

高能束流加工技术的应用及发展

Application and Development of Power Beam Processing Technology in Aviation Field

巩水利 / 北京航空制造工程研究所高能束流加工国家级重点实验室

导读:针对高能束焊接、高能束快速成形及高能束表面加工等三个方面进行讨论,概述并归纳当前的技术现状及应用,结合现代航空技术对制造工艺提出的新要求,阐述高能束流加工技术在航空制造中的发展趋势。

关键词: 高能束流; 加工; 焊接; 快速制造; 表面加工

Keywords: power beam; processing; welding; quick-forming; surface processing

0 引言

高能束流加工技术是21世纪最重要的先进制造技术之一,具有非接触、能量精确可控、材料适应性广、柔性强、质量优、资源节约、环境友好等综合优势,既可用于大批量高效自动化生产,又适用于多品种、小批量加工,甚至个性化产品的订制,因此成为传统制造业改造升级不可或缺的重要技术。高能束流加工技术在工业中所占的比重已成为衡量一个国家工业制造水平高低的重要指标之一,是研制生产高、精、尖武器装备的关键技术,对保障国家安全具有重要意义。经过多年的发展,高能束流加工技术已经发展为焊接、切割、制孔、快速成形、刻蚀、微纳加工、表面改性、喷涂及气相沉积等多种门类,在航空、航天、船舶、兵器、核能、交通、医疗等诸多领域发挥着重要的作用^[1-3]。

1 高能束流焊接技术

高能束焊接在提高材料利用率、减轻钛合金结构重量、降低成本方面独具优势,这使得以高能束流为热源的先进焊接技术——电子束焊接、激光焊接、激光复合热源焊接技术成为航空整体

结构连接制造的发展趋势^[4-6],应用范围也逐渐扩大。空中客车、波音、洛克希德·马丁等公司在军民机制造中,都相继采用电子束焊接、激光焊接技术作为飞机结构的连接方法。

电子束焊接是制造飞机主、次承力结构件和机翼骨架的必选技术,也是衡量飞机制造水平的一把标尺^[7-8],如美国F-14战斗机钛合金中央翼盒、F-22战斗机后机身钛合金梁、机翼梁、A380的发动机钛合金托架均为电子束焊接。此外,电子束焊接也是航空发动机制造的关键技术之一,如发动机机匣、压气机整体叶盘、涡轮、燃烧室等部件的焊接。

激光焊接则是实现大尺寸、薄壁机身结构件焊接的优选方案,具有焊接效率高、变形小、接头质量高等优点。例如,空中客车公司在A380机身壁板上首次成功应用激光焊接技术,与铆接结构相比,其减重约18%,降低成本约21.4%~24.3%。另外,激光焊接在发动机部件焊接与修复上也有重要应用,激光焊接修复技术利于近净成形,减少裂纹产生,已应用于航空发动机涡轮叶片、导向叶片和气路封严系统的零部件,如欧盟第六框架研究项目AROSATEC就

开展了压气机定子与叶栅、高压和低压叶片出口与盖板连接,以及涡轮机匣的激光焊接技术研究。美国通用电气公司成功地完成了喷气发动机的导流板和导向叶片的激光焊接组装,有效地解决了镍基合金小型零件激光焊接变形与裂纹等问题。美国霍尼韦尔公司修复的叶片已累计飞行2000万飞行小时。美国伍德集团利用激光粉末合金熔焊技术可以修理过去认为不可修的单晶和定向凝固合金零部件。

随着高能束焊接技术发展,新光源的研发也不断进步,在航空结构制造上发挥的作用也越来越大,例如电子束焊接^[9]非常注重大功率、高可靠性的电子束枪的研制,目前国外电子束焊接设备功率一般大于60kW,最高可达到200kW,加速电压在150kV以上,同时还利用先进的高压逆变电源技术提高了高压性能、设备稳定性,降低了噪声;在激光焊接方面,CO₂激光器和YAG激光器的功率增大已达到极限,难以实现大型结构中厚板焊接。以盘式激光和光纤激光为代表的高亮度大功率激光技术,尤其是光纤激光,束流品质高,其功率也已超过50kW,且还有提高潜力,可实

现薄板高效焊接、20mm以上厚板的高质量焊接和现场移动焊接,因此,光纤激光焊接大有替代CO₂激光和YAG激光之势(图1)。

2 高能束流快速成形技术

高能束流快速制造技术是基于离散/堆积原理的增材成型技术,由零件的三维模型可直接制造出任意复杂形状的金属零件,具有能够大大减少制造工序、缩短生产周期、节省材料、降低成本等特点。自20世纪90年代中期以来,该技术已发展为多种门类,如激光选区熔化(SLM)、电子束熔化制造(EBM)、激光近净形制造(LENS)、金属直接沉积(DMD)、形状沉积制造(SDM)以及电子束自由成形(EBFFF)等^[10-11]。采用的热源主要为激光、电子束和电弧等束源,该技术根据材料在沉积时的不同状态可以分为:熔覆沉积技术,材料在沉积反应时才送入沉积位置,由高能束在沉积区域产生熔池并高速移动,熔化后沉积下来;选区沉积技术,材料在沉积反应前已位于沉积位置上,再用高能束逐点逐行烧结或熔化。

2.1 熔覆沉积快速成形技术

熔覆沉积技术之一的同轴送粉激光快速成形技术,可制备叠层材料、功能复合材料、裁缝式地制成“变成分”的材料或零件和修复钛合金叶片、整体叶盘等构件,且其力学性能达到锻件的水平。其相关成果已应用在武装直升机、AIM导弹、F/A-18E/F及F-22战机上,如:AeroMet公司利用Lasform技术制造了F-22战机的TC4钛合金接头,满足疲劳寿命2倍要求,F/A-18E/F的翼根吊环,满足疲劳寿命4倍要求且静力加载到225%仍未被破坏。

金属丝材高能束熔融沉积技术是在高能束送丝焊接基础上发展起来的,

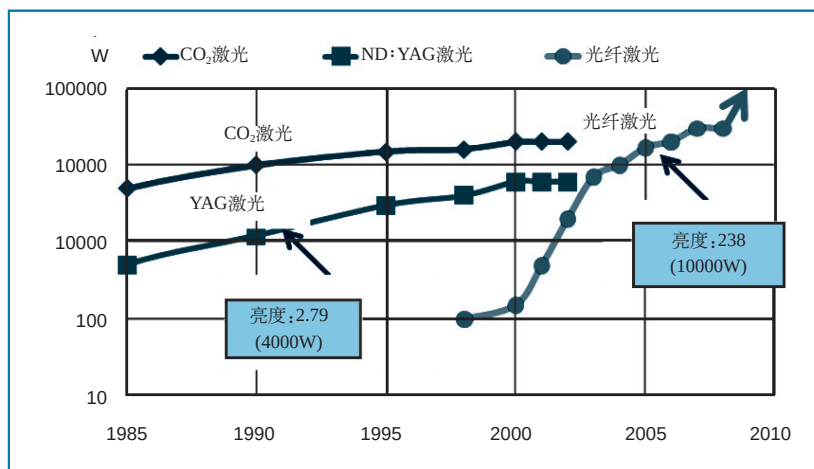


图2 激光器的发展趋势

其中熔化丝材的电子束自由成形快速制造技术是在真空环境工作,其冶金质量高,特别适用于钛合金等材料的快速制造,其发展速度非常快。1995年,美国麻省理工学院首次试制了In718合金涡轮盘。目前,已可以制造出形状比较复杂的零件,最大沉积速率3500cm³/h,性能达到锻件水平。西雅基公司利用该项技术制造了F-22上的钛合金AMAD支座、吊耳和万向结以及直升机的螺旋桨支架等。

2.2 选区熔化沉积成形技术

激光选区烧结技术(SLS),由于光斑或熔池较小,无需附加支撑,因此该技术制造的零件精度较高且形状较复杂。激光选区熔化技术(SLM)是在SLS技术的基础上发展起来的,两者的不同之处在于后者所采用的是一种金属材料与另一种低熔点材料(可以是低熔点金属或有机粘接材料)的混合物,在加工过程中,低熔点材料熔化或部分熔化,但熔点较高的金属材料被已熔化的低熔点材料包覆黏结在一起,从而形成类似于粉末冶金烧结坯件的原型,但这种零件还需经过高温重熔或渗金属填补孔隙等处理后才能使用。

与SLS/SLM技术相比,电子束选区

熔化技术(EBM)具有独特的优点:无反射、可加工激光不易加工的金、银、铜、铝等材料;成形环境为真空,特别有利于钛等活泼金属的成形,但EBM技术成形精度较差,为后续表面光整带来极大困难。

激光选区熔化净成形技术无需模具,直接利用金属粉末成形任意复杂零件,特别是点阵夹芯与复杂型腔结构件,可解决中小型复杂金属构件的难加工、周期长、成本高等问题,可利用此技术开发商业化的金属零部件。

3 高能束流表面工程技术

现代新型武器零部件的性能、可靠性和使用寿命要求越来越苛刻,以航空发动机为例,未来军用发动机空中停车率要达到0.01%~0.06%飞行小时,压气机出口温度将达到650℃,涡轮进口温度将达到1650~1750℃,热端寿命为5000次循环。为达到这些寿命、可靠性和抗疲劳等性能的技术要求,迫切需要对零部件进行高能束表面加工处理,按照工件处理表面的厚度不同可以将其划分为三类:表面改性、薄膜及涂层技术。

高能束表面改性加工技术,主要包括激光冲击强化、离子注入、电子束毛化及表面完整性技术等。美国和欧洲

一些发达国家的激光冲击强化技术较为成熟,已应用于F101、F110、F414和F/A-22等发动机的叶片上。通用电气公司自1997年直到目前累计强化叶片十万片以上,提高叶片高周疲劳寿命5~6倍。离子注入技术已实现了在军工零部件上的应用,如莫斯科航空研究所用离子注入技术处理钛合金压气机叶片,使叶片的疲劳强度提高5%~20%,耐热气腐蚀的性能提高2倍以上,耐颗粒冲蚀的性能提高20%~50%,耐压缩气体冲蚀的性能提高3倍以上^[12]。

高能束表面薄膜加工技术,主要包括航空产品防护薄膜、光电功能薄膜、透明隐身薄膜等加工技术,其在航空航天产品中已得到广泛应用,作为耐磨耐蚀防护薄膜已应用于航空发动机传动系统、导弹及卫星上,作为激光防护膜应用于飞机及导弹制导装置上,作为隐身薄膜已应用于飞行器透明窗口上,作为光电功能膜已应用于各种军用武器传感器、主要控制芯片上。美国古德里奇公司在直升机发动机传动轴上沉积了一层掺碳化钨类金刚石薄膜,使用寿命提高4倍以上,普惠公司开发了多层梯度TiN薄膜,在JT9D压气机叶片上得到应用。

高能束表面涂层加工技术,主要包括热障涂层、封严涂层、隐身涂层、防护涂层。在热障涂层方面^[13-15],主要发展新元素掺杂和新型复合工艺制备隔热温度更高的长寿命热障涂层。德国研发了可以大幅度降低涂层热导率的离子束辅助EBPVD沉积热障涂层技术。在封严涂层方面,正在进行具有良好的结合力、抗抗震性能、可磨耗性和抗冲蚀能力可磨耗涂层开发,其中真空等离子体喷涂技术及热压烧结技术被广泛采用。例如,美国Sulzer等离子技术公司研制的可磨耗陶瓷基封严涂层的最高使用温度已达1300℃,目前已经做到可

磨耗涂层与高压涡轮基体间界面冶金结合,寿命在2000小时以上。在防护涂层方面,冷喷涂技术已在航空领域应用已暂露头角,其主要特点是喷射温度低于被喷射材料的熔化和软化温度。美国多家公司利用该技术生产飞机用的新型韧性涂层,已将该技术应用于发动机镁合金附件机匣防腐涂层制备上。在隐身涂层方面,雷达波及红外隐身涂层已逐步使用在各类飞行器上,并逐步采用新工艺新技术向“薄、轻、宽”涂层和复合隐身涂层方向发展。

4 小结

随着技术的更新与发展,高能束流加工已不再是一种单纯意义上的加工制造技术,已发展成为高能束流能量场与品质、材料冶金、结构力学、自动化、计算机等多学科集成的工程制造技术,显现出极高的技术附加值,高能束流加工技术的发展方向更趋于加工过程的自动化和智能化、虚拟制造、复合束源和集成化,并向着高品质、高功率、高效率、多功能和结构功能一体化方向发展。**AST**

参考文献

- [1] 刘伟,李素丽.特种加工技术研究现状及发展趋势[J].广西轻工业,2010(08).
- [2] 肖荣诗.激光加工技术的现状及发展趋势[C].第13届全国特种加工学术会议论文集,2009:26-33.
- [3] 李涤尘.快速成形技术发展状况与趋势[C].第13届全国特种加工学术会议论文集,2009:34-38.
- [4] 邓树森.我国激光加工产业现状及市场展望[J].激光技术与应用,2007(2):9-22.
- [5] Phipps C. Laser applications overview: The state of the art and the future

trend in the United States[D]. RIKEN Review No.50, January 2003: 11-19.

[6] Borradaile J B. Future aluminium technologies and their application to aircraft structures[C]. Conference on New Metallic Materials for the Structure of Aging Aircraft, April 19-20 1999: 41-44.

[7] Robert W, Messler J R. The greatest story never told: EB welding on the F-14[J]. Welding Journal, May 2007:41-47.

[8] Irving B. EB welding joins the titanium fuselage of Boeing's F-22 fighter[J]. Welding Journal, December 1994:31-36.

[9] Schultz H., in: Electron beam welding[M], Abington Publishing, 1993.

[10] 闫占功,林峰,齐海波,等.直接金属快速成形制造技术综述[J].机械工程学报,2005(11):1-7

[11] Ruffo M. Metal rapid manufacturing: laser vs electron beam technology[C]. RAPID conference, 2009.

[12] 何恒.离子注入技术在航空零件上的应用[J].航空制造技术,2001(3):54-55.

[13] 陈林.航空发动机叶片用热障涂层的现状[J].航空制造工程,1997(6):10-12.

[14] 刘纯波,林锋,蒋显亮.热障涂层的研究现状与发展趋势[J].中国有色金属学报,2007(1):1-13.

[15] 朱佳,冀晓娟,揭晓武,等.封严涂层材料及应用[J].材料开发与应用,2008(4):25-29.

作者简介

巩水利,中航工业特种加工技术首席专家。