

汽车曲轴热锻模焊锻复合电弧熔丝自动增材制造工艺

洪小英^{1,2}, 肖贵乾^{2,3}, 权国政²

(1. 四川信息职业技术学院 现代制造学院, 四川 广元 628017; 2. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044;
3. 重庆佛思坦智能装备有限公司, 重庆 400000)

摘要: 为了提高曲轴模具的服役寿命和降低再制造成本, 提出了焊锻复合电弧熔丝自动增材制造工艺, 并开发了相应的软件和硬件系统。在该工艺中, 曲轴模具的增材目标模型被分层切片和轨迹规划, 并将锤击轨迹和焊接轨迹重合从而将每一道焊缝均进行焊后锤击。锤击分析表明, 焊后锤击能够将焊缝残余拉应力矫正为残余压应力, 提高焊缝的力学性能。自动增材制造工艺中模具被随形增材, 而人工修复模具则采用满焊工艺, 因此, 自动增材制造工艺能够大幅节省材料大约 50% 以上, 降低焊接时间 50% 以上。在服役 8000 件后, 自动修复模具的压塌区域和压塌量显著少于人工修复模具, 此外表面微裂纹的数量也得到了大幅降低, 使得模具的服役寿命大幅提高。

关键词: 电弧熔丝; 焊锻复合; 增材制造; 残余应力; 锤击; 焊接; 曲轴热锻模具

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.04.023

中图分类号: TG315.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 04-0170-06

Automatic additive manufacturing of arc fuse welding and forging composite for auto crankshaft hot forging mold

Hong Xiaoying^{1,2}, Xiao Guiqian^{2,3}, Quan Guozheng²

(1. Institute of Modern Manufacturing, Sichuan Vocational College of Information Technology, Guangyuan 628017, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
3. Chongqing Forgestamp Intelligent Equipment Co., Ltd., Chongqing 400000, China)

Abstract: In order to improve the service life of crankshaft mold and reduce the cost of remanufacturing, an automatic additive manufacturing process of arc fuse welding and forging composite was proposed, and the corresponding software and hardware systems were developed. Then, the additive target model of crankshaft mold was sliced in layers and planned in tracks, and the hammering track and welding track were overlapped so that each weld seam was hammered after welding in this process. The hammering analysis shows that the hammering after welding can correct the residual tensile stress of the weld seam to residual compressive stress and improve the mechanical properties of the welding seam. In the automatic additive manufacturing process, the mold is added conformally, while the manual repair of mold adopts the full welding process, so the automatic additive manufacturing process can greatly save more than 50% of material and reduce the welding time by more than 50%. After serving 8000 pieces, the collapse area and collapse amount of the automatic-repair mold are significantly less than that of the manual-repair mold, and in addition, the amount of surface micro-cracks is also greatly reduced, which greatly improves the service life of mold.

Key words: arc fuse; welding and forging composite; additive manufacturing; residual stress; hammering; welding; hot forging mold of crankshaft

曲轴作为内燃机的重要组成零件之一, 被广泛应用于内燃机、汽车、船舶等行业, 需求量较大。当前曲轴锻造成形的发展方向为精密成形, 而精密

成形的关键因素是模具; 曲轴热锻模的服役条件比较恶劣, 易产生严重压塌变形、磨损、起裂等缺陷^[1-2]。由于服役环境的复杂性, 模具各个部位应当具备不同的性能^[3]; 传统模具制造方法是使用模具钢经机械加工得到, 难以达到不同部位使用不同材料的要求, 并且制造成本较高^[4]。尽管人工焊接修复模具能够满足不同部位使用不同材料的要求, 然而人工焊接无法精确控制焊接形状, 只能满焊填充后进行机械加工, 不仅浪费焊材且浪费机械加工时间。电弧熔丝

收稿日期: 2021-04-14; 修订日期: 2021-07-15

基金项目: 四川信息职业技术学院 新增科技平台课题 (2018KC214);

国家重点研发计划资助项目 (2018YFB1106504)

作者简介: 洪小英 (1981-), 女, 硕士, 高级工程师

E-mail: 20160989002@cqu.edu.cn

增材制造技术具有效率高、质量稳定、成本低等优点,逐渐成为增材制造方向研究的重点^[5-6]。

例如,Ding D H 等^[7]开发了一种多向切片方法和一种可直接从 CAD 模型生成制造路径代码的工艺规划系统。Shassere B 等^[8]开发了金属大面积增材制造工艺,用于制作简单几何形状的薄壁试样。Evjemo L D 等^[9]将 3D 视觉系统集成到机器人机械手中,实现自动自由形焊接,以最小的人为干预改进电弧熔丝增材制造工艺。Lei Y 等^[10]提出了一种新型多向 WAAM 工艺,重点讨论了定位球模型、多向切片和沉积工艺优化。然而,这种方法只能用于制造没有支撑结构的金属零件。Liu F 等^[11]提出了一种满足关节机器人工作空间的速度、加速约束,以及关节空间的速度、加速和力矩约束的最优路径生成算法。Adama Diourté 等^[12]提出了连续三维路径规划技术,该技术在 WAAM 路径规划过程中生成螺旋连续路径,以保证能源和材料的持续供应。国内也有许多学者对电弧熔丝增材制造技术进行了比较深入的研究。例如,张建生等^[13]为解决复杂型腔热锻模具自动化增材再制造过程中分层切片过程效率低和效果差等问题,提出了一种改进的切片方法。以失效的曲轴热锻模具为例,进行了分层切片处理和增材制造过程的模拟仿真和实验,验证了分层切片算法的可行性。郑华辉等^[14]研究了内燃机用 Ti600 合金的激光增材制造性能,该研究对优化工艺方法及提升激光增材制造 Ti600 合金的性能具有一定的参考价值。邵坦等^[15]针对目前快速成形中已有层片扫描路径生成算法不足的问题,在轮廓偏置

扫描路径填充算法和分区扫描路径填充算法的基础上,提出一种改良的基于偏置轮廓特征的分区扫描路径填充算法。采用该算法的混合扫描方式可以有效地改善成形质量,并在一定程度上提高成形效率。方力等^[16]提出了一种复合路径规划算法,实现了单空洞截面的填充,并进一步讨论了其他类型截面的路径规划方法,实验验证了本文算法填充复杂截面轮廓的可行性。

尽管国内外学者对电弧熔丝增材制造技术的研究比较多,但是,对电弧熔丝增材制造技术在热锻模具再制造上的应用较少。本文将电弧熔丝自动增材制造技术用于热锻曲轴模具的修复,并且添加了锤击消应力,提高了模具的服役寿命,降低了模具修复的成本。

1 自动增材制造系统

电弧熔丝自动增材制造系统包含了软件控制算法和硬件执行机构。其中软件控制算法包含了分层切片算法、截面填充算法和路径机器人代码转化算法等。硬件执行机构有焊接机构和锤击消应力机构等。

1.1 控制算法

如图 1 所示,增材制造常用的模型格式为 STL 格式,按照某一个高度切片后得到一系列截面轮廓层。每个截面轮廓使用截面复合填充算法,即边缘采用轮廓偏移填充,内部采用直线偏移填充就可以得到填充好的截面轮廓。

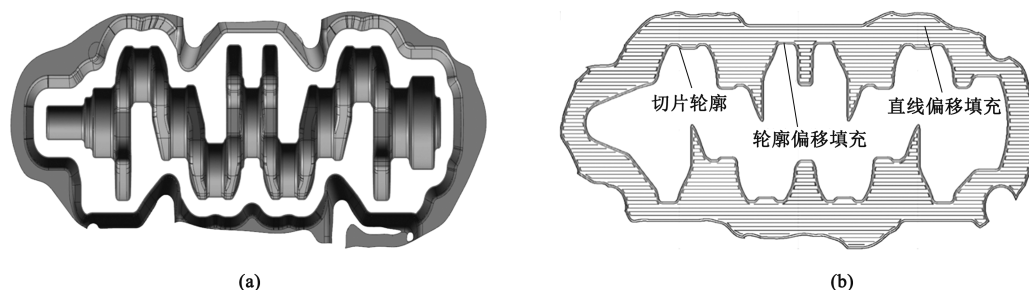


图 1 截面形状 (a) 和填充路径 (b)

Fig. 1 Section shape (a) and filling paths (b)

图 1b 所示的填充轨迹中未断开的轨迹表示一次连续焊接,与常见的 3D 打印不同,焊接填充时要使断弧次数尽量少,否则影响成形质量。锤击轨迹和焊接轨迹相同,以满足锤击中心在焊缝中心,从而达到消除焊接残余拉应力的效果。

1.2 执行装备

电弧熔丝增材制造的执行装备如图 2 所示,整个系统主要包含了焊接系统、锤击系统、焊接台车系统等。焊接和锤击分别有 3 个轴可以移动,利用数控系统实现六轴联动控制。将生成的截面填充轨

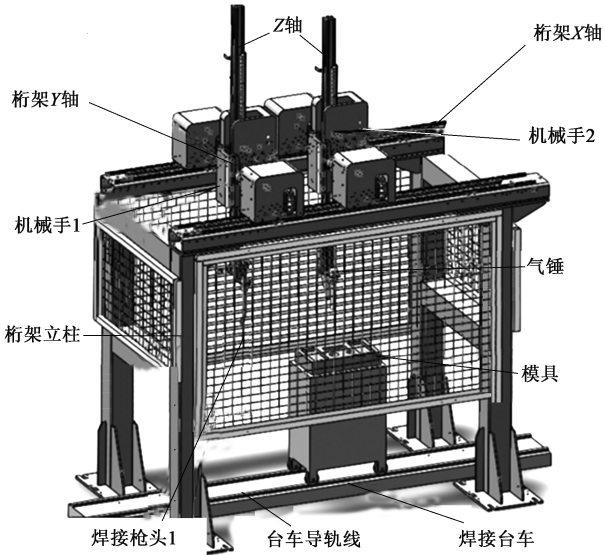


图 2 电弧熔丝增材制造装备
Fig. 2 Arc fuse additive manufacturing equipment

迹数据转化为数控系统能够识别的 G 代码格式，并上传到装备中，装备就能够全自动完成整个热锻模具的再制造。

表 1 焊接工艺参数
Table 1 Welding process parameters

参数	电压/V	电流/A	送丝速度/(mm·min ⁻¹)	焊缝间距/mm	焊接速度/(mm·min ⁻¹)	焊缝宽度/mm	焊缝高度/mm
数值	26	210	6500	4.2	500	8.0	3.1

在一定范围内焊接电压越高，焊缝越宽，焊接飞溅越小；焊接电流越大，熔深越大。系统使用数字自动焊机，因此，焊接电流无需人工调节。数字焊机根据焊接电压和送丝速度自动匹配合适的焊接电流。

在堆焊完成之后，模具上会存在残余压应力和残余拉应力。残余拉应力会在模具服役时促使裂纹的萌生和扩展，从而降低模具的服役寿命；相反残余压应力则可以提高模具的服役寿命。焊接残余应力的产生原因为：当焊缝金属熔化时，焊缝金属膨胀，由于基体的束缚作用，焊缝金属受到压缩，此时熔化金属的塑性好，容易发生塑性变形，压应力得到释放；当焊缝冷却时，焊缝金属收缩，由于基体的束缚作用，焊缝金属受到拉伸力，由于此时金属温度较低，发生塑性变形比较困难，其拉应力无法得到释放，使得拉应力残留于焊缝中，形成残余拉应力。降低焊缝残余拉应力的唯一办法为：焊缝金属冷却时发生塑性变形，释放拉应力；焊缝金属本身由于此时温度较低，无法自行发生塑性变形，

焊接时，锤击系统移动到桁架的一端，避免与焊接轴产生干涉。锤击时，焊接轴移动到桁架的另一端，避免和锤击轴产生干涉。焊接台车的主要功能为运送模具和模具保温。由于焊接时模具基体的温度应保持在 450~550 ℃，因此，焊接台车应具备将模具保温至该温度区间的能力。

2 曲轴锻模增材制造试制

2.1 增材制造工艺

电弧熔丝增材制造中的工艺参数对增材制造质量具有决定性影响。本节讨论增材制造过程中的工艺参数，包含焊接工艺参数和锤击工艺参数。为了精确控制增材制造的精度和减少机械加工量，直径为 $\Phi 1.2\text{ mm}$ 的 RMD248 焊丝被用于焊接。该焊丝对应的最佳工艺参数如表 1 所示。单条焊缝的宽度和高度分别决定了分层切片的层高和直线填充轨迹的间距。考虑到焊接效率、精度和焊接稳定性，分别将直径为 $\Phi 1.2\text{ mm}$ 的焊丝的焊缝宽度和高度调节到 8.0 和 3.1 mm 时较好。

因此，需要外部作用力使其变形。锤击是使其发生塑性变形最简单、高效和快速的方法。

如图 3 所示，锤击前后焊缝的横向残余应力得到了显著的改变，并且焊缝的残余拉应力已被强行改变为残余压应力，其锤击消应力的效果显著。锤击后的最大拉应力反而比未锤击时要大，而压应力数值反而降低，这是由于锤头存在一定的锤击频率并在移动，因此，锤击时焊缝局部区域可能未得到完全锤击，即锤击频率小、移动速度快时，锤头两次锤击的间隔位置可能出现锤击效果不良的现象，因此，这些区域的残余应力可能出现局部轻微畸变。将锤击频率提高并且使移动速度降低可以消除这种畸变现象，并且由于增材制造时为多道焊接多道锤击，也可以消除这些畸变。为了更好地观察焊缝残余应力的变化，对焊缝锤击前后试样的横向、纵向中心区域的残余应力进行测试，测试结果如图 4 所示。

如图 4 所示，焊缝的横向和纵向残余应力在锤击后均全部由原来的残余拉应力改变为残余压应力。经过实验优化，锤击参数如表 2 所示。

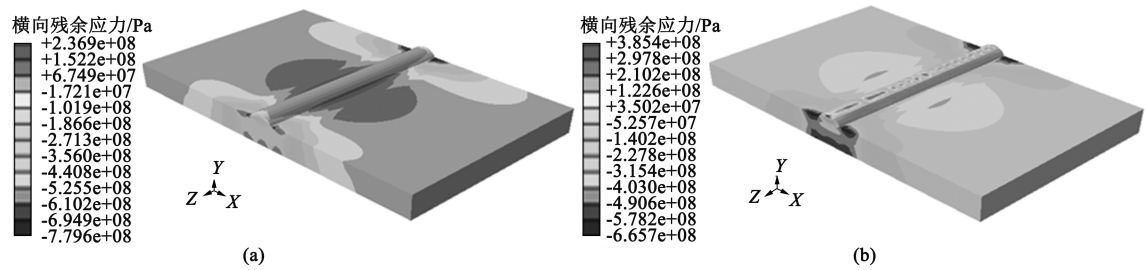


图 3 焊缝锤击前后横向残余应力仿真结果
(a) 锤击前 (b) 锤击后

Fig. 3 Simulation results of transverse residual stress in welding seam before and after hammering
(a) Before hammering (b) After hammering

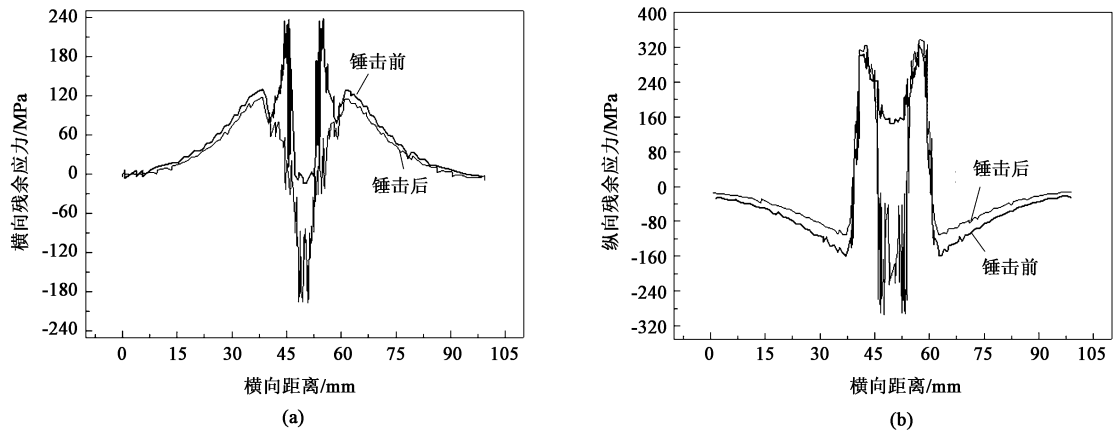


图 4 焊缝横向和纵向残余应力结果
(a) 横向残余应力 (b) 纵向残余应力

Fig. 4 Results of transverse and longitudinal residual stresses for welding seam
(a) Transverse residual stress (b) Longitudinal residual stress

表 2 锤击参数

Table 2 Hammering parameters

参数	气压 P/ MPa	锤击温度 T/℃	锤击速度 V/ (mm · min ⁻¹)	锤头直径 D/ mm
数值	0.5	650	8000	Φ6

其中，锤击压力（气压）可以通过气阀进行调节，锤击温度可通过调节焊接和锤击的间隔时间进行控制，锤击速度可以通过控制移动轴的速度来控制。锤头直径略小于焊缝宽度时，锤击效果较好。

2.2 增材制造流程

电弧熔丝自动增材制造热锻模的全部流程包括碳弧气刨除、3D 扫描、目标模型提取、增材路径规划、焊前预热、自动焊接和锤击、焊后回火、机械加工等。去除裂纹的目的是去除报废模具中的裂纹，使得修复后的模具中不存在裂纹，从而防止服役过程中出现应力集中现象。锻模型腔内部裂

纹的形成与模具的型腔形状、锻造工艺条件以及许多外界不可控因素有关，锻模内部裂纹的形成区域与大小具有一定的随机性。由于裂纹出现的区域、大小具有一定的随机性，所以碳刨量和碳刨区域也不固定；这使得最终碳刨后模具内部型腔具有不固定性。由于碳刨后的模块型腔数据已不可知，因此，需要使用三坐标扫描技术重构碳刨后的模块的内部型腔形状。目标数模提取是利用三坐标扫描获得的碳刨后的模型和标准模型进行比对，从而构建出需要增材部分的三维模型。其中关键部分在于如何精确地对齐两个模型，以及如何选取碳刨区域分解曲线。

轨迹规划软件能够实现给定目标数模自动生成机器所需要的焊接路径、锤击路径、焊接工艺参数等一系列指令文件的功能。最后一步是增材机按照规划软件的指令文件执行自动增材过程。图 5 为逐层增材制造得到的曲轴模具，其型腔内部空出以节省材料。

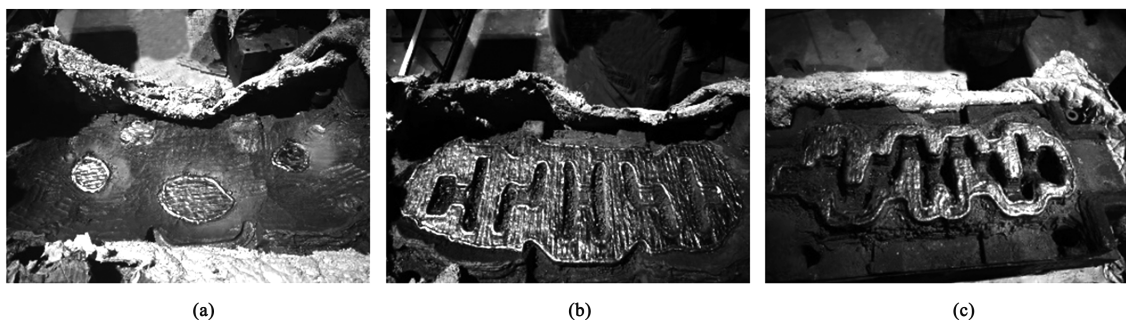


图 5 典型增材层的增材形状

(a) 第 5 层增材形状 (b) 第 18 层增材形状 (c) 第 33 层增材形状

Fig. 5 Additive shapes of typical additive layers

(a) Additive shape on the fifth layer (b) Additive shape on the 18th layer (c) Additive shape on the 33rd layer

如图 6 所示,从修复的锻模外部形貌可知,整套系统能够完成锻模的随形修复,相较于人工满焊节省了宝贵的焊材并提高了焊接效率。修复后的模具达到了预期的效果,验证了整套增材系

统软、硬件的可行性和可靠性,能够满足锻模自动化修复的需求。通过修复效果对比发现,优良的焊接工艺参数组合能够得到成形效果较好的修复锻模。

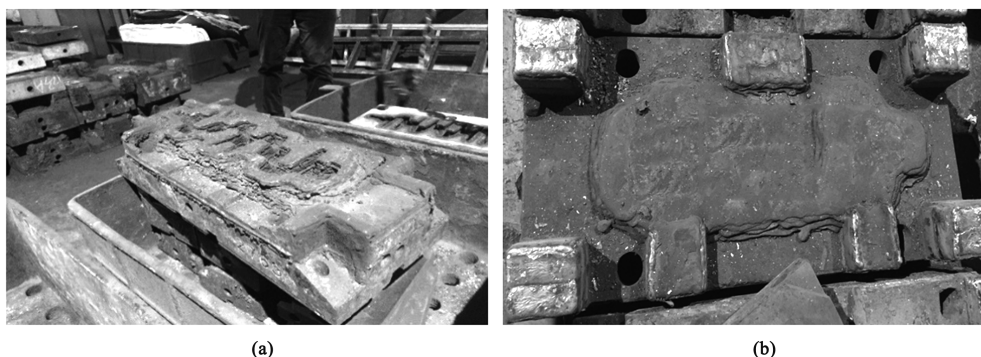


图 6 自动修复模具 (a) 和人工修复模具 (b) 对比

Fig. 6 Comparison of automatic-repaired die (a) and manual-repaired die (b)

3 曲轴锻模服役寿命分析

图 7 为人工满焊修复模具和电弧熔丝增材修复模具同时服役 8000 件时的表面形貌。自动修复模具的表面光滑、呈现出金属光泽,而人工修复的模具表面氧化严重,并且局部区域存在压塌现象。

图 7a 和图 7b 中 B 区域表明,人工修复模具比自动修复模具更容易被压塌。由于人工修复时没有密集锤击,因此,其焊后焊道的柱状晶体未得到有效的破碎。使用同样焊接材料、焊接工艺参数修复的模具,自动修复模具的组织更为致密、晶粒更为细小,其力学性能更优异,抗压塌性能更好。此外,图 7a 和图 7b 中的 A 区域表明,人工修复模具的微裂纹更多。电弧熔丝自动增材制造工艺中的锤击能

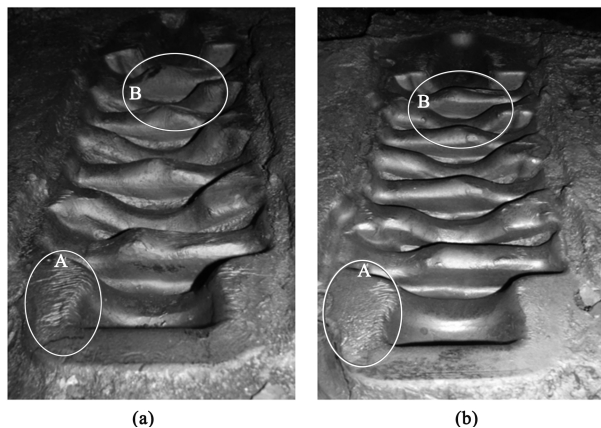


图 7 人工修复模具和自动修复模具服役后的表面形貌对比

(a) 人工修复模具 (b) 自动修复模具

Fig. 7 Comparison of surface morphologies between manual-repaired die and automatic-repaired die after service

(a) Manual-repaired die (b) Automatic-repaired die

够将焊缝的残余拉应力强行矫正为残余压应力,这也能显著提高模具的抗裂性能。

4 结论

(1) 本文提出的电弧熔丝增材制造技术能够对失效模具进行全自动修复,能够实现焊锻复合电弧熔丝自动增材制造工艺。

(2) 采用电弧熔丝自动随形增材制造技术修复热锻模,能够显著节省焊接材料、提高焊接效率、降低模具修复成本。

(3) 焊锻复合增材制造工艺能够显著提高增材模具的服役寿命。由于焊后锤击锻造使得焊缝柱状晶得到破碎和细化,显著提高了增材材料的力学性能,使得增材模具的抗压塌性能显著提高。此外,由于锤击的介入使得焊缝中的残余拉应力被强行矫正为残余压应力,使得增材产品的抗裂性能得到显著提高。

参考文献:

- [1] 吕陶梅,王西建,陶江平. 曲轴模具的堆焊修复工艺研究[J]. 模具工业, 2014, 40 (10): 66-71.
Lyu T M, Wang X J, Tao J P. The surfacing process of die for crankshaft [J]. Die & Mould Industry, 2014, 40 (10): 66-71.
- [2] 孙建丽,高文良. 曲轴模具材料的堆焊性能研究[J]. 铸造技术, 2015, 36 (3): 755-758.
Shun J L, Gao W L. Study on welding performance of crankshaft die materials [J]. Foundry Technology, 2015, 36 (3): 755-758.
- [3] Falk B, Engel U, Geiger M. Estimation of tool life in bulk metal forming based on different failure concepts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 80-81: 602-607.
- [4] Li Q, Wang D F, Wang G Q, et al. Wire and arc additive manufacturing of lightweight metal components in aeronautics and astronautics [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2018, 61 (3): 74-89.
- [5] 杨光,彭晖杰,李长富,等. 电弧增材制造 5356 铝合金的组织与性能研究[J]. 稀有金属, 2020, 44 (3): 249-255.
Yang G, Pen J J, Li C F, et al. Microstructure and mechanical property research on wire+arc additive manufactured 5356-aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44 (3): 249-255.
- [6] 常坤,梁恩泉,张韧,等. 金属材料增材制造及其在民用航空领域的应用研究现状[J]. 材料导报, 2021, 35 (3): 3176-3182.
Chang K, Liang E Q, Zhang R, et al. Status of metal additive manufacturing and its application research in the field of civil aviation [J]. Materials Reports, 2021, 35 (3): 3176-3182.
- [7] Ding D H, Pan Z X, Cuiuri D, et al. Process planning for robotic wire and arc additive manufacturing [A]. 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications [C]. New Zealand, 2015.
- [8] Shassere B, Nycz A, Noakes M W, et al. Correlation of microstructure and mechanical properties of metal big area additive manufacturing [J]. Applied Science-basel, 2019, 9: 1-15
- [9] Evjemo L D, Langlands G, Gravadh J T. Wire arc additive manufacturing by robot manipulator: Towards creating [J]. IFAC, 2019, 52-11: 103-109.
- [10] Lei Y, Ding D H, Pan Z X, et al. Application of multidirectional robotic wire arc additive manufacturing process for the fabrication of complex metallic parts [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16 (1): 454-464.
- [11] Liu F, Liu L. A time optimal trajectory generation method for joint robot workspace [J]. Information Technology and Informatization, 2019, 7: 26-28.
- [12] Adama Diourté, Bugarin F, Bordreuil C, et al. Continuous three-dimensional path planning (CTPP) for complex thin parts with wire arc additive manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2020, 37: 101622.
- [13] 张建生,周杰,肖贵乾,等. 复杂型腔锻模电弧增材再制造分层切片方法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2021, 49 (1): 43-49.
Zhang J S, Zhou J, Xiao G Q, et al. Hierarchy slicing method for wire arc additive remanufacturing process of complex-cavity forging dies [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2021, 49 (1): 43-49.
- [14] 郑华辉,吕俊,余振宇. 内燃机用激光增材制造 Ti600 合金原位拉伸组织演变分析[J]. 锻压技术, 2020, 45 (5): 180-184.
Zheng H H, Lyu J, Yu Z Y. Evolution analysis on in-situ tensile microstructure of Ti600 alloy manufactured by laser additive for internal combustion engine [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (5): 180-184.
- [15] 邵坦,李轶峰,吴强,等. 机器人电弧熔丝增材制造扫描路径生成算法研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48 (5): 220-225.
Shao T, Li Y F, Wu Q, et al. Research on scanning path generation algorithm of robotic arc wire additive manufacturing [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (5): 220-225.
- [16] 方力,侯智文,黄俊润,等. 电弧熔丝增材制造复合填充路径规划算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51 (1): 98-104.
Fang L, Hou Z W, Huang J R, et al. Composite filling path planning algorithm for wire and ARC additive manufacturing [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51 (1): 98-104.