doi: 10. 11933 / j. issn. 1007-9289. 20220301001

磨损失效零件激光增材再制造性神经网络 量化评价方法^{*}

张 琦^{1,2} 张秀芬^{1,2} 蔚 刚³

(1. 内蒙古工业大学机械工程学院 呼和浩特 010051;
2. 内蒙古制造业信息化生产力促进中心 呼和浩特 010051;
3. 内蒙古机电职业技术学院 呼和浩特 010070)

摘要:针对现有激光增材再制造性评价方法主观性强、效率低等不足,提出一种失效数据驱动的磨损失效退役零件增材再制造性神经网络量化评价方法。根据磨损失效退役零件的激光增材再制造修复难易程度与失效模式相关的特点,以修复路径规划可行性、运动轨迹规划可行性、激光熔覆材料选择、再制造时长、再制造经济性为评价指标,构建磨损失效退役零件激光增材再制造性层次评价模型;通过退役零件失效区域的修复路径规划、修复设备运动轨迹模拟和碰撞检测进行修复路径可行性和运动轨迹可行性指标量化,并定义再制造时长、经济性指标的量化公式。以多个同类零件为对象,通过上述量化评价方法构建样本空间,基于神经网络训练获得再制造性神经网络量化评价模型,实现同类零件的快速激光增材再制造性评估。最后,以碎煤机端盘为例对所提方法进行验证,结果表明了该方法的可行性与有效性。根据失效数据与退役零件再制造性之间的映射关系,可实现磨损失效零件增材再制造性的快速量化评价,为其工程应用提供技术支撑。 关键词:激光增材再制造;量化评价;轨迹规划;路径规划;神经网络

Quantitative Evaluation of Wear Failure Part's Remanufacturability for Laser Additive Remanufacturing Based on Neural Network

ZHANG Qi^{1,2} ZHANG Xiufen^{1,2} YU Gang³

(1. College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Inner Mongolia Manufacturing Informatization Productivity Promotion Center, Hohhot 010051, China;

3. Inner Mongolia Vocational College of Mechanical and Electrical Technology, Hohhot 010070, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of high subjectivity and low efficiency of the existing laser additive remanufacturing evaluation methods, a neural network quantitative evaluation method for additive remanufacturability of wear failure retired parts driven by failure data is proposed. According to the relationship between the difficulty of laser additive remanufacturing repair and failure modes, the feasibility of repair path planning, motion trajectory planning, laser cladding parameter selection, remanufacturing time and remanufacturing economy are taken as the evaluation indexes, and the remanufacturability hierarchical evaluation model of wear failure retired parts for laser additive remanufacturing is constructed. Moreover, the repair path planning of the failure area of retired parts, repair equipment trajectory simulation and collision detection are used to quantify the feasibility index of repair path and motion trajectory, and the quantitative formulas of remanufacturing time and economic index are defined. Furthermore, in order to realize the rapid evaluation of laser additive remanufacturability for the same type parts, taking several similar parts as the objects, the sample space is constructed through the above quantitative evaluation method, and the remanufacturability neural network

^{*} 国家自然科学基金 (51965049)、内蒙古自治区关键技术攻关计划 (2021GG0261) 和内蒙古自治区高等学校创新团队发展计划支持 (NMGIRT2213) 资助项目。

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51965049), Key Technology Research Program of Inner Mongolia Autonomous Region (2021GG0261), and Program for Innovative Research Team in Universities of Inner Mongolia Autonomous Region (NMGIRT2213). 20220301 收到初稿, 20220602 收到修改稿

quantitative evaluation model is obtained based on neural network training. Finally, the proposed method is verified by taking a coal crusher end disk as an example, and the results show that the feasibility and effectiveness of this method. According to the mapping relationship between failure data and remanufacturing of retired parts, the rapid quantitative evaluation of additive remanufacturing of worn-out parts is realized, which provides technical support for its engineering application.

Keywords: laser additive remanufacturing; quantification; trajectory planning; route planning; neural network

0 前言

再制造是退役零件剩余价值有效回收重用的重要途径之一。再制造性评价是确保退役零件再制造 质量的重要环节^[1-3]。

再制造性评价一直是学术界的研究热点。任仲 贺等^[4]以技术、经济和环境为评价指标,构建了以 再制造相对加工指数为目标层的可再制造评价模 型;潘尚峰等^[5]基于模拟退火遗传算法和 BP 神经网 络实现了机床基础部件的可再制造性评价; LIU 等^[6]从多工艺路线对零部件的再制造性进行评价; ZHANG 等^[7]基于生命周期评估方法建立了再制造 性评价模型; ZHANG 等^[8]提出了基于模糊扩展分析 层次过程的再制造评估方法。这些方法忽略了失效 特征对于再制造性的影响。工程实践中,退役零件 往往存在磨损、老化、断裂、裂纹等多重失效模式, 不同的失效模式对应的再制造修复方式也不同,因 此,失效特征对再制造性的影响逐渐受到关注。

崔翔等^[9]从失效性、经济性、材料性三个方面进 行退役曲轴的再制造性可拓评价;王金龙等^[10]根据传 统再制造理论建立离心压缩机叶片的损伤临界阈值模 型及其内部损伤和表面损伤的剩余疲劳寿命预测模 型;刘建琴等^[11]研究了失效区域性因素对危险点剩余 裂纹萌生寿命的影响,建立了 TBM 刀盘失效区域性 评价指标模型。王玉琳等^[12]建立特征量与磨损量之间 的映射关系,并以此判断发动机零部件的再制造性。

上述文献从不同角度对退役零件进行评价,但 多为定性评价,评价结果具有主观性。少数采用量 化失效特征为评价指标的方法只适用于某一类零 件,通用性有待增强。

近年来,由于增材再制造可实现损伤零部件的 原位快速修复,具有节材、环保、修复效率高等优 点,已逐渐受到企业界和学术界的关注^[13-14]。然而, 有关增材再制造可行性评价方面的研究较少。 LAHROUR 等^[15]提出了增材再制造技术性评估框 架,但并没有给出具体的实施方法。

国家标准委员会发布的 GB/T 32811—2016 《机械产品再制造性评价技术规范》^[3]中指出废旧产 品及其零部件再制造性评价由定性和定量评价两部 分组成,废旧产品定性评价一般应满足功能性、经济性、市场性、环境性等条件,废旧产品定量评价 包含技术评价参数、经济性评价参数和环境性评价 参数。并未给出废旧零件再制造性评价的具体参数 和流程,但提出应根据实际情况建立合适的再制造 性评价方法体系以保证评价具有个体性。

参考上述标准,从定量角度评价退役零件再制 造性,排除与退役零件量化评价无关的可拆解率、 清洗满足率等评价参数,重点考虑与退役零件定量 评价相关的利润率、加工效率等评价参数,并根据 激光增材再制造的工艺特点进行参数定义。

为此,本文以磨损型退役零件为对象,以量化 的失效特征信息为依据,重点从符合激光增材再制 造工艺特点的经济性、技术可行性、环境性等角度 构建了退役零件激光增材再制造性层次评价模型, 并基于仿真法对再制造指标进行量化,构建同类零 件再制造性神经网络量化评价模型,克服了已有评 价方法的主观性强、效率低等不足。

1 激光增材再制造性层次评价模型

退役零件能否进行再制造的先决条件是判断企业 现有的修复设备能否对其进行再制造修复。再制造工 艺流程主要包括工件检测及预处理、再制造修复、后 处理等。工件检测及预处理的主要任务是清洗零件并 确定退役零件失效区域位置等特征,计算失效量并规 划修复路径,其修复路径对于再制造质量及可行性具 有直接影响,失效程度越大,修复路径越复杂,轨迹 规划越困难,可再制造性越差。再制造修复阶段是最 重要的工艺环节,以激光熔覆为例,主要包括激光熔 覆材料选择、设备运动轨迹编程、工艺参数确定、修 复等,其中,运动轨迹是再制造修复设备沿修复路径 运动时产生的轨迹,修复路径越复杂,运动轨迹越长, 修复时间越长,再制造成本越高,可再制造性越差。 后处理主要对粗糙度和尺寸公差过大部分进行磨削。 为此,提取上述工艺流程中与退役零件再制造性密切 相关的激光熔覆材料选择、修复路径规划可行性、运 动轨迹规划可行性、再制造时长、再制造经济性为评 价指标,构建了激光增材再制造性层次评价模型,具 体如图1所示。



Fig. 1 Laser additive remanufacturability hierarchical quantitative evaluation model

评价指标的影响因子之间相互影响,例如,修复 路径规划的影响因子为失效特征量化和修复路径,其 中,失效特征量化结果为修复路径规划的基础;运动 轨迹规划的影响因子为运动轨迹,根据修复路径确 定;激光熔覆材料选择的影响因子为工艺参数,与激 光熔覆器移动速度ν、熔覆层单层层厚Δd等有关;再 制造时长的影响因子为修复时长和其他时长,并受到 运动轨迹和工艺参数的影响;再制造经济性主要的影 响因子为原材料成本、人工成本和环境成本,受激光 熔覆材料价格、修复时长和其他时长影响。

2 再制造性指标的量化

2.1 修复路径规划可行性

2.1.1 失效特征量化

表面磨损是典型的失效特征形式,退役零件的 磨损位置、磨损量具有随机性,对其进行再制造修 复须要先确定其磨损位置的精确坐标及磨损量大 小,现阶段主要通过 3D 扫描重建法、图像三维重 建法获取退役零件的三维模型,其坐标系为 *O_rx_ry_rz_r*,以全新零件为对标模型,其三维模型的获 取有多种方式,如有其尺寸参数可直接构建其标称 三维模型,如无尺寸参数可通过 3D 扫描重建法、 图像三维重建法获取全新零件的三维模型,设置其 坐标系为 O_nx_ny_nz_n,将两三维模型放入同一空间中, 使其基准面互相对齐,应用三维布尔运算对两个三 维模型求差,则失效区域模型如式(1)所示:

$$N - R = NoutR + (RinN)^{-1}$$
(1)

式中, N 为全新零件三维模型, R 为退役零件三维模型, *NoutR* 为 N 表面在 R 外的部分, (*RinN*)⁻¹ 为 R 表面在 N 内的部分的补集, 表面磨损失效情况下为空集。

退役零件失效区域的失效特征信息集^[16]包含了失 效特征区域的体积、重量、表面积信息,如式(2)所 示。为修复路径规划和再制造经济性判断提供数据。

$$C = \{S_n - S_r, I_{Vn} - I_{Vr}, M_{bn} - M_{br}\}$$
(2)

式中, *S_n*、*I_{Vn}、M_{bn}*分别为全新零件的表面积、体积、 重量的量化信息, *S_r、I_{Vr}、M_{br}*分别为退役零件的表 面积、体积、重量的量化信息。如失效特征信息集 *C*的值为空集或极小值,则认为该退役零件无失效 或失效量极小,可回收重用该退役零件。

对现有增材再制造设备、再制造企业和磨损类 零件再制造修复实例进行分析,表面磨损类零件一 般采用激光熔覆技术进行修复,在退役零件失效特 征信息已知的情况下,激光熔覆的难点之一在于如 何规划退役零件失效区域的修复路径。

2.1.2 失效区域修复路径规划

失效区域的 STL 模型中, 三角形面片顶点坐标

集合为

$$C = \begin{cases} x_{c1} & x_{c2} & \dots & x_{ci} & \dots & x_{cn} \\ y_{c1} & y_{c2} & \dots & y_{ci} & \dots & y_{cn} \\ z_{c1} & z_{c2} & \dots & z_{ci} & \dots & z_{cn} \end{cases}$$
(3)

单个三角形面片顶点坐标集合为

$$F_{i} = \begin{cases} x_{ci} & x_{ci+1} & x_{ci+2} \\ y_{ci} & y_{ci+1} & y_{ci+2} \\ z_{ci} & z_{ci+1} & z_{ci+2} \end{cases}$$
(4)

式中, x_{ci} 、 y_{ci} 、 z_{ci} 为坐标,范围为 $x_{cmin} \leq x_{ci} \leq x_{cmax}$ 、 $y_{cmin} \leq y_{ci} \leq y_{cmax}$ 、 $z_{cmin} \leq z_{ci} \leq z_{cmax}$, x_{cmin} 和 x_{cmin} 为空间中失效区域坐标的最小值和最大值。根据三角形面片的顶点坐标可确定该三角形面片的平面方程式(5)为

$$Ax_c + By_c + Cz_c + D = 0 \tag{5}$$

式中,*A、B、C、D*的值可根据式(4)中的顶点坐标求解。令某一垂直于坐标轴 z 轴的切割平面 *z=d*, 多次等距切割该失效区域,由切割平面与式(5)求解可得失效区域的单层轮廓线方程(6)为

$$\begin{cases} Ax_c + By_c + Cz_c + D = 0\\ z = d \end{cases}$$
(6)

单层轮廓线由每个三角形面片与切割平面相交的线段封闭连接而成,切割平面间的间距Δd 为层 厚,即激光熔覆的单层厚度。轮廓的填充方式有蜂 巢、直线、螺旋、星型等多种方式^[17-18],为了百分 之百地填充失效区域,降低路径复杂度,选择直线 填充方式对轮廓进行填充,线宽 l 即为激光熔覆器 中激光头发射光斑的宽度。由此可获取失效区域修 复路径线段间节点的三维坐标集合如式(7) 所示:

$$G = \begin{cases} x_1 & \dots & x_i & \dots & x_n \\ y_1 & \dots & y_i & \dots & y_n \\ z_1 & \dots & z_i & \dots & z_n \end{cases}$$
(7)

将式(7)中的坐标点依次连接即为失效区域的 修复路径,修复路径的复杂度受失效特征量化信息 影响,再制造修复设备需按照修复路径进行再制造 修复,设备修复时的运动轨迹受修复路径影响。

2.2 修复设备运动轨迹规划

目前,主要的激光增材再制造修复设备包括三种:①人工控制激光熔覆机器,手动寻找磨损部位 进行再制造修复,其原理与堆焊相似,修复效率低、 质量差。②床型自动激光熔覆机器,将车床的刀具 换为激光熔覆喷头,可自动规划修复路径,对简单 轴类零件进行再制造修复。③六轴机械手臂激光熔 覆机器,可自动规划修复路径,修复各种结构不规 则的零件,修复效率高。

以修复路径自动规划为例,其运动轨迹规划是 使激光熔覆器中激光头的运动轨迹与退役零件失效 区域分层切片得到的由式(7)中三维点依次连接形成的修复路径完全拟合。规划步骤如下。

(1)构建机械臂、激光熔覆器模型。根据退役零件的尺寸和所需的修复精度选择合适型号的机械臂和激光熔覆器,并建立对应的三维模型,获取各臂的连杆扭角(*alpha*)、连杆长度(*a*)、关节转角(*theta*)、关节距离(*d*)、偏移(*offset*)信息和尺寸信息。应用标准 D-H 模型^[19]定义并建立各臂和激光熔覆器的 D-H 参数,连接 D-H 参数输出机械臂激光熔覆机器模型。

(2)轨迹点插补。机械臂轨迹规划中插补可分为直线插补和曲线插补,由于失效区域轮廓和填充均有直线段构成,插补方式选择直线插补,式(7)中三维坐标点(*x_i*, *y_i*, *z_i*)、(*x_{i+1}*, *y_{i+1}*, *z_{i+1}*)分别为一次直线插补的起点和终点的三维坐标,插补次数为

$$N = \frac{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}}{v}$$
(8)

式中, v 为激光熔覆器的移动速度。通过改变插补 次数,可增加起终点间的坐标个数,增加机械臂的 移动精度。

(3) 修复碰撞检测。由于激光熔覆修复的修复 对象是基于磨损失效特征的各类退役零件,其失效 区域具有随机性,在修复过程中如机械臂激光熔覆机 器与退役零件发生碰撞则会导致再制造修复失败,使 得该退役零件不可再制造。应尽可能避免修复过程中 的碰撞,将机械臂激光熔覆机器末端,即式(7)姿 态代入机械臂逆运动模型^[20]中,求出八组逆解角度, 并将其代入机械臂正运动学方程^[21],得到机械臂和激 光熔覆器修复时运动空间坐标点集为

$$M = \begin{cases} x_{m1} & \dots & x_{mi} & \dots & x_{mn} \\ y_{m1} & \dots & y_{mi} & \dots & x_{mn} \\ z_{m1} & \dots & z_{mi} & \dots & x_{mn} \end{cases}$$
(9)

退役零件表面空间坐标点集合为

$$R = \begin{cases} x_{r1} & \dots & x_{ri} & \dots & x_{rn} \\ y_{r1} & \dots & y_{ri} & \dots & y_{rn} \\ z_{r1} & \dots & z_{ri} & \dots & z_{rm} \end{cases}$$
(10)

当 *M*∩*R* 为空集时,机械臂激光熔覆机器与障碍物不发生碰撞;当 *M*∩*R* 不为空集时,机械臂激光熔覆机器与障碍物发生碰撞。当碰撞发生时,该退役零件不可再制造,反之,可进行下一步判定。

2.3 激光熔覆材料选择

激光熔覆材料的选择是影响退役零件激光增材再 制造性的关键因素之一,主要影响再制造零件性能、 再制造修复成本和再制造时长等方面。影响再制造性 能主要体现在激光熔覆材料熔覆形成的涂层的硬度、 耐磨性、抗疲劳性、耐高温性等物理特性和熔覆涂层 248

与退役零件表面基体材料的浸润与界面结合性^[22]。影响再制造修复成本主要体现在激光熔覆材料的价格不同。影响再制造时长主要体现在不同激光熔覆材料所适用的激光熔覆器的移动速度v各不相同。

激光熔覆材料主要分为自熔性合金粉末、陶瓷 粉末和复合粉末三类,其中,自熔性合金粉末又分 为 Fe 基、Ni 基和 Co 基^[23]。激光增材再制造主要应 用在矿山机械、模具、铁路、汽车等行业,待修复 退役零件一般为钢制的金属类零件,这类零件与陶 瓷粉末浸润和界面结合性能差,复合粉末靠金属到 陶瓷的过渡涂层提高浸润和界面结合性,技术还不 成熟。自熔性合金粉末与钢制金属零件浸润和界面 结合性能好,已广泛应用于激光增材再制造生产实 践中, 故本文只考虑自熔性合金粉末对退役零件增 材再制造性的影响,自熔性合金粉末特性如表1所 示。表中价格数值越大,代表同等重量下该材料价 格越高。再制造企业可通过表中激光熔覆材料的物 理特性与退役零件修复要求的协同性和价格进行择 优选择,并确定激光熔覆材料适宜的再制造修复速 度,即激光熔覆器移动速度 v。

表1 自熔性合金粉末特性

Table 1	Properties	of self -	melting	alloy powd	er
---------	------------	-----------	---------	------------	----

Category	HRC	Abrasion resistance	Tenacity	Price weight
Fe-30	30-35	High	High	6
Fe-35	36-42	High	High	5
Fe-40	38-45	High	Middle	4
Fe-45	41-46	High	Low	3
Fe-50	50-58	Middle	High	2
Fe-60	>58	High	Low	1
Ni25	20-30	Low	High	9
Ni35	30-35	Low	High	8
Ni60	58-62	High	High	7
Co-01	42-48	High	Low	10
Co-02	42-48	High	Low	11
Co-06	38-46	High	Low	12

2.4 再制造时长判断

再制造企业与退役零件的原生产企业在市场环境 中处于竞争关系,再制造企业的生产效率应大于等于 原生产企业的生产效率。退役零件修复时长*t*a定义为

$$t_{a} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sqrt{(x_{i+1} - x_{i})^{2} + (y_{i+1} - y_{i})^{2} + (z_{i+1} - z_{i})^{2}}}{\nu}$$
(11)

式中, x_i、y_i、z_i为式(7)中的三维坐标, v为激光 熔覆器的移动速度。

退役零件失效区域修复路径中包含激光熔覆路径和非熔覆路径,有效修复时长 t_e可由激光熔覆路径, 定义如下:

$$t_e = \frac{4(I_{\nu_n} - I_{\nu_r})}{\nu \times \pi l^2 \times \Delta d}$$
(12)

式中, Δd 为层厚,l为激光熔覆器中激光头发射光 斑的宽度, I_{Vn} 、 I_{Vr} 分别为全新零件、退役零件体积 的量化信息。

无效修复时长 ti 由非熔覆路径确定, 定义为

$$t_i = t_a - t_e \tag{13}$$

t_i 的整体趋势随失效区域失效量的增加而增加,具体值与失效区域的形状有关,具有随机性。

再制造流程中还包含退役零件清洗、检测、后 处理等步骤,对于不同失效类型的退役零件有固定 的处理方法,处理时间长短和退役零件的失效量存 在耦合关系,即失效特征数量越多,失效程度越大, 耗费的时间越长,定义其他时长为

$$t_o = kt_e \tag{14}$$

式中, *k* 为耦合系数, 数值由再制造企业根据生产 设备水平自行确定。

退役零件增材再制造时长 tc 为

$$t_c = t_a + t_o \tag{15}$$

式中, ta为再制造修复时长, to为其他时长。

全新零件的制造时长根据零件制造方式的不同 而不同,具体计算方法如下。

(1) 对于铸造件,其主要工艺过程^[24]包括金属 熔炼、模型制造、浇注凝固、脱模清理等,模型制 造步骤的存在使得制造周期较长,但模具一旦制造 好便可多次使用,故铸件的制造时长应考虑一批次 铸件生产的总时长除以该批次铸件数量,所得即为 单一铸件制造时长 *t*_z。

(2) 对于机械加工类零件^[25],以车削件为例, 由于车削过程中单一车床只能加工一个零件,故制 造时长为从毛坯件到成品的时间。再制造企业的生 产方式与机械加工零件企业的生产方式类似,单一 机械臂激光熔覆机器一次只能修复一个零件,故制 造时长为单一零件从毛坯件到成品件的时间 *t*_m。

(3) 对于锻造件,其主要的工艺过程^[26]包括:锻 坯下料、锻坯加热、辊锻备坯、模锻成型、切边、冲 孔、中间检验等步骤,单次锻造只形成一个成品零件, 故制造时长为单一零件从毛坯件到成品件的时间 *t_f*。

退役零件可再制造的判断标准为

$$t_c \leq t_z, t_m, t_f \tag{16}$$

式中, t_z 为单一铸件制造时长, t_m 为单一机械加工 类零件制造时长。t_f 为单一锻造件制造时长。由于 技术保密等原因,再制造企业可能难以直接获取全 新零件的制造时长,可将全新零件信息带入具有多 层复杂度的工时定额模型^[27],结合计算机估计全新 零件的制造时长,不满足上述判断式时则判定该退 役零件不可再制造。

2.5 再制造经济性判断

2.5.1 再制造经济可行性准则

成品零件的制造工序越复杂,制造时间越长, 其对应的退役零件的剩余价值越高。退役零件再制 造经济性主要考虑再制造企业的盈利属性,则再制 造经济可行性应满足以下准则

$$P_r + P_c \leq P_n \tag{17}$$

式中, *P*_r 为退役零件的剩余价值,即再制造企业回 收该退役零件的成本; *P*_n 为该退役零件对应的成品 价值,即全新零件的售价; *P*_c 为企业修复该退役零 件的再制造成本。

2.5.2 原材料成本

激光熔覆过程中原材料为各种类型的合金粉末, 金属性能较好,价值较高,原材料成本计算公式为

$$P_{cm} = \frac{\rho_m u_m v \pi l^2 \Delta dt_e}{4\eta_m} \tag{18}$$

式中, ρ_m 为合金粉末材料的密度, u_m 为合金粉末材料的单价, η_m 为合金粉末材料的利用率。

2.5.3 环境成本

环境成本为企业再制造过程中造成的环境污染 治理成本,环境成本受再制造时长影响,再制造时 间越长,对环境的影响越大,环境成本越高,k_s为 环境成本的影响系数,数值由企业根据自身情况进 行赋值,值越大,再制造造成的环境污染越严重。 环境成本计算公式为

$$P_{cs} = k_s t_c \tag{19}$$

2.5.4 人工成本

退役零件的前处理和人员支出为人工成本,人工成本受再制造时长影响,再制造时间越长,人工成本越高,ka为人工成本的影响系数,数值由企业根据自身情况进行赋值,值越高,再制造人员薪酬越高。人工成本计算公式为

$$P_{ca} = k_a t_c \tag{20}$$

2.5.5 再制造成本

退役零件的再制造成本分为原材料成本、环境 成本、人工成本三部分。退役零件的再制造成本计 算式为

$$P_c = t_e \left(\frac{\rho_m u_m v \pi l^2 \Delta d}{4\eta_m} \right) + k_s t_c + k_a t_c \qquad (21)$$

式(21)主要表示再制造成本与再制造时长的 关系,与式(12)、(15)化简整理可得到失效区域 重量和再制造时长与再制造成本的关系式

$$P_{c} = \frac{(M_{bn} - M_{br})\rho_{m}u_{m}}{10\rho_{r}\eta_{m}} + k_{s}t_{c} + k_{a}t_{c} \qquad (22)$$

式中, ρ_r 为退役零件的密度, M_{bn} 、 M_{br} 分别为全新零件、退役零件重量的量化信息。

由式(21)、(22)可计算出退役零件再制造成本, 代入公式(17)即可判断是否满足再制造经济性条件, 满足条件可进行再制造,否则为不可再制造。

3 再制造性神经网络量化评价模型 构建

无效修复时长具有一定的随机性,使得失效区域 重量和再制造时长的关系为非线性关系,且工程实际 中样本量较大,不宜用散点图进行回归分析,为了进 一步增加上述评价方法的评价精度及可拓展性,基于 神经网络挖掘失效特征与再制造性的映射关系。

3.1 样本空间构建

退役零件再制造性评价主要包含失效区域修复 路径规划、修复设备轨迹规划、激光熔覆材料选择、 再制造时长和再制造经济性判断 5 个部分,样本空 间构建流程如图 2 所示。





再制造企业可应用上述方法进行再制造性评价,其评价结果构成样本空间,每个样本反映了该 零件失效区域重量与再制造时长的关系。实践中, 可以通过计算机仿真分析构建样本空间,根据其工 况特点随机生成失效区域,应用上述方法进行多次 评价实验。

3.2 神经网络的训练

使用具有 s 型隐神经元和线性输出神经元的两 层前馈网络 (Fitnet)^[28]对上述失效区域重量和修复 时长的关系进行拟合,输入数据为失效区域重量, 输出数据为再制造时长,将样本空间中的数据分为 训练数据、验证数据、测试数据,按照 70%、15%、 15%的比例进行分配,使用 Levenberg-Marquardt 反 向传播算法(Trainlm)进行多次训练,得到失效区 域重量和再制造时长的关系最优神经网络模型。

3.3 曲线拟合

选取样本空间中失效区域重量数据的最小值和 最大值构成失效区域重量范围,对其进行 n 等分, 得到 n+1 个端点, n 的数值应尽可能大,将端点值 作为输入数据导入到训练好的神经网络模型,得到 与输入值相对应的输出值,将输出值依次连接所得 曲线即为失效区域重量与再制造时长关系曲线。

将输入输出值带入式(22),计算得对应的再制造成本,将再制造成本值依次连接得到失效区域重量和再制造成本的关系曲线。

具体流程如图3所示。



图 3 激光增材再制造性神经网络量化评价模型构建流程

Fig. 3 Flow of remanufacturability evaluation model for laser additive remanufacturing

优化后的退役零件再制造性量化评价模型可通 过再制造时长曲线和经济性曲线对退役零件进行精 确的筛选,快速剔除批量退役零件中不满足再制造 条件的部分,提高退役零件的再制造性评价效率, 对满足条件的退役零件进行精确再制造性量化评价 的同时确定其修复路径,提高了再制造修复效率。

4 案例分析

矿山设备再制造是我国再制造领域的重要组成 部分,有重要的战略和现实意义,为了验证本文所 提退役零件再制造性量化评价方法的有效性,以 PCH0404型环锤碎煤机端盘为例进行验证。PCH型 环锤碎煤机用于破碎各种脆性材料,碎煤机端盘用 于固定碎煤锤,价值较高,是碎煤机的核心零件之 一,制造工艺为锻造,失效形式为表面磨损,主要 磨损位置为后表面及外周,碎煤机端盘实物如图 4a 所示。全新端盘直径 400 mm,厚度 32 mm,重量 为 212 795 N,体积为 2 710.8 cm³,表面积为 3 088.1 cm²,材质为钢,密度为 7.85 g/cm³。全新 端盘三维数字化模型根据其尺寸参数应用 SolidWorks构建(图 4b),退役端盘数字化模型通 过图像三维重建法获得,如图 4c 所示。



(a) Retired end disk physical



(b) New end plate model



(c) Retired end disk model

图 4 碎煤机端盘图

Fig. 4 End disk chart of coal crusher

4.1 碎煤机端盘失效区域修复路径规划

通过对比全新端盘三维模型与退役端盘三维模型,将两三维模型三个基准面对齐,应用式(2)对 两模型进行三维布尔运算,得到端盘失效区域模型 如图 5 所示。



图 5 端盘失效区域模型 Fig. 5 End disk failure area model

端盘背部磨损量为 1 mm,外周磨损为椭圆形, 长轴为 199 mm,短轴为 198 mm,失效区域的重量 为 13 220 N,体积为 168.4 cm³,表面积为 2 999.3 cm²。 将失效区域模型保存为 STL 格式文件后,进行三角 形面片细分,用一个平面多次等距离切割该端盘失 效区域,层高Δ*d*=0.3 mm,端盘失效区域切割后外 部轮廓如图 6 所示。



图 6 端盘失效区域外部轮廓 Fig. 6 External outline of end disk failure area

对该外部轮廓进行填充,填充方式为直线式, 填充率为 100%,线宽 *l* 取值为 1.6 mm,单层填充 图如图 7 所示。



图 7 单层填充图 Fig. 7 Single-layer filling chart

由此便获取失效区域修复路径线段间节点的三 维坐标集合 G。

4.2 修复设备运动轨迹规划

选择 Nachi MC10L-01 型机械臂,并获取各臂 的连杆扭角(*alpha*)连杆长度(*a*)、关节转角(*theta*)、 关节距离(*d*)、偏移(*offset*)信息和尺寸信息,寻 找与机械臂相对应的激光熔覆器的尺寸信息,结合 退役端盘信息和退役端盘失效区域信息构建机械臂 激光熔覆机器修复模型,如图 8 所示。



图 8 机械臂激光熔覆机器修复模型图

Fig. 8 Mechanical arm laser cladding machine repair model chart

对式(9)、(10)求交集,为空集,则机械臂激光 熔覆机器与障碍物不发生碰撞,可进行再制造修复。

4.3 激光熔覆材料选择

碎煤机端盘工作中与煤接触,失效形式为磨损失效,再制造修复后应保证其具有足够的耐磨性,且具有一定的韧性和硬度,在保证上述条件的基础上,从 经济角度出发,从表 1 中选择 Fe-30 型作为激光熔覆 材料,合金粉末材料的密度 ρ_m 为 7.85 g/cm³,单价 u_m 为 40 元/kg,材料的利用率 η_m 取值为 93%,设置激 光熔覆器移动速度 v 为 30 mm/s。

4.4 再制造时长与再制造经济性判断

通过式(11)、(12)计算得修复时长 *t_a*为 12 021 s,有效修复时长 *t_e*为 9 310 s, *k* 值取 0.15,再制造 时长 *t_c*为 13 417.5 s,根据锻造工艺流程,端盘的锻 造时间 *t_f*估值为 86 400 s,满足式(16)中的再制造 时长条件,可进行下一步的再制造经济性判断。

将上述参数和退役端盘失效区域参数带入式(16) 获得原材料成本 P_{cm}为 56.86 元。环境成本的影响 系数 k_s取值为 0.005,人工成本的影响系数 k_a取 值为 0.01,将上述参数带入式(22),计算得该退 役端盘的再制造成本 P_c为 258.12 元,退役端盘 的剩余价值P_r为退役端盘的重量与单价的乘积取 值为 80 元,全新端盘的售价 P_n为 2 000 元,将 上述参数带入式(17)得再制造经济性准则满足 要求,再制造企业对该退役端盘进行再制造可以 盈利。

4.5 再制造性神经网络量化评价模型的构建

为优化再制造评价模型,由于无大量退役端盘 再制造性评价数据,本文根据工况人为随机生成退 役端盘三维模型磨损点,磨损区域为外周和后表面, 应用式(1)对退役端盘三维模型和全新端盘三维模 型进行三维布尔运算,多次实验获得退役端盘的 失效区域信息,如表2所示。将上述失效区域信 息带入再制造性评价模型,计算其修复路径、再 制造时长和再制造经济性,得到再制造性评价参 数,如表3所示。

表 2 端盘失效区域信息表

 Table 2
 End disk failure area information table

After the	Long axis of	Short axis of	W. L. L. 4	X7-1
surface /	outer surface /	outer surface /	weight /	cm ³
mm	mm	mm	14	em
0.25	199.75	199.5	3 336	42.5
0.50	199.50	199.0	6 651	84.7
0.75	199.25	198.5	9 946	126.7
1.00	199.00	198.0	13 220	168.4
1.25	198.75	197.5	16 474	209.9
1.50	198.50	197.0	19 708	251.0
1.75	198.25	196.5	22 922	292.0
2.00	198.00	196.0	26 116	332.7
2.25	197.75	195.5	29 289	373.1
2.50	197.50	195.0	32 443	413.3
2.75	197.25	194.5	35 576	453.2
3.00	197.00	194.0	38 689	492.9
3.25	196.75	193.5	41 783	532.3
3.50	196.50	193.0	44 857	571.4
3.75	196.25	192.5	47 911	610.3
4.00	196.00	192.0	50 945	649.0
4.25	195.50	191.5	53 959	687.4
4.50	195.50	191.0	56 954	725.6
4.75	195.25	190.5	59 929	763.4
5.00	195.00	190.0	62 884	801.1
5.25	194.75	189.5	65 820	838.5
5.50	194.50	189.0	68 737	875.6
5.75	194.25	188.5	71 634	912.5
6.00	194.00	188.0	74 511	949.2
6.25	193.75	187.5	77 370	985.6
6.50	193.50	187.0	80 208	1 021.8
6.75	193.25	186.5	83 028	1 057.7
7.00	193.00	186.0	85 828	1 093.4
7.25	192.75	185.5	88 610	1 128.8
7.50	192.50	185.0	91 372	1 164.0
7.75	192.25	184.5	94 115	1 198.9
8.00	192.00	184.0	96 839	1 233.6
8.25	191.75	183.5	99 544	1 268.1
8.50	191.50	183.0	102 230	1 302.3
8.75	191.25	182.5	104 897	1 336.3
9.00	191.00	182.0	107 545	1 370.0
9.25	190.75	181.5	110 175	1 403.5
9.50	190.50	181.0	112 786	1 436.8
9.75	190.25	180.5	115 378	1 470.0
10.00	190.00	180.0	117 951	1 502.6

表 3 端盘失效区域信息表

 Table 3
 End disk failure area information table

Path point	Additive remanufacturing time / s	Effective repair time/s	Raw material price/ Yuan	Remanufacturing price / Yuan
4 180	5 642	2 350	14	99
4 560	7 908	4 683	29	147
23 014	12 143	7 005	43	225
31 165	13 418	9 311	57	258
34 956	18 684	11 605	71	351
41 996	21 123	13 878	85	402
47 202	25 032	16 145	99	474
55 787	27 618	18 395	112	527
63 557	28 075	20 629	126	547
46 119	29 212	22 851	140	578
71 586	31 924	25 058	153	632
79 686	35 570	27 253	166	700
95 617	38 167	29 431	180	752
123 617	42 287	31 593	193	827
131 689	44 876	33 744	206	879
142 435	47 773	35 883	219	936
159 321	49 654	38 006	232	977
160 175	51 593	40 119	245	1 019
170 658	54 221	42 209	258	1 071
180 019	57 920	44 293	270	1 139
187 031	59 588	46 361	283	1 177
198 641	62 858	48 412	296	1 238
209 581	62 495	50 452	308	1 246
220 177	67 057	52 481	320	1 326
216 531	69 902	54 494	333	1 381
219 605	72 350	56 495	345	1 430
214 201	76 188	58 480	357	1 500
218 079	77 612	60 454	369	1 533
218 963	79 630	62 412	381	1 576
218 617	81 223	64 358	393	1 611
219 640	84 323	66 287	405	1 670
218 867	86 362	68 206	417	1 712
218 918	89 208	70 113	428	1 766
219 090	91 396	72 004	440	1 811
219 004	92 075	73 884	451	1 832
219 161	94 874	75 748	463	1 886
218 951	96 954	77 600	474	1 928
218 797	99 783	79 441	485	1 982
218 910	102 652	81 277	496	2 036
218 947	104 675	83 079	507	2 077

无效修复时长具有随机性,导致再制造时长也 具有随机性,为优化再制造性评价模型,需预测再 制造时长和失效区域重量间的关系,将失效区域重 量作为输入参数,再制造时长作为输出参数,进 行神经网络训练,训练数据、验证数据、测试数 据按照 70%、15%、15%的比例分配,隐含神经 元数量设置为 10 个,进行训练得到训练数据、验 证数据、测试数据的回归值 *R* 均为 0.99,回归值 *R* 是测量输入与输出相关性的参数,其值越接近 1 表示输入与输出密切相关。回归值较高,表明 该模型可用于再制造时长和失效区域重量的关系 预测。将失效区域重量与再制造时长的关系拟合 成曲线,如图9所示。





Fig. 9 Remanufacturing time curve of retired end disks

图 9 中曲线为失效区域重量和再制造时长的关 系曲线,失效区域重量越高,再制造时长越长,且 再制造时长呈随机分布关系,锻造线为该型端盘成 品零件的制造时长,可根据此图快速判断退役端盘 是否满足再制造时长条件。曲线不过零点,这是神 经网络样本空间输入的失效区域重量的最小值为 3 336 N 导致的,增加输入输出数据可改善该情况。

将一失效重量为 95 kN 的退役端盘导入图 9 曲 线中,得出的再制造时长为 84 607 s,通过仿真法 进行计算,得到的再制造时长为 84 234 s,计算值 与预测值仅相差 373 s,精确度为 99.6%。

获取再制造时长与失效区域重量曲线后,可根据式(20)构建失效区域重量与再制造成本之间的 再制造经济性曲线,如图10所示。





由图 10 可知,根据失效区域重量即可得出再制造成本,成品零件售价线为该型端盘成品零件的售价,由于退役端盘的剩余价值具有随机性,还需将再制造成本代入式(17)进行判断,如果满足条件,进行运动轨迹规划,通过碰撞检测后可对该退役端盘进行再制造,反之,进行报废处理。

5 结论

(1)由再制造工艺过程提取评价指标,构建了 磨损失效退役零件激光增材再制造性层次评价模型,克服了已有模型指标确定主观性强的不足。

(2)实现了基于失效数据到激光增材再制造性 评价指标的量化映射,克服了已有方法评价指标量 化困难的不足。

(3)提出了激光增材再制造性神经网络量化评价方法,获得了再制造时长、再制造成本与失效区域重量的函数关系,为同类零件激光增材再制造性评价的快速实施提供了依据。

参考文献

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

- [2] 王庆锋,高金吉,李中,等. 机电设备在役再制造工程 理论研究及应用[J]. 机械工程学报, 2018, 54(22): 1-7.
 WANG Qingfeng, GAO Jinji, LI Zhong, et al. Research and application of electromechanical equipment remanufacuring engineering[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(22): 1-7. (in Chinese).
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会。机械产品再制造性评价技术规范: GB/T 32811—2016[S].北京:国家市场监督管理总局, 2016.

General Administration of Quality Suppervision, Inspection and Quarantine of the people's Republic of China, Sfandardization Administration of China. Technical specification for remanufacturing evaluation of mechanical products: GB / T 32811—2016[S]. Beijing: State Administration for Market Regulation, 2016. (in Chinese)

[4] 任仲贺,武美萍,龚玉玲,等. 机械零部件可再制造性
 评价模型研究与应用[J]. 机械科学与技术,2019,38(2):
 244-252.

REN Zhonghe, WU Meiping, GONG Yuling, et al. Research and application of remanufacturability evaluation method for mechanical parts[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(2): 244-252. (in Chinese) [5] 潘尚峰, 卢超, 彭一波. 基于改进 BP 神经网络的机床 基础部件可再制造性评价模型[J]. 中国机械工程, 2016, 27(20): 2743-2748.

PAN Shangfeng, LU Chao, PENG Yibo. Evaluation model for machine tool basic parts remanufacturability based on optimized BP neural network[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(20): 2743-2748. (in Chinese)

- [6] LIU Q T, SHANG Z Y, DING K, et al. Multi-process routes based remanufacturability assessment and asso-iated application on production decision[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 240(Dec.10): 118114.1-118114.15.
- [7] ZHANG X G, ZHANG M Y, ZHANG H, et al. A review on energy, environment and economic assessment in remanufacturing based on life cycle assessment method[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 255(2-3): 120160.
- [8] ZHANG X G, WANG Y L, XIANG Q, et al. Remanufacturability evaluation method and application for used engineering machinery parts based on fuzzy-EAHP[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2020, 57: 133-147.
- [9] 崔翔,张秀芬. 退役曲轴再制造性可拓评价模型与方法[J]. 机床与液压, 2021, 49(1): 69-74.
 CUI Xiang, ZHANG Xiufen. Extension evaluation model and method for remanufacturability of retired crankshaft[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(1): 69-74. (in Chinese)
- [10] 王金龙,张元良,赵清晨,等. 再制造毛坯疲劳损伤临 界阈值及可再制造性判断研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 41-49.

WANG Jinlong, ZHANG Yuanliang, ZHAO Qingchen, et al. Study of fatigue defect critical threshold of remanufacturing cores and Judgment of Remanufacturability based on fatigue defect [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(5): 41-49. (in Chinese)

[11] 刘建琴,贾玄彬,郭伟,等.基于裂纹萌生的TBM刀 盘地质匹配及失效研究[J].天津大学学报(自然科学与 工程技术版),2017,50(11):1148-1153.

LIU Jianqin, JIA Xuanbin, GUO Wei, et al. Research on TBM cutter-head geological matching and failure based on crack initiation[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2017, 50(11): 1148-1153. (in Chinese)

[12] 王玉琳,胡锦强,柯庆镝,等.基于轴心轨迹特征的发动机曲轴再制造性分析方法[J].中国机械工程,2017, 28(13): 1601-1607. WANG Yulin, HU Jinqiang, KE Qingshang, et al.Remanufacturability analysis method for engine crankshafts based on shaft center trajectory[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(13): 1601-1607. (in Chinese)

- [13] AZIZ N A, ADNAN N, WAHAB D A, et al. Component design optimisation based on artificial intelligence in support of additive manufacturing repair and restoration: Current status and future outlook for remanufacturing[J]. Journal of Cleaner Production, 2021(3): 126401.
- [14] GUO C, LV N, YUE H, et al. Laser additive remanufacturing parameters optimization and experimental study of heavy-duty sprocket, 2021, 118(11-12): 3789-3800.
- [15] LAHROUR Y, BRISSAUD D. A technical assessment of product / component remanufacturability for additive remanufacturing[J]. Procedia Cirp, 2018, 69: 142-147.
- [16] 张琦,张秀芬,蔚刚.基于图像三维重建的退役零件表面失效特征表征方法[J].中国表面工程,2021,34(3): 149-158.

ZHANG Qi, ZHANG Xiufen YU Gang. Study of the surface failure characterization for the retired parts based on image 3D reconstruction [J]. China Surface Engineering, 2021, 34(3): 149-158. (in Chinese)

- [17] 任利民,戴宁,程筱胜,等. 点阵结构填充模型的边界 强化设计方法[J]. 中国机械工程,2021,32(5):594-599.
 REN Limin, DAI Ning, CHENG Xiaosheng, et al.Methodoof boundary strengthening design for lattice structure filling model[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(5): 594-599. (in Chinese)
- [18] 翟晓雅,陈发来. 分形模型的 3D 打印路径规划[J].计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(6): 1123-1135.
 ZHAI Xiaoya, CHEN Falai. 3D printing path planning of fractal models[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2018, 30(6): 1123-1135. (in Chinese)
- [19] LIU Y, ZHANG H G, WANG Y C, et al. Fixed-time cooperative control for robotic manipulators with motion constraints using unified transformati-on function[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2021, 31(14): 6826-6844.
- [20] ZOU Qi, ZHANG Dan, ZHANG Shou, et al. Kinematic and dynamic analysis of a 3-DOF parallel mechanism[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2021, 17(3): 587-599.
- [21] 阳雨妍, 宋爱国, 沈书馨, 等. 基于 CNN-GRU 的遥操 作机器人操作者识别与自适应速度控制方法[J]. 仪器

仪表学报, 2021, 42(3): 123-131.

YANG Yuyan, SONG Aiguo, SHEN Shuxin, et al. Operator recognition and adaptive speed control method of teleoperation robot based on CNN-GRU [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3): 123-131. (in Chinese)

- [22] 张津超,石世宏,龚燕琪,等.激光熔覆技术研究进展[J].表面技术,2020,49(10):1-11.
 ZHANG Jinchao, SHI Shihong, GONG Yanqi, et al. Research progress of laser cladding technology[J].
 Surface Technology, 2020, 49(10):1-11. (in Chinese)
- [23] 余敏,张鸿羽,曹开,等.激光熔覆在高速列车上的应用研究现状[J].表面技术,2020,49(10):12-20,38.
 YU Min, ZHANG Hongyu, CAO Kai, et al. Application status of laser cladding in high-speed trains[J]. Surface Technology, 2020, 49(10):12-20,38. (in Chinese)
- [24] 李永堂,齐会萍,李秋书,等.基于铸辗复合成形的 42CrMo 钢环坯铸造工艺与试验研究[J]. 机械工程学 报,2013,49(20):49-54.

LI Yongtang, QI Huiping, LI Qiushu, et al. Casting process and experimental research of 42CrMo ring blanks based on cast-rolling forming technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 49-54. (in Chinese)

- [25] 赵林杰,程健,陈明君,等. 熔石英光学元件的 CO₂ 激光加工技术研究新进展[J]. 机械工程学报, 2020, 56(11): 202-218.
 ZHAO Linjie, CHENG Jian, CHEN Mingjun, et al. New progress of CO₂ laser processing techniques for fused silica optics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(11): 202-218. (in Chinese)
- [26] 姚静,王佩,宋英哲,等. 锻造液压机锻件变形量精准 补偿控制研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 277-285.

YAO Jing, WANG Pei, SONG Yingzhe, et al. Forging dimension accurate-exact control of forging hydraulic press[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(10): 277-285. (in Chinese)

[27] 叶正梗,蔡志强,周福礼.基于多层次复杂度的工时定额综合研究[J]. 计算机集成制造系统,2019,25(3): 556-565.

YE Zhenggeng, CAI Zhiqiang, ZHOU Fuli. Comprehensive study on man hour estimaton based on multilevelcomplexity[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(3): 556-565. (in Chinese)

[28] 王贲武,黄峰.基于深度网络跨层特征融合的氩弧焊点

分类[J / OL]. 计算机集成制造系统: 1-17[2021-08-14]. http://kns.cnki.net / kcms / detail / 11.5946.TP.20210804. 1632. 002.html.

WANG Benwu, HUANG Feng. Argon arc welding spot slassification method based on deep network cross-layer feature fusion[J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems: 1-17[2021-08-14]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11. 5946.TP.20210804.1632.002.html. (in Chinese)

作者简介: 张琦, 男, 1996 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为机 械设计、再制造。 E-mail: 1254824421@qq.com 张秀芬(通信作者), 女, 1981 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。 主要研究方向为产品绿色设计、再制造。 E-mail: xxff_6188@163.com

(上接第243页)

- [35] CUI G, HAN B, ZHAO J B, et al. Microstructure and tribological performance of sulfurizing layer prepared on the laser cladding Co-based alloy coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 331: 27-34.
- [36] 李建. NiCrW 基高温合金自润滑复合材料的制备及摩 擦学性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.

LI Jian. Preparation and tribological properties of

NiCrW-based superalloy self-lubricating composites[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020. (in Chinese)

作者简介: 王权, 男, 1997 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为材 料表面工程与摩擦学。

E-mail: wq512075320@foxmail.com

刘秀波(通信作者),男,1968年出生,博士,教授、博士研究生导师。 主要研究方向为材料表面工程与摩擦学、激光加工。 E-mail: liuxiubosz@163.com