



激光加工技术的应用 现状与未来发展

杨立军

自1960年激光器出现后,激光技术在测量、通信、信息处理、医疗及制造业等领域得到广泛应用,成为20世纪具有标志性意义的技术进步之一。激光加工技术是利用较大功率的激光束作为热源完成焊接、切割、表面处理、打孔及微加工等工作,在激光加工过程中一般会发生与常规热加工方法相同或相似材料的熔化、汽化与相变等现象,然而激光加工又有其自身的特点。目前,激光加工技术如激光焊、激光熔覆、激光增材制造及激光切割等主要加工方法广泛应用于航空航天、汽车、轨道交通、船舶与海洋工程、电子及机械等制造业领域,呈现出良好的发展势头和潜力。

1. 激光加工的特点

激光加工最突出的特点是利用大功率激光束作用于材料,激光作用面积在一定范围内可调,且可以调得很小,从而达到极高的能量密度,与一般热加工方法相比,完成工作所需能量较少,所造成的附带热影响较小;并且激光作用点的所施加功率、定位和作用范围可以精确控制,对于需要精确定位、精确控制能量的

熔覆和增材制造等加工方法非常适合。这些特点决定了激光加工易于实现高速、高精度加工,而且可以提高生产效率和质量。

激光加工还是一种非接触加工方式,不产生机械磨损,运行灵活,易于集成到机器人等自动化设备上,实现高度的自动化生产乃至智能化生产。激光加工在具体的工艺实施过程中也具备突出的灵活性,可适应不同几何形状工件的加工要求,且可进行批量加工。

2. 激光加工技术的基础理论研究

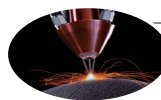
制造业是激光加工应用最基本也是最深入的领域,相关的基础研究也非常活跃,尤其在金属材料的激光焊、激光熔覆及增材制造等基础研究领域表现突出。基础研究的实质就是探索激光作用于材料的效果及其作用的原理,这是开发激光加工应用技术的必要前提,主要的研究包括激光作用材料的冶金特性、激光等离子体的热力学特征、激光深熔焊小孔的行为特征与激光复合热源物理特性等。

虽然激光加工具备速度快,热影响区域小等优点,但同样由

于加热和冷却速度快,所以材料冶金过程的不平衡特点更为突出。例如,多种材料经过激光加工后产生淬硬组织,甚至由于冶金反应不充分而产生气孔、夹杂及组织成分不均匀等缺陷。同时,由于此类加工过程固有的热循环特点,在热影响区仍可能出现组织淬硬、回火软化等热处理现象,例如车用双相高强钢激光焊热影响区较为严重的软化问题,对结构的疲劳强度影响很大。

激光增材制造技术是近年来广受关注的增材制造技术(也称3D打印技术)的重要组成部分,其主要的基础理论研究在于对激光/金属相互作用行为及能量吸收利用机制,熔池快速凝固过程的非稳态冶金行为规律、冶金缺陷与晶粒及显微组织等的控制,制造过程所产生的应力控制等基础问题的认识。

在功率密度较大的金属材料激光加工过程中,如激光焊,会产生强烈的金属蒸发,产生等离子体(被称为激光等离子体),对激光作用于材料有很大影响。一方面激光等离子体因激光作用于材料而产生,另一方面激光等



离子体对激光的吸收、散射等作用减少了到达材料的激光能量。激光深熔焊过程的激光等离子体与小孔行为密切相关,包含了大量这种行为的特征信息,通过对其声、光、电等信息以及其温度、组分密度等热力学特征参数的分析,有助于深化对深熔焊过程的认识;很多学者都指出了小孔和等离子体的振荡特性,这对于监控激光焊过程意义重大。

近年来,激光-电弧复合焊工艺的应用日益增多,对这种复合热源物理特性的研究自然也受到重视。一般认为,当电弧电流较小时,激光对电弧有吸引和压缩作用,电弧对激光等离子体电子密度有稀释作用,激光-电弧的增强效应明显,可获得相对较大熔深;当电流较大时,激光+电弧增强效应不明显,熔深较小;然而,激光对电弧稳定性仍有影响,这在激光-MIG焊电弧中较为显著,由于激光作用产生新的导电通道,所以有助于MIG焊电弧及熔滴过渡的稳定。铝、铜等高反射率材料对激光的反射率可高达90%以上,在激光-电弧复合焊接铝、铜等材料时,电弧加热使材料升温熔化,可大大降低反射率,提高对激光能量的吸收率,改善焊接效果。

3. 激光加工技术的应用及发展

激光加工技术要利用激光热源的多方面特点。如金属材料的激光表面热处理,利用激光束高能密度的特点,可使材料表面快速升高到相变温度或熔点以上;又因施加的激光能量不需太多,转化的热量少,利用材料自身的

体积冷却就可以快速冷却,实现表面的固溶强化、弥散强化或组织均匀化的目的。又如在电子工业中,利用激光能量集中,激光作用点小的特点,可以对微细电子器件进行加热、熔化和连接等加工,热作用及影响范围小,可以完成普通加热方式难以完成的工作。激光加工技术类型众多,应用领域广泛,应用潜力巨大。

(1) 激光焊及激光复合热源焊接 激光焊是利用高能密度激光束加热熔化工件完成焊接的加工方法,具有焊接速度快,焊接热影响区小,工件变形小,且易于获得大深宽比焊缝等优点。

激光焊技术在汽车行业的应用可以减轻车身重量,增加强度,节约成本,促进汽车轻量化技术的发展。现在的大型汽车公司如奔驰、宝马、大众及丰田在高端车型中已经大量使用激光焊接,并积极尝试在中低端车型中应用激光焊接技术。在工业发达国家的汽车中,有接近60%的零件采用激光焊接,如散热器、传动轴、变速齿轮及离合器等。汽车轻量化技术的一个重要方面就是双相高强钢的应用,目前600~800MPa级别的双相高强钢已广泛用于汽车制造业,而在ULSAB—AVC PNGV级车身中800~1 000MPa级别双相钢的使用可占到74%,激光焊非常适合实现不同厚度、不同强度级别高强钢的焊接,是汽车轻量化发展的关键技术之一。大众汽车激光焊如图1所示,遥控激光焊在车体制造中的应用如图2所示。

在航空航天、轨道交通等领域,激光焊技术也得到应用,如

空客A380铝合金壳体、地铁不锈钢车体、飞机铝合金箱体及火箭燃料箱等。除了常规的激光焊工艺外,近年来出现的双束激光焊和激光-电弧复合焊等工艺大大促进了激光焊技术的发展。空客公司成功地将双光束激光焊接技术应用于铝合金机身壁板结构,针对机身壁板的蒙皮-长桁结构,利用两台完全相同的CO₂激光器进行双侧同步焊接,替代铆接结构,能减少5%~10%的结构质量。航空航天和高速铁路列车都是有结构轻质化要求的领域,存在大量铝、镁合金结构的焊接,近年推出的激光-电弧复合焊工艺有其独特的优势。电弧的加入有助于提高材料对激光能量的吸收率,延缓焊缝凝固时间,有利于减少气孔、裂纹及咬边等缺陷,降低了激光对工件的间隙、错边及对中的要求。激光-MIG电弧复合焊由于填入焊

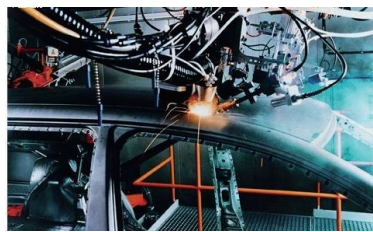


图1 大众汽车激光焊



图2 遥控激光焊在车体制造中的应用

丝与母材的冶金作用有利于减少焊接裂纹倾向,提高焊缝力学性能。英国TWI曾用激光-MIG电弧复合焊技术焊接高速列车铝合金蜂窝板结构,针对8mm厚的铝合金接头一次焊透,焊接速度高达6m/min。

激光焊技术在船舶和海洋工程中的应用多集中在三明治板T形接头和特种金属的焊接,然而,激光-电弧复合焊接技术的出现为船舶和海洋工程大厚度的板材和管道焊接提供了新的途径。激光-电弧复合焊原理如图3所示。

(2) 激光熔覆与激光增材制造 激光熔覆在航空领域有重要应用,经过数十年的发展,已从最初飞机发动机叶片损伤修复逐步发展应用于飞机支架、起落架活塞杆等多种金属材料零件常见腐蚀、裂纹等表面缺陷及损伤的修复,可有效恢复零件使用性能。激光熔覆还可对转子、模具等重要部件的损伤进行修复再使用。

激光熔覆也是一种增材制造方法,有些学者指出激光增材制造技术就来源于激光焊和激光熔

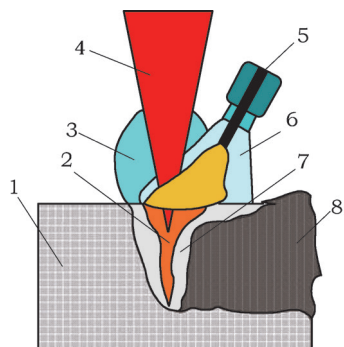


图3 激光-电弧复合焊原理

1.母材 2.匙孔 3.激光等离子体 4.激光束
5.电极 6.保护气 7.熔化金属 8.焊缝

覆技术。增材制造技术原理在20世纪80年代提出,该技术是以设计数据为基础,将材料(包括液体、粉材、线材或块材等)自动化地累加起来成为实体结构的制造方法。适合精密加工的激光束非常符合增材制造技术的要求,出现了激光选区熔化、激光直接沉积等金属增材制造方法,利用大功率激光熔化特定区域的金属或逐层熔化金属粉末或丝材凝固堆积完成零部件制造。

激光增材制造不需模具,材料利用率高,机加工量小,工艺简单,单件制造生产周期短,具有高度的柔性快速反应能力,特别适合成本高、系统复杂、不可能制造多台原型的行业。目前,国外如德国Trumpf公司和美国POM公司、美国Huffman公司及美国Optomec公司等已开发出商业化的激光直接沉积增材制造技术及设备,已可制造出力学性能与锻件水平相当的结构件,应用于先进的飞机与导弹;国外著名的飞机和飞机发动机制造企业如Rolls-Royce、GE、普惠、波音及空客等也已开始利用激光选区熔化增材制造技术开发商业化的金属零部件。我国在此技术领域的起步与国外相差不多,研制出钛合金起落架部件、C919用部件以及点阵夹芯、异形复杂型腔等复杂结构等,但整体的应用基础研究仍需加强。

未来激光增材制造技术将向组织与结构一体化制造发展,实现从微观组织到宏观结构的可控制造。

(3) 激光切割 激光切割是激光加工行业最重要的应用技

术之一,它占整个激光加工业的70%以上。激光切割与其他切割方法相比,最大区别是它具有高速度、高精度以及高适应性的特点,同时还具有割缝窄、热影响区小、切割面质量好、切割时无噪声及切割过程容易实现自动化控制等优点。因此,目前激光切割已广泛地应用于工程机械、汽车、机车车辆制造、航空、化工、轻工、电器与电子、石油和冶金等工业制造中。激光切割薄板与机器人柔性激光切割分别如图4、图5所示。



图4 激光切割薄板

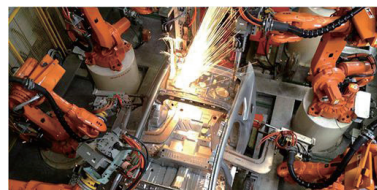


图5 机器人柔性激光切割

4. 结语

激光加工技术已在多个制造业领域得到应用,通过应用基础理论的研究,继续开发新的技术和新的应用领域。激光加工技术将适应高速高精度制造的需求,与智能化装备结合进行智能化制造;面向难加工材料和复杂结构,关注激光作用于材料的行为与影响,实现高质高效的加工。

作者简介:杨立军,天津大学材料科学与工程学院。