, TU S T. In Situ Observation of Interfa-

cial Fatigue Crack Growth in Diffusion Bonded Joints of Austenitic Stainless Steel [J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 366(1): 1—7.

- [55] BUSSU G, IRVING P E. The Role of Residual Stress and Heat Affected Zone Properties on Fatigue Crack Propagation in Friction Stir Welded 2024-T351 Aluminium Joints [J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(1): 77—88.
- [56] BAY N. Cold Pressure Welding—A Theoretical Model for the Bond Strength [C]//Spring Residential Conference Joining of Metals, Practice and Performance. 1981: 47—62.
- [57] BAY N. Mechanisms Producing Metallic Bonds in Cold Welding [J]. Welding Journal, 1983, 62(5): 137.
- [58] HEBERT R J, PEREPEZKO J H. Deformation-Induced Synthesis and Structural Transformations of Metallic Multilayers [J]. Scripta Materialia, 2004, 50(6): 807—812.
- [59] BIRO A L, CHENELLE B F, LADOS D A. Processing, Microstructure, and Residual Stress Effects on Strength and Fatigue Crack Growth Properties in Friction Stir Welding: A Review [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2012, 43(6): 1622—1637.