

航空发动机宽弦空心风扇叶片制造研究综述

李 灿, 郎利辉, SARDAR MUHAMMAD I, 郭英健, 张德鑫

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 详细介绍了国外航空发动机风扇叶片结构及成形技术的发展与现状, 从结构设计、成形工艺以及力学性能领域分析了国内钛合金宽弦空心风扇叶片研究现状。基于宽弦空心风扇叶片服役过程中现存问题, 结合扩散焊接/常规塑性/超塑性成形技术, 探讨了叶片空腔结构设计、成形工艺优化以及扩散焊结构力学性能三大领域的关键技术研究发展方向。结果表明: 空腔结构的设计应基于结构轻量化、成形可行性及力学性能最优三大目标展开研究; 成形工艺的优化着重开展多工序多目标耦合优化、数值计算精度提高、材料冷热复合加工过程形变精确预测与控制等方面的研究; 扩散焊结构力学性能的提高应当从复杂载荷条件下焊缝裂纹扩展以及疲劳性能演变等方面展开研究。

关 键 词: 空心风扇叶片; 扩散焊接; 超塑性成形; 结构设计; 成形工艺; 力学性能

中图分类号: V263.1

文献标志码: A

Review on manufacture of aeroengine wide chord hollow fan blade

LI Can, LANG Lihui, SARDAR MUHAMMAD I, GUO Yingjian, ZHANG Dexin

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The development and present situation of aeroengine fan blade structure, forming technology abroad were introduced in details. The research status of titanium alloy wide chord hollow fan blade in China was analyzed from the aspects of structure design, forming process and mechanical properties. Based on the existing problems in the service process of wide-chord hollow fan blades, combining with the diffusion welding/conventional plastic/superplastic forming technology, the development direction of key technologies in the three fields of blade cavity structure design, forming process optimization and mechanical properties of multilayer diffusion welding structure were discussed. The cavity structure design should be based on three objectives: lightweight structure, feasibility of forming and optimal mechanical properties; The optimization of forming process focuses on the coupling optimization of multi-process and multi-objective, the improvement of numerical calculation accuracy, and the precise prediction and control of material shape evolution during cold and hot composite machining; The improvement of mechanical properties of diffusion welded structures should be studied from the aspects of bonding joint crack propagation and fatigue behavior evolution under complex load conditions.

Keywords: hollow fan blade; diffusion welding; superplastic forming; structural design; forming process; mechanical properties

风扇叶片叶身长、叶弦宽、扭角大、形状复杂, 叶片较薄利于满足高效率/低质量要求, 而叶片较厚利于满足高强度/高稳定性要求, 这种矛盾

的要求导致了复杂的掠型结构设计, 进而对风扇叶片制造技术提出更高要求^[1]。现代军用及民用航空领域飞行环境日益复杂, 不仅要最大程度上

收稿日期: 2022-03-21

作者简介: 李灿(1995—), 女, 博士生, 主要从事轻质合金制备及塑性成形方面的研究。E-mail: lican9504@163.com

引用格式: 李灿, 郎利辉, SARDAR MUHAMMAD I, 等. 航空发动机宽弦空心风扇叶片制造研究综述[J]. 航空动力学报, 2023, 38(11): 2675-2687. LI Can, LANG Lihui, SARDAR MUHAMMAD I, et al. Review on manufacture of aeroengine wide chord hollow fan blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(11): 2675-2687.

实现风扇叶片轻量化、可设计,同时也应达到更高的强度和疲劳寿命^[2-4]。宽弦风扇叶片已经成为现役和在研大涵道比涡扇发动机的关键技术,探索先进的制造技术是提升风扇叶片质量的重要途径。

目前航空发动机风扇叶片主要包含两类材料-钛合金、复合材料,两类结构-实心、空心结构,各家国际航空公司围绕钛合金以及复合材料风扇叶片不断开展研究与探索^[5-9]。钛合金密度小、比强度高、耐高温,具备良好的耐蚀性和可焊性,凭借其优秀的综合性能成为航空发动机复杂构件的主选材料^[10-11]。而近几十年来复合材料行业蓬勃发展,自 1995 年来,美国通用电气(GE)公司、英国罗-罗公司与法国斯奈克玛公司的复合材料风扇叶片相继问世^[12],复合材料风扇叶片的应用可以进一步提高发动机的减质率,改善叶片疲劳强度、损伤容限等,目前欧盟正在开发未来发动机可使用的混合材料-钛合金/复合材料智能风扇叶片。而国内针对复合材料风扇叶片的制造研究尚处在摸索阶段,主要对于制造过程中的铺叠参数或是纤维预制体的参数、固化参数等的各项参数边界控制的认知^[13-16]。

钛合金风扇叶片制造技术与复合材料风扇叶片制造技术的发展将相互促进。钛合金风扇叶片在一定条件下会因为强度不足造成叶片疲劳断裂,复合材料风扇叶片耐冲击性能、耐摩擦性能薄弱,容易受到意外外来物体的影响和损坏,裂纹扩展迅速从而影响整个发动机的服役性能,金属材料裂纹扩展的延缓性相较于复合材料仍是一大优势^[17-18]。此外,复合材料仍存在着腐蚀问题,其环保回收仍然是一个挑战^[19],还应当针对复合材料

风扇叶片开展大量工艺、材料试验。未来钛合金风扇叶片仍是军用航空领域风扇叶片的主流方案。

钛合金宽弦空心风扇叶片是典型的空心加强结构零件,要求具备完整的空心减质结构及准确的外部气动掠形结构,成形工艺复杂^[20],其制造综合运用了扩散连接/热成形以及数控加工、无损检测等组合工艺技术^[21],此种组合成形工艺技术可以充分发挥钛合金成形复杂构件控形、控性的优势。高强度高疲劳性能的结构及其稳定可控的制造等是新一代钛合金宽弦空心风扇叶片的迫切需求。但是超塑成形/扩散连接(SPF/DB)工艺仍存在叶片内部变形不可控、超塑过程变形量过大、设计不确定性因素多等缺点,寻找一种新型结构钛合金宽弦空心风扇叶片及其成形技术成为了所有航空企业主要探索的领域之一^[22]。

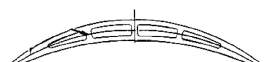
钛合金宽弦空心风扇叶片制造已经成为我国发展大型航空发动机卡脖子问题,国外对于相关技术严格封锁。为了更好地了解、利用钛合金扩散焊接及塑性成形技术,本文总结了钛合金风扇叶片的结构及成形技术演变,对国内钛合金宽弦空心风扇叶片研究现状进行了总结与分析,对未来钛合金宽弦空心风扇叶片制造技术的研究前沿及其中存在的关键技术进行深入探讨。

1 风扇叶片的结构及其成形技术

钛合金风扇叶片的结构变化伴随着成形技术的演变,窄弦实心结构到宽弦空心结构的转变可以看作是钛合金风扇叶片成形技术发展历程的一个重要转折点,而宽弦空心结构叶片内部减质空腔的复杂程度极大的决定了成形技术的难易和稳定可控性。如表 1 简要概述了世界航空发动机风

表 1 航空发动机风扇叶片发展历程

Table 1 Development history of aeroengine fan blade

叶片类型	图片	成形工艺
1984 年以前广泛使用 有阻尼凸肩的窄弦实心钛叶片		预锻-精锻-切边-机加工。
1984 年罗罗公司提出 无凸肩蜂窝夹芯宽弦钛叶片		锻造获取叶盆叶背面板;加工出空腔的面板和蜂窝夹芯块扩散连接;数控加工。
1991 年罗罗公司提出 空心三角桁架结构宽弦钛叶片		三层板层叠件扩散连接; 焊后毛坯气胀成形;数控加工。
1995 年普惠公司提出 对开无芯结构宽弦钛叶片 ^[2,4]		机加工获取带减质槽的叶盆叶背面板; 扩散连接;模具热压成形;数控加工。
1995 年通用电气提出 宽弦碳-钛复合材料叶片 ^[23]		预浸料手工铺叠;热压罐成型固化。

扇叶片的发展历程,从 1970 年先后投入使用的 JT9D 与 TF39 发动机,到 2022 年将要投入使用的 GE9X,大涵道比涡扇发动机风扇叶片的叶型构造、材料和成形技术等历经了 50 多年的改进,罗罗、通用和普惠是目前国际上最主要的三大航空发动机制造企业,在风扇叶片方面的研究取得了重大进展,另外国内外一些研究机构也在该领域开展了相关工作,并取得了一定的成果。目前除了英国罗罗公司的桁架空心叶片以及美国普惠公司的对开无芯结构叶片,复合材料叶片成为重要发展趋势,例如美国通用电气提出预浸料手工铺叠以及热压罐成型复合材料叶片,而法国斯奈克玛公司提出树脂传递模塑成型复合材料叶片。

1.1 钛合金窄弦实心风扇叶片

如图 1 所示为钛合金窄弦实心风扇叶片,凸肩结构设计可以在一定程度上增加叶片刚性和自振频率,通过锻造成形后机加工获取叶片成品,20 世纪 60 年代之前,此类风扇叶片得到普遍应用^[24]。但是凸肩带来的问题有流量限制和气流扰动等,不利于节约发动机的燃油消耗率,不适应风扇叶片的进一步发展,因此无凸肩的宽弦风扇叶片应运而生。

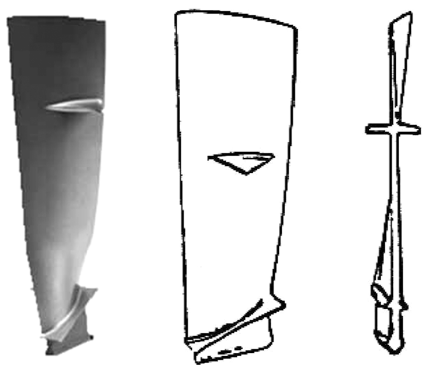


图 1 窄弦实心风扇叶片^[24]

Fig. 1 Narrow-chord solid fan blades^[24]

1.2 钛合金宽弦空心风扇叶片

宽弦空心风扇叶片最早由英国和美国等国家的航空发动机公司提出^[25],如图 2 所示,弦长的增加避免了窄弦叶片凸肩带来的效率损失,同时提高了耐疲劳性能及抗外物损伤能力^[26]。如图 3 所示为钛合金宽弦空心风扇叶片从概念的提出到演化过程示意图。对开式结构和蜂窝夹芯式结构的概念先后由美国通用电气和英国罗罗公司在 20 世纪 70 年代提出。对开式结构由两片钛面板和加强筋组成,在流体压力和模具温度的共同作用

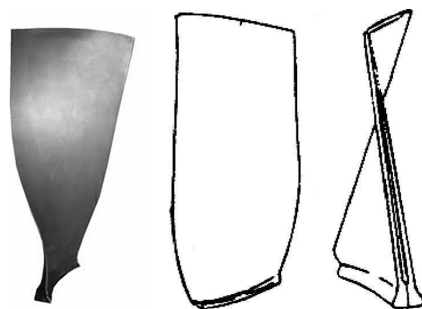


图 2 宽弦空心风扇叶片^[24]

Fig. 2 Wide-chord hollow fan blades^[24]

下实现叶片构件之间的扩散连接^[27]。而蜂窝夹芯式结构,是一种通过氨基树脂与外部面板进行连接而获取风扇叶片的方法。但是针对以上结构提出的成形工艺在当时存在接头强度差等若干问题,仅仅停留在概念上,并未得到实际应用^[28]。后来英国罗罗公司对蜂窝夹芯结构的成形工艺进行改进,提出将叶片的面板和内部蜂窝采用焊接与机加工相结合的成形方式,具体为将两片已经具备弯扭叶型的钛合金面板和蜂窝芯板经钎焊或者扩散连接形成一体,最终通过数控加工获得叶片外形。蜂窝夹芯结构钛合金宽弦空心风扇叶片结构设计和制造技术的成功开创了钛合金风扇叶片结构及其成形技术的新局面。

自蜂窝夹芯结构风扇叶片研制成功后,叶片结构及成形技术经过不断演化,最终形成了三大结构类型,分别是两层对开结构、三层结构及四层结构钛合金宽弦空心风扇叶片。

两层结构叶片由美国普惠公司在 20 世纪 80 年代末提出,首先将预先机加工出空腔的两半对称的扁平叶身进行扩散连接,通过加强筋形成空腔结构,再将整体空心毛坯加热至超塑成形状态,利用重力作用和模具获得叶片初步的弯扭度,之后利用模具合模使叶片成形至所需形状,最后进行数控加工获得成品^[24]。此类叶片成功运用在 PW4084 系列增推型发动机,风扇直径增大到 2.84 m,叶片数量减少至 22 片。Bichon 等^[29]于 1997 年提出了将两块板扩散焊后常规热塑性成形再超塑性成形的方法。原材料为晶粒尺寸 7 μm 左右的钛合金锻坯,预先机加工出带减质槽的叶盆侧和叶背侧平板进行扩散焊接,在焊接温度 875~940 ℃,焊接压力 3~4 MPa 的等静压下保温保压至少 1 h,之后焊后叶片在超塑性成形温度和应变速率范围内扭转得到具有过渡形状的叶片,随后对热扭转后的叶片进行热压和气胀校形,超

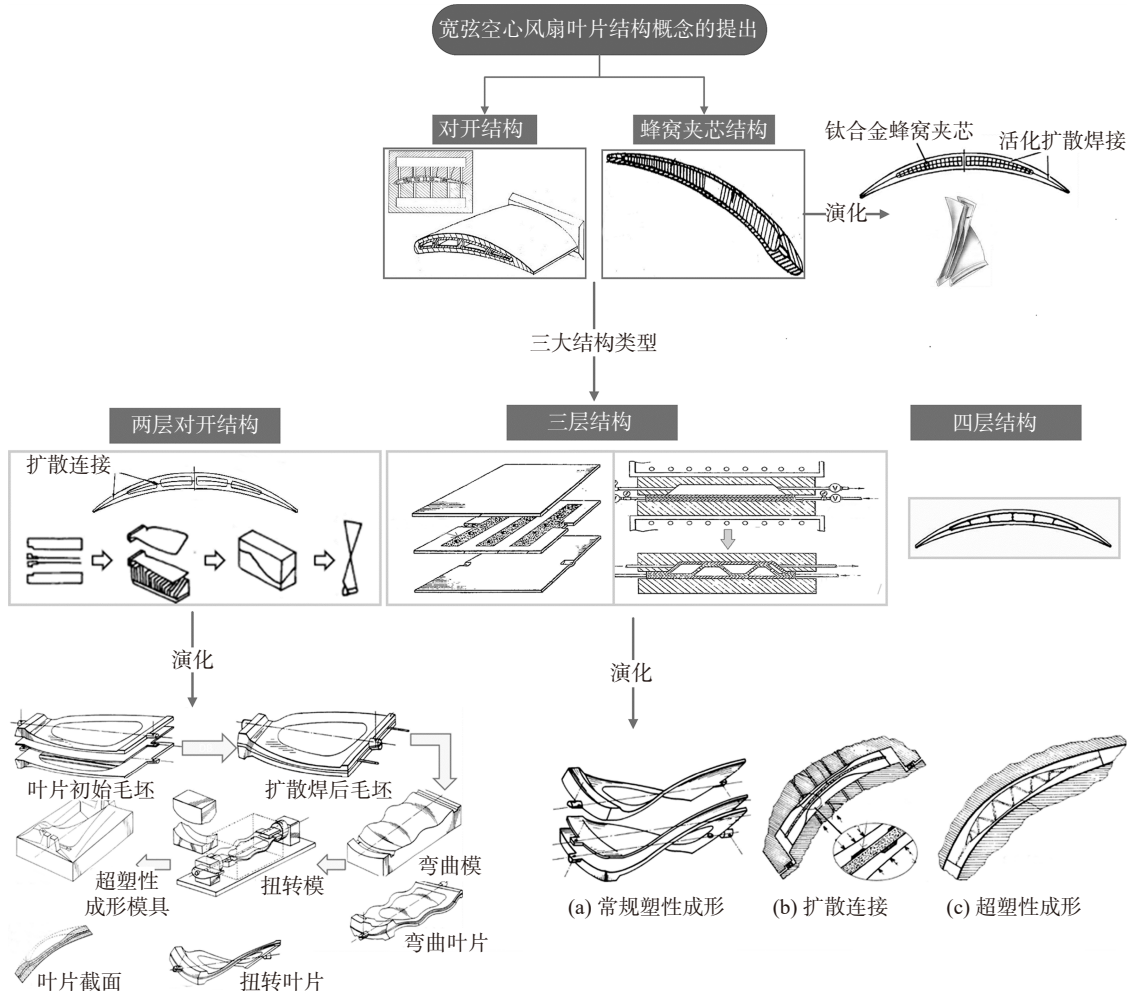


图 3 钛合金宽弦空心风扇叶片发展过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of development process of titanium alloy wide-chord hollow fan blade

塑性气胀成形温度在 $850\sim 940\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 充气压力在 $2\sim 4\text{ MPa}$ 下最佳。目前两层结构宽弦空心风扇叶片的制造工艺路线可总结为:

1) 扩散连接-常规塑性成形-超塑成形

按照预定毛坯设计先通过扩散焊接获取整体空心平板毛坯, 之后利用热成形模具对毛坯进行常规塑性成形及气胀蠕变成形, 材料需要经历至少 3 次加热循环。

2) 常规塑性成形-热等静压扩散连接

首先通过常规塑性成形获取具有叶片曲面外形的叶盆及叶背侧面板, 之后机加工出面板空心结构, 最终通过扩散焊接使已经具有弯扭形状的叶盆以及叶背侧面板连为一体。材料需要经历至少 2 次加热循环, 不需要进行超塑成形。

英国罗罗公司取得了蜂窝夹芯结构叶片的成功后继而提出三层结构宽弦空心风扇叶片, 具体成形工艺为首先对外部面板和中间芯板预定区域进行扩散连接, 之后将三层板放入模具中, 在超

塑性状态下外层面板完全贴膜成形, 中间芯板发生延展变形与面板连接组成了一种质量轻且承载力特性好的三角形桁架结构^[30]。罗-罗公司采用这种工艺生产了 Trent 800 发动机的空心风扇叶片。后来 Varela 等^[31]又提出了改进的三层结构空心风扇叶片成形工艺, 先将外板和中心板进行弯曲和扭转热成形, 之后再行扩散连接以及超塑性成形。

四层结构空心风扇叶片同样运用了 SPF/DB 组合工艺, 由两层外部面板和两层中间芯板构成, 扩散连接后的层板放入模具中后, 外层面板在超塑性状态下贴膜成形, 中间两层芯板顶部与外部面板预定区域实现扩散连接, 相邻侧壁通过扩散连接形成垂直于面板的加强筋^[4]。

2 国内钛合金宽弦空心风扇叶片研究现状

我国在航空发动机的研制方面起步较晚, 尚

未完全掌握钛合金宽弦空心风扇叶片的生产制造技术,在 2017 年成功首飞的 C919 作为自主研发的第一架国产大飞机使用的即是进口的美国通用电气 Leap 航空发动机。目前国内针对钛合金宽弦空心风扇叶片制造工艺的研究已经取得了一定的成果,下面将从结构设计、成形工艺以及力学性能研究三个方面详细叙述国内钛合金宽弦空心风扇叶片研究现状。

2.1 结构设计研究

如图 4 所示,风扇叶片的结构设计包括两部分—气动外型及内部空腔,空腔结构的复杂程度决定了工艺的稳定性 and 可靠性。目前针对风扇叶片两层及三层空腔结构所定义的几何特征参数如图 5 所示。

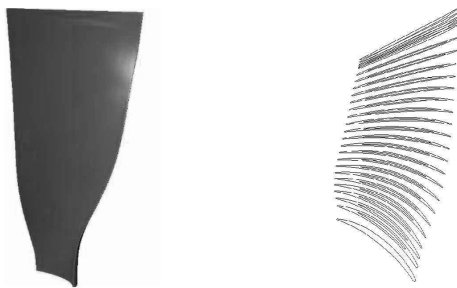


图 4 叶片结构设计示意^[2]

Fig. 4 Schematic of blade structure design^[2]

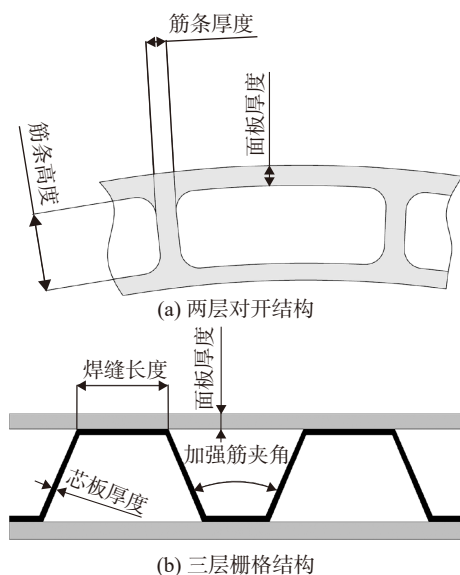


图 5 空腔几何特征参数

Fig. 5 Geometrical characteristic parameters of cavity

如图 6 所示,目前风扇叶片内腔结构设计研究主要围绕轻量化设计及叶片使用性能展开,两者互相制约。部分学者将拓扑优化运用到叶片结

构设计中^[32]。如图 7 所示,阎军等^[33]以风扇叶片静力与动力性能作为目标函数,通过拓扑优化算法给出了更为合理的叶片空心结构的构型设计。严林鑫等^[34]通过数值模拟和逆向分析分析了加强筋的几何特征参数对空心叶片力学性能的影响,得出二层空腔结构具有三层结构无可比拟的应力分布。另外一些学者在建模优化方面开展了相关研究。吴惠松等^[35]研究开发了空心叶片的结构设计及优化设计平台,实现了多层结构宽弦空心风扇叶片快速造型及有限元分析。于洋等^[36]研究表明空心叶片型腔加强筋数量增加或扩散连接区与非连接区长度比增大对加强筋最大应力值影响较大。杨剑秋等^[37]采用正交试验设计获得了空心叶片结构优化设计分析的帕累托最优解。刚铁等^[38]对空心叶片建模及 SPF/DB 过程中应力分布展开了研究,得出空心叶片加强筋夹角应尽量小于 30° ,“S”形加强筋结构优于斜形加强筋。

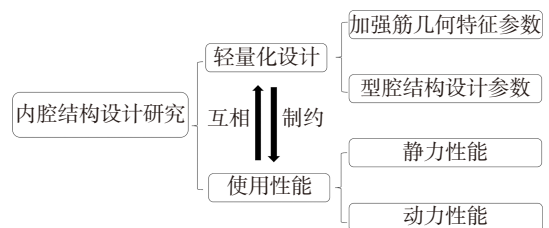


图 6 空腔结构设计研究现状

Fig. 6 Research status of cavity structure design

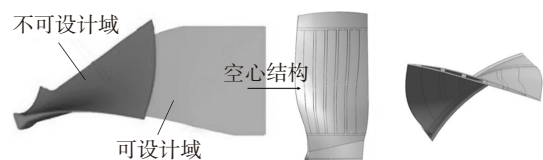
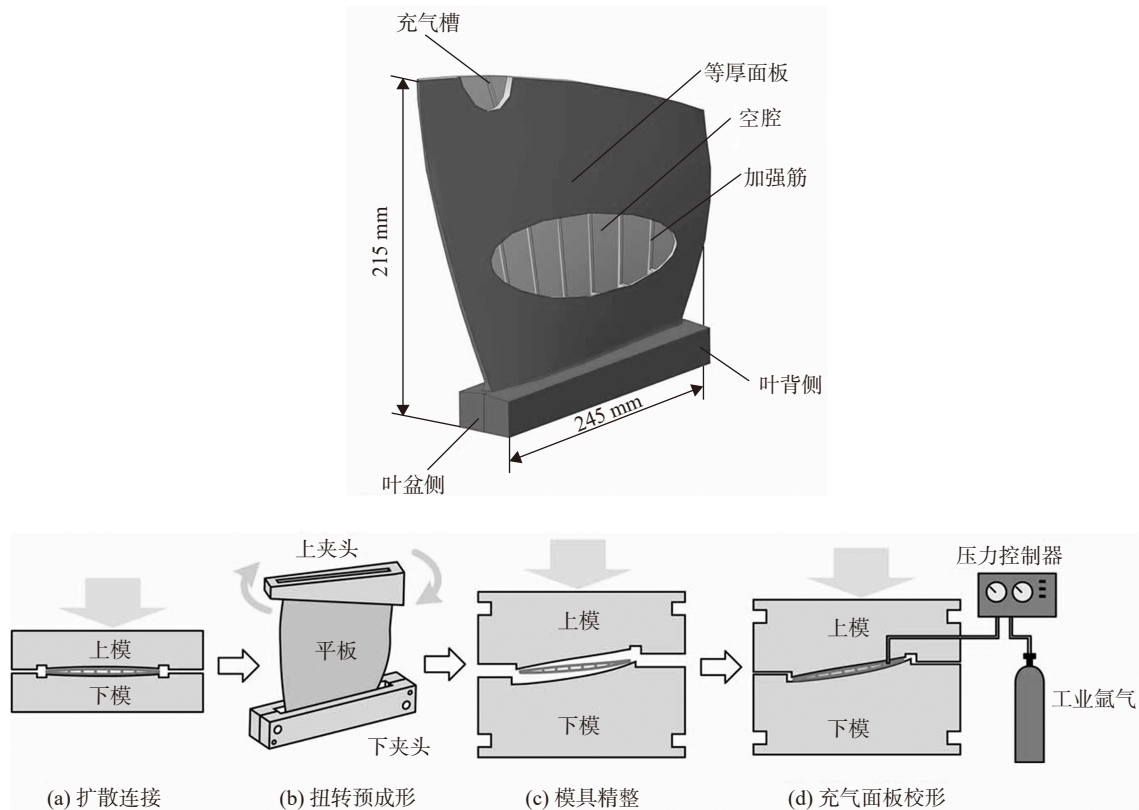


图 7 风扇叶片拓扑优化设计域和不可设计域示意^[33-34]

Fig. 7 Schematic diagram of fan blade topologically optimized design domain and undesignable domain^[33-34]

2.2 成形工艺研究

国内最早于 1999 年成功制备了三层结构钛合金宽弦空心风扇叶片,首先通过扩散连接、热扭转以及超塑成形得到满足设计要求的叶身,再将叶身与榫头进行焊接得到完整叶片^[39]。如图 8 所示,最早针对两层结构钛合金宽弦空心风扇叶片提出的成形工艺为首先将两片钛合金面板进行扩散连接,之后进行热扭转预成形、热压整形以及蠕变校形,最终机加工后得到叶片^[40],但研发的两层结构宽弦叶片仅为较短的叶根的一部分,可以实际生产使用的大尺寸两层结构宽弦空心叶片

图 8 两层结构空心风扇叶片制造工艺路线示意图^[40]Fig. 8 Schematic diagram of manufacturing process of two-layer hollow fan blade^[40]

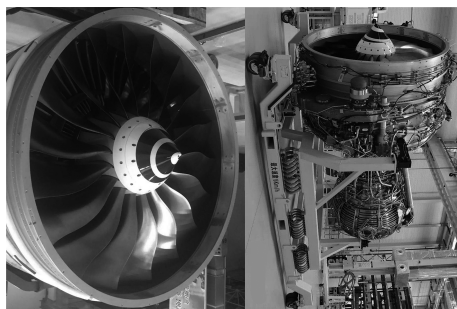
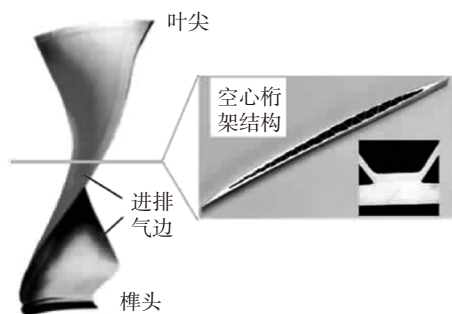
的成形工艺有待进一步研究。

国内目前仍主要采用有限元数值模拟技术对多层结构钛合金宽弦空心风扇叶片的成形工艺参数进行研究。陈明和等^[40]针对两层结构叶片的毛坯优化设计技术展开了研究,通过数值模拟分析了成形后叶片厚度均匀性和结构完整性,提高内部加强筋构建的可靠度。吴心晨等^[21]结合有限元模拟与试验研究了两层结构空心风扇叶片的热扭转工艺,得出单轴扭转相比于双轴扭转更易将毛坯预成形至理想的过渡外形,采用了扭转温度 750 ℃,叶尖夹头扭角 20.4°,扭转速度 0.68(°)/min 的工艺参数。王宁等^[41-42]提出了一种基于蠕变成形的钛合金空心风扇叶片面板修复方法,该方法采用气压加载,在较高的温度下,使凹陷部位发生蠕变变形,恢复到理论外形。

王荣华^[43]对双层板及三层板结构钛合金空心翼类零件 SPF/DB 制造过程中进排气、密封等关键工艺问题提出了解决方案,得出在温度为 860 ℃ 开展构件 SPF/DB 成形实验成形效果较好。针对三层结构钛合金空心叶片的 SPF/DB 工艺,Zhao 等^[44]分析了叶片成形过程中应力应变演变情况,得出随着扭转速率、下降速度、应变速率、

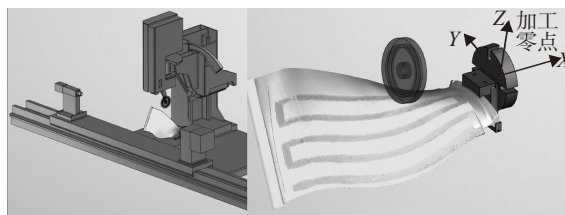
芯板与面板厚度比的增大,成形力增大。门向南^[45]研究了 TC4 三层板结构的超塑成形的最佳压力加载路径,证明 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 为最佳成形应变速率。高庆峰^[46]研究了三层和四层结构的空心叶片 SPF/DB 工艺过程,得出了芯板厚度、摩擦因数、加强筋数目和单元算法对成形的影响规律,指出在超塑成形时,选取芯板厚度应比面板厚度要薄。徐伟^[47]采用有限元计算研究优化了四层板结构空心叶片的超塑性成形工艺参数并制得叶片试验件。也有一些学者针对叶片成形过程中数控加工变形控制及预测等关键技术展开了研究,从而实现钛合金宽弦空心风扇叶片形状精度的精确控制^[48-49]。如图 9 所示,中国航空制造技术研究院采用 SPF/DB 工艺于 2017 年 10 月完成 CJ-1000AX 验证机首台 18 件装机三层结构钛合金宽弦空心风扇叶片研制,攻克了叶片结构优化设计、成形技术以及成形质量评估等一系列关键技术^[50]。

叶片毛坯无法一次性热成形出满足几何精度要求的钛合金宽弦空心风扇叶片,如图 10 所示,需针对叶片榫头、叶尖及进排气边等加工部位分别辅以不同数控加工手段(切/磨削)才能最终满足精度要求^[51]。这是因为扩散焊接及塑性成形过

图 9 国产大型客机发动机验证机首台整机^[50]Fig. 9 The first complete machine of domestic large aircraft engine validator^[50]图 10 机械加工区域示意图^[51]Fig. 10 Schematic diagram of machining area^[51]

程中伴随多道次热循环及冷却,进而造成叶片变形。

目前,国外主流发动机公司和数控机床生产商已经合作开发出包含叶片快速测量、多轴数控加工以及六轴砂带磨削的成套加工技术。国内徐九华等^[49]指出空心风扇叶片热成形后的数控切削加工应突破复杂曲面结构测量、加工变形控制以及加工误差补偿等关键技术。林立^[52]基于叶片薄壁结构件真实切削力编写变形迭代算法,计算出变形量补偿刀位点来提高叶片加工精度。郝炜等^[53]研究叶片前后缘加工误差分布规律,通过误差补偿方法对叶片模型进行修正。而叶片精密磨削已由传统的手工修磨转向为高效率、高精度、自动化程度较高的数控砂带磨削。如图 11 所示,乔虎等^[54]实现了空心风扇叶片在六轴数控砂带磨床上的可靠的虚拟磨削加工。平波^[55]提出应用成形针束喷嘴以及缓进给磨削工艺提高钛合金成型面冷却效果一致性。张宏之等^[56]采用自适应砂带磨削方式保证了航发模锻叶片表面粗糙度值均在 $0.4 \mu\text{m}$ 以下。刘树生等^[57]研制出国内首台公开展示的高动态性能九轴六坐标联动数控砂带磨床,实现了叶片集成磨削精加工,成果成功应用于某型号发动机风扇叶片生产。

图 11 叶片磨削加工仿真^[54]Fig. 11 Simulation of blade grinding^[54]

2.3 力学性能研究

钛合金宽弦空心风扇叶片处于发动机进气口,需要解决三大问题:气动性能、振动问题以及抗外物冲击损伤性能。目前国内学者主要围绕扩散焊的焊接接头以及空心单元件进行力学性能分析。

大量学者以静力学性能作为优化目标针对钛合金的扩散焊接最佳工艺参数展开了研究工作^[58-61]。航空发动机结构的主要失效形式为疲劳失效^[62],尤其焊接接头是受力的薄弱部位。周克印^[63]对比分析了焊前 TC4 原材料以及不同扩散焊工艺得到的材料的疲劳断裂特性,提出在压强为 2.94 MPa 以及加热制度为 960°C 下保温 120 min 时可获得良好的连接效果。谢佩玉^[64]以 TC4 母材、扩散焊后的母材及焊缝为研究对象,研究了不同加载路径下的不同形式焊缝的静力学性能及疲劳性能演变,得出原材料与扩散焊接头均对裂纹比较敏感。刘小刚等^[65-66]通过静力学试验、断裂韧性试验、纳米压痕试验以及疲劳裂纹扩展试验研究了 TC4 扩散焊接头的力学性能,并建立了其复合型疲劳裂纹扩展速率统一模型。招文龙等^[67]对 TC4 钛合金双搭接接头的抗剪切疲劳性能进行了试验研究,得到了接头的正应力、切应力和寿命相关曲线。

国内以空心单元件为研究对象,主要在外物损伤及疲劳性能方面开展了研究工作。赵平、关玉璞等^[68-69]总结了航空发动机叶片疲劳失效的主要研究方法,指出叶片损伤试验设备和试验方法需要进一步完善。李白洋等^[70]建立了三层结构空心叶片单元件的弯曲疲劳寿命预测方法,深入分析了叶片失效过程。李迪^[3]设计了空心风扇叶片的高循环疲劳试验方法,并研究了叶身空心结构的抗疲劳性能,得到的试验件叶身部分对应 1×10^7 次循环的高循环疲劳强度介于 370 MPa 至 400 MPa 之间。黄芳^[71]通过钛合金宽弦空心风扇叶片的振动试验和疲劳性能试验,研究了叶片的振动模态参数以及疲劳失效机理,为空心风扇叶片的制造提供参考。

具有多层扩散焊结构的宽弦空心风扇叶片在受到外物冲击后,除了对叶片叶盆及叶背侧表面造成损伤,空腔中扩散焊缝的力学性能也会受到影响,焊缝失效是空心结构在冲击载荷下最重要的失效模式之一^[72-73]。李白洋、丁进等^[74-75]通过外物损伤(FOD)模拟试验证实了 FOD 会造成 TC4 合金三层扩散焊结构板件高循环疲劳强度显著降低,内部焊缝出现损伤。如图 12 所示,孙青平^[76]针对桁架式夹芯结构单元件进行了结构设计、加工工艺以及疲劳失效分析,建立了接头的疲劳损伤演化方程。

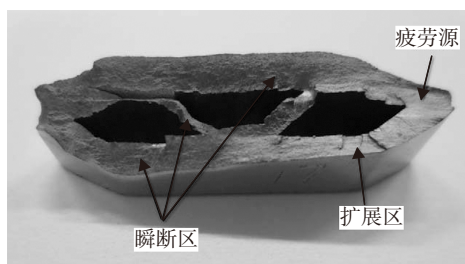


图 12 空心单元件宏观断口

Fig. 12 Macroscopic fracture of hollow element

3 钛合金宽弦空心风扇叶片扩散焊接/常规塑性/超塑性成形关键技术发展展望

目前多层结构扩散连接/常规塑性成形/超塑性成形组合工艺还存在较多技术难题需要攻克,传统的结构设计及其制造工艺仍具有诸多的局限性。国外航空发动机宽弦空心钛合金风扇叶片在服役过程中仍频繁出现失效问题,截至 2018 年 2 月,英国罗罗公司 Trent 700 叶片已经报道过 9 个故障,前 6 个故障是由于在超塑性成形过程中叶片内部残留空气或其他活性气体,最后 3 次失效是由于在内膜和凸板之间的锐角-局部板增厚处产生疲劳裂纹源,如图 13 所示^[77-78]。普惠 PW4000



图 13 三层板超塑性成形/扩散连接叶片失效示意图^[77]

Fig. 13 Schematic diagram of blade failure under SPF/DB process of three-layer plate^[77]

发动机在使用过程中也多次出现事故,事故原因均被判定为与风扇叶片金属疲劳相关。

基于空心叶片多层扩散焊结构的特殊性以及成形工艺的复杂性,未来针对钛合金宽弦空心风扇叶片的研究需要攻克的关键技术可以主要从下文几方面入手。

3.1 空腔结构设计

1) 基于结构轻量化的目标

在有效实现叶片轻质的同时,必须同时考虑空心结构设计受到叶片服役状态下离心力、鸟撞等复杂载荷的影响。在空腔结构的概念设计阶段,应当加强获得风扇叶片空心结构材料分布的优化设计系统理论指导。选择可以间接地反映结构的静力与动力性能的特性参数作为优化目标,在基本设计阶段给出更为合理的空心结构构型设计,最终获得材料分布合理,具有优良总体刚度、强度性能的初始设计,促进结构轻量化的目标实现。

2) 基于成形可行性及力学性能最优的目标

叶片空腔结构的设计除了要考虑轻量化效果以外,还必须综合考虑成形工艺可行性、稳定性以及力学性能要求等多方面因素。在详细设计阶段,借助形状优化、尺寸优化等手段对空腔结构进行局部设计调整,从而满足叶片刚度、强度以及叶片振动等所有设计要求。如图 14 所示,对空腔结构设计参数进行了归纳总结,对于空腔内加强筋,应当考虑的几何参数包括加强筋数量、高度、厚度及夹角,而工艺参数应当考虑叶片空心率、焊缝长度以及加强筋与面板的几何关系。首先应当明确空腔结构设计尺寸参数以及这些参数之间的相互影响作用,设计难度较大。在空心风

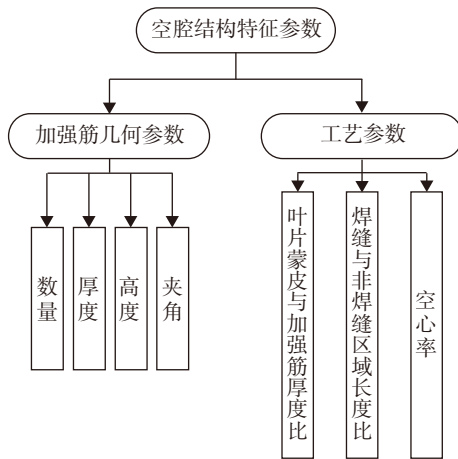


图 14 空腔结构设计参数

Fig. 14 Design parameters of cavity structure

扇叶片成形过程中, 内部空心区域的形状及位置分布不容易控制, 还会产生制造偏差, 应当研究原设计参数的变化对各类性能的影响规律, 进而调整设计参数及成形工艺。

3.2 成形工艺优化研究

成形工艺可以看作是钛合金宽弦空心风扇叶片制造全流程中最重要的一环, 但应当摆脱只着眼于成形工艺单工序优化的现状, 成形工艺不可避免地会影响初始结构设计参数及叶片最终冷加工质量。钛合金宽弦空心风扇叶片未来冷热复合加工的关键技术可以从以下几方面着重开展研究: ①深入研究多层结构材料的扩散焊接工艺与后续塑性成形工艺的相互影响规律, 研究思路从以往的单步工序优化研究转变为多工序多目标耦合优化研究; ②在经过不同成形工艺后叶片材料的流变应力曲线和热物性参数已经发生了变化, 针对每个状态下的材料建立更加准确的本构方程, 对提高计算精度有十分重要的意义; ③深入研究原始毛坯材料多次热循环过程中组织控制及演变规律, 优化成形过程材料热暴露时间周期及升降温工艺参数, 精准控制构件晶粒度及力学性能范围; ④在冷热加工过程中叶片具有复杂的应力分布和特殊的损伤演变规律, 并且前后工序相互影响作用大, 利用材料的高温应力松弛性能, 深入研究叶片热成形过程中应力分布控制方法及质量影响规律; ⑤风扇叶片切削加工误差的补偿需要全面考虑机床、刀具以及零件自身结构特征因素, 建立误差分析模型; ⑥面向叶片空心与实心混杂、刚性强弱相间的特征结构, 基于试验和数值模拟仿真技术, 建立加工变形预报模型, 在此基础上, 结合误差补偿技术, 有效控制钛合金宽弦空心风扇叶片加工变形; ⑦开发集测量、分析及加工功能为一体的叶片数控切削加工集成系统, 将有效提升数控切削加工能力; ⑧大力发展机器人柔性砂带磨抛技术在叶片磨削中的应用, 开发基于知识学习的叶片机器人砂带磨削智能系统及平台, 提高叶片的加工精度及效率。

3.3 扩散焊接结构力学性能研究

以往研究学者主要分别对钛合金扩散焊接接头力学性能和钛合金基体材料的力学性能进行了研究, 但是多层扩散焊接整体空心构件在经历一系列复杂成形工艺后会产生需要微观分析技术辅助才能观测到的变形和损伤, 复杂的多因素影响下带来的扩散焊结构使用可靠性问题应当成为关

注重点。未来针对扩散焊接空心结构力学性能研究可以从以下方面展开: 在构建整体叶片疲劳预测模型时进一步研究空心构件内部焊缝裂纹扩展对叶片疲劳寿命的影响; 在评估宽弦空心叶片的抗外物损伤能力时, 综合考虑外物冲击对叶片表面和空腔结构中扩散焊缝损伤的影响; 不局限于某一种载荷, 应当针对离心、振动以及弯曲等复杂载荷下疲劳性能展开研究; 焊接接头焊缝区附近的力学性能具有非均匀性, 通过原位拉伸、原位疲劳以及纳米压痕法等显微力学试验手段获得焊缝附近不同区域的显微力学性能参数^[79-83]。

4 结 论

钛合金宽弦空心风扇叶片复杂的弯扭叶型、内部空心减质结构仍处于不断演化之中, 伴随而来的越来越高的服役性能要求对叶片制造技术提出了更大的挑战。目前多层结构扩散连接/常规塑性成形/超塑性成形组合工艺还存在较多技术难题需要攻克, 其中涉及的研究内容十分丰富, 未来针对钛合金宽弦空心风扇叶片的研究可以主要从叶片空心结构设计、冷热复合加工过程中多目标成形工艺优化以及多层扩散焊结构力学性能的提高三大领域进行关键技术的攻克。针对空腔结构设计, 基于结构轻量化、成形可行性以及力学性能最优开展多目标优化研究, 按照由总体到局部的思路, 在基本设计阶段获得具有优良总体刚度、强度性能的合理的结构材料分布, 促进结构轻量化的目标实现, 在详细设计阶段首先应当明确空腔结构设计尺寸参数, 综合考虑成形工艺可行性以及力学性能要求等多方面因素, 对空腔结构进行局部调整。针对成形工艺优化, 应当围绕扩散焊接工艺与塑性成形工艺多工序多目标耦合优化、提高数值模拟计算精度、材料冷热复合加工过程中组织性能控制及力学性能演变等方面着重开展研究。针对扩散焊接结构力学性能, 可以从复杂载荷下空心构件内部焊缝及母材裂纹扩展、焊缝损伤以及相应的显微力学试验方面展开研究。以上研究对准确评估复杂载荷条件下的钛合金多层焊接结构塑性变形以及力学性能具有重大理论指导价值和工程实用意义。

参考文献:

- [1] 陈懋章, 刘宝杰. 大涵道比涡扇发动机风扇/压气机气动设计技术分析[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 513-526.
CHEN Maozhang, LIU Baojie. Fan/compressor aero design tech-

- nology for high bypass ratio turbofan[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(3): 513-526. (in Chinese)
- [2] 李志强, 杜发荣, 张力. 大涵道比涡扇发动机的宽弦空心风扇叶片技术研究[C]//大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会学术年会论文集. 广州: 中国航空学会, 2007: 1320-1332.
- [3] 李迪, 陈云永, 廖连芳. 空心风扇叶片高循环疲劳试验设计与验证[J]. *航空动力学报*, 2017, 32(6): 1359-1365. LI Di, CHEN Yunyong, LIAO Lianfang. Experimental design and verification of hollow fan blade high cycle fatigue[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017, 32(6): 1359-1365. (in Chinese)
- [4] 吴心晨. 宽弦空心风扇叶片超塑成形/扩散连接工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015. WU Xincheng. Research on superplastic forming and diffusion bonding technology of hollow wide-chord fan blade[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [5] 刘志强, 李从富, 贾林, 等. 钛合金空心风扇叶片模拟鸟撞研究[J]. *航空科学技术*, 2022, 33(9): 7-15. LIU Zhiqiang, LI Congfu, JIA Lin, et al. Research on simulant bird strike of Titanium alloy hollow fan blade[J]. *Aeronautical Science and Technology*, 2022, 33(9): 7-15. (in Chinese)
- [6] 康永强, 陈勇. 铺层复合材料风扇叶片榫头层间应力分析[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(2): 388-396. KANG Yongqiang, CHEN Yong. Inter-laminar stress analysis of laminated composite fan blade dovetail[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(2): 388-396. (in Chinese)
- [7] 刘洋, 王亮, 郭军. 铝包边对复合材料风扇叶片抗鸟撞能力的影响[J]. *兵工学报*, 2018, 39(增刊1): 114-120. LIU Yang, WANG Liang, GUO Jun. Influence of aluminum package edge on bird-strike resistance of composite fan blades of an engine[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(Suppl.1): 114-120. (in Chinese)
- [8] 谭志刚, 赵兴东, 唐军, 等. TiB₂/7050铝基复合材料风扇叶片锻件的研制[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(11): 114-116, 119. TAN Zhigang, ZHAO Xingdong, TANG Jun, et al. Development of TiB₂/7050 aluminium matrix composite fan blade forgings[J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(11): 114-116, 119. (in Chinese)
- [9] 肖贾光毅, 陈勇, 欧阳华, 等. 复合材料风扇叶片-机匣摩擦振动的数值模拟[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(5): 997-1009. XIAO Jianguangyi, CHEN Yong, OUYANG Hua, et al. Numerical investigation of composite fan blade vibration characteristics due to blade-casing rub[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(5): 997-1009. (in Chinese)
- [10] 刘世锋, 宋玺, 薛彤, 等. 钛合金及钛基复合材料在航空航天的应用和发展[J]. *航空材料学报*, 2020, 40(3): 77-94. LIU Shifeng, SONG Xi, XUE Tong, et al. Application and development of titanium alloy and titanium matrix composites in aerospace field[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2020, 40(3): 77-94. (in Chinese)
- [11] 李毅, 赵永庆, 曾卫东. 航空钛合金的应用及发展趋势[J]. *材料导报*, 2020, 34(增刊1): 280-282. LI Yi, ZHAO Yongqing, ZENG Weidong. Application and development of aerial titanium alloys[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(Suppl.1): 280-282. (in Chinese)
- [12] 刘强, 赵龙, 黄峰. 商用大涵道比发动机复合材料风扇叶片应用现状与展望[J]. *航空制造技术*, 2014, 57(15): 58-62. LIU Qiang, ZHAO Long, HUANG Feng. Present conditions and development of composite fan blades of high bypass ratio commercial jet engines[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 57(15): 58-62. (in Chinese)
- [13] 朱启晨, 陈勇, 肖贾光毅. 复合材料风扇叶片铺层设计方法研究[J]. *航空发动机*, 2018, 44(3): 49-54. ZHU Qichen, CHEN Yong, XIAO Jianguangyi. Study on laminate design method of composite fan blade[J]. *Aeroengine*, 2018, 44(3): 49-54. (in Chinese)
- [14] 康永强, 陈勇. 复合材料风扇叶片榫头铺层设计及加工制造[J]. *合成纤维*, 2020, 49(1): 44-51. KANG Yongqiang, CHEN Yong. Laminate design of composite fan blade dovetail[J]. *Synthetic Fiber in China*, 2020, 49(1): 44-51. (in Chinese)
- [15] 孙煜, 刘强, 黄峰, 等. 复合材料风扇叶片钛合金加强边胶接技术研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2021(3): 78-81, 98. SUN Yu, LIU Qiang, HUANG Feng, et al. Study on bonding technology of titanium alloy trim/composite fan blade[J]. *Composites Science and Engineering*, 2021(3): 78-81, 98. (in Chinese)
- [16] 韦鑫, 荆云娟, 杨明杰, 等. 航空发动机风扇叶片预成型体发现状及趋势[J]. *棉纺织技术*, 2020, 48(8): 81-84. WEI Xin, JING Yunjuan, YANG Mingjie, et al. Development status and trend of aeroengine fan blade preform[J]. *Cotton Textile Technology*, 2020, 48(8): 81-84. (in Chinese)
- [17] 佚名. 罗罗将在发动机中用碳纤维和陶瓷基复合材料[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2014(4): 98. Anonymous. Rolls-Royce will use carbon fiber and ceramic matrix composites in engines[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2014(4): 98. (in Chinese)
- [18] 杨洋. 英国罗罗公司首款碳钛合金风扇叶片开始飞行测试[M]//中国有色金属工业协会专家委员会组织. 中国钛业. 北京: 冶金工业出版社, 2014.
- [19] 石. 纳米复合材料的新用途[J]. *航空维修与工程*, 2008(1): 55. SHI. New uses of nano-composite materials[J]. *Aviation Maintenance and Engineering*, 2008(1): 55. (in Chinese)
- [20] 丁建国, 胡骏, 蔡显新. 某复合掠形风扇设计与内外函数值模拟研究[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(3): 626-633. DING Jianguo, HU Jun, CAI Xianxin. Design and core and bypass numerical simulation of a compound swept fan[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(3): 626-633. (in Chinese)
- [21] 吴心晨, 陈明和, 谢兰生, 等. 复杂外形航空发动机TC4钛合金宽弦空心风扇叶片弯扭成形[J]. *航空学报*, 2015, 36(6): 2055-2063. WU Xincheng, CHEN Minghe, XIE Lansheng, et al. Twist-bend forming of aeroengine titanium TC4 wide-chord hollow fan blade with complex geometries[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(6): 2055-2063. (in Chinese)
- [22] 陈矛章. 风扇/压气机技术发展和对今后工作的建议[J]. *航空动力学报*, 2002, 17(1): 1-15. CHEN Maozhang. Development of fan/compressor techniques and suggestions on further researches[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2002, 17(1): 1-15. (in Chinese)
- [23] 马子干, 苏震宇, 魏然. 复合材料风扇叶片的发展与思考[J]. *科技与创新*, 2020(13): 34-37. MA Ziyu, SU Zhenyu, WEI Ran. Development and thinking of composite fan blades[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2020(13): 34-37. (in Chinese)
- [24] 侯冠群. 宽弦空心风扇叶片制造工艺的发展[J]. *航空制造工程*, 1994(5): 6-8. HOU Guanqun. Development of manufacturing technology of wide

- chord hollow fan blades[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 1994(5): 6-8. (in Chinese)
- [25] 梁春华, 杨锐. 航空发动机宽弦空心风扇叶片的发展及应用[J]. 航空发动机, 1999, 25(2): 54-58.
LIANG Chunhua, YANG Rui. Development and application of wide chord hollow fan blades for aero-engine[J]. Aeroengine, 1999, 25(2): 54-58. (in Chinese)
- [26] 王乐安. 国外航空发动机风扇叶片及其成形技术[J]. 航空科学技术, 1995, 6(1): 31-33.
WANG Lean. Foreign aero-engine fan blades and their forming technology[J]. Aeronautical Science and Technology, 1995, 6(1): 31-33. (in Chinese)
- [27] JOSEPH A. Method of fabricating hollow gas turbine blades: US3623204[P]. 1971.
- [28] MICHAEL P, PETRIE J A. Method of making an aerofoil-shaped blade for a fluid flow machine: US3566493[P]. 1971-03-02.
- [29] BICHON M, DOUGUET C J P, LORIEUX A G H, et al. Process for manufacturing a hollow blade for a turbo-machine: US5636440 [P]. 1997-06-10.
- [30] HAMILTON C H. Method for making metallic structures from two or more selectively bonded sheets: GB1495655A[P]. 1977-12-21.
- [31] COLLOT A C F, SOHIER B P C, VARELA D. Method for fabricating a hollow blade for a turbomachine: EP0500458A1[P]. 1992-08-26.
- [32] 李琳, 薛铮. 等强度三维空心叶片的内部拓扑结构[J]. 航空动力学报, 2012, 27(10): 2329-2335.
LI Lin, XUE Zheng. Internal structure of three-dimensional hollow blade with equal strength[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(10): 2329-2335. (in Chinese)
- [33] 阎军, 张晨光, 霍思旭, 等. 宽弦风扇叶片空腔结构多目标轻量化设计[J]. 航空科学技术, 2021, 32(4): 60-64.
YAN Jun, ZHANG Chenguang, HUO Sixu, et al. Multi-objective lightweight design of the cavity structure of wide-chord fan blades [J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(4): 60-64. (in Chinese)
- [34] 严林鑫. 航空发动机宽弦风扇叶片结构优化设计研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2020.
YAN Linxin. Research on structural optimization design of aero-engine wide-chord fan blade[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2020. (in Chinese)
- [35] 吴惠松, 黄致建, 郝艳华, 等. 桁架式空心风扇叶片结构参数化设计平台开发[J]. 机械设计与制造, 2013(10): 66-68, 72.
WU Huisong, HUANG Zhijian, HAO Yanhua, et al. The parametric design platform development for hollow fan blade of girder internal structure[J]. Machinery Design and Manufacture, 2013(10): 66-68, 72. (in Chinese)
- [36] 于洋, 张力, 战鹏, 等. 宽弦空心风扇转子叶片叶身结构设计参数分析[J]. 航空发动机, 2010, 36(1): 24-26.
YU Yang, ZHANG Li, ZHAN Peng, et al. Analysis of design parameters of wide chord hollow fan blade structure[J]. Aeroengine, 2010, 36(1): 24-26. (in Chinese)
- [37] 杨剑秋, 王延荣. 基于正交试验设计的空心叶片结构优化设计[J]. 航空动力学报, 2011, 26(2): 376-384.
YANG Jianqiu, WANG Yanrong. Structural optimization of hollow fan blade based on orthogonal experimental design[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(2): 376-384. (in Chinese)
- [38] 刚铁. 宽弦空心风扇叶片结构设计及强度分析研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
GANG Tie. Research on structural design and stress analysis of hollow fan blades[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)
- [39] 侯冠群, 尚波生. 宽弦风扇叶片技术的发展[J]. 国际航空, 2002(12): 45-47.
HOU Guanqun, SHANG Bosheng. Development of wide chord fan blade technology[J]. International aviation, 2002(12): 45-47. (in Chinese)
- [40] 陈明和, 吴心晨, 谢兰生, 等. 复杂结构的钛合金宽弦空心风扇叶片的双层制造工艺及其毛坯优化设计[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(6): 1717-1724.
CHEN Minghe, WU Xincheng, XIE Lansheng, et al. Two-layer process and optimal blank design for hollow titanium wide-chord fan blades with complex geometries[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(6): 1717-1724. (in Chinese)
- [41] 吴心晨, 陈明和, 谢兰生, 等. TC4钛合金空心风扇叶片面板成形缺陷的蠕变修复[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(11): 2942-2947.
WU Xincheng, CHEN Minghe, XIE Lansheng, et al. Creep repair of skin defects for the titanium TC4 wide-chord hollow fan blade[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(11): 2942-2947. (in Chinese)
- [42] WANG Ning, CHEN Minghe, XIE Lansheng. Hot flow behavior characterization for predicting the titanium alloy TC4 hollow blade surface Sinkage defects in the SPF/DB process[J]. International Journal of Material Forming, 2019, 12(5): 827-844.
- [43] 王荣华. 翼类钛合金零件超塑成形/扩散连接关键工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
WANG Ronghua. Research on the superplastic forming and diffusion bonding technology for aerofoil part of titanium alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [44] ZHAO Bing, LI Zhiqiang, HOU Hongliang, et al. Three dimensional FEM simulation of titanium hollow blade forming process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(6): 963-968.
- [45] 门向南. TC4三层板结构超塑成形/扩散焊接工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
MEN Xiangnan. Research on superplastic forming and diffusion bonding for three-sheet structure of TC4 titanium alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [46] 高庆峰. 宽弦空心风扇叶片超塑成形的数值仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
GAO Qingfeng. Research and application of numerical simulation of superplastic forming hollow fan blades[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
- [47] 徐伟. 某航空发动机叶片超塑成形/扩散连接工艺参数优化[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2012.
XU Wei. Some aeroengine leaf SPF/DB parameters optimization[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2012. (in Chinese)
- [48] 江志伟, 赵正彩, 傅玉灿, 等. 钛合金宽弦空心风扇叶片进排气边加工变形预测[J]. 航空制造技术, 2017, 60(19): 86-91.
JIANG Zhiwei, ZHAO Zhengcai, FU Yucan, et al. Machining deformation prediction of titanium alloy wide chord hollow fan blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(19): 86-91. (in Chinese)
- [49] 徐九华, 赵正彩, 傅玉灿, 等. 钛合金宽弦空心风扇叶片数控切削加工关键技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(5): 659-666.
XU Jiuhua, ZHAO Zhengcai, FU Yucan, et al. Key technologies of

- NC machining of titanium wide chord hollow fan blade[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 46(5): 659-666. (in Chinese)
- [50] 佚名. 制造院自主研制的钛合金宽弦空心风扇叶片在CJ-1000AX首台整机上完成装配[J]. 航空精密制造技术, 2018, 54(1): 63.
- Anonymous. Titanium alloy wide chord hollow fan blade independently developed by the manufacturing institute was assembled on the first CJ-1000AX machine[J]. Aerospace Precision Manufacturing Technology, 2018, 54(1): 63. (in Chinese)
- [51] 蒋少松. TC4钛合金超塑成形精度控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- JIANG Shaosong. Accuracy control of superplastic forming for TC4 titanium alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [52] 林立. 复杂薄壁叶片加工误差分析与研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- LIN Li. Analysis and research on error of manufacturing complex thin-walled blade surface[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [53] 郝炜, 蔺小军, 单晨伟, 等. 薄壁叶片前后缘加工误差补偿技术研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(9): 1446-1450.
- HAO Wei, LIN Xiaojun, SHAN Chenwei, et al. Research on the machining error compensation for the leading and trailing edges of thin-walled blades[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(9): 1446-1450. (in Chinese)
- [54] 乔虎, 邓瑞祥, 伍娅, 等. MTS1600-500六轴数控砂带磨床构建及磨削仿真验证[J]. 机床与液压, 2021, 49(24): 153-158.
- QIAO Hu, DENG Ruixiang, WU Ya, et al. Construction and grinding simulation verification of MTS1600-500 Si_x axis CNC belt grinder[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(24): 153-158. (in Chinese)
- [55] 平波. 钛合金圆弧榫齿高效精密加工技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- PING Bo. Research on high efficiency and precision machining of titanium circular-arc rabbet[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [56] 张宏之, 梁巧云, 陈盛天, 等. 航发钛合金风扇叶片自适应砂带磨削实验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2018, 38(5): 67-72.
- ZHANG Hongzhi, LIANG Qiaoyun, CHEN Shengtian, et al. Research on adaptive belt grinding aeroengine titanium alloy fan blades[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2018, 38(5): 67-72. (in Chinese)
- [57] 刘树生. 航空钛合金叶片数控砂带磨削关键技术[J]. 航空制造技术, 2011, 54(4): 34-38.
- LIU Shusheng. Key technology of NC abrasive belt grinding for titanium blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(4): 34-38. (in Chinese)
- [58] 吴为, 张凯锋, 龚泰宾. TB2钛合金扩散焊接头强度的影响因素[J]. 宇航材料工艺, 2002, 32(2): 55-59.
- WU Wei, ZHANG Kaifeng, GONG Taibin. Influencing factors of strength of diffusion bonding TB2 alloy joint[J]. Aerospace Materials and Technology, 2002, 32(2): 55-59. (in Chinese)
- [59] 程耀永, 马文利, 郭万林. TC4合金TLP扩散焊的组织与性能[J]. 材料工程, 1999, 27(12): 31-34.
- CHENG Yaoyong, MA Wenli, GUO Wanlin. The microstructure and properties of TLP diffusion bonding joints of TC4 alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 1999, 27(12): 31-34. (in Chinese)
- [60] 熊进辉, 高福洋, 陈斌, 等. TC4钛合金真空扩散焊工艺研究[C]/中国有色金属工业协会钛锆铅分会2014年会论文集. 辽宁 大连: 中国有色金属工业协会, 2014: 213-219.
- [61] LI Hong, ZHANG Chao, LIU Hongbin, et al. Bonding interface characteristic and shear strength of diffusion bonded Ti-17 titanium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(1): 80-87.
- [62] 贾旭, 胡绪腾, 朱自佳, 等. FOD缺口型损伤对TC4疲劳极限强度的影响[J]. 航空动力学报, 2018, 33(7): 1584-1594.
- JIA Xu, HU Xuteng, ZHU Zijia, et al. Effect of FOD notch-type damage on fatigue limit strength of TC4[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(7): 1584-1594. (in Chinese)
- [63] 周克印, 徐来, 林兆荣, 等. TC4钛板扩散连接后的疲劳断裂特性[J]. 机械强度, 1998, 20(2): 112-115.
- ZHOU Keyin, XU Lai, LIN Zhaorong, et al. Fatigue and fracture characteristics of titanium alloy boards bonded by diffusion[J]. Journal of Mechanical Strength, 1998, 20(2): 112-115. (in Chinese)
- [64] 谢佩玉. TC4扩散焊接头疲劳性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- XIE Peiyu. Research on fatigue properties of TC4 diffusion bonding joints[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [65] 刘小刚, 谢佩玉, 郭海丁, 等. TC4钛合金扩散焊接头的力学性能[J]. 航空动力学报, 2017, 32(6): 1342-1348.
- LIU Xiaogang, XIE Peiyu, GUO Haiding, et al. Mechanical properties of TC4 titanium alloy diffusion bonded joints[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(6): 1342-1348. (in Chinese)
- [66] 刘小刚, 朱笑林. 钛合金扩散焊接头复合型疲劳裂纹扩展[J]. 航空动力学报, 2019, 34(11): 2395-2402.
- LIU Xiaogang, ZHU Xiaolin. Mixed-mode fatigue crack propagation of titanium alloy diffusion bonded joints[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(11): 2395-2402. (in Chinese)
- [67] 招文龙, 刘小刚, 谢佩玉, 等. TC4钛合金扩散焊接头剪切疲劳性能研究[J]. 航空发动机, 2020, 46(3): 99-102.
- ZHAO Wenlong, LIU Xiaogang, XIE Peiyu, et al. Study on shear fatigue performance of TC4 titanium alloy diffusion bonded joints[J]. Aeroengine, 2020, 46(3): 99-102. (in Chinese)
- [68] 赵萍, 何清华, 杨治国. 航空发动机叶片疲劳断裂研究领域与方法概述[J]. 航空发动机, 2009, 35(3): 58-61, 4.
- ZHAO Ping, HE Qinghua, YANG Zhiguo. Summarize of investigation and method for blade fatigue fracture of aeroengine[J]. Aeroengine, 2009, 35(3): 58-61, 4. (in Chinese)
- [69] 关玉璞, 陈伟, 高德平. 航空发动机叶片外物损伤研究现状[J]. 航空学报, 2007, 28(4): 851-857.
- GUAN Yupu, CHEN Wei, GAO Deping. Present status of investigation of foreign object damage to blade in aeroengine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(4): 851-857. (in Chinese)
- [70] 李百洋. SPF/DB宽弦空心叶片单元件弯曲疲劳性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- LI Baiyang. Research on bending fatigue behaviors of SPF/DB wide-chord hollow blade specimen[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [71] 黄家经. 商用发动机钛合金宽弦空心风扇叶片振动特性及疲劳研究[C]/2015年第二届中国航空科学技术大会论文集. 北京: 中国航空学会, 2015: 313-316.
- [72] LI G Y, TAN M J, LIEW K M. Three-dimensional modeling and simulation of superplastic forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 150(1/2): 76-83.

- [73] CHEN Y, KIBBLE K, HALL R, et al. Numerical analysis of super-plastic blow forming of Ti-6Al-4V alloys[J]. *Materials & Design*, 2001, 22(8): 679-685.
- [74] 李百洋, 刘小刚, 郭海丁. FOD对TC4合金扩散焊板材HCF性能影响[J]. *航空发动机*, 2018, 44(5): 93-97.
LI Baiyang, LIU Xiaogang, GUO Haiding. Effect of foreign object damage (FOD) on the high cycle fatigue (HCF) performance of TC4 alloy diffusion bonding plate[J]. *Aeroengine*, 2018, 44(5): 93-97. (in Chinese)
- [75] 丁进. 外物损伤对TC4扩散焊结构疲劳性能影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
DING Jin. Research on effects of foreign object damage to TC4 diffusion bonding structure on fatigue properties[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [76] 孙青平. 空心风扇叶片桁架式夹芯结构件疲劳特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
SUN Qingping. On the fatigue behaviors of truss stiffened structure used in hollow fan blade[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [77] Australian Transport Safety Bureau. Engine failure involving Airbus[R]. The 62th Northbourne Avenue Canberra: Australian Capital Territory, ATSB Report No: AO-2017-066, 2020.
- [78] ANDERSON C R, TOMEIO P V. Gas turbine engine fan blade lock assembly: US9376926[P]. 2016-06-28.
- [79] 陈继乐. 铝合金焊接接头焊缝区力学性能理论与试验研究[D]. 辽宁 大连: 大连海事大学, 2018.
CHEN Jile. Theoretical and experimental study on mechanical properties of weld zone of aluminum alloy welded joints[D]. Dalian Liaoning: Dalian Maritime University, 2018. (in Chinese)
- [80] 杨磊. 钛合金扩散焊接头焊缝区显微力学行为研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
YANG Lei. Study on micromechanical behavior of weld zone of diffusion welded joint of titanium alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [81] 宋凯, 毛小南, 辛社伟, 等. 钛合金焊接接头组织性能研究进展[J]. *材料导报*, 2018, 32(增刊2): 336-340.
SONG Kai, MAO Xiaonan, XIN Shewei, et al. Research progress on microstructure and properties of titanium alloy welded joints[J]. *Materials Review*, 2018, 32(Suppl.2): 336-340. (in Chinese)
- [82] HUANG C A, WANG T H, LEE C H, et al. A study of the heat-affected zone (HAZ) of an Inconel 718 sheet welded with electron-beam welding (EBW)[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 398(1/2): 275-281.
- [83] LEE H K, KIM K S, KIM C M. Fracture resistance of a steel weld joint under fatigue loading[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2000, 66(4): 403-419.

(编辑: 王碧珺)