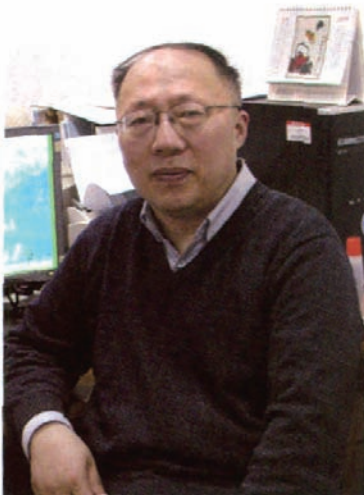


金属零件直接快速制造技术

Direct Rapid Manufacturing Technology for Metal Part

华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室 张海鸥

华中科技大学材料学院 蒋疆 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。

高熔点、高韧性的难加工高性能零件在航空航天、能源动力、国防军工、石油化工等尖端科技和国家支柱产业关键技术领域的用途十分广泛,

基于数字化生长成形原理的快速成形技术, 变革了传统的体积成形与去除式成形加工方式, 为开发复杂形状难成形 / 难加工新材料和 FGM 零件的无模近终成形方法提供了新的思路。

在应用中, 对零件的性能、精度、制造成本的要求也日趋苛刻。然而, 采用传统的铸造、粉末冶金、机械加工等工艺, 存在成形或加工难度大、制造工序多、周期长等问题, 尤其难以制造复杂形状、高性能的难熔难加工合金或梯度功能材料 (FGM) 零件。因此, 研究开发此类零件的高质量低成本的制备 - 成形 - 加工一体化的短流程制造技术已成为先进制造技术的重要发展方向和前沿热点课题。

基于数字化生长成形原理的快速成形技术, 变革了传统的体积成形与去除式成形加工方式, 为开发复杂形状难成形 / 难加工新材料和 FGM 零

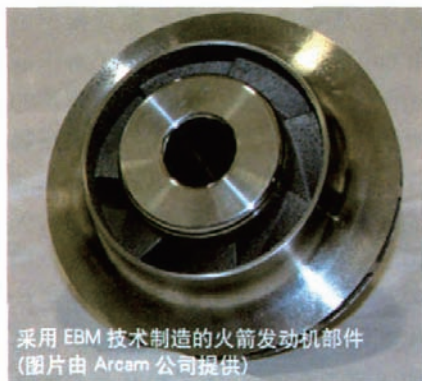
件的无模近终成形方法提供了新的思路。近年来该技术与新材料技术交叉融合, 由过去以几何运动学信息为重心的快速原型向以高性能、高组织性能为主要目标的金属 / 合金和 FGM 零件无模直接成形方向发展^[1-2]。业已提出的金属零件直接成形方法主要有基于激光束、电子束、等离子束的高能三束的激光烧结



PARLEC

Measurably Better

Your total machining solution!



采用 EBM 技术制造的火箭发动机部件
(图片由 Arcam 公司提供)

法和激光熔覆近终成形法、电子束自由成形法、等离子熔积成形法。激光烧结法可采用较小功率的激光成形复杂形状金属原型,但要获得高致密度需做浸渗或热等静压等后处理;改良了的 SLM (Selective Laser Melting) 方法,虽提高了

原型密度,但成形过程中易出现熔化金属“聚球”的现象,需要通过材料参数、工艺参数和扫描方式的严格控制^[3]。此外,还可采用热等静压以得到高致密度的方法,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,且 SLS/SLM 技术因采用层层铺粉的送料方式而难以制造 FGM 零件。

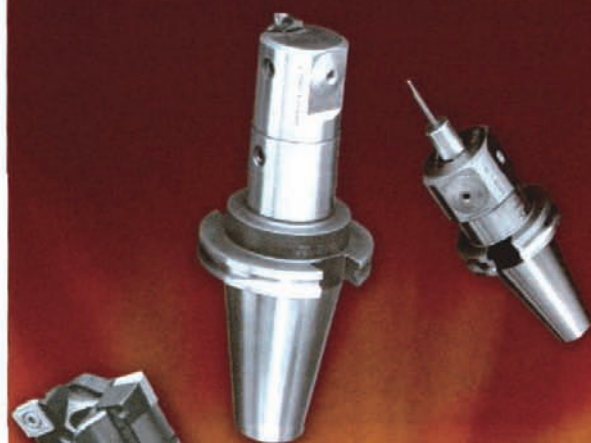
激光熔覆近终成形法、电子束自由成形法、等离子熔积成形法为高致密、难加工零件的材料制备与成形一体化的短流程制造提供了新的途径,这 3 种方法存在各自的优势与弱点。

激光熔覆近终成形法的尺寸和表面精度较佳,成形密度较激光烧结方法大为提高。美国 Sandia 国家实验室采用 LENS 工艺,



Arcam 公司开发的 EBM S12 型电子束成形机

通过调整工艺参数,成形件的最小特征尺寸可达 0.76mm。通过对控制软件进行研究和改进,有效地提高了加工精度。通过测试, X、Y 方向的公差为 $\pm 0.05\text{mm}$, Z 方向的公差为 $\pm 0.38\text{mm}$ 。平均表面粗糙度 R_a 为 $5.08\ \mu\text{m} \sim 7.62\ \mu\text{m}$ 。国内北京航空航天的王华明教授研究室开发了“自由平面接触/动态密封/惰性气氛保护”钛合金结构件、激光快速成形装备系统以及钛合金复杂结构件激光成形工艺的关键技术^[4]。西北工业大学黄卫东教授研究室的试验结果表明,激光快速成形沉积态 Ti6Al4V 合金的拉伸性能具有高强低塑特点,影响其拉伸性能的因素主要



帕莱克镗刀系统

性能卓著,效率倍增!

- 精密的模块化设计,小孔极具优势!
- 标准镗孔范围是 2mm 到 556mm,调节精度最小为 2 μm
- 双刃可调镗刀的效率可达传统镗刀的 4 倍
- 使用 ISO/ANSI 标准刀片,降低库存和生产成本

★ North America

★ Asia

★ Europe



美国帕莱克公司是刀具及刀具预调仪设计与制造的世界领航者,随着国内公司规模的不不断扩大,现诚邀销售工程师加盟:

1. 机械相关专业本科以上学历
2. 具有 2 年以上的机械行业经验
3. 工作地点: 南京, 天津, 成都, 武汉

请将个人简历发 Email 至: hr.parlec@163.com

帕莱克机械(南京)有限公司

全国办事处: 上海, 广州, 天津, 成都, 武汉
电话: 025-66612228 传真: 025-66612278

Email: sales@parlec.com.cn

www.parlec.com



包括显微组织、氧含量和冶金缺陷,经固溶时效热处理后获得综合性能最好的网篮组织^[5]。但是,该技术因激光光斑直径小且冷却凝固速度很快,使冶金过程难以充分进行,导致



采用 EBM 技术制造的起落架组件 (图片由 Arcam 公司提供)

成形件内可能存在未熔粒子和气孔;能量利用率、成形效率和材料利用率不高;因需要大功率激光器和上述原因,致使设备投资和运行成本高。

2001 年,瑞典 Chalmers 工业大学与 Arcam 公司合作推出了第一台电子束实体自由成形概念机^[6],采用 100kV ~ 4MV 的电压加速、功率可达 4kW 的电子束熔化金属粉,堆积成形速度为 1cm³/min,达到高致密,成形精度较高。Arcam 公司于 2003 年 3 月和 2007 年 4 月分别推出 EBM S12 和 EBM A2 机型,并试制了用于航天领域的 Ti6Al4V 材料成分的火箭发动机部件和起落架组件。然而,也因采用与激光烧结类似的送粉方式而难以制作 FGM 零件,且对硬件和环境的要求高,整个成形过程须在真空室内进行,故设备和运行成本很高,尚未用于制作中大型零件^[7]。

等离子熔积成形方法冶金过程充分,易于低成本地获得组织性能明显优于真空铸件的满密度高温合金零件;电弧能量利用率、成形效率、材料利用率高,设备投资和运行成本远低于前两者。然而,因弧柱直径较前两种方法粗,成形及表面精度不及前两者。

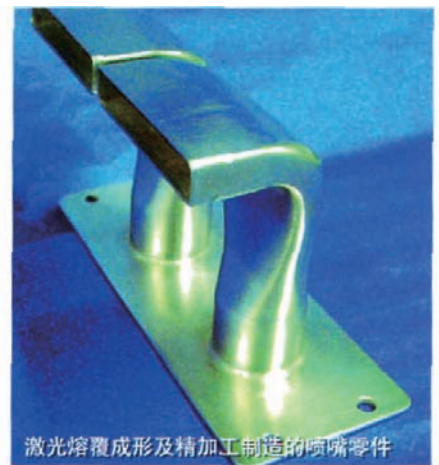
激光熔覆近终成形法和等离子熔积成形法皆采用无支撑成形技术,

避免了因需要添加和去除支撑材料导致材料、工艺、设备上的诸多不利,缩短了制造时间,降低了成本,并可制造 FGM 零件,但同时也因支撑条件缺乏,成形件大都为直壁或小倾角件,大侧斜或悬角的复杂形状零件在成形过程中可能因重力造成流淌甚至坍塌,导致成形困难。要达到工业化应用所需的尺寸和表面精度,大都要在成形完成后进行精整加工。

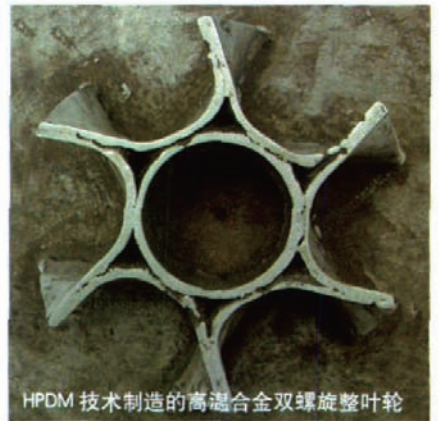
然而,直接成形的难加工高温材料零件因急冷凝固使表面硬度增大,导致加工非常困难;形状复杂的零件有时需多次装夹,致使加工时间长,有时甚至要占整个制造周期的 60% 以上,成为高性能难加工零件低成本短流程制造的瓶颈。因此,迫切需要开发可在成形过程中实现尺寸精度和表面质量要求的复杂形状难加工零件的直接精确制造技术。为此,笔者和美国 Southern Methodist 大学的 Kovacevic 教授分别提出将高能束成形与铣削复合无模快速制造相结合的方法^[8-9],即以等离子束为成形热源,在分层堆积近形成形过程中,交叉进行数控铣削精加工,以实现短流程、低成本的直接精确制造。Kovacevic 教授研究室开发了多轴激光与铣削复合直接沉积制造系统^[10]。笔者针对航空发动机关键高温零件——复杂形状双螺旋叶轮的制造难度大、周期长和难以满足高性能发动机快速高质量研制的瓶颈问题,采用自主研发的三轴等离子熔积与铣削复合技术 (Hybrid Plasma Deposition & Milling, HPDM) 工艺和设备试制的表面无裂纹、满密度高温合金整体双螺旋叶轮,使新型高温零件的形状与内外质量在同一制造过程中并行实现^[11-12]。这些研究为高性能航空发动机难加工高温零件的短流程、低

成本、高质量、高效率无模直接制造开辟了新的途径。此外,为了解决前述激光束光斑直径很小、激光熔覆的单道宽度不大,以及激光固有的反射等因素造成的激光直接制造工艺的能量利用率和加工效率低的问题,美国 Southern Methodist 大学、韩国的汉城理工研究所等多家研究机构相继展开了基于焊接热源的金属零件无模制造技术,为了提高金属零件的表面质量,都在焊接成形的过程中引入了铣削加工,有效解决了金属零件的精确成形问题^[10,13-14]。

然而,HPDM 等技术虽通过分层的成形和铣削精整,降低了加工复杂程度,但对于侧面带大倾角尤其是横向直悬角的复杂形状零件,堆积成形时因重力产生的流淌甚至塌落问题仍不能避免,以至成形困难。此外,难熔/难加工合金材料在急速加热和冷却的高能束多层堆积成形过程中有时会出现热裂现象,致使高能束



激光熔覆成形及精加工制造的喷嘴零件



HPDM 技术制造的高温合金双螺旋整叶轮

PARLEC

Measurably Better

Your total machining solution!

熔积成形性变差,成形高度和尺寸范围受到限制。因此,高能束直接成形复杂形状零件的流淌、热裂问题,已成为该技术进一步发展和应用的关键技术难题。

关于复杂形状零件无附加支撑直接成形的流淌问题,国外研究机构,如美国 Michigan 大学、Southern Methodist 大学、新加坡国立大学,多采用变方向切片技术,选择支撑条件最多的方向作为零件成形主方向,或将复杂形状零件分解成若干简单形状部件依次成形,并开发出五轴和多轴直接成形加工软件^[15-17]。采用

用 EBM 技术制造的赛车变速箱外壳
(图片由 Arcam 公司提供)



五轴加工技术,虽然有效改善了生长成形的支撑条件,但将导致空间干涉检验和成形路径规划复杂,编程与加工时间长、难度大等问

题,而且对于复杂形状零件仍难以从根本上解决因重力造成的流淌问题,致使零件成形精度不高,尺寸规格和形状复杂程度仍受到限制。关于热裂问题,目前主要有两类解决途径:一类是在材料中添加改善抗裂性能的材料或改变原材料的成分配比,这虽能使材料抗裂性能有所提高,但往往会导致零件的使用性能(如高温蠕变强度或耐磨性)的降低,从而在实际应用中受到限制;另一类主要通过合理匹配熔积成形工艺条件、制定使温度分布均匀化的熔积成形路径等来减少成形过程中的热裂,从而提高成形性和成形质量,但这些措施的效果有限。因此,必须探索新的有效方法来防止复杂形状金属零件高能束直接成形过程中的流淌和热裂。

综上所述,探索高性能复杂形状金属零件无模直接精确成形的新方法,根本解决高熔点金属/合金和 FGM 零件直接成形过程中流淌、热裂的瓶颈问题是高致密、高性能复杂形状金属零件直接成形技术进一步发展的关键。解决此瓶颈问题将充分发挥快速成形技术在制造复杂形状、材料分布可控方面的独特优势,开发出具有我国自主知识产权的新型复杂形状、高性能零件的材料制备-成形-加工一体化的无模直接制造技术,在航空航天、能源、汽车等关键领域的高性能高温关键零部件和耐久模具的低成本快速制造中推广应用,大幅度地缩短研制和制造周期,降低成本,提高我国制造业的国际市场竞争能力以及国民经济和国防支柱产业的装备水平。

注:本文有参考文献 17 篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑索取。

(责编 金卯)



帕莱克刀柄系统

— 专业设计, 精密制造!

■ 同心度
在3倍直径处小于 $3\mu\text{m}$

■ 动平衡
获得专利的可调平衡系统

■ 高精度
刀柄锥度达到AT3标准
 $2.5\mu\text{m}$ 的公差

□ 高速加工的动平衡热缩式刀柄, ER弹簧夹头刀柄, 强力铣刀柄和侧固式刀柄, 刀柄规格有BT, DIN, HSK, CAT, Chiron和Morse锥度

□ 帕莱克标准ER弹簧夹套螺母夹持力比其他标准螺母大3倍

★ North America

★ Asia

★ Europe

美国帕莱克公司是刀具及刀具预调仪设计与制造的世界领导者,随着国内公司规模的不扩大,现诚邀销售工程师加盟:

1. 机械相关专业本科以上学历
2. 具有2年以上的机械行业经验
3. 工作地点: 沈阳、西安

请将个人简历发Email至: hr.parlec@163.com

帕莱克机械(南京)有限公司

全国办事处: 上海, 广州, 天津, 成都, 武汉
电话: 025-66612228 传真: 025-66612278

Email: sales@parlec.com.cn

www.parlec.com

