https://doi.org/10.12442/j.issn.1002-185X.20250421

航空发动机用惯性摩擦焊接关键技术研究现状、应用及展望

乌彦全[1,2]，周 军[1,2]，张春波[1,2]，袁明强[1,2]，梁 武[1,2]，秦 丰[1,2]，杨海峰[1,2]，黄彩艳[1,2]

（1. 中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司，黑龙江 哈尔滨 150028）

（2. 黑龙江省先进摩擦焊接技术与装备重点实验室，黑龙江 哈尔滨 150028）

摘 要：惯性摩擦焊作为一种先进的固相焊接工艺，以其绿色、高效及优异的焊接质量在航空发动机转子组件制造上得到了广泛应用。本文系统总结了近年来各方学者在航空用钛合金与高温合金的惯性摩擦焊接头的微观组织、力学性能及数值模拟等方面的研究成果，针对航空用大吨位、高精密惯性摩擦焊机及在各型先进航空发动机转子组件上的应用进行了总结概括，未来研究应着力解决新材料、新结构的工程应用中的关键技术难题，并对未来发展方向进行了展望，惯性摩擦焊技术的持续创新也将为新一代航空发动机的高性能、轻量化与可靠性提供关键技术支撑。

关键词：惯性摩擦焊；航空发动机；钛合金；高温合金；微观组织；力学性能；数值模拟

中图法分类号：TG456.9 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-185X(2026)12-3278-11

1 引 言

航空发动机作为现代航空器的动力源，是在材料、工艺和设计的极限边缘，追求性能、效率、可靠性与寿命的完美平衡，发动机结构也向着轻量化、整体化、复合化的方向发展，其性能直接决定了飞机的承载能力、燃油效率及可靠性，更是一个国家科技水平、工业基础和综合国力的重要标志[1–2]。随着航空发动机向高推重比、高效率和高稳定性方向发展，发动机的工作环境日益严苛，这对关键材料也提出了更高要求[3]。钛合金与镍基高温合金因其独特的物理化学性质，已成为航空发动机转子部件的核心制造材料，各自凭借其独特的力学性能在航空发动机的高温、高压和复杂应力环境下发挥着重要作用，通过两者间的轻量化和耐高温性能的互补及应用，共同推动了发动机推重比和效率的提升，二者的协同应用也构成了现代航空发动机材料体系的基石[4–6]。

近年来，各型先进航空发动机（如GE9X、LEAP等）的成功研发显著依赖材料和制造工艺技术的突破和应用[7–9]。钛合金以其高比强度、耐腐蚀性好和耐高温等一系列优异性能，广泛应用于风扇、压气机等中温转子和叶片部件，在保证发动机极端工况环境下安全可靠的同时，在材料方面最大程度地实现了结构减重[10–11]；而镍基高温合金凭借其卓越的高温强度、良好的抗氧化和抗热腐蚀性、良好的疲劳性能及断裂韧性等综合性能，主导压气机高温端、涡轮盘轴及叶片等热端部件的制造，已成为航空发动机高温组件不可替代的关键材料[12–13]。

国内外学者已在航空用钛合金和镍基高温合金材料上开展了大量研究。在钛合金方面，新型高温钛合金及金属间化合物（TiAl、Ti_3Al、Ti_2AlNb）的工程化应用显著扩展了其服役温度范围[14–16]；镍基高温合金则通过单晶铸造技术（如CMSX系列合金）和粉末冶金（如RR1000涡轮盘合金）实现了承温能力与疲劳寿命的双提升[17–18]，在应用材料方面进一步支撑了高性能航空发动机的研制和应用。

随着航空发动机性能的逐渐提升，各种新型耐高温材料在转子组件上的大量应用，进一步提高了转子组件的焊接制造难度。目前，电子束焊和惯性摩擦焊作为航空发动机转子组件连接的两种主流焊接工艺[19–20]，针对航空发动机风扇和压气机常采用的钛合金（例如TC4）和变形高温合金（例如IN718）等材料均能获得良好的焊接接头。近年来，各种耐温更高的难变形高温合金及粉末高温合金在航空发动机转子上的应用越来越多，特别是粉末高温合金因其晶粒细小、组织均匀、疲劳性能好及耐温能力更高等优点，已成为航空发动机制造高压压气机末端盘鼓及涡轮盘的最佳材料[21–23]。电子束焊作为一种高能量密度的熔化焊工艺，针对高含量γ′强化相且成分

收稿日期：2025-12-14

基金项目：国家重点研发计划（2022YFB3404901）

作者简介：乌彦全，男，1991年生，博士生，工程师，中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司，黑龙江 哈尔滨 150028，电话：0451-87199357，E-mail：1272797994@qq.com

复杂的镍基合金材料，极易形成结晶裂纹、热影响区液化裂纹和应变失效裂纹[24–25]，在异质高温合金材料的焊接过程中还易造成组织偏析和裂纹等缺陷。因此，电子束焊已经不适合难变形高温合金及粉末高温合金等同质和异质材料的焊接。惯性摩擦焊接作为一种固相连接技术，通过机械摩擦产热和顶锻压力实现材料的冶金连接，焊接过程中摩擦界面金属完全处于高温塑性状态而未发生熔化，很好地避免了熔化焊接过程中容易产生的裂纹、气孔及夹渣等缺陷[26–28]。同时惯性摩擦焊接过程中的轴向压力在挤出摩擦界面高温塑性金属形成卷曲飞边，也带走了摩擦界面的金属氧化物及油污等污染物，具备了一定程度的自清理功能[29–30]。此外，惯性摩擦焊还具有工艺控制参数少、变形小、能量输入可控及焊缝窄等突出优点，也为航空发动机的进一步减重和降低制造成本而采用异质高温合金材料的连接方案提供了重要焊接工艺支撑[31–34]。

本文旨在系统梳理航空用钛合金、镍基高温合金的惯性摩擦焊接工艺、设备的研究现状及其在航空发动机上的应用。

2　航空用惯性摩擦焊机研究现状

惯性摩擦焊最早始于20世纪60年代初，美国卡特彼勒拖拉机公司和AMF公司在连续驱动摩擦焊机基础上开始研发惯性摩擦焊设备，其中美国卡特彼勒公司于1965年申请了惯性摩擦焊专利，经过与美国AFM公司多年的专利纷争于1968年赢得了诉讼，成为了惯性摩擦焊专利的唯一拥有者[35]，之后的美国制造技术公司（MTI）从上述两家公司购买了惯性摩擦焊设备的全部专利权及技术开发资料，成为了世界上比较著名的惯性摩擦焊机制造商之一，并形成了系列化的惯性摩擦焊接设备，在美国各领域关键产品及部件的制造过程中得到了广泛应用，而欧洲和日本等国家更多的是应用连续驱动摩擦焊[36]。惯性摩擦焊出现不久后，美国通用电气（GE）便引进了该种焊接方法，也是全球首家将惯性摩擦焊接技术应用于航空发动机的压气机盘鼓及涡轮盘轴组件的高质量焊接制造的航空企业[37]。相比传统的连续驱动摩擦焊方法，惯性摩擦焊因具有工艺控制参数少、热输入小、变形小、焊缝窄及接头质量稳定等特点，是少有的真正能达到6σ质量水平（缺陷率为百万分之3.4以下）的工艺，整个焊接过程容易监控并得到优异的焊接质量[38]。

航空发动机被誉为现代工业“皇冠上的明珠”，对各个结构部件的加工制造均要求严格，其中对风扇盘鼓、压气机盘鼓的相邻两级间或多级盘之间、涡轮盘轴等转子组件的焊接几何尺寸精度、焊缝力学性能更是提出了极高要求。目前，全球范围可以生产惯性摩擦焊机的公司众多，集中在美国、德国、英国、中国、日本及韩国等国家，但成功应用于航空发动机转子组件焊接的大吨位、高精度惯性摩擦焊机制造商极少，主要有美国MTI、德国KUKA及哈尔滨焊接研究所。美国MTI公司作为全球最大的惯性摩擦焊机制造企业，应用于航空发动机转子组件焊接制造的设备型号主要有480（F_{max}=3780 kN）、750（F_{max}=6670 kN）及800（F_{max}=20000 kN）型惯性摩擦焊机，800型惯性摩擦焊机如图1所示。德国KUKA公司为了满足航空发动机转子组件高质量需求，也开发了一台型号为SRS1000（F_{max}=10000 kN）的惯性摩擦焊机，在德国MTU公司的相关发动机转子组件上得到了成功应用，如图2所示，该型惯性摩擦焊机在人工装夹完工件后实现了全自动的焊前组件对中精度校准测量及调整与焊接，大大提高了焊接效率。哈尔滨焊接研究所作为我国摩擦焊技术发源地，现已研发了IFW-377（F_{max}=3700 kN）、IFW-600（F_{max}=6000 kN）及IFW-1000（F_{max}=10000 kN）三种型号惯性摩擦焊机，并均已成功应用于我国相关航空发动机转子组件的焊接制造，实现了进口替代。经过近十年的持续技术攻关，国内航空用惯性摩擦焊机研发及制造能力获得了巨大进步，其中惯性摩擦焊机的主轴稳定性、惯量储能精度、焊接过程自动化控制等关键部件及核心技术均达到了航空发动机转子组件的焊接质量及精度要求，但在焊前在线自动化检测技术方面还有一定差距，需要加大研发力度追赶世界先进水平。

3　惯性摩擦焊接技术研究现状

3.1　微观组织

惯性摩擦焊接头通常呈现出典型的区域特征：焊缝

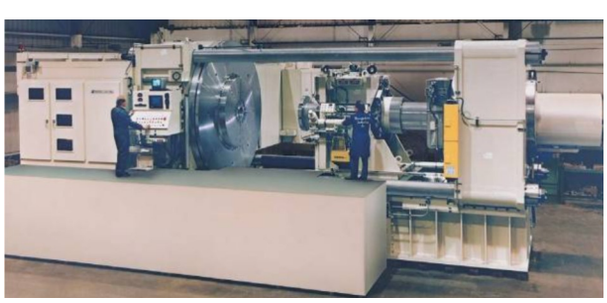


图1　800型惯性摩擦焊机

Fig.1　800-type inertial friction welding machine



图2　SRS1000型惯性摩擦焊机

Fig.2　SRS1000-type inertial friction welding machine

区（WNZ）、热力影响区（TMAZ）、热影响区（HAZ）和母材（BM）。焊接工艺参数的变化会直接影响焊接接头的微观组织特征、分布状态及晶粒尺寸，不同热输入和压力条件的组合会引起差异化的相变和再结晶行为。尤其对高合金化的钛合金与镍基高温合金材料，不同的热-力耦合作用会诱导差异化的相变动力学行为，进而形成多样化的微观组织及分布。通过研究惯性摩擦焊接头的微观组织特征及演变对揭示接头的力学性能规律至关重要。

在惯性摩擦焊接过程中，焊缝区会经历剧烈的高温与塑性变形的双重耦合作用，普遍会发生连续动态再结晶（CDRX）或不连续动态再结晶（DDRX），经历过动态再结晶的组织其主要特征是会发生晶粒细化而形成细小的等轴晶粒，进而提高了组织性能。Zhao 等[39]发现 FGH96 合金焊缝区的 γ′相几乎全部溶解，并形成单一的细小等轴晶粒（晶粒尺寸约 7 μm），γ′相的体积分数和晶粒尺寸随着到焊缝区距离的增加而增大，其形态也由球形逐渐转变为立方形，如图 3 所示。许乔郅等[40]在研究 FGH101 合金接头时观察到焊缝区同样由细小均匀等轴晶组成，仅含有少量的 γ′相。

Zhou 等[41]发现 GH4151 合金焊缝区为 γ 等轴晶粒，高倍下还可观察到大量超细尺寸的二次 γ′相（γ'_{II}）和三次 γ′相（γ'_{III}），部分区域还存在 *M*C 和 $M_{23}C_6$ 碳化物（如图 4 所示），袁明强等[42]也获得了相近的研究成果。Liu 等[43]通过 EBSD 证实了 TC25G 合金接头焊缝区主要是剪切变形，形成了<111>//TD 织构；热力影响区主要为压缩变形，形成了<100>//RD β 织构；在 TC25G 与 Ti65 异质钛合金接头焊缝区会形成 bcc D2($11\bar{2}$)[111]剪切织构，并在冷却阶段产生了变体选择，形成了[$\overline{10}$553]/63.26°位错的 α 变体[44]。Ti60 和 TC18 异质钛合金的接头焊缝区也表现出了明显的织构特征，其中{0001}<$11\bar{2}0$>和{100}<$0\bar{1}1$>取向占主导地位[45]。

3.2　力学性能

惯性摩擦焊作为一种固相焊接工艺，其工艺参数的变化将获得不同的微观组织特征，从而形成不同的力学性能，焊接过程中的动态再结晶和相变行为会显著影响接头的强度与塑性，优化焊接工艺参数对细化焊缝区晶粒、减少缺陷、提高强度性能和疲劳性能具有重要作用。

Zhou 等人[46]研究了 FGH101 和 IN718 异质合金接头的力学性能，其中室温及 650 ℃高温下平均抗拉强度分别可达 1467 及 1212.5 MPa，高温疲劳试验均断裂在远离焊缝的母材区，通过 SEM 观察试样断口均为混合断裂模式，如图 5 所示，且 FGH101 母材性能对焊接接头的疲劳

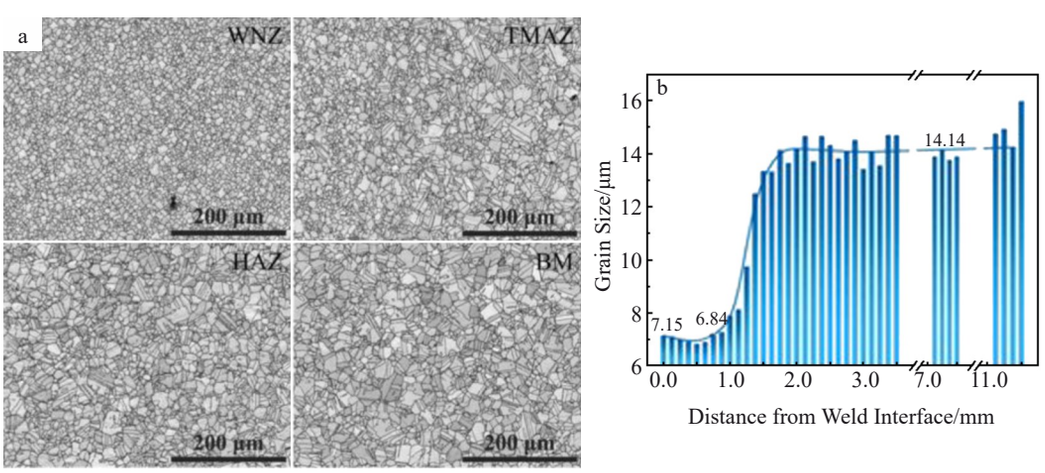


图 3　FGH96 合金惯性摩擦焊接头的晶粒结构 EBSD 图像和晶粒尺寸分布

Fig.3　EBSD mappings of grain structures in inertial friction welded FGH96 joint (a) and grain size distribution (b)[39]

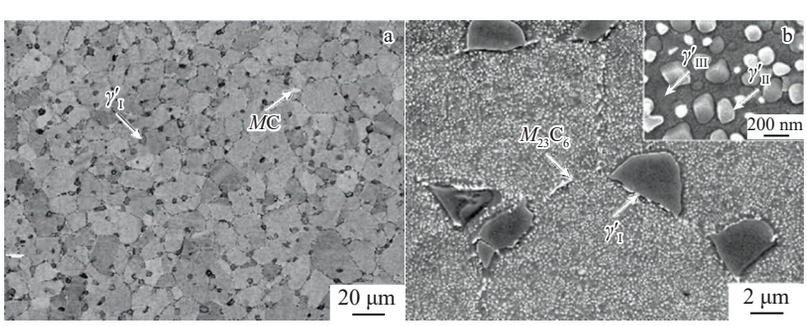


图 4　GH4151 合金接头焊缝区组织

Fig.4　Microstructures of the weld zone of GH4151 alloy joint[41]: (a) *M*C carbide; (b) $M_{23}C_6$ carbide

寿命具有重要影响。

Zhang 等[47]在分析同质的 FGH96 合金接头的 650 ℃高周疲劳行为时发现，接头的疲劳性能与母材相近，其中晶粒尺寸越大，孪晶界越多，晶界角度越大，在循环载荷作用下形成沿晶裂纹并发生开裂的趋势就会越高，图 6 中证实了裂纹萌生于与晶粒尺寸相近的约为 50 μm 的大晶面上，高应力首先激活了大晶面上的滑移系产生滑移变形而开裂。乌彦全等[48]根据 ASTM E399 标准检测了 TC4 钛合金母材和接头室温下的断裂韧性分别为 $K_{IC母}$= 62.1 MPa·m$^{1/2}$ 和 $K_{IC焊}$=71.8 MPa·m$^{1/2}$，在分析 TC4 钛合金惯性摩擦焊接头疲劳裂纹扩展行为时发现，晶界上分布的连续片状 α_p 相、晶粒内大量的平行或交叉分布的片状 α 相和复杂的相界面结构可有效阻碍裂纹的扩展并改变裂纹的扩展路径，使裂纹在扩展过程中发生偏折或分叉，如图 7 所示。

Zhang 等[49]研究了 GH4065A 和 FGH96 同质/异质合金接头的 680 ℃高温及不同应力条件下蠕变行为和断裂机制。结果显示，同质合金接头的蠕变性能要优于异质合金接头，且应力越高，蠕变断裂时间越短，同时应变率越高。GH4065A 和 FGH96 合金接头试样在 680 ℃时 685、750、830 和 914 MPa 条件下的蠕变失效寿命分别为 612、419、194 和 42 h，均断裂于 FGH96 侧热力影响区，主要是由于 FGH96 的热力影响区内存在大量的未溶解粉末颗粒边界（PPB），如图 8 所示，成为了潜在的裂纹源，微裂纹也更倾向于沿着晶界上的 PPB 析出物扩展。梁武等[50]针对 FGH96 和 IN718 异质合金接头进行了 650 ℃高温拉伸试验，试样全部断裂于焊缝区，但 1080.8 MPa 的平均抗拉强度与 IN718 母材相近，当裂纹源在试样四周

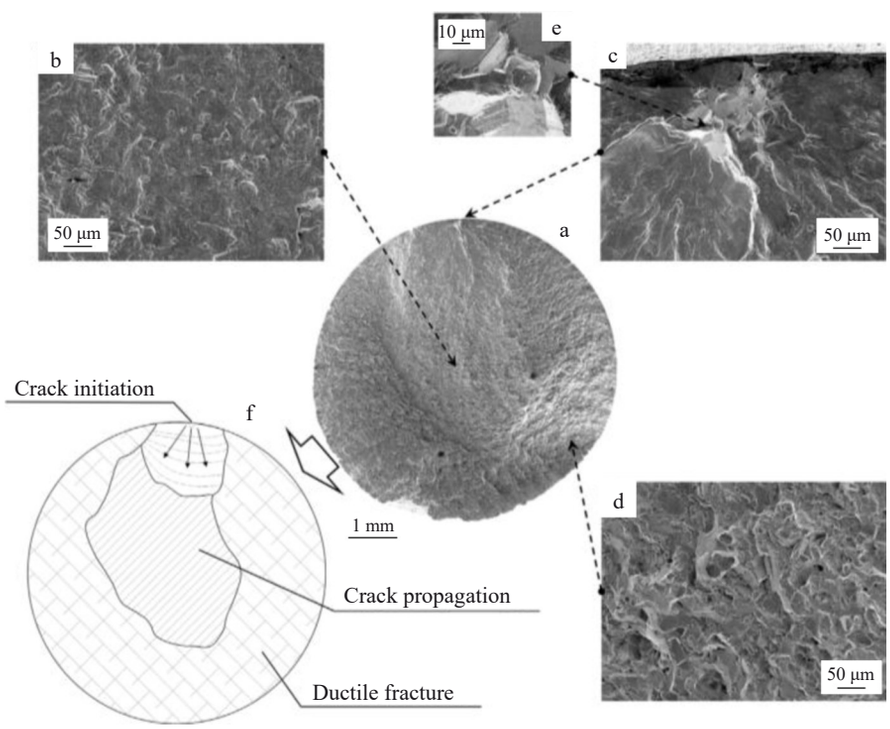


图 5　FGH101 和 IN718 异质合金接头疲劳试样断口形貌

Fig.5　Fatigue fracture morphologies of FGH101 and IN718 dissimilar alloy joint[46]: (a) overall fracture; (b) crack propagation zone; (c) crack initiation zone; (d) ductile fracture zone; (e) local enlarged view of crack initiation zone; (f) distribution of different fracture zones

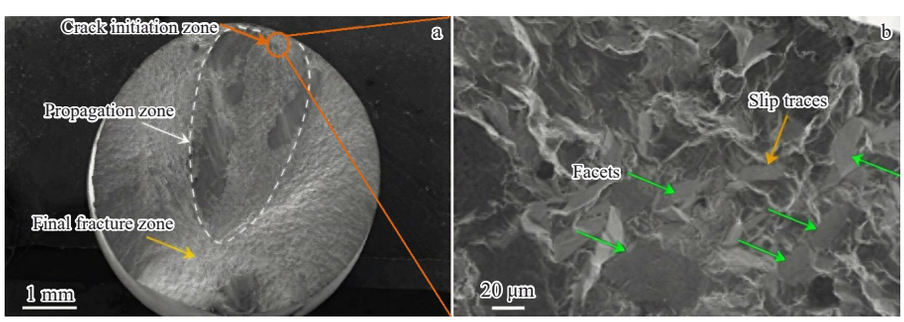


图 6　FGH96 合金接头 650 ℃下高周疲劳断口形貌

Fig.6　Fatigue fracture morphologies of the FGH96 welded joint at 650 ℃[47]: (a) entire fracture surface and (b) magnified image of facets and slip traces

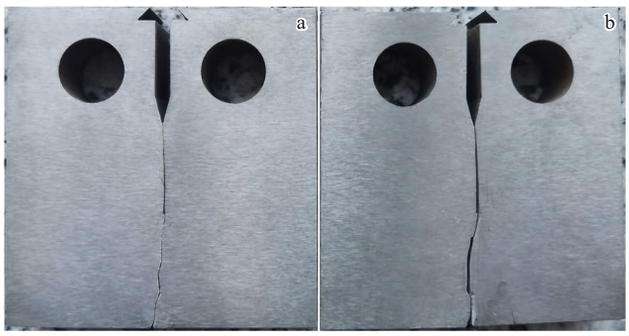


图7 TC4钛合金惯性摩擦焊接头疲劳裂纹扩展试验加载后的母材和接头照片

Fig.7 Photographs of base metal (a) and welded joint (b) after fatigue crack growth detection on TC4 titanium alloy inertial friction welded joint[48]

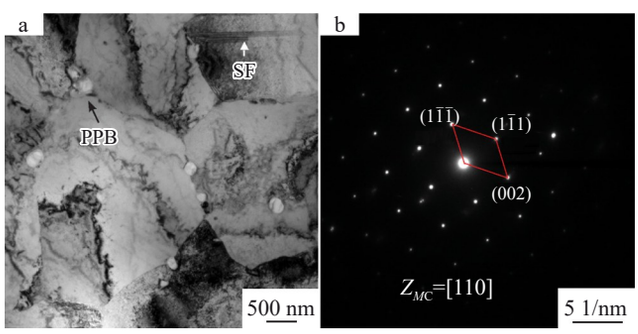


图8 PPB沉淀的明场像和SAED花样

Fig.8 Bright field image (a) and SAED pattern (b) of PPB precipitate[49]

边缘均产生时，形成“平台+凹坑”状断口特征；当裂纹源仅在试样边缘焊缝局部区域出现时，便形成“平台+剪切”状断口特征，如图9所示。

3.3 数值模拟

数值模拟是通过计算机算法和数学模型来间接研究和预测物理现象或工程问题，已经成为各领域研究和优化的重要手段。近年来，惯性摩擦焊接数值模拟的研究主要围绕热-力耦合建模、材料本构关系和多尺度仿真等内容，这些内容的研究为预测试验结果、降低试验成本及深入理解惯性摩擦焊接机理和工艺优化提供了重要技术支撑。

Grant等[51]基于DEFORM-2D软件建立了RR1000粉末合金惯性摩擦焊接热-力耦合有限元模型，研究了焊接压力对接头材料流动、温度变化及残余应力的影响，如图10和图11所示。该模型预测峰值温度与实测值偏差在20~30 ℃，残余应力分布在环向和径向均显示出了较好的一致性，其中低焊接压力接头的高温区域出现在靠近管壁内径较宽的环形拉应力场内，但在焊缝及4 mm范围内的环向应力（r=–2.5 mm）分布基本与焊接压力无关，焊接压力越高、热影响区宽度越窄。Wang等[52]也研究了焊接压力、转速及惯量对摩擦界面温度和缩短量的影响（如图12所示），研究结果显示缩短量与初始转速的平方近似成正比，而与焊接压力成对数关系，并且焊接压力与初始转速相比对接头高温区宽度的影响更大，模拟的晶粒尺寸与实验参数之间的相对误差小于10%。

Nie等[53]采用MSC.Marc软件建立了FGH96合金环形件摩擦焊的动态再结晶动力学模型，模拟结果显示动态再结晶过程首先发生在整个壁厚的内外边缘区域，动态再结晶越充分的区域，再结晶晶粒尺寸越小，模拟晶粒尺寸与实测结果误差小于10%，如图13和图14，该模型具备较高的准确性。前期的惯性摩擦焊接模拟大部分为同质合金材料，Tang等[54]依托ABAQUS和Python软件创建了一种具备扭转变形自由度的完全耦合温度-位移轴对称模型，该模型较好地模拟了LSHR和Mar-M247异质合金焊接过程的摩擦机制转变所引起的界面热流、摩擦应力及温度的变化，该种异质合金组合摩擦机制的瞬态转变会产生两个库仑摩擦区和一个剪切摩擦区，从库仑摩擦状态过渡到剪切摩擦状态，有助于焊接界面温度的均匀化。

Li等[55]首次实现了界面摩擦状态转变和热力响应的全耦合模拟，揭示了焊接界面热力分布不均匀性，其最大热流和温度集中在2/5~2/3半径区域，中心温度比峰值低

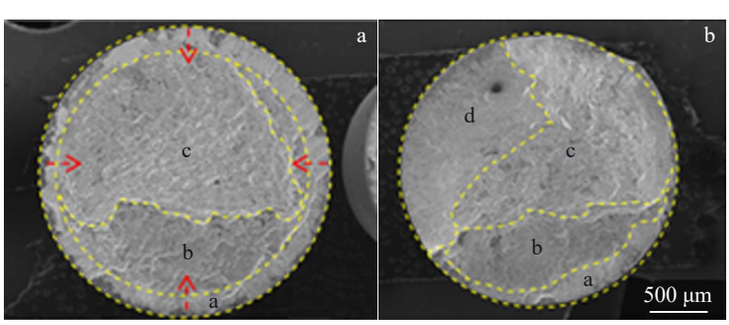


图9 FGH96和IN718异质合金接头拉伸试样的宏观断口形貌

Fig.9 Macroscopic fracture morphologies of tensile specimens of FGH96 and IN718 dissimilar alloy joint[50]: (a) “platform+pit” shaped fracture; (b) “platform+shear” shaped fracture

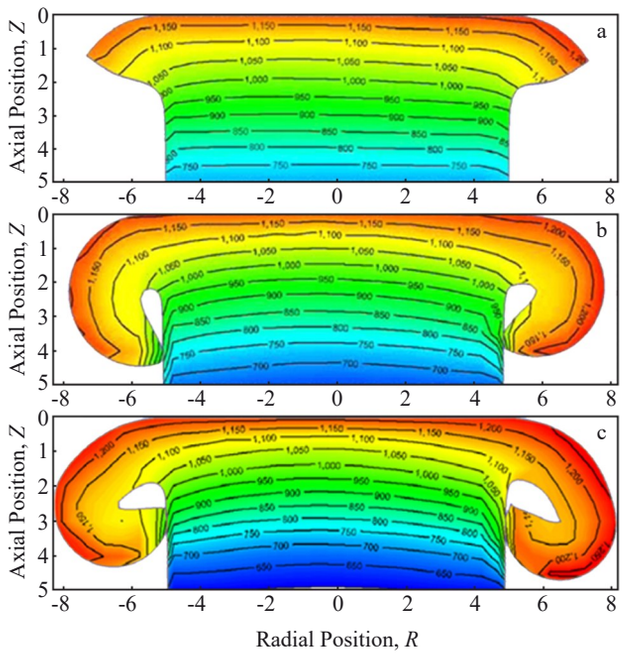


图10 低、中、高焊接压力下的接头温度分布

Fig.10 Temperature maps attained in the weld piece for weld-low (a), weld-middle (b) and weld-high (c)[51]

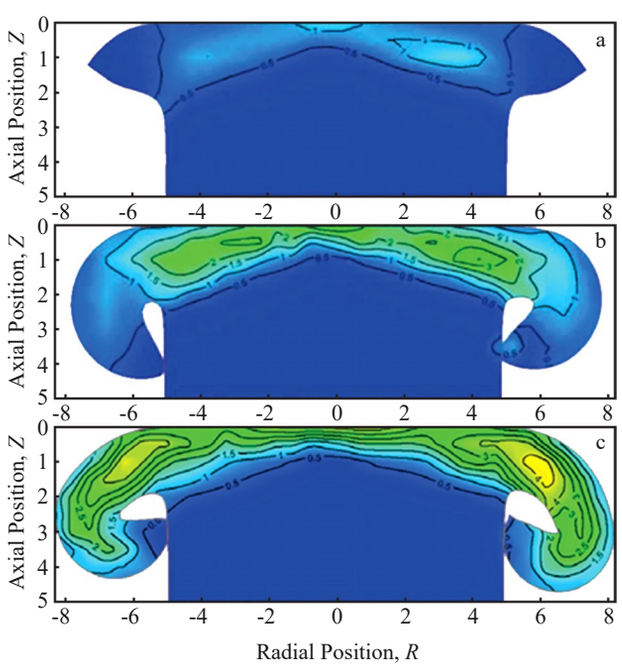


图11 低、中、高焊接压力下的应变率分布

Fig.11 Contour maps of in-plane strain rates through the final weld geometry for weld-low (a), weld-middle (b) and weld-high (c)[51]

100~150 K。还提出了基于三轴应力状态下 von Mises 准则的新型摩擦状态转变判据，有效区分了库伦摩擦和软化摩擦状态，准确模拟了界面非对称的扭转和周向塑性流动的瞬态热-力学行为，模型验证平均误差<6%[56]。弱连接缺陷作为惯性摩擦焊接头质量检测的难题，一直困扰着众多技术人员，Tang 等[57]首次采用了试验与模拟相结合的方法研究了 IN718 高温合金惯性摩擦焊接头弱连接缺陷的形成及分布，试验显示弱连接缺陷沿线的空洞呈多边形状（尺寸约为 5 μm，见图 15），图 16 清晰模拟了惯性摩擦焊过程中整个焊接界面上的温度、轴向压力和界面结合比例的演变，研究显示界面上的轴向压力表现出中心高、边缘低的特征，这也是边缘区域产生弱连接缺陷的主要原因。

4　惯性摩擦焊在航空发动机上的应用

目前惯性摩擦焊接技术在航空发动机上的应用主要集中在转子组件上，包括风扇盘鼓、压气机盘鼓及涡轮盘轴组件，焊接结构可省略大量的连接紧固件，进而可大幅度降低转子组件的质量。航空发动机风扇盘均为空心腹板结构，前期通过整体锻造与机械加工进行制造，其特点是加工周期长、成本高、材料利用率低，美国 GE 公司将 GE90 发动机风扇盘从整体锻造改成了三个薄盘件惯性摩擦焊接而成，GE90 发动机的改进型 GE90-115B 型发动机的风扇盘鼓也采用了四级惯性摩擦焊接结构，如图 17 所示[58]。

航空发动机压气机均为多级盘鼓组件结构，惯性摩擦焊工艺在压气机组件上更是得到了广泛应用，例如 GE90 发动机高压压气机的 2~6 级钛合金盘鼓和 8~10 级高温合金盘鼓均采用惯性摩擦焊连接工艺。CF6 发动机的 3~9 级压气机转子原为整体锻造加工，总质量达到了 413 kg，整体锻件变更为 2 个锻件惯性摩擦焊连接后，质量降低至 300 kg，锻件减重约为 27%。P&W 公司的 F100-PW-100 发动机的高压压气机转子组件焊接采用的电子束焊接工艺，在其改进型 F100-PW-229 发动机的高压压气机盘鼓则采用了惯性摩擦焊接工艺。国际知名的 CFM56 发动机压气机的 1~2 级钛合金盘鼓和 4~9 级 Rene95 合金盘鼓组件的连接、LEAP 发动机的高压压气机转子也都采用了惯性摩擦焊接技术。英国 R·R 公司对惯性摩擦焊接技术的研究及应用要晚于美国 GE 公司，在 Trent 系列发动机转子的焊接上一直采用电子束焊接工艺，但随着新型高含量 γ′ 强化相合金材料的应用，电子束焊接难度越来越高，R·R 公司在 Trent 系列发动机的后续衍生型号的压气机毂筒也逐渐采用了惯性摩擦焊接工艺。此外，德国 MTU 公司研制的 EJ200 发动机的高压压气机 4~5 级盘鼓组件间的焊接工艺均为惯性摩擦焊。中国在航空发动机整体转子的惯性摩擦焊接技术的研究及应用起步相对较晚，其科研成果也仅在 FWS10 型发动机压气机整体转子部件上得到了应用，如图 18 所示[59]。

随着航空发动机推力的逐渐提高，涡轮前温度也越来越高，涡轮盘也从变形高温合金材料替换成了耐热温度更高的粉末高温合金，但涡轮后轴依然采用变形高温

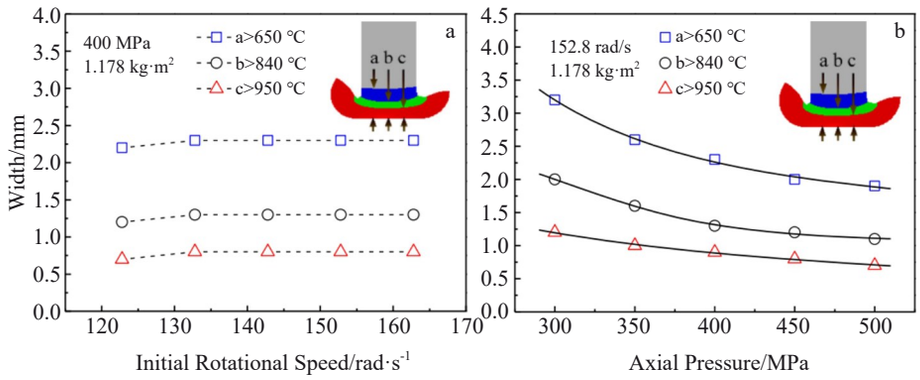


图 12　初始转速和焊接压力对接头高温区宽度的影响

Fig.12　Effect of initial rotational speed (a) and axial pressure (b) on the width of high-temperature zone in joint[52]

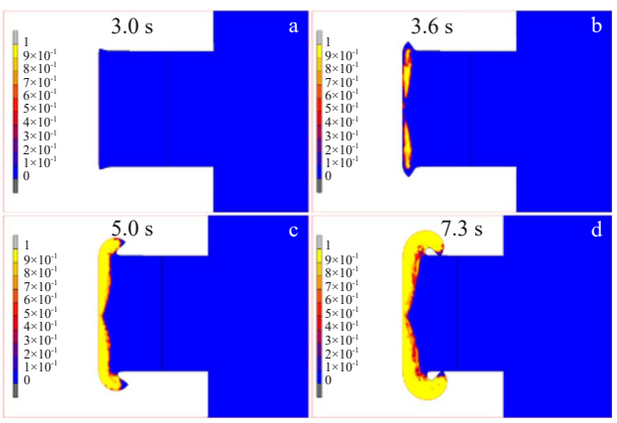


图 13　FGH96 高温合金惯性摩擦焊接过程动态再结晶分布状态

Fig.13　DRX fraction distribution during inertial friction welding process of FGH96 superalloy[53]

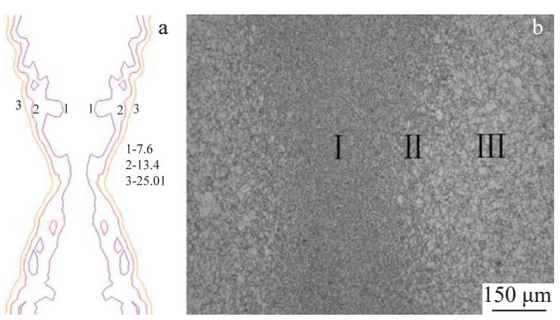


图 14　模拟晶粒尺寸和焊缝区的实验结果

Fig.14　Simulated grain size (a) and experimental result in the weld zone (b)[53]

合金，针对高合金化的异质合金材料的连接，惯性摩擦焊因其焊接过程中材料不熔化处于一种高温塑性状态而具有独特优势[60]，例如 GEnx 发动机的涡轮盘（Rene′104）与涡轮后轴（IN718）、Trent1000 发动机的粉末合金涡轮盘（RR1000）与后轴（IN718）之间的连接均采用惯性摩擦焊接工艺。同时，R·R 公司也开展了 IN718 与 U720Li，IN718 与粉末合金等异种材料的惯性摩擦焊工艺开发。

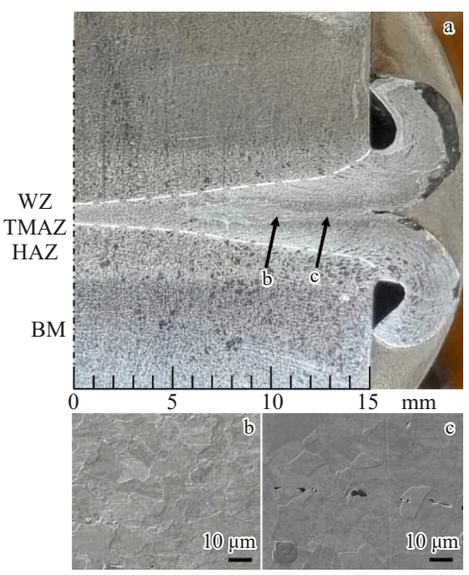


图 15　IN718 高温合金惯性摩擦焊接界面结合状态和微观组织

Fig.15　Bonding state and microstructures at the interface of inertial friction welded IN718 superalloy[57]

世界先进航空发动机转子件应用惯性摩擦焊接技术情况如表 1[61–63]。

5　当前挑战及展望

60 多年来，惯性摩擦焊接技术在航空发动机转子组件轻量化制造上得到了广泛应用，针对钛合金及镍基高温合金的惯性摩擦焊接工艺研究也取得了丰硕成果，但随着航空发动机性能要求的不断提高，新型合金材料大量应用和转子结构变更，给惯性摩擦焊接工艺也带来了多方面的挑战。①材料的合金化程度越来越高，惯性摩擦焊接工艺窗口越来越窄；②变温度条件下的梯度材料组合特征，惯性摩擦焊接头性能及尺寸精度控制难度更大；③发动机转子组件的设计趋向于更薄壁及复杂结构，惯性摩擦焊接工装夹具结构匹配性及焊接过程稳定性控制难度更高。

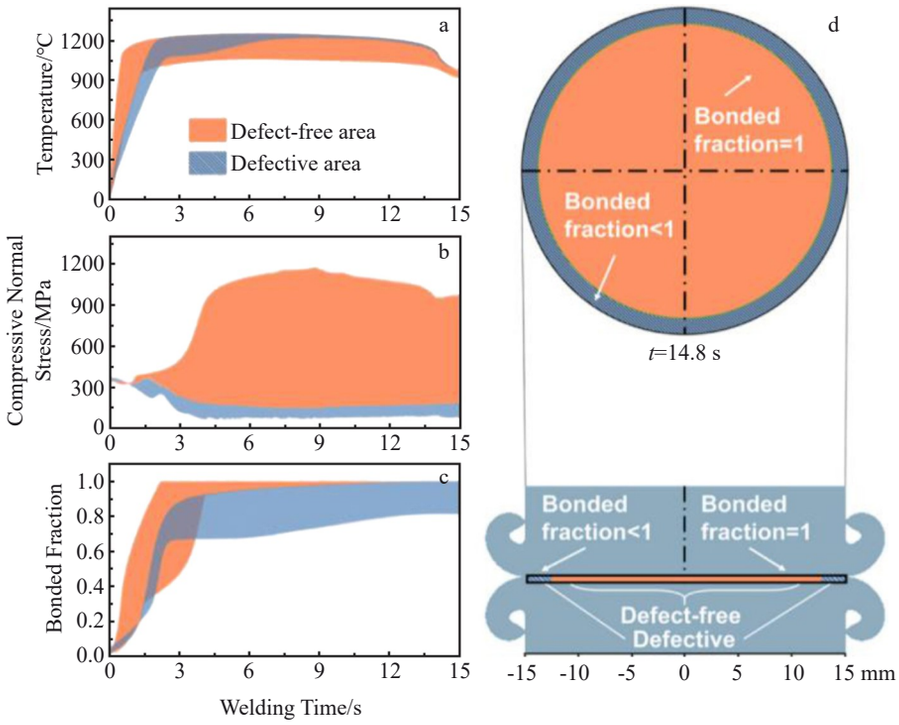


图16　焊接界面热-力学变量的转变和结合比例

Fig.16　Evolution of thermo-mechanical variables (a–c) and bonded fraction across the interface (d)[57]: (a) temperature; (b) compressive normal stress; (c) bonded fraction

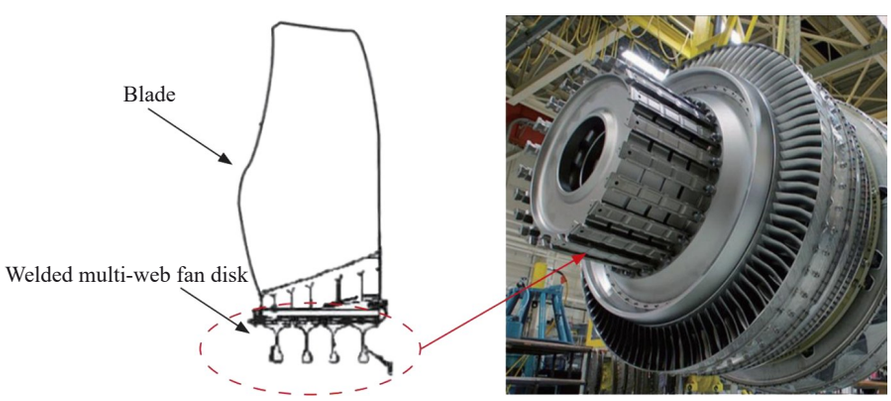


图17　GE90-115B发动机惯性摩擦焊风扇盘组件

Fig.17　GE90-115B engine fan disk assembly welded by inertial friction welding[58]



图18　惯性摩擦焊接的发动机压气机整体转子部件

Fig.18　Aeroengine compressor rotor welded by inertial friction welding[59]

随着全球“双碳”目标的逐渐推进，化石能源价格的不稳定，推动着航空发动机向低排放、绿色化、轻量化方向发展，依赖新材料的应用、结构设计的创新，也为制造工艺提出巨大挑战。因此，未来需要重点关注新型合金材料（单晶合金、陶瓷基复合材料及金属间化合物）的惯性摩擦焊接工艺开发及智能化控制、梯度合金材料组合部件的惯性摩擦焊接质量控制、新型柔性化工装夹具研制及焊接过程的自适应控制。此外，随着AI人工智能技术的飞速发展，未来惯性摩擦焊机的自动化控制+AI算法有望真正实现焊接过程的智能监测与质量诊断。

表1 惯性摩擦焊在先进航空发动机转子部件中的应用

Table1 Application of inertial friction welding in rotor components of advanced aero-engines

Engine model	Application component	Application material
GE90	Fan disk	Ti17
	2nd–6th, 8th–10th stage HP compressor disk assembly	Ti17+Ti6242 and IN718+Rene′88DT
	HP turbine disk-shaft assembly	Rene′88DT
GEnx	Fan disk	Ti-6Al-4V
	3rd–4th, 6th–10th stage HP compressor disk assembly	Ti6242 and IN718+Rene′88DT
	HP turbine disk-shaft assembly	Rene′104+IN718
GP7200	HP compressor rotor	-
CF6	3rd–9th, 11th–14th stage HP compressor rotor	Titanium alloy and IN718
F101	1st–2nd, 4th–9th stage compressor disk	Titanium alloy and A286
F110	1st–2nd, 4th–9th stage compressor disk	Titanium alloy and IN718
F414	1st–2nd, 4th–7th stage compressor disk	Ti17 and IN718
T58	1st–8th stage compressor disk	IN718
TF34	1st–9th, 11th–14th stage compressor disk	Titanium alloy and superalloy
F100-PW-229	1st–2nd, 4th–10th stage compressor disk	Titanium alloy and superalloy
Trent1000	HP compressor rotor	RR1000
	Rear turbine stub shaft and turbine disk	RR1000
CFM56	1st–2nd, 4th–9th stage compressor disk	Ti17 and IN718
LEAP	HP compressor	-
EJ200	4th–5th stage disk and rear conical shaft	-

6 结 论

1）目前全球有美国MTI、德国KUKA及中国哈尔滨焊接研究所制造的惯性摩擦焊机成功应用于航空发动机转子组件的焊接制造，其中德国KUKA的SRS1000型惯性摩擦焊机实现了全自动的焊前组件对中精度校准测量及调整与焊接。

2）钛合金与镍基高温合金材料作为航空发动机转子制造的关键材料，采用惯性摩擦焊接工艺均实现了钛合金与镍基高温合金无论在微观组织，还是力学性能等方面均远超过熔化焊的焊接接头，为航空发动机转子组件的高质量焊接制造提供了关键技术支撑。

3）目前惯性摩擦焊接技术主要应用于航空发动机转子的风扇盘鼓、压气机盘鼓及涡轮盘轴组件，典型发动机有GE90、GEnx、F100-PW-229、Trent1000等。

惯性摩擦焊接技术在航空发动机转子组件上的广泛应用已证明其优异的技术价值，新材料及新结构的逐渐增多，其应用范围将进一步扩大，成为支撑高性能、轻量化航空发动机制造的关键技术之一。随着智能化制造技术的进步，惯性摩擦焊接技术将更好地满足航空发动机转子组件高性能、高可靠性需求，推动航空发动机的发展与革新。

参考文献 References

[1] Liu Daxiang(刘大响), Jin Jie(金 捷). *Strategic Study of CAE*(中国工程科学)[J], 2004(9): 1

[2] Liu Daxiang(刘大响). *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2017, 45(10): 1

[3] Zhang X L, Zhang T H, Cen Z H *et al. Energy*[J], 2025, 322(5): 135488

[4] Peters M, Kumpfert J, Ward C H *et al*. *Advanced Engineering Materials*[J], 2003, 5(6): 419

[5] Pollock T M, Tin S. *Journal of Propulsion and Power*[J], 2006, 22(2): 361

[6] Chamanfar A, Jahazi M, Cormier J. *Metallurgical & Materials Transactions A*[J], 2015, 46(4): 1639

[7] Corman G S, Luthra K L. *Comprehensive Composite Materials II*[J], 2018, 5: 325

[8] Mao Jixuan(毛吉烜), Zhang Xiaoping(张晓平). *Aerospace Materials & Technology*(宇航材料工艺)[J], 2025, 55(1): 1

[9] Warwick G. *Aviation Week & Space Technology*[J], 2014, 176(11): 43

[10] Wu Z H, Kou H C, Chen N N *et al*. *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2022, 20(9–10): 469

[11] Yin L W, Osamu U. *International Journal of Fatigue*[J], 2022, 156(3): 106688

[12] Li Y, Liang X Y, Yu Y F *et al*. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*[J], 2022, 1(1): 100019

[13] Fu Qingfeng(付青峰), Yang Xilian(杨细莲), Liu Keming(刘克明). *Heat Treatment Technology and Equipment*(热处理技术与装备)[J], 2018, 39(3): 69

[14] Song X Y, Wang Y L, Zhang W J *et al*. *Materials Science Forum*[J], 2017, 898: 574

[15] Huang Xiaoning(黄晓宁), Wang Cenyang(王岑阳), Zhu Zhihao

(朱智浩) *et al*. *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2025, 45(2): 53

[16] Wu Yanquan(乌彦全), Zhou Jun(周 军), Zhang Chunbo(张春波) *et al*. *Electric Welding Machine*(电焊机)[J], 2019, 49(5): 32

[17] Ohtani R, Tada N, Shibata M *et al*. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*[J], 2002, 24(12): 867

[18] Tan L M, Ye L, Dong H *et al*. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2025, 35(5): 1585

[19] Ferro P, Zambon A, Bonollo F. *Materials Science and Engineering A*[J], 2005, 392(1–2): 94

[20] Bennett C J. *Inertial Friction Welding of High Strength Aerospace Alloys*[D]. Nottingham: University of Nottingham, 2007

[21] Jiang He(江 河), Dong Jianxin(董建新), Zhang Maicang(张麦仓) *et al*. *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2021, 64(Z1): 62

[22] Wu Jinjiang(武金江), Zhao Guangdi(赵广迪), Wang Bo(王 博) *et al*. *Materials China*(中国材料进展)[J], 2024, 43(10): 902

[23] Yang Sheng(杨 升). *Proceedings of the 13th Sub-forum of the 15th Annual Conference of the China Association for Science and Technology: Symposium on Design, Manufacturing and Application Technology of Aero Engines*(第十五届中国科协年会第 13 分会场:航空发动机设计、制造与应用技术研讨会论文集)[C]. Guiyang: China Association for Science and Technology, 2013: 913

[24] Ma J, Wang H Q, Wang X B *et al*. *Vacuum*[J], 2025, 233(3): 113963

[25] Li H, Wang H Q, Qiu Y *et al*. *Materials Characterization*[J], 2025, 222(4): 114800

[26] Li W Y, Suo J D, Kim K *et al*. *Materials Science & Engineering A*[J], 2014, 599(4): 38

[27] Spiller S, Varone A, Angella G *et al*. *Materials & Design*[J], 2025, 257(9): 114413

[28] Liu Y, Wu D T, Gao Z H *et al*. *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2024, 30(5–6): 6341

[29] Yang J, Lou S N, Zhou Y *et al*. *Journal of Aeronautical Materials*[J], 2002, 22(2): 8

[30] Attallah M M, Preuss M. *Welding and Joining of Aerospace Materials*[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012

[31] Huang Z W, Li H Y, Preuss M *et al*. *Metallurgical & Materials Transactions A*[J], 2007, 38(7): 1608

[32] Senkov O N, Mahaffey D W, Semiatin S L *et al*. *Metallurgical & Materials Transactions A*[J], 2014, 45(12): 5545

[33] Zhang Lu(张 露), Zhang Chunbo(张春波), Liao Zhongxiang(廖仲祥) *et al*. *Electric Welding Machine*(电焊机)[J], 2022, 52(4): 8

[34] Zhang Chunbo(张春波), Zhou Jun(周 军), Zhang Lu(张 露) *et al*. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2019, 40(6): 40

[35] Liu Jun(刘 军). *Welding Technology*(焊接技术)[J], 1995(4): 46

[36] Vauderwange C, Lindenau D, Palkowski H *et al*. *Journal of Advanced Joining Processes*[J], 2025, 12(12): 100337

[37] Liang Hai(梁 海), Zhang Zheng(张 峥). *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 1992(2): 48

[38] Chen Jianzhong(陈建忠), Song Zhenqi(宋振琦), Shi Yaowu(史耀武) *et al*. *Materials for Mechanical Engineering*(机械工程材料)[J], 1999, 23(4): 1

[39] Zhao P, Li P, Ding Z J *et al*. *Materials Today Communications*[J], 2025, 42(2): 111194

[40] Xu Qiaozhi(许乔郅), Zhang Guodong(张国栋), Yuan Hong(袁鸿) *et al*. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2023, 52(23): 63

[41] Zhou H J, Tang C, Zhang X M *et al*. *Results in Materials*[J], 2022, 14(6): 100272

[42] Yuan Mingqiang(袁明强), Zhang Chunbo(张春波), Liang Wu(梁 武) *et al*. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2024, 45(12): 63

[43] Liu Y H, Zhao Z B, Zhang C B *et al*. *Materials Letters*[J], 2020, 277(10): 128329

[44] Liu Y H, Sun H, Zhao Z B *et al*. *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2024, 29(3–4): 3185

[45] Liu Y Y, Tian W T, Yang Q H *et al*. *Materials Characterization*[J], 2024, 208(2): 113598

[46] Zhou J, Zhang Y Q, Qin F *et al*. *Frontiers in Materials*[J], 2025, 3(2): 1544584

[47] Zhang S, Li X L, Zhang J F *et al*. *International Journal of Fatigue*[J], 2023, 176(11): 107870

[48] Wu Yanquan(乌彦全), Zhou Jun(周 军), Zhang Chunbo(张春波) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(9): 3132

[49] Zhang Z X, Zhao Q, Li X G *et al*. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*[J], 2025, 48(1): 217

[50] Liang Wu(梁 武), Zhou Jun(周 军), Zhang Chunbo(张春波) *et al*. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2023, 44(9): 44

[51] Grant B, Preuss M, Withers P J *et al*. *Materials Science & Engineering A*[J], 2009, 513–514(7): 366

[52] Wang F F, Li W Y, Li J L *et al*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2014, 71(9–12): 1909

[53] Nie L F, Zhang L W, Zhu Z *et al*. *Finite Elements in Analysis and Design*[J], 2014, 80(3): 63

[54] Tang T X, Shi Q Y, Zhang C B *et al*. *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2024, 30(5–6): 1650

[55] Li C A, Qin G L, Wang H. *Chinese Journal of Aeronautics*[J], 2025, 38(1): 103047

[56] Li C A, Qin G L, Fu B L *et al*. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2025, 303(10): 110643

[57] Tang T X, Shi Q Y, Zhou J *et al*. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2025, 338(4): 118786

[58] Zhao Qiang(赵 强), Zhu Wenhui(祝文卉), Shao Tianwei(邵天巍) *et al*. *Aerospace Power*(航空动力)[J], 2019(5): 41

[59] Xu Fei(许 飞), Zhang Kan(张 侃), Zang Weifeng(臧伟锋). *Science Technology and Engineering*(科学技术与工程)[J], 2019,

19(18): 144

[60] Zhang Z X, Zhao Q, Li X G *et al. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*[J], 2024, 48(1): 217

[61] Zhang Lu(张 露), Han Xiufeng(韩秀峰), Wang Lun(王 伦). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术) [J], 2015(11): 96

[62] Han Xiufeng(韩秀峰), Zhang Lu(张 露), Qian Lingyi(钱凌翼). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术) [J], 2012(13): 55

[63] Zhang Lu(张 露), Han Xiufeng(韩秀峰), Ruan Xueqian(阮雪茜). *Electric Welding Machine*(电焊机)[J], 2022, 52(5): 91

Research Status, Application and Prospect of Key Technologies in Inertial Friction Welding for Aero-engines

Wu Yanquan[1,2], Zhou Jun[1,2], Zhang Chunbo[1,2], Yuan Mingqiang[1,2], Liang Wu[1,2], Qin Feng[1,2], Yang Haifeng[1,2], Huang Caiyan[1,2]

(1. China Academy of Machinery Science and Technology Group Harbin Welding Institute Co., Ltd, Harbin 150028)

(2. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Advanced Friction Welding Technology and Equipment, Harbin 150028)

Abstract: Inertial friction welding (IFW), as an advanced solid-state welding process, has been widely applied in the manufacturing of aero-engine rotor components due to its green, efficient, and superior welding quality. This review systematically summarizes the research achievements in recent years regarding the microstructure, mechanical properties, and numerical simulation of IFWed joints of aviation titanium alloys and superalloys. It also summarizes the large-tonnage, high-precision IFW equipment for aerospace and their application in various types of advanced aero-engine rotor components. Future research should focus on addressing key technical challenges in the engineering application of new materials and new structures. This review also presents prospects for future development, highlighting that continuous innovation of IFW technique will provide critical technical support for achieving the high performance, lightweight design, and enhanced reliability of the new generation of aero-engines.

Key words: inertial friction welding; aero-engines; titanium alloy; superalloy; microstructure; mechanical property; numerical simulation

Corresponding author: Zhou Jun, Professor, China Academy of Machinery Science and Technology Group Harbin Welding Institute Co., Ltd, Harbin 150028, Tel: 0086-451-86334868, E-mail: mch_zhoujun@126.com