金属零件激光直接快速成形技术的研究(上)——国外篇

张 凯^{1,2} 刘伟军¹ 尚晓峰^{1,2} 王天然¹

1 中国科学院沈阳自动化研究所 2 中国科学院研究生院

摘 要:金属零件激光多层熔覆直接快速成形技术是目前快速成形领域的研究热点,本文系统介绍了国内外 激光熔覆直接快速制造成形工艺的最新研究进展。研究表明,金属零件激光熔覆直接快速成形工艺具有常规制造 方法无法比拟的优势,有着广阔的发展前景。

关键词 激光多层(三维)熔覆,直接快速成形,金属零件

Research on Technology of Directly Laser Rapid Manufacturing Metal Part

Zhang Kai Liu Weijun Shang Xiaofeng et al

Abstract : The new technology, directly rapid prototyping of metal components by laser multi-layer cladding, is a hot topic in the RP (rapid prototyping) field. The latest achievements about manufacturing metal parts by using the new technology are described in detail, which shows that comparative to the conventional technologies, the new one holds many overwhelming advantages and greatly developing promises.

Keywords :Laser multi-layer cladding, directly rapid prototyping, metal parts

1 引言

快速原型技术(Rapid Prototyping, RP)是 20世纪 80年代末兴起并得到迅速发展的崭新的制造技术, 被认为是近代制造技术发展史上的又一个里程碑。 快速原型技术作为一种与传统的去除材料加工相反 的加工技术——增材制造技术,自出现以来已对制 造业产生了深远的影响,已在产品设计评估与审校、 零件功能实验、快速模具制造等方面取得重要应用, 并在汽车、电子、国防军事、航空航天、家电、医学、建 筑等领域得到成功应用。由于采用快速原型技术不 仅可以显著缩短新产品的开发周期,节省开发费用, 而且可以大大降低产品的开发风险,提高产品在市 场上的竞争力。在早期的快速原型技术当中,所使 用的材料多为纸、塑料、蜡、尼龙等,由于这些材料的 强度等性能很低,由此制得的零件大多只用作实际 金属零件的原型或模型,不能作为功能件直接满足 使用要求 这种致命的局限性大大限制了该项技术 在现代装备制造业的大规模应用。在这样的历史背

景下,金属零件激光直接快速成形工艺技术迅速成 为 RP 领域乃至整个制造装备业的研究热点,国际 上众多的学者和研究机构纷纷投入到这项新技术的 研究当中,短短几年间诞生了多种基于此种成形原 理和加工方法的先进制造技术。

2 金属零件激光直接快速成形技术的 原理及特点

金属零件的激光直接快速成形技术融合了选择 性激光烧结技术和激光熔覆技术,以"离散+堆积" 的成形思想为基础,首先在计算机中生成最终功能 零件的三维 CAD 模型,然后将该模型按一定的厚度 分层'切片",即将零件的三维数据信息转换为一系 列的二维轮廓几何信息,层面几何信息融合成形参 数生成扫描路径数控代码,控制成形系统采用同步 送料激光熔覆的方法按照轮廓轨迹逐层扫描堆积材 料,最终形成三维实体零件或仅需进行少量加工的 近形件(见图1)。

从金属零件激光直接快速成形技术的原理可以

Model

(a) CAD 模型

图 1

 (b)加工过程
 (c)

 金属零件激光直接快速成形技术原理示意图

(c)最终机加工零件

看出,该技术与 RP 技术的基本思路是一致的,其实 质就是 CAD 软件驱动下的激光三维熔覆过程。因 此,它具有与快速原型技术相同的特点,如柔性好 (不需要专用工具、模具和夹具),加工速度快、对零 件的复杂程度基本没有限制等。除此之外,金属零 件激光直接快速成形技术还具有一些独特的优 点^[1]①全面提高材料的力学和耐腐蚀性能,②制造 速度快,节省材料,降低成本;③可在零件不同部位 形成不同的成分和组织;④可以很方便地加工高熔 点、难加工的材料;⑤可以加工具有倾斜薄壁、悬垂 结构、复杂空腔和内流孔道的特殊零件;⑥成形的近 形件仅需少量的后续机加工。

3 国外金属零件激光直接快速成形技术的研究进展

1979 年美国联合技术研究中心(United Technologies Corporation JUTC)利用高能束沉积多层金属 来获得大体积金属零件,开了金属零件激光直接快 速成形技术研究的先河。UTC 在 1982 年把该项技 术命名为" LAYERGLAZE ^[2],提出在成形过程中可 以使用的加热源为激光束或电子束,而送给料可以 选择粉末或丝材。在早期的实验当中,UTC的研究 人员就意识到该项技术具有成形成分梯度材料等独 特的优势,并加工了一个具有两种不同合金成分的 镍基合金燃气轮机涡轮盘^{3]}。然而、受当时相关理 论基础和计算机技术(主要指零件的 3D 计算机模 型及分层切片等图形处理技术)发展水平的限制, "LAYERGLAZE"技术的发展也遇到很多困难,比如 成形件容易开裂、难于加工轴对称和形状复杂的零 件等等^[4]。借助 RP 技术的产生和计算机技术的飞 速发展,直到20世纪90年代中期才促成了多种基 干激光熔覆的金属零件激光直接快速成形技术的实 质性应用。

3.1 LENS 成形工艺的研究

20世纪 90 年代中期,UTC 与美国桑地亚国家 实验室(Sandia National Laboratories)合作开发了使用 Nd :YAG 固体激光器和同步粉末输送系统的全新理 念的激光工程化净成形技术(Laser Engineered Net Shaping,LENS)^{4~9]},成功地把同步送粉激光熔覆技 术和选择性激光烧结技术融合成先进的激光直接快 速成形技术(系统示意图见图 2),使 RP 进入了激光 近形制造的崭新阶段。

LENS 系统主要由连续 Nd :YAG 固体激光器、可 调整气体成分的手套箱、多轴计算机控制定位系统 和送粉系统四部分构成。其中 Nd :YAG 激光器功率 700W,波长 1.064µm,此波长有利于金属元素吸收激 光热辐射,使用 6 英寸焦距的平凸透镜把激光束聚 焦到加工平面上;数控运动系统可以灵活地加工复 杂的零件,甚至成形无需支撑的具有倾斜薄壁和悬 垂结构的近形件;为了克服侧向气体送粉对扫描方 向的限制,Sandia 开发了一种环形粉末喷嘴(见图 3)^{11]}四个喷嘴的交点和激光的焦点位置相重合, 并且汇聚在加工平面上,集中的能源避免了引入过 多的热量来形成熔池,从而减小了热影响区,改善了 材料性能,送粉装置的独特设计可以通过控制水平 轴的转速来实现送粉量的精确调节(见图 4);为避 免加工过程中金属材料与空气中氧、氮等元素发生 反应,整个加工过程均在由惰性气氛保护下的手套 箱中进行。



图 2 LENS 系统组成示意图



图 3 环形粉末喷嘴示意图



1.载气输入 2.载气输出 3.电机 4.送粉器支座 5.贮粉器 6.接头
 图 4 LENS 送粉装置结构示意图

Sandia 实验室对多种材料的 LENS 工艺进行了 研究,所使用的材料包括镍基高温合金、钢、钛合金、 钨等。与传统方式制件相比,在塑性没有损失的情 况下,采用 LENS 工艺制造的近形金属件的强度显 著提高。通过调整工艺参数,成形件的最小特征尺 寸可达 0.03 英寸;通过对控制软件进行研究和改 进,有效地提高了该技术的加工精度,制造的近形件 与 CAD 模型的设计公差仅为 0.002~0.015¹²]。特 别引人注目的是 通过调节送粉装置 逐渐改变粉末 成分和送粉速度,在一个零件中实现了材料成分的 连续变化^{13]}。这一结果表明激光直接快速成形技 术在加工异质材料(功能梯度材料、复合材料)方面 的特有优势,采用 LENS 技术可以很容易地实现零 件不同部位具有不同的成分和性能,为合理化设计 零件提供了一个灵活的实现手段。为了了解 LENS 加工过程中热影响区的温度梯度状况对成形材料性 能和几何外形的影响 ,Griffith M L^[14~15]等人采用红 外热成像仪记录了 LENS 工艺中热影响区的温度场 分布,并利用高速摄影的方法测量热影响区的温度 梯度和等温线分布,通过监控 LENS 工艺中的热信 号在现场中实时校准测量仪器,并结合传感器和反 馈算法实时调整参数、控制零件的制造过程(见图 5)。但美中不足的是该实验室的制件成形效率较 低 其堆积速率仅为 0.5 in³/h。 1998 年以来 Optomec Design Company 开始致力于 LENS 技术的商业开发, 近来推出的第三代成形机 LENS 850-R(见图 6)具有 七轴运动控制系统 Nd :YAG 激光器标称功率 4kW, 工作空间为 5×3×3 立方英尺 组成了更加强大灵 活的 LENS 系统。



图 5 LENS 热成像实验装置示意图



图 6 Optomec 公司第三代成形机 LENS 850-R

3.2 Lasform 成形工艺的研究

美国 AeroMet 公司在 Defense Advanced Research Projects Agency 和 Naval Research Office 的联合支持 下,与 John Hopkins University、Penn State University、 MTS Systems Corp 合作研究开发了 Lasform(Laser Forming)技术^[16~21]。AeroMet 公司的主攻方向是军 事和商业领域内航空钛合金构件的激光近形制造技 术 成形的钛合金构件主要用在实际飞机上 构件达 到近终形 致密度高且高度冶金结合 力学性能与传 统方法生产的零部件相当。Lasform 的技术原理与 LENS 完全相似,所不同的是该系统(见图 7、图 8)采 用了 14kW 和 18kW 的大功率 CO, 激光器,并且其惰 性气体保护箱的尺寸也达到直接制造实用零件的要 求,工作空间为3×3×1.2m³,工作时保护箱内充以 氩气,氧含量小于10ppm;其沉积制造装置采用5轴 运动控制系统, x—y 工作台可以承受 20000 磅载荷 的重量。在研究开发中 AeroMet 还特别考虑了粉末 堆积的速率问题。通过这些改进,该公司应用 Lasform 技术的制造效率有了明显的提高,其单层堆积 厚度达到 4mm,单道堆积宽度达到 13mm,堆积速率 达到 10in³/h 使该公司采用这一技术进行大体积零 件的制造成为可能。当然,由于粉末堆积速率的提 高 特别是单层厚度和单道宽度的增大 必然降低零 件的成形精度 因此该公司所制造的零件通常需要 后续机加工。

近来,AeroMet的研究有了更加实质性的进展, 生产的钛合金结构件不断在实际飞机上获得应用, 并且在使用中表现出良好的力学性能和抗疲劳性 能,这些Lasform制件不仅性能超出传统工艺制造的 零件,同时由于节约材料、节省机加工工序,使得其 制造成本降低20%~40%,生产周期也缩短30%~ 50%。Lasform技术除了在国防制造业、战斗机、武 器系统等军事领域有着越来越广泛的应用外,还可 用于制备功能梯度材料及修复大型金属零件。



图 7 Lasform 成形系统



图 8 Lasform 成形示意图

3.3 DLF 成形工艺的研究

美国 Los Alamos 国家实验室在美国能源部的支 持下,与SyntheMet合作,开发了被称作"直接光学制 造 Directed Light Fabrication ,DLF)"的金属零件快速 成形技术^[22~29]。DLF 在金属零件的成形原理上和 LENS 基本相同,也是一种以激光作为能源将金属粉 末熔化、在计算机的控制下逐层沉积、直至制造出整 个金属零件的快速成形技术。DLF 与 LENS 的区别 主要在干所使用的激光器功率、沉积速率、层面扫描 路径的数据存储格式以及数控机床的可动轴数的不 同。LENS 技术是在计算机中建立 CAD 模型后,把 模型离散成无数的三角形面片,存为 STL 格式文件, 然后再分层切片,生成层面扫描路径几何信息;而 DLF 工艺是直接由 CAD 模型分层获得数控加工路 径格式的文件,避免了生成庞大的 STL 文件时所产 生的数据冗余和错误,提高了零件成形的效率和精 度^[30,31]。DLF采用功率为 2kW 的 Nd:YAG 固体激 光器 同 LENS 一样采用同轴送粉系统 ,沉积速率为 12cm³/h。DLF 的数控机床采用五轴联动,即工作台 可沿 x, y 方向水平运动 同时可以在 x - y 平面内 围绕z 轴转动以及相对于z 轴进行倾斜;此外,还配 合有激光头在 z 方向的垂直运动。灵活的数控系统 使得 DLF 可以生产具有悬垂结构的金属零件。DLF 的加工过程也是在充满保护气体——氩气的手套箱 中进行的 氩气循环使用的过程中会通过一个真空 干燥器,用来保持0,和H,0的含量小于5ppm;氧气 监控器用作连锁装置在氧气侵入的时候可以关闭系 统 :DLF 还有一个未熔金属粉末的回收再利用装置, DLF 的工艺原理和多轴运动系统与手套箱设备分别 见图 9³⁰和图 10³¹。DLF 技术通过调整激光功率 和扫描速度,可以使单层熔覆厚度控制在0.3~ 2.5mm 范围内,而成形零件的精度可以控制在± 0.12mm 范围内,表面粗糙度约10µm。采用 DLF 工 艺不仅可以直接成形具有复杂内部孔腔结构的金属 件 使得用传统工艺需要多道工序才能加工出的零

件应用 DLF 工艺只需一步就可实现,而且还可完成 用传统方法无法胜任的金属零件的近形制造。此 外 独特的五轴运动系统和可以同时输送四种不同 成分粉末的送粉装置使 DLF 在加工高致密度、异质 材料方面表现出显著的优势。



图 9 DLF 工艺原理示意图



图 10 DLF 多轴运动系统和手套箱设备

3.4 SDM 成形工艺的研究

美国 Stanford University 和 Carnegie Mellon University 合作开发了形状沉积制造技术(Shape Deposition Manufacturing SDM)^{32~35}]。SDM 工艺把增材制造和 减材制造相结合,并且在沉积制造过程中使用了牺 牲支撑结构,其工艺流程示意图见图 11^[32]。SDM 工 艺最大的特色在于融入了实体自由制造、焊丝沉积 和层面数控平整加工的激光多层熔覆技术:采用 2.4 kW Nd :YAG 激光器加工致密金属零件,材料沉 积速率约 30g/min 沉积过程中使用焊炬熔化金属丝 形成熔滴、滴落并凝固在基材上,这样逐点、逐线、逐 层熔凝金属材料 ,在沉积完每一层后都进行表面和 侧面轮廓的机加工,直至加工出整个零件³³]。 层面 平整加工能够精确成形斜面或曲面 避免了阶梯效 应的产生,可以在增加单层沉积厚度的情况下获得 高精度的成形件(见图 12)^{32]}但是成形过程中需要 生成轮廓加工文件即增加了计算机程序的复杂度。 其次 SDM 与 LENS、 DLF 等不同之处在于使用了支 撑结构,这样不必借助于 5 轴或 6 轴运动控制系统 就能够实现悬垂结构件的加工;当加工金属零件时, 通常使用铜来作为支撑结构,当成形完毕后可以很 容易地用硝酸去除铜等支撑结构;支撑结构使得 SDM 在加工全装配机构和具有复杂内部特征的零 件等方面表现出独特的优势。此外,用 SDM 也可以 成形异质材料和等角冷却通道的金属注射模具^[32]。



图 12 有无轮廓加工的倾斜侧面比较图

3.5 DMD 成形工艺的研究

美国密歇根大学(University of Michigan) Mazumder 等人研究开发了直接金属沉积技术(Direct Metal Deposition ,DMD)^{36~38}],融合激光、传感器、计 算机数控平台、CAD/CAM 软件、熔覆冶金学等多种 技术的闭环控制 DMD 系统能够制造出适于直接应 用的金属零件。DMD 与 LENS 或 Lasform 的主要区 别在于 DMD 能实时反馈控制熔覆层高度、化学成份 和显微组织(见图 13、图 14)。DMD 成形材料的种类 范围很广,包括不锈钢、工具钢、镍基合金以及其它 高温合金等 材料沉积速度可以达到 4cm³/min ,1998 年 美国 Michigan 大学成立了 POM(Precision Optical Manufacturing)公司,专门从事 DMD 技术在商业和国 防等领域的应用推广工作。POM 公司开发的最新 设备 DMD5000 使用 6kW CO, 激光器 最大扫描速度 达到 170mm/s,加工零件体积范围为 1 × 0.5 × 0.5m³采用5轴数控加工中心,可以灵活沉积金属 粉末以成形复杂的功能零件。此外 密歇根大学应 用 DMD 技术开发了一种新方法用于设计和制造基 干多材料沉积的功能梯度材料,该方法的整个系统 结构包括计算机集成的三种核心技术:同质设计方 法 homogenization design method ,HDM) 异质实体模 型 heterogeneous solid modeling ,HSM)和直接材料沉 积 direct material deposition ,DMD),可以设计合成材

料的成分和显微结构以获得理想的材料性能。



图 13 DMD 反馈式同轴送粉装置示意图



图 14 工作中的 DMD 反馈式同轴送粉装置

3.6 CMB 成形工艺的研究

德国弗朗和夫生产技术研究所(Fraunhofer Institute for Production Technology)融合材料添加和去除方 法开发了控制金属堆积技术(Controlled Metal Buildup,简称 CMB)^{39,40]},该技术的原理与 LENS/ DLF相似,但不是用金属粉末而是用基于激光沉积 焊接技术的金属焊丝作为原材料(见图 15),并在 CMB 系统上配备了铣切装置,在扫描沉积了一层 后利用铣切来加工每一层的表面轮廓使之平整,这 样就改善了零件的精度和表面光洁度(见图 16)。 据报道在制造不锈钢零件时,可以达到 100% 的致 密度。CMB 加工间的体积为 600 × 600 × 600mm³,加 工精度 \pm 0.02mm。



图 15 基于激光沉积焊接的 CMB 堆积加工示意图

3.7 LAMP 成形工艺的研究

2001 年,美国 Missouri-Rolla 大学的 Liou 等人成 功开发了一套五轴混合 PR 系统,该系统采用的激 光辅助制造工艺(Laser Aided Manufacturing Process, LAMP)融合了沉积—去除制造技术^[41,42],由激光系



图 16 CMB 表面和轮廓平整加工示意图

统、五轴数控加工中心、粉末供给系统等组成;其去除机加工过程与 SDM、CMB 类似,增加了单层以至于整个零件的尺寸和表面精度。此外,该系统集成了视觉系统、激光位移传感器、温度传感器等监视系统和实时控制系统,这些子系统用来实时控制、监视和调节加工参数,管理整个激光金属沉积过程,可以显著提高成形件的质量和精度。该系统使用 2.5kW Nd :YAG 高能激光;五轴数控系统可以加工结构复杂、具有隐蔽特征或悬垂特征的零件,同时省去了支撑结构和后续机加工;两个独立电机控制的螺旋送粉器可以加入不同的材料成形功能梯度材料或复合材料。

此外,美国 The Ohio State University 和 University of Idaho、英国 University of Birmingham 和 University of Liverpool、加拿大国家科学院(NRC·CNRC)集成制造 技术研究所、德国汉诺威激光中心等在当地政府的 资助下,也进行了激光直接快速成形金属零件方面 的研究,并且都取得了一定的研究成果。

4 结语

金属零件激光直接快速成形工艺技术在国际上 的广泛应用和迅猛发展,展现了该技术的广阔发展 前景,代表了 RP 技术发展的方向。

参考文献

- 李延民.激光立体成形工艺特性与显微组织研究[博士 学位论文].西安:西北工业大学 2001
- 2 Brown C O, Breinan E M, Kear B H. 1982: United States Patent
- 3 Snow D B , Breinan E M ,Kear B H. Rapid solidification processing of super alloys using high power lasers. Super Alloys 1980, 1980
- 4 M L Griffith ,D M Keicher ,et al . Free form fabrication of metallic components using laser engineered net shaping(LENSTM). Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium ,August 12 ~ 14 ,1996 ,Austin ,TX ,p. 125
- 5 John E Smugeresky, Dave M Keicher, Joseph A Romero, Michelle L Griffith, Lane D Harwell. Using the laser engineered

net shaping(LENS) process to produce complex components from a CAD solid model. Photonics West SPIE Proceedings-Laser as Tools for Manufacturing Nolume 2993, 1997, p.91

- 6 F Klocke, H Wirtz. Direct manufacturing of metal prototype tools.Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, August 12 ~ 14,1996, Austin ,TX, p. 141
- 7 E Schlienger ,D Dimos ,M Griffith ,J Michael , et al. Near net shape production of metal components using LENS. Proceedings of the Third Pacific Rim International 8 Conference on Advanced Materials and Processing ,July12 ~ 16 ,1998 ,Honolulu ,HI ,p. 1581
- 8 C L Atwood , M L Griffith , M E Schlienger , L D Harwell , M T Ensz , D M Keicher , M E Schlienger , J A Romero , J E Smugeresky. Laser engineered net shaping (LENS): a tool for direct fabrication of metal parts. Proceedings of ICALEO '98 , November 16 ~ 19 , 1998 , Orlando , FL , p. E – 1
- 9 Griffith M L, Schlienger E, Atwood C L, Romero J A, Smugeresky J E, Harwell L D, Greene D L. Using laser engineered net shaping LENS to fabricate metal parts. Proceedings of the Rapid Prototyping and Manufacturing Conference 1997. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers, 22 ~ 24 April 1997
- 10 Schwendner K I, Banerjee R, Collins P C, Brice C A, Fraser H L. Direct laser deposition of alloys from elemental powder blends. yet to be published, 2000
- 11 J T Schriempf ,et al. Advances in pwder metallurgy and particulate materials. Vol. 3(Princeton , NJ :Metal Powder Industries Federation , 1997) , pp.21 – 51 ~ 2 – 59
- 12 Peter C Collins , B S , M S. A combinatorial approach to the development of composition-microstructure-property relationships in titanium alloys using directed laser deposition [Dissertation]. USA : The Ohio State University , 2004
- 13 Griffith M L , Harwell L D , Romero J A , Schlienger E , Atwood C L , Smugeresky J E. Multi-material processing by LENS. Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin , TX : University of Texas at Austin Publishers , August 1997 ;p. 387
- 14 Griffith M L , Schlienger M E , Harwell L D , Oliver M S , Baldwin M D , Ensz M T , Smugeresky J E , Essien M , Brooks J , Robino C V , Hofmeister W H , Wert M J , Nelson D V. Thermal behavior in the LENS process. Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium , Austin , TX , August 1998 : p.89
- 15 M L Griffith , M E Schlienger , L D Harwell ,et al. Understanding thermal behavior in the LENS process. Materials and Design , 20 (1999): 107 ~ 113
- 16 Arcella F G , Abbott D H ,House M A. Rapid laser forming of titanium structures. Proceedings of the Powder Metallurgy World

Conference , Granada , Spain , $18\sim 22$ October 1998

- 17 AeroMet implementing novel Ti process. Metal Powder Report, p. 24, Vol. 53(2), February, 1998
- 18 Arcella F G ,Froes F H. Production of titanium aerospace components from powder using laser forming. Accepted for Publication in the Journal of Metals , May 2000
- 19 Arcella F G. Laser forming near shapes. Titanium '92 Science and Technology, Ed. by F H Froes and I L Caplan, TMS, 1993 Vol. II, p. 1395 ~ 1402
- 20 Abbott D H ,Arcella F G. Laser forming titanium components. Advanced Materials and Processes , May 1998
- 21 AeroMet Corporation web site : http://www.aerometcorp.com
- 22 Thoma D J , Charbon C , Lewis G K , Nemec R B. Directed light fabrication of iron – based materials. Advanced Laser Processing of Materials-fundamentals and Applications , Pittsburgh : MRS , 1996
- 23 Lewis G K , Nemec R B , Milewski J O , Thoma D L , Barbe M R , Cremers D A. Directed light fabrication. Proceedings of the ICALEO '94 , Laser Institute of America , Orlando , Florida , 1994 :17
- 24 D J Thoma, G K Lewis, R B Nemec. Solidification behavior during directed light fabrication. In: J. Singh, editors. Beam Processing of Advanced Materials. Cleveland, OH: ASM, 1995
- 25 Lewis G K , Thoma D J , Milewski J O , Nemec R B. Directed light fabrication of near-net shape metal components. World Congress on Powder Metallurgy and Particulate Materials , Washington , DC , 16 ~ 21 June 1996
- 26 Thoma D J , Lewis G K , Schwartz E M , Nemec R B. Near net shape processing of metal powders using directed light fabrication. Advanced Materials and Technology for the 21st Century , J Inst Metals , 1995 Fall Annual Meeting (117th) Hawaii , 13 ~ 15 Dec. 1995
- 27 Lewis G K , Thoma D J , Milewski J O , Nemec R B. Directed light fabrication of refractory metals. 1997 International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials , Chicago , Illinois , 29 June ~ 2 July 1997
- 28 Lewis G K, Milewski J O, Thoma D B, Nemec R B. Properties of near – net shape metallic components made by the directed light fabrication process. The 8th Solid Free-Form Fabrication Symposium, University of Texas at Austin, Austin, 1997
- 29 Lewis G K , Thomas D J , Nemec R B , Milewski J O. In : Cadle TM , Narasimhan KS , editors. Advances in powder metallurgy and particulate materials , part 15 , Princeton , NJ , Metal Powers Industries Federation (MPIF), 1996 , p. 65
- 30 Gary K. Lewis , Eric Schlienger. Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition. Materials

and Design , 2000(21):417 ~ 423

- 31 J O Milewski, G K Lewis, D J Thoma, G I Keel, R B Nemec, R A Reinert. Directed light fabrication of a solid metal hemisphere using 5-axis powder deposition. Journal of Materials Processing Technology, 1998 (75): 165 ~ 172
- 32 Alexander H Nickel. Analysis of thermal stresses in shape deposition manufacturing of metal parts [Dissertation]. USA : Stanford University, 1999
- 33 Krishnan Ramaswami Process planning for shape deposition manufacturing : [Dissertation]. USA : Stanford University, 1999
- 34 J R Fessler ,R merz ,A H Nickel ,F B Prinz ,L E Weiss. Laser deposition of metals for shape deposition manufacturing. In Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium ,University of Texas at Austin ,August , 1996 ,p. 117
- 35 R Merz ,F B Prinz ,K Ramaswami ,M Terk ,L E Weiss. Shape deposition manufacturing. In Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium , University of Texas at Austin ,August , 1994 ,p. 1~8
- 36 Mazumder J ,Schilerer A ,Choi J. Direct materials deposition : dsesigned macro and microstructure.Mater Res. Innovate , 1999 (3):118 ~ 131
- 37 Mazumder J ,Dutta D ,Kikuchi N ,et al . Closed loop direct metal deposition :art to part. Optics and Lasers in Engineering ,2000 (34) 397 ~ 414
- 38 Mazumder J ,Koch J ,Nagarathnam K ,Choi J. Rapid manufacturing by laser aided direct deposition of metals. In :Cadle TM , Narasimhan KS , editors. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials ,part 15 ,Princeton ,NJ ,Metal Powers Industries Federation (MPIF) ,1996 ,p. 107 ~ 118
- 39 Xue L ,Chen J Y ,Islam M U ,Prifchard J ,Manente D ,Rush S. Laser consolidation of Ni-base IN-738 super alloy for repairing gas turbine blades. ICALEO '2000 89(D) 31
- 40 Mould Makers Council. Free-form laser consolidation & its potential applications for mould making. Mould Makers Council Dinner Meeting, January 25, 2001
- 41 Mallikharjuna R Boddu , Vishnu P Thayalan ,Robert G Landers. Modeling for the control of the laser aided manufacturing process (LAMP). Fourteenth Annual Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, August 4 ~ 6 2003
- 42 Robert G Landers. Process control of laser metal deposition manufacturing—a simulation study. Fourteenth Annual Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, August 4 ~ 6, 2003

第一作者 张 凯 ,博士研究生 ,中国科学院沈阳自动化 研究所快速成形实验室 ,110016 沈阳市