申请代码	E050804
受理部门	
收件日期	
受理编号	5140050106



国家自然科学基金

申 请 书

（2 0 1 4 版）

NSFC 2014

资助类别：青年科学基金项目

亚类说明：

附注说明：

项目名称：涡轮叶片的光内送粉变光斑高效增材制造方法及机理研究

申 请 人：朱刚贤　　电 话：0512-67587216

依托单位：苏州大学

通讯地址：苏州市东环路50号424信箱

邮政编码：215021　　单位电话：0512-67507192

电子邮箱：gxzhu@suda.edu.cn

申报日期：2014年03月01日

国家自然科学基金委员会

基本信息

申请人信息	姓　　名	朱刚贤	性别	男	出生年月	1980年10月	民族	汉族
	学　　位	博士	职称	讲师		每年工作时间（月）		10
	电　　话	0512-67587216		电子邮箱		gxzhu@suda.edu.cn		
	传　　真			国别或地区		中国		
	个人通讯地址	苏州市东环路50号424信箱						
	工　作　单　位	苏州大学/机电工程学院						
	主要研究领域	增材制造,激光快速成形,数值模拟						
依托单位信息	名　　称	苏州大学						
	联　系　人	刘开强		电子邮箱		kliu@suda.edu.cn		
	电　　话	0512-67507192		网站地址		http://www.suda.edu.cn/		
合作研究单位信息	单位名称							
项目基本信息	项目名称	涡轮叶片的光内送粉变光斑高效增材制造方法及机理研究						
	英文名称	Mechanism and method of high efficient additive manufacturing turbine blade using variable laser spot by the inside-laser powder feeding						
	资助类别	青年科学基金项目			亚类说明			
	附注说明							
	申请代码	E050804			E050904			
	基地类别							
	研究期限	2015年01月 -- 2017年12月						
	申请经费	26.0000万元						
中文关键词		增材制造 ； 激光直接成形 ； 涡轮叶片 ； 光内送粉 ； 变光斑						
英文关键词		additive manufacturing ; laser direct forming ; turbine blade ; inside-laser powder feeding ; variable laser spot						

NSFC 2014

中文摘要	涡轮叶片是动力装备的核心部件，其日益复杂的结构及越发变薄的壁厚使得制造技术面临极大的挑战。激光金属直接成形是最具代表性的一种增材制造技术，能直接制造出全致密且力学性能优异的金属零件，是制造技术的发展方向。鉴于现有技术中存在成形效率及成形质量相互制约，粉末利用率低等问题。本项目提出基于光内送粉方式在单道工艺中实时变化激光光斑大小一次扫描而非多道搭接直接成形出不等宽熔覆层的新方法，逐层堆积直接制造出涡轮叶片。采用数值模拟、理论分析及实验检测相结合的方法，重点研究激光变斑过程中激光束、光内粉及熔池间的相互作用规律，建立能预测熔覆层几何形貌的理论模型，揭示中空光与光内粉的空间耦合机理及工艺参数实时精确调控机制，掌握成形精度、组织性能与工艺参数的内在联系，优化成形工艺，实现涡轮叶片变光斑激光金属直接成形。本课题的研究成果有望为高性能涡轮叶片制造提供新的理论方法和技术支撑。
英文摘要	Turbine blade is one of the key components of power equipment. The difficulties of fabrication remain a significant challenge due to the increasing demands for thinner and more complex of turbine blades at present. As one of the most promising additive manufacturing technologies, laser metal direct forming (LMDF) can be employed to directly build three-dimensional full dense metal components with excellent mechanical properties. However, the existing problems of mutual compromise between efficiency and accuracy of forming and low powder utilization have limited the further development of this technology. We propose a variable laser spot method to fabricate single-track cladding layers with unequal width by the inside-laser powder feeding. Thereby, the turbine blade can be fabricated by layer-by-layer accumulation. The combination of numerical simulation, theoretical analysis and experimental tests is used to fulfill the key research contents, described as follows. (1) To establish the theoretical model by studying the interaction law among laser beam, powder and molten pool. The model can predict geometrical morphology of cladding layers and reveal the space coupling mechanism between hollow light and powder. (2) To investigate the real-time control mechanism among process parameters according to the theoretical model. (3) To optimize the forming process based on the internal relation of forming accuracy, structural properties and process parameters. The objective of the project is expected to provide a new fundamental and technique, supporting for manufacturing of high-performance turbine blades.

NSFC 2014

项目组主要参与者（注：项目组主要参与者不包括项目申请人）

编号	姓名	出生年月	性别	职 称	学 位	单位名称	电话	电子邮箱	项目分工	每年工作时间（月）
1	刘秀波	1968-08-28	男	教授	博士	苏州大学	13451661263	liuxiubo@suda.edu.cn	理论模型的建立	6
2	尹成科	1980-12-10	男	讲师	博士	苏州大学	13646201647	yinck@suda.edu.cn	工艺控制系统	8
3	王丽芳	1979-10-13	女	助理实验师	硕士	苏州大学	13915560792	lfwang@suda.edu.cn	组织性能分析	10
4	史建军	1981-07-08	男	博士生	硕士	苏州大学	13815414404	20134029002@stu.suda.edu.cn	熔池温度场应力场数值模拟	10
5	顾传祥	1991-02-18	男	硕士生	学士	苏州大学	15106201250	15106201250@163.com	工艺研究	10
6	杨轼	1989-03-06	男	硕士生	学士	苏州大学	18896588782	18896588782@163.com	工艺研究	10

总人数	高级	中级	初级	博士后	博士生	硕士生
7	1	2	1		1	2

NSFC 2014

经费申请表

（金额单位：万元）

科目	申请经费	备注（计算依据与说明）
一. 研究经费	19.5000	
1. 科研业务费	10.0000	
(1) 测试/计算/分析费	3.5000	显微组织分析，力学性能测试
(2) 能源/动力费	1.5000	支持项目研究所需水、电、气等费用
(3) 会议费/差旅费	2.5000	项目研究过程中试验调研、参加国内学术会议等活动中的会务、交通和住宿等费用
(4) 出版物/文献/信息传播费	2.5000	论文出版、专利申请及信息检索费等
(5) 其他	0	
2. 实验材料费	6.0000	
(1) 原材料/试剂/药品购置费	6.0000	试验用材料，包括不锈钢（316L）及镍基高温合金（DZ125L）粉末及基板
(2) 其他	0	
3. 仪器设备费	3.5000	
(1) 购置	1.5000	辅助夹具、低压电器及电路板等费用
(2) 试制	2.0000	改进变斑同轴送粉喷嘴的制造费用
4. 实验室改装费	0	
5. 协作费	0	
二. 国际合作与交流费	2.6000	
1. 项目组成员出国合作交流	1.8000	项目组成员到国外研讨交流、参加国际学术会议费用
2. 境外专家来华合作交流	0.8000	邀请国外专家来华讲学、交流和指导费用
三. 劳务费	2.6000	直接参加项目研究的研究生的劳务费用
四. 管理费	1.3000	依托单位为组织和支持本项目而支出的费用
合计	26.0000	

与本项目相关的其他经费来源	国家其他计划资助经费	0
	其他经费资助(含部门匹配)	0
	其他经费来源合计	0

NSFC 2014

报告正文:

1. 申请人简历

姓名

朱刚贤

所在单位及职称

苏州大学，机电工程学院，讲师

受教育经历（从大学本科开始，按时间倒排序）

2005/09 – 2011/06，西安交通大学（硕博连读），机械工程学院，博士

2003/09 – 2005/07，河南科技大学（专升本），机电工程学院，学士

研究工作经历（按时间倒排序）

2011/08 – 至今，苏州大学，机电工程学院，讲师

2. 立项依据与研究内容

（1）项目的立项依据。（研究意义、国内外研究现状及发展动态分析，需结合科学研究发展趋势来论述科学意义；或结合国民经济和社会发展中迫切需要解决的关键科技问题来论述其应用前景。附主要参考文献目录）

● 研究意义

涡轮叶片是动力设备的核心部件，其结构与材料的不断改进是人类提高能源利用效率、获得高性能装备和产品的关键。由于其处于温度最高、应力最复杂、环境最恶劣的部位而被列为第一关键部件，并被誉为“王冠上的明珠”。因此，其制造技术成为国内外近 20 年来极为关注的重大技术问题[1]。其在发动机中的功能使命及其工作特点，决定了叶片一般都具有形状复杂（三维空间曲面）、尺寸跨度大、宽弦及叶身宽度不一致等特征[2]。为更好的解决叶片承温能力差和热强度低的问题，进一步提高叶片的冷却效率，其设计的结构日益复杂，壁厚愈发变薄，使得制造技术面临极大的挑战。所以，研究具有复杂结构涡轮叶片的制造新方法及成形机理，对制造出高性能涡轮叶片具有很重要的现实意义。

“增材制造技术可能与制造信息化共同催生第三次工业革命”，西安交通大学卢秉恒院士在 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上明确提出[3]，可见增材制造技术在未来国民经济发展中的重要地位。激光金属直接成形（Laser Metal Direct Forming, LMDF）技术是最具代表性的一种增

NSFC 2014

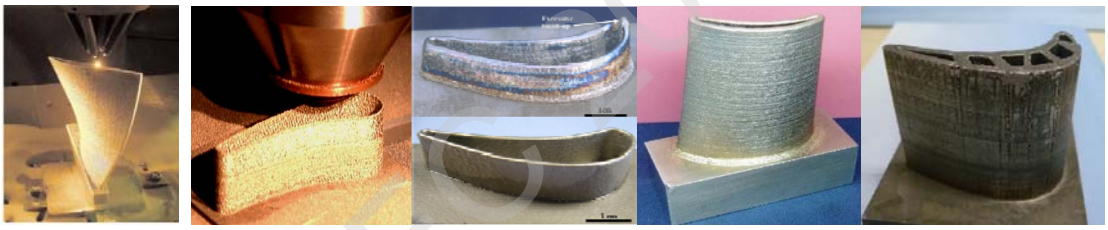
材制造技术，能直接制造出全致密且力学性能优异的金属零件，在航空航天、汽车船舶及武器装备等领域具有广阔的应用前景[4-6]。鉴于目前采用 LMDF 技术成形金属零件存在成形效率与成形精度相互制约，粉末利用率低及制造成本高等问题[7, 8]，本项目提出采用变激光光斑（在单道熔覆工艺中实时变化激光光斑大小一次扫描而非多道搭接直接成形出不等宽熔覆层，逐层堆积直接制造出涡轮叶片。此方法一方面可大大提高零件的成形效率，同时由于一次扫描可避免多次扫描造成能量累积导致熔覆层开裂等缺陷的产生，进而提高零件成形精度）及中空激光光内送粉（采用圆锥-圆环双反射镜技术，将入射的实心圆形激光束在喷头装置中进行扩束、聚焦等光学变换，使投射到成形表面上的聚焦激光束内部形成一中空锥形的无光区，单根送粉喷嘴即可布置在此无光区中并与聚集激光束同轴，粉末通过送粉喷嘴垂直送入加工面上的聚焦光斑中，实现光内垂直正向送粉[9]）的 LMDF 方法，探索制造涡轮叶片的新方法及成形机理，具有重要的理论意义及工程应用价值。

● 国内外研究现状

自 20 世纪 80 年代中期以来，随快速原型（Rapid Prototyping, RP）技术的迅速发展及 LMDF 技术所展现出的巨大发展前景，美国、英国等西方发达国家率先开始高度关注 LMDF 技术的开发，**并着手对涡轮叶片的成形展开相应的探索**。20 世纪 80 年代末，美国 Sandia 国家实验室、Los Alamos 国家实验室及 Michigan 大学分别对 LMDF 工艺展开研究[10]，此后一系列的 LMDF 工艺相继出现，其命名也多种多样。90 年代中期，美国 Sandia 国家实验室发展了一种称作激光工程化净成形(Laser Engineered Net Shaping, LENS)的金属零件快速成形技术，成功地把同步送粉激光熔覆技术和RP技术融合成先进的激光直接成形技术，使 RP 技术进入了激光近形制造的崭新阶段。该实验室对多种合金材料的成形工艺进行研究，成功制造出了各种合金零件，零件致密度达到近乎 100%，零件性能达到铸件水平。通过对控制软件不断改进，有效地提高了该技术的成形精度，其零件在 X 及 Y 方向的加工精度已达到 0.05mm，Z 方向达到 0.4mm，表面粗糙度可达 6.35μm。但制件成形效率较低，其堆积速率仅为 8cm^3/h[11, 12]。图 1(a)为采用 **LENS 工艺加工的镍基高温合金涡轮发动机薄壁叶片**[13]。为了提高零件的成形速率及成形精度，90 年代末，美国 Michigan 大学的 Mazumder 等人研究开发了直接金属沉积 (Direct Metal Deposition，DMD) 技术。该技术将激光、传感器、计算机数控平台、CAD/CAM 软件及熔覆冶金学等多种技术融合为一起，构建了一种闭环控制系统。使材料的沉积速率可达到 240 cm^3/h，但成形零件的尺寸精度仅提高到 0.25mm[14, 15]，采用 **DMD 工艺成形的薄壁叶片样件**如图 1(b)所示。为了进一步提高薄壁叶片的成形精度，英国 Nottingham 大学 Bi 等人采用直接激光金属粉末沉积（Laser Metallic Powder Deposition，LMPD）技术，构建了

基于红外传感技术的熔池温度的闭环控制系统，提出了基于路径（path-dependent）的功率闭环控制方法，解决因零件结构引起的散热不均问题，提高了薄壁叶片的成形精度，但其沉积速率仅为 16.5cm^3/h[16, 17]，**在开闭环系统下成形出的薄壁叶片**如图 1(c)所示。此外，加拿大 National Research Council 工业材料研究所 Xue 等人采用名为激光固结 (Laser Consolidation，LC) 技术成形的 IN-718 零件的表面粗糙度能达到 1.5-1.7μm[18]。

相比国外，国内在 LMDF 技术的研究起步稍晚。1997 年，西北工业大学凝固技术国家重点实验室黄卫东等人开发了类似LENS原理的激光立体成形（Laser Solid Forming，LSF）技术研究[19]，针对镍基高温合金、不锈钢、钛合金等材料的成形工艺及组织力学性能进行了大量的研究，**获得外形规整无缺陷且表面质量良好的薄壁叶片**，如图 1(d)所示。为制造出结构更加复杂的空心涡轮叶片，2005 年申请人开展了基于 LENS 原理的 LMDF 空心涡轮叶片的工艺研究[20, 21]，构建了激光快速成形系统，研究发现粉末在负离焦状态下存在“自愈合效应”，并**在优化的搭接率及扫描路径下成功堆积出空心涡轮叶片**，如图 1(e)所示[22]。



(a) LENS 工艺　(b) DMD 工艺　(c) LMPD 工艺　(d) LSF 工艺　(e) LMDF 工艺

图 1 采用不同 LMDF 工艺成形的叶片

同时，北京航空航天大学与沈阳飞机设计研究院等单位合作开展“产学研”结合，成功突破了钛合金、超高强度钢等大型关键构件激光熔化沉积增材制造工业、装备、标准和应用关键技术[5]。清华大学在激光快速成形同轴送粉系统的研制、熔覆层高度检测及控制方面取得了研究进展[23]，此外天津工业大学[24]、中国科学院沈阳自动化研究所[25]、华中科技大学[26]等研究单位也针对 LMDF 技术展开了积极研究，取得了诸多研究成果。

● 存在的问题

①成形效率与成形精度相互制约，成形精度不高。

与快速原型技术一样，LMDF 技术也面临着成形精度和成形速度的相互制约问题。目前，LMDF 技术的成形精度还不够高，所制造的零件大多属于近形件，仍需进行最终的机加工方能使用。虽然 Sandia 国家实验室的成形精度相对较高，但他们牺牲了成形速率，因而其整体效率并不一定高。所以，还需要进行开发研究新的制造方法或工艺以确定如何使成形精度和成形速度达到最佳，

从而获得最高的成形速率及成形精度。

利用 LMDF 技术制造复杂构件时，均是采用多道搭接及一定扫描路径下堆积成形，如图 2 所示构件的最宽部位需四道搭接才能实现。搭接率的大小直接影响成形表面宏观平整度。如果搭接率选择的不合理将直接导致成形表面宏观倾斜角度，成形表面的尺寸精度将很难保证，严重时甚至会导致成形无法进行，且多道搭接易造成熔覆层冷却不均匀引起能量累积，而导致熔覆层开裂等缺陷的产生[19, 27, 28]。三维零件每一层堆积过程中其成形轨迹是按照一定的扫描路径成形的，而扫描路径规划问题是激光直接成形工艺中的关键步骤，直接影响着零件的成形效率和成形质量。扫描路径规划不合理不仅会造成效率低下，更会引起内部热应力分布不均，直接影响熔覆层的微观组织及力学性能[19, 29]。

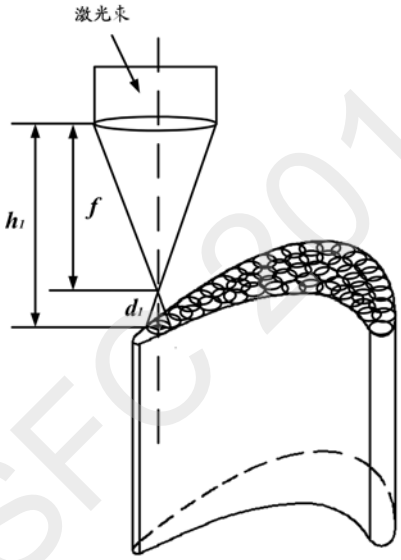
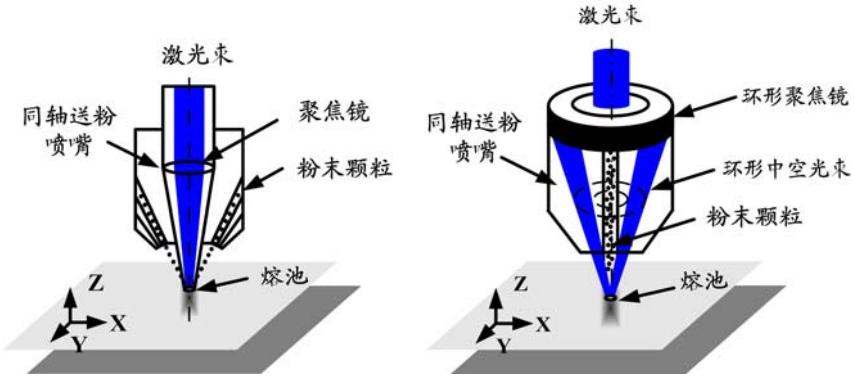


图 2 多道搭接 LMDF 涡轮叶片示意图

②粉末汇聚性差，造成粉末利用率较低及零件表面成形质量差。



（a）光外送粉 （b）光内送粉

图 3 不同送粉方式示意图

在 LMDF 工艺送粉过程中，大多采用“多路送粉喷嘴”及“圆锥环形送粉

喷嘴”来实现，而这种同轴送粉装置均是将粉末在经过激光束外侧进行汇聚送入激光所产生的熔池中，如图 3(a)所示，这种方法通称为“光外送粉法”[30]。所谓的同轴实质上只是各粉管轴线共同的几何中心与光束同轴，而各粉管的轴线仍然相对光束倾斜，导致各路粉束皆呈抛物线状抛射至成形表面上的熔池中，汇聚精度差[31, 32]。另外，多粉束汇聚后的粉斑汇聚尺寸较大，且粉束发散，造成粉末利用率较低。同时抛洒的粉末一部分形成未熔颗粒粘附于工件表面，影响表面粗糙度[8]。

● 本项目的研究思路

①在单道成形时采用变激光光斑的方法一次扫描而非多道搭接直接成形出不等宽熔覆层，逐层堆积直接制造出复杂构件。此方法不仅提高了成形效率，而且可避免由于搭接率及扫描路径选择不合理导致的缺陷问题，提高零件成形精度。

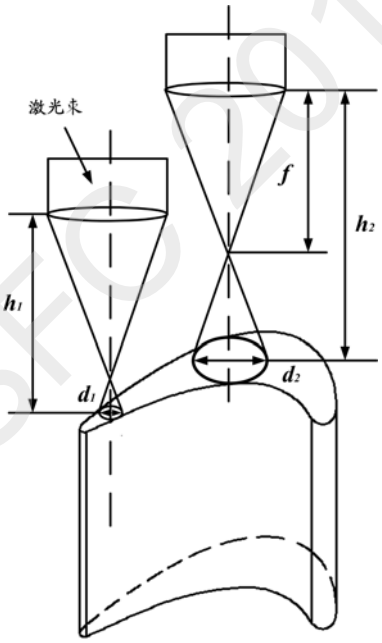


图 4 变激光光斑一次扫描 LMDF 涡轮叶片示意图

为提高 LMDF 技术制造零件的成形效率及成形精度，**本项目提出在单道成形时采用变激光光斑的方法一次扫描而非多道搭接直接成形出不等宽熔覆层，逐层堆积直接制造出复杂构件**，如图 4 所示。此方法不仅提高了成形效率，而且可避免由于搭接率及扫描路径选择不合理导致的缺陷问题，提高零件成形精度。激光变斑方法是依据单道熔覆层宽度/高度与工艺参数的关系，采用实时变化激光光斑及同时调整激光功率、扫描速度、送粉量及保护气流量工艺参数，通过单道工艺直接堆积出不等宽但高度增长一致的熔覆层，不需经过搭接及扫描路径规划，逐层堆积成形出复杂结构涡轮叶片。采用变激光光斑的方法首先

NSFC 2014

从实心涡轮叶片的成形入手，随后在此基础上分区变光斑直接成形空心涡轮叶片。

②采用“中空激光，光内送粉”新工艺，解决“光外送粉”粉束与光束不同轴，粉末利用率低等问题。

为解决“光外送粉”LMDF 技术出现的不足，本课题组利用激光束易变换的特点，提出了一种“中空激光，光内送粉”的创新方案[9]，如图 3(b)所示。单粉管与聚焦光束的光轴真正同轴安装，粉粒由粉管下部喷嘴喷出后受自身惯性力、气载压力、重力的作用方向一致，运动轨迹为直线状，粉束中心线与光轴始终重合(光斑离焦也重合)，因此实现了真正意义上的光粉同轴。同时单束粉垂直下落至加工面上的光斑中，准确且发散角小，粉束截面上粉粒密度分布比较均匀，粉末利用率高，能达到 68%以上[33]。**本项目基于“中空激光、光内送粉”LMDF 新工艺，探索制造复杂结构涡轮叶片新方法及成形机理。**

主要参考文献

[1] 李涤尘, 吴海华, 卢秉恒. 型芯型壳一体化空心涡轮叶片制造方法[J]. 航空制造技术, 2009, (3): 38-42.

[2] 《透平机械现代制造技术丛书》编委会. 叶片制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002:8-9.

[3] 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会在武汉举行. http://news.e-works.net.cn/category6/news48265.htm.

[4] Gu DD, Meiners W, Wissenbach K, Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms[J]. International Materials Reviews, 2012, 57(3): 133-164.

[5] 王华明. 高性能金属构件增材制造技术开启国防制造新篇章[J]. 国防制造技术, 2013, 6(3): 5-7.

[6] Dutta B, Singh V, Natu H, Choi J, Mazumder J. Direct metal deposition[J]. Advanced Materials & Processes, 2009, 167(3): 29-31.

[7] 黄卫东. 如何理性看待增材制造(3D 打印)技术[J]. 新材料产业, 2013, (8): 9-12.

[8] Wu X. A review of laser fabrication of metallic engineering components and of materials[J]. Materials Science and Technology, 2007, 23(6): 631-640.

[9] 石世宏, 傅戈雁, 王安军, 张赟, 朱鹏飞, 胡进. 激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉喷头[P]. 中国专利 200610116413.1 2006-09-22.

[10] Dinda GP, Song L, Mazumder J. Fabrication of Ti-6Al-4V scaffolds by direct metal deposition[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39A(12): 2914-2922.

[11] Griffith ML, Keicher DM, Atwood CL, Romero JA, Smugeresky JE, Harwell LD, Greene DL. Free form fabrication of metallic components using Laser Engineered Net Shaping (LENS^{TM})[C]. Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium 12-14 August 1996, Austin, TX:125-131.

[12] Schlienger E, Dimos D, Griffith M, Michael J, Oliver M, Romero T, Smugeresky J. Near net shape production of metal components using LENS[C]. Proceedings of the Third Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing 12-16 July 1998, Honolulu,

NSFC 2014

HI:1581-1588.
[13] Sandia National Laboratories: Manufacturing Science and Technology Center. http://www.sandia.gov/mst/technologies/net-shaping.html.
[14] Mazumder J, Schifferer A, Choi J. Direct materials deposition: designed macro and microstructure[J]. Materials Research Innovations, 1999, 3(3): 118-131.
[15] Mazumder J, Dutta D, Kikuchi N, Ghosh A. Closed loop direct metal deposition: art to part[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 34(4-6): 397-414.
[16] Bi GJ, Gasser A, Wissenbach K, Drenker A, Poprawe R. Characterization of the process control for the direct laser metallic powder deposition[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201(6): 2676-2683.
[17] Bi GJ, Schuermann B, Gasser A, Wissenbach K, Poprawe R. Development and qualification of a novel laser-cladding head with integrated sensors[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(3-4): 555-561.
[18] Xue LJ, Chen JY, Wang SH, Li YS. Laser consolidation of waspalloy and IN-718 alloys for making net-shape functional parts for gas turbine applications[C]. ICALEO Congress Proceeding: Laser Materials Processing Conference October 20-23, 2008, Temecula, CA USA:255-263.
[19] 黄卫东, 林鑫, 陈静, 刘振侠, 李延民. 激光立体成形[M]. 中国, 西安: 西北工业大学出版社, 2007:1-12.
[20] **Zhu GX**, Li DC, Zhang AF, Pi G, Tang YP. The influence of standoff variations on the forming accuracy in laser direct metal deposition[J]. Rapid Prototyping Journal, 2011, 17(2): 98-106.
[21] **Zhu GX**, Li DC, Zhang AF, Pi G, Tang YP. The influence of laser and powder defocusing characteristics on the surface quality in laser direct metal deposition[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(2): 349-356.
[22] **朱刚贤**. 空心涡轮叶片激光金属直接成形工艺研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2011: 86-88.
[23] Zhong ML, Liu WJ, Ning GQ, Yang L, Chen YX. Laser direct manufacturing of tungsten nickel collimation component[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 147(2): 167-173.
[24] 杨洗陈. 激光制造中同轴粉末流动量和质量传输[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1664-1679.
[25] Zhang K, Liu WJ, Shang XF. Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping[J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(3): 549-557.
[26] Li P, Ji SQ, Zeng XY, Hu QW, Xiong WH. Direct laser fabrication of thin-walled metal parts under open-loop control[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(6): 996-1002.
[27] Pi G, Zhang AF, **Zhu GX**, Li DC, Lu BH. Research on the forming process of three-dimensional metal parts fabricated by laser direct metal forming[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57(9-12): 841-847.
[28] Cao J, Liu FC, Lin X, Huang CP, Chen J, Huang WD. Effect of overlap rate on recrystallization behaviors of Laser Solid Formed Inconel 718 superalloy[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45(2): 228-235.
[29] He B, Li DC, Zhang AF, Ge JB, Yang XH, Hu XH. Influence of scanning pattern on the edge collapse of solid parts in laser metal direct forming[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 48(6): 171-177.

NSFC 2014

[30] 王明娣, 左敦稳, 王珉, 石世宏. 光内送粉激光熔覆工艺参数对单层熔覆质量的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(3): 354-357.
[31] Guo W, Greenville SC. Compact coaxial nozzle for laser cladding[P]. US Patents 7259353B2 2007-8-21.
[32] Harris JG, Brandt M. Powder delivery nozzle[P]. US Patent 7605346B2 2009-10-20.
[33] 石皋莲, 石世宏, 吴少华, 邵其文. 光内送粉激光熔覆快速成形粉末利用率实验研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(7): 152-161.

（2）项目的研究内容、研究目标,以及拟解决的关键科学问题。（此部分为重点阐述内容）

● **研究内容**

①变斑过程中激光束、光内粉及熔池间的相互作用规律，建立能预测熔覆层几何形貌的理论模型

基于“中空激光、光内送粉”新工艺，研究中空光与光内粉空间耦合机理，研究中空激光在不同光斑下的能量分布规律，依据能量守恒定律，建立熔池宽度的理论模型；研究单粉管粉末流场空间分布规律，依据质量守恒定律，建立熔覆层截面轮廓曲线的理论模型，进而获得能预测熔覆层几何形貌的理论模型，为实验工艺参数的调控提供理论依据。

②变光斑 LMDF 过程温度场及应力场的理论预测

依据熔覆层几何形貌理论模型，建立高度增长一致、宽度逐渐变化的单道熔覆层物理模型，在此基础上建立不等宽变曲率单道及多层堆积的叶片的物理模型，对其成形过程中的温度场及应力场进行理论计算，获得激光工艺参数及材料参数对成形过程中温度场和应力场影响规律，为后续工艺参数优化调控提供指导。

③光内送粉变光斑直接成形叶片工艺调控机制

研究激光变斑过程中激光工艺参数与送粉参数间协调控制方法，获取能成形出高度增长一致、宽度逐渐变化熔覆层的工艺条件。研究叶片曲率对熔覆层截面形貌的影响规律，结合变斑工艺研究在成形变曲率不等宽单道熔覆层时工艺参数的变化规律；在此基础上研究多层堆积墙及叶片时熔覆层几何形貌随堆积层数的变化规律，获取成形涡轮叶片时工艺参数间的调控机制。

④成形精度、组织性能与工艺参数的内在联系，优化成形工艺

研究激光工艺参数及送粉参数对熔覆层成形精度和组织性能的影响规律。研究激光变斑过程中，进入熔池的能量密度及粉末密度的扰动规律，提出能够补偿扰动的措施，提高成形工艺及熔覆层内部冶金质量稳定性，改善成形精度。

NSFC 2014

掌握成形精度、组织性能与工艺参数的内在联系，从中优化出光内送粉变光斑激光金属直接成形工艺，实现涡轮叶片变光斑激光金属直接成形。

● 研究目标

针对复杂结构涡轮叶片制造技术的迫切需求及激光直接成形技术的发展趋势，基于“中空激光、光内送粉”新工艺，采用变激光光斑尺寸一次扫描而非多道搭接直接制造出不等宽熔覆层的新方法，研究激光变斑过程中激光束、光内粉及熔池间的相互作用规律，揭示中空光与光内粉的空间耦合机理及激光变斑过程中工艺参数间实时精确调控机制等科学问题，建立能预测熔覆层几何形貌的理论模型，掌握成形精度、组织性能与工艺参数的内在联系，实现涡轮叶片的变光斑激光金属直接成形，为高性能涡轮叶片制造提供新的理论方法和技术支撑。

● 拟解决的关键科学问题

①揭示中空光与光内粉的空间耦合机理，建立能预测熔覆层几何形貌的理论模型

研究变光斑过程中激光束能量分布规律，粉末浓度在熔池表面的空间分布规律及其相互作用导致液体熔池的产生，计算出金属粉末与激光束及熔池的能量交换。揭示中空光与光内粉的空间耦合机理，建立能预测熔覆层几何形貌的理论模型，获得熔覆层几何形貌与激光工艺参数及送粉参数的函数关系是成形过程中的关键科学问题。

②在激光变斑过程中工艺参数实时精确调控机制

在单道工艺中，变激光光斑大小一次扫描直接成形出高度增长一致、宽度逐渐变化熔覆层，要求在激光变斑的同时与之匹配的其他工艺参数也发生相应的调整。该过程涉及的工艺参数较多且模型相对复杂，而这些参数间又相互制约和影响。所以，研究工艺参数在变化过程中相互耦合机制及调控方法，以实现实时精确调控的目的又是本项目要解决的关键科学问题。

（3）拟采取的研究方案及可行性分析。（包括有关方法、技术路线、实验手段、关键技术等说明）

● 技术路线

本项目拟采取的技术路线如图 5 所示。

NSFC 2014

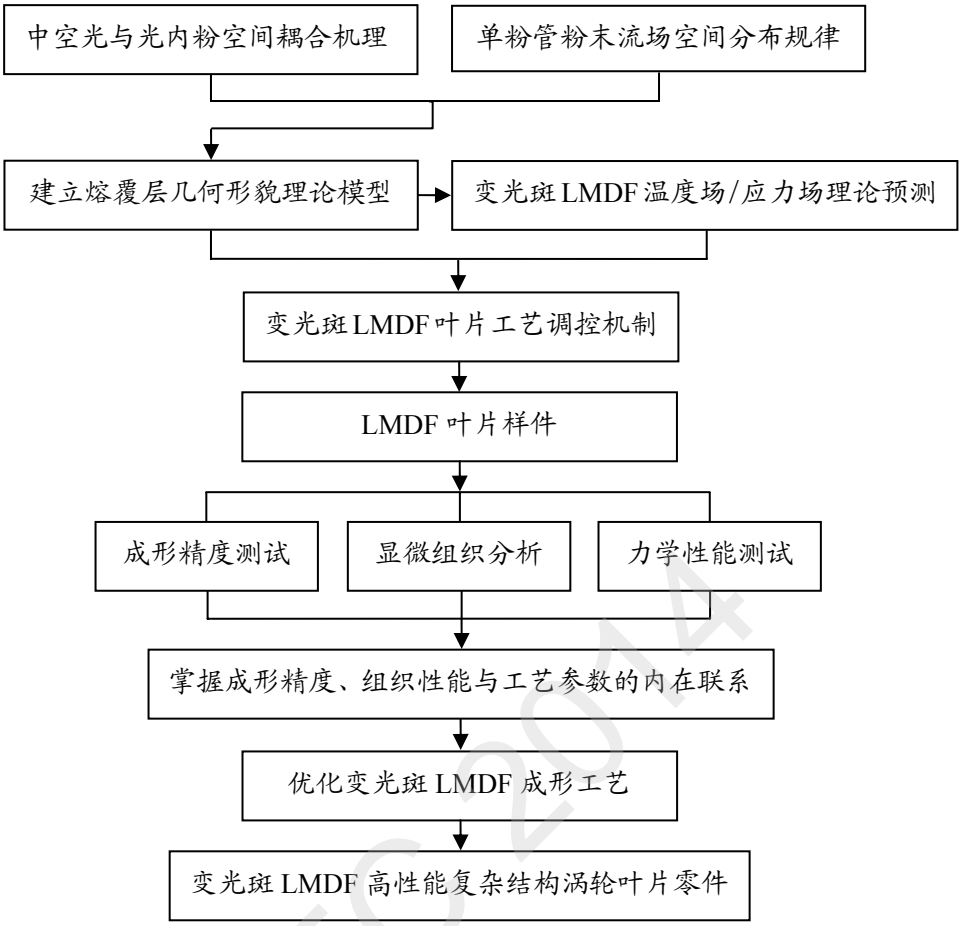


图 5 本项目研究拟采取的技术路线

● 研究方案

①变斑过程中激光束、光内粉及熔池间的相互作用规律，建立能预测熔覆层几何形貌的理论模型

在激光金属直接成形中，单道熔覆层轨迹几何形貌的准确控制对于精确控制成形过程至关重要。典型熔覆层横截面示意如图 6 所示，熔覆层轨迹截面几何形貌可以用熔覆层宽度 w，熔覆层横截面轮廓曲线方程 $h(x)$来描述。

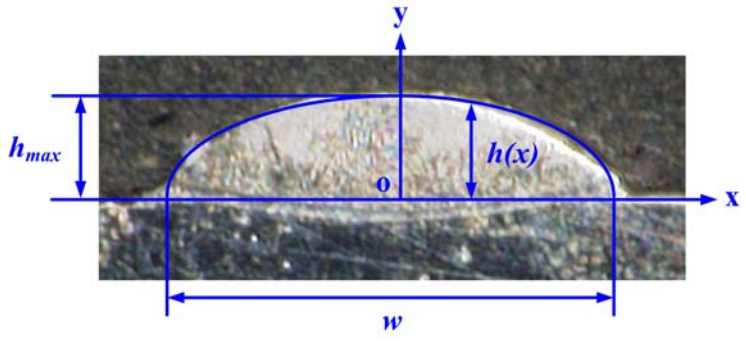


图 6 熔覆层截面几何形貌示意图

NSFC 2014

a、研究中空光与光内粉的空间耦合机理，建立熔覆层宽度理论模型

采用电子天平对激光熔覆前后成形件的质量直接测量，求解出粉末利用率。结合单位时间内送粉量大小，获得单位时间内进入熔池的粉末量。

利用 Accuraspray 传感器对粉末进入熔池前与激光束相互作用后的平均温度进行测量，计算出粉末在进入熔池前穿过激光束所吸收的能量。与激光束相互作用后的粉末粒子进入熔池后，在激光束作用下与熔池内的熔体进行热量交换，随后成为熔池的一部分。利用双色点温仪对熔池的表面温度进行测量，由于粉末不断进入熔池表面且不考虑熔池流动，取熔池的表面温度作为粉末落入熔池的温度，可以求解出金属粉末与熔池所进行的能量交换。结合粉末进入熔池前穿过激光束所吸收的能量，计算出进入熔池粉末所吸收的激光能量。

运用几何光学及光学追踪法，建立中空环形光的转换聚焦模型，获得聚集环形光斑，找出占空比、光斑大小与离焦量的关系；依据聚集模型，利用微分原理和几何光学，建立激光光束能量转换模型，获得环形激光束在不同离焦量时的能量分布规律，计算出单位时间内进入熔池总能量。

依据能量守恒定律，计算出通过热传递从熔池固-液边界向固体材料内部传递的能量，此能量可以通过热影响区得到的能量来计算，进而获得熔池宽度/熔覆层宽度的理论模型。

b、研究单粉管粉末流场空间分布规律，建立熔覆层截面轮廓曲线理论模型

采用 FLUENT 软件模拟径向（垂直于粉管方向）及轴向（平行于粉管方向）粉末流场的分布规律。对所使用的同轴送粉喷嘴结构采用高速摄像机对粉末流动状态进行拍摄，利用图像处理技术找出粉末汇聚直径及汇聚焦距等参数，结合粉末流场计算的汇聚特性，获得粉末浓度在三维空间中的分布规律，建立其理论模型。

在熔池宽度范围内，假设进入的粉末全部熔化，在垂直于扫描方向上熔覆层几何形貌上的点的高度 $h(x)$可由进入该点的粉末质量及该点处于熔化的时间来确定，而进入该点的粉末质量可由该点粉末浓度决定。所以可以利用该点粉末浓度对该点处于熔化的时间的积分来获得，结合熔覆层宽度理论模型，进而建立熔覆层几何形貌上点的高度 $h(x)$的理论模型。

由质量守恒定律，单位时间内进入熔池的粉末质量等于凝固成形的粉末质量。单位时间内进入熔池内的粉末质量可由进入熔池粉末速度及浓度计算出；而单位时间内凝固成形的粉末量可由熔覆层几何形貌曲线方程在熔池宽度上的积分，获得截面面积，结合扫描速度可计算出。两者相等，进而可以求解出熔覆层几何形貌最大值 h_{max}。

综上，通过建立的熔覆层宽度及熔覆层截面曲线的理论模型，获得与激光工艺参数及送粉参数的函数表达式。不断调整工艺参数，以期达到能够成形出如图 7 所示的高度增长一致，宽度逐渐变化的熔覆层的目的，为实验工艺参数的调控提供理论依据。

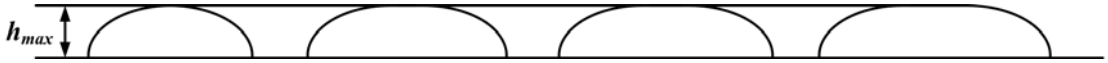


图 7 变光斑理想熔覆层截面几何形貌示意图

②变光斑 LMDF 过程温度场及应力场的理论预测

运用 ANSYS 中的“生死单元法”来完成零件的逐层累加制造过程，采用 APDL 语言编程对成形过程温度场及应力场进行理论计算。

a、采用中空环形激光的热源模型，建立高度增长一致、宽度逐渐变化的单道熔覆层物理模型，对单道一次扫描熔覆层温度场分布规律进行计算，获得在满足熔池中心温度稳定条件下，工艺参数随熔覆层宽度的变化规律。在此基础上建立不等宽变曲率单道及多层堆积叶片的物理模型，分别对其温度场进行模拟计算，得到工艺参数随曲率及堆积层数的变化规律。通过实时变激光功率或扫描速度的方式来保证熔池温度场稳定，最终获得在成形叶片时工艺参数的变化规律。

b、在温度场基础上建立熔覆层力学模型，采用间接法研究熔覆层内部应力场分布规律，预测成形过程中内应力演变规律，分析翘曲及变形机理，为后续采取措施控制内应力及预防熔覆层变形开裂的工艺调控及优化提供指导。

③光内送粉变光斑直接成形叶片工艺调控机制

成形过程中工艺控制模块的主要功能是完成对包括激光器（激光光闸开关、激光开关及激光功率）、数控工作台、送粉器（送粉器的开关及送粉量）及调光斑伺服电机的控制。根据成形系统工艺要求，编写并调试相应的控制程序，以实现工艺参数间相互协调运动。系统软件开发的控制程序由 VC 语言编制实现。

在激光变斑的同时要求与之配合的其他工艺参数也发生相应的调整，变化的这些工艺参数不仅能够实时控制，而且能够实时响应。具体控制细节如下:

a、激光光斑的实时控制

为实现激光光斑的连续变化，本课题组自主研发设计及已制造出变斑同轴送粉喷嘴。该喷嘴的激光聚焦装置由两块反射镜组成：一块为圆锥形扩束镜，另一块为环锥抛物聚焦镜组成。工作时，圆形激光束沿二块反射镜中心轴线首先入射到圆锥形扩束镜面上，圆锥反射镜将入射光扩束沿径向反射到环锥形抛物聚焦镜上，环锥形抛物聚焦镜继续将入射光反射至焦面上实现聚焦。另外，

所设计的圆锥形扩束镜具有沿轴线上下移动的自由度。

值得注意的是：喷嘴上端配一个交流伺服电机，且与圆锥扩束镜连接在一起，以控制圆锥扩束镜的上下移动。在圆锥扩束镜的上下移动过程中，反射光线再经过环形聚焦镜聚焦，可以在加工面上得到实心光斑或不同直径的环形光斑。

所以，激光光斑的变化不是通过提升喷嘴，而是通过控制喷嘴上端的交流伺服电机，进而控制圆锥扩束镜的上下移动，实现激光光斑的连续变化。

b、激光功率及扫描速度实时控制

激光功率控制通过控制激光器的输出电压来实现；扫描速度控制是采用数控控制卡发模拟电压方式控制电机转速，以达到控制扫描速度的目的。

如果要改变同一层内的激光功率及扫描速度，则需要控制每个点的功率及速度。首先在程序中必须规划好数据结构，且数据结构必须支持不同的属性规划，需要对数据结构中的每个点增加功率属性及速度属性。其次依据预先设定值编辑好各个点的输出电压，以达到实时调节的目的。在本项目中功率控制细化到每个点，层与层之间调节激光功率在一层成形后在原激光功率基础上改变激光器的控制电压。

c、送粉参数的实时控制

送粉参数主要包括送粉量、粉斑直径及外层保护气体压力大小。基于光内送粉方式的单粉管送粉喷嘴，通过实验发现在卸载条件下，外层保护气压力对粉末汇聚直径起决定性作用，相关实验结果已发表在《中国激光》上（2013,40(s1): s103007）。实验结果表明：在卸载方式下，随保护气压力的增大，粉末汇聚直径逐渐变小。当载气压力增大到 0.3MPa 时，粉末汇聚直径可以聚焦到 1.24mm。

在卸载方式下，采用高速摄像仪对粉末汇聚状态进行拍摄，对拍摄的照片进行图像处理，建立粉末汇聚直径与外层保护气压力大小的对应关系，以实现调整外层保护气压力大小实时调整粉斑直径大小的目的。外层保护气不仅起到保护熔池防止氧化作用，而且能够起到规整及限制粉末汇聚直径大小的作用。

本项目采用的送粉器是德国 GTV 公司提供的 TWIN PF 2/2-MF 型双筒送粉器，该送粉器不仅具有送粉效率高、调节精度高及稳定性好等特点，更具有对喷嘴出口粉末流量实时检测功能，可给出实时检测的粉末量及粉末速度等参数。采用这些参数与设定参数进行比对，通过实时调节伺服电机电压去控制送粉盘转速，实现送粉量的实时控制。

d、硬件系统延迟的处理

在实验过程中由于控制这些工艺参数硬件系统存在不可避免的延迟，所以

NSFC 2014

本项目一方面采用响应快的系统硬件及优化硬件结构方式，提高系统响应时间；另一方面通过计算系统各个控制部分的延迟时间，找出延迟时间最长的控制部分，以最长延迟时间为基准，计算出最长延迟时间与各个控制量自身延迟时间的差值，将其设置在各个工艺参数的控制系统中，达到同步的目的。

e、工艺调控过程

从激光工艺参数（激光功率、光斑大小及扫描速度）及送粉参数（送粉量及粉斑直径）出发，以进入熔池的能量密度（激光功率/（光斑直径×扫描速度））及送粉密度（送粉量/（粉斑直径×扫描速度））恒定为约束条件，依据熔覆层几何形貌理论模型及数值模拟，以如图 7 所示的高度增长一致，宽度逐渐变化熔覆层为目标函数。采用正交试验法，设计正交试验表，选择的五个因素（工艺参数）分别为：激光功率 P、光斑大小 D_l、扫描速度 V、送粉量 M_p、粉斑直径 D_p。通过工艺实验，研究其对熔覆层截面形貌尺寸的影响规律。对正交试验结果进行分析，完成激光工艺参数（激光离焦量、激光功率及扫描速度）与送粉参数（送粉量及粉斑直径）间协调控制，实现能成形出高度增长一致、宽度逐渐变化熔覆层时的工艺条件的优化。

结合变斑工艺，研究在成形变曲率不等宽单道熔覆层时工艺参数的变化规律；在此基础上研究多层堆积墙及叶片时熔覆层尺寸随堆积层数的变化规律，获得成形涡轮叶片时工艺参数间的调控机制。

以不锈钢（316L）及镍基高温合金粉末（DZ125L）作为熔覆材料，成形对象由简单到复杂，进行系统的工艺实验，具体详细流程如图 8 所示。

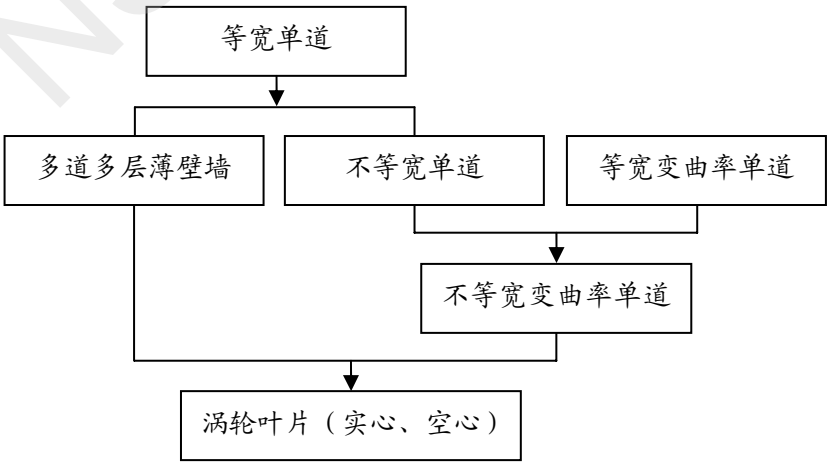


图 8 工艺实验流程图

④成形精度、组织性能与工艺参数的内在联系，优化成形工艺

采用表面粗糙度仪测量成形件的表面粗糙度，测量样件三个方向（X，Y，Z）上的尺寸精度。分别利用光学显微镜及扫描电子显微镜对成形件的形貌及显微组织进行分析，并测量熔覆层的形貌尺寸。在显微硬度计上测量熔覆层的显

微硬度；在万能试验机上进行拉伸试验，以测量抗拉强度；在疲劳试验机上测量疲劳强度。

通过工艺实验研究工艺参数对成形件的成形精度（表面粗糙度及尺寸精度）的影响规律，结合显微组织分析及力学性能测试，研究其与工艺参数的相关性。通过测量的熔覆层形貌尺寸及显微组织分析，研究激光变斑过程中，进入熔池的能量密度及粉末密度的扰动规律，提出修正工艺参数变化规律的措施以补偿扰动造成的影响，进而提高成形工艺及熔覆层内部冶金质量的稳定性，改善成形精度。掌握成形精度、组织性能与工艺参数的内在联系，从中优化出光内送粉变光斑 LMDF 的工艺参数，最终实现采用变光斑激光金属直接成形复杂结构涡轮叶片的目的。

● 可行性分析

本项目的研究方案和技术路线是切实可行的，主要表现在以下方面：

①依据激光与物质的相互作用规律，当作用于材料的激光能量密度达到一定值时进入熔池的粉末与基体表面/熔覆层在吸收激光光能下受热、熔化，并快速凝固形成熔覆层。熔池大小由进入熔池的能量与粉末量共同决定。激光功率及光斑大小决定激光光强的分布规律，在激光变斑过程中，可通过调整激光功率保持激光光强分布保持不变，同时调整扫描速度可保持进入熔池的能量密度不变。在光内送粉单粉管卸载送粉过程中，保护气压力决定粉末粉斑汇聚直径，在激光变斑过程中，可通过调节保护气压力及送粉量大小决定进入熔池的粉末量。因此，在激光变斑过程中，可通过实时调节激光功率、扫描速度、保护气压力及送粉量大小，以改变进入熔池的能量及粉末量，实现实时改变熔池大小的目的。

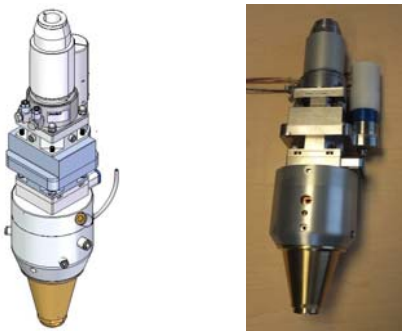
所以，在激光变斑过程中，通过调整工艺参数的实时变化，从理论上是可以堆积出高度增长一致、宽度逐渐变化的熔覆层。

②本项目涉及的具体技术细节如变激光光斑、变激光功率、变送粉量及变扫描速度在国内外均有深入研究，积累了丰富的成果和经验，供我们借鉴。此外，在前期研究工作中，本课题组已研发出变斑同轴送粉喷嘴，如图 9 所示。并在此基础上初步开展了变光斑 LMDF 工艺实验，实验结果已经证实直接成形宽度逐渐变化熔覆层的可行性（见图 10），说明从技术上是可行的。

③申请人所在的苏州大学机电工程学院激光制造技术研究所具有长期从事激光与物质的相互作用规律、激光快速成形装备及工艺研究的基础，拥有先进的实验设备和测试仪器，为本项目开展提供了有利条件。项目组成员主要是从事激光快速成形技术和数控加工技术方向的研究工作，所在的科研团队在与本

NSFC2014

项目相关的课题上参与了数项国家、江苏省自然科学基金，并取得了预期成果，为本项目的申请创造了良好的声誉。且申请人自攻读博士以来一直从事 LMDF 空心涡轮叶片的工艺研究，在成形叶片方面有一定的经验和成果。



（a）CAD 图 （b）实物图

图 9 本项目研发设计变光斑同轴送粉喷嘴

（4）本项目的特色与创新之处。

①提出基于中空激光光内送粉变光斑的激光金属直接成形方法，通过单道一次扫描而非多道搭接直接成形出高度增长一致、宽度逐渐变化的熔覆层，逐层堆积直接制造出涡轮叶片，为复杂结构涡轮叶片制造提供一种新工艺及新方法。

②基于“中空激光、光内送粉”新工艺，揭示中空光与光内粉的空间耦合机理及激光变斑过程中工艺参数实时精确调控机制，都是全新的科学问题，有关研究成果可丰富激光快速成形领域的理论基础。

（5）年度研究计划及预期研究结果。（包括拟组织的重要学术交流活动、国际合作与交流计划等）

● **年度研究计划**

2015.01-2015.12

①完善实验方案，购买实验材料；实现各个工艺参数的实时控制；

②研究出中空激光在变光斑时的能量分布规律、单粉管粉末流场空间分布规律，揭示中空光与光内粉的空间耦合机理，建立能预测熔覆层几何形貌的理论模型。

2016.01-2016.12

①采用中空环形激光的热源模型，完成变激光光斑直接成形（单道、墙及叶片）过程温度场及应力场的理论预测；

②以熔覆层几何形貌宽度及轮廓高度与工艺参数的关系为指导，实现激光

NSFC 2014

工艺参数与送粉参数间协调控制，获取能成形出高度增长一致、宽度逐渐变化熔覆层时的工艺条件，并研究出在成形变曲率不等宽单道熔覆层时工艺参数的变化规律。

2017.01-2017.12

①研究多层堆积墙及叶片时熔覆层尺寸随堆积层数的变化规律，获取成形涡轮叶片时工艺参数间的精确调控机制;

②对成形样件的成形精度、显微组织及力学性能进行测试分析，掌握变斑工艺下成形精度、组织性能与工艺参数的内在联系，优化出无冶金缺陷、成形精度良好成形件的光内送粉变光斑 LMDF 的工艺参数，最终实现采用变光斑激光金属直接成形复杂结构涡轮叶片的目的。

③总结研究成果，完善 LMDF 涡轮叶片工艺参数数据库；撰写验收报告，准备验收。

● 预期研究结果

①构建一种 LMDF 涡轮叶片制造新方法，为复杂结构涡轮叶片制造提供新的技术途径,加工出内部无缺陷、表面粗糙度 Ra≤12.5μm 及尺寸精度小于 0.05mm 的涡轮叶片样品 1-2 件。

②通过理论分析及数值模拟研究，获得能预测熔覆层几何形貌的理论模型。

③掌握激光变斑过程中工艺参数实时精确调控机制，获得采用变光斑激光金属直接成形涡轮叶片的优化成形工艺。

④发表学术论文 6-10 篇，其中 SCI 收录 3-5 篇，EI 收录 5-8 篇；在变光斑 LMDF 工艺方法及变斑同轴送粉喷嘴装置方面，申请发明专利 1-2 项；在熔覆层几何形貌理论模型、熔池温度场及应力场模拟、工艺调控及优化方面协助培养研究生 1-2 名。

● 国际合作与交流计划

针对本项目研究内容，拟于 2015 年下半年，邀请新加坡国立大学工程学院机械工程系教授 Fuh Y H, Jerry 来苏州大学进行学术交流。

3. 研究基础与工作条件

（1）工作基础（与本项目相关的研究工作积累和已取得的研究工作成绩）

● 与本项目相关的研究工作积累

NSFC 2014

申请人及所在的苏州大学机电工程学院激光制造技术研究所长期从事激光与物质的相互作用规律、激光快速成形工艺及装备、激光表面改性与修复和激光制备新材料及其性能的研究工作，为本项目设计与实验创造了有利条件。

从 2005 年至今，本项目申请人在国家“973”计划“大型动力装备制造基础研究子课题四-复杂构件的高能束控形控性制造”（编号：2007CB707704）、国家自然科学基金“超高能束空心超细柱晶叶片的成形机理及关键技术研究”（编号：50675171）、江苏省科技支撑计划-工业部分“中空激光光内送粉送丝三维制造关键技术与装备”（编号：BE2012068）、江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金“光内送粉激光金属直接成形单道熔覆截面尺寸的理论模型与实验研究”（编号：GZ201106）及苏州大学青年教师预研基金“光内送粉激光变斑直接制造薄壁叶片的成形机理与方法研究”（编号：SDY2012A14）等项目的支持下，一直从事 LMDF 技术的理论、装备与工艺研究工作，已进行如下几方面的前期基础研究工作:

①开展了“光外送粉”激光金属直接成形空心涡轮叶片的工艺研究工作，已成功制造空心涡轮叶片样件，如图 1(e)所示。为“光内送粉”变光斑 LMDF 复杂结构涡轮叶片的成形提供了有益借鉴。相关研究工作可参考文献[22]。

②研究了“光外送粉”激光离焦量及粉末离焦量对熔覆层表面成形精度的影响规律，基于瞬态-质量及能量守恒定律建立了“光外送粉”单道熔覆层截面尺寸的工艺理论模型，为本项目建立熔覆层几何形貌模型提供理论指导。相关成果已发表在《Rapid Prototyping Journal》上：“The Influence of Standoff Variations on the Forming Accuracy in Laser Direct Metal Deposition”及《Optics & Laser Technology》上：“The influence of laser and powder defocusing characteristics on the surface quality in laser direct metal deposition”。（**论文第一作者为本项目申请人**）

③完成了“光外送粉”薄壁叶片轮廓曲率及层数对熔池温度场影响规律的数值模拟研究，提出并获得了在保持熔池温度稳定条件下激光功率随曲率及层数的变化趋势，并依据此趋势进行实验研究，大大提高了薄壁叶片的壁厚精度。为顺利开展涡轮叶片温度场及应力场的研究提供研究思路。相关成果已发表在《International Journal of Advanced Manufacturing Technology》上：“Numerical simulation of thermal behavior during laser direct metal deposition”。（**论文第一作者为本项目申请人**）

④完成了“光外送粉”成形件的结构特征对粉末流场汇聚特性的影响规律研究，发现与自由射流状态相比，在成形零件时粉末汇聚点浓度增大且汇聚焦点上移，与实际工况一致。可作为本项目中单粉管气固两相流粉末流场分布规律的前期基础研究。相关成果已发表在《Optics & Laser Technology》上：

“Numerical simulation of metallic powder flow in a coaxial nozzle in laser direct metal deposition”。（**论文第一作者为本项目申请人**）

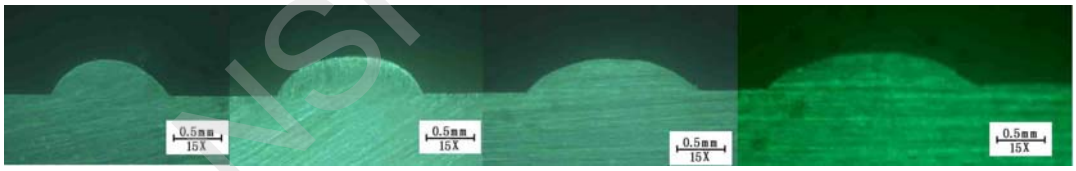
⑤研究了“光内送粉”外层保护气压力对粉末汇聚特征的影响规律，为本项目粉末汇聚直径参数调控提供方法。相关成果已发表在2013年中国光学学会学术大会及《中国激光》上：“保护气压力对光内送粉喷嘴粉末流场的影响研究”。（**论文通讯作者为本项目申请人**）

● 已开展的部分研究工作

采用初步设计的实验方案本项目进行了简单的变斑工艺实验。在变激光光斑同时仅变化激光功率及送粉量，成形不等宽单道熔覆轨迹如图 10(a)所示。截取第三道熔覆层轨迹（沿熔道次序）的放大图及其四个横截面（沿激光扫描方向）的形貌分别如图 10(b)及图 10(c)所示。



(a) 单道熔覆层　　(b) 第三道熔覆层轨迹放大图



(c) 第三道熔覆层四个横截面形貌

图 10 不等宽熔覆层

由图 10(a)及图 10(b)可以看出，通过单道变光斑工艺一次扫描而非多道搭接能够直接堆积出不等宽熔覆层，说明此实验方案是可行的。同时也看出工艺参数配合的不是很合理，造成熔覆层高度增长稍有差异，这也正是本项目要解决的关键科学问题（工艺参数实时精确调控）。

（2）工作条件（包括已具备的实验条件，尚缺少的实验条件和拟解决的途径，包括利用国家实验室、国家重点实验室和部门开放实验室等研究基地的计划与落实情况）

已具备的实验条件包括：

● 激光成形设备（生产单位：型号）：

①IPG 2000W 光纤激光器 1 台（德国 IPG 光子公司：YLS-2000）；10KW 横流 CO_2 激光器 1 台（武汉大族金石凯激光系统有限公司：GS-TFL-10 KW）；

②5 轴联动数控成形机床 2 台（苏州天弘激光股份有限公司；武汉大族金石凯激光系统有限公司）；

③双筒送粉器 2 台（德国 GTV：TWIN PF 2/2-MF；北京航空制造工程研究所：DSPF-2）；

④中空光光内送粉同轴送粉喷嘴 2 台（苏州大学）；

⑤惰性气体工作室 1 套（苏州天弘激光股份有限公司）；

⑥激光快速成形软件包 2 套（苏州大学；苏州天弘激光股份有限公司）。

● 测试及分析设备（生产单位：型号）：

①高速 CCD 及动态图形信号摄像与分析系统（加拿大 Qimaging 公司：MicroPublisher 5 RTV）；

②双色红外测温仪（美国 Raytek 公司：MR1SCSF）；

③Accuraspray 传感器（加拿大 Tecnar Automation 公司：Accuraspray-G3C）；

④表面粗糙度仪（英国 Taylor Hobson 公司：Surtronic 25）；

⑤冷场发射扫描电子显微镜及能谱仪(日本日立公司：S-4700)；

⑥全自动 X 射线衍射仪(日本 Rigaku 公司： D/MAX-IIIC)；

⑦光学显微镜（德国徕卡微系统公司：LEICA DM IRM）；

⑧电子万能试验机（济南试金集团有限公司：WDW-200D）；

⑨电液伺服疲劳试验机（长春新科试验仪器有限公司：PLA30200）。

已具备所需要的全部实验条件。

（3）承担科研项目情况（申请人正在承担或参加科研项目的情况，包括自然科学基金的项目。要注明项目的名称和编号、经费来源、起止年月、与本项目的关系及负责的内容等）

● 作为项目负责人正在承担的科研项目

①江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金“光内送粉激光金属直接成形单道熔覆截面尺寸的理论模型与实验研究”（编号：GZ201106），2011/10-2014/06，2 万，负责建立理论模型，为本项目的理论研究提供参考。

②苏州大学青年教师预研基金“光内送粉激光变斑直接制造薄壁叶片的成形机理与方法研究”（编号：SDY2012A14），2012/11-2014/11，2 万，负责调控工艺参数实时变化，为本项目工艺参数的耦合调控提供指导。

● 作为项目骨干近年来参与的科研项目

①国家“973”计划“大型动力装备制造基础研究子课题四-复杂构件的高能

NSFC 2014

束控形控性制造”（编号：2007CB707704），2007/05-2012/05，400 万。

②国家自然科学基金“超高能束空心超细柱晶叶片的成形机理及关键技术研究”（编号：50675171），2007/01-2009/12，30 万。

③江苏省科技支撑计划-工业部分“中空激光光内送粉送丝三维制造关键技术与装备”（编号：BE2012068），2012/05-2014/05，120 万。

（4）完成自然科学基金项目情况（对申请人负责的前一个已结题科学基金项目（项目名称及批准号）完成情况、后续研究进展及与本申请项目的关系加以详细说明。另附该已结题项目研究工作总结摘要（限 500 字）和相关成果的详细目录）

无

4. 研究成果

主要论著(近 3 年来已发表的与本项目有关的主要论著目录和获得学术奖励情况，按以下格式填写)

（1）近 3 年来已发表与本项目有关的部分代表性论文

[1] **Zhu GX**, Li DC*, Zhang AF, Pi G, Tang YP, The influence of laser and powder defocusing characteristics on the surface quality in laser direct metal deposition, Optics & Laser Technology, 44(2), 349-356, 2012(SCI: 831ZR; EI: 20123715420251).

[2] **Zhu GX**, Li DC*, Zhang AF, Pi G, Tang YP, The Influence of Standoff Variations on the Forming Accuracy in Laser Direct Metal Deposition, Rapid Prototyping Journal, 17(2), 98-106, 2011(SCI: 750WS; EI: 20111113741273).

[3] **Zhu GX**, Zhang AF, Li DC*, Tang YP, Tong ZQ, Lu QP, Numerical simulation of thermal behavior during laser direct metal deposition, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 55(9-12), 945-954, 2011 (SCI:784MV,EI: 20113214208699).

[4] **Zhu GX**, Li DC*, Zhang AF, Tang YP, Numerical simulation of metallic powder flow in a coaxial nozzle in laser direct metal deposition, Optics & Laser Technology, 43(1), 106-113, 2011(SCI: 653PL; EI: 20103313153182).

[5] **朱刚贤***, 石拓, 傅戈雁, 石世宏, 李洪远, 中空光光内送丝熔覆工艺参数对熔覆层质量的影响, 应用激光, 33(4), 381-384, 2013.

[6] **朱刚贤***, 石拓, 傅戈雁, 石世宏, 李洪远, 光内送丝激光熔覆工艺参数对熔覆层质量的影响, 第十届全国激光加工会议, 2012.11.08-10, 中国温州(**大会宣读论文**).

[7] 王丽芳, **朱刚贤***, 石世宏, 傅戈雁, 保护气压力对光内送粉喷嘴粉末流场的影响研究, 中国激光, 40(s1), s103007, 2013.

[8] 王丽芳, **朱刚贤***, 石世宏, 傅戈雁, 外层保护气压力对光内送粉喷嘴粉末流场的影响研究, 2013年中国光学学会学术大会, 2013.08.15-18, 中国长沙(**大会宣读论文**).

[9] Zhang AF*, Deng X, **Zhu GX**, Lu ZL, Li DC, Influence of laser waveform features on accuracy of direct metal forming, Materials Technology, 26(2), 71-75, 2011(SCI: 754FZ; EI: 20111713937348).

[10] Pi G, Zhang AF*, **Zhu GX**, Li DC, Lu BH, Research on the forming process of

three-dimensional metal parts fabricated by laser direct metal forming, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 57(9-12), 841-847, 2011(SCI: 842VJ; EI: 20115114608478).

[11] 付伟, 张安峰*, 李涤尘, **朱刚贤**, 路桥潘, 鲁中良, 同轴送粉喷嘴三路气速度对粉末汇聚特性的影响, 中国机械工程, 22(2), 220-226, 2011.

[12] 张安峰*, 李涤尘, 张利峰, **朱刚贤**, 皮刚, 付伟, 同轴送粉喷嘴粉末汇聚特性三维数值模拟, 红外与激光工程, 11(4), 327-331, 2011(EI: 20112814137451).

[13] 葛江波, 张安峰*, 李涤尘, **朱刚贤**, 路桥潘, 贺斌, 鲁中良, 激光金属直接成形DZ125L高温合金零件工艺的研究, 中国激光, 38(7), 0703004, 2011(EI: 20113114207838).

[14] Liu XB*, Pan M, Zhang ZG, Tan JS, **Zhu GX**, Wang MD, Numerical simulation of stress field for laser thermal loading on piston, Optics & Laser Technology, 44, 1636-1640, 2012 (SCI: 910BE;EI:20120814786195).

[15] Zhang AF*, Fu W, Li DC, Lu ZL, **Zhu GX**, Lu QP, Effect of coaxial powder nozzle design parameters and the gas flow on the powder gathering characteristics, International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering, 16-18 September 2011, Guangzhou, China(EI:20113914365453).

[16] 杨小虎, 张安峰*, 李涤尘, 鲁中良, **朱刚贤**, 贺斌, 激光金属直接成形工艺参数对形貌自愈合能力的影响,中国激光, 38(6), 0603023, 2011(EI: 20112714124450).

（2）近3年来已申请及授权的与本项目有关的发明专利

[1] **朱刚贤**, 石世宏, 傅戈雁, 王丽芳, 一种不等宽构件的激光直接成形方法, 2013.05, 中国, 201310174650.3.（**已公开**）

[2] 张安峰, 李涤尘, **朱刚贤**, 路桥潘, 同治强, 卢秉恒, 一种薄壁变曲率空心叶片的制造方法, 2012.05, 中国, 201010607192.4.（**已授权**）

[3] 张安峰, 李涤尘, **朱刚贤**, 同治强, 路桥潘, 卢秉恒, 一种在线检测及控制激光金属成形高度的方法, 2011.11, 中国, 201010216398.4.（**已授权**）

[4] 张安峰, 李涤尘, 同治强, 路桥潘, **朱刚贤**, 卢秉恒, 提高激光金属成形零件表面平整度的方法, 2012.09, 中国, 201010234337.0.（**已授权**）

[5] 张安峰, 李涤尘, 皮刚, 张利峰, **朱刚贤**, 卢秉恒, 基于自愈合机制的激光金属直接成形实验方法, 2011.11, 中国, 200910022659.6.（**已授权**）

5. 经费申请说明

购置单项经费5万元以上固定资产及设备等，须逐项说明与项目研究的直接相关性及必要性。

本项目没有购置5万元以上的固定资产及设备。研究经费占申请基金资助经费的75%，劳务费占申请基金资助经费的10%，国际合作与交流费占申请基金资助经费的10%，管理费占申请基金资助经费的5%。

6. 其他需要说明的问题

无

附件信息

序号	附件名称	备注	附件类型
1	代表性论文首页扫描文件		其他
2	代表性专利扫描文件		其他

NSFC 2014

签字和盖章页

申 请 人： 朱刚贤 依托单位： 苏州大学

项目名称： 涡轮叶片的光内送粉变光斑高效增材制造方法及机理研究

资助类别： 青年科学基金项目 亚类说明：

附注说明：

申请人承诺：

我保证申请书内容的真实性。如果获得资助，我将履行项目负责人职责，严格遵守国家自然科学基金委员会的有关规定，切实保证研究工作时间，认真开展工作，按时报送有关材料。若填报失实和违反规定，本人将承担全部责任。

签字：

项目组主要成员承诺：

我保证有关申报内容的真实性。如果获得资助，我将严格遵守国家自然科学基金委员会的有关规定，切实保证研究工作时间，加强合作、信息资源共享，认真开展工作，及时向项目负责人报送有关材料。若个人信息失实、执行项目中违反规定，本人将承担相关责任。

编号	姓名	工作单位名称	项目分工	每年工作时间（月）	签字
1	刘秀波	苏州大学	理论模型的建立	6	
2	尹成科	苏州大学	工艺控制系统	8	
3	王丽芳	苏州大学	组织性能分析	10	
4	史建军	苏州大学	熔池温度场应力场数值模拟	10	
5	顾传祥	苏州大学	工艺研究	10	
6	杨轼	苏州大学	工艺研究	10	
7					
8					
9					

依托单位及合作研究单位承诺：

已按填报说明对申请人的资格和申请书内容进行了审核。申请项目如获资助，我单位保证对研究计划实施所需要的人力、物力和工作时间等条件给予保障，严格遵守国家自然科学基金委员会有关规定，督促项目负责人和项目组成员以及本单位项目管理部门按照国家自然科学基金委员会的规定及时报送有关材料。

依托单位公章 合作研究单位公章1 合作研究单位公章2

日期： 日期： 日期：