

Application and development prospect of electron beam welding in the field of special equipment manufacturing

Lina Pei Quanzhi Wang Wei Zhang

Benxi Special Equipment Supervision and Inspection Institute, Benxi, Liaoning, 117000, China

Abstract

Electron Beam Welding (EBW), which primarily utilizes electron beams as a heat source, delivers superior weld strength while enabling high-precision welding with excellent penetration rates and minimal heat-affected zones. As a pivotal technology in aerospace, nuclear power equipment, defense industries, and precision manufacturing, EBW has emerged as a critical support system for special equipment production due to its high precision, efficiency, and minimal deformation characteristics. This paper analyzes the fundamental principles and process features of EBW technology, while exploring its applications and future prospects in special equipment manufacturing. The discussion aims to facilitate professional exchange and reference for industry practitioners.

Keywords

electron beam welding; special equipment; development prospect

电子束焊接在特种设备制造领域中的应用及其发展前景

裴丽娜 王金之 张微

本溪市特种设备监督检验所, 中国·辽宁 本溪 117000

摘要

电子束焊接 (Electron Beam Welding, EBW), 其主要是利用电子束作热源, 焊缝强度更大, 可以实现高精密度高熔透率、小热影响区的焊接。目前是航空航天、核电装备、兵器工业、精密制造等领域的关键技术之一。同样EBW作为一种高精度、高效率、低变形的高端焊接技术, 正逐步成为特种设备制造领域的重要技术支撑。基于此, 下文主要从基本原理以及工艺特点等方面来分析电子束焊接技术, 并对其在特种设备制造领域中的应用以及发展前景进行探讨。以供广大同行参考与交流。

关键词

电子束焊接; 特种设备; 发展前景

1 引言

特种设备在满足用户 (企业) 和民生安居的同时, 也存在巨大的潜在危险。特种设备大部分情况下都处于疲劳、腐蚀、高温、高压等恶劣工作环境之中, 对材料的强度、韧度、耐腐蚀性和密封性要求非常高。其焊接的质量将直接影响特种设备的安全使用性能。

随着工业化进程的加快和安全标准的不断提升, 特种设备的制造技术不断向高精度、高质量迈进。在过去所使用的手工电弧焊、钨极氩弧焊、埋弧焊等焊接方法存在不同程度的焊缝缺陷率高、残余应力大、热影响区过宽以及接头性能下降等问题, 无法满足复杂合金或者高精度结构件的制造有要求^[1]。

而电子束焊接 EBW 借超高能量密度和真空环境下的焊接条件, 不但可以实现高纯度连接、深窄焊缝, 并且不会产生诸如气孔、夹杂等常见的焊接缺陷问题, 有效地解决了特种设备制造中的难题,

EBW 凭借其卓越的焊接性能, 成为满足行业严苛需求的重要手段而广泛运用于航空航天、核电、兵器、石化和医疗等高科技行业当中。尤其在特种设备制造中, 其不仅提升了特种设备产品质量, 还极大地推动了行业的技术革新。

2 电子束焊接的基本原理与工艺特点

2.1 基本原理

EBW 就是利用高压电场使电子定向加速获得近似于光速运动状态, 然后让高速运动的电子流以极小发散角聚焦于工件表面。电子流撞击靶面的过程中将动能转化成了热能, 其局部瞬时功率密度远远大于常规热源, 这样在集束加速过程中, 束流与材料表层的原子层发生非弹性碰撞, 使得晶格内能迅速升高产生局部熔化, 而后在束流穿透的同时, 瞬间

【作者简介】裴丽娜 (1967-), 女, 满族, 中国辽宁本溪人, 本科, 高级工程师, 从事特种设备检验检测质量管理研究。

的能量传递产生典型的“键孔效应”得到深窄的焊缝截面^[2]。因为电子在真空中运动没有受到气态介质的影响，能量更加集中，并且不会像气焊那样使金属被氧化或者受到污染。

2.2 工艺特点

第一，能量密度高。聚焦后的电子束能量密度高达 $107 \sim 108 \text{ W} / \text{cm}^2$ ，是电弧热源的 103 倍以上，可在千万分之一秒内把高温合金或难熔金属加热到高温并使之熔化，所以特别适合于焊接高熔点合金或难熔金属。第二，熔透能力强。单道焊缝的熔深可达 200mm 以上。它是通过束流产生的稳定蒸汽压通路，不断使电子射入熔池内部，将能量注入深度部位的材料中沉积下来，获得高深宽比焊缝形态。第三，热影响区小。由于能量集中度很高，所以电子束只在很小的范围内向材料输入热量，其熔池周围的金属温度呈陡降的温度梯度分布，瞬时热循环很短，组织粗化的程度和发生相变的程度都很小，所以焊接后的焊接残余应力、焊接残余变形都很低，有利于保持具有较高精度要求结构件的几何稳定性^[3]。第四，适用材料广。因为电子束真空焊接是在超真空环境下进行的，因而能够将同类金属或者钢与包括铝、镁合金、钛合金、镍基高温合金、钼、钨等在内的大多数合金都能焊接在一起，而且这些接头没有出现气孔和夹杂物，能更好地对接活泼金属和一些高合金含量的材料。第五，焊接精度高。焊接精度具体表现为可以把束斑直径稳定地控制在 0.1mm 以下，把束流轨迹定位误差控制在 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 以内。该性能保证了微小结构件的焊接质量。另外，束流的高可控性使得它们能够将接头尺寸做到与需要高度一致，并且几乎没有余量，所以非常适合用于精密制造等领域。

在此，本文主要阐述 EBW 在特种设备制造行业中的应用。

3 电子束焊特种设备行业中的应用

3.1 特种设备

特种设备，是指对人身和财产安全有较大危险性的锅炉、压力容器（含气瓶）、压力管道、电梯、起重机械、客运索道、大型游乐设施、场（厂）内专用机动车辆，以及法律、行政法规规定适用本法的其他特种设备。（摘自《中华人民共和国特种设备安全法》）

3.2 在承压类特种设备中的应用（承压焊）

3.2.1 锅炉、压力容器（含气瓶）

锅炉（尤其是电站锅炉）和压力容器作为能源和工业基础设施的核心，其焊接质量直接关系到特种设备安全运行。电子束焊的高深熔透能力，确保了焊缝的密封性和强度，减少了缺陷率。

目前，我国许多特种设备专业技术人员对 EBW 工艺在电站锅炉制造的应用进行了广泛深入的研究。诸如其电站锅炉过热器接头性能强化；其在电站锅炉厚壁构件中的应用实践；其在电站锅炉膜式壁质量控制方法；其在电站锅炉异种钢焊接中的技术应用；其在电站锅炉集箱焊接方面接缺陷预

防及修复技术；其变形控制在电站锅炉制造中的应用等等；

特别是在超厚壁和特殊材料的焊接中，EBW 表现出无可比拟的优势。

再如：压力容器及其元件长期处于高温、高压、腐蚀等复杂工况下使用，其制造尤以厚壁钢制压力容器在常规焊接条件下易产生层状未熔合和裂纹扩展等隐患，而 EBW 凭借高能量密度束流可一次性完成深熔透成形，显著降低多层多道堆焊所导致的缺陷累积风险。并且在真空环境中进行的过程能够避免氧化反应与杂质侵入，从而使焊缝金属的致密性和纯净度得到保证。

再如：在焊接气瓶制造中，利用电子束热源可以对薄壁管材、精密接头进行低热输入焊接，可以减小热影响区范围，抑制组织粗化，提高材料的抗辐照性和耐腐蚀性。调节束流的聚焦及扫描可以保证焊缝与母材几何尺寸一致，有利于焊后残余应力分布均匀、减小由于应力集中导致的早期失效可能，降低爆炸风险。由于这项工艺具有深熔透的特性和优秀的冶金控制能力，所以非常符合特种设备需要的焊缝结构完整、长周期运行、可靠的性能要求。

3.2.2 压力管道

压力管道传输的介质常常高温、高压、有毒、可燃、易爆。其对焊接的密封性和耐腐蚀性要求极高。EBW 能够实现无缺陷的焊缝，这显著提升设备设施的安全性能和使用周期。

3.2.3 承压类特种设备承压焊典型案例分析

a) 在电站锅炉制造中常常需要异种钢焊接，且工艺复杂，焊接效率低。

EBW 利用高能量密度束流可实现厚壁、异种材料、异型工件的单道深熔透焊，避开多道焊产生的夹渣、气孔和未熔合等缺陷。且由于热输入的高度集中，焊接热影响区小，焊接残余应力小，且焊接后无需后处理，所以可保持零件原有的几何精度，保证了焊接接头与母材的力学性能相同或基本一致。不仅如此，焊接时对束流电流、聚焦线圈以及扫描轨迹参数进行调节可实现熔深和焊缝形貌的准确控制，使得焊接截面尺寸一致，焊缝组织过渡均匀。EBW 通过在真空环境下形成高能量密度束流，实现局部区域的瞬时加热与快速凝固，能够在不引入过多热输入的情况下完成深熔透连接，从而保证接头区域与母材在组织、强度和塑韧性上的协调性^[4]。其适合于高硬、高强材料焊接，且还可适用于轻量化结构件加工。

b) 大型压力容器项目采用 EBW 技术的具体实践中，目前大型可移动式电子束焊接设备，熔透能力强。单道焊缝的熔深可达 40mm 以上。且无需焊缝加工。仅此一项，其在提高焊接质量、缩短工艺周期、降低成本方面的显著成效。就非其它焊接可比。

3.3 电子束焊在机电类特种设备中的应用（结构焊）

3.3.1 起重机械与电梯

起重机械和电梯的关键结构件对焊接质量要求极高，

EBW 在高强度钢材和复合材料的连接中表现出色。其微米级焊缝确保了特种设备的安全性和耐久性。

3.3.2 客运索道、大型游乐设施

其关键受力结构采用 EBW, 可极大改善了焊缝的质量和结构的整体承重性能。

3.3.3 场(厂)内机动车辆

EBW 用于车辆关键零部件的高精度焊接, 可大大提升整体性能和安全保障水平。

3.3.4 机电类特种设备结构焊典型案例

通常而言, 汽车制造工业精密仪器与设备零部件具备微型化、密封性和几何结构复杂等特点, 对于焊接的热输入、几何精度都具有较高的要求。场(厂)内机动车辆及其零部件的制造同样如此。

EBW 是在真空环境下利用高能量密度束流实现局部快速熔化的一种方法, 可以保证热影响区极小, 焊接后不会引起材料组织变化及尺寸误差。并且束流直径可以做到亚毫米级别, 通过调整聚焦参数和扫描路径来满足微小接头定位精度高的工艺要求, 以达到微型传感器外壳、微电子元件封装的要求。可在 EBW 情况下不改变材料表面化学组成以及力学性能的基础上实现微细焊接, 确保焊接接头具有良好的密封性和力学连续性。加上在真空状态下焊接, 能有效避免氧化及杂质进入的问题, 使接头的致密性及耐蚀性能保持在一个较高水平。该工艺适用于微型化、复杂构件的精密装配, 并兼顾焊接质量与几何尺寸控制, 形成可重复、高可靠的高端制造工艺体系。

4 未来发展前景与趋势

4.1 大型真空与移动式设备发展

当前 EBW 技术逐渐朝着超大型和高适应性的方向发展。对于厚壁结构件、复杂构型的设备来说, 大型真空 EBW 设备逐渐朝着腔体体积更大、束流能量分布更均匀、功率更高的方法优化, 确保能够与深熔透焊接及多材料组合构件的加工需求相符。不仅如此, 移动式的 EBW 系统也逐步实现模块化、可搬移的功能, 便于现场、受限空间内进行焊接操作, 减轻了工件搬运、装配的压力。除此之外, 移动式设备结构相对紧凑, 可在焊接过程中保证束流稳定性以及高能量密度, 可以对大型或者固定设备进行深熔透焊缝的加工, 推动 EBW 技术在特种装备制造领域走向效率高、适应范围广的高端发展路线。

4.2 自动化与智能化控制

EBW 技术向着更加快速化、自动化、智能化的方向前进, 焊接过程的参数监测以及控制精度获得了大幅提高。利用多传感器集成系统可以监测到束流强度、焦点位置、扫描轨迹、焊接熔池等状态, 并且通过闭环反馈控制可以使焊接

的能量输入和束流移动速度获得动态的调节。同时采用智能控制算法和高精度定位装置, 使焊缝路径、形貌与工件的复杂几何表面相匹配, 且热输入均匀性良好、熔深稳定。不仅如此, 通过自适应控制方法可使焊接过程根据不同类型的材料、板厚变化以及形式的接头可自动调整焊接参数, 以保证在各类工作条件下的焊缝质量。数据采集与分析平台通过对焊缝熔合状态以及微观组织形成的实时记录及分析, 结合实时监测建立焊缝缺陷预测模型, 并在焊接过程中进行线上修正, 有效推动 EBW 在特种设备制造中向智能化、柔性化和高效率方向发展。

4.3 复合工艺融合

现阶段 EBW 已经开始了向电子束焊与激光焊、电弧焊和增材制造等其他焊接方法的工艺集成的发展, 为复杂结构和多材料体系的成型需要提供了更多的可能性。多热源协同可以通过同一焊接工序完成深熔、大成型与表层精细成型, 通过调控热循环可以调节分布集中性以及减少残余应力集中与组织偏析。并且通过束流和辅助能量的联合可以对异种材料接头的冶金结合与微观演变进行精确控制以保障焊缝力学性能以及焊缝组织的均一。不仅如此多工艺耦合平台能更好地将 EBW 技术应用于高端装备制造业的大规格工件焊接生产之中, 以深熔透、高表面质量和奇、难工件加工为主要目标, 并能够在特种设备的结构一体化、工艺柔性化中发挥作用。

5 结语

综上所述, 电子束焊接 EBW 具有高能量密度、深熔透、焊接纯净度高的优点, 其在特种设备制造上的使用, 对于设备的安全性能和使用寿命和有着飞越式的提升作用, 促进特种设备的轻量化和高可靠性的制造。但是设备成本高、工艺复杂、大型工件焊接受限和质量检验检测难度大等问题, 都限制了 EBW 的大规模使用。在今后, 随着大型真空与移动设备、智能化控制和复合工艺的日益发展, 电子束焊接将在特种设备制造中发挥更为关键的作用, 成为推动特种设备高端制造业升级的重要支撑技术。

参考文献

- [1] 尹续臣, 陈志勇, 王清江, 等. 退火处理对粉末冶金 Ti₂AlNb 合金电子束焊接接头显微组织和拉伸性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(8):2293-2300.
- [2] 李晓强, 宋晓娇, 高健, 等. 钛合金电子束焊接接头组织和性能分析[J]. 电焊机, 2025, 55(5).
- [3] 张鹏, 张国栋, 袁鸿, 等. 大厚度 Ti-6Al-4V ELI 钛合金电子束焊接接头的组织及力学性能[J]. 热加工工艺, 2023, 52(11):15-18.
- [4] 刘佳熙, 智文虎, 井云鹏, 等. 传感器常用材料电子束焊接研究现状综述[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(8):6-10.