

高能束流加工技术的应用与发展

Application and Development of High Energy Beam Manufacturing Technology

北京航空制造工程研究所 巩水利 李怀学 锁红波 李晋炜 张雁 陈哲源
沈阳飞机工业集团公司 李新



巩水利

自然科学研究员、博士，北京航空制造工程研究所高能束流加工技术研究室主任、高能束流加工技术国防科技重点实验室常务副主任，中国焊接学会高能束流及特种焊接分会副主任。主要从事激光焊接及焊接接头力学行为研究工作。先后承担国防科工委及总装科研课题15项。获部委级科技进步奖13项，技术专利17项。

高能束流加工技术以高能量密度束流(电子束、激光、离子束等)为热源与材料作用，从而实现材料去除、连接、生长和改性。高能束流加工该技术具有独特的技术优势，被誉为本世纪先进制造技术之一，受

高能束流加工技术具有独特的技术优势，被誉为本世纪先进制造技术之一，受到越来越多的重视，应用领域不断扩大。经过多年的发展，高能束流加工技术已经应用到焊接、表面工程和快速制造等方面，在航空、航天、船舶、兵器、交通、医疗等诸多领域发挥了重要作用。

到越来越多的重视，应用领域不断扩大。经过多年的发展，高能束流加工技术已经应用到焊接、表面工程和快速制造等方面，在航空、航天、船舶、兵器、交通、医疗等诸多领域发挥了重要作用。

高能束流束源品质的发展

高能束流加工技术的应用与发展和高能束流束源品质有着密切的关系。随着科学技术的不断发展，无论是电子束还是激光束，束流品质越来越好，能量密度、功率等参数越来越高，加工能力和加工质量都有所提高。

电子束束流品质主要有2方面的内涵：一是束流和高压的稳定性；二是束流的形态和能量分布。前者主要取决于高压电源及相应控制系统；后者主要取决于电子枪及其电

磁聚焦系统。

高压电源是电子束加工设备的重要组成部分，自20世纪50年代以来，高压电源的设计及制造技术经历了3个阶段，即工频变压器、中频发电机组、高频开关式电源。在每个发展阶段，高压电源性能都得到了很大提高，特别是开关式高压电源，高压调节范围更广，有效功率更高，高压纹波、设备体积更小。目前，高压开关电源的各个部分均实现了高频工作方式，通常在束流满量程的情况下，束流稳定度达到 $\pm 0.25\%$ ，高压的稳定度达到 $\pm 0.25\%$ 。

束流形态和能量分布主要取决于电子枪及其所属的电磁聚焦系统，目前没有专属的量化指标，通常可对束流的不同截面进行能量分布的测定，来分析束流形态和能量分布是否良好。目前，电子束流发生装置(电

子枪)技术发展迅速,已经由低压小功率型发展到高压大功率型(如表1所示),大大提升了加工能力和加工质量,同时拓展了电子束加工技术手段。

我国高压电子束焊接设备的研制开发起步较晚,这主要因为高压电子束加工设备中的电子枪和高压电源设计制造技术难度大,测试试验不易开展。目前,国内开展电子束焊接设备的研究较多,但主要局限于中压、小功率电子束焊机的研究,高压、大功率设备的研究相对较少。目前已经解决了大功率高压电源和高压电子枪的问题,国防科技重点实验室对高能束流加工技术进行了系统深入的研究,并取得了一定成果,高压电源的高压、束流稳定度均达到了±0.25%,同时也开发了新型电子束能量密度测量装置,以进行相关电子枪的研究改进。

新型激光器的不断出现和技术上的不断改进完善,有力地推动了激光技术在各个领域的应用,特别是20世纪80年代中后期以后,Nd:YAG激光器和CO₂激光器的性能进一步提高,输出功率增大到千瓦和万瓦级,使得材料的激光加工技术应用范围进一步扩大,特别是激光焊

接技术已由热传导焊向深熔焊转变,焊接机制和原理发生了根本性变化。

在国外,输出功率在10kW左右的CO₂激光加工系统已经成为稳定应用于各工业部门的常规焊接设备。在大功率激光焊接应用方面,法国焊接研究所于1993年安装并完成了45kW CO₂激光器的调试工作,正在开展大厚度(40~50mm)单道焊接技术基础研究工作。1994年和1996年,日本的Kinki先进材料加工研究所和日本钢铁公司也先后完成了45kW CO₂激光器的安装工作。与此同时,YAG激光焊接系统的输出功率也有较大提高,输出功率4kW的商品化设备已推向市场。

在国内,激光材料加工技术经历了30多年的发展历史。经过国家多个五年计划的攻关,激光加工设备从无到有,输出功率一步步提高,还有多家单位都具有生产2~10kW CO₂激光器系列产品的能力,也可制造千瓦级以下的YAG固体激光器。但是与国外相比,光束品质较差,元器件可靠性、稳定性方面需进一步提高。

目前,Nd:YAG激光器和CO₂激光器的性能进一步提高。对于Nd:YAG激光器,为了克服其在高

功率运转时严重的热透镜效应、提高激光器的输出功率和光束质量,发展了板条、管状等新型激光器结构形式;另外,光纤传输极大地提高了焊接操作的灵活性。与此同时,CO₂激光器由最初的横流结构改为快速轴流结构,输出功率极大提高,射频激励和微波激励模式的建立减小了CO₂激光器的体积,提高了效率和可调制性。

20世纪90年代,二极管泵浦固体激光器的出现,使激光器的体积大大缩小,光束质量高、寿命长,泵浦效率远远超过灯激励方式,是一种很有前途的新型激光加工能源,必将在很大程度上替代现有的激光加工设备。

近年来,一些新型激光器相继进入激光加工领域(如准分子激光器、发射5μm附近激光波长的CO激光器),这将拓展激光焊接设备的新领域,促进激光加工技术向前发展。特别是光纤激光器的出现,无论是束流品质还是输出功率都应该说是激光加工技术的一场革命性变化。

高能束流焊接技术

与传统焊接技术相比,高能束流焊接技术具有诸多优势:

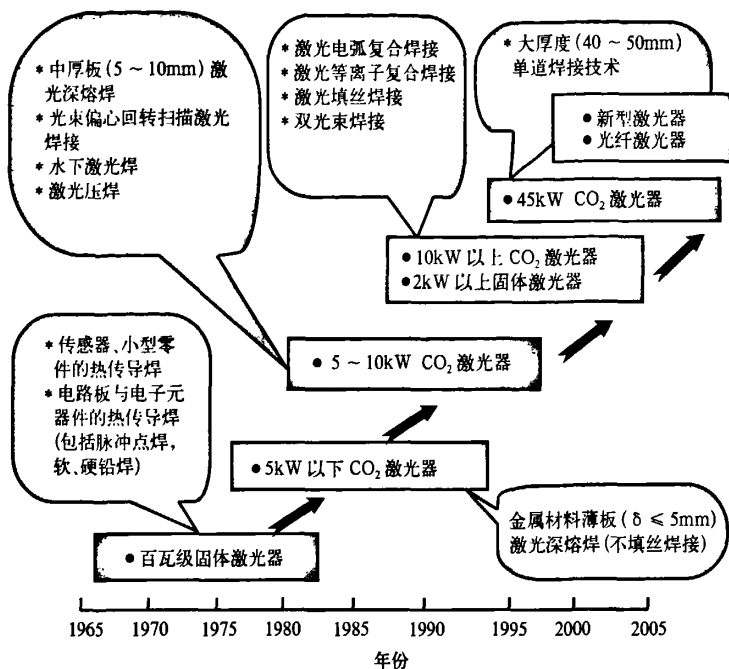
(1)功率密度高。高能束流斑点尺寸小,功率密度大。焊接束流的功率密度通常达10⁵~10⁸W/cm²,而一般常规电弧焊的功率密度为10²~10⁴W/cm²。

(2)焊缝深宽比高。高能束流可实现高深宽比(即焊缝深而窄)的焊接,其中电子束深宽比达60:1,可一次焊透0.1~300mm厚度的不锈钢板,激光焊的深宽比也达到20:1。

(3)焊接速度快。高能束流的高能量密度使得焊接加热集中,焊接熔化和凝固过程快、效率高,如利用电子束焊接厚125mm的铝板,焊接

表1 电子束流束源类型及特点

分类	加速电压范围/kV	功率/kW	特点
高压型	80 ~ 300	15 ~ 60	加速电压高,束斑直径小,束流功率密度大,焊缝深宽比大,焊接变形小;适用于薄件、大厚件焊接,尤其是热敏感性强的材料焊接;产生的X射线强,对真空室屏蔽要求高;电子枪多为固定式,目前可沿X、Y轴移动800~1000mm
中压型	40 ~ 60	≤ 60	束斑直径较小(0.4mm),30kW时可焊钢板最大厚度为60mm左右,相当于15kW的高压型焊机的能力;焊接时产生的X射线可由适当厚度的钢制真空室壁屏蔽,无需包铅板,电子枪为固定式或移动式
低压型	≤ 30	≤ 10	焊机无需特殊防护,设备简单,电子枪体积小,可为移动式;在相同功率下,电流大,束流会聚较困难,束斑直径难于达到1mm以下,焊缝深宽比小,只适用于焊缝要求不高的薄板材料



激光器与激光焊接技术的发展历程

速度达4m/min,是氩弧焊的40倍,1mm厚薄板激光焊接速度可达到20m/min。

(4) 焊件热变形小,焊缝性能好。高能束流功率密度高,使得焊接热输入量少,焊件变形小,焊后加工量小,有利于降低制造成本,且能避免焊接接头组织晶粒长大,使接头性能改善;高温作用时间短,合金元素烧损少,能有效改善焊缝抗蚀性能。

(5) 焊缝纯度高。真空对焊缝有良好的保护作用,高真空电子束焊尤其适合焊接钛及钛合金等活性材料。

(6) 工艺适应性强。焊接参数易于精确调节,焊接头便于偏转,焊接位置的可达性好,对焊接结构的焊接适应性优于常规电弧焊,不仅可应用于对接接头、搭接接头,而且特别适合于T形接头焊接。

(7) 可焊材料多。适合于难焊材料焊接,不仅能焊金属和异种金属材料接头,也可焊非金属材料(如陶瓷、石英玻璃等)。

国外高能束流焊接技术研究水

平与应用程度都比我国好。在电子束焊接方面,国外围绕超高能密度装置研制,设备智能化、柔性化、电子束流特性诊断,束流与物质作用机制,以及非真空电子束焊设备及工艺等方面开展了卓有成效的研究。在日本,加速电压600kV、功率300kW的超高压电子束焊机已问世,一次可焊200mm的不锈钢,深宽比达70:1。同时,日、俄、德开展了双枪及填丝电子束焊接技术研究。在对大厚度板第1次焊接的基础上,通过第2次填丝来弥补顶部下凹或咬边缺陷;日本采用双枪实现了薄板超高速焊接,反面无飞溅,成形良好。关于非真空电子束焊接,德国斯图加特大学实现了母材为AlMg0.4 Si1.2的旋转件的填丝焊接,加丝材料为AlMg4.5Mn,送丝速度35m/min,焊接速度高达60m/min。非真空电子束焊接在汽车制造领域一直倍受重视并得到应用。如手动变速器中同步环与齿轮采用非真空电子束焊接,生产率已超过500件/h。最近,德国和波兰的学者共同研制了真空电子束焊接时,

安装在真空室中的非接触测温装置测量点最小直径1.8mm,主要用于陶瓷和硬质合金的钎焊,该装置可排除随机的热流干扰,测量精度高。

在国外电子束焊接是制造军机大厚度钛合金承力框、梁等的发展趋势,俄罗斯和美国第3、4代战斗机的结构梁、框等重要承力件均采用电子束焊接技术。F-14战斗机钛合金中央翼盒是典型的电子束焊接结构。该翼盒长7m,宽0.9m,整个结构由53个钛合金件组成,共70条焊缝,焊接厚度为12~57.2mm,全部焊缝长达55m,电子束焊接使整个结构重量减轻270kg;俄罗斯的苏-27飞机钛合金框、图波列夫设计局和乌克兰巴顿所的钛合金整体焊接壁板等结构均采用电子束焊接技术。尤其是目前最先进的第4代战斗机——美国的F-22机身,很大一部分为焊接件,后机身钛合金前后梁结构是由腹板加强的Ti-6-4壁板与框架经电子束焊接而成的,包括3556cm长的周向及纵向焊缝,厚度在6.4~25mm之间,这是航空航天工业最复杂的焊接结构之一。

与常规焊接方法相比,激光能量密度高、加热集中,以具有小孔效应的大功率激光深熔模式进行焊接时,焊缝深宽比大,焊接速度快,焊接结构变形小,焊缝质量高,而且激光焊接在大气环境下完成,焊接可达性好。另外,激光焊接过程还具有易于集成化、自动化、柔性化的特点。因此,激光焊接特别适合于大型结构件的焊接,已成为21世纪解决大型复杂结构制造的先进焊接技术之一。目前,激光焊接技术已成为衡量一个国家制造业现代化水平的重要标志。

目前,基于深熔焊的激光焊接已成为汽车行业焊接标准化工艺之一,在造船工业和航空、航天工业中的应用也已经起步,例如空客公司A380大型宽体客机制造技术中的亮点就是激光焊接技术在飞机壁板制造中

的应用,且已成为 A380 先进性的主要标志之一。另外,欧洲造船工业中船体板架构件(16m×20m)制造中激光焊接的实际应用,美国海军焊接中心(NJC)针对战舰和装甲车等开展的激光焊接应用技术研究,都充分展示了激光焊接在大型结构制造中的优势和前景。

我国从 20 世纪 80 年代就开始了激光焊接技术研究,通过多年努力,已取得了长足进步:如成功实现汽车板坯激光拼焊、管道焊接;近年来,针对激光焊接铝合金和钛合金开展了基础研究,已将激光焊接技术应用于飞机结构和飞机发动机结构制造中;另外,还有针对性地开展了激光填丝焊和激光电弧复合焊等激光焊接新技术的研究。

当前高能束流焊接被关注的主要领域为:高能束流设备的大型化——功率大型化及可加工零件(乃至零件集成)的大型化;设备的智能化和加工的柔性化;束流品质的提高及诊断;束流、工件、工艺介质相互作用机制的研究;束流的复合及其效应研究;新材料的焊接及异种材料的焊接;焊接过程稳定性与可靠性调控。

高能束流表面工程技术

高能束流表面工程技术是高能束流加工技术中一个重要的组成部分,已广泛使用于武器装备及国民经济的多个领域。按照涂层的厚度来划分,可分为无涂层的表面改性技术(激光冲击强化、电子束毛化、精密局部热处理)、10 μm 以下的涂层(薄膜)制备技术(离子注入及沉积)、用于 100 μm 以上的涂层制备技术(电子束物理气相沉积及等离子喷涂)。

1 激光冲击强化技术

在激光冲击强化技术应用方面,美国 GE 公司已开始利用激光对涡轮风扇叶片和 F110-GE-100/129 的风扇第 I 级工作叶片进行冲击强

化,以提高叶片表面压应力、防止叶片裂纹;LLNL 与 MIC 公司合作进行 F110 发动机(F15E, F16C/D)及 F119 发动机(F-22)叶片的强化工作;LSP 公司采用可移动的激光冲击强化装置对飞机结构进行强化。

我国现役的 WP13 发动机压气机 I 级、II 级叶片在外场使用中发生多起叶尖裂纹、掉块故障。近年来,国家某重点型号、空军“杀手锏”工程发动机在外场也发生了多起压气机二级叶片叶尖裂纹、掉块故障,造成故障的主要原因是高阶复合振动导致叶片高周疲劳失效。目前一级压气机叶片采用常规的喷丸技术,但覆盖率、零件变形都难以控制,强化工艺存在困难。与机械喷丸相比,叶片经激光冲击强化后叶片表面产生的残余压应力层深、表面质量好、疲劳性能提高幅度大。激光束的可达性好,可以对叶片进行局部强化,叶片的双面强化工艺可以很好地控制叶片变形。另外,航空飞机上部分疲劳关键部位的孔结构难以采用机械喷丸强化,但可以用激光束对孔结构进行强化,并且在飞机焊接结构上也存在焊后强化的需求。

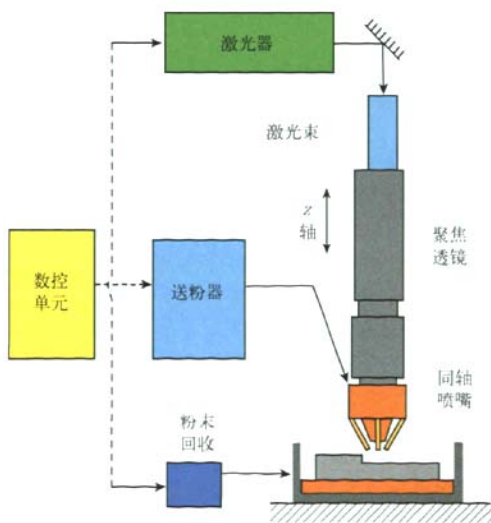
2 离子注入及沉积技术

对于离子注入及沉积技术,国外已在航空零件、生物材料、模具和刀具等方面有了广泛的应用,该技术日益成为金属材料表面处理不可缺少的重要手段。在此项工艺的发展进程中,美国和英国进展最快,效果最明显。1983 年美国国防部制定了一项离子束联合发展计划,联合美国各军事研究所、科研部门和高等院校开展改善武器装备的研究,

即采用离子束技术改善热汽轮机、航天器、飞机、舰艇和其他武器装备关键部件的性能,以延长这些装备的使用寿命。目前在航空航天及其他军事领域的应用有:航天飞机主机的涡轮使用泵轴承、导航仪器轴承、喷气发动机主轴轴承、直升机传动装置的齿轮、航天设施的小型精密齿轮、燃料喷嘴和火箭往复活塞等,成效显著。

3 电子束物理气相沉积技术

电子束物理气相沉积技术在航空领域也具有独特的优势。如国外在飞机发动机上广泛应用电子束物理气相技术制造涡轮叶片热障涂层,提高了涡轮使用温度 50 ~ 200℃。德国 ALD 公司对 EB-PVD 技术的研究已经达到了一个相当高的水平,其产品不仅在航空领域得到了广泛应用,而且在光学涂层、半导体制造等其他工业领域也有所应用。目前,ALD 公司已经拥有大规模生产叶片涂层的 EB-PVD 设备,一台工业化生产的设备日产量估计可达上百片叶片甚至更多。其前景规划中,一方面针对 TBC 涂层材料,找到比 $w(Y_2O_3) = 6\% \sim 8\%$ 稳



金属粉末激光熔融沉积技术的原理示意图

定的 ZrO_2 陶瓷隔热效果更好,性能更优越的新型改性陶瓷或几种陶瓷联合的复合陶瓷,从而进一步提高热端部件的工作温度;另一方面致力于多种工艺的联合交叉,从而降低工艺复杂性和制作成本,提高涂层质量;此外还将对涂层的结构展开新的研究,有可能采用多层材料的涂层等。美国宾夕法尼亚州立大学也在进行微层及微结构涂层的研 究,以及制备具有更好粘结强度的结合层。

美国 GE 公司现采用 SULZER METCO 公司制造的用于大批量生产的全自动真空等离子喷涂设备制备航空发动机涡轮导向叶片及工作叶片的抗氧化涂层及热障涂层的 MCrAlY 粘结底层,质量十分优良。美国 PW 公司在航空发动机的涡轮导向叶片上使用等离子喷涂热障涂层也非常成功。F119、PW2000、PW4000、JT9D-7R4、V2500 发动机涡轮导向叶片均采用了 ZrO_2 热障涂层系统,达到的主要技术指标有:0.25mm 厚的热障涂层,可使结构基体温度降低 $150^\circ C$ 以上,寿命超过 5000h,真空等离子喷涂的 MCrAlY 抗氧化涂层达到完全抗氧化级,梯度热障涂层及纳米热障涂层寿命提高 30% 以上,纳米耐磨涂层耐磨性能提高 50% 以上。

高能束流快速制造技术

高能束流快速制造技术是基于离散/堆积原理的增材成形技术,由零件三维 CAD 模型数据驱动,可以直接制造出零件实体,能够大大减少制造工序、缩短生产周期、节省材料及经费,目前已发展到金属原型直接制造阶段。其热源主要有激光、电子束等,加工形式有熔融沉积(丝材、粉末)及选区熔化(粉末)等。

1 金属粉末激光熔融沉积技术

该技术是基于快速原型技术和同步送粉激光多层熔覆技术相结合

而发展起来的新技术,其发展历史可追溯到 20 世纪 70 年代末期关于激光多层熔覆的研究上,但由于当时计算机建模及分层切片等图形处理技术较困难,研究工作局限于径向对称的简单形状零件,并将注意力集中到材料和熔覆工艺的研究上。

从 20 世纪 90 年代开始,随着快速原型技术的逐渐成熟,金属粉末激光熔融沉积技术在西方发达国家逐渐成为材料加工领域的研究热点,并迅速进入高速发展阶段。国内外众多研究机构对同轴送粉激光快速成形技术的原理、成形工艺、熔凝组织、零件几何形状和力学性能等基础性问题开展了大量研究工作。美国 Sandia 国家实验室、Los Alamos 国家实验室和密西根大学 J. Mazumder 教授研究组分别提出了技术原理相类似的激光近成形制造技术(Laser Engineered Net Shaping, LENS)、激光直接制造技术(Directed Laser Fabrication, DLF)和金属直接沉积(Direct Metal Deposition, DMD)技术。目前,国外先进制造系统典型代表有德国 Trumpf 和美国 POM 公司 DMD505、美国 Huffman 公司 HP-205、美国 Optomec 公司 Lens850、Aeromet 公司 Lasform 等。国外已经利用这些商业化的技术及设备取得了实质性的成果,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高附加值的钛合金叶片、整体叶盘等构件,且其力学性能达到锻件的水平。其相关成果已在武装直升机, AIM 导弹,波音 7X7 客机, F/A-18E/F、F-22 战机等方面均有实际应用。譬如, AeroMet 公司利用 Lasform 技术制备 F-22 战机的 TC4 钛合金接头满



电子束自由成型快速制造钛合金零件

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% 仍未破坏等,为军用飞机与发动机制造钛合金结构件的试生产件。

国内最早从 1998 年开始了相关技术的研究工作。国家对该研究非常重视,并给予了大力支持,先后安排了 973 计划、863 计划和总装“十五”、“十一五”预研等项目。北京航空航天大学、西北工业大学、高能束流加工技术国防科技重点实验室、清华大学等国内研究机构也开展了激光快速成形与修复技术及其设备的开发研制,并取得了一定成果。譬如,北京航空航天大学王华明教授研究组已开发同轴送粉激光快速成形技术及装备,并制备了一些钛合金结构件。然而,该技术难以制备复杂结构薄壁部件。

2 金属丝材高能束熔融沉积技术

金属丝材高能束熔融沉积技术是在激光和电子束送丝焊接基础上发展起来的快速制造技术。由于在真空环境工作,其冶金质量高,特别是钛合金等活性技术的快速制造,其发展速度非常快。

1995 年,美国麻省理工学院 John Edward Matz 在世界上首次用电子束自由成形直接制造技术(EBF³)技术试制了 In718 合金涡轮盘。2002 年,美国航空宇航局 Langley 研究中心、西雅基

(Sciaky Inc.) 公司、洛克希德·马丁 (Lockheed Martin) 公司先后公开相关研究。目前,可以制造出形状比较复杂的零件,最大沉积速率超过 $3500\text{cm}^3/\text{h}$,性能达到锻件水平。西雅基 (Sciaky Inc.) 公司利用该项技术直接制造第 4 代战斗机 F-22

$200\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$; 研究了 TC4 合金的力学性能,其强度、塑性及疲劳性能均可达到锻件水平。

3 高能束选区熔化技术

高能束选区熔化技术是利用激光和电子束为热源,基于粉末床逐层铺粉/熔化而成型全致密金属零件的快速制造技术。通过粉末的支撑和散热作用,该技术可制备任意复杂结构的零部件,特别是传统制造技术无法实现的蜂窝或点阵结构、复杂型腔结构等。根据能源形式不同,该技术可分为激光选区熔化技术和电子束选区熔化技术。

激光选区熔化技术及其设备的典型代表主要有德国 EOS 公司 EOSINT M270 和英国 MCP 公司的 Realizer。EOSINT M270 设备的沉积速度为 $2 \sim 20\text{mm}^3/\text{s}$,层厚控制范

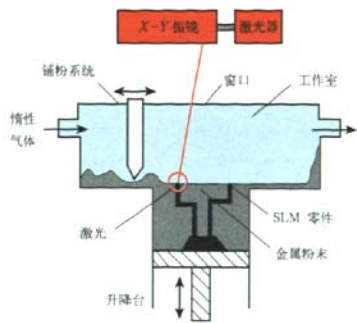
表是瑞典 Arcam AB 公司的 S12。从 2003 年开始,该公司开发了 EBM 技术及设备,目前以制造 EBM 设备为主,兼顾成形技术开发。美国、日本、英国、德国等许多研究机构,在不同领域开展应用研究。现在,生物医学植入物方面的研究已较为成熟,航空航天及汽车等领域也在积极开展研究。美国波音机器人工厂及 NASA Marshall 空间飞行器中心的研究方向是飞行器及火箭发动机结构制造以及月球或空间站环境下的金属直接成形制造。

电子束粉末熔融快速成形方面,清华大学与桂林电器科学研究所合作研制了试验设备,用于基础实验研究,目前仍处于实验室研究阶段。幸福曼德智能工程技术公司引进的其外方合作伙伴瑞典 Arcam AB 公司 S12 型设备已于 2007 年 9 月安装完毕,随即投入生产,主要生产医用钛合金关节头,工艺较为成熟。

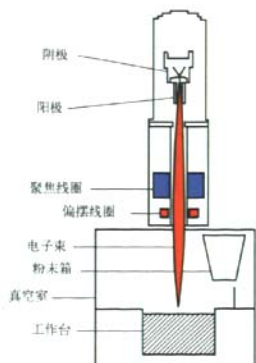
总之,高能束快速制造诸多技术各有优缺点,关键是如何充分发挥其独特优势,抑制其劣势。粉末快速制造加工过程复杂,可制造形状复杂的零件;送丝快速制造加工成本低,加工过程较简单。应基于钛合金零件的类型、服役条件、制造方法经济可承受性,选择高能束快速制造技术及设备加工。随着高能束快速制造技术发展和商用设备的不断完善,该技术将被广泛应用于高性能多功能复杂钛合金构件的制备及修复。

结束语

高能束流诸多加工技术已在多种制造领域取得了较为广泛的应用,是本世纪先进制造技术中不可缺少的特种加工技术。随着激光、电子束、等离子体等高能束流品质的发展,高能束流加工技术及其设备将不断改进,其加工质量会更高,加工制造领域会更广。 (责编 小颖)



激光选区熔化技术原理图



(a) 原理图



(b) 零部件

电子束选区熔化技术原理图及其典型钛合金零部件

上钛合金 AMAD 支座、吊耳和万向结,直升机的螺旋桨支架等。NASA Langley 研究中心持续开展了微重力条件下的成形试验,以便未来在太空中使用该技术。

在熔化金属丝材的电子束自由成形直接制造技术方面,高能束流加工技术国防科技重点实验室开发了国内首台 $60\text{kV}/8\text{kW}$ 定枪 EBF³ 设备及配套的专用电子束快速成形分层处理软件,可成形尺寸

围为 $20 \sim 100\ \mu\text{m}$,聚焦直径为 $100 \sim 500\ \mu\text{m}$,所制备近净成形零部件的表面粗糙度可达到利用磨粒流加工的精度要求;且该设备可直接制备多孔燃烧室罩,减少制孔工序。该设备加工舱环境可通过循环洗气系统进行控制,达到加工环境超纯净状态。另外,该设备已广泛应用于欧洲空客飞机、罗·罗公司发动机等的某些零部件的制造。

电子束选区熔化技术的典型代