

激光快速成形技术新进展及其在高性能材料加工中的应用

苏海军, 尉凯晨, 郭伟, 马菱薇, 于瑞龙, 张冰, 张军, 刘林, 傅恒志

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

摘要: 回顾了激光快速成形技术的发展历程, 评述近年来发展的几种具有代表性的激光快速成形技术主要包括激光熔覆成形技术、激光近形技术、激光立体成形技术以及选择性激光熔化技术的原理、技术特点及最新研究进展, 介绍了这几种技术在金属及陶瓷等高性能材料中的应用, 并指出激光快速成形技术是实现高致密度、高精度以及复杂结构金属以及陶瓷构件的最有力途径, 最后展望了激光快速成形技术的发展趋势。

关键词: 激光快速成形; 金属; 陶瓷; 复合材料; 快速凝固

中图分类号: TB332

文献标志码: A

New development of laser rapid forming and its application in high performance materials processing

SU Hai-jun, WEI Kai-chen, GUO Wei, MA Ling-wei, YU Rui-long, ZHANG Bing,
ZHANG Jun, LIU Lin, FU Heng-zhi

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The development history of laser rapid forming (LRF) was reviewed, and the theory, technical characteristics and recent development of several representative LRF techniques including the laser cladding forming, laser engineered net shaping, laser solid forming and laser selective melting techniques were summarized. On the basis, the applications of the above several techniques to high-performance metal and ceramic materials were introduced. The LRF technique is the most promising method to achieve advanced metals and ceramics with near-full density, high shaping precision and complex structure. Finally, the possible development trends of LRF in future were discussed.

Key words: laser rapid forming; metals; ceramics; composites; rapid solidification

激光快速成形技术(Laser rapid forming, LRF)是20世纪末发展起来的一种材料制备新技术,以快速成形原理(Rapid prototyping, RP)与激光熔覆制造思想为基础,通过结合计算机辅助设计、激光加工、凝固技术、数控技术、材料以及力学等学科先进技术,将激光快速成形技术获得的独特凝固组织通过逐层堆积并扩展到整个三维实体零件,从而使传统的材料成形多步制造工艺集成为一步制造,极大地提高了工件制造效率以及材料性能并节省了成本,被认为是制造领域

的一次重大变革,代表先进制造技术和材料制备技术的最新发展方向,目前,已应用于金属、陶瓷、塑料以及各种复合材料的制备和零件修复中^[1-2]。

与传统制造技术相比,激光快速成形技术具有以下突出特点。

1) 打破了传统材料去除或变形加工成形方法的限制,利用“离散+堆积”的增材成形思想,通过同步送粉(送丝)或激光熔覆数字化成形一步实现工件的精确成形;

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51272211, 51002122); 陕西省自然科学基金资助项目(2010JQ6005); 航空科学基金资助项目(2010ZF53064); 中国博士后科学基金资助项目(2012M510218); 西北工业大学校级大学生创新实验计划(XJ1025)

收稿日期: 2012-09-13; **修订日期:** 2013-01-09

通信作者: 苏海军, 副教授, 博士; 电话: 029-88492228; E-mail: shjnpu@nwpu.edu.cn

2) 属近净成形制造技术。制造时无需预制材料毛坯和设计模具,几乎做到无废料加工,极大地提高了材料利用率,降低了设计成本和制造成本,同时大幅度缩短制造周期。一般制造费用降低 50%,加工周期缩短 70%以上;

3) 激光快速凝固能够产生超细化的凝固组织以及许多常规条件下无法得到的组织,使材料的各方面性能获得大幅度的提高或获得新的功能特性,其力学性能超过铸件的,而与锻件的力学性能相当;

4) 适用的材料种类不受限制。激光具有非常高的能量密度,能够快速熔化各种材料,尤其适用于传统技术难以制备的难熔合金和高熔点陶瓷材料以及梯度功能材料,适应性很强;

5) 制造工艺与所生产零件的尺寸、复杂程度无关,能够快速生产传统制造工艺难以制备的形状复杂的零件,如薄壁结构、封闭内腔结构等。

因此,鉴于以上优异的特性以及广阔的发展和前景,从 20 世纪 90 年代起,激光快速成形技术持续成为世界各国研究机构关注的热点,并飞速发展起来。近年来,人们在激光快速成形原理的基础上设计和开发了多种不同特征的激光快速成形技术。例如,由美国 Sandia 国家实验室发展的激光近形制造技术(Laser engineered net shaping, LENS)^[3]、英国利物浦大学和美国密西根大学发展的直接金属沉积技术(Direct metal deposition, DMD)^[4]、英国伯明翰大学发展的直接激光制造技术(Direct laser fabrication, DLF)^[5]、德国亚琛工业大学 Fraunhofer 激光技术研究所以发展的激光选择性熔化技术(Laser selective melting, LSM)^[6]以及西北工业大学发展的激光立体成形技术(Laser solid forming, LSF)^[7]等。基于激光快速成形技术近年来的发展以及本文作者前期在该方面所开展的工作,本文作者在此主要介绍了目前及新发展的几种主流的激光快速成形技术的原理、技术特点及其在高性能材料加工中的应用,并对激光快速成形技术的发展进行了展望。

1 激光快速成形方法及进展

1.1 激光熔覆成形技术

1.1.1 激光熔覆成形技术原理

激光熔覆亦称激光包覆或激光熔敷,是一种重要的材料表面改性技术。它是利用高能激光束($10^4 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$)在金属表面辐照并诱发化学反应^[8],通过迅速熔化、扩散和快速凝固的手段(冷却速率 $10^2 \sim 10^6 \text{ }^\circ\text{C/s}$)

在金属基材表面形成一层厚度 $10 \sim 1\ 000 \text{ }\mu\text{m}$ 、具有特殊物理、化学或力学性能的冶金表面涂层,以弥补基体在某些性能方面的不足,从而显著改善基材表面耐磨、耐蚀、耐热、抗氧化及功能等特性,达到表面改性或修复的目的,既满足了材料表面对特定性能的要求,又节约了大量的贵重金属原料。熔覆材料添加方式有预置粉末法以及同步送粉法等。图 1 所示为激光熔覆成形技术原理图。

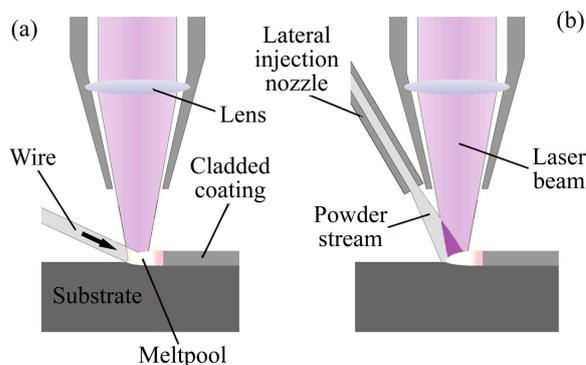


图 1 激光熔覆成形原理图

Fig. 1 Schematic diagram of cladding laser forming: (a) Wire feeding; (b) Powder feeding

1.1.2 激光熔覆成形技术特点

与堆焊、喷涂、电镀和气相沉积等传统表面改性技术相比,激光熔覆成形技术具有以下优点^[9]: 1) 涂层与基体界面为完全冶金结合,结合强度高; 2) 聚焦激光辐照时形成的熔池小,热影响区小,在工件修复和表面改性时几乎不损伤基材; 3) 激光具有近似绝热的快速加热过程,能够在基材表面形成超细化的组织以及新的结构,显著改善材料表面的性能以及进一步拓展表面层的性能; 4) 控制激光的输入能量,能够将基体材料的稀释度降到较低的程度,从而在保证熔覆层与基体形成冶金结合的前提下,又能保持原选定熔覆材料的优异性能; 5) 易实现选区熔覆用来修复大的金属零件损伤,节约合金材料,降低生产成本; 6) 材料适用范围广,几乎所有的金属或陶瓷材料都能采用激光熔覆到任何合金上。基于以上特点,激光熔覆技术近 10 年来在材料表面改性方面受到了广泛关注。

1.1.3 激光熔覆成形技术研究进展

自从 1974 年 GNANAMUTHU 等^[10]申请了一项利用激光熔覆法在金属基体上熔覆另一层金属的专利后,美国 AVCO 和 METCO 公司随后做了大量基础研究工作。为了实现全方位送粉, KHANNA 等^[11]设计出一种最新的喷嘴装置,将粉末材料、气体与激光束三者同轴射入移动基体形成熔池,粉末利用率可达

40%^[11]。德国斯图加特大学发展了激光辅助粉末固化即 LAPS-J 系统(Laser aided powder solidification/powder jet), 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), 另外, 美国、德国和日本等国家的其他研究机构也做了许多研究工作。近年来, 华中科技大学、中国科学院、清华大学、西北工业大学等多家单位在激光熔覆设备及过程控制方面的研究取得了大量进展。图 2 所示为采用激光熔覆技术修复的高压压缩机轮毂薄壁的照片^[6]。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, 发展了激光快速柔性制造即 LRFM 系统。中科院已经开发出集成激光智能加工系统。随着控制技术以及计算机技术的发展, 激光熔覆技术越来越向智能化、自动化方向前进。



图 2 激光熔覆技术修复的高压压缩机轮毂薄壁的照片^[6]

Fig. 2 Photos showing repaired groove walls of front drum of high pressure compressor by laser cladding^[6]

1.2 激光近形技术

1.2.1 激光近形技术原理

在进行激光熔覆修复工件时, 有时为了实现修复和补充缺损的材料, 常常需要进行多层加工。因此, 在 20 世纪 90 年代末美国联合公司和美国 Sandia 国家实验室合作开发了激光近形技术(简称 LENSs)。该技术将激光熔覆技术和快速原型技术相结合, 利用计算机生成预成形零件的三位 CAD 模型, 并用分层切片软件获得各截面形状的参数, 然后由该参数生成激光扫描路径的控制代码控制工作台的移动和激光扫描路径, 采用激光熔覆方法进行逐层堆积, 同时通过监控 LENSs 工艺中的热信号实时校准测量仪器, 控制零件的制造过程, 最终形成具有一定形状的三维实体模型。LENSs 装置主要由 Nd: YAG 固体激光器、可调气体成分的手套箱、计算机控制系统、多坐标数控系统和送粉系统构成, 如图 3 所示。通常, 该工艺制造的金属零件经少量精加工后能够直接作为塑料注射成形用模具。

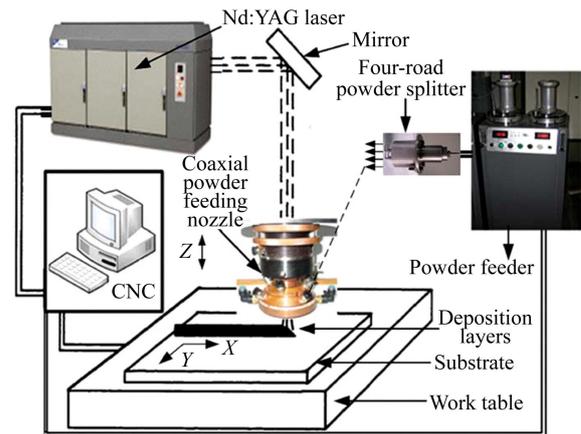


图 3 激光近形技术示意图^[12]

Fig. 3 Schematic diagram of LENSs system^[12]

1.2.2 激光近形技术特点

激光近形技术与 RP 技术的基本思路一致, 除具有快速原型技术的特点外, 它还具有以下独特的优点: 1) 成形材料范围广, 凡被加工材料对激光有较高的吸收率, 即可用 LENSs 方法处理; 2) 不需要生产昂贵的模具, 降低模具设计和生产成本, 制造周期大幅缩短, 效率高; 3) 与传统成形工艺相比, LENSs 工艺成形的金属件塑性没有损失, 且强度显著提高; 4) 由于激光光源采用的是连续波 Nd:YAG 激光器, 因此激光光束可采用光纤传输, 无需昂贵的光学传导镜片, 光路设计和成本大大降低, 提高硬件设计柔性; 5) 与激光熔覆技术相比, LENSs 在制备异质材料(功能梯度材料、复合材料)方面具有独特的优势。然而, LENSs 的缺点主要表现在系统的制造成本太高、零件的精度和沉积效率相对较低, 这些均极大地限制了该技术的广泛推广, 使得该技术目前仅在一些财力雄厚的国际性企业中得到初步应用。

1.2.3 激光近形技术研究进展

1998 年, 美国 Sandia 国家实验室率先推出了商品化的激光快速制造系统 LENSs 750, 通过改变激光功率、沉积速率、金属送粉率等方法生产出包括飞机起落架、发动机叶片等许多高性能金属零件, 制造速率大大提高, 且零件的抗拉强度和断裂强度较传统方法的有很大提高。图 4 所示为采用 LENSs 技术制造的飞机外挂架舱壁照片。近年来, 随着大功率半导体激光器的发展, 采用半导体激光器作为激光光源的 LENSs 系统逐渐出现, 激光工作台从最初的三轴工作台发展到五轴工作台以及高性能多自由度机床乃至工业机器人, 极大地提高了工件成形的精度和复杂性。德国通快公司开发了 DMD505 LENSs 设备, 系统采用五轴数控

系统, 加工范围为 $2\,000\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm} \times 750\text{ mm}$ ^[13]。

西北工业大学凝固技术国家重点实验室黄卫东和北京航空航天大学王华明等^[14]较早开展金属材料的激光近形设备及技术研究。近年来, 通过大量工艺实验优化了工艺参数, 获得了较为复杂的 Ti 合金、Ni 合金以及金属间化合物等的激光近形技术金属零件, 所制造零件组织均匀, 其力学性能与锻件零件的力学性能相当, 可满足实际生产需求。



图4 采用 LENS 技术制造的飞机外挂架舱壁照片

Fig. 4 Photo of exterior hanging wall of plane fabricated by LENS

1.3 激光立体成形技术

1.3.1 激光立体成形技术原理

激光立体成形技术是在激光近形技术的基础上发展起来的, 被认为是实现高性能复杂结构致密金属零件快速无模自由成形的新型激光加工技术。该技术原理与 LENS 技术类似, 即首先在计算机中生成零件的三维 CAD 实体模型, 然后将模型按一定厚度切片分层, 即将零件的三维形状信息转换成一系列二维轮廓信息, 随后在数控系统的控制下, 用同步送粉激光熔覆的方法将金属粉末材料按照填充路径在基材上逐点填满给定的二维形状, 重复这一过程逐层堆积从而构建三维实体零件。与 LENS 不同的是所使用的激光器功率、沉积速率及数控机床的动轴数不同。激光立体成形通常采用 CO₂ 激光器。图 5 所示为激光立体成形技术示意图^[15]。

1.3.2 激光立体成形技术特点

激光立体成形技术具有以下优点: 1) 无需材料毛坯, 制造柔性化程度高, 生产的产品外形规整、精度高, 提高了材料利用率, 降低了制造成本, 并缩短了制造周期; 2) 无需设计和制造模具, 零件的设计、建模、分层切片以及制造过程均由计算机程序控制, 大

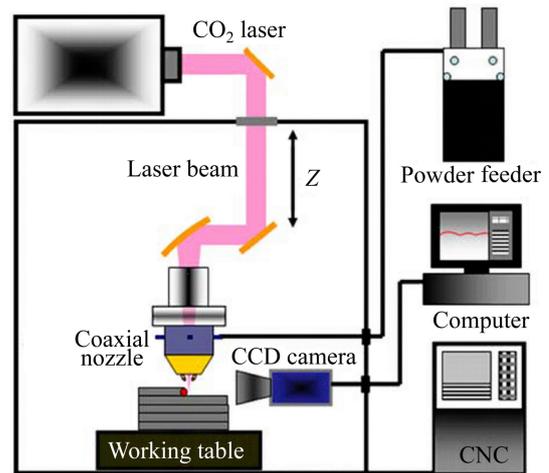


图5 激光立体成形技术原理示意图^[15]

Fig. 5 Schematic diagram of laser solid forming^[15]

大提高了工作效率和制造精度; 3) 与激光熔覆相比, 激光立体成形是同种金属材料的多层熔覆, 层与层之间的冶金结合质量更高; 4) 激光立体成形过程中, 材料在高能激光束作用下快速熔化并凝固, 因此制备的零件致密度高, 组织细密, 性能大大提高; 5) 激光立体成形技术不仅可以用于承受强大力学载荷的三维实体金属零件的快速制造, 而且还可应用于零件上具有较复杂形状、一定深度制造缺陷、误加工损伤或服役损伤的修复, 因此, 在航空、航天、汽车等高新技术领域展示出广阔的应用前景。

1.3.3 激光立体成形技术研究进展

激光立体成形技术在高性能和复杂结构的金属零件的制造和修复具有独特的优势, 发展迅猛。MAZUMDER 等^[16]通过融合激光、传感器、计算机数控平台、CAD/CAM 软件、熔覆冶金学等多种技术, 研究开发了直接金属沉积的激光立体成形系统, 能够制造出适于直接应用的金属零件; 德国弗朗霍夫生产技术研究所以^[17]通过融合材料添加和去除方法开发了控制金属堆积技术的激光立体成形系统, 有效改善了零件的精度和表面粗糙度; 黄卫东等^[2]开发研制了五轴联动的专用激光立体快速成形机, 成形的零件尺寸最大达到 $600\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$, 并对镍基高温合金、不锈钢、钛合金和口腔修复体等材料的成形工艺特性进行了大量的工艺实验。通过对工艺参数进行优化, 获得了形状较为复杂的激光立体成形金属零件, 成形件外形规整无缺陷, 表面质量良好。最近, 本文作者开发了用于制备高性能陶瓷材料的激光立体成形系统, 其结构示意图如图 6 所示^[18]。

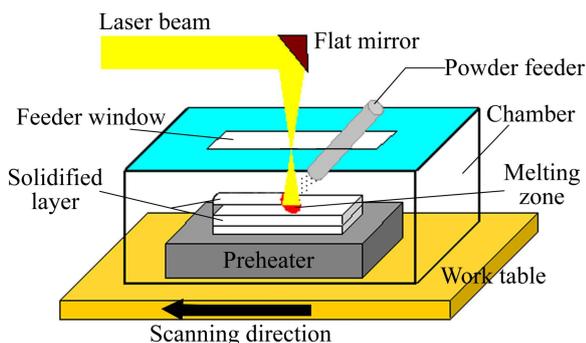


图 6 改进的制备陶瓷材料的激光立体成形示意图^[18]

Fig. 6 Schematic diagram of modified laser solid forming for preparing ceramics^[18]

1.4 选择性激光熔化技术

1.4.1 选择性激光熔化技术原理

选择性激光熔化技术(SLM)是快速原型制造技术的一个重要分支,它是在选择性激光烧结技术的基础上发展起来的,利用高功率密度的激光束直接熔化金属粉末,获得具有冶金结合,相对密度接近 100%,结构复杂、尺寸精度高的金属零件^[6]。SLM 基本原理是利用计算机编制出 CAD 模型,用分层切片软件处理,形成一系列的薄面截层,与此同时获得各截层信息参数,并根据相关参数控制激光束有选择性的熔化各层的金属粉末材料。当一层粉末加工完成后,粉床下降一定距离,送粉器同时再铺上一层粉末,此过程不断反复并逐步堆叠成三维金属零件。SLM 技术需要使金属粉末完全熔化,直接成形金属件,因此需要高功率密度激光器,光斑使用光束模式优良的光纤激光器作为加热源,激光聚焦到几十至几百微米。目前,SLM 技术通常功率在 50 W 以上,功率密度达 5×10^6 W/cm² 以上^[1]。选择性激光熔化的示意图如图 7 所示^[19]。

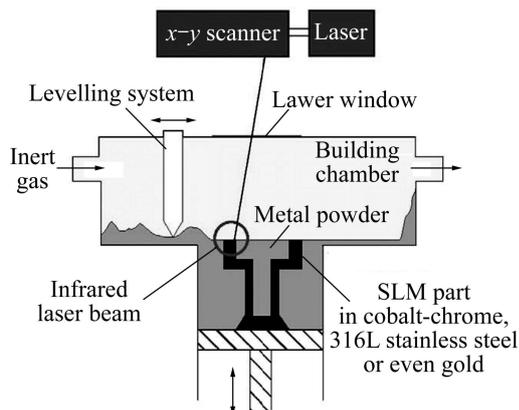


图 7 选择性激光熔化成形技术示意图^[19]

Fig. 7 Schematic diagram of selective laser melting^[19]

SLM 与 LSF 技术不同之处在于,SLM 是基于粉末床的材料快速制备方法,而 LSF 是基于激光熔覆的增材快速制造技术。

1.4.2 选择性激光熔化技术特点

选择性激光熔化技术特点如下。

1) 制备零件致密度和精度高、组织细小,致密度几乎达到 100%,产品不需进行任何后处理工艺或只需进行简单的表面处理即直接用于生产,零件的力学性能与锻造工艺所得零件的力学性能相当。

2) 生产周期短,从 CAD 设计到零件的加工完成只需几小时到几十小时,这一特点使其特别适合于新产品的开发,生产成本低,是其他成形技术无可比拟的。

3) 导光系统使用振镜,反映速度快、定位准确,非常适合加工尺寸较小、形状复杂、要求精密的零件。

4) 与 LENSs 技术相比,LSM 成形过程与零件的复杂程度无关,在计算机帮助下几乎可以制造任何复杂形状的零件,尤其是具有复杂凹凸部分,中空和三维的零部件。

5) 材料范围宽,理论上加热后能够熔化的材料都可以通过 SLM 进行成形,包括金属、塑料和陶瓷等多种材料。

1.4.3 选择性熔化技术研究进展

目前,德国在该技术领域处于领先地位。1995 年,德国亚琛工业大学 ILT 研究所首先提出了 LSM 技术,并于 2002 年研制成功,之后该技术发展迅速^[6]。近年来,德国 EOS 公司推出了 EOSINTM270 型 SLM 设备,其激光器为固体 Yb 光纤激光器,最小光斑仅为 100 μ m,功率密度高,可支持更高的扫描速度,减少了零件的激光热影响和成形过程的变形^[19]。MCP 公司开发了能够直接成形金属零件的 SLM 设备 MCP Realizer,加工层厚度精确控制可达到 30 μ m,大大提高成形精度,且加工件表面精度好。图 8 所示为采用 SLM 技术制备的高压涡轮叶片尾缘照片^[6]。最近,ZHANG 等^[20]采用 SLM 技术成功制备了致密度大于 99%、具有复杂形状的 Ti-24Nb-4Zr-8Sn 合金微型伞藻杯(见图 9)。华南理工大学、华中科技大学、南京航空航天大学较早开展了关于 SLM 技术的研究。华中科技大学先后推出了 HRPM-I 和 HRPM-II 两套 SLM 设备,解决了大尺寸 SLM 零件易于变形的难题,成功开发出具有大面积工作台(250 mm \times 250 mm)的 SLM 系统。华南理工大学与广州瑞通激光科技有限公司合作开发了 SLM 制造设备样机 DiMetal-280,成形零件相对密度 $\geq 97\%$,尺寸精度 20~100 mm^[1]。南京航空航天大学顾冬冬等^[21]采用 SLM 技术制备了形状复杂、高致

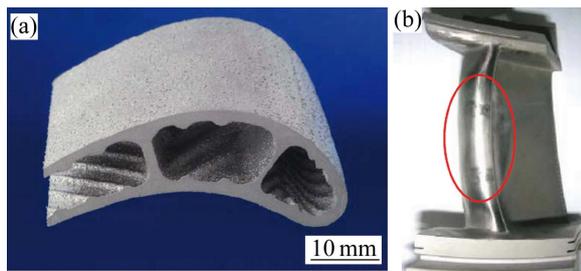


图8 采用 SLM 技术制备的高压涡轮叶片尾缘照片^[6]

Fig. 8 Photos of patch produced by SLM(a) and welded into PW4000 HPT vane(b)^[6]

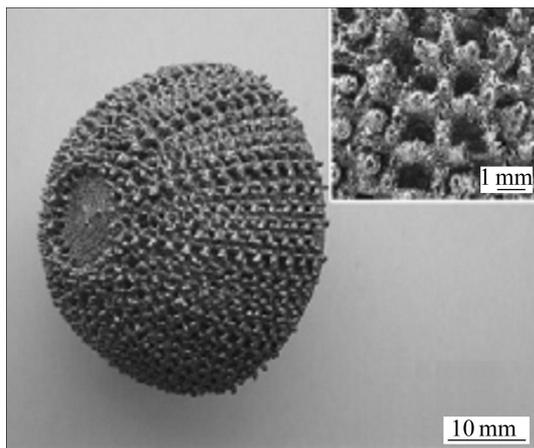


图9 采用 SLM 技术制备的微型 Ti-24Nb-4Zr-8Sn 伞藻杯形貌^[20]

Fig. 9 Morphologies of small scale Ti-24Nb-4Zr-8Sn alloy acetabular cup manufactured by SLM^[20]

密度的 TiC_x/Ti 纳米复合材料。

2 激光快速成形技术在高性能材料加工中的应用

2.1 激光快速成形技术在金属材料中的应用

自从 1995 年美国首先提出高性能金属零件的激光快速成形技术以来, 该技术以其独特的优势和极强的竞争力迅速在航空、航天、工业制造、医疗、考古、民用等领域获得了广泛的应用。美国 Sandia 国家实验室研究了不锈钢、镍基合金、钛合金、难熔金属材料等的组织及性能, 并采用该技术成功制造出铍及铱的喷管, 显示出该技术在高性能金属零件直接成形方面的优势。

近年来, 钛合金在飞机中的应用越来越多, 激光快速成形技术在大型复杂合金结构件直接成形方面突

出的优势及其在飞机装备研制生产中的广阔应用前景使高性能钛合金结构件的激光快速成形研究成为该领域的研究重点。美国 MTS 公司于 1997 年成立专门从事钛合金飞机结构件激光快速成形技术开发与应用的 AeroMet 公司, 进行激光快速成形钛合金飞机结构件的应用及其关键技术研究, 直接成形出各种钛合金飞机结构件, 于 2000 年 9 月完成了激光快速成形钛合金飞机机翼结构件的地面性能考核试验, 构件的静强度及疲劳强度达到飞机设计要求^[7], 并在 2001 年为 Boeing 公司 F/A-18E/F 舰载联合歼击/攻击机提供小批量试制发动机舱推力头、翼梁等钛合金次承力结构件, 其力学性能全面超过传统制造工艺的结构件的力学性能, 并且成本低周期短; 率先实现了激光快速成形钛合金次承力结构件在 F/A-18 等战机上的验证考核和装机应用, 并制定出专门的技术标准(AMS 4999)。此外, 激光快速成形技术在高性能航空发动机叶片制造与修复方面也具有重要的应用。Rolls-Royce 的 RB211 飞机发动机高压叶片通常在 1 600 K 下工作, 用传统方法生产的叶片在高温下会产生裂纹, 利用激光快速成形技术生产得到的叶片则可以在该环境下很好地工作, 而且利用该技术生产叶片, 通过在重力作用下吹氩气送粉, 生产处理一个叶片只需 75 s, 合金用量减少 50%。美国 Los Alamos 国家实验室(LANL)利用激光直接技术制造出带有半球、直壁、通孔、尖角的零件, 加工材料包括 AlSi 316 和 400 不锈钢、 Fe_2Ni 合金、 Al_2Cu 以及 TiAl、NiAl 等金属间化合物, 并发现该技术生产的合金为完整的冶金结合, 超细的定向柱晶沿堆积方向向上生长, 并且其室温抗拉强度和结合处强度均显著提高, 垂直方向的伸长率是铸态的 3~4 倍, 水平方向的伸长率不低于铸态的, 零件的平均屈服寿命提高了 1.5 倍^[16]。激光快速成形技术还可以用于加工活性金属, 如镍、钨、铍及其他特殊金属, 它能提供良好气氛的工作环境, 材料浪费少。国内西北工业大学和北京航空航天大学分别利用激光立体成形技术对先进金属材料、金属间化合物高温耐磨耐蚀涂层、钛合金、高温合金、金属梯度复合材料以及牙科修复体等高性能金属材料制造和零件修复等进行了深入研究^[2, 14]。

2.2 激光快速成形技术在陶瓷材料中的应用

氧化物陶瓷具有优异的室温和高温力学性能、良好的抗氧化、抗腐蚀以及耐磨性, 特别是 ZrO_2 陶瓷在医学方面具有良好的生物相容性, 可制造人体植入物, 还可以用于牙齿修复, 因此, 近年来受到人们的广泛关注。然而, 陶瓷具有较高的熔点和硬度以及较大的

脆性, 传统烧结制备工艺程序复杂且制备的材料致密度低、强度较低、色泽差, 特别是难以制备形状复杂的零件, 后续加工量大。因此, 近年来世界各国开始尝试将金属材料的激光快速成形技术应用到氧化物陶瓷上来。SHISHKOVSKY 等^[22]采用 SLM 技术合成出了 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 复合陶瓷, 然而制备的工件内部含有大量的空隙和裂纹。最近 Fraunhofer 实验室对 SLM 技术进行了改进, 通过增加 YAG 激光器预热陶瓷粉末, 制备出无裂纹, 密度接近 100% 的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 复合陶瓷。HAGEDORN 等^[23]基于上述研究成果, 采用 SLM 技术成功制作了 3 单位的全瓷固定支架, 但表面质量较差。图 10 所示为采用 LSM 技术制备的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 陶瓷牙齿支架模型照片^[23]。本文作者最近采用改进的激光立体成形送粉技术成功地制备了表面光滑、密度近 100% 的高性能 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ 大尺寸共晶自生复合陶瓷^[18]。此外, 激光熔覆技术还可用作人工制备蓝宝石, 其密度及硬度与天然蓝宝石的相当, 并具有良好的晶体质量^[24]。



图 10 采用 SLM 技术制备的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 陶瓷牙齿支架模型照片^[23]

Fig. 10 Photo of dental restoration bridge for posterior region prepared by SLM^[23]

3 展望

1) 探索有效提高激光成形制造金属零件的尺寸精度和形状精度的方法, 进一步降低加工成本。

2) 激光快速成形技术工艺因素对零件凝固组织量化的控制研究, 建立激光快速成形制造过程的计算机数值模拟和理论模型。

3) 深入开展大型高性能金属结构部件的激光快速修复研究, 有效降低激光快速成形设备的制造和维护成本。

4) 大力开展激光快速成形技术在高性能陶瓷材

料制备方面的工艺积累, 未来激光快速成形技术在制备高性能生物陶瓷方面具有很大的潜力。

REFERENCES

- [1] 杨永强, 王迪, 杨斌, 罗子艺, 卢建斌. 激光快速成形技术在精密金属零件快速制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2010, 16: 48-52.
YANG Yong-qiang, WANG Di, YANG Bin, LUO Zi-yi, LU Jian-bin. Application of laser rapid prototyping technology in rapid manufacturing of precise metal part[J]. Aeronautical Manufacture Technology, 2010, 16: 48-52.
- [2] 黄卫东, 林鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29: 12-27.
HUANG Wei-dong, LIN Xin. Research progress in laser solid forming of high performance metallic component [J]. Materials China, 2010, 29: 12-29.
- [3] GRIFFITH M L, KEICHER D M, ATWOOD C L, ROMERO J A, SMUGERESKY J E, HARWELL L D, GREENE D L. Free form fabrication of metallic components using laser engineered net shaping (LENS)[C]// Solid Freeform Fabrication Proceedings. Texas, USA, University of Texas at Austin, 1996, 9: 125-131.
- [4] MURPHY M L, STEEN W M, LEE C. A novel prototyping technique for the manufacture of metallic components[C]// Proceeding of ICALEO, 1994. Orlando: Laser Institute of America, 1994: 31-40.
- [5] WU X, SHARMAN R, MEI J, VOICE W. Direct laser fabrication and microstructure of a burn resistant Ti alloy[J]. Materials and Design, 2002, 23(3): 239-247.
- [6] ANDRES G, GERHARD B, INGOMAR K. Laser additive manufacturing laser metal deposition (LMD) and selective laser melting (SLM) in turbo-engine applications[J]. Laser Technic Journal, 2010, 7(2): 58-63.
- [7] 黄卫东, 李延民, 冯莉萍, 陈静, 杨海欧, 林鑫. 金属材料激光立体成形技术[J]. 材料工程, 2002, 3: 40-43.
HUANG Wei-dong, LI Yan-min, FENG Li-ping, CHEN Jing, YANG Hai-ou, LIN Xin. Laser solid forming of metal powder materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2002, 3: 40-43.
- [8] 杨永强, 张翠红. 激光熔覆-激光氮化复合法制取 TiNi-TiN 梯度材料[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(2): 213-218.
YANG Yong-qiang, ZHANG Cui-hong. Synthesis of TiNi-TiN gradient coating by hybrid method of laser cladding and laser nitriding[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(2): 213-218.
- [9] 姚秀军. 激光熔覆及快速成形专用镍基粉末的研制[D]. 济南: 山东大学, 2006.
YAO Xiu-jun. Study on Ni-based alloy powders for the laser cladding and the rapid forming[D]. Ji'nan: Shandong University, 2006.
- [10] GNANAMUTHU D S. High temperature coatings by surface

- melting[P]. US 3952180, 1976-04-01.
- [11] KHANNA A S, KUMARI S, KANUNGO S. Hard coatings based on thermal spray and laser cladding[J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2009, 27: 485-491.
- [12] LU Z L, LI D C, LU B H, ZHANG A F, ZHU G X, PI G. The prediction of the building precision in the Laser Engineered Net Shaping process using advanced networks[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48: 519-525.
- [13] 张冬云, 王瑞泽, 赵建哲, 左铁钊. 激光直接制造金属零件技术的最新进展[J]. *中国激光*, 2010, 37: 18-25.
ZHANG Dong-yun, WANG Rui-ze, ZHAO Jian-zhe, ZUO Tie-chuan. Latest advance of laser direct manufacturing of metallic parts [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2010, 37: 18-25.
- [14] 王华明. 航空高性能金属结构件激光快速成形研究进展[J]. *航空制造技术*, 2005, 12: 26-28.
WANG Hua-ming. Advance of laser rapid forming of aviation metallic parts[J]. *Aeronautical Manufacture Technology*, 2005, 12: 26-28.
- [15] TAN Hua, CHEN Jing, ZHANG Feng-ying, LIN Xin, HUANG Wei-dong. Process analysis for laser solid forming of thin-wall structure[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2010, 50: 1-8.
- [16] MAZUMDER J, DUTTA D, KIKUCHI N, GHOSH, A. Closed loop direct metal deposition: art to part[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, 34: 397-414.
- [17] XUE L, CHEN J Y, ISLAM M U, PRIFCHARD J, MANENTE D, RUSH S. Laser consolidation of Ni base IN738 super alloy for repairing gas turbine blades[J]. *ICALEO*, 2000, 89: 31-38.
- [18] SU H J, ZHANG J, LIU L, ECKERT J, FU H Z. Rapid growth and formation mechanism of ultrafine structural oxide eutectic ceramics by laser direct forming[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99: 221913.
- [19] SANTOS E C, SHIOMI M, OSAKADA K. Rapid manufacturing of metal components by laser forming[J]. *International Journal of Machine Tools and manufacture*, 2006, 46: 1459-1468.
- [20] ZHANG L C, KLEMM D, ECKERT J, HAO Y L, SERCOMBE T B. Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of a biomedical Ti-24Nb-4Zr-8Sn alloy [J]. *Scripta Materialia*, 2011, 65: 21-24.
- [21] 李 闯, 顾冬冬, 沈以赴, 孟广斌. 选区激光熔化制备 TiC_v/Ti 纳米复合材料的致密化及显微组织[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(7): 1554-1561.
LI Chuang, GU Dong-dong, SHEN Yi-fu, MENG Guang-bin. Densification and microstructure of TiC_v/Ti nanocomposites prepared by selective laser melting[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(7): 1554-1561.
- [22] SHISHKOVSKY I, YADROITSEV I, BERTRAND P, SMUROV I. Alumina-zirconium ceramics synthesis by selective laser sintering/melting[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 25(4): 966-970.
- [23] HAGEDORN Y C, WILKES J, MEINERS W, WISSENBACH K, POPRAWA R. Net shaped high performance oxide ceramic parts by selective laser melting[J]. *Physics Procedia* 2010, 5: 587-594.
- [24] 左铁钊. 21 世纪的先进制造—激光技术与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 442-461.
ZUO Tie-chuan. Advanced manufacturing technology of 21 century—Laser science and technology[M]. Beijing: Science Press, 2007: 442-461.

(编辑 龙怀中)