

# 整体叶盘线性摩擦焊接设备研制 与发展现状

苏宇<sup>1</sup>, 马铁军<sup>1</sup>, 李文亚<sup>1</sup>, 杨夏炜<sup>1</sup>, 周军<sup>2</sup>, 张学军<sup>3</sup>

(1. 西北工业大学材料学院陕西省摩擦焊接工程技术重点实验室, 西安 710072;

2. 机械科学研究院哈尔滨焊接研究所, 哈尔滨 150028;

3. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

**[摘要]** 线性摩擦焊作为航空发动机整体叶盘制造与修复的一项关键技术得到了快速发展与成功应用,并在航空航天及其他制造领域中具有广阔的前景。主要针对线性摩擦焊的设备研制与发展历程,介绍电磁式、机械式及液压式3类结构的设备工作原理与主要优缺点,同时介绍了国内外用于整体叶盘研制的典型设备的主要性能指标、结构特点及各自开展的研究与应用现状,并在最后指出线性摩擦焊设备现阶段的不足与发展前景。

**关键词:** 线性摩擦焊; 整体叶盘; 工作原理

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2016.18.053



苏宇

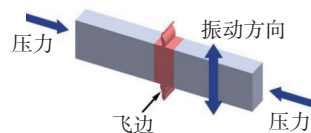
西北工业大学硕士研究生,主要从事与摩擦焊相关的研究工作。

线性摩擦焊(Linear Friction Welding, LFW)是摩擦焊技术的一种,其焊接原理如图1(a)所示。摩擦副中一侧的工件被往复机构驱动,在轴向压力作用下相对于另一侧被

夹紧的工件沿焊接面上某一方向以一定的振幅和频率作直线往复相对运动,从而产生大量摩擦热使焊接面软化形成粘塑性金属层,金属层不断被挤出形成飞边,当接头达到一定缩短量时两焊件迅速对中并施加顶锻压力完成焊接。

LFW能够实现非轴对称复杂截面同质及异质材料的固相连接,有效避免熔焊中易出现的偏析、裂纹、气孔等缺陷,成为目前国际公认的理想航空发动机整体叶盘焊接制造与维修关键技术<sup>[1]</sup>。图1(b)是Rolls-Royce公司焊接的EJ200发动机风扇整体叶盘<sup>[2]</sup>。此外,LFW拓展了旋转摩擦焊的应用范围,能够解决传统熔焊方法或其他摩擦焊难焊或无法焊接的部件,可用于贵金属复杂零件的预成形。图1(c)为TWI开发的LFW近终型结构件<sup>[3]</sup>,被关桥院士称为“块体组焊固相增材制造技术”<sup>[4]</sup>。LFW的潜在应用包括涡轮、齿轮、导

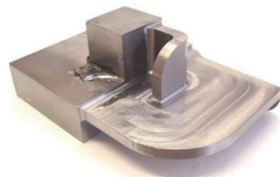
电板及双金属凿刃,也可用来焊接大截面的塑料部件,以及塑料或金属的复合焊件<sup>[5]</sup>,在滑轮发电机、涡轮增压



(a) LFW原理示意图



(b) LFW整体叶盘示例



(c) LFW近终型结构件示例

图1 LFW原理及应用示例

Fig.1 Principle and applied examples of LFW

压器等方面也有推广应用价值<sup>[6]</sup>,因此在航空航天及其他制造领域结构整体化设计与制造中应用前景非常广阔。

相对旋转摩擦焊, LFW 出现的时间较晚。1969 年英国一项专利主要描述了焊接低碳钢的线性往复机构,到了 20 世纪 80 年代, TWI、University of Bristol 和 Rolls-Royce 公司开始合作对 LFW 进行系统研究,研制出 LFW 原型机,可用于方形、圆形、多边形等不规则截面的金属和塑料构件的焊接。MTU 和 Rolls-Royce 等公司为进行航空发动机整体叶盘的焊接制造与修复,最先开始推动和发展了 LFW 新设备和新技术,并于 2000 年开始逐步成功应用于不同型号航空发动机整体叶盘制造<sup>[1,7]</sup>。

航空发动机整体叶盘等重要构件对接头的焊接质量与位置精度均有着很高的要求。一方面,须依靠 LFW 设备本体,如回位精度、装夹精度及足够的强度与刚性等来保证;另一方面,焊接过程振动频率、振幅、摩擦压力及顶锻压力等规范参数的精确控制至关重要。因此,研发高精度、高稳定性的 LFW 设备及测控系统,有利于实现线性摩擦焊过程的精确控制与深入研究,对于推动 LFW 技术应用于我国整体叶盘及其他重要构件的工程制造具有重要的研究价值。

### LFW 设备分类

LFW 设备最核心的技术是采用何种振动源输出需要的振动频率和振幅,以及如何实现精确回位对中。在 LFW 设备研发的历程中,先后产生了 3 类往复运动激励方式的焊机,分别是:电磁式、机械式和液压式<sup>[5]</sup>。

#### (1) 电磁式 LFW 焊机。

其原理是通过电磁铁的吸合和释放来实现往复运动,如图 2 (a) 所示。其优点包括:频率易调节,可调范围大(最高可达 2000Hz),振幅可

以实时控制,易实现逐渐回零;主要局限性在于:推力较小,冷却结构复杂,成本高。因此,此类焊机不太适合金属材料的焊接,仅限于一些需要热输入较小材料,如塑料件的焊接<sup>[5]</sup>。

#### (2) 机械式 LFW 焊机。

原理是利用旋转电动机加上一套将旋转运动转化为往复运动并可实现振动回位的特殊机构。国外最早研发用于整体叶盘焊接的机械式 LFW 焊机原理如图 2 (b) 所示<sup>[8]</sup>。系统由一个直流电机带动双曲柄连

杆机构运动,轴上安装的旋转相位变换器可以在 0° ~180° 之间改变两个连杆之间的相位差来调节运动系统的振幅与回位。该设备的优点在于往复牵引力大、成本低,能够焊接较大截面的金属工件,但振动与回位机构比较复杂,体积大、噪声大、频率偏低、控制难度大。

#### (3) 液压式 LFW 焊机。

其原理如图 2 (c) 所示,是利用伺服阀为振动油缸的上下腔提供交变油压,从而产生往复运动,当上下

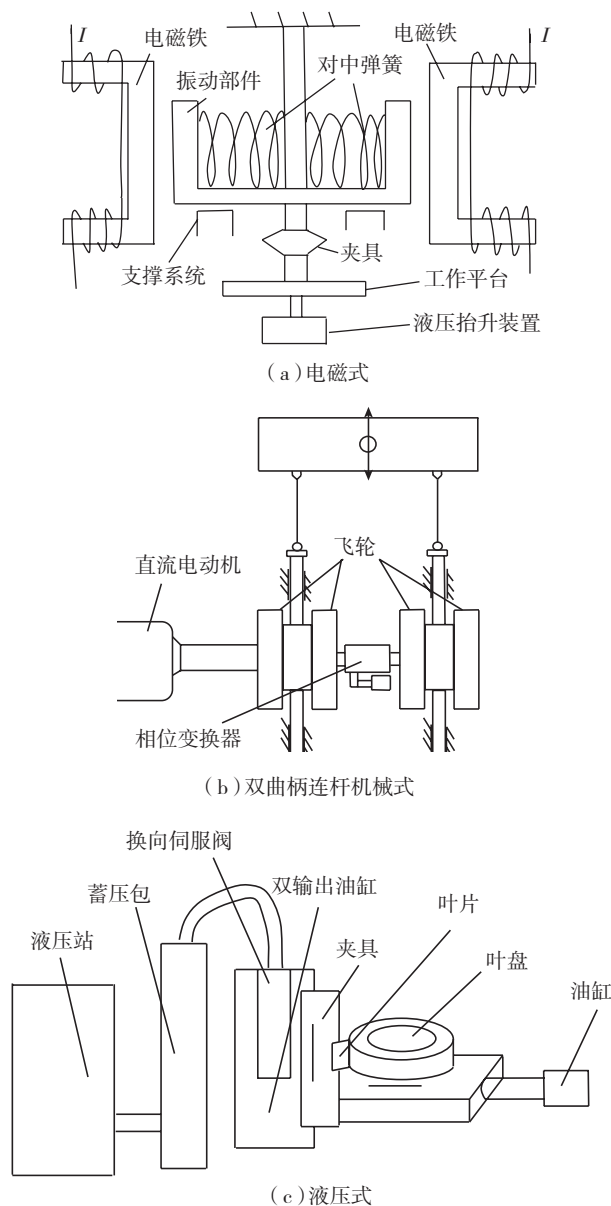


图2 LFW设备原理图  
Fig.2 Principle diagram of the LFW equipment

腔油压相等时实现振动回位。此类设备易于实现更大的焊接力,而且在很低的频率下也可得到很大的激振力,材料适应性较强,但对液压元器件和液压油清洁度等要求很高,对操作和维护人员的专业水平也有较高的要求<sup>[5]</sup>。

综合比较上述 3 类 LFW 设备目前的技术水平<sup>[5,8-9]</sup>可得出:仅机械式和液压式焊机适用于整体叶盘及其他金属构件的焊接工程制造。二者相比,液压式焊机的振动频率(可达 200Hz 以上)比机械式的频率(一般在 100Hz 以下)要高,对于导热非常好的材料,如铝合金等的焊接是非常有利的。TWI 曾采用液压式焊机成功焊接了铝合金整体叶盘模拟样件。对于钛合金、高温合金以及钢等导热差的材料,机械式与液压式焊机的振动频率均能满足要求。机械式焊机的振幅(可达 5mm 以上)比液压式焊机的振幅(一般在 3mm 以内)要大,可补偿偏低的振动频率,以满足较大截面接头焊接热输入的要求。

### LFW 设备的发展现状

20 世纪 80 年代中期,英国 Rolls-Royce 与德国 MTU 公司为研制用于欧洲战斗机的发动机 EJ200,开始与 TWI 合作研发 LFW 新设备。该项目于 1985 年启动,由 TWI 提供技术指导,Allwood、Searle 和 Timney 公司负责设计,Blacks 公司负责机器制造,耗资 150 万英镑,于 1990 年研制出世界上第一台用于航空发动机整体叶盘制造和维修的机械式 LFW 焊机(图 2 (b)即为其设备原理)。该设备工件分度台可以提供  $+0.026^\circ$  的定位精度,有一个主驱动马达,功率 89kW,可以进行 4000r/m 的无级变速,振幅 0~3mm,振动频率可达 75Hz,用 5~147kN 的压力可以焊接断面达 2000mm<sup>2</sup> 以上的工件。经过近 10 年的焊接及相关试验研究,从 2000 年开始用于 EJ200 和 F119 等

发动机部分整体叶盘的制造,以取代原来的电子束焊接<sup>[10-14]</sup>。

TWI 后来拥有了一台液压式 LFW 焊机——LinFric 焊机(图 3),它由 8 个欧洲公司合作研发而成。该设备利用液压驱动器(与疲劳试验机所使用的驱动器相似)和液压蓄能器实现快速能量释放,振动频率的范围为 25~125Hz,振幅达到  $\pm 3$ mm,最大顶锻力为 200kN,焊接横截面同样可达 2000mm<sup>2</sup>。液压振荡器还可以提供非正弦的振动曲线,可以优化工件的几何结构并适用于多种焊接材料。LinFric 焊机的研发旨在大幅降低 LFW 设备的成本,使技术更适合包括航空在内的各种行业的潜在用户<sup>[15]</sup>。

美国 MTS 公司制造的液压式 LFW 焊机原理如图 2 (c)所示,设计了一个完全开放的床面,可以放置较大的焊接组件。与机械式焊机相比,该设备其更加紧凑,维护成本较低<sup>[15]</sup>。该焊机顶锻力达到 40t,振动频率达到 250Hz,振幅达到  $\pm 4.0$ mm,焊后误差小于 0.25mm,主要用于为 P&W 公司焊接 F119 发动机风扇整体叶盘,且用于一些汽车结构件及塑料管接头的焊接。

2010 年 Moog 和 Thompson 公司联合研发出世界上最大的 E100 型

LFW 焊机。E100 采用了立体建造模式,该方式不仅能确保线性焊接过程中的闭环监控,还能对摆动的部件进行高度精准的最终位置控制。这种特殊设计还意味着可以将摩擦压力和锻压力施加到焊接中点,进而使较大的焊接力能够均匀分布,以尽量减少焊件的变形程度。该焊机顶锻力达到 100t、振动频率为 20~100Hz,最大焊接面积达 10000mm<sup>2</sup>,主要被用来研究生产喷气发动机整体叶盘焊接的新技术。

国外 LFW 焊机制造商主要有美国的 MTI、英国的 Thompson 及德国的 MTU 公司等<sup>[16]</sup>。在国内,目前有 3 家单位拥有自主研发的 LFW 设备,分别是西北工业大学、中航工业北京航空制造工程研究所(625 所)及哈尔滨焊接研究所。

北京 625 所于 2006 年研制成功国内第一台液压式 LFW 设备,该设备采用电液伺服控制系统,振动焊件的激振力为 147kN,水平方向的顶锻力为 196kN,可实现最大 2000mm<sup>2</sup> 钛合金的焊接<sup>[17]</sup>。该设备针对航空发动机整体叶盘及多种钛合金材料开展了 LFW 焊接工艺、连接机理等研究。为了推广 LFW 应用,还针对飞机的框架等主承力结构开展了焊接试验、接头热处理及全面力学性

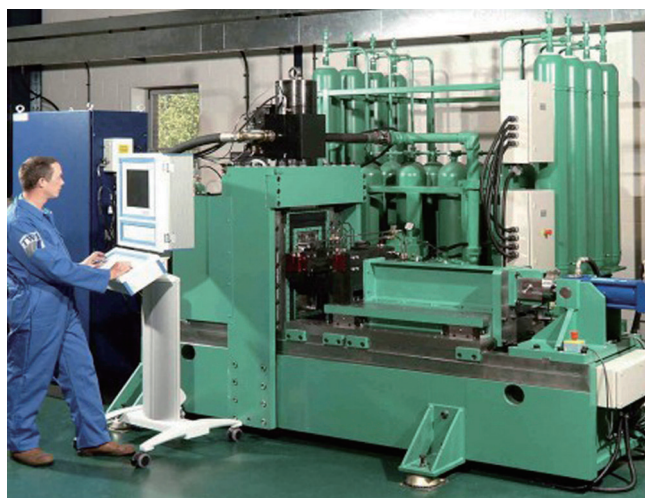


图3 国外LFW设备  
Fig.3 LFW equipment abroad

能测试等研究<sup>[18]</sup>。文献[17]通过实际检测得出：该设备焊后试件的振动方向、横向及轴向误差分别为 $\pm 0.35\text{mm}$ 、 $\pm 0.1\text{mm}$ 及 $\pm 0.35\text{mm}$ ，与国外设备3个方向误差为 $\pm 0.1\text{mm}$ 的指标相比还有较大差距。文中还指出，导致振动方向误差的众多因素中设备振动的影响最大，通过测试与分析提出了改进方案。

哈焊所周军等人基于液压驱动方式，也于2015年研制成功了最大顶锻力30t、最大振动力15t、最高振动频率50Hz的液压式LFW焊机(图4(a))，目前正在着手各项LFW试验研究。

西北工业大学自2000年启动LFW相关研究以来，于2003年自制了一台LFW原型试验装置，2006年研制成功了具有完全自主知识产权的机械式LFW焊机(XMH-160型)。在此基础上，通过技术完善与提升，

于2015年又研发了新一代LFW设备(XMH-250型,图4(b))，其主要技术指标为：振动频率0~70Hz,振幅0~5mm,最大顶锻力50t,最大钛合金焊接面积达 $5000\text{mm}^2$ 。

XMH-250型LFW焊机,由驱动电机通过特殊的振动-回位机构将旋转运动转化为直线往复运动,不仅振幅无级可调,且可实现振动焊件的自动回位对中。摩擦/顶锻压力系统由比例阀控制,压力输出精度高。采用工控机控制,振幅、频率及摩擦压力均可通过数字调节,可实现在线变幅、变频及变压力焊接工艺,对不同接头尺寸、不同材料零件的焊接具有很高的工艺适应性。测控系统通过高精度传感测量及高速数据采集技术,可对轴向压力、摩擦力、振动波形、变形量及摩擦功率等全过程参量的变化曲线进行采集、显示及输出,不仅可用于LFW过程深入研究,还

有利于焊接参数优化。目前,上述两台焊机完成了钛合金、镍基高温合金、单晶高温合金、碳钢等多种材料<sup>[19]</sup>及钛合金整体叶盘模拟件(图5)的LFW及相关试验研究。

尽管国内外目前主推液压式LFW设备,但西工大研制的机械式焊机结构简单,制造与维修成本较低,焊接过程稳定、可靠,测控系统功能完备,操作方便,不仅能实现整体叶盘的焊接,也有利于在其他制造业的推广。

### LFW设备的不足及展望

LFW打破了传统旋转摩擦焊只限于焊接圆或管截面焊件的局限,极大地拓展了摩擦焊接的应用范围,但是设备成本较高、技术难度大,在工业方面的成熟应用还仅限于航空发动机整体叶盘制造领域,因此,大幅降低设备制造成本是实现线性摩擦焊技术大面积推广的努力方向之一;国内设备在接头焊后轴向与周向等精度等方面与国外还存在一定的差距,还需要在设备本体结构与焊接过程测控技术上不断改进;另外,随着新材料的出现以及应用部门对接头性能要求的增加,还需要进一步在材料与结构的焊接工艺性、接头性能与服役可靠性、大吨位焊接设备及高精度控制、数字化/智能制造等方面开展更加深入的研究。

### 参考文献

[1] 张海艳,张连锋.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(S2):38-41.  
ZHANG Haiyan, ZHANG Lianfeng. Development overview of aeroengine integral blisk and its manufacturing technology at home and abroad[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(S2): 38-41.  
[2] GARCÍA A M M. BLISK fabrication by linear friction welding[M]. Rijeka: InTech, 2010. DOI: 10.5772/21278.  
[3] ADDISON A C. Linear friction welding information for production engineering[C]. TWI



(a) 哈焊所研制的液压式LFW焊机



(b) 西工大开发的新一代LFW设备

图4 国内研制的LFW设备  
Fig.4 LFW equipment developed at home



(a) 焊后



(b) 接头加工后

图5 钛合金整体叶盘模拟件  
Fig.5 Simulation specimen of titanium alloy blisk

Industrial Members Report, Cambridge, UK, 2010.

[4] GUAN Q. Generalized additive manufacturing based on welding/joining technologies[J]. The Paton Welding Journal, 2013(10-11): 33-37.

[5] 栾海英. 电液伺服控制线性摩擦焊系统关键技术的研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2007.

LUAN Haiying. Study on the key techniques of the electric-hydraulic servo control linear friction welding system [D]. Beijing: Mechanical Science Research Institute, 2007.

[6] 刘家富. 整体叶盘结构及制造工艺[J]. 航空科学技术, 1998(6): 23-25.

LIU Jiafu. The structure and manufacturing process of blisk[J]. Aeronautical Science and Technology, 1998 (6): 23-25.

[7] 张田仓, 韦依, 周梦慰, 等. 线性摩擦焊在整体叶盘制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2004(11): 56-58.

ZHANG Tiancang, WEI Yi, ZHOU Mengwei, et al. The application of linear friction welding in the manufacture of blisk[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004(11): 56-58.

[8] 郭劲松. 整体叶盘线性摩擦焊接过程动态仿真[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.

GUO Jinsong. Dynamic simulation of linear friction welding process of blisk[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003.

[9] 温国栋. 异种钛合金线性摩擦焊温

度场、微观组织及性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.

WEN Guodong. Study on temperature field, microstructure and properties of linear friction welded titanium alloy joint[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014.

[10] 朱瑞峰, 白钢, 苏利龙, 等. 线性摩擦焊及其研究应用现状[J]. 热加工工艺, 2009, 38(9): 100-103.

ZHU Ruifeng, BAI Gang, SU Lilong, et al. Linear friction welding and its status of research and application[J]. Hot-working Technology, 2009, 38(9): 100-103.

[11] 石文. 德国 MTU 公司研究的整体叶盘结构[J]. 国际航空, 1997(10): 57-58.

SHI Wen. The blisk researched by Germany MTU company[J]. International Aviation, 1997(10): 57-58.

[12] NUNN M E. Aero Engine improvements through linear friction welding[C]. The 1st International Conference on Innovation and Integration in Aerospace Sciences, Northern Ireland, UK, 2005: 4-5.

[13] STEFFENS K, WILHELM H. Next engine generation: materials, surface technology, manufacturing processes[R]. MTU Aero Engine Report, 2003: 1-17.

[14] 陈光. 新技术, 新工艺和新材料的结晶普惠公司研制的 F119 发动机[J]. 国际航空, 2000(7): 57-59.

CHEN Guang. The crystallization of new

technique, new technology and new material-F119 engine developed by Pratt & Whitney [J]. International Aviation, 2000(7): 57-59.

[15] SHTRIKMAN M M. Linear friction welding[J]. Welding International, 2010, 24(7): 563-569.

[16] CHAMANFAR A, JHAZI M, CORMIER J. A review on inertia and linear friction welding of Ni-based superalloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(4): 1639-1669.

[17] 李辉, 张田仓, 江乐天. 线性摩擦焊设备的振动测量和分析[J]. 航空制造技术, 2015(11):105-108,118.

LI Hui, ZHANG Tiancang, JIANG Letian. Vibration measurement and analysis of linear friction welding equipment [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(11):105-108,118.

[18] 许平, 毕世权, 苏智星, 等. TA15 钛合金线性摩擦焊在飞机结构上的应用研究[J]. 航空制造技术, 2015(17): 69-72,78.

XU Ping, BI Shiquan, SU Zhixing, et al. Application on linear-friction welding of TA15 titanium alloy applied to aircraft structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(17): 69-72,78.

[19] LI W Y, VAIRIS A, PREUSS M, et al. Linear and rotary friction welding review[J]. International Materials Reviews, 2016, 61(2): 71-100.

## Research and Development Status of Linear Friction Welding Equipment of Blisk

SU Yu<sup>1</sup>, MA Tiejun<sup>1</sup>, LI Wenyu<sup>1</sup>, YANG Xiawei<sup>1</sup>, ZHOU Jun<sup>2</sup>, ZHANG Xuejun<sup>3</sup>

(1. Shanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies, School of Materials, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Harbin Institute of Welding, Mechanical Science Research Institute, Harbin 150028, China;

3. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**[ABSTRACT]** Linear friction welding has developed rapidly and been applied successfully as a key technology of manufacture and repair of aeroengine blisks. And there are broad application prospects in the field of aerospace and other manufacturing. This article summarizes the research and development of linear friction welding equipment, introduces the working principle and main advantages and disadvantages of electromagnetic, mechanical and hydraulic equipments. This article also introduces the main performance index, structural features and research and application status of the typical equipment for the blisks manufacturing at home and abroad. Finally, the shortage and development prospects of linear friction welding equipment at present stage are pointed out.

**Keywords:** Linear friction welding; Blisk; Working principle

(责编 谷雨)