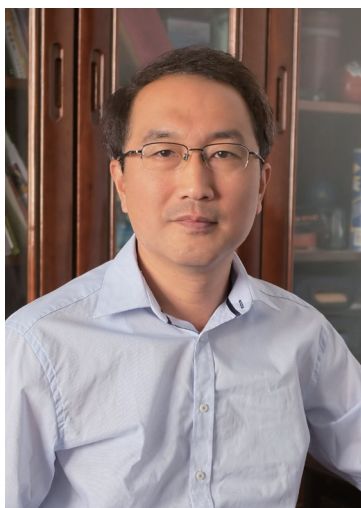


航空发动机先进焊接技术应用

Application of Advanced Welding Technology in Aeroengine

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 曲 伸 李 英 倪建成 杨 烁 周冠男



曲 伸

研究员级高级工程师,沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司技术中心焊接实验室主任,现任中航发动机公司熔焊技术首席专家,长期从事航空焊接技术研究工作,获部级科技奖 6 项,专利 10 余项。

现代飞机及航空发动机中焊接件的比重已达到 50% 左右,焊接技术在产品制造中的重要作用不言而喻。在航空航天诸多制造技术中,焊接技术的优势在于可以明显地减轻发动机的重量、降低成本、简化结构设计、提高性能和产品附加值。焊接作为制造工程中最重要主导工艺技术之一,已渗透到航空航天等高端制造业的全过程中。

随着航空航天产品性能、技术要

分析了高能束流焊接及增材制造、惯性摩擦焊和扩散焊等技术的特点以及这些技术在国内航空发动机制造领域的应用现状,结合国内航空航天业需求提出技术研发的方向和目标,同时介绍了这些技术在航空航天零部件修理方面的重要作用。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.20.053

求的不断提高,对焊接技术提出更加苛刻的要求,除质量、安全性外,还有轻量化、高可靠性、高生产效率、可维修性和低成本等指标。焊接技术的发展随着新材料、新结构的应用而不断推进。

近 20 年来,先进航空航天制造中新材料、新结构的不断应用引领了以高能束流(电子束、激光等)焊接和增材制造、惯性摩擦焊、线性摩擦焊、扩散焊为代表的先进焊接技术快速发展,应用的深度和广度不断深入和扩展,这些焊接技术得到极大重视,已成为新一代航空航天制造中最有代表性的先进焊接技术。

高能束流焊接及增材制造

1 电子束焊接

电子束焊接具有能量密度高、热输入小、零件焊后残余应力水平低、

变形小、自动化程度高等突出优点。真空电子束焊接在航空航天领域得到大规模的应用,对先进自动化焊接技术应用起到巨大推动作用,现已成为压气机转子和透平转子、薄壁机匣类零件、机体重要承力部件、传动零件焊接的标准工艺,极大提高了产品质量水平和材料(结构)应用范围,可以认为电子束焊接的广泛应用是国内近 20 年以来熔焊领域最有代表性的技术进步之一。

目前真空电子束焊接面临的主要问题有:特殊结构零件的焊接工艺、大型薄壁类零件焊接过程模拟及变形控制、大厚度材料电子束焊接工艺及质量控制、脉冲电子束焊技术开发等。

航空航天产品中广泛应用的大型薄壁高温合金和钛合金机匣结构复杂,主要由机械加工铸锻件、钣金

件经电子焊工艺完成,由于零件刚性较差、结构复杂,难以通过使用焊接工装或预变形方法有效控制焊接变形,需要进行全工艺过程模拟分析,采取控制焊前零件尺寸精度、优化焊接工艺、焊后采用精密热处理校正等方法提高组件尺寸精度。

受现有设备条件和工艺技术水平限制,国内对脉冲电子束焊接技术的研究起步较晚。与常规直流电子束焊相比,在平均功率相当的情况下,脉冲电子束焊可提高焊接效率,获得更大的深宽比。国外的研究表明,在一定频率下,脉冲焊能够增大焊缝熔深达 46%,降低焊缝宽度 22%^[1]。这意味着在焊接相同厚度的材料时,脉冲焊可用较小的参数和热输入完成,明显降低零件焊后残余应力水平,减小变形。

脉冲电子束焊工艺特别适用于对焊接热输入较敏感的材料和对变形要求高的复杂结构件。2014 年,中航工业黎明航空发动机(集团)有限责任公司开展了脉冲电子束焊接 TC4 合金的探索性研究工作,得到的结论与上述结果相近。脉冲电子束焊接工艺还存在一些问题:焊缝穿透和背面成形不稳定,焊缝背面咬边等缺陷不易稳定控制,脉冲焊对接头装配质量要求高等。尽管目前在生产中脉冲焊技术未能成熟稳定地应用,但作为电子束焊接技术的发展方向,应给予足够重视。

电子束加工的另一个重要应用方向是用电子束进行增材制造。与激光增材技术相比,电子束熔丝增材具有输出功率大、沉积效率高、保护效果好等突出优点^[2]。在偏转线圈的作用下,电子束可以实现极高频率的扫描,还可实现多束流加工,对电子束增材制造极为有利。北京航空制造工程研究所进行了大量的电子束增材制造研究工作,并在工程化应用方面取得重要突破。

国内航空航天业对电子束加工

需求很多,但设备主要依靠进口,设备制造所需的一些关键技术与国外相比还有相当差距,会影响后期电子束加工新技术的深度开发。

2 激光增材技术

激光沉积工艺修复的一个主要问题是快速凝固组织均呈现较高的强度和硬度,但塑性较差,从拉断后激光成形样品的截面可以看出,断裂部位几乎都产生在激光成形组织中央贯穿焊缝截面的方向性极强的晶粒附近。因此激光增材技术集成了激光技术、材料科学、机械加工等学科,并与数字化智能制造技术相结合,代表着今后制造技术的发展新方向,这项技术从 20 世纪 80 年代以来得到快速发展。目前激光增材制造技术在民用领域已大量应用,但总体上还缺乏在较大批量航空结构件制造上的应用验证考核。目前对激光增材在修理方面做了相对较多的应用研究,还应继续深入,并在应用中不断完善这项技术。激光增材技术在修理方面具有特殊优势,中航工业黎明公司用激光同轴送粉沉积方式修复高温合金薄壁机匣零件,在 1m 直径的薄壁机匣上修复了总长 400mm 的裂纹,沉积组织性能满足材料标准要求,修复(热处理)后定位尺寸精度变化不超过 0.10mm;国内还进行了飞机钛合金构件损伤激光快速修复技术研究并已应用于生产。

激光增材修理应关注沉积层与基体界面结合、沉积层之间组织变化、沉积层与基体性能差异、缺陷形成机理和质量控制、修复组织性能调整等具体技术问题。近期应更加重视激光增材在修理方面的应用研究,积累修理基础研究数据,为后期在结构件制造上成熟应用打好基础。

正如关桥院士所指出的:增材制造的技术基础是焊接(连接)技术,材料的可焊性是评价增材制造零件质量的重要依据,应以产品在工作条

件下的适应性作为增材制造零件的评价指标。这些指导思想应成为今后增材制造技术和产品性能验证的重要依据。

近年来,激光及激光复合焊在航空航天领域逐渐得到重视,成为继真空电子束焊后发展最快的高能束流焊接技术。由于激光焊能量密度更高,工艺上比真空电子束焊具有更好的柔性,必将在高端制造领域得到广泛应用。激光填丝复合焊综合了激光焊和 MIG 的优点,在空间型面角焊缝焊接方面具有特殊优势。

激光自动化焊接是集成了焊接设备、工艺、冶金、结构、过程和质量控制等多学科的系统工程,目前的激光复合焊接技术已在航天领域实现了应用,但还比较缺乏在航空制造中的应用积累,激光(复合)焊接的一些应用性问题还没能彻底解决,研究和应用的范围和深度远不如真空电子束焊,主要问题包括:工程应用中的大功率激光器严重依赖进口;适应航空航天产品材料和结构的特殊激光焊工艺和自动化、智能化焊接系统开发及质量控制;航空航天业激光焊工艺、检验标准体系不完备^[3];航空用材料激光焊接性研究较少。

借鉴国外激光焊接在航空航天制造业(如飞机蒙皮、蒙皮与桁条焊接)上应用的成功经验,加强基础理论研究和常用材料焊接性研究,借助产业升级和智能化制造发展机遇,发展自动化焊接和焊接全过程控制技术,向数字化、智能化、信息化、柔性化方向发展,是今后高能束流焊接,尤其是激光焊的重点研究目标。

惯性摩擦焊

从国外先进发动机转子部件(盘与盘或盘与轴的连接)制造的发展历程来看,惯性摩擦焊是最佳的连接方式,焊缝综合性能最好。国内针对航空航天业的惯性摩擦焊工艺研究已有近 30 年的历史,从钛合金、高温

合金同种材料的盘、轴类零件向异种材料、特种材料连接方向发展。现在国内已有在先进发动机上使用粉末冶金盘的需求。

粉末高温合金晶粒细密、组织均匀、无宏观偏析、屈服强度高、疲劳性能好,已成为发动机整体涡轮转子部件采用的最佳材料。到1993年,俄罗斯已累计生产粉末合金盘25000个,总工作时间达到100万h^[4]。由于惯性摩擦焊技术的特殊优势,从转子部件性能要求和材料焊接性等方面考虑,惯性摩擦焊成为粉末合金盘类零件连接的最佳和唯一手段。粉末合金材料连接工艺研究重点是:焊接过程对材料组织影响、缺陷控制、焊接工艺和热处理状态对材料疲劳性能的影响。中航工业黎明公司和国内一些单位合作已开展了相关研究工作,为后期工程化应用打下了较坚实的基础。

受设备条件限制,国内在线性摩擦焊工艺应用方面还没能取得较大突破,但进行了较多的基础研究。

扩散焊

作为一种固相焊接方法,扩散焊(TLP)的接头具有显微组织和性能与母材接近或相同、不易出现熔焊中的各种缺陷、不会产生过热区、焊接变形较小等明显优势,可焊接各种高温材料和异种材料的复杂结构零件。

TiAl、Ti3Al基金属间化合物由于具有低密度、良好的高温强度和抗氧化能力等突出优点,是重点开发并已应用于航空航天业的轻质高温结构材料,在国外新一代发动机(如GE公司的GENx)上已成功使用。扩散焊(TLP)工艺非常适宜于这些材料的连接。国内众多单位已进行了大量的研究工作,在中间层合金研制、界面反应及扩散机理等关键技术领域取得很大进步,已完成多种高温材料扩散焊(TLP)工艺研究并开始工程化应用。今后的研究重点是:钛合

金、Ni基单晶合金、Ni3Al金属间化合物、ODS合金的扩散连接技术和工程化应用中质量稳定性问题。

中航工业黎明公司对高Nb的Ti3Al基金属间化合物也开展过熔焊技术研究工作,焊接的主要问题是:由于合金的室温塑性低,不易控制焊后低塑性脆化裂纹的产生。

除用于特种高温材料的连接外,钎焊、扩散焊(TLP)还适用于高温部件的焊接修理,与钎焊相比,扩散焊接头可避免钎焊焊缝中低熔点金属间化合物产生和聚集,接头综合性能优于常规钎焊。

焊接修理技术

焊接修理的难度在一定程度上超过新件的制造难度,主要是:

(1)经过一定使用周期的高温零部件的组织会发生一定变化,这些零部件长期在不均匀温度场、应力场及高温氧化腐蚀作用下,会发生蠕变、疲劳、烧蚀、腐蚀的问题。对Ni基高温合金来讲,会发生过热过烧、 γ' 回溶、 γ' 粗化、碳化物的长大、晶界及晶界碳化物形貌变化、脆性相生成等组织退化问题,另外不同使用周期后材料组织性能的差异对修理工艺有不利影响,对叶片类零件还存在温度梯度造成的叶片各位置组织性能不均匀现象,这些变化会增加焊接修理难度,降低修理性能。除保证修理处性能外,焊接修理后还应将零件的材料性能恢复到与新品的材料标准相当的水平。

(2)待修理零件的尺寸精度较高,对焊接变形精度控制要求高,尤其对结构复杂的高温零件,焊接修理和焊后热处理的变形控制是极大的难题。

(3)为提高使用性能,高温部件均采用合金化程度高的材料,通过加入更多的合金元素进行强化,使材料焊接性变差。

正常服役条件下,零件失效主要

是由于材料组织缓慢变化引起组织退化,在超温的工作条件下,零件失效是以 γ' 回溶和组织严重损伤引起的性能降低和烧蚀、裂纹等形式表现出来的。针对不同材料和损伤形式,应综合考虑修理方法、技术成熟度,修理的安全性、可靠性和修理成本等因素,把零件使用性能恢复到安全程度。

高温部件的磨损、烧蚀、裂纹等缺陷的修理通常采用钎焊(扩散焊)、粉末冶金(PM)、等离子焊、激光增材等工艺方法。如Liburdi公司分别用微束等离子和PM技术成功修理高焓、高导叶片;MTU、P&W、Honeywell公司用激光增材工艺修理压气机和涡轮叶片并申请了专利。钛合金材料具有殊的晶体结构,裂纹敏感性高,断裂韧性低,焊接后疲劳强度降低幅度大,这些不利因素使钛合金压气机叶片、整体叶盘叶片修复难度加大,需要重点研究钛合金修复工艺和修复后的性能恢复技术。

国内对航空发动机和燃气轮机修理技术进行了较多的研究工作,但在技术难度最大的高焓、高导叶片等高温部件修理方面与国外相比有相当大的差距,技术差距主要表现在在高温、复杂应力等苛刻条件下能满足使用要求的修理用焊接材料技术;焊接修理所需的配套工艺技术;焊接修理质量控制技术;焊缝和基体性能恢复技术;修理质量评定和寿命评估等。

参考文献

- [1] 齐铂金,范霖康,刘方军.脉冲束流电子束焊接技术综述.航空制造技术,2015(11):26-30.
- [2] 巩水利,锁红波,李怀学.金属增材制造技术在航空领域的发展和应用.航空制造技术,2013(13):66-71.
- [3] 岩石.航空航天先进特种焊接技术应用调查报告.航空制造技术,2010(9):58-59.
- [4] 国为民,冯涤.俄罗斯粉末高温合金工艺的研究和发展.粉末冶金工业,2000,10(1):20-27.

(责编 早春)