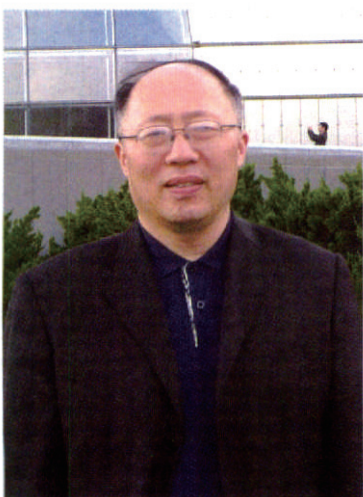


金属零件直接快速制造技术及发展趋势

Direct Rapid Manufacturing Technology for Metal Parts and Its Development Trends

华中科技大学机械学院 张海鸥 王超 胡帮友
华中科技大学材料学院 蒋疆 邹海平 王桂兰



张海鸥

东京大学工学博士, 华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室教授、博士生导师, 主要从事新材料加工与模具制造技术, 数字制造技术与装备、高能束和机器人制造 CAD/CAE/CAM 等方面的研究。承担和完成国家自然科学基金、国家 863、国防重点预研等项目 20 余项, 在 Journal Of Applied Physics, Journal Of Power Source, Thin Solid Films, Surface and coating technology, 中国科学等国内外权威及核心重要杂志上发表论文约 200 篇。

增材快速成形与制造技术在高形状复杂度、高功能复杂度零件的

在高能束直接制造高致密金属零件技术中, 有支撑的 EBm 技术在高形状复杂度的小型零件制造方面具有优势, 但难以制造大型、复合功能梯度材料的零件; 无支撑的 LENS 技术与 HPDM 技术在制造高功能复杂度、大中型金属零件方面独具优势, 但尚未有效解决带悬臂等的复杂形状零件无支撑直接成形过程中的流淌和开裂问题, 根本解决此瓶颈问题、提高其复杂形状成形度, 是扩大该技术应用范围的迫切需求。

制造方面独具特色, 被认为是现代制造技术发展史上的一个里程碑, 并正向高功能、高性能材料零件直接制造方向发展, 对制造业产生着深远的影响^[1-2]。其中, 金属零件的直接快速制造 (Direct Rapid Metal Manufacturing) 需求范围最广, 也是其主要发展方向之一。目前主要有采用激光束、电子束、等离子束的高能三束, 以及非高能束的成形方法, 该技术可直接由零件 CAD 模型, 完成难加工复杂形状金属零件的快速成形, 还可根据零件不同部位的工作条件与特殊性能要求实现梯度功能

材料零件的快速成形。因此, 这是一种零件结构与材料设计、新材料制备、成形、加工一体化的创形创质并行的短流程、数字化制造技术, 代表着先进制造技术的发展方向。由于该技术和装备在航空航天、国防、能源、交通等尖端支柱领域的重要应用前景, 受到发达国家政府和企业的高度重视和大力支持, 但目前尚处在工业规模实用化的前夜。

高能束金属零件直接快速制造技术现状

因篇幅所限, 本课题主要分析

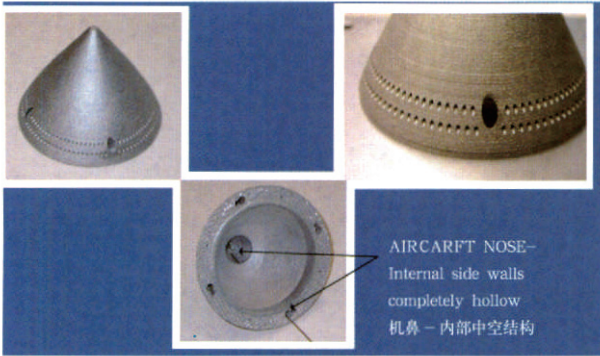


图1 MTT公司采用SLM技术制造的机鼻

广泛使用的致密金属零件的直接快速制造技术现状,其中,采用高能束流的直接制造主要有选区激光熔化/烧结成形法(SLM/SLS)和激光近终成形法(LENS)、电子束成形法(EBM)、等离子束熔积成形法(PDM),以及其它派生的技术。

1 SLM 技术

SLM (Selective Laser Melting) 技术是在 SLS 技术基础上发展起来的,与 SLS 方法的相同之处是,因控制热变形困难等限制而只适于成形复杂形状小型件;不同之处是将粉末烧结改良成粉末熔化,省去了 SLS 法后续的低熔点金属浸渗致密化环节,较 SLS 方法可直接成形密度显著提高的金属产品。然而,对于成形过程中出现的熔化金属“聚球”现象,需严格控制材料参数、工艺参数和扫描方式才能减轻^[3]。要得到高致密度零件需采用热等静压技术,但这往往需要后续加工来保证精度,从而增加了制造难度、时间和成本。SLM/SLS 技术皆因采用层层铺粉的送料

方式而难以制造梯度功能材料 FGM 零件。图 1 为 MTT 公司采用 SLM 技术制造的金属零件^[4]。

PHENIX SYSTEMS 公司研究开发了与 SLS 方法相似的激光烧结方法,不同之处在于采用了

激光固相烧结的专利技术,并使用了光纤激光器。公司宣称:金属粉末成形无后续热处理工序^[5],但未见其对成形件密度数据影响的报道;其开发的 PM250 机型的圆柱成形室空间为直径 250mm,高 300mm,成形材料采用高温合金、不锈钢、模具钢等粉末。

2 LENS 技术

由美国 Sandia 国家试验室与 Allied Signal Inc., Eastman Kodak Co., Hasbro Inc., Laser Fare Inc. 等公司合作开发,已成功制造了 316、304 不锈钢, Inconel625、690、718 镍基高温合金, H13 工具钢, Ti-6Al-4V 钛合金以及镍铝金属间化合物等材料零件,还制备了 316-304 不锈钢、304 不锈钢-A690 合金、Fe-Cu、Ti-V 和 Ti-Mo 梯度材料零件,显示出其在功能梯度材料制备方面的独特优势。目前, Optomec 公司专门从事该技术的商

业化工作,已开发出 1kW 的 LENS 850 商业机,运动定位精度在 X-Y 方向为 0.05mm, Z 方向 0.5mm,成形最小层厚 0.0756mm,最大成形速度 8.19cm³/h^[6]。图 2 为 Optomec 公司开发的 LENS 850 成形机成形腔内状况和成形零件。图 3 为正在用 LENS 技术加工的某金属制品。

此外,还有一些基于 LENS 技术原理的激光成形技术。如 Los Alamos 国家试验室与 SyntheMet 合作开发的 DLF (Directed Light Fabrication) 技术,与 LENS 技术的不同之处是它可直接由 CAD 模

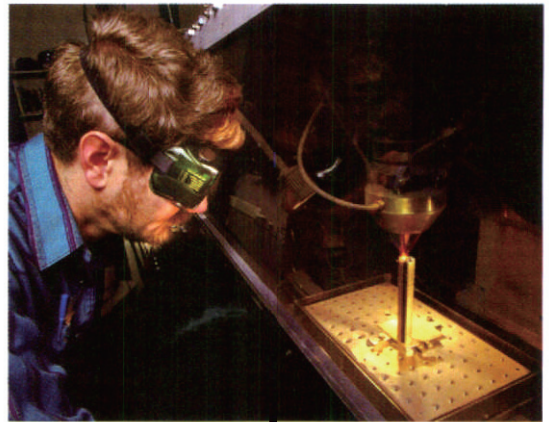


图3 正在用LENS技术加工的金属零件

型分层获得加工路径格式文件,避免了 STL 文件格式的数据冗余和错误。可用的成形材料有 AISI316 和 400 不锈钢、FeNi 合金、AlCu、Ag、Cu 合金, P20 工具钢、Ti、W、Re 合金,以及钛铝、镍铝、钼硅等金属间化合物等^[7]。Michigan 大学 J.Mazumder 教授等提出的 DMD 技术(Direct Metal Deposition)与 LENS 技术的区别主要是增加了实时反馈系统^[8]。

美国 Johns Hopkins 大学、Penn State 大学和 MTS 公司合作开发的 LasForm 工艺,与 LENS 技术不同之处是采用了 19kW 大功率 CO₂ 激光器和稳定的快速供粉系统,单道堆积宽度和厚度分别达 13mm 和 4mm,工作空间达 3m × 3m × 1.2m,成形速度明显高于 LENS 激光成形工艺^[9]。但

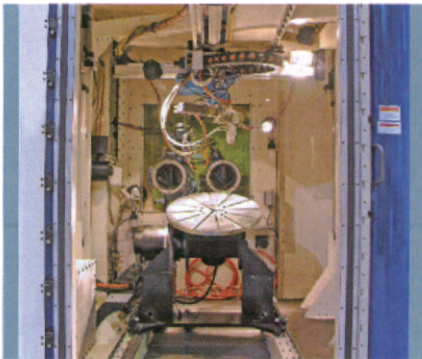


图2 Optomec公司开发的LENS 850成形机及成形件

MTS公司成立的 AeroMet 子公司的教训表明,即使经热等静压(HIP)、模锻后加工之后,成形件的疲劳等关键力学性能仍低于钛合金锻件,故未能有效解决激光成形大型钛合金结构件内部质量和力学性能控制等关键技术难题,加之成本过高,最终导致该公司关闭。

国内西北工业大学、北京航空航天大学、有色金属研究院、清华大学、南京航空航天大学、上海交通大学等单位都开展了基于 LENS 技术的激光直接成形技术研究。北京航空航天大学王华明教授研究小组开发了激光快速成形双相钛合金“特种热处理”新工艺,提出“热应力离散控制”新方法,制造出的大型整体钛合金飞机结构试验件^[10]。

3 EBM 电子束成形技术

瑞典 Chalmers 工业大学与 Arcam 公司合作开发了电子束熔化(Electron

Beam Melting, EBM)技术,并以 CAD-to-Metal 申请了专利^[11]。EBM 技术采用粉末成形,成形零件尺寸 250mm×250mm×200mm,成形速度 1cm³/min,最小孔隙率可控制在 0.5%以内,适于复杂小型近终件成形,为提高成形效率,最近还开发了多束电子束成形机。因其对硬件和环境的要求高,整个成形过程须在真空室内进行,设备和运行成本高;也存在表面熔化金属“聚球”现象,且与层层铺粉的 SLS/SLM 法相似,难以成形梯度功能材料零件,且成形精度尚不足。图 4 为美国宇航局兰利研究中心(NASA Langley Research Center)采用 EBM 成形或经后加工的样品及特点。最大尺寸为 15.24 cm×15.24 cm×15.24 cm,层厚为 0.5 mm~1.27 mm,沉积率为 80cm³/h,零件精度:±1.27mm~2.54 mm。图 5 为 EBM 成形所用的粉末金属。

麻省理工学院的 Matz

J. 在美国海军研究局(ONR)的资助下研究了电子束实体自由成形(Electron-beam Solid Freeform Fabrication, EBSFF)技术,其与 EBM 技术的不同之处是采用电子束熔化同步输送的金属丝材,其成形的组织较铸造方法细小。国内清华大学开发的电子束选区同步烧结工艺,可在整体成形区域内,材料同步升温、烧结、沉积和降温,减小了热应力,提高了零件成形的精度和质量^[12]。

4 PDM 等离子束成形法

等离子熔积(PDM)成形方法是利用经电磁、几何和热压缩的转移电弧产生高温高速的等离子束流,使

金属达到熔融态,并按设定的三维空间轨迹逐层熔积成形。本课题作者开发了 PDM 成形工艺与设备^[13],研究结果表明:该方法冶金过程充分,组织性能明显优于真空铸件,密度与锻件相当;成形效率、材料和能量利用率高,设备投资和运行成本远低于激光束和电子束成形方法,但因弧柱较这两种方法粗,成形精度不及这两者。所以,上述三种高能束直接成形方法在成形精度、成形效率、成本和功能等方面各有优缺点,难以全面兼顾。

最近,作者对空间圆管、弹簧等平面轮廓环沿空间引导线扫掠形成的空间扫掠式复杂结构实体直接成形进行研究,采用成形方向沿引导轴线切向且不断变化的楔形切片方式进行路径规划,开发了变向变厚楔形切片的算法,直接快速成形了图 6 所示的变向渐缩式不锈钢空间螺旋管,表明了该技术具有成形复杂形状零件成形性的能力。



图4 美国宇航局兰利研究中心(NASA Langley Research Center) EBM成形与后加工的样品



图5 EBM技术所用的粉末金属



图6 采用变向变厚楔形切片算法制造的变向渐缩式316不锈钢空间螺旋管

非高能束直接快速制造技术

1 超声波固结成形技术

超声波固结成形技术,由 Solidica 公司(Ann Arbor, Michigan)开发。与采用热能束的金属零件快速成形过程的区别在于:第一,不采用金属

粉末作为原材料,采用多种金属薄带,如铝带等;第二,无成形热源,而是采用超声波技术,将各层铝带固结在一起,制作金属零件。此外,可将成形与铣削结合,保证零件精度和表面质量。该技术能制作深槽、空洞、网格、内部蜂巢状结构体,以及形状复杂而传统去除型工艺无法制造的金属零件^[14]。

2 其他技术

由 MIT 开发 3DP (3D inkjet printing) 技术,授权给 Ex One 公司及其 Prometal 子公司开发应用,类似的还有 feubic 公司的技术^[15],都是通过喷头,用粘结剂将粉末以及各层粘接起来积层成形。因制品密度和强度较低,故需后续去粘结剂和浸渗低熔点金属致密化的热处理,致使工序和成本增加;且与 SLS 技术相似,因控制热变

时间长,甚至有时要占整个制造周期的 60% 以上,使直接制造技术的优势大为丧失。

因此,需要开发可在成形过程中实现高尺寸精度和表面质量要求的复杂形状难加工零件的直接精确制造技术。除了早期斯坦福大学的 Ramaswami 等研究开发了形状沉积制造系统 (SDM)^[16],采用与 FDM 类似的方式堆积材料并对其进行三轴铣削加工制造原型之外,荷兰的 Delf 大学和韩国科技大学研究开发了分层实体制造和线切割结合的复合快速成形技术。该技术在不同的加工位置根据待加工表面形状,以可调节形状的金属丝为切削刀具,因而可实现简单形状的大厚度去除^[17]。本课题作者提出并开发了在成形过程中将等离子熔积与铣削复

合的金属零件直接快速制造技术 (Hybrid Plasma Deposition & Milling, HPDM), 并采用自主开发的三轴 HPDM 工艺和设备试制了高温合金双螺旋叶片、高温合金整体双螺旋叶轮,为实现难加工材料制备—成形—加工一体化的低成本短流程制造提供了新的途径^[18-19]。

在金属零件无支撑直接成形过程中发生的流淌、变形、开裂、组织性能各向异性和非稳定性问题,是由于移动传热传质条件下无约束空间自由熔积成形所固有的热力学、动力学、几何学特点所决定的,存在原理上的问题,仅靠改变材料成分和配比以及成形工艺等方法,难以根本解决。因此,有必要采用逆向和综合思维方法,考虑受迫成形工艺精度高、组织性能好的优点,将其引入无支撑自由快速成形,综合发挥其各自的优势,开发自由增材成形和受迫成形复合的低成本直接快速制造金属零件的新方法,为从根本上解决无支撑自由快速成形工艺固有难点问题和工业实用化提供新的有效途径。

本文共有参考文献 19 篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要请向本刊编辑部索取。

(责编 侧卫)

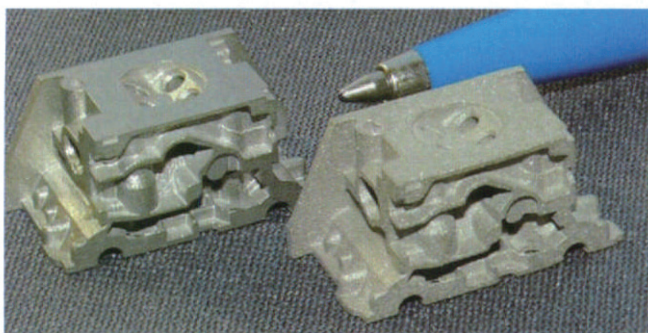


图7 feubic公司制造的气缸盖模型

形困难,因此仅适于小型件的制造,零件尺寸小于 30mm,表面粗糙度约为 $4\mu\text{m}$ 。该技术主要使用了铁、铜、钨、镍合金等材料。图 7 为 feubic 公司制造的气缸盖模型。

复合型金属零件直接快速制造技术

采用上述金属零件直接快速制造技术,一般只能获得近终成形零件,尚未达到工业化生产所需的尺寸和表面精度要求,大都需在成形结束后精加工。然而,直接成形的金属零件因急冷凝固后使表面硬度增大并有阶梯效应,导致加工困难;形状复杂的零件有时需多次装夹,致使加工

整体双螺旋叶轮,为实现难加工材料制备—成形—加工一体化的低成本短流程制造提供了新的途径^[18-19]。

金属零件直接快速制造技术发展趋势探讨

采用增材积层无模直接制造的金属零件,其材料特性明显不同于传统的锻造或铸造零件,目前对此材料特性尚无特别的工业标准,这已成为推广该技术的很大障碍。为此,美国材质及测试协会 (ASTM) 于 2009 年 1 月成立了专门委员会致力于开发增材积层成形材料标准的工作,这将支持此项技术在许多工业领域中的推广应用。