DOI: 10.3901/JME.2013.23.001

柔性增材再制造技术*

朱 胜

(装甲兵工程学院再制造技术国家重点实验室 北京 100072)

摘要:再制造数字化智能化发展的新需求将促进柔性增材再制造技术的发展。对柔性增材再制造技术的内涵及特点进行阐述,近年来在柔性增材再制造领域的相关研究成果也被简要地介绍。研究成果表明,开发的柔性增材再制造系统具有柔性好,成形快速,适应范围广等优势;自主开发的反求建模技术保证了扫描反求和数据处理精度;将熔敷增材技术和铣削减材加工相结合开发的增材/减材复合再制造技术,实现了柔性增材再制造过程的形状精确控制;制备的集约化材料可有效减少所携带的再制造材料种类;开发的磁控增材再制造技术既细化晶粒,又减少组织缺陷,可以用于铝合金零件的再制造。

关键词:增材再制造 熔敷成形 机器人

中图分类号: T11

Mobile Additive Remanufacturing

ZHU Sheng

(National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract: New requirement of remanufacturing industry development to digital and intelligence direction promote the development of mobile additive remanufacturing technology which is a core technology of remanufacturing engineering. The connotation and character of mobile additive remanufacturing technology are expatiated and relative research works at the mobile additive remanufacturing technology are introduced briefly. The research results indicate that the exploited mobile additive remanufacturing system possess the advantages such as good flexibility, high forming efficiency, wide application scope. Independent innovated reversing and modeling technology ensure the scanning and data processing precision and efficiency. Shape exact controlling can come true by the hybrid process combining additive technology with subtractive technology in mobile additive remanufacturing course. The prepared intensivism material may effectively reduce remanufacturing material kinds. The exploited magnetism controlling additive remanufacturing technology which can also make crystal grain thin and decrease structure defect may apply in aluminium alloy part remanufacturing.

Key words: Additive remanufacturing Deposition forming Robot

0 前言

机械工程技术的发展趋势为绿色、智能、超常、融合和服务^[1]。制造业的发展方向是数字化智能化^[2]。再制造业,作为制造产业链的延伸和先进制造、绿色制造的重要组成部分^[3],也应适应新形势,以数字化智能化作为其发展方向。增材再制造是再制造技术的重要发展方向,近年来在缺损零件的反求建模^[4]、焊道评价^[5]、成形材料开发^[6-7]、三维体积损伤零件再制造^[8]、自动化等方面取得了进

展^[9-10]。

柔性增材再制造技术是指利用机器人等系统的高柔性控制,对缺损零件进行反求建模、成形分层、路径规划等,并选用合适的熔敷工艺,采用增材逐层堆积的方式进行再制造的各种成形技术。

柔性增材再制造技术具有其固有的特点:增材再制造是以废旧零件为基础,对其失效部分进行处理,恢复其形状尺寸和性能,并可以根据需要进行性能提升,因此,再制造过程是在零件使役以后,具有时间上的滞后性,而增材制造过程是在零件使役之前进行的。再制造属于先进制造、绿色制造,与增材制造相比,增材再制造加工对象更复杂、前期处理更繁琐、质量控制更困难,所需科技含量更高,体现出技术上的先进性。

* 国家自然科学基金(50975286, 51005245, 51105376)和部委基金(51327040301, 51327040402)资助项目。20130114 收到初稿,20130910 收到修改稿

增材再制造时间上的滞后性和技术上的先进性特点,契合了废旧零件因失效形式、结构、性能要求等不同而产生的个性化修复需求。从而导致增材再制造与增材制造具有明显的区别:增材制造直接通过 CAD 模型分层、路径规划即可成形,而增材再制造则需要经过缺损零件的反求建模、与标准 CAD 配准与对比、再制造建模分层、路径规划等才可完成,其成形过程更加复杂;虽然都采用逐层堆积的方式进行,但增材制造一般都采用同一种熔敷工艺对同质材料进行加工,而柔性增材再制造大多属于异质成形,需要根据成形材料、性能要求等选用激光、等离子、电弧等多种熔敷工艺;增材制造都是用于制造新品,大多采用三维坐标操作机,而柔性增材再制造主要用于“坏中修好”,对缺损零件进行修复再制造,因此,需要采用智能机器人进行成形控制,其成形过程更加柔性,可面向现场多维约束条件下的装备零部件再制造,也用于一些大型零部件或难拆卸部件的在线在位再制造。

柔性增材再制造技术本身固有特性使其适用于非对称、曲面等结构复杂零件的再制造,尤其适合一些需快速响应、成本不是主要考虑因素的场合,如装备零件的现场抢修,大型设备的零件在线再制造等。

本文将简要介绍作者近年来在柔性增材再制造技术方面相关的研究成果。

1 柔性增材再制造平台开发

柔性增材再制造系统主要由四部分构成,即:作为执行机构的机器人系统,作为反求装置的三维激光扫描仪反求系统,作为成形机构的熔敷电源系统,作为控制器的计算机。图 1 是系统的实物图。

图 1 系统实物图

柔性增材再制造系统以恢复磨损金属零件的

尺寸与性能为目的,将机器人技术、反求测量技术、增材技术融合在同一平台上,具有操作柔性好、扫描精度高、成形快速、智能化程度高、适应范围广和开放性好等功能要求。

2 柔性增材再制造过程反求建模技术

柔性增材再制造系统采用非接触的激光扫描仪对缺损零件进行反求测量,获得零件的再制造模型,再进行分层和路径规划。

2.1 缺损零件点云获取

采用光切和亚像素级检测相结合的方法提取激光光条的中心线,并对缺损零件进行反求扫描,图 2 为一个典型零件的缺损模型点云数据。

图 2 缺损零件点云数据

2.2 缺损零件再制造模型建立

通过比较零件的标准模型与缺损模型,获得零件表面的再制造模型,为修复过程提供数据支撑。建立了基于特征点的迭代最近点(Iterative closest point, ICP)算法,来获取零件的再制造模型。解决了传统 ICP 算法计算效率低的难题。图 3 为通过 ICP 算法配准技术获得的缺损量模型。

图 3 通过配准技术获得的典型零件的再制造模型

2.3 增材再制造路径规划

图 4 为实际零件的再制造成形路径规划图。采用阈值优先法进行再制造路径规划,即每次都先熔敷缺损最多的区域,依次进行,直至再制造成形完成。这样,路径规划效率高,成形过程易控,保证

了再制造成形过程的稳定。

图4 缺损零件的再制造路径规划图

图6 焊道搭接量模型及成形熔敷层

3 柔性增材再制造过程形状精度控制

增材再制造是一个非均匀加热、冷却的过程，加热、冷却的不均匀导致了应力分布的不均匀，而应力分布不均匀引起再制造成形件变形。

在柔性增材再制造系统的基础上，配备数控铣床，通过熔敷增材制造与铣削减材加工相复合，既提高了再制造效率，又提高了再制造件精度。由此开发出增材/减材复合再制造技术，实现柔性增材再制造过程的形状精度控制。

图5为熔敷增材加工/铣削减材加工复合再制造系统。

图5 熔敷增材加工/铣削减材加工复合再制造系统

为了得到较为平整的熔敷层，根据“等体积”原则，建立了熔敷焊道搭接量模型，图6为焊道搭接量模型图和根据搭接量模型成形的熔敷层。可以看出，根据搭接量模型成形的熔敷层较为平整。图7为再制造出的一个典型零件，经测试，其形状尺寸精度和性能要求均符合使役要求。

4 柔性增材再制造的材料集约化

针对目前装备零件材料多样化、复杂化特点，开发研制出具有高强韧性和高耐磨性两种金属芯

图7 再制造凸轮

焊丝，分别用于成形备件心部部分和工作表面，在不热处理的条件下获得同时具备高强韧性和高耐磨性的备件，满足大部分备件增材再制造需求，实现增材再制造材料集约化。

图8所示为强韧型金属芯焊丝成形件的典型组织。可见，强韧型焊丝制备的成形件典型组织为针状铁素体、先共析铁素体、晶内块状铁素体和珠光体。成形件中大量针状铁素体组织有利于提高成形件的强度和韧性。

图8 强韧型焊丝成形件的组织形貌

图9所示为耐磨型金属芯焊丝成形件的典型组织。可见，耐磨型成形件的典型组织为板条状马氏体和铁素体。板条状马氏体组织有利于提高成形件的耐磨性。

图 9 耐磨型焊丝成形件的组织形貌

5 磁控柔性增材再制造技术

针对铝合金在熔敷堆焊成形再制造过程中容易生成氧化膜导致成形过程困难和晶粒粗大导致性能降低的难题,在熔化极气体保护焊(Gas metal arc welding, GMAW)堆积增材再制造系统的基础上,配备电磁控制发生器,利用外加磁场对焊接电弧的拘束、搅拌作用,既细化了晶粒,又减少了组织缺陷,实现铝合金的再制造成形,从而开发出适应于铝合金零部件的柔性磁控 GMAW 堆焊增材再制造技术。

图 10 为采用磁控增材再制造技术制备的铝合金零件的组织形貌图,可以看出,较未加磁场相比,磁控增材再制造技术制备的铝合金零件组织晶粒更为细化,均匀,缺陷更少,说明磁控电弧对熔池的搅拌作用较为显著。图 11 为采用柔性磁控 GMAW 堆焊增材再制造技术修复的典型件,经测试,其精度和性能均满足服役要求。

(a) 未加磁场

(b) 加磁场

图 10 铝合金磁控增材再制造组织

图 11 铝合金支座再制造件

6 结论

(1) 制造向数字化智能化方向发展,柔性增材再制造技术应运而生,在社会、经济和军事方面应用前景广阔。

(2) 开发的柔性增材再制造系统将机器人技术、反求测量技术、GMAW 增材技术融合在同一平台上,具有操作柔性好,机动性好,成形效率高,适应范围广,开放性好等特点。

(3) 通过反求建模处理、成形精度控制、集约化材料开发、磁控柔性增材再制造等技术研究,提高了柔性增材再制造零件的精度和力学性能,对典型零件进行再制造表明,柔性增材再制造技术可以实现金属零件的再制造,其力学性能和精度满足服役要求。

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会. 面向 2030 中国机械工程技术路线图[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011.
Chinese Mechanical Engineering Society. Technology roadmaps of Chinese mechanical engineering [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2011.
- [2] 周济. 制造业数字化智能化[R]. 2012 年增材制造技术国际论坛暨第六届全国增材制造技术学术会议大会报告, 2012.
ZHOU Ji. Manufacturing digital and intelligence[R]. 2012 International Additive Manufacturing Forum and the 6th China National Additive Manufacturing Conference, 2012.
- [3] 徐滨士, 刘世参, 朱绍华, 等. 再制造与循环经济[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
XU Binshi, LIU Shican, ZHU Shaohua, et al. Remanufacturing and recycle economy[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [4] ZHU S, CUI P Z, SHEN C D, et al. Scanner external calibration algorithm based on fixed point in robot remanufacturing system[J]. Journal of Central South University of Technology, 2005(12): 133-137.
- [5] MENG Fanjun, ZHU Sheng, BA Dema, et al. Fussly synthetical evaluation of weld bead stability for pulse MAG welding prototyping[J]. Advanced Materials Research, 2011, 148-149: 1241-1245.
- [6] ZHU Sheng, LI Chao, SHEN Canduo, et al. Microstructure and micro mechanical property of part formed by GMAW surfacing rapid prototyping[J]. Key

- Engineering Materials, 2010, 419-420: 853-856.
- [7] ZHU Sheng , LI Chao , SHEN Canduo , et al. Microstructure and performance characteristics of parts via GMAW surfacing rapid forming[J]. Advanced Materials Research, 2010, 97-101: 4024-4027.
- [8] 曹勇. 机器人GMAW-数控铣削复合快速制造与再制造研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2010.
- CAO Yong. Research on hybrid rapid manufacturing and remanufacturing using robotic GMAW processing-CNC milling processing[D]. Beijing: Academy of Armored Forces Engineering, 2010.
- [9] ZHU Sheng , MENG Fanjun , BA Dema. The remanufacturing system based on robot MAG surfacing [J]. Key Engineering Materials, 2008, 373-374: 400-403.
- [10] ZHU Sheng, SHEN Canduo, LI Chao. Robot surfacing system for flexible remanufacturing based on off-line programming[J]. Applied Mechanics and Materials, 2009, 16-19: 718-722.
-
- 作者简介: 朱胜(通信作者), 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械工程、再制造。
- E-mail: mfj7519@163.com, zusg@sohu.com