

# 航空增材制造复杂结构件表面光整加工技术研究及进展\*

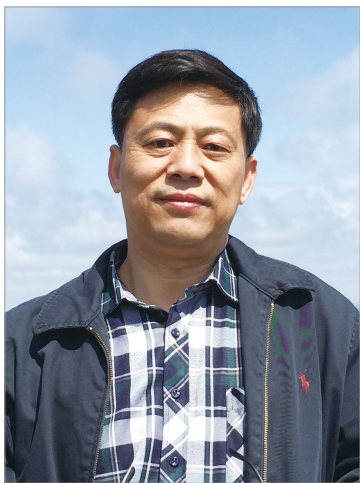
高航, 彭灿, 王宣平

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 大连 116024)

**[摘要]** 增材制造是解决航空复杂结构件制造难题的有效方法。首先概述了增材制造技术原理、特点及其在航空领域的应用, 并深入评述了增材制造技术在材料力学性能、表面质量等方面面临的挑战, 指出增减材复合制造的方法, 并表明先进表面光整加工技术是提升航空增材制造复杂结构件表面质量和精度的有效途径。重点阐述了高加工可达性的磨粒流加工技术在航空复杂结构件精密抛光中的优势, 并总结了保持零件精度同时改善表面质量需要重点研究的内容。

**关键词:** 增材制造; 光整加工; 磨粒流加工; 表面粗糙度; 复杂结构件

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.09.014



高航

教授、博士生导师, 大连理工大学现代制造技术研究所副所长、精密与特种加工教育部重点实验室副主任、中国机械工程分会常务理事、中国光整加工专业委员会主任委员、国际磨粒加工技术学会委员。研究方向为高效与精密磨削加工技术、光整加工技术等。

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(U1708256); 大连理工大学基本科研业务费项目(DUT1TZD201, DUT18GF104)。

航空航天装备作为《中国制造2025》提出要重点发展的十大领域之一, 受到国家和社会的广泛关注。航空装备的制造水平也是衡量一个国家综合经济能力和科技发展水平的重要标志。

随着航空产业的高速发展, 为了满足高端航空装备对零件的极端轻量化与可靠性要求, 先进飞机越来越多地增加高温合金、钛合金、高强铝合金和超高强度钢等高强度合金的用量, 且结构越来越复杂, 加工精度要求越来越高<sup>[1]</sup>, 其中高强度合金大型复杂整体结构件和精密复杂构件的制造给传统热成形和机械加工技术带来了重大挑战。

增材制造(Additive Manufacturing, AM)是一种基于离散堆积原理的数字化制造技术, 美国材料与试验协会将增材制造技术定义为利用三维模型数据自下而上地逐层堆叠材料制造实体物品的过程<sup>[2]</sup>。据统计, 当前

飞机机体结构重量的20%~35%和发动机结构重量的30%~45%的零件由锻造加工而成<sup>[3]</sup>, 而制造后期的机械加工切削余量高达70%以上, 因此材料利用率极低。而增材制造技术突破了传统减材制造的多工序去除材料的制造方式, 大大提高了材料利用率。此外, 因为逐层堆叠材料的原理, 增材制造可以加工传统减材制造无法完成的工件, 诸如镂空的网状复杂结构件等, 也可以通过合理优化某些大型承力结构件的结构实现轻量化设计, 以及使原来需要多个零件装配而成的部件简化为一体化的单一零件, 大大缩短了零部件的制造周期。基于以上优点, 增材制造成为了解决航空领域复杂结构件制造难题新的技术途径。

## 增材制造技术在航空领域的应用

自20世纪90年代中期, 英国罗

罗公司、美国波音公司和 GE 航空发动机公司等大型公司和国内外知名高校对增材制造技术及其在航空领域的应用进行了大量研究工作。经过近 30 年的研究,增材制造技术已成功应用于航空大型复杂构件和小型精密构件的直接成形。

北京航空航天大学长期从事钛合金激光增材制造技术的研究,实现了飞机钛合金次承力结构件、钛合金大型主承力结构件的增材制造新工艺,突破了激光快速成形飞机承力构件的组织性能和质量控制关键技术。图 1 (a) 所示为激光增材制造的钛合金主承力构件加强框,其综合力学性能超过了钛合金模锻件,零件的材料利用率提升了 5 倍,降低制造成本 50% 以上<sup>[1,4-5]</sup>。除此之外,该技术还成功应用于国产大飞机 C919 机头工程样机钛合金主风挡窗框、前后三叉接头等大型复杂钛合金关键构件。西北工业大学与中国商用飞机有限责任公司合作,采用激光立体成形技术制造了最大尺寸达到 3m 的 C919 钛合金中央翼 1# 肋缘条(图 1 (b)),且最大变形量 <1mm,实现了大型钛合金复杂薄壁结构件的精密成形技术<sup>[1]</sup>。GE 公司开发的 LEAP-1B 引擎,采用增材制造镍钴合金燃油喷嘴(图 1 (c))<sup>[6]</sup>,比传统工艺制造的喷嘴重量轻了 25%,使生产成本降低 50%,且使用寿命提高了 5 倍。此外,航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司探索采用增材制造异形群孔格栅(图 1 (d))来改善战机进气系统的空气动力学性能和隐身性能。

### 航空复杂结构件增材制造面临的挑战

虽然增材制造技术相比传统制造技术具有许多独特的优点,但仍旧存在一些不足,制约着该技术的广泛应用。

一方面,增材制造零件的力学性能难以满足高性能零件的使用要

求,这主要是因为增材制造零件内部缺陷普遍存在,例如热应力引起的裂纹<sup>[7]</sup>和气泡<sup>[8-9]</sup>、金属粉末融化不充分引起的空隙<sup>[9]</sup>等。针对增材制造零件力学性能差和内部缺陷等问题,国内外学者深入研究了多种金属材料的增材制造零件微观组织结构、机械性能、成形致密度与工艺参数、成形环境、粉末状态之间的关系<sup>[10-18]</sup>,希望通过对增材制造工艺和复杂热循环下微观结构演变规律的深入研究,达到对增材制造加工过程的全面控制。此外,对增材制造零件热处理并结合等静压处理方法<sup>[19-20]</sup>可以起到粗化微观组织结构、减少残余应力、闭合内部气孔和融合不充分缺陷的作用,同时还极大地提高了零件的力学性能和疲劳性能。

另一方面,虽然增材制造技术是一种“近净成形”方法,由于“分层制造,逐层叠加”的技术特点,增材制造件表面有明显的纹理特征,

表面粗糙度 $R_a$ 一般在 $10\mu\text{m}$ 以上。造成表面粗糙的原因之一是当通过逐层叠加近似成形零件上的曲面或斜面时,会形成如图 2<sup>[21]</sup>所示的“阶梯效应”,且其表面的平均粗糙度取决于层间厚度 $t$ 和表面构造角 $\theta$ ,并遵循<sup>[21]</sup>

$$R_a = 1000t \sin\left(\frac{90^\circ - \theta}{4}\right) \tan(90^\circ - \theta)$$

式中, $R_a$ 为具有特定构造角的区域的表面粗糙度的算术平均值。从上式可以看出,减小层间厚度可以削弱阶梯效应对表面粗糙度的影响,但是也会大大增加加工时间。如图 3<sup>[22]</sup>所示,造成表面粗糙的第 2 种原因是金属粉末颗粒的不充分融化并粘附在零件表面<sup>[22]</sup>,粉末粘附使得零件表面平均粗糙度和金属粉末的粒径在一个数量级。另外,在激光选区熔化加工中,当扫描速度较高时,熔池变得狭长,熔池趋向于改变形状以降低表面能,这就造成熔池分裂



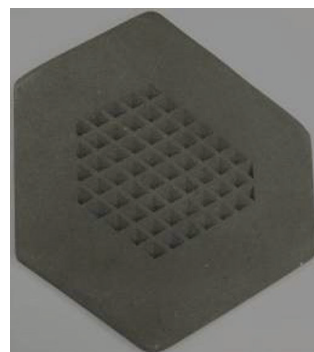
(a) 飞机机身加强框



(b) C919中央翼缘条加强框



(c) 燃油喷嘴



(d) 航空格栅

图1 增材制造技术在航空领域的应用

Fig.1 Applications of AM technology in aviation

并在两边产生如图4<sup>[23]</sup>所示的球形金属颗粒,这一过程被称为“球化效应”<sup>[22-24]</sup>。“球化效应”不仅会大大增加最后成形表面的粗糙度,还会降低材料的致密度,影响材料的物理力学性能,虽然可以通过增加热量来减少“球化效应”,但过高的热量也会导致较高的热应力和增加凝固的不均匀性<sup>[25]</sup>。

虽然改进金属粉末质量、优化堆叠成形方向、优化增材制造成形工艺(激光或离子束功率、扫描速度、扫描间距、切片策略、温控等)能在一定程度上改善增材制造零件的表面质量,但是仍然无法完全解决增材制造零件表面粗糙的问题。

粗糙的表面易产生应力集中,进而萌生出微裂纹,大大降低零件的疲劳性能,因此,目前增材制造直接成形航空复杂结构件的表面光洁度难以满足使用要求。

### 航空增材制造复杂结构件表面质量改善技术

为了解决增材制造零件热变形引起的尺寸和形状精度低以及表面质量差的问题,对增材制造零件进行后处理加工是必要的,目前主要的后处理方式包括切削加工和光整加工。

#### 1 增减材复合制造技术及其装备

对有深槽、深孔或内部型腔的复杂结构件来说,刀具与零件几何结构干涉,很难切削甚至无法加工。增减材复合制造(Additive/Subtractive Hybrid Manufacturing, A/SHM)是解决复杂结构件切削加工难题的有效方法,这种方法在增材制造一层或多层后,用减材方法将零件加工至设计尺寸,增材制造及减材加工交替进行,直至零件完成,其过程如图5所示<sup>[26-27]</sup>,增减材复合制造技术允许在零件结构尚满足减材加工的条件下,及时地切削加工至尺寸精度及表面质量要求值,最终加工出高精度高表面质量的复杂结构件。如表1所

示,目前先进的增减材复合制造装备制造厂商主要是日本、德国等发达国家

的传统机床巨头及大连三垒、青海华鼎、大连光洋等国内企业虽然也逐步

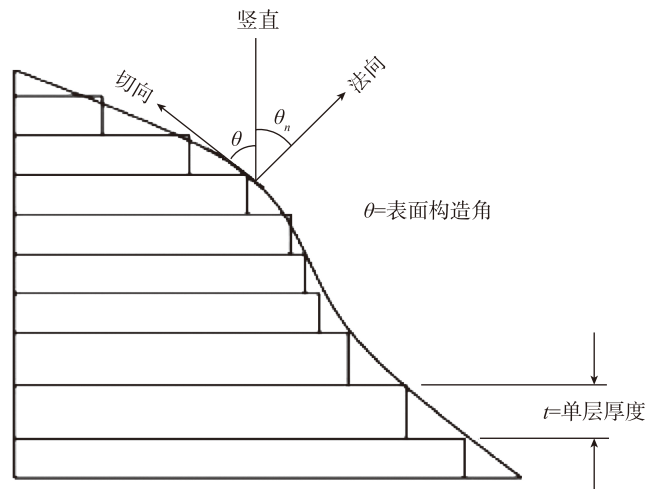


图2 阶梯效应  
Fig.2 Step effect

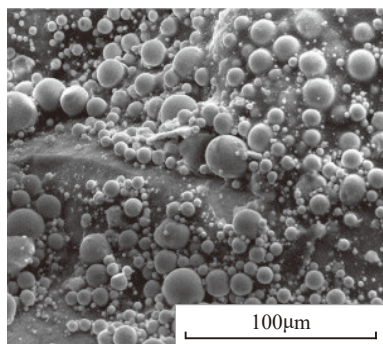


图3 粉末粘附  
Fig.3 Powder adhesive

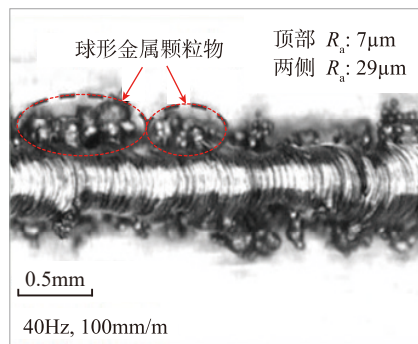


图4 球化效应  
Fig.4 Ball effect

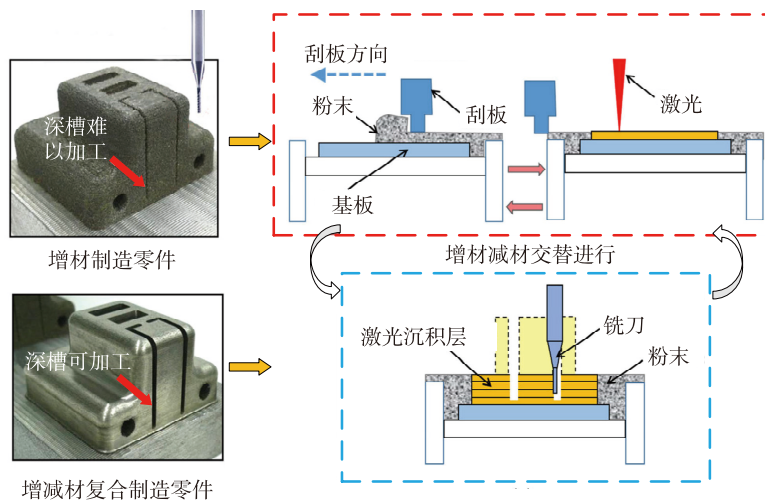


图5 增减材复合制造过程示意图  
Fig.5 Schematic diagram of A/SHM process

表1 国内外增减材复合制造机床对比

Table 1 Comparison of additive and subtractive composite machining machines

制造商	型号	加工方式	特点	典型应用
日本 Matsuura	LUMEX Avance-25	金属激光烧结 + 三轴高速铣削	加工尺寸精度 $\pm 5\mu\text{m}$ 以下	复杂结构阀体
日本 Sodick	OPM 350L	直接金属激光烧结 + 高速铣削	并行模式多区域同时烧结; 零件粗糙度 $R_a 2\mu\text{m}$	生产具有共形冷却通道的复杂模具
日本 Mazak	INTEGREX i-400 AM	熔融沉积成形 + 五轴多功能加工中心	多种激光熔覆头; 具备激光打标功能	难加工材料小批量加工; 航空叶片修复
德国 DMG MORI	LASERTEC 65 3D	激光熔覆 + 五轴数控加工	高熔积速度: $3.5\text{kg/h}$	航空和医疗行业复杂件制造与修理
西班牙 IBARMIA	ZVH 45/L1600 Add+Process	激光熔覆 + 五轴车铣复合加工	高效率 and 低成本多种加工模式	航空航天、模具行业的产品制造和修复
大连三垒	SVW80C-3D	激光金属沉积 + 五轴加工中心	重复定位精度 $5\mu\text{m}$	中大型零件直接近净成形

推出了增减材复合五轴加工中心,但是相比国外的设备仍然存在较大差距。

## 2 增材制造复杂结构件光整加工技术现状

当前增材制造零件的光整加工方法主要是手工抛光、喷砂或数控磨削抛光。手工抛光质量严重依赖于操作者的经验水平,可重复性及一致性差,人力与时间成本高,并且抛光过程中产生的粉尘危害人体健康。而喷砂和数控磨削抛光对具有复杂内曲面、多孔结构零件的加工可达性差,一般主要用于零件外表面的清洁抛光、去除氧化层等。

因此,高性能航空复杂结构件的低表面粗糙度要求 ( $0.8\mu\text{m} < R_a < 1.6\mu\text{m}$ )、无表面松散残留物要求和高使役性能要求,给增材制造成形后的光整加工带来了巨大的挑战。国内外学者研究了其他光整加工方法对增材制造零件的抛光效果,包括自适应磨削、激光抛光、化学抛光和电化学抛光等。

Beaucamp 等<sup>[28]</sup>采用具有球状柔性磨头的自适应磨削方法(见图6<sup>[28]</sup>)对增材制造钛合金自由曲面进行了抛光,通过粗抛和精抛去除了增材制造表面的缺陷层,最终表面粗糙度  $R_a$  达到  $10\text{nm}$  以下。

激光抛光是利用高能激光束使零件表面材料重新融化,并通过合理的工艺参数控制使被抛光表面粗糙度降低的一种新式抛光方法(见图7<sup>[29]</sup>),目前激光抛光后的零件表面粗糙度  $R_a$  在  $2\sim 3\mu\text{m}$  左右<sup>[29-31]</sup>。因激光抛光设备较为昂贵,目前在实际工程中未能得到广泛应用。在化学抛光中,待抛光的零件被浸入特制的化学氧化剂溶液中,因溶液强烈的氧化性,在待抛光表面形成氧化层,氧化层可以逐渐溶解于溶液,且表面微凸起的高点处氧化的较快且多,而表面

低谷氧化的慢且少,从而达到改善待抛光表面的粗糙度的目的。化学抛光方法对小型增材制造镂空结构或阵列结构零件表面松动易脱落的球化层的去除效果显著。Łyczkowska 等<sup>[32]</sup>用氢氟酸和硝酸作为抛光液对如图8<sup>[32]</sup>所示的选择性激光融化(Selective Laser Melting, SLM)方法加工的支架进行化学抛光,其试验结果表明使用低浓度的溶液在磁力搅拌下长时间抛光具有更好的工艺稳定性和过程可控性,并提出可以采用该方法批量抛光小孔尺寸在

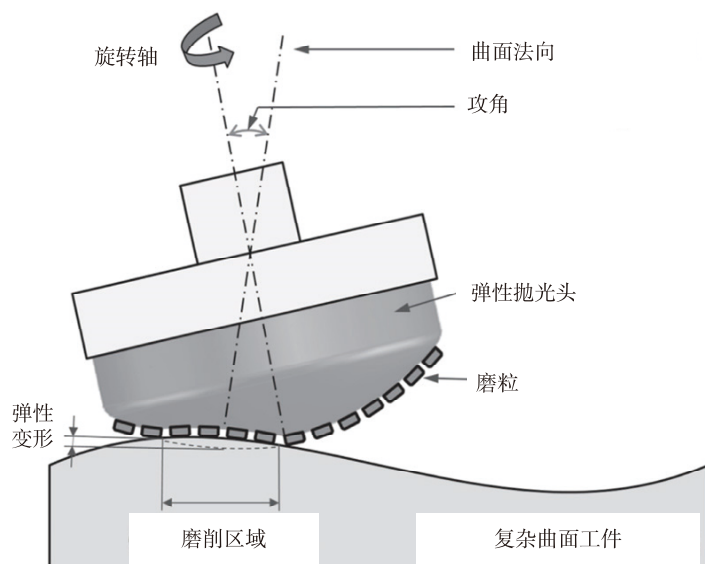


图6 自适应磨削加工原理

Fig.6 Principle of shape adaptive grinding

400~420 $\mu\text{m}$  范围的选择性激光融化多孔结构件。进一步地, Pyka 等<sup>[33]</sup>采用化学抛光与电化学抛光相结合的方法对类似的多孔结构支架抛光, 抛光后的支架的表面粗糙度  $R_a$  由抛光前的 6~12 $\mu\text{m}$  降至 0.2~1 $\mu\text{m}$ , 并认

为化学抛光主要迅速去除表面粘附的金属球形粉末, 电化学抛光在此基础上进一步降低表面粗糙度。传统的化学抛光和电化学抛光溶液主要采用酸性溶液, 应当注意抛光废液的处理问题, 采用中性溶液等环保型抛

光溶液是化学及电化学抛光技术的发展方向。

### 3 磨粒流加工技术

磨粒流加工技术, 出现于 20 世纪 60 年代, 其加工原理如图 9 所示, 它迫使一种可流动的半固态黏弹性磨料介质在一定压力下往复地流过被加工区域, 利用磨料介质中磨粒的微切削作用去除工件表面的微观粗糙峰, 以达到对这些区域加工的目的。磨粒流加工将可随工件几何形状自适应变化的磨料介质作为加工的“刀具”, 磨粒流加工技术适用于具有复杂内部型腔、自由曲面以及不规则形状零件的抛光、去毛刺、倒圆角等, 此外磨粒流加工对材料的适用性强, 能加工几乎所有的金属材料。表 2<sup>[28-35]</sup> 所示为各种增材制造复杂结构件光整加工方法的对比, 可以看出, 磨粒流加工技术的高加工可达性

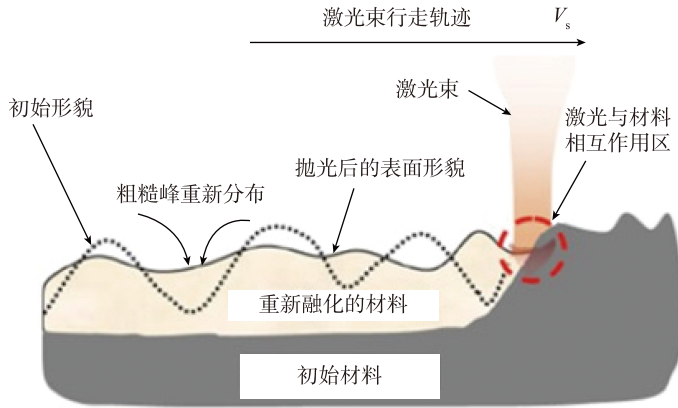
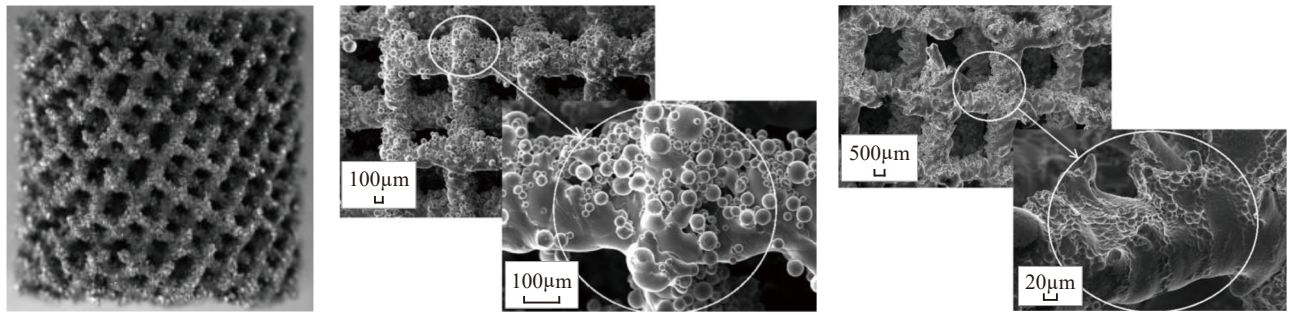


图7 激光抛光加工原理  
Fig.7 Schematic view of the laser polishing mechanism



(a) Ti-6Al-7Nb 支架 (b) 化学抛光前 (c) 化学抛光 10min 后

图8 选择性激光融化技术制成的Ti-6Al-7Nb支架微观形貌  
Fig.8 Microstructure of scaffold made of Ti-6Al-7Nb alloy by SLM technology

表2 增材制造复杂结构件光整加工方法比较

Table 2 Comparison of finishing methods for complex structural parts of additive processing

光整加工方法	材料类型	处理前 / 后粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	特点	缺点
自适应磨削	Ti6Al4V <sup>[28]</sup>	4~5/0.01 以下	适合连续的复杂外曲面抛光	对内曲面抛光可达性差
激光抛光	钛合金 <sup>[29]</sup> 、不锈钢 <sup>[30-31]</sup>	10~45/2~3	抛光效率高、可提高表面层材料硬度	设备昂贵、对复杂结构件抛光可达性差
化学抛光	钛合金 <sup>[32-33]</sup>	6~12/0.2~1	适合多孔结构件抛光、加工可达性好	酸性抛光液对环境污染严重
磨粒流抛光	铝合金 <sup>[34-35]</sup> 、钛合金	10~14/1.8 以下	适合复杂结构件内表面或外表面抛光、加工可达性好	棱边易过抛、材料去除不均匀

这一独特优点为克服航空增材制造复杂零件表面光整加工难题提供了一条新途径。

国内外对磨粒流加工技术用于航空增材制造复杂结构件表面的光整加工还处于起步阶段,技术成熟度还不高,具有较高的研究潜力。Williams等<sup>[36]</sup>发现磨粒流加工对增材制造件表面“阶梯效应”的去除效果,试验发现材料去除率主要与磨粒粒径、加工循环次数、挤推压力、增材制造方向有关。Bergmann等<sup>[37]</sup>采用磨粒流加工技术对选择性激光熔化成形的平板样件进行抛光,试验表明样件的表面粗糙度 $R_z$ 由 $53\mu\text{m}$ 降低至 $2\mu\text{m}$ 左右。大连理工大学的学者们从事磨粒流加工技术研究多年,提出了恒压差旋转磨粒流加工技术,研制了适用于不同介质黏度的磨粒流加工装备和无毒且不粘结工件的黏弹性磨料介质,在此基础上,采用自研磨料介质对航空增材制造铝合金(图10)和钛合金多孔结构件(图11)外表面及阵列异型斜孔进行了抛光试验,研究了材料去除过程中零件表面形貌、材料去除、表面粗糙度<sup>[34]</sup>和表面残余应力<sup>[35]</sup>变化规律。试验结果表明,磨粒流加工方法能够有效消除“阶梯效应”、“球化效应”和粉末粘附造成的缺陷层,并能够完成零件外表面和内孔高质高效抛光,表面粗糙度 $R_a$ 从初始的 $10\sim 14\mu\text{m}$ 降至 $1.8\mu\text{m}$ ,并在抛光后的表面产生了 $(-30.5 \pm 7.3)\text{MPa}$ 的残余压应力,这表明磨粒流加工有利于提升零件的表面完整性。大连理工大学的学者还对具有复杂曲面和异型内腔结构的增材制零件(图12)进行了磨粒流抛光研究,设计了具有均匀流场的抛光专用夹具,完成了外锥面、内腔曲面和异型孔的抛光,表面粗糙度 $R_a$ 由抛光前的 $10\sim 11\mu\text{m}$ 降低至 $0.7\sim 1\mu\text{m}$ ,由图13可以看出,抛光后不同区域的表面质量一致性和均匀性得到了极大改善。

然而,磨粒流加工存在明显的“边缘效应”,导致被加工面出现局部过抛或欠抛现象,严重破坏零件前工序的加工精度,因此磨粒流加工材料等余量均匀去除是一直以来广受关注的问题。Wang等<sup>[38]</sup>通过对在链孔内设计不同的型芯作为夹具,调控加工表面形貌。Wang等<sup>[39]</sup>

还设计了四螺旋型芯作为夹具,研究结果显示,添加螺旋型芯增强了表面材料去除效果且均匀性得到改善。高航等<sup>[40-41]</sup>在光整加工叶片和整体叶盘原型件时,通过在夹具中设置导流板调控叶片进排气边附近的流场,缓解了叶片进排气边的“过抛”问题。

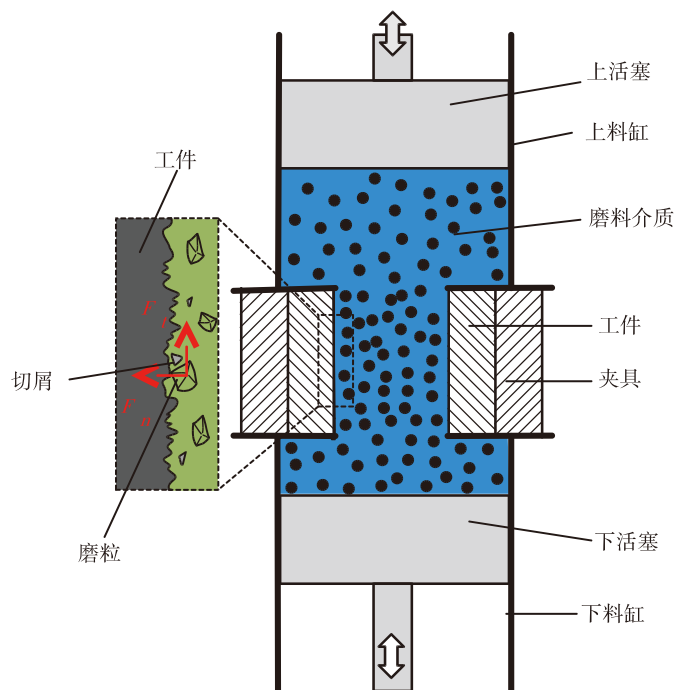


图9 磨粒流加工技术原理  
Fig.9 Principle of AFM technology

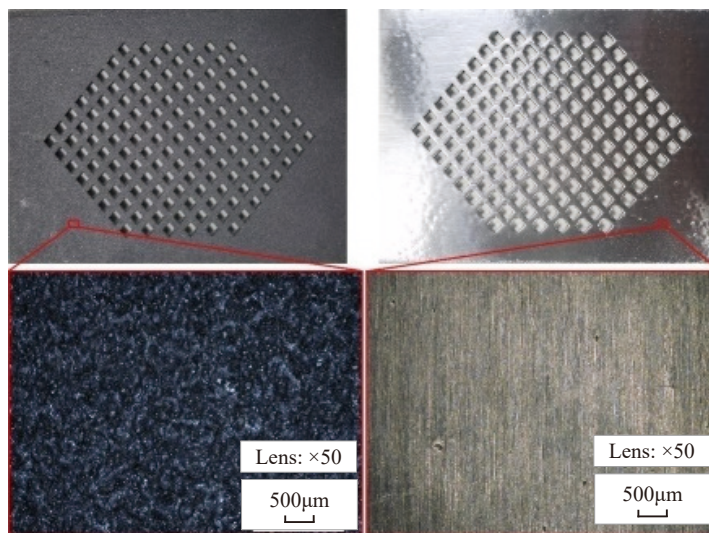


图10 增材制造铝合金阵列孔磨粒流抛光效果  
Fig.10 Polishing effect of AM aluminum alloy array holes using AFM

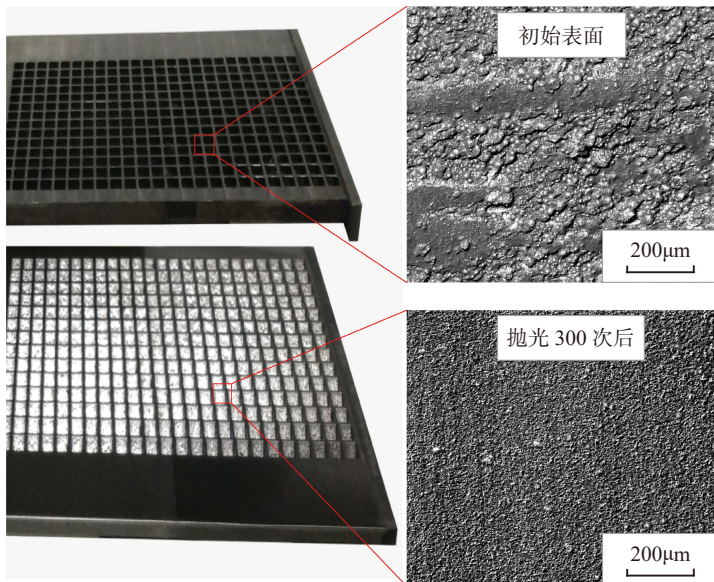


图11 增材制造钛合金格栅阵列孔磨粒流抛光效果

Fig.11 Polishing effect of AM titanium alloy array holes using AFM



(a) 抛光前

(b) 抛光后

图12 增材制造复杂结构件磨粒流抛光效果

Fig.12 Polishing effect of AM complex structural components using AFM

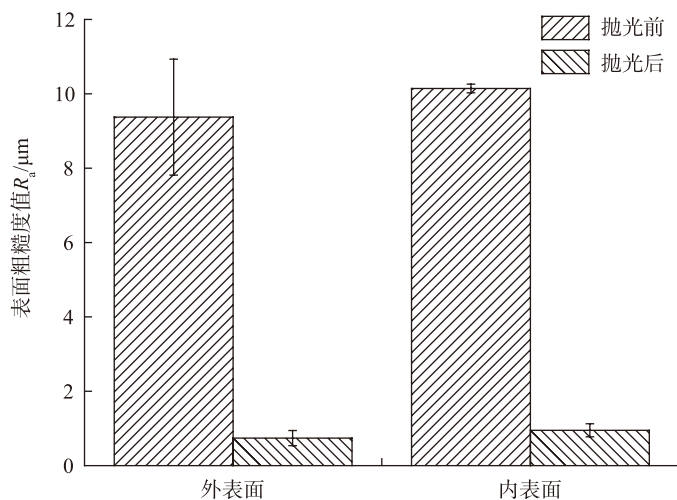


图13 增材制造复杂结构件磨粒流抛光表面粗糙度

Fig.13 Variations of surface roughness of AM complex structural components using AFM

为了采用高加工可达性的磨粒流加工技术完成强几何干涉、加工可达性差的航空增材制造复杂结构件高表面完整性、高精度抛光,亟需深入研究增材制造零件异形形貌表面材料去除机理和去除模型,探索增材制造零件表层应力性态的调控规律,实现高完整性表面创造成功;建立基于黏弹性磨料介质本构模型的磨粒流光整加工流场仿真模型,结合材料去除模型反求等余量均匀化材料去除的流道,以保证增材制造近净成形零件精度,为可重复、可预测、一致性的航空增材制造复杂结构件精密抛光提供理论指导与技术支持。

## 结论

增材制造是一种颠覆传统减材制造的新兴技术,正处于高速发展阶段,并将日益扩展其在航空领域的应用。针对近净成形增材制造的复杂结构件面临着表面质量差、成形精度不高、难以满足高使役性要求等方面的挑战,虽然增减材复合制造能从原理上有效改善表面粗糙度,但是高端增减材复合加工装备主要依靠进口且价格昂贵,因此在研制复合加工装备的同时,有必要大力发展经济、有效的光整加工技术。通过对目前航空增材制造光整加工方法的对比分析可以看到,大部分研究工作还处于改善表面粗糙度层面的阶段,为了满足光整加工后零件的精度要求,航空增材制造复杂结构件的抛光技术应向精准可控的方向发展,而磨粒流加工技术在这方面有着非常广阔的应用前景。

## 参考文献

[1] 林鑫, 黄卫东. 应用于航空领域的金属高性能增材制造技术[J]. 中国材料进展, 2015, 34(9): 684-688.

LIN Xin, HUANG Weidong. High performance metal additive manufacturing

- technology applied in aviation field[J]. *Materials China*, 2015, 34(9): 684–688.
- [2] FRAZIER W E. Metal additive manufacturing: a review[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23(6): 1917–1928.
- [3] 曾凡昌. 锻压先进制造技术及在航空工业领域的应用[J]. *航空制造技术*, 2009, 52(6): 26–29.
- ZENG Fanchang. Advanced forging manufacturing technology and its application in aviation industry[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2009, 52(6): 26–29.
- [4] 王华明, 张述泉, 汤海波, 等. 大型钛合金结构激光快速成形技术研究进展[J]. *航空精密制造技术*, 2008, 41(6): 28–30.
- WANG Huaming, ZHANG Shuquan, TANG Haibo, et al. Research progress of laser rapid prototyping technology for large titanium alloy structures[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2008, 41(6): 28–30.
- [5] 田宗军, 顾冬冬, 沈理达, 等. 激光增材制造技术在航空航天领域的应用与发展[J]. *航空制造技术*, 2015, 58(11): 38–42.
- TIAN Zongjun, GU Dongdong, SHEN Lida, et al. Application and development of laser additive manufacturing technology in aeronautics and astronautics[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 58(11): 38–42.
- [6] 张小伟. 金属增材制造技术在航空发动机领域的应用[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(1): 10–16.
- ZHANG Xiaowei. Application of metal additive manufacturing in aero-engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(1): 10–16.
- [7] ZHAO X M, LIN X, CHEN J, et al. The effect of hot isostatic pressing on crack healing, microstructure, mechanical properties of Rene88DT superalloy prepared by laser solid forming[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 504(1/2): 129–134.
- [8] SAMES W J, MEDINA F, PETER W H, et al. Effect of process control and powder quality on Inconel 718 produced using electron beam melting[C]//*Proceedings of 8th International Symposium on Superalloy 718 and Derivatives*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2014.
- [9] JOHNSON A S, SHUAI S, SHAMSAEI N, et al. Fatigue behavior and failure mechanisms of direct laser deposited Inconel 718[C]//*Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing*. Austin: Laboratory for Freeform Fabrication and University of Texas at Austin, 2016.
- [10] GU D D, HAGEDORN Y C, MEINERS W, et al. Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium[J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(9): 3849–3860.
- [11] BARBAS A, BONNET A S, LIPINSKI P, et al. Development and mechanical characterization of porous titanium bone substitutes[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2012, 9(3): 34–44.
- [12] WEN S F, LIS, WEI Q S, et al. Effect of molten pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melting parts[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(11): 2660–2667.
- [13] THUIS L, KEMPEN K, KRUTH J P, et al. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(5): 1809–1819.
- [14] ZHANG D Q, LIU Z H, CAI Q Z, et al. Influence of Ni content on microstructure of W–Ni alloy produced by selective laser melting[J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2014, 45: 15–22.
- [15] ATTAR H, CALIN M, ZHANG L C, et al. Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 593(2): 170–177.
- [16] MONROY K, DELGADO J, CIURANA J. Study of the pore formation on CoCrMo alloys by selective laser melting manufacturing process[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 63: 361–369.
- [17] BAUEREIß A, SCHAROWSKY T, KÖRNER C. Defect generation and propagation mechanism during additive manufacturing by selective beam melting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(11): 2522–2528.
- [18] ABOULKHAIR N T, EVERITT N M, ASHCROFT I, et al. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting[J]. *Additive Manufacturing*, 2014, 1–4: 77–86.
- [19] MASKERY I, ABOULKHAIR N T, TUCK C, et al. Fatigue performance enhancement of selectively laser melted aluminium alloy by heat treatment[C]//*Proceedings of 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing*. Austin, 2015.
- [20] GREITEMEIER D, PALM F, SYASSEN F, et al. Fatigue performance of additive manufactured TiAl6V4 using electron and laser beam melting[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 94: 211–217.
- [21] RAHMATI S, VAHABLI E. Evaluation of analytical modeling for improvement of surface roughness of FDM test part using measurement results[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 79(5): 823–829.
- [22] GU D D, SHEN Y F. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: metallurgical mechanisms and control methods[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(8): 2903–2910.
- [23] MUMTAZ K, HOPKINSON N. Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2009, 15(2): 96–103.
- [24] KRUTH J P, LEVY G, KLOCKE F, et al. Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing[J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2007, 56(2): 730–759.
- [25] LIU B C, WILDMAN R, TUCK C, et al. Investigation the effect of particle size distribution on processing parameters optimisation in selective laser melting process[J/OL]. [2019–03–02] <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2011/2011–18–Liu.pdf>.
- [26] FLYNN J M, SHOKRANI A, NEWMAN S T, et al. Hybrid additive and subtractive machine tools—research and industrial developments[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, 101: 79–101.
- [27] 白倩, 董志刚, 闫英, 等. 金属增

减材复合制造专业硕士实践教学平台建设[J]. 实验室科学, 2018, 21(2): 158-160.

BAI Qian, DONG Zhigang, YAN Ying, et al. Development of additive/subtractive hybrid manufacturing practical teaching platform for full-time master of engineering students[J]. Laboratory Science, 2018, 21(2): 158-160.

[28] BEAUCAMP A T, NAMBA Y, CHARLTON P, et al. Finishing of additively manufactured titanium alloy by shape adaptive grinding (SAG)[J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2015, 3(2): 024001.

[29] BHADURI D, PENCHEV P, BATAL A, et al. Laser polishing of 3D printed mesoscale components[J]. Applied Surface Science, 2017, 405: 29-46.

[30] MARIMUTHU S, TRIANTAPHYLLOU A, ANTAR M, et al. Laser polishing of selective laser melted components[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 95: 97-104.

[31] LAMIKIZ A, SÁNCHEZ J A, LÓPEZ DE LACALLE L N, et al. Laser polishing of parts built up by selective laser sintering[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(12/13): 2040-2050.

[32] ŁYCZKOWSKA E, SZYMCZYK

P, DYBAŁA B, et al. Chemical polishing of scaffolds made of Ti-6Al-7Nb alloy by additive manufacturing[J]. Archives of Civil & Mechanical Engineering, 2014, 14(4): 586-594.

[33] PYKA G, BURAKOWSKI A, KERCKHOFS G, et al. Surface modification of Ti6Al4V open porous structures produced by additive manufacturing[J]. Advanced Engineering Materials, 2012, 14(6): 363-370.

[34] 高航, 李世宠, 付有志, 等. 金属增材制造格栅零件磨粒流抛光[J]. 航空学报, 2017, 38(10): 231-239.

GAO Hang, LI Shichong, FU Youzhi, et al. Abrasive flow machining of additively manufactured metal grilling parts[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(10): 231-239.

[35] PENG C, FU Y Z, WEI H B, et al. Study on improvement of surface roughness and induced residual stress for additively manufactured metal parts by abrasive flow machining[J]. Procedia CIRP, 2018, 71: 386-389.

[36] WILLIAMS R E, MELTON V L. Abrasive flow finishing of stereolithography prototypes[J]. Rapid Prototyping Journal, 1998, 4(2): 56-67.

[37] BERGMANN C, SCHMIEDEL

A, UHLMANN E. Postprocessing of selective laser melting components using abrasive flow machining and cleaning[C]//Proceedings of International Additive Manufacturing Symposium. Markness, 2013.

[38] WANG A C, TSAI L, LIANG K Z, et al. Uniform surface polished method of complex holes in abrasive flow machining[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(S1): 250-257.

[39] WANG A C, CHENG K C, CHEN K Y, et al. A study of surface uniformity for helical passageways in abrasive flow machining[J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2012, 88(9B): 13-16.

[40] FU Y Z, WANG X P, GAO H, et al. Blade surface uniformity of blisk finished by abrasive flow machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(5-8): 1725-1735.

[41] 高航, 吴鸣宇, 付有志, 等. 流体磨料光整加工理论与技术的发展[J]. 机械工程学报, 2015, 51(7): 174-187.

GAO Hang, WU Mingyu, FU Youzhi, et al. Development of theory and technology in fluid abrasive finishing technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(7): 174-187.

通讯作者: 高航, E-mail: gaohang@dlut.edu.cn.

## Research Progress on Surface Finishing Technology of Aeronautical Complex Structural Parts Manufactured by Additive Manufacturing

GAO Hang, PENG Can, WANG Xuanping

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology, Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**[ABSTRACT]** Additive manufacturing is an effective way to solve the manufacturing problems of aeronautical complex structural parts. Firstly, the principle and characteristics of additive manufacturing technology and its application in aeronautical field are introduced. Furthermore, the challenges faced by additive manufacturing technology in terms of material mechanical properties and surface quality are discussed deeply. Moreover, it is pointed out that additive and subtractive hybrid manufacturing and advanced finishing technology are effective approaches to the improvement in surface quality and accuracy of aeronautical complex structural parts. The advantages of abrasive flow machining with high processing accessibility in the precision polishing of aeronautical complex structural parts are highlighted, and important researches of maintaining the precision of parts while improving the surface quality are recommended.

**Keywords:** Additive manufacturing; Finishing; Abrasive flow machining; Surface roughness; Complex structural parts

(责编 逸飞)