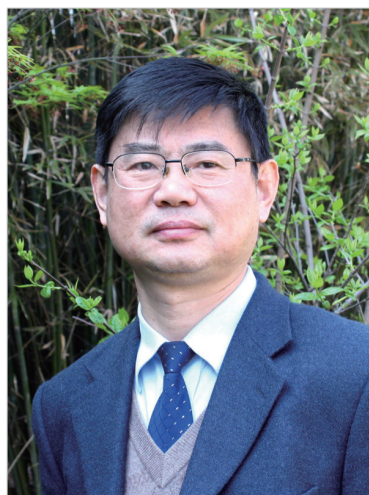


高能束流焊接技术现状及发展

Application and Development of Advanced Welding Technology by High-Energy Density Beam

山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室 李亚江 王 娟
莫斯科国立鲍曼技术大学材料科学系 P.U.Puchkov



李亚江

山东大学教授, 博士生导师, 从事先进材料特种焊接技术研究。主持完成国家自然科学基金和省(部)级科研项目 10 多项, 获国家教育部自然科学一等奖 1 项、省科学技术奖 4 项, 授权国家发明专利 8 项, 发表论文 180 多篇。

高能束流(High Energy Density Beam)加工技术包含了以激光束、电子束和等离子弧为热源对材料或构件进行特种加工的各类工艺方法。高能束流焊(或高能密度焊)是指焊接功率密度比通常的氩弧焊(TIG、MIG)或 CO₂ 气体保护焊高的一类焊接方法。严格地讲, 焊接能量和焊接功率密度是 2 个不同的概念, 但二者

高能束流焊接技术是现代高科技与先进制造技术相结合的产物, 国内在高能束流焊接设备水平上与国外有一定差距, 但在工艺研究上水平较为接近, 在某些方面甚至还有自己的特色。当前高能束流焊接被关注的主要领域是高能束流设备的大型化, 如功率大型化及可加工零件的大型化、设备的智能化以及加工的柔性化、束流品质的提高、束流的复合及相互作用、新材料焊接及应用领域的扩展。

具有相关性。习惯上, 高能密度焊常被认为是高功率密度焊(功率密度大于 10⁵W/cm²), 如电子束焊、激光焊、等离子弧焊等。

高能束流加工的特点

高能束流加工技术是利用功率密度大于 10⁵W/cm² 的热源(如激光束、电子束、等离子弧等)对材料或结构进行的特种加工技术。这里所指的“加工技术”不仅仅是把材料加工制成具有先进技术指标的构件, 还包括利用高能束流制备新型材料。

20 世纪 80 年代以后, 高能束流加工技术呈现出加速发展的趋势。在世界高科技市场竞争中, 一些发达国家相继建立了各自的研究开发中

心, 支持开展高能束流加工技术的研究和应用工作。我国在这一领域的研究和应用也取得了高速发展^[1]。

高能束流由单一的光量子、电子和等离子或 2 种以上的粒子组合而成, 目前用在焊接领域的高能束流主要是激光束、电子束和等离子弧。几种常见热源的功率密度见表 1。属于高功率密度的热源有等离子弧、电子束、激光束、复合热源(激光束 + 电弧)等。根据热源功率密度的不同, 常用焊接热源的功率密度可分为如下 4 个区域。

(1) 低功率密度区, 功率密度约小于 3 × 10²W/cm²。这时, 热传导散失大量的热, 被加热材料只有轻微的可以略而不计的熔化, 这种热源难于

表1 几种常见热源的功率密度

热源		最小加热面积/cm ²	功率密度/(W·cm ⁻²)	正常温度/10 ³ K
光	聚焦的太阳光束	—	(1~2) × 10 ³	—
	聚焦的氙灯光束	—	(1~5) × 10 ³	—
	聚焦的激光	—	10 ⁷ ~10 ⁹	—
电弧	电弧(0.1MPa)	10 ⁻³	1.5 × 10 ⁴	6
	钨极氩弧	10 ⁻³	1.5 × 10 ⁴	8
	熔化极氩弧	10 ⁻⁴	10 ⁴ ~10 ⁵	8~9
高能束流	等离子弧	10 ⁻⁵	(0.5~1) × 10 ⁵	18~24
	电子束	10 ⁻⁷	>10 ⁶	19~25
	激光束(0.1MPa)	10 ⁻⁸	>10 ⁶	—

实施对金属的焊接。

(2) 中功率密度区,功率密度范围为 $3 \times 10^2 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ 。这时的热过程以径向导热为主,材料被加热熔化,几乎没有蒸发,绝大多数电弧焊的功率密度都在这个范围内。

(3) 高功率密度区,功率密度范围为 $10^5 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$ 。处于此范围内的焊接方法主要是电子束焊和激光焊,这时以蒸发为主,强烈的蒸发会在熔池中产生小孔。

(4) 超高功率密度区,功率密度大于 10^9 W/cm^2 。这时的蒸发更剧烈,高功率的脉冲激光聚焦成很小的束斑时即出现这种情况。超高功率密度的脉冲激光束可用于打孔,其加工的小孔精度高,小孔侧壁几乎不受热传导的影响。

高能束流焊接技术是现代高科技与先进制造技术相结合的产物,国内在高能束流焊接设备水平上与国外有一定差距,但在工艺研究上水平较为接近,在某些方面甚至还有自己的特色。当前高能束流焊接被关注的主要领域是高能束流设备的大型化,如功率大型化及可加工零件的大型化、设备的智能化以及加工的柔性化、束流品质的提高、束流的复合及相互作用、新材料焊接及应用领域的扩展。

高能束流焊接设备向大型化发展有2层含义,一是设备的功率增大,二是采用该设备焊接的零件大型化。由于高能束流焊接设备一次性

投资大,特别是激光焊和电子束焊设备。因此增大功率、提高焊接深度和焊接过程的稳定性,相对降低焊接成本,才能为工业界所接受。大型焊接配套设备建立之后,高能束流焊接成本可以进一步降低,有利于在军用、民用各个工业领域中扩大应用。

高能束流焊接特点

在高能束流焊接过程中,由于热源能量密度高,在极短暂的作用时

填丝、焊缝熔深大于熔宽、焊接速度快、热影响区小、焊缝组织细化、焊接变形小。“小孔效应”改变了焊接过程的能量传递方式,由一般熔焊方法的导热焊转变为穿孔焊,这是包括激光焊、电子束焊、等离子弧焊在内的高能束流焊接的共同特点。

在其他因素不变条件下,高能束流的功率密度越高,熔深越大,焊缝的深宽比也越大。高能束流类型不同,工艺参数和被焊材料不同,焊缝的尺寸和形状也不同。对电子束焊接来说,典型的小孔直径为0.5mm,熔深可达200mm,焊缝深宽比达60:1;对激光焊接来说,典型的小孔直径为0.1mm,熔深可达20mm。

高能束流加工技术在高技术及国防科技的发展中起着无可替代的作用。表2所示是高能束流加工技术的特点及其应用领域。

由于有上述优势,高能束流焊接

表2 高能束流加工技术的特点及其应用领域

特点	用途	适用性	产品示例
穿透性	重型结构的焊接	1次可焊透300mm	核装置、压力容器、反应堆潜艇、飞行器、运载火箭、空间站、航天飞机、重武器、坦克、火炮、厚壁件
精密控制、微焦点	微电子与精密器件制造	聚焦后的束斑直径 < 0.01mm	超大规模集成元器件、结点、航天(空、海)仪表、膜盒、陀螺、核燃料棒封装
高能密度、高速扫描	特殊功能结构件制造	扫描速度为 10^3 孔/s, 400m/s	动力装置封严、高温耐磨涂层、沉积层、切割、气膜冷却层板结构、小孔结构、高温部件
全方位加工	特殊环境加工制造	薄板、超薄板、厚大件	太空及微重力条件下的零部件,真空、冲气、水下及高压条件下的零部件
高速加热、冷却	新型材料制备、特殊及异种材料	速率 10^5 K/s	超高纯材料冶炼、超细材料、非金属复合材料、陶瓷、表面改性、合成、非晶态、快速成形、立体制造

间内,随着热源与被焊工件的相对运动形成连续的而且完全熔透的焊缝。高能束流焊接技术的最大特点是焊接时产生“小孔效应”,焊缝深宽比比热传导焊接方法显著提高。

“小孔”的存在从根本上改变了焊接熔池的传质、传热规律,与常规电弧焊方法相比有明显的优点。高能束流焊接时基本不需要开坡口和

技术可以焊接难熔合和采用常规方法难以实现焊接的材料,并具有较高生产率。在核工业、航空航天、汽车等工业部门得到广泛的应用。并且,随着高能束流焊接技术的不断推广,也被越来越多的工业部门所采用。

高能束流焊接新发展

(1) 电子束焊接。

电子束焊(Electron Beam Welding)在工业上的应用已有 50 多年的历史,随着电子技术、高压和真空技术的发展,电子束焊接技术的研究及推广应用极为迅速,在大批量、大厚度件生产、大型零件制造以及复杂零件的焊接加工方面显示出独特的优越性。目前,在工业中实际应用的电子束焊接设备的功率一般小于 150kW,加速电压在 200kV 以内。一次可焊最大厚度钢板约为 300mm,铝合金约 50mm。

随着国内外对电子束焊接设备及控制、同种及异种材料焊接工艺、电子束焊接理论等方面研究的深入,电子束焊接技术在航空燃油测量系统、飞机发动机上得到了广泛应用。焊接产品涉及航空装备、卫星导航、雷达通讯、舰载机箱,尤其是变截面电子束焊接技术的出现,为航空工业的发展起到了促进作用^[2-5]。正是由于这项技术使得许多复杂的飞机和发动机零部件的一次性焊接成为可能,避免了多次焊接出现的局部焊接缺陷和重复加热造成的组织性能下降,提高了飞机的整体性能。



进行机身壁板焊接的激光焊接系统

进入 21 世纪,随着人类活动空间向太空的进一步扩展,电子束焊接技术的应用也逐步拓展到太空领域。高低温度交替冲击、失重、真空及宇宙线辐射等特殊的太空环境,对宇航零部件的结构设计、材料选择及加工工艺提出了极为苛刻的要求。实践证明,为了满足上述特点,电子束焊接技术是必不可少的强有力的工具

之一。为适应特殊的焊接环境,空间所用电子束焊机应具有以下特点:一是重量轻、体积小,以方便火箭运载及宇航员操作;二是要对宇宙辐射线进行防护;三是需要考虑失重、超高真空、空间温度交变的影响。

由于电子束焊接过程中电子束与金属之间的深穿透和快速物理化学冶金作用,以及当前研究分析手段上的局限性,使得电子束焊机机理的本质研究有待进一步深入。同时,借助于计算机系统更新、软件升级,有望在脉冲电子束焊、电子束焊缝自动跟踪系统上寻求突破,从而实现超薄零件、不规则焊缝的自动化和半自动化焊接。

(2) 激光焊接。

激光焊(Laser Welding)是以聚焦的激光束作为能源轰击焊件所产生的热量进行焊接的方法。激光焊接技术经历了由脉冲波向连续波的发展、有效功率薄板焊接向大功率厚件焊接的发展、由单工作台单工件向多工作台多工件同时焊接的发展,以及由简单焊缝形状向可控的复杂焊缝形状的发展。目前激光焊接技术几乎已涉及各个工业领域,尤其在航空航天、汽车制造业,激光焊技术能够显著降低成本、提高生产效率、减轻飞机、航天武器和飞行器的重量,成为传统焊接技术的有效补充,显示出某些独特的优势^[6-7]。

激光焊接技术是飞机制造业的一次技术革命。例如空客 A380 是欧洲空中客车公司设计生产的运输力最大的民用飞机,空客 A380 之所以能大大减轻飞机重量(机身重量减轻 18%),减少油耗排放,降低运营成本的主要原因就是将激光焊接技术应用于飞机机身、机翼的内隔板与加强筋的全部连接,取代了原有的铆接工艺,被称为航空制造业中的一大技术革命^[8]。

激光技术已成功用于焊接航空发动机主要结构件,如叶片、燃烧室、机匣等。普惠公司在美国空军项目

计划资助下,建立了涡轮叶片激光焊接中心,可以完成涡轮叶片所需部件的自动激光焊接,如 JT9D 和 FLO 的二级涡轮转子叶片以及 V2500、F100-PW-220 等发动机的涡轮叶片、导向叶片、机匣、燃烧室等均采用激光焊接技术。V2500 发动机的风扇机匣前后段是采用 6kW 的 CO₂ 激光束将其焊接成一整体。美国 GE 公司也成功完成了发动机导向叶片组件的激光焊接,解决了镍基合金零件激光焊接变形与裂纹等问题,并用 CO₂ 激光设备焊接喷气发动机燃烧室衬套。钛合金飞行舵翼外型面为空间曲线型面,要求连接强度高,焊接过程采用计算机编程,实现了焊接轨迹和激光焊枪的精密调整,保证焊接过程与局部保护等技术的协调运动控制,提高了焊接质量。

激光焊接技术用于航空航天工业仍面临新型激光器研发、先进工艺研究、焊接性能预测及质量控制等方面的问题^[9-10]。目前,激光焊接所用的激光器主要为大功率 CO₂ 激光器、脉冲 YAG 激光器和光纤激光器,激光器的发展应集中于高性能激光设备的研发,如提高电源的稳定性和寿命,对于 CO₂ 气体激光器要解决大功率激光器的放电稳定性,对于 YAG 固体激光器要研制大容量、长寿命的光泵激励光源。

在激光焊接过程控制和质量预测研究中,关键问题是建立熔池形状参数与焊接工艺之间的关系。一些研究者根据激光深熔焊中的小孔机制,对激光焊接的温度场、液体流动及小孔形状、尺寸等用计算机进行模拟计算并取得了一定效果。随着图像传感方法的改进,人们可以从熔池图像获得熔池形状更多的特征信息,如熔池宽度、长度和面积,这对激光焊焊缝质量控制有着重要的作用,这也是激光焊接研究的一个重要方向。

(3) 高能束流的复合技术。

近年来,国内外关于束流复合焊

接新工艺、新技术的研究报道推动了束流复合焊接技术的发展。其中最主要的是采用激光-电弧复合热源的高效焊接技术。高能束流焊接的优势很明显,但目前高能束流焊接的成本仍较高。因此以激光为核心的复合技术受到人们的关注。事实上,激光-电弧复合在20世纪70年代就已提出,然而稳定的加工应用直至近几年才出现,这得益于激光技术以及电弧焊设备的发展,尤其是激光功率和电弧控制技术的提高。

束流复合加工时,激光产生的等离子体有利于电弧的稳定;复合加工可提高加工效率,提高焊接性差的材料(如铝合金、双相钢等)的焊接性,增加焊接稳定性和可靠性;激光加丝焊对参数变化是很敏感的,通过与激光-电弧的复合,则变得容易而可靠。

激光-电弧复合主要是激光与钨极氩弧、等离子弧以及活性电弧的复合。通过激光与电弧的相互影响,克服每一种焊接方法自身的不足,产生良好的复合效应。

熔化极活性电弧成本低,使用填充丝,适用性强;缺点是熔深浅、焊接速率低、工件承受热载荷大。激光焊可形成深而窄的焊缝,焊接速率快、热输入低,但设备成本高,对工件制备精度要求高,对铝等材料的适应性差。激光-GMAW的复合效应表现在:电弧增加了对间隙的桥接性,其原因一是填充焊丝,二是电弧加热范围较宽;但复合电弧的功率决定了焊缝顶部宽度;激光产生的等离子体减小了电弧引燃和维持的阻力,使电弧更稳定;激光功率决定了焊缝的深度。也就是说,复合电弧导致了焊接效率增加,增强了焊接适应性。

激光-电弧复合对焊接效率的提高十分显著,这主要基于2种效应:一是较高的能量密度导致了较高的焊接速度,工件热流损失减小;二是两热源相互作用的叠加效应。焊接

时,激光等离子体使电弧更稳定;同时电弧也进入熔池小孔,减小了能量的损失。

激光-GTAW的复合可增加焊接速度,约为钨极氩弧焊的2倍。钨极烧损也大大减小,坡口夹角也可显著减小,焊缝截面积与激光焊时相近。与激光单弧焊相比,激光双弧复合焊接的焊接热输入可减小25%,而焊接速度可增加约30%。

激光-电弧(或等离子弧)复合焊接的优点主要是提高了焊接速度和熔深。由于电弧加热,金属温度升高,降低了金属对激光的反射率,增加了对光能的吸收。这种方法在小功率CO₂激光器试验基础上,还在12kW的CO₂激光器以及光纤传输的2kW的YAG激光器上进行试验,并为应用机器人进行激光-电弧(或等离子弧)复合焊接打下了基础。

激光焊接复合技术还有激光-高频焊、激光-压焊、激光-搅拌摩擦焊等。激光-高频焊是在高频焊管的同时,采用激光对熔焊处叠加热量,使待焊件在整个焊缝厚度上的加热更均匀,有利于提高焊管的接头质量和生产率。激光-压焊是将聚焦的激光束照射到被连接工件的接合面上,利用材料表面对垂直偏振光的高反射将激光导向焊接区。由于接头特定的几何形状,激光能量在焊接区被完全吸收,使工件表层的金属加热或熔化,然后在压力作用下实现材料的连接。这样不仅焊缝强度高,焊接速度也得到大幅度提高。

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)是近年来发展起来的先进焊接技术。激光-搅拌摩擦焊是用激光束在FSW搅拌头前方进行预热的复合搅拌摩擦焊,可以大幅度加快焊接速度。这种方法采用YAG激光发生器,自左而右和自上而下采用Ar气保护。

近年来,通过激光-电弧复合而诞生的高能束流复合焊接技术获

得了长足的发展,在航空航天、军工等部门复杂构件上的应用受到重视。目前,高能束流与不同电弧的复合焊接技术已成为高能束流焊接领域发展的热点之一。

结束语

作为先进制造技术的一个重要发展方向,高能束流加工技术具有常规加工方法无可比拟的特点,并已扩展应用于航空新型材料的制备和特殊结构的制造领域。高能束流焊接热源(如激光、电子束等)以其高能量密度、可精密控制的微焦点和高速扫描技术特性,实现对材料和构件的深穿透、高速加热和高速冷却的全方位加工,在高技术领域和国防科技发展占有重要地位。

参考文献

- [1] 关桥. 高能束流加工技术—先进制造技术发展的重要方向. 航空制造技术, 1995(1): 6-10.
- [2] 赵明书. 航空制造业中的电子束焊接. 现代焊接工程, 2008(3): 26-27.
- [3] 冯吉才, 王廷, 张秉刚, 等. 异种材料真空电子束焊接研究现状分析. 焊接学报, 2009, 30(10): 108-113.
- [4] 黄刚. 电子束焊接技术在航空产品中的应用. 四川兵工学报, 2010, 31(5): 73-76.
- [5] 秦国梁, 林尚扬. 激光深熔焊接过程中小孔径向尺寸及其动特性. 中国激光, 2005, 32(4): 557-561.
- [6] 李亚江, 吴娜, Puchkov P U. 先进焊接技术在航空航天领域中的应用. 航空制造技术, 2010(9): 43-47.
- [7] 纪春雨, 李伟剑, 李伟红, 等. 激光焊接技术发展及其在航空工业领域的应用. 航空制造技术, 2009(25): 126-129.
- [8] 左铁钊, 陈虹. 21世纪的绿色制造—激光制造技术及应用. 机械工程学报, 2009, 45(10): 106-110.
- [9] 刘必利, 谢颂京, 姚建华. 激光焊接技术应用及其发展趋势. 激光与光电子学进展, 2005(9): 43-47.
- [10] 张益坤, 成志富. 激光焊接技术在航天产品中的应用. 航空制造技术, 2009(16): 45-46.

(责编 良辰)