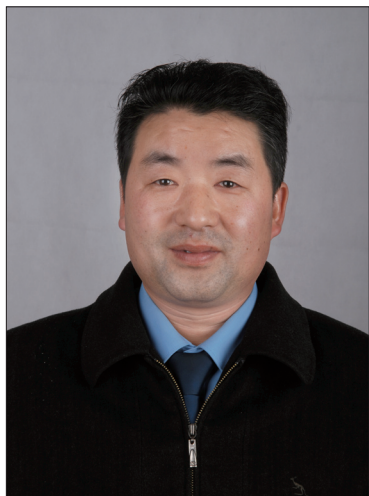


先进焊接技术在飞机修理中的应用

Application of Advanced Welding Technology in Aircraft Repair

空军第一航空学院 代永朝
空军驻广州地区军事代表局 黄飞波
9 3 7 0 7 部队 李小阳



代永朝

教授,空军高层次人才,主要研究方向为航空修理和无损检测。获军队科技进步一、二等奖 7 项;主编专著、教材 8 部;发表学术论文 80 余篇。

在航空航天制造与维修工程中广泛采用了多种焊接技术,先进焊接技术在飞机设计与制造中的广泛应用使得一些传统技术无法实现的复杂结构和高性能材料在航空制造与维修工程中大量应用,也为先进焊接技术在飞机修理中的应用提供了广阔的市场。

在航空航天制造与维修工程中广泛采用了多种焊接技术^[1],先进焊接技术在飞机设计与制造中的广泛应用使得一些传统技术无法实现的复杂结构和高性能材料在航空制造与维修工程中大量应用,也为先进焊接技术在飞机修理中的应用提供了广阔的市场。搅拌摩擦焊、激光焊和高频感应钎焊等多种焊接新技术是现代高新技术与传统焊接技术相互融合、相互促进的产物,也是焊接技术研究发展最快和最有活力的方向。目前,应用搅拌摩擦焊修复航空铝合金和铝锂合金材料、应用激光焊和高频感应钎焊修复钛合金和不锈钢等

材料已经取得了一定的应用研究经验。然而,相对于焊接技术与航空制造技术的飞速发展,各种先进焊接技术在飞机修理中的理论研究和应用工艺研究还有待进一步开展更加深入和广泛的研究。

搅拌摩擦焊

1 搅拌摩擦焊的工作原理与特点

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)是英国焊接研究所(The Welding Institute, TWI)于1991年发明并获世界范围内专利保护的新型固相焊接技术,也是世界焊接技术发展史上自发明到工业应用时

焊接是指通过加热或加压(或两者并用),并且用或不用填充材料,使工件达到冶金结合的一种方法。焊接能够将零件组合连接成整体结构,被誉为金属材料的“缝纫师”。高新技术的迅猛发展与多学科的相互交融,推动着焊接学科技术研究成果在不断实现工程化的同时,又继续开拓本学科的新方向。

间跨度最短且发展最快的一项神奇
的连接技术,被誉为“世界焊接史上
的第二次革命”。FSW 通过高速旋
转的搅拌头与被焊接材料表面间生
成的摩擦热使搅拌头邻近区域的材
料受热达到热塑性状态(见图 1),在
搅拌头轴肩的锻造作用下,实现工件
之间的连接。搅拌摩擦焊接过程中
没有金属熔化属于固相连接,在搅
拌头旋转、挤压和粉碎等机械力的作
用下,形成致密的组织结构,接头质
量高、缺陷少、焊后变形小、具有优
异的机械性能。

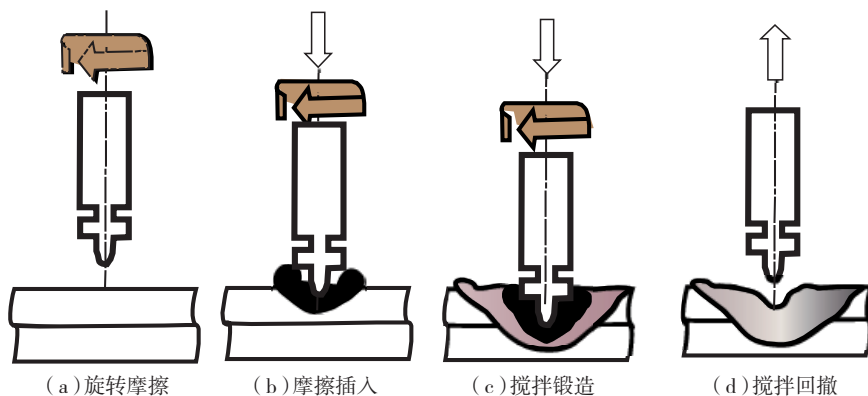


图1 搅拌摩擦焊接过程示意图

与传统熔焊工艺相比,搅拌摩擦
焊具有无烟尘、无气泡、无飞溅、无
需添加焊丝,焊接时不需要使用保护
气体、焊后焊缝晶粒细小、残余应力
小和变形小等优点,并且可焊接如高
强铝合金、镁合金等熔化焊接性差的
有色金属,非常适合航空用高强度铝
合金和铝锂合金材料的焊接修理。

2 搅拌摩擦焊在飞机修理中的应用

现代战机上的机身隔框等承力
构件多采用高强度铝合金(如 B 95、
7050、7075)加工而成,且隔框腹板
大多为网格状的筋条结构,一旦腹板
上产生裂纹,传统的铆接补强难以满
足等强度修理的需要,常规焊接技术
又由于受到结构形状、材料的可焊性
和安全性的影响难以实施。为此,国
外很多公司已将 FSW 技术引入到飞
机维修中,据国外的一项研究比较发
现,FSW 技术对机翼裂纹的修理会

消除高应力集中,其蒙皮表面需要的
首次安全检验时间推迟了 3.5 倍,同
时也减少了随后的检验次数。在对
隔框腹板裂纹 FSW 修理时,通过优
化焊接参数,搅拌头沿裂纹方向进行
焊接(见图 2),即可消除裂纹,而且
焊缝力学性能优良,基本达到等强度
修理的性能指标。

目前,国内已成功地将 FSW 应
用于飞机制造,完成搅拌摩擦焊研究
的铝合金包括:2000 系列(Al-Cu)、
5000 系列(Al-Mg)、6000 系列(Al-
Mg-Si)、7000 系列(Al-Zn)、8000 系

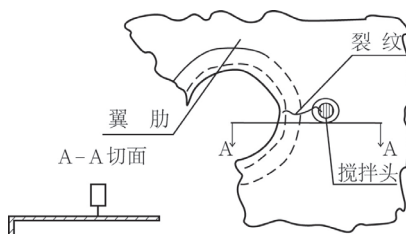


图2 裂纹的FSW修理

列(Al-Li)。王廷等应用搅拌摩擦焊
方法对 7050 铝合金进行了焊接试验
研究,发现在参数不当的情况下出现
飞边、孔洞、沟槽以及未焊合等缺陷^[2]。
针对搅拌焊在铝合金焊接方面存在
的局限性,近年来有人提出了超声搅
拌复合焊接技术^[3],将超声振动的能
量导入到焊缝深层,能够降低焊接流
变的抵抗力,减小残余应力,以达到
改善焊缝组织,提高焊缝强度的目
的。

然而,FSW 作为未来飞机修理

的一种新技术,要想得到广泛的推广
应用,需要开展以下几个方面研究:

- (1) 飞机损伤部位搅拌摩擦焊
原位修理技术研究,以及焊接设备的
小型化、智能化和机动性研究。
- (2) 飞机高强度铝合金结构件
曲线焊缝的搅拌摩擦焊修复工艺参
数优化研究,包括搅拌头旋转速度、
焊接速度、轴肩直径、旋转探头外形
轮廓和轴向压力等。
- (3) 对适用于飞机搅拌摩擦焊
搅拌头的研究,并根据不同特种金属
材料和飞机构件的焊接需要实现搅
拌头型号的系列化。
- (4) 飞机结构焊接的工装夹具
设计及研究。
- (5) 研究和制订军用飞机 FSW
焊接规范和焊接质量评估体系。

激光焊接

1 激光焊接的工作原理及特点

激光焊接(Laser Welding, LW)
是利用激光束照射金属表面,通过高
能量激光快速使金属熔化,同时激光
高温能够将材料内部的大部分杂质
汽化,具有熔池净化效应,从而使焊
缝的机械性能得到明显地改善和提
高^[4](如图 3 所示)。激光焊接可分
为连续激光焊接和脉冲激光焊接两
大类,连续激光焊接使用 CO₂ 激光
器,输出功率大,适合焊接大型结构
件,焊接深度可达 20 mm 以上。脉
冲激光焊接使用 Nd:YGA 激光器,其
输出能量较小,适用于中、小型零件
的精密焊接,由于其光束可用于光
纤传输,因此使用更加方便。

激光焊接具有焊接能量密度高、
光束斑点定位准确、热影响区域小、
无污染以及任何腐蚀、激光技术配
以计算机控制接口易实现自动化的
特点^[5]。根据实际作用在工件上的
功率密度或激光焊接时焊缝的形成
特点,可把激光焊接分为热传导焊接
和深熔焊接两类^[6],二者最根本的区

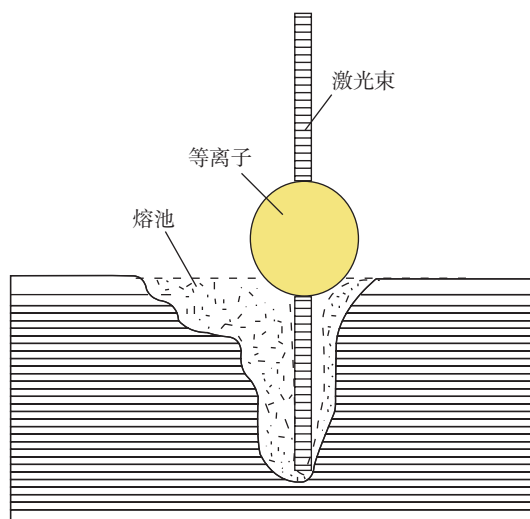


图3 激光焊接示意图

在于：前者熔池表面保持封闭，而后者熔池则被激光束穿透成孔。

2 激光焊在飞机修理中的应用

激光焊接技术除大量应用于飞机制造领域外，还被广泛应用于飞机结构损伤修复。20世纪末以来，美国 AeroMet 公司与波音、洛克西德·马丁、格如曼三大美国军用飞机公司紧密合作，开展飞机钛合金结构件损伤的激光快速修复技术研究^[7]，美国国防部后勤署 (DLA) 对用于飞机高性能钛合金、超高强度钢等结构件损伤的激光快速修复研究也十分重视。近年来，F-18E/F、JSF、F-22、F-15 等美军主力战斗机均分别采用了激光焊接技术对损伤的钛合金构件进行了修复。目前，激光焊接、激光切割、激光熔覆再制造快速修复技术已开始成为美国飞机等大型国防装备的低成本、短周期的最重要修理技术之一。

国内在激光修复技术的研究与应用领域也在近年来取得了一定的进展^[8-9]。飞机修理工厂已将该技术成功地应用于飞机钛合金机尾罩的损伤修理，发动机叶片局部缺损的熔覆再制造^[10]，并制定出了飞机钛合金、铝合金结构激光焊接修理工艺规范。目前，激光焊接在飞机修理中主要用于铝合金、铝锂合金、

钛合金和不锈钢材料的焊接修理^[11]，尤其是传统焊接修理难以解决的薄板合金材料焊接修理。

高频感应钎焊

1 高频感应钎焊的工作原理及特点

高频感应钎焊 (High Frequency Induction Brazing, HFIB) 的基本原理是利用交变磁场-电场感应现象，使场中的工件产生涡流效应对工件进行加热，造成钎料熔化，液态钎料在毛细作用下填充

间隙从而实现钎焊^[12]。与其他钎焊方法相比，高频感应钎焊有着独特的优点，如对待焊零部件的尺寸没有严格要求，有较好的加工适应性，电磁感应加热效率高、速度快、加热均匀、可控性好，工件表面的氧化程度比火焰钎焊、炉中钎焊低，可对某些特定部位进行焊接，尤其适用于管件套接、管和法兰、轴和轴套之间的连接^[13]。

2 高频感应钎焊在飞机修理中的应用

导管高频感应钎焊从工艺上分为两类：一类是固定式钎焊；另一类是安装式钎焊，已在航空、航天等领域得到了广泛应用。如美国波音-麦道公司在其大型客机 DC-10 中的总长达 850m 的液压管道上使用了近 2000 个钎接管接头，而在该公司为美国海军设计生产的 A-4 喷气式攻击机上更是运用了近 10 万个钎接管接头。近年来，国内在高频感应钎焊的连接的应用理论和实践上已取得了显著进展。中航工业沈阳飞机工业 (集团) 有限公司在某型号机的总装中已采用了安装式高频感应钎焊技术连接系统导管。

目前，航空修理工厂已将高频感应钎焊技术应用于飞机钛合金导管断裂、磨损等损伤的原位修复。将 2 个待焊导管端头预置于带钎料的套管中，加上焊接保护器，绕上软式感

应线圈，通过高频感应加热使钎料熔化，实现导管的连接。

结论

(1) 搅拌摩擦焊、激光焊和高频感应钎焊等先进焊接技术可用于修复飞机结构的铝合金、铝锂合金、钛合金、不锈钢等多种典型合金材料。搅拌摩擦焊作为一种固相焊接技术适合于熔化焊接性差的铝合金和铝锂合金等材料的焊接修理，作为高能束焊的激光焊与电弧焊、氩弧焊等传统焊接技术复合适用于铝合金、不锈钢和钛合金等多种材料的焊接修理。

(2) 搅拌摩擦焊的焊接速度、旋转速度及压入量等工艺参数是保证搅拌摩擦焊接头质量的基本条件，激光焊接的主要工艺参数是功率密度、光束焦点位置和焊接速度等，针对飞机修理工作中的实际应用有待进一步深入研究各种工艺参数对飞机修理的影响。

(3) 高频感应钎焊非常适用于飞机狭窄空间内的钛合金导管损伤修理，其修理工艺比较成熟，但钎焊设备都是固定式的，设备的移动性和可控性较差，需要开发小型化的便携式焊接设备。

参考文献

- [1] 王廷, 刘会杰, 冯吉才, 等. 7050-T7451 铝合金搅拌摩擦焊缝缺陷分析. 焊接, 2009(3):42-46.
- [2] 刘晓山, 郑立胜. 飞机修理新技术. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [3] 贺地求, 李剑, 李东辉, 等. 铝合金超声搅拌复合焊接. 焊接学报, 2011,12(32):70-72.
- [4] 李亚江, 王娟. 高能束流焊接技术现状及发展. 航空制造技术, 2011,8(38):38-41.
- [5] 杨晋萍, 孟勤. 国内外激光焊接现状. 焊接技术, 1991(5):41-43.

本文共有参考文献 13 篇，因篇幅所限，未能全部列出，读者如有需要，请向本刊编辑部索取。

(责编 深蓝)