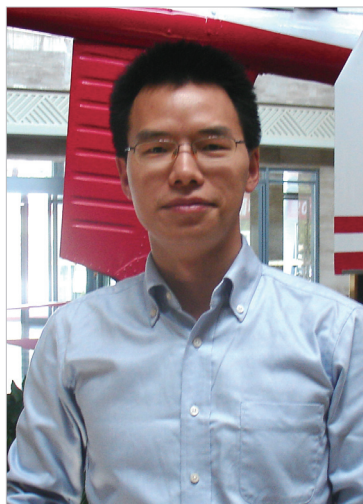


固态焊接在民用航空发动机中的应用

Application of Solid State Welding in Civil Aircraft Aeroengine

中航工业商用航空发动机有限责任公司 韩秀峰 张 露 钱凌翼



韩秀峰

2006年硕士毕业于西北工业大学,现为中航工业商用航空发动机有限责任公司材料工艺部主管设计师,从事航空发动机制造技术工作。

民用航空发动机是航空产业的重要支柱,我国的大客发动机研制项目已逐步展开。民用航空发动机与军用航空发动机相比要求具备长寿命、高可靠性、低油耗和低成本。由于技术指标要求高,民用航空发动机需要采用更多的新材料、新结构、新工艺,才能满足设计要求。为了提高航空材料的高温强度、抗腐蚀性能及抗氧化性能,在材料的制备过程中相继加入了更多的合金化元素,然而某

些合金元素的加入在不同程度上降低了材料的可焊性。在结构设计方面,结构整体化是发展趋势,选用的新型结构也给焊接技术提出了更高的要求。在各种焊接方法中,固态焊接方法是解决材料可焊性的最为有效的方法,也是复杂构件焊接的可行方法。

固态焊接作为一种先进的焊接技术,在民用航空发动机中的应用已有40多年的历史。与传统的熔焊工艺相比,固态焊接的优势在于焊接在母材未融化的状态下进行,母材保持在塑性状态。焊缝区域的显微组织为细晶组织,非常接近母材的锻态组织。焊缝组织的力学性能与母材相当甚至超过母材。固态焊接的另一个优势在于焊接过程的机械化、自动化程度高,不需要特殊的焊接技术人员,焊接设备的可靠性高,焊接过程

的可重复性好。固态焊接包括摩擦焊和扩散焊,在民用航空发动机的结构整体化设计及制造中,固态焊接作为一种先进的焊接技术,正发挥着越来越重要的作用。

本文在介绍固态焊接技术及研究发展的基础上,总结概括了固态焊接在民用航空发动机中的应用现状,并对其今后的发展作了展望。

本文在介绍固态焊接技术及研究发展的基础上,总结概括了固态焊接在民用航空发动机中的应用现状,并对其今后的发展作了展望。

惯性摩擦焊

1 惯性摩擦焊的技术特点

惯性摩擦焊(Inertia Friction Welding, IFW)是摩擦焊工艺中较典型的一种,卡特彼勒公司在20世纪60年代初发明了惯性摩擦焊^[1],目前世界上比较著名的惯性摩擦焊设备制造商为美国MTI公司。惯性摩擦焊通过在待焊材料之间摩擦,产生热量,在顶锻力的作用下材料发生塑

性变形与流动,进而连接母材。惯性摩擦焊一般装有飞轮,飞轮可储存旋转的动能,用以提供工件摩擦时需要的能量。惯性摩擦焊在焊接前,将工件分别装入旋转端和滑移端,再将旋转端加速,当旋转端转速达到设定值时,主轴的驱动马达与旋转端分离。滑移端一般由液压伺服驱动,朝旋转端方向移动,工件接触后开始摩擦同时切断飞轮的驱动电机供电;当旋转端的转速下降到一定值时,开始对待焊工件进行顶锻,保持一定时间后,滑移端退出,焊接过程结束。在实际生产中,可通过更换飞轮或组合不同尺寸的飞轮来改变飞轮的转动惯量,从而改变焊接能量及焊接能力。

工件经焊接后,有部分材料会被挤出焊缝,造成飞边。一般情况下,焊缝的飞边应被去除。惯性摩擦焊的优点是工艺控制参数少、热输入小、变形小、焊缝窄,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,尤其适用于焊接异种材料,如粉末合金与高温合金的焊接。

惯性摩擦焊的缺点在于设备昂贵,按功率的不同,价格在 200 万~800 万美元之间;工装的设计较复杂,仅限于焊接旋转体的零件,且对截面尺寸有限制。

2 惯性摩擦焊的应用

惯性摩擦焊作为一种先进的焊接工艺,已成为先进航空发动机的压气机转子及涡轮部件的主要焊接工艺。

为了降低成本,减轻重量,先进航空发动机的压气机转子已基本采用焊接连接代替螺栓连接。这是因为采用焊接结构后,省去了大量的盘与盘之间的连接紧固件,并且减少了转子在螺栓孔处的截面尺寸。同时,采用焊接连接后,还可以消除应力集中的螺栓孔,提高转子的刚性,改进转子的平衡性,提高发动机的工作稳

定性。

目前,惯性摩擦焊与电子束焊均被应用于转子的焊接,但惯性摩擦焊更具有优势。因为惯性摩擦焊属于固态焊接过程,焊缝及热影响区组织好,可焊接异种金属,焊接过程中不易造成漏焊,缺陷极少(6σ 以上的质量水平)。但惯性摩擦焊设备的一次性投入较高。

惯性摩擦焊自出现之后就在各大航空发动机公司得到广泛应用。GE 公司在 20 世纪 60 年代中期开始研发惯性摩擦焊技术,并使其应用于旋转件的焊接;在 60 年代后期,惯性摩擦焊就得到了批产。GE 公司的航空发动机重要转动件几乎全部都采用惯性摩擦焊焊接^[1]。如 GE 公司为波音 787 开发的新一代发动机 GENx,其高压压气机转子采用惯性摩擦焊焊接。又如由 GE 与 P&W 联合开发的发动机 GP7200,用于世界上最大的飞机 A380,其高压压气机转子也采用惯性摩擦焊焊接。同样,GE90 的高压压气机转子也采用了惯性摩擦焊焊接。惯性摩擦焊的应用使 GE 公司获得了巨大的经济效益。例如,CF6 发动机的 3~9 级压气机转子,原为整体锻件,重 413kg,改为 2 个锻件经惯性摩擦焊连接后,重量降至 300kg^[1]。GE90 的风扇盘在最初设计时为 Ti17 的整体锻件,后也改为由 3 个 Ti17 锻件经惯性摩擦焊连接,大大降低了制造成本。另外,GE 与 SNECMA 共同开发的 CFM56 发动机的 1~2 级压气机盘(见图 1)和 4~9 级压气机盘的连接、低压涡轮轴与盘的连接都采用了惯性摩擦焊。

P&W 公司同时采用惯性摩擦焊和电子束焊,电子束焊用于一般转动件,惯性摩擦焊用于工作温度高、转速快、受力大的重要转动件^[1]。

R·R 公司则在 60 年代后期开始研究惯性摩擦焊,但在 Trent 系列发动机中一直采用电子束进行焊接。随着高温合金向更高耐高温能力



图1 采用惯性摩擦焊焊接的压气机盘鼓

的方向发展,采用电子束焊接已越来越困难^[2]。近几年,惯性摩擦焊在 R·R 公司得到了快速发展,并逐渐成为 Trent 后续衍生机型盘轴的主要焊接方法。R·R 公司已装备了 2000t 的惯性摩擦焊设备,用于焊接高压压气机鼓筒。随着压气机压比及出口温度的进一步增加,压气机后几级需要采用耐高温能力更高的材料,如粉末合金。惯性摩擦焊同样可以用于这类新材料的焊接,R·R 公司研制的 Trent1000 发动机的涡轮后短轴(Inco718 合金)和粉末合金涡轮盘(RR1000 粉末合金)就采用了惯性摩擦焊。同时,R·R 公司已将 Inco718 与 U720Li, Inco718 与粉末合金等异种材料的惯性摩擦焊工艺列入了相应的材料工艺标准中。

线性摩擦焊

1 线性摩擦焊的技术特点

线性摩擦焊(Linear Friction Welding, LFW)可追溯到 1969 年的一个英国专利,英国焊接研究所(The Welding Institute, TWI)在 20 世纪 80 年代进一步发展了线性摩擦焊技术。早期的线性摩擦焊是由机械驱动的,现代的线性摩擦焊设备几乎都是由液压伺服系统驱动线性运动的往复运动机构及顶锻机构。与惯性摩擦焊相同的是,零件焊接时的热量也来自于摩擦;不同的是,运动方向为直线运动。线性摩擦焊设备的制造商有美国 MTI、英国 Thompson 及 Blacks 等公司。GE 公司已装备了一台 30t 的线性摩擦焊设备。

线性摩擦焊在焊接前,将待焊的工件固定,另一个工件以一定的速度做往复运动,或两个工件做相对往复运动,在压力的作用下工件接触后,界面摩擦产生热量,在热和压力的作用下形成固相连接接头^[3]。线性摩擦焊过程也会产生飞边,应被去除。线性摩擦焊的主要优点是无论工件是否对称,均可进行焊接,焊缝区可保持锻态的细晶组织,焊接质量稳定,可焊接异种金属,热输入小、变形小、焊缝窄。

线性摩擦焊的缺点在于设备昂贵(约400万美元以上),工装复杂,对截面尺寸也有限制。

2 线性摩擦焊的应用

近年来,关于线性摩擦焊的研究较多,开展了复杂型面的焊接、铸件与锻件的焊接、涡轮单晶或定向合金叶片的焊接等。但迄今为止,线性摩擦焊在航空发动机上最主要的应用是整体叶盘的焊接,如图2所示^[4]。

整体叶盘是新一代航空发动机实现结构创新与技术跨越的核心部件,也是高效、低油耗航空发动机所要采用的关键结构。在大型客机、大型运输机发动机中的风扇、压气机部位使用整体叶盘,可以达到减重、增效、简化零件结构和提高可靠性的目的。对于空心风扇叶片与风扇盘的连接,为了进一步减轻重量,也可以采用线性摩擦焊制备成整体叶盘;对军用航空发动机来说,尤为适用,

并且线性摩擦焊是空心叶片与盘连接的唯一可行的方法。

与传统的叶盘分离结构相比,整体叶盘有两大优势。一是在结构上,整体叶盘由于省去了榫槽,减轻了重量,并可进一步缩小壁厚,重量减轻达50%,大大提高了燃油效率。二是叶盘分离结构中的榫槽在服役过程中易磨蚀,采用整体叶盘可以避免榫槽磨蚀和修复的问题^[5]。

整体叶盘的制备方法包括机械加工方法和线性摩擦焊方法。采用机械加工制备整体叶盘是将锻件直接进行机械加工而成;采用线性摩擦焊方法是将单个的叶片逐个焊接到轮盘上,虽然焊接后也需要机械加工,但与机械加工制备整体叶盘相比,加工余量要少得多。具体采用哪种方法制备整体叶盘还要从成本上考虑,机械加工的成本主要取决于去除的材料量,线性摩擦焊制备整体叶盘的成本主要取决于叶片的数量,因此,最适合用线性摩擦焊制备的整体叶盘应具有相对少的叶片数量,并且叶片之间的材料去除量大。一般来说,当整体叶盘的叶片尺寸超过100mm以上时,较适宜采用线性摩擦焊方法制备。

GENx发动机高压压气机前两级采用了线性摩擦焊制备的整体叶盘结构,CF34的后继机型(NG34)的风扇也准备采用线性摩擦焊制备整体叶盘。R·R公司采用线性摩擦焊制备了EJ200及联合攻击机JSF发动机的整体叶盘。

线性摩擦焊也可应用于整体叶盘的修复。整体叶盘在服役过程中,可能受到高温高速气流的冲蚀,及可能的异物撞击,叶片不可避免地出现点坑、裂纹、叶片掉角、叶片卷边甚至断

裂等损伤。由于整体叶盘是一体式结构,损伤叶片的更换非常困难,而如果更换整个整体叶盘则面临高昂的费用和生产周期。整体叶盘的修复技术已成为制约整体叶盘应用的关键。线性摩擦焊作为整体叶盘单个叶片的修理工艺,于20世纪80年代中期开发,作为一种重要的修复技术,可以替换损伤的单个叶片,是一种方便且实用的修复方法^[6]。R·R公司采用线性摩擦焊技术开展了整体叶盘的修复研究,并申请了线性摩擦焊修复整体叶盘的专利。

搅拌摩擦焊

1 搅拌摩擦焊的技术特点

较前两种摩擦焊方法,搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)属于比较新的焊接技术。英国焊接研究所于1991年发明并取得了该项技术的专利,在焊接高强度铝合金板材方面极为成功。搅拌摩擦焊采用非耗损的耐高温硬质材料搅拌头,旋转并插入待焊位置,停留一小段时间后,搅拌头开始沿待焊零件的结合方向移动,搅拌头旋转时在结合位置产生大量的热量,使结合处的金属产生塑性变形,旋转的搅拌头对周围的塑性变形材料进行搅拌,塑性软化区在搅拌头离开后的冷却过程中,受到挤压而形成固相焊接接头^[7]。焊接时,要求搅拌头在母材中保持足够的强度,且不能与母材发生反应,在高温下有足够的强度搅拌母材的塑性区。由于搅拌头材料的限制,一般认为搅拌摩擦焊用于较低熔点合金的焊接。

与惯性摩擦焊及线性摩擦焊一样,搅拌摩擦焊的焊接过程也为固态过程,母材未被熔化,焊缝区可保持母材的锻态细晶组织;某些用熔焊方法难于焊接的材料可以采用搅拌摩擦焊焊接,如7075铝合金。

搅拌摩擦焊(见图3)的缺点在于受搅拌头材料的限制,目前仅限于铝合金及某些钛合金的焊接,且一般

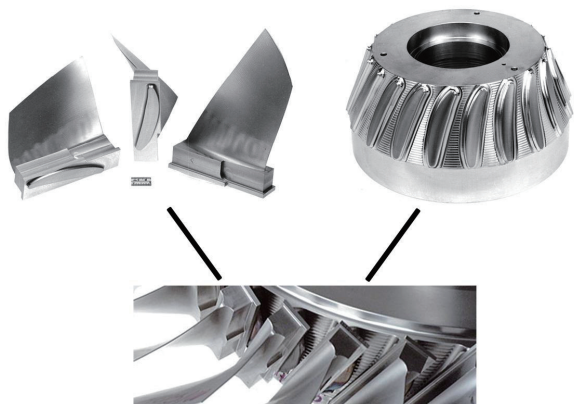


图2 MTU采用线性摩擦焊焊接的整体叶盘

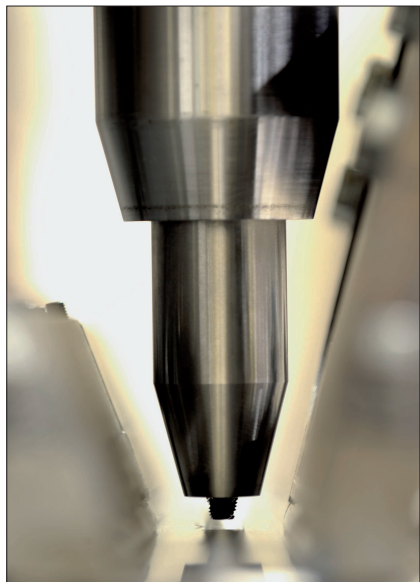


图3 搅拌摩擦焊的搅拌头

适用于对接接头,搭接接头的高周疲劳性能较差。搅拌摩擦焊设备也较为昂贵,约 30 万美元以上。

2 搅拌摩擦焊的应用

铝合金的搅拌摩擦焊已成为成熟的焊接技术,并已成功应用于许多行业。钛合金的搅拌摩擦焊正在研发过程中,某些钛合金的搅拌摩擦焊研究已经取得了成功。镍基高温合金是发动机中的主要材料,由于高强度、高抗氧化能力的合金采用熔焊方法较困难,一般采用惯性摩擦焊及线性摩擦焊对镍基高温合金进行焊接,但这两种方法均受限于零部件的几何尺寸或待焊处的截面形状,只有采用搅拌摩擦焊才可以解决这些问题。目前,钛合金和镍基高温合金搅拌摩擦焊在航空业中很受重视,但其主要障碍是需要开发出耐高温且高强度的搅拌头。

近几年,GE 在钛合金的搅拌摩擦焊方面进行了研究,已成功地对 13mm 厚的钛合金进行了焊接^[8],并取得了搅拌头材料的专利。

搅拌摩擦焊已在造船业及机车行业得到了成功的应用,尤其适用于缝焊及非对称的零部件的焊接。目前,搅拌摩擦焊在航空航天的应用还非常有限,主要的应用有美国 Eclipse

公司的公务机,波音公司的 Delta II, IV 的火箭和 C17, NASA 的太空梭外舱均为铝合金的焊接。搅拌摩擦焊至今还未能能在航空发动机中应用,未来有可能在机匣或某些结构件中采用搅拌摩擦焊技术。

扩散焊

1 扩散焊的技术特点

扩散焊(Diffusion Welding, DW)也是一种固态焊接,待焊材料相互接触的表面在高温和压力作用下,局部发生塑性变形,原子间产生相互扩散,在界面生成了扩散层,形成接头,待焊零件之间不发生移动,也不产生宏观变形。

扩散焊的优点是接头质量好、精度高、变形小,并且可以实现难焊材料,甚至是陶瓷基材料的连接。

扩散焊的缺点在于设备比较昂贵,对接合面的表面质量要求高,工艺过程时间长。

2 扩散焊的应用

在航空发动机中,扩散焊最成功的应用是与超塑成形(Superplastic Forming, SPF)结合使用,制备钛合金空心风扇叶片。由于钛合金的扩散焊与超塑成型的温度在同一温度区间,风扇叶片复杂的几何形状及内部结构可以在一个制造过程中完成。

大型宽弦风扇叶片是先进航空发动机典型部件之一。R·R 公司采用 SPF/DW 方法制造钛合金宽弦空心风扇叶片已有 20 年的历史,将其用于 Trent 系列及 RB211 发动机(图 4)。采用 SPF/DW 方法制造钛合金空心风扇叶片后,与实心风扇叶片相比,每份发动机可减重约 50kg,并且还可以进一步减轻包容机匣及风扇盘的重量。P&W 公司由于在 F119 发动机中成功采用扩散焊制备空心风扇叶片,以及采用线性摩擦焊制备整体叶盘,被美国焊接学会授予杰出开发奖(Outstanding Development in Welded Fabrication Award)。



图4 采用SPF+DW方法制造的Trent1000钛合金宽弦空心风扇叶片

目前,我国已能生产 4 层钛合金超塑成型/扩散连接风扇导流叶片,并具备了研制大型宽弦风扇叶片的基础和能力。

结束语

在国外,固态焊接在民用航空发动机中已有很多年的发展,并已成功应用于多种先进民用航空发动机的机型中。随着航空材料向更高强度、更好的环境耐久性的方向发展,结构设计向轻量化、整体化方向发展,固态焊接还将得到进一步发展。在国内,固态焊接还处于初步应用阶段,与国外的差距较大,应加快开展先进材料、异种材料和新型结构的焊接工程化应用研究,提高技术成熟度。此外,由于设备昂贵,国内大部分航空制造企业还不具备设备能力,需要在进一步开展工艺研究的同时,开发更经济的焊接设备。随着我国航空发动机产业的快速发展,固态焊接方法将发挥更加重要的作用,固态焊接技术也将进入一个快速发展期。

本文共有参考文献 8 篇,因篇幅所限未能一一列出,如有需要请向本刊编辑部索取。(责编 三丰)