

金属粉末熔化快速成型 技术的研究进展

Research Approach of Rapid Prototyping Technology of Metal Powder Melting

华中科技大学快速制造中心 周 钢 蔡道生 史玉升
武汉滨湖机电技术产业有限公司 吴 澄 黄 智



周 钢

华中科技大学讲师, 博士研究生。
主要从事反求工程和快速成型技术方面的
研究工作。

近年来诞生了选择性激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)金属粉末的快速成型技术,用它能直接成型出接近完全致密度的金属零件。SLM技术克服了选择性激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS)技术制造金属零件工艺过程复杂的困扰。用SLS技术制造金属零件的方法主要有:(1)熔模铸造法:首先采用SLS技术成型高聚

物(聚碳酸酯PC、聚苯乙烯PS等)原型零件,然后利用高聚物的热降解性,采用铸造技术成型金属零件。(2)砂型铸造法:首先利用覆膜砂成型零件型腔和砂芯(即直接制造砂型),然后浇铸出金属零件。(3)选择性激光间接烧结原型件法:高分子与金属的混合粉末或高分子包覆金属粉末经SLS成型,经脱脂、高温烧结、浸渍等工艺成型金属零件。(4)选择性激光直接烧结金属原型件法:首先将低熔点金属与高熔点金属粉末混合,其中低熔点金属粉末在成形过程中主要起粘结剂作用;然后利用SLS技术成型金属零件;最后对零件后处理,包括浸渍低熔点金属、高温烧结、热等静压(Hot isostatic Pressing, HIP)。这些方法所制造的金属零件机械性能受低熔点金属的影响,而且零件精度受成

型工艺过程的影响因素比较多。为此,德国Fraunhofer激光器研究所(Fraunhofer Institute for Laser Technology, ILT)最早提出了直接制造金属零件的SLM技术。

型工艺过程的影响因素比较多。为此,德国Fraunhofer激光器研究所(Fraunhofer Institute for Laser Technology, ILT)最早提出了直接制造金属零件的SLM技术。

选择性激光熔化技术的 基本原理

SLM技术是利用金属粉末在激光束的热作用下完全熔化、经冷却凝固而成的一种技术。为了完全熔化金属粉末,要求激光能量密度超过 $10^6\text{W}/\text{cm}^2$ 。目前用于SLM技术的激光器主要有Nd-YAG激光器、CO₂激光器、光纤(Fiber)激光器。这些激光器产生的激光波长分别为1064nm、10640nm、1090nm。金属粉末对1064nm等较短波长激光的吸收率比较高,而对10640nm等较长波长激光的吸收率较低。因此在

成型金属零件过程中具有较短波长激光器的激光能量利用率高,但是采用较长波长的CO₂激光器,其激光能量利用率低。

在高激光能量密度作用下,金属粉末完全熔化,经散热冷却后可实现与固体金属冶金焊合成型。SLM技术正是通过此过程,层层累积成型出三维实体的快速成型技术。

根据成型件三维CAD模型的分层切片信息,扫描系统(振镜)控制激光束作用于待成型区域内的粉末。一层扫描完毕后,活塞缸内的活塞会下降一个层厚的距离;接着送粉系统输送一定量的粉末,铺粉系统的辊子铺展一层厚的粉末沉积于已成型层之上。然后,重复上述2个成型过程,直至所有三维CAD模型的切片层全部扫描完毕。这样,三维CAD模型通过逐层累积方式直接成型金属零件。最后,活塞上推,从成型装备中取出零件。至此,SLM金属粉末直接成型金属零件的全部过程结束。

选择性激光熔化技术的研究现状与进展

目前,国外应用SLM技术可制造模具、工具、生物移植物等金属零件。但技术仍不够成熟,其应用领域还不够广泛。SLM技术的研究主要针对以下几个方面:成型装备、金属粉末、成型工艺、成型机理、成型件性能、成型过程模拟和成型件的应用。

1 选择性激光熔化装备

SLM装备的许多方面都影响成型工艺及成型件的精度、机械性能。在开发SLM装备方面,只有德国、日本、美国等少数几个国家的生产商成功地开发了商用装备。这些公司包括德国的MCP、TRUMPF,日本的MATSUUR和美国的PHENIX。这些公司SLM装备的不同之处主要体现在激光器、聚焦面光斑尺寸、铺粉方式和活塞缸铺粉层厚等方面。

MCP公司和PHENIX公司的SLM装备应用的激光器为100W光纤激光器,激光波长为1090nm,其主要工作模式为CW/Modulated,光纤激光器激光束的输出模式为TEM₀₀(Transverse Electromagnetic Modes);其光束横截面能量分布为高斯分布,且在传输过程中保持不变,光束质量好;激光束经聚焦后的激光光斑在30μm~250μm之间。

TRUMPF公司的SLM装备配备250W盘形激光器,激光波长为1030nm;光斑大小可变范围在200μm~400μm。

MATSUURA公司的SLM装备采用500W脉冲式CO₂激光器,激光波长10640nm,其峰值达1.5kW,频率达100kHz。光斑大小为600μm。

除了以上公司进行SLM装备的商业生产外,还有包括比利时鲁汶大学、日本大阪大学等在内的高校从事SLM装备的研制。这些高校自行研制的SLM装备和上述公司商用生产的装备相似,主要是在激光器、聚焦光斑、铺粉层厚、铺粉方式等方面有所不同。

目前国内主要有华中科技大学在这方面进行了研究,并不断地跟踪SLM技术的最新发展情况。华中科技大学快速制造中心已经研制出拥有自主知识产权的商品化SLM设备——HRPM系列金属粉末熔化成型设备。该设备采用了150W CW Nd-YAG激光器和100W CW 光纤激光器,由武汉滨湖机电技术产业有限公司生产制造,已在市场上进行了销售,打破了国外公司在这方面的垄断,大大降低了该设备的价格,方便了国内的广大用户。

2 选择性激光熔化技术所用粉末

适合SLM技术的金属粉末比较广泛。如果自行设计适合SLM成形的材料成分并制备粉末,其造价比较高,不经济。因此,目前用于SLM技术研究的粉末主要来源于商用粉末。可以研究它们的成型性,从而提出该技术选用粉末的标准。

用于SLM成型的粉末可以分为混合粉末、预合金粉末、单质金属粉末3类。

(1) 混合粉末。

混合粉末由一定成分的粉末经混合均匀而成。设计混合粉末时要考虑激光光斑大小对粉末颗粒粒度的要求。Kruth J. P.等人研制了铁基混合粉(包含Fe, Ni, Cu, Fe₃P)。因激光光斑为600μm,所以要求混合粉中颗粒的最大尺寸不能超过该光斑直径。应用这种混合



粉的SLM成形件不能满足100%致密度要求,因此其机械性能还有待进一步提高。鲁中良等研制了Fe-Ni-C混合粉末,其组成成分为:ω(Fe)=91.5%、ω(Ni)=8.0%、ω(C)=0.5%。Fe、Ni粉末为-300目,C粉为-200目。应用该混合粉末的SLM成型件致密度较低,存在大量的孔隙。对混合粉的SLM成型研究表明,混合粉的成型件致密度有待提高,其机械性能受致密度、成分均匀度的影响。

(2) 预合金粉末。

根据预合金主要成分的不同,预合金粉末可以分为铁基、镍基、钛基、钴基、铝基、铜基、钨基等。

铁基合金粉末包括工具钢 M2、工具钢 H13、不锈钢 316L (1.4404)、Inox 904L、314S-HC、铁合金 (Fe-15Cr-1.5B), 其 SLM 成型结果表明: 低碳钢比高碳钢的成型性好, 成型件的相对致密度仍不能完全达到 100%。

镍基合金粉末包括 Ni625、NiTi 合金、Waspaloy 合金、镍基预合金 ($\omega(\text{Ni})=83.6\%$ 、 $\omega(\text{Cr})=9.4\%$ 、 $\omega(\text{B})=1.8\%$ 、 $\omega(\text{Si})=2.8\%$ 、

95%。

钨合金粉末主要有钨铜合金, 其 SLM 成型结果表明: 成型件的相对致密度仍然达不到 100%。

(3) 单质金属粉末。

单质金属粉末主要有钛粉, 其 SLM 成型结果表明: 钛粉的成型性较好, 成型件的相对致密度可达 98%。

综上所述, SLM 技术所用粉末主要为单质金属粉末和预合金粉末。单质金属粉末和预合金粉末的成型件的成分分布、综合机械性能较好。所以成型工艺研究主要针对预合金、

型件致密度是一个关键技术指标, 受激光波长、激光功率密度和粉末成分的影响。在 CO_2 激光 (波长为 10640nm) 作用下成型件致密度较低, 这与金属粉末对激光的较低吸收率、激光功率密度有关; 而 YAG 激光 (波长为 1064nm) 作用下的成型件致密度较高, 是因为其激光功率密度高, 金属粉末对激光的吸收率高。此外, 粉末化学成分是影响其润湿性的主要因素, 所以低碳成分的铁基合金粉末的润湿性好, 其 SLM 成型件的致密度高。

4 选择性激光熔化成型机理

在 SLM 成型过程中, 提高粉末的成型性, 就必须提高液态金属的润湿性。在成型过程中, 若液态金属成球, 则说明液态金属的润湿性不好。液态金属对固体金属的润湿性受工艺参数的影响, 因此可优化工艺参数来提高特定粉末的润湿能力。研究表明, 液态金属在缺少与氧化物发生化学反应的情况下是不能润湿固体氧化膜的, 因此在成型过程中要防止氧化; 虽然添加合金元素 P 可提高润湿性, 但是元素 P 会影响成型件的机械性能。

5 选择性激光熔化成型件性能

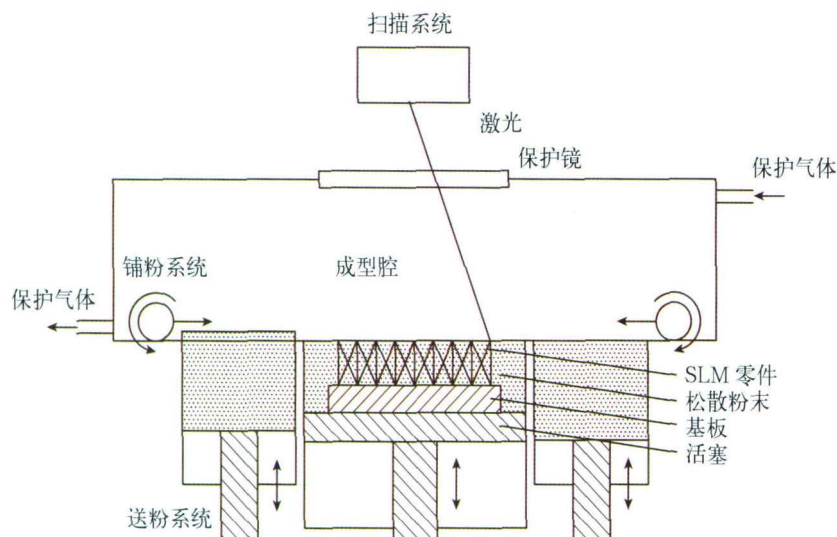
SLM 成型件性能主要包括残余应力、残余应变、显微组织和机械性能。

(1) 残余应力、残余应变。

金属粉末在 SLM 成型过程中, 会因温度梯度产生热应变和残余应力, 进而影响成形过程。研究表明: 翘曲、裂纹、热应力、表面粗糙、显微组织等问题主要是因成型过程中激光作用下的快热快冷 (淬火) 所致。为此, 提出了双激光 (CO_2 、Nd-YAG) 扫描系统方案。

(2) 显微组织。

工艺参数会影响 SLM 成型件的显微组织。如果激光扫描速度快, 那么冷却速度也会较快, 使显微组织更细, 有利于提高 SLM 成型件的机械



SLM 成形技术原理

$\omega(\text{Fe})=2.0\%$ 、 $\omega(\text{C})=0.4\%$), 其成型结果表明: 成型件的相对致密度可达 99.7%。

钛合金粉末主要有 TiAl_nV_4 合金, 其 SLM 成型结果表明: 成型件相对致密度可达 95%。

钴合金粉末主要有钴铬合金, 其 SLM 成型结果表明: 成型件相对致密度可达 96%。

铝合金粉末主要有 Al6061 合金, 其 SLM 成型结果表明: 成型件的相对致密度可达 91%。

铜合金粉末包括 Cu/Sn 合金、铜基合金 (84.5Cu-8Sn-6.5P-1Ni)、预合金 Cu-P, 其 SLM 成型结果表明: 成型件的相对致密度可达

单质金属粉末的工艺优化, 以提高成型件的致密度。

3 选择性激光熔化成型工艺

SLM 成型工艺主要研究工艺参数对粉末成型轨迹和致密度的影响规律。

(1) 工艺参数对成型轨迹的影响。在 SLM 成型过程中, 成型轨迹特征受工艺参数的影响。成型轨迹主要包括激光束对粉末的单点、单道扫描, 单层、多道扫描成型的轨迹, 通过对成型轨迹的评价来研究工艺参数对成型轨迹的影响规律。

(2) 工艺参数对致密度的影响。金属零件致密度是影响其机械性能的一个主要因素。金属粉末 SLM 成

性能。

(3) 机械性能。

SLM 成型件的机械性能主要包括强度、硬度、精度和表面粗糙度等。SLM 成型件的弯曲强度受激光工作模式的影响,在脉冲及其反冲作用力工作模式下的 SLM 成型件,其最大抗弯曲强度为 630MPa,未经任何处理的成型件表面粗糙度达 $10\mu\text{m} \sim 30\mu\text{m}$ 。因 SLM 成型件的相对致密度未达到 100%,所以抗弯强度等机械性能会受到一定的影响。

6 选择性激光熔化成型过程的数值模拟

SLM 成型过程是一个激光束熔化粉末、相变和凝固冶金结合的过程。在 SLM 成型过程中,粉末在极短(毫秒级)的时间内熔化,温度梯度大,通过试验方法测量其温度动态过程比较困难;而通过有限元法模拟分析并揭示其成型过程,能够为制定合理的工艺参数、减少试验次数、成型高质量零件提供重要的理论指导。

7 选择性激光熔化成型技术的应用

选择性激光熔化成型技术可以直接成型金属零件,主要有生物医用零件、散热器零件、超轻结构零件、微型器件等。因此,SLM 技术在成型薄壁零件、超轻结构零件方面的研究及应用较多。

8 选择性激光熔化与热等静压(SLM/HIP)复合成型技术

SLM 成型件内部存在残余应力且致密度仍有待提高,因此其机械性能受到了影响。为提高成型件的综合机械性能,可以采用 SLM 与热等静压(Hot Isostatic Pressing, HIP)复合成型技术。但是这种针对金属粉末的 SLS 与 HIP 相结合的复合成型技术还不成熟,SLS 技术难以直接成型致密外壳。为解决这方面的不足,使 SLM 技术直接成型致密金属外壳来替代包套,从而实现 SLM 与 HIP 的复合成型技术,为快速成型技术的应用提供新的发展思路。

选择性激光熔化技术的发展趋势

目前我国正在大力发展飞机制造业,选择性激光熔化技术在飞机零件制造上具有不可比拟的优势,不仅可以快速地生产出小批量飞机零件,而且在产品开发阶段可大大缩短样件加工时间,节省大量开发费用。

通过以上的分析,SLM 技术的优点总结如下:

(1) 能将 CAD 模型直接制成终端金属产品,只需要简单的后处理或表面处理工艺。

(2) 适合各种复杂形状的工件,尤其适合内部有复杂异型结构(如空腔、三维网格)、用传统机械加工方法无法制造的复杂工件。

(3) 能得到具有非平衡态过饱和和固溶体及均匀细小金相组织的实体,致密度几乎能达到 100%,SLM 零件机械性能与锻造工艺所得相当。

(4) 使用具有高功率密度的激光器,以光斑很小的激光束加工金属,使得加工出来的金属零件具有很高的尺寸精度(达 0.1mm)以及很好的表面粗糙度值($R_a=30\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$)。

(5) 由于激光光斑直径很小,因此能以较低的功率熔化高熔点金属,使得用单一成分的金属粉末来制造零件成为可能,而且可供选用的金属粉末种类也大大拓展了。

(6) 能采用钛粉、镍基高温合金粉加工解决在航空航天中应用广泛的、组织均匀的高温合金零件复杂件加工难的问题;还能解决生物医学上组分连续变化的梯度功能材料的加工问题。

由于 SLM 技术具有以上优点,它具有广阔的应用前景和广泛的应用范围,如机械领域的工具及模具(微制造零件、微器件、工具插件、模具等)、生物医疗领域的生物植入零件或替代零件(齿、脊椎骨等)、电子

领域的散热器件、航空航天领域的超轻结构件以及梯度功能复合材料零件等。

特别是在航空航天领域,应用较多的是典型的多品种小批量生产过程,尤其是在其研发阶段,SLM 技术具有不可比拟的优势。有些复杂的工件,采用机加工不但浪费时间,而且严重浪费材料,一些复杂结构甚至无法制造;铸造能解决复杂结构的制造问题并提高材料利用率,但钛和镍等特殊材料的铸造工艺非常复杂,制件性能难以控制;锻造可有效提高制件性能,但需要昂贵的精密模具和大型的专用装备,制造成本很高。而采用 SLM 方法则可以很方便、快捷地制造出这些复杂工件,在产品开发阶段可以大大缩短样件的加工生产时间,节省大量的开发费用。我国正在全力推进大飞机的研发工作,SLM 技术将可以在其中发挥巨大的作用。

可以说,SLM 技术代表了快速制造领域的发展方向,运用该技术能直接成型高复杂结构、高尺寸精度、高表面质量的致密金属零件,减少制造金属零件的工艺过程,为产品的设计、生产提供更加快捷的途径,进而加快产品的市场响应速度,更新产品的设计理念和生产周期。SLM 技术在未来将会得到更好、更快的发展。

但是,由于巨大的市场价值与商业机密,目前 SLM 技术的发展与推广还存在一些问题。主要是 SLM 设备十分昂贵,工作效率低;并且由于大工作台范围内的预热温度场难以控制,工艺软件不完善,制件翘曲变形大,因而无法直接制作大尺寸零件,目前还只能制作一些尺寸较小的工件。只有解决以上问题,研发出可靠性和技术指标达到国际先进水平、价格低廉、具有自主知识产权的 SLM 设备、成型材料和配套的工艺路线等,才能在我国推广这项技术。

(黄编 澳蓝)