

高能束流加工技术的发展动态

New Development of Power Beam Processing Technology

中航工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室

巩水利 高巍
王玉岱 马旭颐



巩水利

研究员,博士,北京航空制造工程研究所副总工程师,中航工业特种加工技术首席专家,享受国务院政府特级津贴专家,“国家高等数控机床与基础制造装备”科技重大专项总体组成员,国际焊接学会航空专委会主席,中国焊接学会常务理事、高能束流和特种焊接委员会主任,高能束流加工技术重点实验室常务副主任。中国航空研究院博士生导师,大连理工大学、北京工业大学和沈阳航空航天大学兼职教授。

高能束流加工技术是由物理科学、机械与制造科学、信息科学、控制科学和材料科学等多学科融合发展起来的高智能、高柔性、低能耗、高清洁的先进制造技术,是 21 世纪最重

高能束流通常是指高能量密度的束流,如激光束、电子束、等离子体及离子束。高能束流加工技术利用高能束流对材料或构件进行制造及加工,主要包括焊接、增材制造和表面工程等。高能束流加工技术具有其他加工技术无法实现的独特优势,在先进制造领域尤其是飞机和航空发动机中的应用愈加重要。

要的先进制造技术之一^[1-2]。高能束流是指在自由空间可定向传输的高能量密度的束流,如激光束、电子束、离子束及等离子体等。高能束流加工技术是指利用高能束流使材料产生加热、熔化、气化、等离子体等物理现象而达到对材料进行去除、连接、生长和改性等目的的一种先进制造技术。高能束流加工技术的主要特点有:多尺度、选择性、非接触、三维高精度、灵活性强、材料适应性强,可实现极端条件制造。随着长寿命、高性能飞机及航空发动机发展的要求,高能束流加工技术的应用愈加广泛和重要。高能束流加工技术对促进学科发展,提升原始创新能力,推动国民经济发展和进步,提高国家抗风险能力有着不可替代的作用。

本文以高能束流加工技术在航

空工业领域的应用为背景,重点介绍高能束流焊接与制孔技术、高能束流表面工程技术和高能束流增材制造技术的当前应用、发展前沿、研究方向和发展趋势。

高能束流焊接与制孔技术

高能束流焊接在减轻结构重量、增强结构可靠性、提高材料利用率和降低成本方面独具优势,因而在航空工业领域应用广泛,其中主要有激光焊接和电子束焊接。

激光束焊接技术大量地应用于大尺寸和超大尺寸薄壁件的拼合焊接。激光束焊接具有能量密度高,热影响区小,空间位置转换灵活,可在大气环境下焊接,焊接变形极小等优点。激光焊接是一种以可聚焦、高功率密度激光束作为热源的高能

束流加工技术,其焊接过程在大气环境下完成,易于实现集成化、自动化及柔性化,特别适合大型复杂结构件焊接^[3]。它主要应用于飞机大蒙皮的拼接以及蒙皮与长桁的焊接,以保证气动面的外形公差。另外在机身附件的装配中也大量使用了激光束焊接技术,如腹鳍和襟翼的翼盒,其结构不再是应用内肋条骨架支撑结构和外加蒙皮完成,而是应用了先进的钣金成形技术后,采用激光焊接技术在三维空间完成焊接拼合,不仅产品质量好,生产效率高,而且工艺再现性好,减重效果明显。近年来激光焊也多见于薄壁零件的制造中,如进气道、波纹管、输油管道、变截面导管和异型封闭件。

近年来,中航工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室建立了双光束激光焊接平台,如图1所示。针对激光焊接技术应用过程中的关键问题,在激光焊接过程行为及焊接工艺与性能调控方面进行了大量研究。激光焊接过程行为方面,依托自主研发的激光焊接过程监测和检测技术研究平台,针对小孔、金属蒸气/等离子体、熔池、温度场及过程稳定性等进行系统研究,建立了焊接过程行为理论,有效解决了焊接工艺中遇到的过程不明、机理不清等问题。而在工艺与性能调控方面,在薄板激光深熔焊接工艺参数优化、激光填丝/电弧复合焊接装置、



图1 双光束激光焊接设备及焊接过程

工艺优化及焊丝熔化过渡机理、薄板激光焊缝气孔形成机理及控制、激光焊接接头的组织性能分析、T型接头双光束激光装置及焊接工艺优化以及超窄间隙激光焊接方面,针对钢、铝、钛及难熔或易氧化金属进行了大量基础研究,研究成果已在飞机铝合金、钛合金薄壁整体化结构焊接制造中取得突破性应用。

电子束焊接是一种以高速电子汇聚形成的高能量电子束流作为热源高能束流加工技术,具有焊缝深宽比大、焊缝纯度高等优点,特别适合大厚度高质量要求结构的焊接^[4]。电子束焊接已经成为大型飞机制造公司的标准配置,是制造飞机主、次承力结构件和机翼骨架的必选技术。

近些年,高能束流加工技术重点实验室对铝合金、钛合金、不锈钢、超高强钢及高温合金的电子束焊接技术均进行了较为系统的研究,尤其在大厚度钛合金电子束焊接结构完整性评定方面成果显著。通过对接头不均匀性(包括焊缝几何形状不均匀性、接头微观组织不均匀性以及接头力学性能不均匀性,如图2所示)、残余应力形成机理及表征以及接头性能调控方面的研究,提出了焊接接头性能控制理论与方法;另外,通过对钛合金电子束焊接接头塑性损伤本构关系及损伤演变规律、疲劳裂纹萌生、扩展行为及机理研究,获得相关断裂机理及疲劳机理,最终建立起系统的结构完整性评定方法,该理论和评定方法对大厚度钛合金结构电子束焊接设计及制造具有指导意义,并可显著提升经济效益。

激光加工小孔具有速度快、效率高的特点,主要应用于航空发动机热端部件气膜冷却孔加工。超快激光可以实现无再铸层、无微裂纹的小

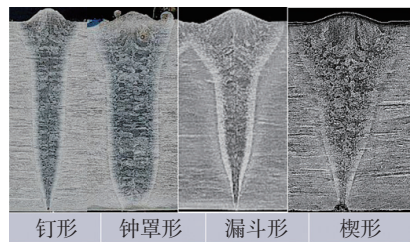


图2 电子束焊接焊缝几何形状

孔加工,并可以对陶瓷、复合材料进行加工,因而在未来先进发动机小孔加工领域具有独特优势。超快激光具备对带热障涂层的涡轮叶片进行加工气膜孔(包括异型孔),并确保气膜孔无再铸层、微裂纹,涂层无热致损伤的可行性,可以实现先涂层后制孔,可以改进涡轮叶片的制造技术路线,因此,需求非常迫切。

高能束流表面工程技术

高能束流表面工程技术主要利用激光、电子束、离子束及等离子体等高能密度束流使材料表面改性或在材料的表面形成防护或功能涂层,以提高零件的寿命或使用性能。高能束涂层技术主要包括:电子束物理气相沉积(EB-PVD)、大气/真空等离子喷涂、超音速火焰喷涂、冷喷涂、真空电弧沉积和磁控溅射等。制备的涂层按功能可以分为:热障涂层、高温抗氧化涂层、阻燃涂层、环境障碍涂层、封严涂层、耐磨涂层、耐腐蚀涂层、抗冲刷涂层、抗微动磨损涂层、憎水涂层、隐身涂层等^[5]。航空发动机中大量的关键零部件都离不开高能束表面处理技术,如压气机叶片、燃烧室、涡轮叶片、转子轴、鼓筒、轴承、封严装置表面等。大型飞机用发动机对安全可靠性的要求非常高,目前单独依靠基体材料的性能很难满足发动机部件长时间的高温、高负荷运行的要求。美国第四代战斗机F-22装备的F119涡轮风扇航空发动机的涡轮进口温度为1650~1700℃,这就对热端部件提出了苛刻的使用要求,必须采取高能束

流表面工程技术来满足零部件长期可靠工作的要求。现代航空发动机设计将集中于减少燃料消耗和增强推重比,同时提高可靠性和寿命。实现这一设计需求面临着结构设计、新材料和制造技术的挑战。现代航空发动机有 75% 以上的零件都采用表面工程技术以改进性能和可靠性,其中高能束表面工程技术起到了非常重要的作用。

离子束辅助 EB-PVD 技术是在电子束蒸发沉积涂层的同时用高能离子束对沉积基体进行轰击,从而实现了对涂层微观结构的调控,工艺原理如图 3 所示。蒸发枪对陶瓷棒料进行蒸发,棒料在电子束作用下温度逐渐升高,从而熔化、沸腾直至蒸发,蒸气在工件上凝聚,冷却形成涂层。工件在水平轴上旋转,预热枪发射电子束对沉积工件进行加热。离子源在电子束蒸发的同时产生离子束对工件进行轰击,涂层在生长过程中由于受到离子束的干扰,从而实现对涂层微观结构的调控。与传统 EB-PVD 技术比,离子束辅助 EB-PVD 技术的优势是:涂层的热导率低、隔热效果好,涂层的使用寿命高,涂层的沉积温度低^[6-7]。在国内,中航工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室最早开展了离子束辅助 EB-PVD 热障涂层技术的研究,并建立了国内第一个用于热障涂层制备的离子束辅助 EB-PVD 技术研究平台。

超音速火焰喷涂(高速火焰喷

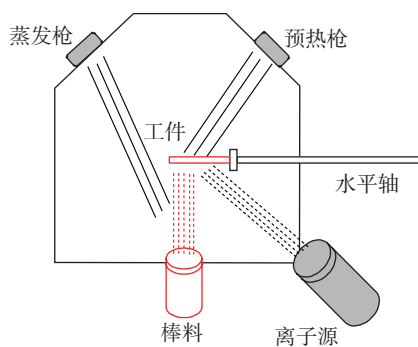


图3 离子束辅助EB-PVD沉积原理示意图

涂)采用可燃气或雾化煤油与氧气在燃烧室内燃烧,通过拉瓦尔管加速,形成高达 2000m/s 的高速焰流;将粉末粒子送入焰流中,加热、加速到 500~800m/s 以上,撞击基体形成涂层。涂层表面粗糙度小,致密(孔隙率小于 2%),结合强度高(60~70MPa),氧化少,特别适合于制备金属、金属合金和碳化物的涂层。采用超音速火焰喷涂制备的抗微动磨损涂层后,钛合金构件的抗微动磨损性能提高了 8 倍,图 4 所示为超音速火焰喷涂原理图。

高能束表面改性技术主要包括激光冲击强化、脉冲电子束表面强化、脉冲离子束表面强化和离子注入等。激光冲击强化是利用强激光产生的等离子体冲击波作用于金属表面,提高金属表面的抗疲劳、耐磨损和抗腐蚀性能的一种新技术,其技术原理如图 5 所示。欧美等发达国家已经将激光冲击强化应用于 F22 等先进发动机的叶片上,波音和空客公司对宽弦风扇叶片进行了强化,GE 公司累计强化叶片 10 万片以上,提高叶片高周疲劳寿命 5~6 倍;国内中航工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室率先开展了整体叶盘的激光冲击强化研究。

高能束流增材制造技术

高能束流增材制造技术是以高能束流(电子束、激光束、等离子束

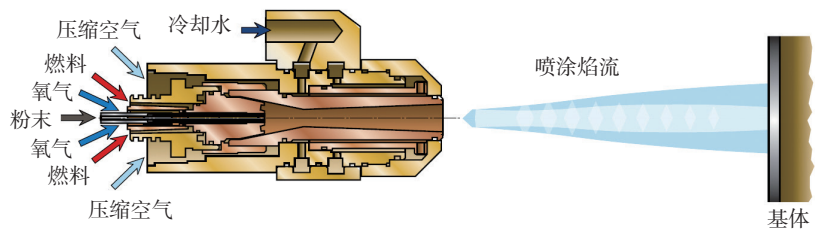


图4 超音速火焰喷涂原理图

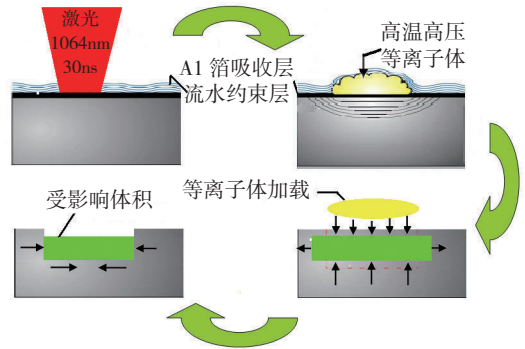


图5 激光冲击强化原理示意图

等)为热源,根据零件三维 CAD 数据,由计算机进行数字化控制,将材料逐层累加制造实体零件的技术。与传统材料铣削/切除的减材制造技术相比,高能束流增材制造技术就其原理来说具有“颠覆性”意义,特别是对人的思维产生深远影响,通过设计/材料/制造/验证四位一体的快速迭代循环过程,使人们得以摆脱结构形状对思想的束缚。高能束流增材制造技术具有快速、复杂结构不敏感性、材料利用率高、计算机数字化控制、零件性能优异等特点。

根据原材料的不同供给方式,高能束流增材制造技术可以分为两大类:第一类,在沉积过程中将粉末或丝材形式的原材料实时送入由激光或电子束产生的熔池,进行逐层熔化与沉积,称之为激光/电子束沉积增材制造技术,该技术仅能成形出毛坯,需要依靠数控加工达到其净尺寸;第二类,在沉积前将粉末形式的原材料预先铺展在沉积区域,其层厚一般为 20~100μm,然后利用高亮度激光或电子束按照预先规划的扫描路径逐层熔化与堆积,直接净成形出

零件,称之为激光/电子束选区熔化增材制造技术。中航工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室目前同时开展的研究方向有:电子束熔丝沉积成形技术、电子束选区熔化技术、激光直接沉积技术和激光选区熔化技术。

中航工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室在国内最早开展了电子束熔丝沉积成形技术的研究工作,并成功开发了国内首台电子束熔丝沉积成形设备,如图6所示。目前已成功开发的设备包括定枪式、动枪式、立式等。利用这些设备开展了钛合金及超高强度钢的成形、组织与力学性能等基础研究工作,研制出大量钛合金零件。

中航工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室针对钛合金、TiAl金属间化合物开展了电子束选区熔化技术研究,开发了电子束精确扫描技术、精密铺粉技术、数据处理软件等装备核心技术。针对飞行器结构轻量化需求,重点研究了钛合金的力学性能及空间点阵结构的承载性能和变形失效行为,目前正进行飞机复杂钛合金接头及TiAl叶片的电子束选区熔化制造技术研究。

中航工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室针对TC4、TB6、TC17、TC11、Ti60、



图7 激光直接沉积TC11钛合金叶片

TiAl等材料开展了大量激光直接沉积技术基础研究工作,研制出TC11钛合金压气机叶片,如图7所示。针对某型号航空发动机TC11钛合金斜流整体叶轮损伤部位进行了修复,目前已顺利通过试车考核。北京航空制造工程研究所具有激光直接沉积成套装备的研发能力,已成功研制出分别基于机器人和数控机床的激光直接沉积专用装备,具备送粉与送丝功能。

中航工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室突破了金属零件激光选区熔化装备研制和成形技术研究,突破了原材料、成形工艺、后续热处理、表面处理等技术,研制出国内最大的激光选区熔化空间曲面多孔金属件,为该技术在型号产品上的应用奠定了坚实基础。图8为采用激光选区熔化技术成形的复杂结构件。

结束语

高能束流加工技术在能量、时间和空间方面可选择范围宽,并可

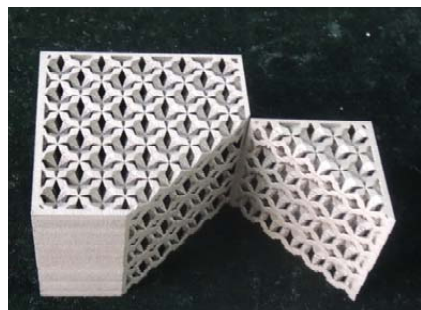


图8 激光选区熔化成形的复杂结构件

精确、协调控制。在特种材料制造、特殊精度制造、复杂形状制造、微纳制造和跨尺度制造方面具有独特优势。复合制造技术是高能束流加工技术发展的重要趋势之一,具有单一制造技术无法实现的优势。高能束流加工技术在难加工材料、复杂结构件加工、微纳加工、高性能表面防护涂层制备、大厚度和窄间隙焊接、高精度制造领域起的作用越来越大。随着我国航空工业的发展,高能束流加工技术必将贡献更大的力量。

参考文献

- [1] 巩水利. 高能束流加工技术在航空发动机领域的应用. 航空制造技术, 2013(9): 34-37.
- [2] 关桥, 邵亦陈. 航空特种焊接/连接技术体系的形成和发展——中航工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室建所55周年纪念. 航空制造技术, 2012(13): 34-39.
- [3] Steen W M. Laser materials processing. New York: Springer Verlag, 1991.
- [4] James D C. Titanium alloys on the F-22 fighter airframe. Advanced Materials & Processes, 2002, 160(5): 25-28.
- [5] 武洪臣, 高巍. 航空发动机涂层技术及应用. 航空制造技术, 2013(9): 80-83.
- [6] Renteria A F, Saruhan B, Schulz U, et al. Effect of morphology on thermal conductivity of EB-PVD PYSZ TBCs. Surface & Coatings Technology, 2006, 201: 2611-2620.
- [7] Youchison D L, Nygren M A, Gallis R E, et al. Effects of ion beam assisted deposition, beam sharing and pivoting in EB-PVD processing of graded thermal barrier coatings. Surface and Coatings Technology, 2004, 177-178: 158-164.

(责编 谷雨)



图6 国内首台电子束熔丝沉积成形设备