

文章编号: 1001-3806(2002)05-0388-04

激光熔覆快速制造金属零件研究与发展*

钟敏霖 宁国庆 刘文今

(清华大学机械工程系激光加工研究中心, 北京, 100084)

摘要: 论述了激光快速直接制造的国内外研究和发展现状, 介绍了激光快速制造金属零件的方法, 重点说明了基于激光熔覆的快速制造技术和激光制造技术涉及的关键问题: 精密高质量同轴送粉熔覆系统、激光熔覆的工艺优化与稳定性和激光熔覆过程的检测与闭环控制。展示了激光熔覆快速制造的典型金属零件和应用领域。提出了激光熔覆制造进一步研究的方向。

关键词: 激光快速制造; 激光熔覆; 金属零件

中图分类号: TG156.99 **文献标识码:** A

Research and development on laser direct manufacturing metallic components

Zhong Minlin, Ning Guoqing, Liu Wenjin

(Laser Processing Research Center, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract: This paper summarized the research and development on laser direct manufacturing (LDM) metallic components based on laser cladding technology. The various direct manufacturing methods were introduced with the main emphasis on laser clad based manufacturing technology and its important technological constitutes: high quality coaxial nozzle, optimization of the laser cladding technique and the closed loop control of the process. The typical metallic components produced and the main application fields of LDM were demonstrated. The further research interests on LDM were proposed.

Key words: laser rapid manufacturing; laser cladding; metallic components

引 言

快速成型(RP)技术是一种先进的制造方法,它能够直接利用计算机CAD模型、无需特定模具而在特定时间内制造出复杂形状的立体模型或实体。主要RP设备已经在外国和国内实现商业化,并已低成本、高效率地制造出了大量高精度的模型。但是,目前RP技术只能制造出非金属原型(如聚合物、蜡、纸或包敷粉末),它们虽然具有良好的形状精度,但是不具备机械强度和机械性能,需经过二次铸造才能得到最终的金属原型。因此,RP技术的发展趋势是金属零件的直接快速制造,国外各主要发达国家均大力发展能够直接制造出全密度高强度功能性金属零件的新型快速制造技术,目前主要有以下几种^[1~5]。

(1) 多相组织沉积制造法(SDMHS)

用多个喷头沉积不同材料来制造微机械零件的方法。其原理为:利用等离子放电来加热金属丝材料,熔化的材料根据特定的几何形状要求沉积到工件上逐渐堆积成型,其特点是可以制造出包含多种材料的零件。

(2) 三维堆焊成型

利用焊接机器人和三维堆焊的方法制造金属零件。同时采用凹凸结合的方法进行连接,以提高层之间粘接强度,以改变由于固液态金属的表面张力和流动性,层与层之间连接不牢固会出现裂缝,影响物理、力学性能的缺陷。

(3) 选择性激光高温烧结法

其原理类似于快速成型技术中的选择性激光烧结法。所不同的是在金属零件的直接制造中,用高功率激光烧结金属粉末材料直接成型。其烧结件往往呈多孔状低密度结构,可将低熔点金属熔化后渗入形成金属模具,但制件的强度与精度问题一直是难以逾越的障碍。

(4) 金属液微滴直接成形方法生成金属零件

* 清华大学985重点基金资助项目。

作者简介:钟敏霖,男,1961年9月出生。博士,副教授。现从事激光材料加工、激光快速制造、激光制备新材料研究。

收稿日期:2001-09-11;收到修改稿日期:2002-01-29

通过电场偏转来控制金属液微滴直接三维成形,生成金属零件,目前用锡液微滴直接成型已取得成功。

(5) 激光熔覆制造

激光熔覆技术是指用高能激光束局部熔化金属表面形成熔池,同时用送粉器将金属粉末喷入熔池而形成与基体金属冶金结合且稀释率很低的新金属层的方法,根据 CAD 给定的路线,用数控系统控制激光束来回扫描,便可逐线、逐层地熔覆堆积出任意形状的功能性金属实体零件,其密度和性能与常规金属零件完全一致。由于激光熔覆的快速凝固特征,所制造出的金属零件具有优良的质量和强度。激光快速制造技术是快速成型技术的进一步发展,它将现有的快速成型技术推进到金属和高温合金的新高度,是快速成型基本原理和激光加工技术精华的集成。

基于激光熔覆的激光快速柔性制造技术(LRFM)或直接金属沉积(DMD)具有金属或合金材料范围广、完全冶金结合、根据零件需要变化合金成分、参数精密控制以及高度自动化等诸多优势,是目前快速直接制造诸多方法中研究最多、技术发展最成熟、最有发展前途的新型制造技术。

1 激光熔覆快速直接制造的研究进展

鉴于激光熔覆快速直接制造的技术先进性和巨大的发展前景,世界各国相关的重要研究机构纷纷进行研究,尤其是美国政府对快速制造十分重视,并投入大量人力和经费进行深入研究。在 80 年代末,美国能源部同时资助了桑地亚国家实验室、洛斯·阿拉莫斯国家实验室和密歇根大学 3 个机构进行基于激光熔覆的快速制造研究。到 90 年代末和 21 世纪初,各种不同名称的快速制造技术得到深入研究和快速发展:美国桑地亚国家实验室发展了激光工程化近成型即 LENS 系统(laser engineering net shaping);美国洛斯·阿拉莫斯国家实验室发展了直接光制造即 DLF 系统(direct light fabrication);美国密歇根大学机械工程系发展了直接金属沉积即 DMD 系统(direct metal deposition);加拿大国家科学院集成制造技术研究所发展了激光合成即 LC 系统(laser consolidation);美国中佛罗里达大学发展了激光辅助直接快速成型即 LADRP(laser aided direct rapid prototyping);德国斯图加特大学射束研究所发展了激光辅助粉末固化即 LAPS-J 系统(laser aided powder solidification/powder jet);德国弗朗和夫

生产技术研究所发展了控制金属堆积即 CMB 系统(controlled metal buildup);中国清华大学机械工程系发展了激光快速柔性制造即 LRFM 系统(laser rapid & flexible manufacturing);虽然名称各有不同,但实质都是利用同轴送粉激光熔覆进行添加式层叠直接制造的方法。

基于 LENS 和 DMD 技术,美国还成立了 AeroMet, Optomec 和 POM 公司,进行激光快速制造技术的商业化开发、技术示范和小批量生产。

激光熔覆快速制造的技术关键包括:精密高质量同轴送粉熔覆系统;激光熔覆的工艺优化与稳定性;激光熔覆过程的检测与闭环控制。

1.1 高质量同轴送粉系统

激光熔覆本身是一种涂层技术,将激光熔覆层沿垂直方向向空间多层叠加便可以制造出三维金属零件。激光熔覆作为一种制造技术,必须要求熔覆层的尺寸和性能

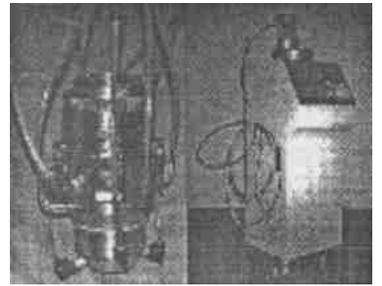


图 1 清华大学研制的用于激光快速制造的同轴送粉喷嘴和高精度送粉器

能沿各个方向保持一致,因而,在涂层熔覆中所用的侧向送粉系统无法满足要求,需要发展高性能的同轴送粉喷嘴;制造过程要求送粉量保持很高的均匀性,一般的送粉器也难以达到低速均匀性要求,这就要求发展高质量的精密送粉器。各国在发展激光熔覆快速制造技术时均首先研制各自高质量的同轴送粉熔覆系统并往往以专利形式加以保护。清华大学机械系激光加工研究中心已研制出适合于直接制造金属零件的各种规格的同轴送粉喷嘴和自动送粉器(见图 1),已申请相关发明专利两项。该喷嘴具有灵活方便的垂直装卸功能、对粉末流的动态均匀化功能、喷嘴内部部件的良好冷却以保证长时间稳定可靠地工作、出口光斑大小的调节功能、反射激光能量和反弹金属粉末的再利用功能。自动送粉器由单板微机控制,具备手动和自动编程控制功能,可由各种数控系统编程控制,能均匀连续地将金属粉末输送至工作表面并保证激光制造时的低速均匀送粉。上述同轴送粉喷嘴和送粉器已供应国内单位使用。

1.2 激光熔覆工艺优化与稳定性

激光熔覆制造作为层叠添加式制造过程,首先需要保证单道熔覆层的质量。熔覆层整体质量包括

熔覆层厚度、宽度、稀释率、缺陷率、成分、冶金结合状况及微观组织和性能等。熔覆层质量受许多因素影响,包括^[6-11](1)激光参数:激光功率、光束模式、光斑直径、光波波长;(2)材料特性:熔覆材料和基体材料的物理特性(热导率、熔点、热胀系数等)、熔覆材料对基材的浸润性、熔覆材料与基材的固溶度、熔覆材料对光束的吸收率等;(3)加工工艺参数:光束扫描速度、同步送粉速率、多道搭接时的搭接率;(4)环境条件:保护气体、预热、缓冷条件等。

为得到良好的熔覆层,上述条件均需要优化,其中,激光功率、光斑直径、扫描速度和送粉速度是关键的影响因素,它们共同作用确定了熔覆层的宽度和厚度,从而影响激光制造的形状、制造精度和效率。稀释率也是需要注意的因素,当稀释率高时,熔覆层凝固后较平,与基层结合较好;而稀释率太低时,熔覆层凝固后为球形,与基层结合较差。稀释率与激光功率成正比,而与扫描速度和送粉速度成反比。由此,在熔覆制造过程中,为保证质量,必须保证以下3点:(1)激光功率必须保证能够熔化基层;(2)稀释率必须保证能够使上层与下层紧密结合;(3)激光束必须保证在穿过熔覆粉末后,能够有剩余能量到达基层。要保证以上3点,必须调整好激光功率 P 、扫描速度 v 、送粉速度 M 。

激光熔覆直接制造不仅要求激光熔覆工艺的优化,更重要的是要保证激光熔覆过程的稳定性,这是影响激光熔覆直接制造精度的关键因素,其影响关系如图2所示,主要包括熔池温度的稳定性、熔池形状的稳定性的影响、喷嘴与熔池距离的稳定性、零件形状的影响、单层熔覆层的厚度稳定性及其多层叠加特性带来的温度累积效应^[12]等等。

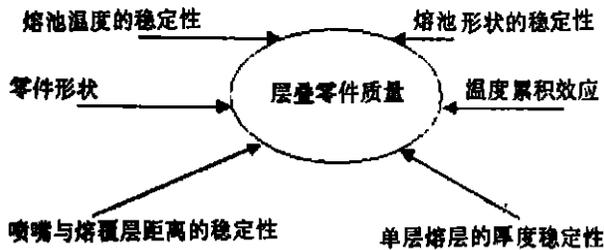


图2 激光直接制造质量的影响因素

要确保上述各因素的稳定性从而保证激光制造精度,首先需对激光熔覆制造系统的硬件设备的性能指标提出较高的要求,其中包括:(1)激光输出功率、光斑模式、光束指向的稳定性;(2)激光工作头聚焦镜片的热透镜效应要低;(3)同轴送粉喷嘴的对中性和粉末流的均匀性;(4)送粉器的送粉精度和可控

制性。

1.3 激光熔覆过程的检测与闭环控制

激光熔覆制造过程包含数百次数千次的层叠循环,单道熔覆过程上述诸多因素中的任何某一因素的不稳定性和层叠循环过程中可能产生的扰动会直接影响制造结果,一旦扰动因素循环增强,则制造过程将出现不可控结果,使得后续层叠过程无法进行。因此,除保证上述硬件设备条件的稳定性外,熔覆制造过程的检测与闭环反馈控制是极为重要的。

目前,国际上激光直接制造的研究发展的重点是熔覆过程中的检测与闭环控制系统研制^[13,14]。通过对熔覆过程中某些关键因素的实时检测,反馈闭环控制激光器输出功率、光束扫描速度、送粉速度和喷头升高高度来补偿制造过程中的外部环境变化和主要输入参数的不可预料随机变化。图3为某一激光熔覆制造系统的控制回路,该系统通过CNC、计算机CAD/CAM及检测单元将激光熔覆制造过程中各硬件装备和工艺软件均包含在一个控制回路中。国际上各研究机构对检测与闭环控制的研究发展各有特色,其中以美国方面的研究最为深入,美国密歇根大学已申请了闭环控制的一项专利。德国的几个研究机构也有较多的研究结果。我国清华大学机械系在国内率先进行了激光制造过程的检测与控制研究,已取得良好的进展。

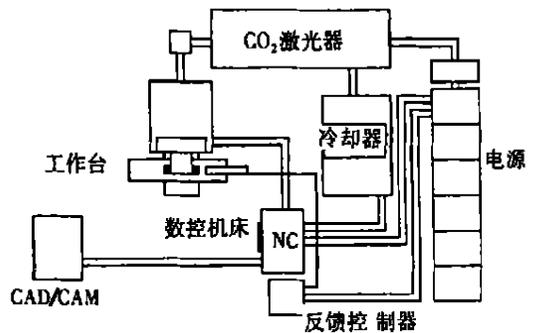


图3 激光直接制造系统的闭环控制示意图

1.4 激光熔覆直接制造金属零件实例

目前,国际国内已用激光熔覆制造技术快速制

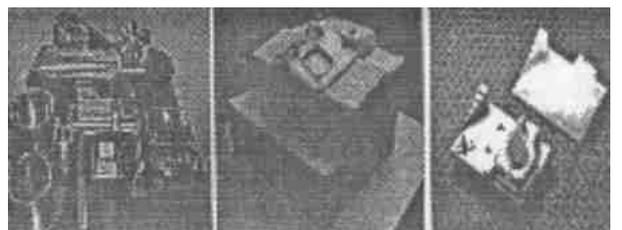


图4 LENS系统和DMD系统制造的典型金属零件

造出一些典型的金属零件和模具,如图 4 所示。图 4a,图 4b 分别为 Aeromet 和 Optomec 公司基于 LENS 系统制造的典型金属零件和模具。图 4c 为美国 POM 公司基于 DMD 系统制造的工具钢模具样品并与激光快速成型制作的光敏树脂模型的比较。

清华大学机械系激光加工研究中心基于 LRFM 系统制造了 973 项目“天体高能辐射的空间观测与研究”中子课题的硬 X 射线调制望远镜准直器,该零件材料为高熔点高密度钨基合金,薄壁圆筒状结构,内含筋板,用传统制造技术是极难胜任的,图 5 为其制造过程。



图 5 清华大学基于 LRFM 系统制造钨基合金望远镜准直器的过程

1.5 激光熔覆直接制造金属零件的应用领域

激光快速直接制造技术能够根据计算机三维立体模型经过单一加工过程快速地制造出形状、结构复杂的实体模型,较之于传统模型制造的铸锻轧焊车铣刨磨等一系列过程具有巨大的技术优越性,能大大缩短新产品开发到市场的时间,大大减少产品加工周期、大大降低加工成本,十分适应于现代技术快速、柔性、多样化、个性化发展的需求,在新型汽车制造、空间、航空、新型武器装备中的高性能特种零件和民用工业中的高精尖零件的制造领域将具有极好的应用前景,尤其是常规方法很难加工的梯度功能材料、超硬材料和金属间化合物材料的零件快速制造以及大型模具的快速直接制造上。激光熔覆直接制造技术的应用范围主要包括:特种材料复杂形状金属零件直接制造;模具内含热流管路和高热导率部位制造;模具快速制造、修复与翻新;表面强化与高性能涂层;敏捷金属零件和梯度功能金属零件制造;航空航天重要零件的局部制造与修复;特种复杂金属零件制造;医疗器械等。

2 激光熔覆制造金属零件今后的研究方向

激光熔覆直接制造金属零件今后的研究工作应着重在以下几个方面:(1)激光制造过程的模拟和模型建立;(2)进一步研究激光熔覆制造过程中关键因素的实时检测与闭环控制;(3)研究提高激光熔覆制造金属零件的尺寸精度和形状精度的措施;(4)研究激光制造获得高质量、无缺陷特定材料金属零件的优化工艺;(5)特种 CAD/CAM 软件的研制;(6)激光制造技术的应用性研究。

以上问题的解决将使人们对激光熔覆制造金属零件技术有一个全面的飞跃,使该技术能得到广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] 李彦生,李涤尘,卢秉恒.应用光学,1999,20(3):34~36.
- [2] 黄树槐,肖跃加,莫健华 *et al.*中国机械工程,2000,11(2):195~200.
- [3] 仲伟虹.宇航材料工艺,1999(3):30~34.
- [4] Lewis G K, Nemeč R, Milewski J *et al.* Directed Light Fabrication, ICALEO'94:17~22.
- [5] Murphy M L, Steen W M, Lee C. A Novel Rapid Prototyping Technique for the Manufacture of Metallic Components, ICALEO'94:31~40.
- [6] Gerken J, Hafenkamp H, Schmidt H. Rapid Prototyping/Manufacturing of Metal Components By Laser Cladding, 94RA025, ISATA'94 Proceedings: 85~91.
- [7] Campbell R I, Ray A J. A New Rapid Prototyping Process for Automotive Tooling Manufacture, 94RA015, ISATA'94 Proceedings: 59~63.
- [8] Staskewitsch E, Greul M. Rapid Prototyping of Functional Metallic Parts, 94RA019, ISATA, Proceedings: 65~70.
- [9] Martukanitz R P, Parks K D. Analysis of Hard Particle Retention In Laser Melt Pools, ICALEO 2000 Proceedings, Section D, 80~84.
- [10] Gebhardt A. Reconditioning of Machine and Engine Parts using High-Power LASERs, ECLAT'96 Proceedings: 373~381.
- [11] Sandig S, Wiesner P, Eckstein M *et al.* Rapid Metal Prototyping Using Laser Radiation, CISFFEL 6 Proceedings, 503~509.
- [12] Hoffmann E, Backes G, Gasser A *et al.* 激光与光电子,1997,3(1):25~32.
- [13] Koomsap P, Prabhu V V, Schriempf J T *et al.* Simulation Based Design of Laser Based Free Forming Process Control, ICALEO 2000 Proceedings, Section D, 11~20.
- [14] Donald K, Sylvia N. Intelligent Process Control for Laser Direct Metal Deposition, ICALEO 2000 Proceedings, Section D, 1~10.