

# 激光直接沉积成形增材制造技术在飞机起落架上的应用研究

崔 灿, 王向明, 吴 斌, 毕世权, 苏亚东

(航空工业沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035)

[摘要] 激光直接沉积成形对于飞机起落架制造具有“变革性”意义, 具有突破规格限制、减少原材料浪费、缩短加工制造周期等技术优点, 在未来飞机起落架快速试制方面具有较为明显的技术优势及应用前景。目前已突破 A-100 钢激光直接沉积增材制造成形工艺、性能质量控制等关键技术, 试制的起落架零件已在飞机上实现领先试用, 力学性能基本达到材料锻件水平。但面向该技术的推广应用仍面临着成形工艺策略、热处理控制、无损检测、构件表面强化及综合验证等关键技术的进一步突破。

关键词: 激光直接沉积成形; 增材制造; 飞机起落架; 超高强度钢; 快速试制技术

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.10.074



崔 灿

硕士、高级工程师, 主要从事金属材料增材制造应用技术研究工作, 负责并参加多项国家重大科研项目研究工作, 发表论文及研究报告 10 余篇, 申请专利 10 余项。

响, 起落架的技术水平和可靠度对于飞机整体性能和使用安全具有重要影响<sup>[1-2]</sup>。同时, 起落架在飞机起飞后不再参与机体结构的承载和传力, 为提高飞机在飞行过程中的机动性及承载能力, 起落架结构力求减重并控制空间尺寸。随着超高强度钢及其制造技术的发展, 其具备高强度和高刚度相结合的独特优势, 在发展之初就成为了现代飞机起落架主承力结构的首选材料之一<sup>[3-4]</sup>。AerMet100 钢是 20 世纪 90 年代美国 Carpenter 技术公司开发出的一种二次硬化型超高强度钢, 其具有超高的强度、韧性和抗应力腐蚀性能, 成为目前美国四代机及舰载机起落架的主要用材<sup>[5]</sup>。国内相对应的 A-100 钢是从“九五”开始进行预研, 历经

10 余年的技术攻关, 突破了材料冶金、热处理组织性能控制等关键技术, 研制的大规格棒材综合性能达到了国外相应材料水平, 大型模锻件实现了在飞机起落架上的应用。

由于 A-100 钢是由 C、Cr、Mo 强化的 Fe-Ni-Co 系合金, 合金化元素含量高, A-100 钢主元素化学成分见表 1。且 A-100 钢熔炼方式采用真空感应加真空自耗重熔, 材料冶炼成本高, 因此材料价格较高。而起落架外筒及活塞杆为筒状构件, 采用传统锻造 + 机加的制造方法, 筒内实心部分需要采用深镗切削加工去除, 易造成材料的浪费, 且增加加工难度和周期; 特别是面向当前飞机型号的快速试制, 采用锻造工艺制造起落架将面临原材料尺寸规格限制、不利于

表1 A-100钢主元素化学成分(质量分数) %

C	Cr	Ni	Co	Mo
0.21~0.25	2.90~3.30	11.0~12.0	13.0~14.0	1.10~1.30

起落架是飞机上关键的受力部件, 在起飞和着陆过程中作用无可替代, 对飞机的使用与安全有极大的影

快速响应试制等诸多技术问题。

随着增材制造技术的迅猛发展,以激光直接沉积成形为代表的增材制造技术越来越多地应用于航空结构件。鉴于激光直接沉积成形技术具有高度柔性、无需模具、可突破规格限制及快速响应等技术特点与优势,国内相关技术团队开始尝试采用激光直接沉积成形制造技术成形 A-100 钢<sup>[6]</sup>。采用 A-100 钢激光直接沉积成形技术试制飞机起落架,可有效地解决飞机型号研制中存在的复杂构型超规格结构试制技术瓶颈,实现起落架外筒及活塞杆等大型关键承力构件的无模敏捷快速试制。该技术将成为未来飞机起落架快速试制的一个重要发展方向。

## A-100 钢激光直接沉积成形技术研究进展

激光直接沉积成形技术最早起源于美国,又名激光快速成形技术(Laser Rapid Forming),是一种将快速原型制造、高功率激光熔覆技术与先进材料制备技术有机融合在一体的高性能金属零件制造技术<sup>[7]</sup>。早期国外有关高性能金属激光快速成形技术的研究主要集中在美国,近年来,随着增材制造技术的迅猛发展,以美国、欧盟为首的西方发达国家开始从原材料、装备和工艺、产品性能、质量检测等产业全链条大力发展增材制造技术,目前钛合金激光直接沉积成形技术在国外已有应用,但有关激光直接沉积成形技术在 A-100 超高强度钢上的应用尚未见报道<sup>[8]</sup>。

国内早期开展激光直接沉积成形技术研究的单位主要有北京航空航天大学、西北工业大学及沈阳航空航天大学等。其中,航空工业沈阳飞机设计研究所和北京航空航天大学组建的技术团队,从 2003 年开始开展激光直接沉积成形应用技术研究,历经 10 余年的技术攻关,实现了钛合金激光直接沉积成形技术在飞机

次承力结构件到主承力结构件再到工程化应用的 3 个跨越。在 A-100 钢激光直接沉积成形技术研究方面,航空工业沈阳飞机设计研究所/北京航空航天大学技术团队从 2008 年开始,在相关项目及背景型号的支持下,开展了 A-100 钢激光直接成形技术在飞机起落架上的应用技术研究,在工艺成形、性能质量控制等方面取得了关键性技术突破,试制的 A-100 钢起落架零件力学性能基本达到了同材料锻件水平;同时在基于成形工艺约束的起落架结构优化设计、制件后处理工艺控制、试验考核及应用验证等方面,开展了大量的研究工作,取得了一定的技术积累,试制的起落架零件已在飞机上实现了领先试用<sup>[6-8]</sup>。但目前的研究工作主要集中在面向特定型号起落架的试制技术攻关研究,鉴于激光直接沉积成形所固有的个性化强、工艺门槛窄等技术特点,因此面向该技术的推广应用,相关的工艺技术存在较大的局限性,仍面临着一些关键技术问题有待进一步解决的局面。

## A-100 钢激光直接沉积成形起落架应用关键技术问题

传统飞机起落架应用关键技术主要体现在原材料冶金质量控制、整体锻造、热处理、表面强化及防护等几方面,通过控制制造过程中的每一环节,保证性能质量,提高起落架的安全使用寿命。A-100 钢激光直接沉积成形起落架技术面临相似的问题,需要针对制造过程中各阶段对零件性能质量的影响情况,基于工艺技术特征,开展关键技术研究工作。

### 1 成形工艺策略

由于起落架为大型的结构件,为保证成形效率,必然要求大功率的激光成形设备,因此在快速成形过程中,具有较大截面的 A-100 钢起落架成形制件内部的温度梯度较大;同时由于 A-100 钢热膨胀系数大,

其冷却收缩大,产生热应力开裂的倾向也增大。在成形过程中因局部热输入造成不均匀温度场,表现为熔池在快速凝固及随后的快速冷却中产生热应力和组织应力,致使成形制件易形成残余应力和变形。残余应力作为一种内应力,将影响成形件的拉伸强度、疲劳强度、抗应力腐蚀等性能及尺寸的稳定性,严重时甚至会直接引发裂纹缺陷。

当成形过程中在制件内部形成较大的热应力时,制件开裂倾向增加,材料容易在结构薄弱部位如未熔合处、局部应力集中处如截面内存在尖锐转角部位或表面凹凸不平严重位置等诱发热应力开裂,在层间存在未熔合等内部冶金质量缺陷时易出现垂直沉积方向的层间横向开裂,或沿沉积方向扩展的纵向开裂。

为保证起落架的成形质量,如何控制激光直接沉积成形过程中制件的内应力,避免成形件的变形与开裂,是 A-100 钢激光直接沉积成形起落架研究的技术重点。近年来针对钛合金 3D 打印技术的成形工艺路径和扫描方式,及其在成形过程中的温度场及应力场的模拟计算等方面的研究,国内相关学者开展了大量的研究工作。相关研究表明,成形工艺策略及扫描方式对增材制造钛合金结构组织及力学性能有明显的影响<sup>[9-11]</sup>。对于激光直接成形结构件,调整成形策略,如采用离散沉积补充填充等成形方法,分区后将激光扫描路径变短,减少局部区域热量的积累,可有效控制成形制件的热应力,提高成形质量,降低制件变形和开裂倾向<sup>[12]</sup>。因此,基于 A-100 钢材料特性,如何制定成形工艺策略,优化激光成形工艺扫描路径是 A-100 钢激光直接沉积成形起落架技术的重点研究方向。

### 2 热处理控制技术

A-100 钢为高合金化二次硬化型超高强度钢,热处理工艺对材料的

组织性能影响至关重要。对于A-100钢锻造组织,为保证材料的综合力学性能水平,目前的热处理工艺主要包含两个过程:预备热处理和最终热处理。预备热处理一般在零件机械加工前进行,主要是为了得到均匀化的软化组织,有利于机械加工,工艺过程如下:

(1)正火: 900℃,保温 ≥ 60min,空冷;

(2)高温回火: 680℃,保温 ≥ 8h,空冷。

最终热处理一般在机械加工后进行,可以得到二次硬化型回火马氏体组织,实现材料强韧化匹配,工艺过程如下:

(1)淬火: 885℃,保温 60min,油冷;

(2)冷处理: -73℃,保温 60min,空气中回温;

(3)回火: 482℃,保温 5~8h,空冷。

经最终热处理后A-100钢锻件主要技术指标见表2<sup>[8]</sup>。

激光成形工艺形成的沉积态组织与锻造成形组织有明显差异,组织形态的差异必然影响材料的性能,因此需要通过优化热处理工艺以控制成形制件的性能水平<sup>[8,13]</sup>。

A-100钢激光沉积后,成形组织为快速凝固的近等轴状胞晶或树枝晶组织,由于A-100钢的合金元素含量很高,在凝固过程中受成分过冷影响,易产生成分偏析,因此在制件成形后,首先需要进行均匀化退火处理。均匀化退火工艺对材料的原始组织形态影响较大,温度偏低不利于合金元素的扩散及偏析的消除,温度过高则会导致材料原始晶粒度的增大。同时,试验研究结果显示,均匀化退火时间及退火处理次数均会对材料的组织性能产生较大的影响。制件在均匀化处理之后,为保证后续机械加工,与传统锻件工艺相同,A-100钢激光直接沉积形成制件需

要进行正火+高温回火的预备热处理,对材料进行奥氏体均匀化及软化处理,之后再行淬火+冷处理+回火的最终热处理,现实材料的强韧化匹配<sup>[8]</sup>。

由于A-100钢激光成形制件的整个热处理工艺环节较多,各热处理工艺参数及工艺间的相互匹配等对材料最终的组织性能均会产生一定的影响,特别是回火工艺参数的微调对A-100钢性能的影响较为敏感。试验结果表明,回火温度在472~490℃范围内,激光直接沉积成形A-100钢性能变化明显(见图1),抗拉强度变化250MPa左右,断裂韧性变化20MPa·m<sup>1/2</sup>左右。因此,选择合适的热处理工艺参数及工艺过程控制流程,对A-100钢激光直接沉积成形起落架的应用至关重要。

### 3 无损检测技术

为控制起落架零件内部质量,提高使用安全性,A-100钢起落架锻件一般采用超声波及磁粉进行无损检测。超声波主要是检测锻件的内部缺陷,一般情况下锻件表面会预留7~8mm的加工余量,且在锻件接头

与耳片部位会保留过渡弧面,因此锻件的超声波可检性一般较好。同时锻件的冶金质量及内部缺陷是从原材料棒材就开始进行控制的,所以锻件的内部质量主要是受锻造工艺的影响,在锻造工艺过程中一般不会再增加夹杂、气孔等冶金缺陷。此外,起落架零件的加工过程中,在热处理前/后、表面强化和防护后,各个阶段均需进行磁粉检测,以控制零件的近表面质量。

与传统锻件对比,激光增材制造的成形机理及材料组织形态完全不同,冶金缺陷主要表现为局部未熔合、微气孔、显微疏松或热应力开裂等(见图2),缺陷特征与传统锻件存在着差异,缺陷显示具有一定的方向性;因此,受制件沉积生长方向及检测入射角方向的影响,超声波等无损检测方法的结果并不能完全显示制件内部质量。研究结果显示,对于同一试验料,沿激光沉积生长方向和垂直于沉积生长方向进行超声波检测,结果会有明显的差异。沿激光沉积方向进行检测,更有利于发现制件内部缺陷。

表2 A-100钢主要技术指标

抗拉强度 $R_m$ /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断裂韧度 $K_{IC}$ /(MPa·m <sup>1/2</sup> )	延伸率 $A$ %	断面收缩率 $Z$ %
2030 ± 100	≥ 1620	≥ 110	≥ 10	≥ 55

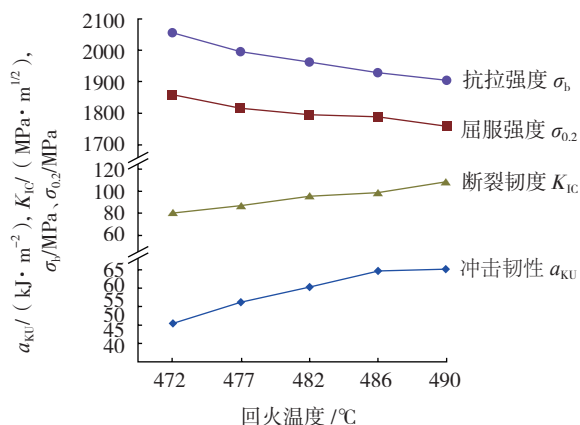


图1 回火温度对激光直接沉积成形A-100钢的性能影响变化

Fig.1 Effect of tempering temperature on mechanical properties of laser deposited A-100 steel

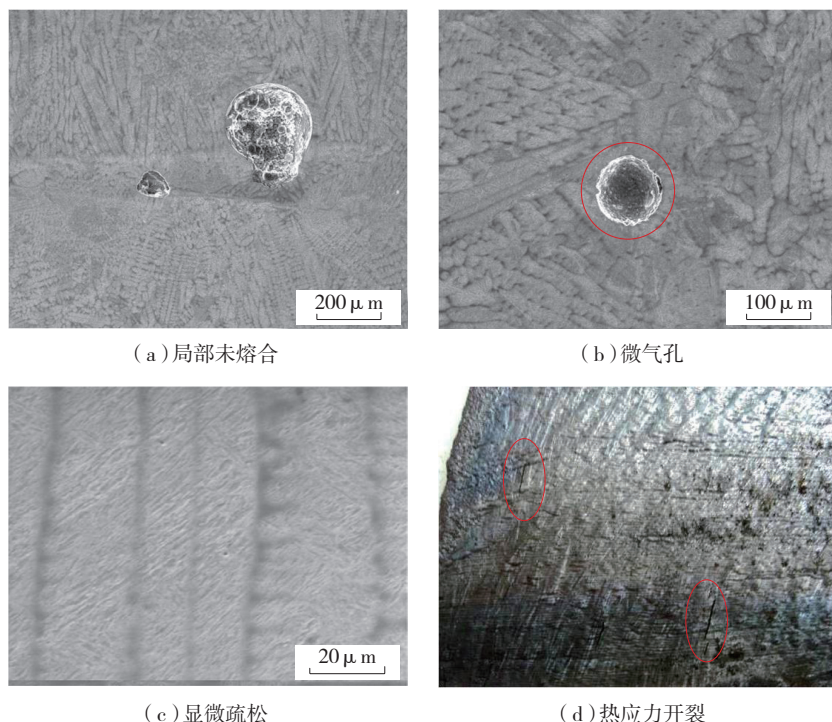


图2 激光直接沉积成形A-100钢冶金缺陷典型形貌

Fig.2 Typical metallurgical defect of laser deposited A-100 steel

因此,传统的无损检测方法已不能完全适用于 A-100 钢激光成形零件。特别是起落架外筒、活塞杆零件为大型的筒状结构,外筒的外侧及头部呈现多个耳片结构形式,不利于超声波及射线检测,零件无损检测可检性比例低。目前国内相关研究团队针对 A-100 钢激光成形零件无损检测技术开展了多方面的研究,结合起落架结构形式,开发了沿零件内筒表面检测的水浸法 C 扫描超声波检测专用设备,可有效提高起落架零件的可检性。但对于零件上的一些接头及耳片根部等部位仍缺乏有效的检测措施。同时,针对成形制件微细孔等未熔合缺陷,缺陷尺寸方位大多在 50~200  $\mu\text{m}$  内,目前武器装备制造领域常用的检测技术及方法对于如此大小的缺陷存在着很大的技术难度。因此,需要发展新的无损检测技术及方法,以保证成形制件的检测质量。目前,国内外相关研究机构已开展在线检测技术研究,通过在线检测熔池热辐射来监控成形件的缺陷,随

着对激光直接沉积成形结构内部组织形成规律及缺陷形成机理认识的不断深入以及在线检测技术的不断进步,零件内部质量控制技术可早日取得突破性进展<sup>[14]</sup>。研究结果显示,通过热等静压处理,可以降低激光直接沉积成形 A-100 钢制件缺陷数量及缺陷尺寸。

#### 4 表面强化技术

由于超高强度钢对应力集中比较敏感,为提高超高强度钢结构件疲劳性能,发挥超高强度钢高强度和高寿命的性能潜力,必须采用表面强化技术来减小其应力集中敏感性<sup>[15]</sup>。为提高起落架的使用寿命,防止构件表面裂纹的萌生和扩展。通常采用表面强化技术来改善构件表面组织结构,产生残余压应力,提高疲劳性能。目前起落架零件表面强化工艺主要包括喷丸强化、孔挤压强化和螺旋纹滚压强化等,强化机理是通过冲击或压力接触等方式使材料表面发生塑性变形,从而使材料表面产生压应力,形成表面强化层<sup>[16-17]</sup>。

由于激光直接沉积成形技术通过激光熔化和逐层快速凝固沉积,组织形态及组织的致密度与锻件不同,针对基于激光直接沉积成形工艺技术的创新结构构型,传统的用于锻造+机加零件的表面强化工艺方案能否适用激光直接沉积成形 A-100 钢零件,发挥材料及工艺技术优势,目前尚未开展足够的试验验证。当前,新的强化技术如激光冲击强化、超声波冲击强化等正在快速发展中,这些工艺技术对于改善复杂结构构型零件的性能、提高疲劳寿命具有显著的效果。因此,为使 A-100 钢激光成形起落架获得更加优异的使用安全寿命,需针对结构形式及材料组织特性,开展新的强化工艺技术研究,以最大程度地发挥新技术的优势。

#### 5 综合验证技术

为保证飞机结构件质量及寿命安全,用于飞机结构件上的新材料新工艺需要通过结构完整性验证考核,通过验证考核发现问题,提高技术成熟度,促进其应用。由于激光直接沉积成形技术具有个性化强、工艺门槛窄等技术特点,结构件在试制过程中的验证考核尤为重要<sup>[18-19]</sup>。

起落架结构件属于单传力路径结构件,基于使用环境及承力特点,为降低起落架使用风险,需根据起落架承载情况对 A-100 钢激光直接沉积成形起落架零件进行材料级、典型结构件级及全尺寸件级性能综合验证试验考核。

材料级性能试验主要是为了考核材料工艺技术水平与特点,通过进行 A-100 钢激光直接沉积成形构件的材料基本性能试验,为起落架零件的结构设计分析提供基本性能数据。一般来说,材料级性能试验主要包括拉伸、冲击、断裂韧性、疲劳等,试验方法及标准均执行国标。

典型结构件级性能试验主要目的是在模拟使用环境下验证工艺/结构的适用性,通过对典型关键要素

极端考核,为结构设计提供基本单元数据支持。对于 A-100 钢激光直接沉积成形起落架零件,需针对工艺成形特点,结合起落架结构形状及承载情况,挑选结构薄弱环节或承载较大的关键部位,设计典型结构件进行静力/疲劳等性能试验考核,通过典型结构件试验验证工艺技术对于结构形式设计的可靠性。

全尺寸件级性能试验是基于结构件使用环境,在多因素作用环境影响下,完成真实构件模拟环境验证试验,通过试验暴露结构疲劳薄弱环节。对于 A-100 钢激光直接沉积成形起落架,需根据实际的使用载荷情况,开展地面综合验证试验,如静力、疲劳、落震、摆震等试验考核,通过地面验证试验考核,为全尺寸零件的装机使用提供试验依据,降低装机使用风险。

目前,国内以沈阳飞机设计研究所为代表的技术团队,在 A-100 钢激光直接沉积成形起落架综合验证技术方面开展了充分的研究工作,试制的起落架在飞机上实现了领先试用(图 3)。同时,技术团队基于设计制造一体化理念,面向结构完整性技术要求,通过结构综合验证试验迭代优化 A-100 钢激光直接沉积成形制造工艺技术,以提高技术成熟度,促进技术实现工程应用。

## 结论

相对于传统的锻造+机加制造技术,A-100 钢激光直接沉积成形是一项“变革性”的飞机起落架制造技术,具有突破规格限制、减少原材料浪费、缩短加工制造周期等技术特点,在未来飞机起落架快速试制方面具有较明显的技术优势及应用前景。需要围绕成形工艺策略、热处理控制、无损检测、表面强化及综合验证等技术协同开展研究工作,以促进应用。随着相关技术的不断完善,该项技术必将越来越多地应用于飞机起



图3 A-100钢激光直接沉积成形增材制造飞机起落架

Fig.3 Aircraft undercarriage of A-100 steel laser deposited additive manufacturing

落架等重要承力结构件的生产试制。同时,该技术也可推广应用于其他武器装备领域,充分发挥高柔性、超大规模结构快速试制等技术优势。

## 参考文献

[1] 李铭. 大型飞机起落架制造技术[J]. 航空制造技术, 2008, 51(21): 68-71.  
 LI Ming. Manufacturing technology for large aircraft undercarriage[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(21): 68-71.  
 [2] 杨昭明, 罗小安. 先进工艺在飞机起落架制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2005, 48(6): 100-103.  
 YANG Zhaoming, LUO Xiaon. Application of advanced manufacturing technology in aircraft undercarriage production[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005, 48(6): 100-103.  
 [3] 赵振业. 关于超高强度钢研究与设计的最新进展[J]. 功能材料, 2009, 40(S1): 8.  
 ZHAO Zhenye. Latest progress of study and design on ultra-high strength steel[J]. Functional

Materials, 2009, 40(S1): 8.

[4] 刘天琦. 飞机起落架用材发展[C]// 中国航空学会 2007 年学术年会: 材料专题. 深圳, 2007.

LIU Tianqi. Development of aircraft underriage material[C]// CSAA Annusl Conference 2007: Material Topics. Shenzhen, 2007.

[5] 李杰, 李志, 颜鸣皋. 高合金超高强度钢的发展与关键技术[J]. 中国机械工程, 2000, 11(1): 186-189.

LI Jie, LI Zhi, YAN Minggao. Development and key technologies of high alloy ultra-high strength steel[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(1): 186-189.

[6] 郭初阳, 郭喜军, 刘聪, 等. A-100 钢激光成形零件在飞机起落架制造领域的工艺研究[J]. 新工艺新技术, 2015(1): 71-74.

GUO Chuyang, GUO Xijun, LIU Cong, et al. Research on process of A-100 steel laser forming parts in the filed of aircraft landing gear manufacturing[J]. New Technology & New Process, 2015(1): 71-74.

[7] 王华明, 张凌云, 李安, 等. 高性能航空金属结构材料及特种涂层激光熔化沉积制备与成形研究进展[J]. 金属热处理, 2008, 33(1): 82-85.

WANG Huaming, ZHANG Lingyun, LI An, et al. Progress on laser melting deposition processing and manufacturing of advanced aeronautical metallic structural materials and coatings[J]. Heat Treatment of Metals, 2008, 33(1): 82-85.

[8] 崔灿, 刘栋, 苏亚东, 等. 热处理对激光直接沉积成形 A-100 钢基体组织及性能的影响[J]. 航空制造技术, 2017, 60(13): 89-92.

CUI Can, LIU Dong, SU Yadong, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser deposited A-100 steel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(13): 89-92.

[9] 席明哲, 高士友, 刘博, 等. 扫描方式和退火热处理对激光快速成形 TA15 钛合金组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(2): 445-449.

XI Mingzhe, GAO Shiyu, LIU Bo, et al. Effect of scanning pattern and annealing heat treatment on microstructures and mechanical

properties of TA15 titanium alloy formed by laser rapid forming process[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(2): 445-449.

[10] 崔宝磊, 尚纯, 杨光, 等. 工艺参数对钛合金激光沉积成形质量影响的研究[J]. *激光应用*, 2013, 33(3): 245-249.

CUI Baolei, SHANG Chun, YANG Guang, et al. Research on process parameters of laser metal deposition quality influence[J]. *Applied Laser*, 2013, 33(3): 245-249.

[11] 龙日升, 刘伟军, 邢飞. 扫描方式对激光金属沉积成形过程温度的影响[J]. *光电子·激光*, 2008, 19(4): 528-531.

LONG Risheng, LIU Weijun, XING Fei. Effects of scanning methods on temperature during laser directly metal shaping[J]. *Optoelectronics · Laser*, 2008, 19(4): 528-531.

[12] 卞宏友, 刘伟军, 王天然, 等. 激光金属沉积成形的扫描方式[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(10): 170-175.

BIAN Hongyou, LIU Weijun, WANG Tianran, et al. Scanning mode for laser metal deposition shaping[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(10): 170-175.

[13] 贺亚勇, 赵勇. 起落架用 A-100 钢热处理力学性能质量控制研究[J]. *新技术新工艺*, 2016(6): 79-82.

HE Yayong, ZHAO Yong. Research on quality control of the aircraft landing gear A-100 heat treatment[J]. *New Technology & New Process*, 2016(6): 79-82.

[14] 解瑞东, 鲁中良, 弋英民. 激光金属成形缺陷在线检测与控制技术综述[J]. *铸造*, 2017, 66(1): 33-37.

XIE Ruidong, LU Zhongliang, YI Yingmin. Overview of defect detection and control technology in laser metal forming[J]. *Foundry*, 2017, 66(1): 33-37.

[15] 高玉魁, 李向斌, 殷源发. 超高强度钢的喷丸强化[J]. *航空材料学报*, 2003, 23(S1): 132-135.

GAO Yukui, LI Xiangbin, YIN Yuanfa. Shot peening on ultra-high strength steels[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2003, 23(S1): 132-135.

[16] 高玉魁. 表面强化对 A-100 钢带孔构件疲劳性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2014, 35(5): 160-164.

GAO Yukui. Influence of local surface strengthening on fatigue properties of components with holes of an A-100 steel[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2014, 35(5): 160-164.

[17] 赵勇, 李博. A100 钢零件复合喷丸工艺及质量控制研究[J]. *新技术新工艺*, 2015(5): 147-149.

2015(5): 147-149.

ZHAO Yong, LI Bo. Research on compound shot peening process and quality control of A100 steel parts[J]. *New Technology & New Process*, 2015(5): 147-149.

[18] 王向明, 苏亚东, 吴斌. 增材技术在飞机结构研制中的应用[J]. *航空制造技术*, 2014, 57(22): 16-20.

WANG Xiangming, SU Yadong, WU Bin. Application research of additive manufacturing technology on aircraft structure development[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 57(22): 16-20.

[19] 苏亚东, 吴斌, 王向明. 增材制造技术在航空装备深化应用中的研究[J]. *航空制造技术*, 2016, 59(12): 42-48.

SU Yadong, WU Bin, WANG Xiangming. Research on further application of additive manufacturing technology on aviation equipment[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(12): 42-48.

通讯作者: 王向明, 博导、研究员, 航空工业沈阳飞机设计研究所项目总设计师、新型功能结构航空重点实验室主任、国防 973 项目技术首席专家, 研究方向为飞机先进结构快速响应设计/制造一体化技术, E-mail: wangxm601@163.com。

## Study on Application of Laser Deposited Additive Manufacturing Technology on Aircraft Undercarriage

CUI Can, WANG Xiangming, WU Bin, BI Shiquan, SU Yadong  
(AVIC Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China)

**[ABSTRACT]** The laser deposited additive manufacturing is of a revolutionary significance for aircraft landing gear manufacturing. It has many technical advantages, such as breaching restriction of material specification, reducing waste of original material, and shortening manufacturing time. This technology has obvious advantage and application prospects on rapid trial-manufacture for the future aircraft undercarriage. At present, the key technologies of laser deposited A-100 steel such as forming process, quality control and so on have been breached through. The undercarriage formed by laser deposition has achieved leading application on aircraft. Mechanical properties of parts reached almost that of the forgings. Some keys such as strategy of forming process, control of heat treatment, non-destructive testing, surface strengthening and integrated evaluation, need to be further broken through and solved for extended application of this technology.

**Keywords:** Laser deposition forming; Additive Manufacturing; Aircraft undercarriage; Ultrahigh strength steel; Rapid trial-manufacture technology

(责编 铃兰)