doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20181017001

# 能束能场增材再制造技术的研究进展

王启伟<sup>1</sup>,朱 胜<sup>2</sup>,陈春良<sup>3</sup>,王晓明<sup>2</sup>,李 卫<sup>1</sup>

(1. 暨南大学 先进耐磨蚀及功能材料研究院,广州 510632;2. 陆军装甲兵学院 装备再制造技术国防科技重点实验室,北京 100072;3. 陆军装甲兵学院 装备保障与再制造系,北京 100072)

**摘** 要:针对再制造工程在发展和应用中面临的挑战和需求,阐述了增材再制造技术的概念,探讨了基于激光、电子 束、电弧的熔敷成形技术以及电弧-激光复合熔敷、电弧-磁场复合熔敷、激光-磁场复合熔敷、双激光复合锻打成形等 技术的特点及应用,重点分析了纵向磁场对电弧温度场以及旋转磁场对激光熔敷层组织的影响。结果表明:电弧熔 敷成形过程引入纵向磁场,电弧中心温度降低,电弧对基体的热影响减小;激光熔敷成形铝基非晶材料过程加入旋 转磁场,有利于非晶相的形成和组织缺陷的减少,熔敷层的耐蚀性和力学性能提高。最后指出能束能场增材再制造 技术的发展趋势是向多能束能场及后处理复合、再制造全过程智能化和装备集成移动式方向发展。

关键词:能束;能场;增材成形;再制造工程

中图分类号: TH17

文献标志码:A

文章编号:1007-9289(2018)06-0001-08

## Research Progress of Additive Remanufacturing Technology Based on Energy Beam and Energy Field

WANG Qiwei<sup>1</sup>, ZHU Sheng<sup>2</sup>, CHEN Chunliang<sup>3</sup>, WANG Xiaoming<sup>2</sup>, LI Wei<sup>1</sup>

Institute of Advanced Wear & Corrosion Resistant and Functional Materials, Jinan University, Guangzhou 510632, China;
 National Key Laboratory for Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China;
 Department of Equipment Support and Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China)

**Abstract:** To address the challenges and needs of remanufacturing engineering in its development and application, additive remanufacturing technology was elaborated, and the characteristics and applications of additive forming technologies were discussed in details including laser cladding, arc cladding, electron beam cladding, laser-arc hybrid cladding, arc-magnetic field hybrid cladding, laser-magnetic field hybrid cladding, and dual-laser forging cladding. The influence of longitudinal magnetic field on the arc temperature field and the rotating magnetic field on the microstructure of the laser cladding layer were emphatically analyzed. The results show that with the longitudinal magnetic field the center temperature of the arc on the substrate reduced during arc cladding. When rotating magnetic field is introduced in laser cladding forming of Al-based amorphous materials, it is beneficial to the formation of amorphous phase and the reduction of tissue defects, as well as improvement of the corrosion resistance and mechanical properties of the deposited layer. Finally, it is pointed out that additive remanufacturing technologies based on energy beam and energy field developed towards the combination of multiple energy beams and energy fields and post-processing, intellectualization of the remanufacturing process and mobile integrated equipment in the future.

Keywords: energy beam; energy field; additive forming; remanufacturing engineering

收稿日期: 2018-10-17; 修回日期: 2018-11-22

- 网络出版日期: 2018-12-04 09:16; 网络出版地址: http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20181204.0915.006.html
- 通信作者:朱胜(1964—),男(汉),研究员,博士;研究方向:表面工程与再制造工程;E-mail:zusg@sina.com

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1105800)

Fund: Supported by National Key Research and Development Program of China (2018YFB1105800)

引用格式: 王启伟, 朱胜, 陈春良, 等. 能束能场增材再制造技术的研究进展[J]. 中国表面工程, 2018, 31(6): 1-8. WANG Q W, ZHU S, CHEN C L, et al. Research progress of additive remanufacturing technology based on energy beam and energy field[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(6): 1-8.

### 0 引 言

我国为制造业大国,机电产品保有量巨大, 对机电产品实施再制造是实现废旧机电产品循环 利用的重要途径,是资源再生的高级形式,也是 发展循环经济,建设资源节约型、环境友好型社 会的重要举措,更是推进绿色发展、低碳发展, 促进生态文明建设的重要载体<sup>[1]</sup>。与传统制造业相 比,再制造可节约成本 50%,节能 60%,节材 70%,大气污染物排放量降低 80% 以上,经济效 益、社会效益和生态效益显著<sup>[2]</sup>。为此,国家大力 提倡发展再制造产业,国务院颁发的《中国制造 2025》中明确指出,大力发展再制造产业,实施 高端再制造、智能再制造和在役再制造<sup>[3]</sup>。

截至 2018 年 6 月,工信部已批复的再制造试 点企业达到 150 余家,全国范围内已经建立了 8 个 国家再制造产业集聚区和再制造产业示范基地, 工信部已发布的七批《再制造产品目录》涵盖了 工程机械、内燃机、石油机械、轨道车辆、汽车零 部件、机床等 11 大类 147 种产品总计 9528 个型 号<sup>[4]</sup>。据统计<sup>[5-7]</sup>,截至 2017 年底,我国机动车保 有量达 3.10 亿辆,每年有数百万辆的汽车报废, 2018 年报废汽车数量将达到 900 万辆,工程机械 总保有量约 800 万台左右,80% 已经超过质保 期,30% 的盾构设备处于报废闲置状态,服役十 年以上的机床超过 200 万台,预计到 2020 年,我 国再制造产业规模将达到 2000 亿元,面对巨大的 市场需求,发展先进的再制造技术势在必行。

#### 1 增材再制造技术及其面临的挑战

再制造是一项复杂的系统工程,流程包括回 收、拆解、清洗、检测、寿命评估、修复、组装等 过程,其中损伤修复是再制造的核心过程,该过 程依托先进的再制造技术恢复零件的外形尺寸和 服役性能,增材再制造技术是实现这一过程目标 的有效技术手段。朱胜<sup>(8)</sup>首次提出了增材再制造的 概念,即利用增材制造技术(3D打印)对废旧机电 产品进行增材修复的工艺过程,增材再制造技术 是再制造过程中缺损零件反求建模、成形分层、 路径规划、堆积成形等增材技术的总称。基于激 光、电子束、电弧等能束能场的增材成形技术是 增材再制造技术之一,已广泛应用于车辆、舰 船、重载机械、能源化工、航空航天等领域的装备 再制造,但上述技术在再制造工程应用过程中,仍面临着以下挑战:

(1) 再制造过程智能化程度低

增材再制造与增材制造都是离散-堆积的成形 过程,但两者有所区别,增材再制造是以损伤的 零部件作为毛坯,获得缺损件的模型,与原件进 行对比后获得缺损模型,得到零件的缺损模型后 再进行离散分层处理,进行大量的计算生成路径 程序代码,再进行逐道、逐层堆积,由点连成 线,由线搭接成面,再由面堆积成体,最终使修 复件恢复原有零件的形状尺寸和性能。增材再制 造的重要特征是损伤零部件的数字模型、装备材 质、失效模式、修复位置以及修复区域表面状态 各不相同,其产品具有个性化和多样化特征,因 此,广泛应用于增材制造中的数字模型、分层及 路径规划等技术和控制软件不能直接用于增材再 制造过程,尚无法实现增材再制造过程的智能化 控制。

(2) 再制造产品的性能达不到服役要求

再制造产品的一个重要特性是产品的性能和 质量达到或超过新品。基于激光、电子束、电弧 等能束能场的增材成形过程是金属材料熔化与结 晶的过程,结晶组织为铸态组织,而许多装备零 部件的制造过程为挤压、锻造、轧制等工艺或经 过特定的热处理工艺,其结晶组织为变形组织, 力学性能要远优于铸态组织,因此,采用能束能 场增材成形技术修复的此类零件,其性能尚不能 达到新品的水准。另一方面,基于能束能场的增 材成形过程是一个非均匀加热和冷却的过程,受 热影响和多层堆积的热循环作用,母材熔区周围 的基体过热,容易造成晶粒粗大、热裂纹等缺 陷,并产生较大的收缩变形,使得修复件的整体 性能降低或发生变形。

(3) 现场条件下再制造成形精度低

对于一些大型构件或难以拆卸的零部件,必 须在现场或原位实施在役再制造。现场在线修复 过程受时间、空间、状态等多维约束的影响,难 以保证材料按预定轨迹定量熔化和准确沉积,直 接影响零部件修复的几何精度。例如,当原位成 形面为非水平面大倾角时,熔融金属受重力作用 向下流动,实际成形的微单元形状偏离计算模 型,产生较大误差,成形精度降低,甚至引起熔 池表面下塌,出现咬边、焊瘤等缺陷而不能成 形,只能采取机械加工的办法进行后续加工去除 或增加后续的堆积量来达到工件尺寸的要求,影 响成形的效率和质量。

#### 2 基于能束能场的增材成形技术

基于激光的增材成形技术发展成熟,应用最 为广泛。激光的功率密度最高可达 10° W/cm<sup>2</sup>,激 光作用区的深度为 0.2~2 mm,可以在熔点相差较 大的异质材料之间进行熔覆和多层熔覆堆积,形 成厚度可调的熔覆成形层;激光的光斑直径较 小,照射时间极短,形成的熔池尺寸小,因此整 体热输入较低,对基体的热影响较小;激光作用 下的熔池具有极高的加热和冷却速率,冷却速率 最高可达 105~10° K/s,可以形成极其细小、致密 的凝固组织和亚稳相、超弥散相、纳米晶相、非晶 相等特殊结构[9-10]。激光熔覆成形技术已得到了广 泛的应用,美国 Sandia 国家实验室和空军研究实 验室、英国 Rolls-Royce 公司、法国 Alstom 公司 以及德国 Fraunhofer 研究所等机构均对航空发动 机涡轮叶片和燃气轮机叶片的激光熔覆修复工艺 进行了研究并成功实现了定向晶叶片的修复:美 军的"移动零件医院",可以对战场破损零件(如坦 克链轮、传动齿轮和轴类零件等)进行实时修复<sup>111</sup>。

与激光相比,电子束能量密度更高,最大功 率密度可达 10° W/cm<sup>2</sup>,仅需毫秒级时间就可熔化 金属材料或陶瓷材料,有利于难熔材料的熔覆, 但由于电子束的温度场瞬间温度较高,在对微小 及薄壁零件进行熔覆时,易造成薄壁零件的熔化 或变形;电子束的冷却速率可达 10<sup>6</sup>~10<sup>8</sup> K/s,形 成纳米晶相、非晶相组织更有优势;电子束 参数可控性好,能量密度容易调节,易于实现自 动化;电子束加热深度和尺寸范围比激光更大, 熔化层至少几个微米厚。电子束熔覆为真空操作, 可以避免空气中的杂质渗入和氧化等问题,熔覆 质量较高,但真空条件也限制了电子束熔覆的 应用范围,在移动式现场再制造修复时,不具有 优势<sup>[12-13]</sup>。

电弧热源成形效率高、设备简单、成本低 廉,在熔滴尺寸、熔滴过渡方式等方面都具有良 好的可控性,并且克服了激光、电子束等成形技 术的设备昂贵、体积庞大、不适合现场修复等劣 势,在实现大型装备零部件现场快速修复时,更 具有优势,目前广泛采用的电弧增材成形方法主要依托非熔化极气体保护焊、熔化极气体保护焊、等离子弧焊和冷金属过渡焊 (CMT-cold metal transfer) 及交流 CMT 等技术发展而来。

熔化极和非熔化极气体保护焊热输入较大, 电弧稳定性差,成形精度低,特别是在成形铝合 金、镁合金等材料时,其热变形、气孔、热裂等问 题仍然没能得到彻底解决。CMT 技术相较于传统 的电弧熔敷具有效率高、热输入低、无飞溅以及 工艺稳定性强等特点[14],特别是热输入量的大幅 降低使得变形量减小,可以保证增材成形的尺寸 精度,并可减少组织成分偏析,特别适合薄壁零 部件的增材制造和再制造。姜云禄、张瑞[15-16]利 用 CMT 技术实现了船用三叶螺旋桨铝合金等装备 的增材制造成形。交流 CMT 电弧的热输入比传 统 CMT 的热输入还要小,采用交流 CMT 技术进 行增材再制造,对基材的热影响进一步降低,可 以有效防止焊缝区和热影响区晶粒的快速长大, 克服大量热积累效应导致的尺寸精度不可控和组 织粗大等问题, 组织性能明显优于传统 CMT, 因 此,相较于CMT技术,交流CMT技术在增材再 制造领域的应用前景更加广泛[14]。

### 3 基于能束能场复合的增材成形技术

在增材成形过程中,能束之间的复合以及加 入热、力、声、振、磁等外场辅助可以对成形过程 形成干预,影响成形组织、成形精度、母材热输 入等等,最终可以提高修复效率,改善修复件的 力学性能,特别是对于钛合金、铝合金、镁合金、 高温合金等零件的再制造修复,能束与能场复合 具有各自的优势。

激光熔敷成形过程中辅助感应加热,可以优 化成形组织结构。对于TC4 钛合金,辅助感应加 热后,沉积方向上的部分柱状晶被打断,抑制了 柱状晶的贯穿生长<sup>[17]</sup>;在成形裂纹敏感性强的镍 基高温合金时,熔敷层内部组织易沿晶界产生开 裂,并顺着沉积方向发生扩展,通过辅助感应加 热,除可消除气孔等微观缺陷外,还可以大幅降 低零件在成形过程中的裂纹敏感性,消除零件熔 覆层裂纹<sup>[18]</sup>。在激光熔敷增材成形过程中引入超 声辅助振动,可以降低成形件的表面粗糙度和残 余应力,整平甚至消除结构缺陷,抑制柱状晶的 生长,得到细小的等轴晶,获得高性能的金属修 复件[19]。

将磁场引入电弧增材成形过程,通过磁场控 制电弧运动、熔滴过渡和熔池金属的流动,可对 熔池凝固过程进行有效干预,影响成形的质量和 精度。不同形式的磁场影响成形过程的机制不 同,当加入横向稳恒磁场时,电弧受洛仑兹力作 用产生偏移,熔池的运动状态也发生变化。在此 过程中,向熔融的熔池金属内通入电流,磁场与 电流相互作用,产生洛仑兹力作用在熔池金属 上,通过控制磁场的方向和熔池中电流的方向, 可以在熔池内部产生与重力方向相反的洛仑兹 力,来抑制熔池金属下淌产生的缺陷<sup>[20]</sup>,克服由 于重力作用熔融金属流动产生的精度问题。当加 入横向交变磁场时,电弧按照横向磁场的交变频 率沿焊道中心左右摆动,熔池呈波浪式前进,而 且由于熔池运动速度的增加,使电弧的加热区加



(a) Isothermal nephogram of MIG arc without magnetic field

宽,热影响区和半熔化区的范围减小,得到较浅的熔深<sup>[21]</sup>。横向交变磁场可以应用于厚度较薄零件的再制造成形。

电弧增材成形过程引入纵向磁场,电弧在磁 场作用下发生扩张,外形由圆锥形变为钟罩形, 电弧中心电流密度、热流密度降低,电弧边部电 流密度、热流密度升高,电弧中心温度显著降低<sup>[23]</sup>, 有磁场和无磁场条件下的 MIG 电弧等温云图如 图 1 所示。可见,加入纵向磁场后,电弧在水平 方向覆盖了母材更大的面积,焊道熔深减小,熔 宽增大,增材过程的热输入减少,热影响区组织 长大趋势减缓,母材整体硬度有所提高,电弧热 输入对母材软化行为的影响减弱。同时,由于磁 场的搅拌作用,熔敷层内部气孔和氧化夹杂等缺 陷减少,成形层密度值提高,熔敷层摩擦性能和 拉伸性能得到提高<sup>[23]</sup>。



(b) Isothermal nephogram of MIG arc with magnetic field

镁的焊接性较差,采用电弧增材技术修复镁 合金装备容易产生应力、变形、气孔和热裂纹缺 陷,修复的难度较大。采用激光-TIG 电弧复合热 源,激光可以对电弧起到牵引与压缩的作用,使 电弧的燃烧更稳定,熔池内的液体金属流动更平 稳,并可提高熔池对激光的吸收率,降低金属对 激光的反射作用,使熔敷层焊道搭接平滑、平 整,鱼鳞纹整齐,无咬边、气孔和裂纹等缺陷, 修复精度和性能更优。激光-TIG 电弧能束复合, 其热源穿透力增强,较单一的两种能束功效大大 提高,工艺成本降低了 50%,生产效率提高了 50%,目前该技术已广泛应用于镁合金装备的体 积损伤修复<sup>[24]</sup>。

前已述及,激光熔覆具有较高的冷却速率,

在快速凝固的过程中,熔池与基体材料结合部位 会形成较大的温度梯度,但如果熔覆材料与基体 材料热胀系数相差较大,易导致结合区产生变 形、裂纹、气孔等缺陷,会对熔覆层质量造成很 大影响。为了更好的控制激光熔覆过程中产生的 缺陷,可以向熔池内加入磁场,通过磁场力对熔 池作用,细化组织,提高非晶、纳米晶含量,减 少裂纹、夹杂、气孔和成分偏析等缺陷,从而改 善熔覆层质量和提高服役性能<sup>[25]</sup>。王晓明等<sup>[26]</sup>采 用磁场辅助激光熔覆技术在 5083 铝合金表面制备 铝基金属玻璃覆层,研究结果表明,与相同条件 下未加磁场作用的熔覆层组织进行对比发现,旋 转磁场能够对熔池起到搅拌和冲击作用,使 Ni、 Y、Co、La 元素更容易进入 Al 晶格内形成化合

图 1 有磁场和无磁场条件下的 MIG 电弧等温云图 Fig.1 Isothermal nephogram of MIG arc with and without magnetic field

物,在成分上更有利于非晶相的形成,熔覆层物 相分析如图 2 所示,通过计算可知,加入磁场 后,熔覆层非晶相含量由 10.2% 提高到 30.7%, 而且可以抑制粗大的金属间化合物的形核和长 大。熔覆层组织微观形貌如图 3 所示,无磁场 时,组织为长条状枝晶,尺寸增大明显,当加入 磁场后,晶粒尺寸较小,未发生明显长大;另一 方面,加入磁场后能够显著增强熔池的对流,降 低温度梯度,进而减少熔覆层存在的气孔、氧化 夹杂等缺陷并且减少甚至消除裂纹的产生,从而 提高熔覆层的非晶相含量以及整体成形质量。采 用旋转磁场辅助激光熔覆制备的 Al 基金属玻璃覆 层自腐蚀电位较基体提高约 0.2 V,熔覆层和基体 的自腐蚀电流分别为 4.64 和 35.6 μA,熔覆层的 自腐蚀电流较基体降低约 10 倍,且具有比基体更 宽的钝化区间<sup>[27]</sup>。由于熔覆层中的非晶相没有晶 界、相界等易造成腐蚀的缺陷,并且能够促进钝化 膜的形成,因此能够提高熔覆层的耐腐蚀性能。









(a) Microstructure of cladding without magnetic field

(b) Microstructure of cladding with magnetic field



基于激光、电子束、电弧等能束的增材成形 层组织为铸态组织,通常性能较锻造、挤压、轧 制等变形组织低,再制造后零件的性能不能满足 服役要求。针对这一问题,常采用随焊锤击碾 压、挤压等外力锻打和超声冲击、激光冲击等能 束能场锻打技术使结晶组织由铸态组织转变为变 形态组织,从而提高力学性能<sup>[28]</sup>。基于能束能场 的熔敷锻打成形技术的主要原理是将两种不同功 能的能束同时且相互协同作用于工作区,第一束 能束可以采用连续激光、电子束、等离子、电弧等 热源,利用其热效应对金属粉末进行熔敷,与此 同时第二束能束采用短脉冲激光或超声波等直接 作用在锻造温度范围内的熔敷金属表面,利用激 光冲击波或超声波的力学效应对处于锻造温度范 围内的熔敷层进行冲击锻打,锻打过程使每一层 熔敷层晶粒细化,最终提高了整个块体材料的强 度、塑性以及晶粒尺寸的均匀性,消除了熔敷层 的气孔等内部缺陷和热应力,显著提高金属零件 的内部质量和力学综合性能,并有效控制宏观变 形与开裂问题。

张永康<sup>[29]</sup>发明了双激光束熔敷成形冲击锻打 复合增材制造方法,其原理是第一束连续激光利 用热效应对金属粉末进行熔敷,与此同时,第二 束短脉冲激光直接作用在锻造温度范围内的熔敷 金属表面,金属表层吸收激光束能量后气化电离 形成冲击波,利用第二束短脉冲激光冲击波力学 效应对处于锻造温度范围内的熔敷层进行冲击锻 打,该技术的原理如图 4 所示。



1-Cladding layer, 2-Molten pool, 3-Metal powder, 4-CW laser, 5-Short pulse laser, 6-Plasma, 7-Shock wave, 8-Porosity, shrinkage and unfused defects, 9-Fused metal crystal, 10-Variable angle of short pulse laser

#### 图 4 双激光熔敷锻打成形技术原理图

Fig.4 Schematic diagram of dual-laser forging cladding

该方法通过双激光束协同作用,逐层堆叠熔 敷区材料形成工件,加工效率提高 1~2 倍;通过 调整激光冲击锻打频率及脉冲功率密度,解决了 不同材料冷却速率及锻造温度区间大小的差异, 使熔敷层在较高的塑性及低变形抗力下完成冲击 强化,并通过激光冲击锻打频率与压力参数调控 激光熔敷速度与送粉参数,使激光冲击锻打熔敷 层晶粒显著细化,不同材料熔敷成形后的强度和 疲劳寿命可提高几倍到几十倍不等;上述各工艺 参数的稳定性保证了逐层晶粒尺寸可控,从而实 现整个熔敷层晶粒尺寸的均匀性,消除了熔敷层 的气孔等内部缺陷和热应力,提高了金属零件的 内部质量和综合力学性能,并可有效控制宏观变 形与开裂问题。

#### 4 能束能场增材再制造技术的发展趋势

由于能束能场增材成形技术具有独特的优势 和特点,已广泛应用于再制造工程,具有巨大的 发展空间和潜力,其发展趋势主要是:

(1) 向多能束能场及后处理复合方向发展

单一的能束能场成形技术和方法在再制造工 程中都有其应用的局限性,基于激光、电子束、 电弧等能束的增材成形技术与热、力、声、振、磁 等能场以及先进的数控加工技术和后处理技术复 合,可以进一步优化成形层的内部组织,提高再 制造成形的精度、性能和效率,是未来能束能场 增材成形技术发展的一个重要方向。

(2) 向再制造全过程智能化方向发展

智能制造是新一轮工业革命的核心技术,《中 国制造 2025》中明确提出了发展智能再制造,将 人工智能技术融入到再制造领域中,可实现再制 造过程的智能判断和决策,提高再制造的质量和 效率,因此,增材再制造技术也要契合再制造全 过程智能化发展的重要方向,开发与研究缺损模 型快速测量方法、数字模型重构、成形策略优选、 分层切片与路径规划及复杂形位成形微单元模型 等智能增材再制造技术,并集成为智能化增材修 复成套系统,使设备能够自主适应损伤零件现场 环境和空间约束条件,自动识别定位零件待修复 部位,智能重构缺损模型和处理数据,并切片分 层生成修复路径,使增材修复过程具有更完善的 判断与适应能力,实现再制造过程中质量和精度 的控制。

(3) 向装备集成移动式方向发展

大型装备拆卸难、拆卸成本高,装备停机修 复的经济效益或军事效益损失巨大,而在线修复 与再制造仍是制约装备再制造发展和突破的瓶颈 问题,因此,增材再制造技术未来的发展趋势是 能束能场增材成形装备集成化,再制造装备能够 通过陆海空运条件快速抵达修复现场,完成快速 高效优质修复与再制造,为大型装备尤其是流程 工业装备金属零件在线、高效率、高精度、高性能 修复提供技术支撑。

#### 5 结 语

(1)基于能束能场的增材成形技术可以实现不同环境下装备复杂形位损伤的现场高柔性修复,

是实现装备优质高效再制造的有效手段。

(2)多能束能场复合增材成形技术可以细化组织晶粒、消除熔敷层内部缺陷、降低热应力和减小热变形,可有效提高再制造零件的内部质量和综合力学性能。

(3)能束能场增材再制造技术的发展趋势是向 多能束能场及后处理复合、再制造全过程智能化 和装备集成移动式方向发展。

### 参考文献

[1] 朱胜,周超极.面向"中国制造 2025"的增材再制造技术[J].
 热喷涂技术, 2016, 8(3): 1-4.

ZHU S, ZHOU C J. Additive remanufacturing for"Made in China 2025"[J]. Thermal Spray Technology, 2016, 8(3): 1-4 (in Chinese).

[2] 徐滨土.绿色再制造工程及其关键技术[J].再生资源与循 环经济,2009,2(11):5-8.

XU B S. Remanufacture and the technological support[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2009, 2(11): 5-8 (in Chinese).

[3] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发《中国制造
 2025》的通知[A/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/
 2015-05/19/content\_9784.htm, 2015-05-19.

National Assembly of the PRC. Notice of the state council on printing and distributing"made in China 2025"[A/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content\_ 9784.htm, 2015-05-19 (in Chinese).

[4] 徐滨土. 装备再制造领域的军民融合-徐滨士院士访谈录[J]. 军民两用技术与产品, 2018, 8: 8-13.

XU B S. Civil-military inosculation in the field of equipment remanufacturing-interview with academician XU BIN SHI[J]. Dual Use Technologies & Products, 2018, 8: 8-13 (in Chinese).

[5] 徐滨士. 新时代中国特色再制造的创新发展[J]. 中国表面 工程, 2018, 31(1): 1-6.

XU B S. Innovation and development of remanufacturing with chinese characteristics for a new era[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(1): 1-6 (in Chinese).

 [6] 刘文强, 莫君媛, 顾成奎. 中国再制造产业发展现状、未来 及对策[J]. 中国工业评论, 2018(3): 50-57.
 LIU W Q, MO J Y, GU C K. Current situation, future and countermeasures of China's remanufacturing industry[J].

China Industry Review, 2018(3): 50-57 (in Chinese).

[7] 工业和信息化部.工业和信息化部关于印发《高端智能再制造行动计划(2018-2020年)》的通知.[A/OL].http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057542/n3057545/c5900275/content.html. 2017-11-09.

Ministry of Industry and Information Technology. Circular of the Ministry of Industry and Information Technology on the issuance of the action plan for high-end intelligent remanufacturing (2018-2020). [A/OL].http://www.miit.gov. cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057542/n3057545/c590 0275/content.html. 2017-11-09 (in Chinese).

[8] 朱胜. 柔性增材再制造技术[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23): 1-5.

ZHU S. Mobile additive remanufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(23): 1-5 (in Chinese).

- [9] 张瑞珠, 李林杰, 唐明奇, 等. 激光熔覆技术的研究进展[J]. 热处理技术与装备, 2017, 38(3): 7-11. ZHANG R Z, LI L J, TANG M Q, et al. Research progress of laser cladding technology[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2017, 38(3): 7-11 (in Chinese).
- [10] 徐滨士.表面工程的理论与技术[M].北京: 国防工业出版社, 2010.
   XULP S. Theory and technology of surface ancience/ins/MI

XU B S. Theory and technology of surface engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010 (in Chinese).

- [11] 张安峰, 李涤尘, 梁少端, 等. 高性能金属零件激光增材制造技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016(22): 16-22. ZHANG A F, LI D C, LIANG S R, et al. Development of laser additive manufacturing of high-performance metal parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(22): 16-22 (in Chinese).
- [12] 王波, 刘海浪, 祁正伟, 等. 电子束熔覆表面改性技术的研究进展[J]. 热加工工艺, 2018, 47(14): 19-22.
  WANG B, LIU H L, QI Z W, et al. Research progress of electron beam cladding surface modification technology[J].
  Hot Working Technology, 2018, 47(14): 19-22 (in Chinese).
- [13] 张国培, 刘海浪, 黄以平, 等. 基于电子束的材料表面熔覆 技术研究进展[J]. 热加工工艺, 2017, 46(2): 27-30. ZHANG G P, LIU H L, HUANG Y P, et al. Research progress of material surface cladding technology based on electron beam[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(2): 27-30 (in Chinese).
- [14] 张博文,张来启. 交流冷金属过渡 (Advanced CMT) 技术 的研究进展及其在增材制造中的应用[J]. 新型工业化, 2017, 7(11): 82-88.

ZHANG B W, ZHANG L Q. Research progress of AC cold metal transfer technology (advanced CMT) and its application in additive manufacturing[J]. The Journal of New Industrialization, 2017, 7(11): 82-88 (in Chinese).

[15] 姜云禄. 基于冷金属过渡技术的铝合金快速成形技术及工 艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. JIANG Y L. Aluminum alloy rapid prototyping technology based on cold metal transfer technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013 (in Chinese).

2018年

- [16] 张瑞. 基于 CMT 的铝合金电弧增材制造 (3D 打印) 技术 及工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
  ZHANG R. Aluminum arc additive manufacturing (3D printing) technology and process study[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016 (in Chinese).
- [17] 李丽君, 王豫跃, 张安峰, 等. 感应加热辅助 Si 细化激光熔 覆沉积 TC4 晶粒的研究[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 1-6. LI L J, WANG Y Y, ZHANG A F, et al. Silicon refinement of TC4 grains by induction heating asisted laser cladding deposition[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 1-6 (in Chinese).
- [18] 梁少端,张安峰,王潭,等. 感应加热消除激光直接成形 DD4 零件裂纹[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 1-6. LIANG S D, ZHANG A F, WANG T, et al. Elimination of laser direct forming crack on DD4 parts by induction heating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 1-6 (in Chinese).
- [19] ZHANG M X, LIU C M, SHI X Z, et al. Residual stress, defects and grain morphology of Ti-6Al-4V alloy produced by ultrasonic impact treatment assisted selective laser melting[J]. Applied sciences-basel, 2016, 6(11): 304.
- [20] 郭宁,林三宝,范成磊,等. 横向 GMAW 熔池控制研究进展[J]. 焊接, 2009(9): 21-25.
  GUO N, LIN S B, FAN C L, et al. Review and progress on molten pool contral in horizontal GMAW[J]. Welding, 2009(9): 21-25 (in Chinese).
- [21] 张忠典, 李冬青, 尹孝辉, 等. 外加磁场对焊接过程的影响[J]. 焊接, 2002(3): 10-14.
  ZHANG Z D, LI D Q, YIN X H, et al. Influence of adding magnetic field on welding progress[J]. Welding, 2002(3): 10-14 (in Chinese).
- [22] WANG Q W, ZHU S, YIN F L, et al. Numerical simulation of MIG welding arc with longitudinal magnetic field[J]. Materials Science Forum, 2012, 704.
- [23] 王启伟. 外加纵向磁场作用下铝合金焊接熔敷再制造成形基础与应用研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2011.
   WANG Q W. Foundational and applied study on remanufacturing forming of aluminum alloys based welding deposition

under longitudinal magnetic field[D]. Beijing: Academy of Armored Forces Engineering (in Chinese).

- [24] 王之千. 镁合金激光-TIG 复合焊再制造熔敷层组织与性能研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2015.
   WANG Z Q. Study on microstructure and properties of remanufacturing depositing layers by laser-TIG hybrid welding on magnesium alloy[D]. Beijing: Academy of Armored Forces Engineering (in Chinese).
- [25] 朱胜, 张垚, 王晓明, 等. 扫描速度对激光熔覆 AI 基非晶复 合层组织与性能的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(7): 136-142.
  ZHU S, ZHANG Y, WANG X M, et al. The effect of scanning speed on structure and performance of Al based

ning speed on structure and performance of Al-based amorphous composite by laser cladding[J]. Surface Technology, 2016, 45(7): 136-142 (in Chinese).

- [26] 王晓明,朱胜,杨柏俊,等. 磁场辅助激光熔覆铝基金属玻 璃覆层[J]. 航空学报, 2018, 39(11): 422134.
  WANG X M, ZHU S, YANG B J, et al. Magnetic field assisted clad laser cladding aluminum-based metallic glass coatings[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2018, 39(11): 422134 (in Chinese).
- [27] 朱胜,张垚,王晓明,等. 激光熔覆制备铝基非晶复合层的 组织及性能[J]. 轻金属, 2016(6): 44-49. ZHU S, ZHANG Y, WANG X M, et al. The research on structure and performance of Al-based amorphous composite laser by laser cladding[J]. Light Metals, 2016(6): 44-49 (in Chinese).
- [28] 方洪渊, 李军, 杨建国, 等. 铝合金随焊控制焊接应力与变形的几种新方法[J]. 焊接, 2009(9): 18-24.
  FANG H Y, LI J, YANG J G, et al. Several new in-process control methods for the welding of aluminum alloy thin-plate structures[J]. Welding, 2009(9): 18-24 (in Chinese).
- [29] 张永康, 张峥, 关蕾, 等. 双激光束熔敷成形冲击锻打复合 增材制造方法: CN107475709A[P]. 2017-12-15 (in Chinese). ZHANG Y K, ZHANG Z, GUAN L, et al. Additive manufacturing method of double laser beam cladding forming and impact forging compound: CN107475709A[P]. 2017-12-15 (in Chinese).