

惯性摩擦焊在航空发动机转子制造中的应用

Application of Inertia Friction Welding in Engine Rotor Manufacturing

■ 赵强 祝文卉 邵天巍 刘佳涛 帅焱林 / 中国航发黎明 王冉 / 东北大学

推重比和可靠性是航空发动机的关键考核指标。长期以来，先进航空发动机制造商都在为研发高推重比和可靠性的发动机进行诸多尝试，而惯性摩擦焊作为一种先进的制造技术是提高发动机推重比和可靠性的重要手段之一。

惯性摩擦焊是一种先进焊接技术，国内外针对惯性摩擦焊已开展了大量深入的研究工作，并被成功地应用到一些先进航空发动机核心转子部件的制造中。采用惯性摩擦焊技术制造发动机核心转子部件可以提高转子零组件的整体刚度，减少零件数量，减少故障源，减轻发动机的质量，从而提高发动机的推重比和可靠性。

惯性摩擦焊

惯性摩擦焊的设备及焊接过程

惯性摩擦焊通过在待焊材料之间摩擦产生热量，在顶锻力的作用下使材料产生热塑性变形与流动，进而发生固相连接。典型的惯性摩擦焊设备一般包括主轴驱动系统、飞轮组、顶锻力液压系统、主轴、尾座滑、主轴侧夹紧系统、尾座侧夹紧系统、回转待焊件、非回转待焊件等9个主要组成部分（如图1所示）。惯性摩擦焊机的驱动系统为主轴的转动提供动力，主轴上装配不同惯量组合的飞轮组用于储存惯性焊接的能量。待焊件分别固定在主轴和尾座的夹紧系统上，主轴侧的待焊件可以转动，但不能前后移动；尾座侧的待焊件不能转动，但可连

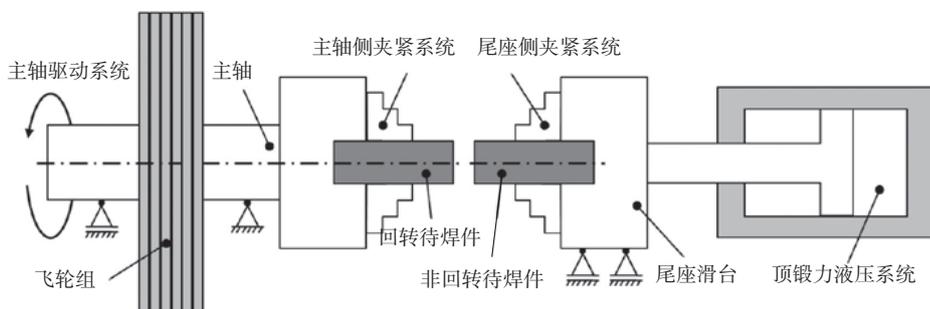


图1 典型惯性摩擦焊设备组成示意图

同夹紧系统整体在尾座滑台上前后移动，移动的动力由尾座液压系统提供，该系统也在焊接过程中提供顶锻力。

在惯性摩擦焊的焊接过程中，尾座侧待焊件固定不动，主轴旋转并带动飞轮组高速旋转，当主轴加速到设定速度时，主轴与驱动系统断开，此时主轴依靠主轴和飞轮储存的动能继续惯性旋转。当主轴转

速降至焊接速度时，顶锻液压系统驱动尾座轴向主轴端移动，直到焊接件发生接触。在轴向压力和摩擦扭矩作用下，焊接界面在接触瞬间摩擦生热，摩擦热输入使界面附近的母材加热到热塑性状态。顶锻力继续作用，使摩擦界面处的热塑性金属挤出形成飞边，同时摩擦过程不断消耗主轴和飞轮组的动能，直至能量消耗殆尽，主轴停止转动，

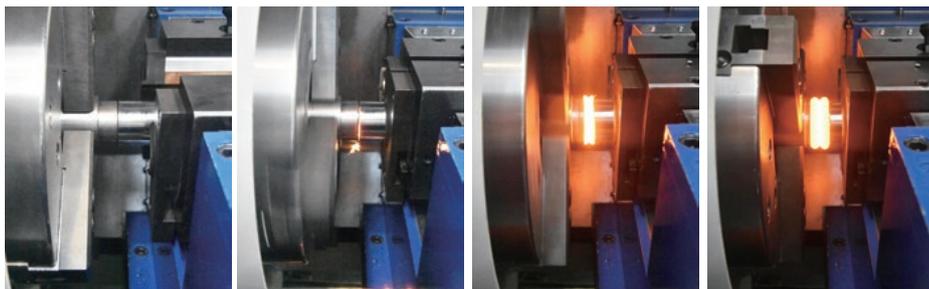


图2 惯性摩擦焊的焊接过程

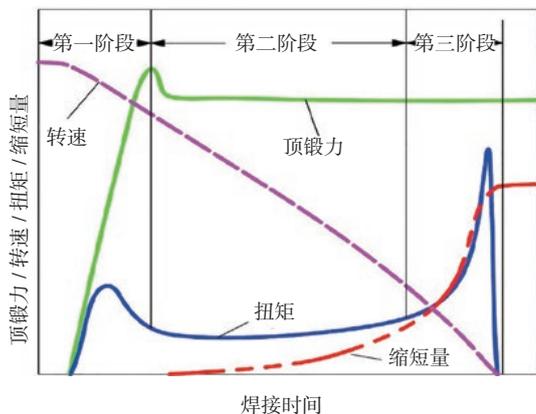


图3 焊接过程主要工艺参数变化图

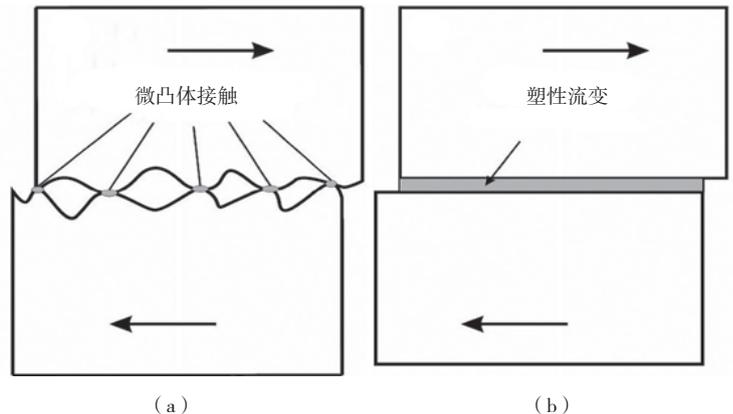


图4 摩擦界面不同接触状态的示意图

此时保压一段时间后撤销顶锻压力，以完成整个焊接过程。（如图2所示）

惯性摩擦焊的机理

惯性摩擦焊的焊接过程可分为3个阶段（如图3所示），扭矩曲线的变化可作为分析惯性摩擦焊焊接过程的一个关键因素。第一阶段由金属干摩擦和磨损作用主导，机加工后的金属表面微观上不是完全光滑的，存在微凸体，如图4(a)所示。在轴向压力和摩擦扭矩作用下，在摩擦界面上接触的微凸体发生黏结作用和塑性变形，同时金属表面的较硬微凸体压入较软金属的表面。在切向力作用下相对滑动时，较硬的金属对较软的金属发生犁削作用。摩擦过程中，塑性变形、机械挖掘、黏结和分子作用等现象在摩擦界面同时发生。随着摩擦界面氧化层或脏污层破碎程度的加深，清洁金属的接触面积增大，接触面的黏结作用增大，导致摩擦所需的作用力增大，从而使扭矩快速上升至峰值（扭矩的前峰值）。在第一阶段后期，摩擦界面金属发生受热软化、热塑性流变、形变硬化现象，由于摩擦界面塑性变形层的受热软化起主导作用，扭矩发生明显的下降。第一阶

段的摩擦转速是最高的，高转速导致这一阶段的瞬时能量输入达到最大值。瞬时的高能量输入将塑性流变限制在很窄的变形层范围内，未在母材较宽区域产生显著扩展，如图4(b)所示。

第一阶段至第二阶段的转变期间，应变硬化、受热软化对摩擦界面金属塑性变形层的影响达到平衡。在第二阶段，焊接进程是自动调整的，塑性变形层的软化金属在摩擦扭矩和轴向压力作用下，从摩擦界面挤出，形成飞边，界面附近高温区域新的金属不断进入摩擦界面，发生摩擦—受热软化—飞边形成—摩擦的循环作用。当摩擦转速继续下降，能量消耗、应变速率、温度变化之间存在复杂的相互关系，多种关系之间形成动平衡状态，扭矩保持稳定，从图3中的第二阶段扭矩曲线可看出，扭矩保持了相对恒定的值。

第二阶段至第三阶段转变瞬间，摩擦界面的温度梯度降低，同时狭窄的塑性形变区迅速变宽。在第三阶段，随着轴向缩短量与飞边量不断增大，沿着焊缝中心内外侧形成明显飞边环。这一阶段后期，随着转速下降到较低水平，能量输入变小，摩擦界

面金属软化程度下降，此时摩擦的金属充分焊合，焊缝金属强度提高导致扭矩上升到另一个峰值，即扭矩的后峰值。当转速完全停止时，焊缝金属得到充分形变，形成细晶组织的焊缝，第三阶段终止。

在整个摩擦焊接过程中，热力学耦合作用反复循环，摩擦界面发生复杂的变化，可能存在应变硬化、塑性流变、变形孪晶、动态再结晶、析出相的回溶和析出、形变诱发的相变、温度引起的相变、合金元素的扩散等现象。

惯性摩擦焊在发动机转子部件上的应用

惯性摩擦焊在航空发动机转子部件上的应用非常广泛，主要应用于风扇盘转子组件、压气机转子组件和涡轮盘轴转子组件的焊接，其中在高压压气机转子组件制造中的应用最为典型。

在风扇盘转子组件上的应用

惯性摩擦焊技术被应用于大型民用航空发动机风扇盘转子组件制造中。由于风扇叶片尺寸较大，常规的风扇盘因辐板很宽而导致质量很大，因此在设计风扇盘时采用多

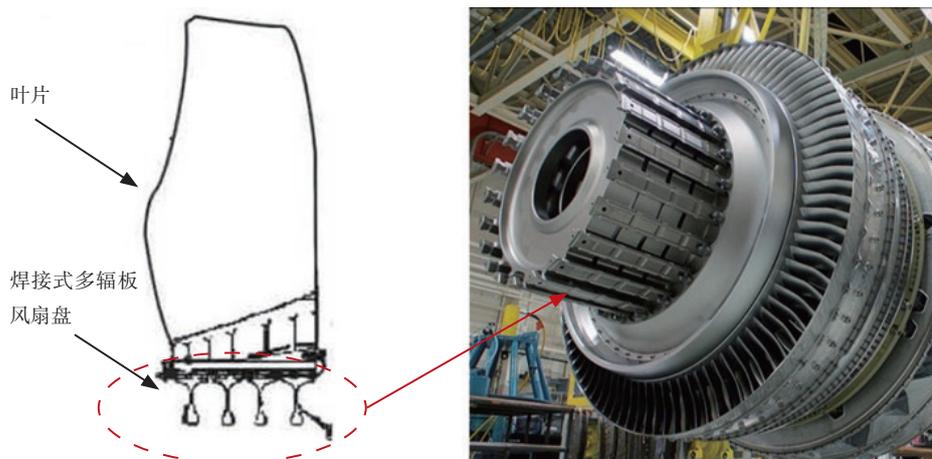


图5 惯性摩擦焊接的GE90-115B风扇盘组件

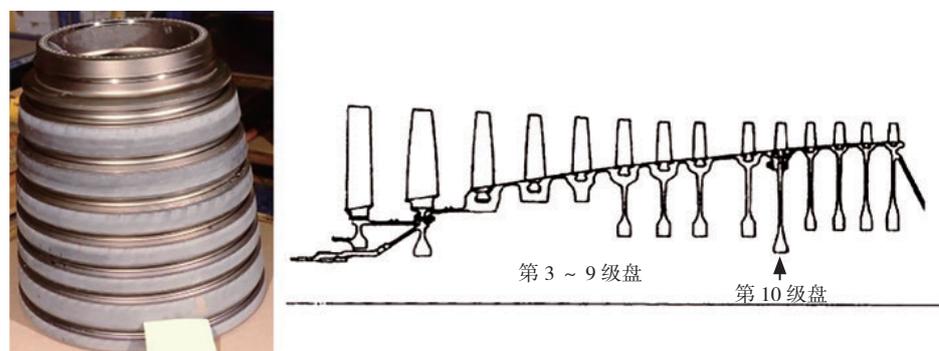


图6 CF6-GE-80C2高压压气机第3~9级钛合金惯性摩擦焊转子组件及结构图

个薄盘焊接的整体式结构，风扇叶片采用燕尾形榫头连接到轮盘上。GE航空集团的GE90发动机风扇盘由3个带鼓的薄盘采用惯性摩擦焊焊接而成。在GE90-115B中，如图5所示，风扇直径进一步加大，弦长加大，且做成后掠形，叶片叶根处宽度加大，为此增加了1个薄盘，即风扇盘由4个带鼓的薄盘焊接而成，仍采用惯性摩擦焊连接。GENx发动机是在GE90基础上发展的，其风扇盘组件同样采用惯性摩擦焊连接。

在压气机转子组件上的应用

在航空发动机压气机转子组件制造中，惯性摩擦焊技术的应用最为广泛，同时涉及军用和民用发动机。惯性摩擦焊被用于制造高压压

气机的两种转子结构，一种是由榫头、榫槽连接叶片的多级盘鼓混合式整体转子结构，一种是多级整体叶盘的转子结构。

多级盘鼓混合式整体转子的叶片和轮盘由榫头、榫槽连接，先将压气机盘用惯性摩擦焊连接成一个整体鼓筒，再将叶片装配到加工好的榫槽上，这种方式较为典型。GE航空集团的F101-GE-100发动机高压压气机的第1~2级钛合金盘、第4~9级A286合金盘，都是采用惯性摩擦焊连接。第1~2级转子如果采用整体锻件制造用料77kg，用惯性摩擦焊焊接则用料54kg，质量明显减轻。F110-GE-129发动机高压压气机转子结构是在F101基础上研制的，第1~2级仍为钛合金盘，第4~9级盘改为IN718合金，也是采用惯性摩擦焊连接的。CF6-80C2发动机高压压气机第3~9级钛合金转子采用惯性摩擦焊连接，第10级盘、第11~14级IN718合金盘鼓（惯性摩擦焊连接）及后轴焊接段之间用螺栓连接（如图6所示）；第3~9级压气机转子原为整体锻质量为413kg，改为惯性摩擦焊连接后，质量降至300kg。GE航空集团的发动机高压压气机转子应用了惯性摩擦焊技术的情况详见表1。

普惠公司的F100-PW-229发动机高压压气机第1~2级为钛合金转

表1 GE航空发动机惯性摩擦焊技术的应用情况

发动机型号	惯性摩擦焊应用
F101	高压压气机第1~2级钛合金转子，第4~9级A286合金转子
F110	高压压气机第1~2级钛合金转子，第4~9级IN718合金转子
F404	高压压气机转子
F414	高压压气机第1~2级Ti17钛合金转子，第4~7级IN718合金转子
T58	高压压气机第1~8级IN718合金转子
TF34	高压压气机第1~9级钛合金转子，第11~14级高温合金转子
TF39	高压压气机第14~16级IN718合金转子
CF6	高压压气机第3~9级钛合金转子，第11~14级IN718合金转子
GE90	高压压气机第2~6级，第8~10级Rene88DT合金转子
GENx	高压压气机转子
Passport	高压压气机转子

子,第4~10级为IN718合金转子,采用惯性摩擦焊连接,前2级和后7级鼓筒组件仅用一级螺栓连接,零件数大大减少。F100-PW-100发动机高压压气机转子采用电子束焊接,其推力增长型F100-PW-229发动机的高压压气机转子则采用了惯性摩擦焊连接;1985年首次试飞、1987年首次交付使用的PW4000发动机,其高压压气机第8~11级IN718合金转子由电子束焊连接;而1989年首次试飞、1991年初投入使用的F100-PW-229发动机,其高压压气机IN718合金转子则改为惯性摩擦焊连接。上述情况说明,普惠公司在IN718合金高压压气机转子的制造中更加倾向于使用惯性摩擦焊技术。

罗罗公司对惯性摩擦焊技术的研究始于20世纪60年代后期,此后罗罗公司陆续配备了多台大吨位、大惯量的惯性摩擦焊设备,并与英国曼彻斯特大学、伯明翰大学等科研机构合作开展了大量深入的基础研究和工艺探索。截至目前,惯性摩擦焊技术在罗罗公司已经得到工程化应用,遑达1000发动机高压压气机转子就采用了惯性摩擦焊技术。

惯性摩擦焊技术在其他公司高压压气机制造上也有广泛应用。CFM国际公司的CFM56系列发动机是有史以来销售最好的商用航空发动机(截至2019年6月,交付了33400台),其高压压气机的第1~2级钛合金盘,第4~9级Rene95合金盘都是采用惯性摩擦焊连接的整体式转子,CFM国际公司的LEAP发动机高压压气机转子也采用了惯性摩擦焊技术。MTU公司负责研制的EJ200发动机的高压压气机第4~5级盘及后锥形轴,均采用惯性摩擦焊连接成一体。

由GE和普惠合资的发动机联盟公司研制的GP7200发动机高压压气机转子也是用惯性摩擦焊连接的。

高压压气机多级整体叶盘转子是指将两个以上的整体叶盘不使用螺栓连接的方式串联在一起,形成一个整体转子结构。多级整体叶盘转子结构使发动机零件数大量减少,质量明显减轻,发动机结构进一步简化,减少了故障源,提高了发动机可靠性和维修性。惯性摩擦焊技术已被应用于这种多级整体转子的制造。

GE航空集团的F414发动机的多级整体叶盘制造采用了惯性摩擦焊技术。GE航空集团在F404和F412发动机基础上,开发了推力增长型F414发动机,推重比达到9.0:1。1991年开始发展F414-GE-400发动机,1995年在F/A-18E/F“超级大黄蜂”舰载机上实现首飞,1998年开始批量生产。F414发动机风扇第2~3级Ti17合金整体叶盘、高压压气机第1~2级Ti17合金整体叶盘都是采用惯性摩擦焊连接的。多级整体叶盘转子的制造是采用惯性摩擦焊技术连接压气机的多级轮盘,结合电化学加工或者五坐标数控铣床加工等关键技术完成多级整体叶盘叶片的加工。F414发动机后2级风扇、前3级高压压气机采用多级整体叶盘后,两部件的质量分别减少了20.43kg与3.632kg,与F404发动机相比,风扇、高压压气机的零件数目减少了484个,有利于提高可靠性。采用惯性摩擦焊制造多级整体叶盘的还有EJ200发动机高压压气机的第4~5级整体叶盘转子、CF34-8C发动机的高压压气机的第1~2级整体叶盘转子。

在涡轮盘轴转子组件上的应用

随着对发动机推力和推重比等指标的要求不断提高,高压涡轮部件的工作温度也逐步升高,因此先进发动机涡轮盘材料已经升级为承温能力更强的新型粉末高温合金,涡轮轴则采用镍基变形高温合金。相比电子束焊,惯性摩擦焊在焊接异质高温合金时有较为明显的优势,电子束焊焊接异质高温合金时,产生液化裂纹、应变时效裂纹、热裂纹等缺陷的倾向性较大。因此,惯性摩擦焊是改善产生这种焊接裂纹的可行方法之一。

惯性摩擦焊被广泛应用到涡轮盘轴转子组件的制造中。罗罗公司的遑达1000发动机的高压涡轮后短轴与轮盘采用惯性摩擦焊连接。罗罗公司还开展了RR1000合金、IN718、U720Li和IN718等新型高温合金同种材料及异种材料的惯性摩擦焊工艺研究。

结束语

由惯性摩擦焊技术制造的航空发动机整体转子既可以满足航空发动机推重比指标,又兼顾了可靠性和耐久性的设计要求,惯性摩擦焊已被广泛应用到先进航空发动机的风扇盘、压气机、涡轮盘轴等转子组件的制造中。但惯性摩擦焊是一项技术壁垒非常高的先进制造技术,能够实现工程化应用的国家屈指可数。随着国产设备综合能力不断提升以及关联技术工艺取得突破,将对惯性摩擦焊技术在国内航空发动机上的工程化应用产生显著的推动作用。

航空动力

(赵强,中国航发黎明,助理工程师,从事惯性摩擦焊研究工作)