DOI: 10.3901/JME.2021.15.211

考虑层间停光的废旧机械零件多区域多层激光熔覆路径规划^{*}

王蕾 周楚建 张泽琳 刘翔 张欢 夏绪辉
(武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室 武汉 430081)

摘要: 激光熔覆是实现废旧机械产品广义生长的关键技术之一。层间停光时间对激光熔覆后产品组织特性和力学性能有重要影响。在分析熔覆层整体硬度与层间停光时间和熔覆层数关系的基础上,建立最高熔覆区域硬度条件下最佳层间停光时间与熔覆层数的数学模型。综合考虑最佳层间停光时间和激光逐层扫描路径,制定熔覆头空行程移动路径挑选规则,建立多区域多层激光熔覆路径规划模型。提出一种改进蚁群算法对模型寻优求解,采用多层整数编码方式,克服不同区域不同熔覆层编码混乱的问题;提出路径选择策略并引入激励函数,避免算法在运算初期出现局部最优现象;改进信息素分配机制,以提高运算收敛速度和准确性。通过方案的对比仿真,验证模型的正确性;将改进算法与传统算法寻优结果进行对比,验证改进算法的有效性和优越性。

关键词: 再制造; 激光熔覆; 层间停光时间; 路径规划; 改进蚁群算法

中图分类号: TG156, TH16

Multi-zone and Multi-layer Laser Cladding Path Planning for Scrapping Mechanical Parts Considering Interlaminar Time Interval

WANG Lei ZHOU Chujian ZHANG Zelin LIU Xiang ZHANG Huan XIA Xuhui
(Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract: Laser cladding is one of the key technologies to realize the generalized growth of scrapping machinery products. Time interval on multilayer laser cladding greatly affects the microstructure and mechanical properties of the laser cladding products. A correlation mathematical model of the optimal time interval and the number of cladding layers under the highest hardness of the cladding area is established based on the relationship between overall hardness of the cladding layer, time interval on multilayer laser cladding and the number of cladding layers. With a consideration of the optimal time interval and layer by layer scanning path, the selection rules for the empty travel path of the cladding head is formulated and a multi-zone and multi-layer laser cladding path planning model is established. An improved ant colony algorithm for model optimization is proposed. A multi-layer integer coding is adopted to overcome the problem of coding confusion between different cladding layers and different zones. The rule of path selection is made and the incentive function is introduced to avoid the local optimization in the initial stage of the algorithm, and the pheromone allocation mechanism is improved to optimize convergence speed and accuracy. Simulation test verify the correctness of the model and comparison of algorithm results verify the effectiveness and superiority of the improved algorithm.

Key words: remanufacturing; laser cladding; time interval on multilayer laser cladding; path planning; improved ant colony algorithm

^{*} 湖北省重点研发计划(2020BAB047); 国家自然科学基金(51805385); 襄阳市重点研发计划(2020AAT001420)资助项目。20200902 收到初稿, 20201215 收到修改稿

0 前言

我国废旧机械产品量大面广,其零部件广义生长是资源充分利用的重要方式^[1-2]。激光熔覆是其广义生长的关键工艺技术,在尺寸修复再制造、降级再制造等多种生长方式中具有广阔的应用前景^[3]。相比于常规的表面涂层工艺,激光熔覆在能量密度、热影响区、加工精度及加工灵活性等方面独具特性^[4]。因此,激光熔覆近年备受学界和工业界关注,并取得了丰富的研究成果,如:对激光功率调节^[5]、扫描速度调整^[6]、不同光斑尺寸设置^[7]、搭接率确定^[8]和送粉速度调整^[9]等激光熔覆工艺参数选择,以及多种工艺参数组合优化^[10-11]等方面进行了大量研究,提高了熔覆效果。试验研究表明,在多层激光熔覆过程中,层间停光时间对基体成形质量具有影响,较长的层间停光时间可以提高熔覆层的整体硬度,且熔覆层数越多优势越明显^[12];熔覆层的平均硬度随层间停光时间的增加而增加,且当层间停光时间足够长时,各层之间的硬度分布也会发生变化^[13]。同时,废旧机械产品零部件具有损伤程度不同、位置随机、数量不定等特点^[14],具有多区域同时熔覆加工的需求,考虑每个区域的熔覆工艺并合理的规划路径可以提高工作效率,降低生产成本。

针对激光熔覆路径规划的研究,主要集中在扫描路径方面。为了挑选出合适的扫描路径,张德强等^[15]分别测试了四种不同扫描路径,并观察他们在熔覆成形之后的显微硬度和洛氏硬度;ENOCH等^[16]提出了一种扫描路径梯度策略,以提高在多层熔覆时合金残余应力大和疲劳寿命短的问题;为了降低熔覆成形后的残余应力,CHEN等^[17]提出了一种基于水平集的扫描路径优化方法,并且采用一种自适应水平集调整策略,以弥补灵敏度不足的缺点。上述研究主要以单熔覆区域为对象,通过优化扫描路径提高熔覆层质量,而为了提高工艺效率和熔覆整体质量,需要对多区域激光熔覆路径规划进行研究。

针对多区域路激光熔覆径规划,仅有少部分学者对此进行了研究,马国帅等^[18]将多区域激光熔覆路径规划问题分为访问次序的选择和两加工位置无碰撞路径的规划两个子问题,从而简化了模型并采用混合指标作为依据使机械臂得到了最优的运动轨迹。在计算机和机器人领域,针对多区

域路径规划方面的方法已研究的比较成熟,其中蚁群算法、遗传算法、粒子群算法等均是解决多区域路径规划的有效方法,WANG等^[19]针对蚁群算法存在稳定性不足、收敛过早、求解复杂概率较难等问题,应用遗传算法配置参数的思想,提出了一种改进蚁群算法,减小了运算寻优时产生的波动,增强了算法本身的稳定性;DAS等^[20]针对多机器人在杂乱环境下移动混乱问题,提出了一种混合改进粒子群算法,在IPSO中加入一个从差分进化继承的矢量微分算子来调整机器人的速度,提高了算法的准确性;JIAO等^[21]提出了一种自适应多态蚁群算法以解决传统算法在运算寻优时易陷入局部最优的缺点,采用自适应状态转移策略和自适应信息更新策略,保证了在迭代时每条路径上信息素浓度以及保留了全局搜索时的随机性。但上述方法并未考虑到路径点可能需要多次访问的情况,在解决多个区域之间往复移动的问题上尚有欠缺。

因此,本文针对多损伤区域废旧零部件激光熔覆问题,在分析熔覆区域整体硬度最高时最佳层间停光时间与熔覆层关系的基础上,以层间停光时间为路径选择约束,以熔覆作业总时间最少为优化目标,建立多区域多层激光熔覆路径规划模型,采用改进蚁群算法(Improved ant colony algorithm, IACA)对模型寻优求解,通过案例分析验证模型的可行性和算法的有效性。

1 多层激光熔覆的层间停光分析

1.1 停光时间对硬度的影响

再制造产品在熔覆过程中对材料的选择和工艺参数的设定有较高的要求,它影响到再制造件熔覆成形之后的组织特性以及物理性能。多层熔覆时,熔覆层数以及层间停光时间关系到熔覆层金相组织的形成过程,均会导致熔覆区域整体硬度发生变化。采用由5轴数控机床控制的CO₂激光器对某同一材质的合金钢在熔覆总层数不同的情况下采用不同层间停光时间进行多组激光熔覆试验,激光功率 $P=2\ 000\ \text{W}$,激光扫描速度 $v_s=3\ \text{mm/s}$,光斑半径 $r=4\ \text{mm}$,同步送粉速率为 $v_f=13\ \text{g/min}$,搭接率 $\eta=25\%$,单层熔覆高度 $h=0.5\ \text{mm}$ 。并采用数字显微硬度计测量该合金钢的每一层沿层厚方向的硬度上的平均硬度以及整体硬度,其结果如表1所示。

表 1 某合金钢各层的平均硬度及整体硬度

停光时间 /s	熔覆总 层数	各熔覆层硬度/HV					整体硬 度/HV
		第一层	第二层	第三层	第四层	第五层	
1	1	462					462
	2	440	410				425
	3	410	400	390			400
	4	360	350	340	330		345
	5	310	290	270	250	230	270
5	1	462					462
	2	445	415				430
	3	417	410	403			410
	4	380	370	364	338		363
	5	328	310	300	290	272	300
10	1	462					462
	2	447	417				432
	3	424	415	406			415
	4	388	378	372	346		371
	5	343	325	315	305	287	315
20	1	462					461
	2	448	424				436
	3	430	420	410			420
	4	390	380	370	360		375
	5	353	337	327	318	290	325
50	1	463					463
	2	448	431				439.5
	3	433	426	412			423.67
	4	414	391	376	352		383.25
	5	362	352	345	321	312	340
80	1	463					463
	2	450	432				441
	3	435	424	413			424
	4	410	395	385	370		390
	5	360	355	350	345	340	350
120	1	461					461
	2	444	444				444
	3	425	425	425			425
	4	415	415	415	415		415
	5	380	380	380	380	380	380
150	1	462					462
	2	435	460				447.5
	3	396	431	458			428.33
	4	374	412	435	463		421
	5	360	383	410	437	460	410
180	1	462					462
	2	427	459				443
	3	404	443	465			437.33
	4	382	418	440	462		425.5
	5	375	400	420	442	463	415
210	1	462					462
	2	427	459				443
	3	404	443	465			437.33
	4	382	418	440	462		425.5
	5	375	400	420	442	463	420
240	1	462					462
	2	427	459				443
	3	404	444	466			438
	4	382	418	440	462		425.5
	5	375	400	420	442	463	420

根据表 1 测量的结果可以发现熔覆区域的整体

硬度随着层间停光时间的增加而增加，随着熔覆层数的增加而减小，并且随着层数的增加，层间停光时间对整体硬度的影响趋于明显，其变化趋势如图 1 所示。

图 1 区域整体硬度随层间停光时间和层数的变化趋势

1.2 停光时间与熔覆层数的关系

层间停光时间对熔覆区域整体硬度的影响表现为，在多层熔覆时，后一熔覆层($k+1$ 层)在熔覆时会导致前一熔覆层(k 层)经历重熔—二次淬火—回火反应，硬度也随之发生降低—增加—降低的变化，如图 2a 所示。当层间停光时间较短时， k 层的温度尚未完全冷却，仍有很高的温度。熔覆头以此为基体继续熔覆，导致 k 层的冷却速度和凝固速度大幅度降低，硬度也急速下降。另外 $k+1$ 层在熔覆时会受到来自 k 层的高温回火作用，导致 $k+1$ 层的硬度反而低于 k 层的硬度；而随着层间停光时间的增加， k 层受到 $k+1$ 层的热影响趋于退火，缩短了回火区和重熔区的作用范围，减缓了平均硬度的下降速度，同时基体温度得到冷却， $k+1$ 层不会受到来自 k 层的回火作用，如图 2b 所示。以此类推，每层的平均硬度将会高出很多，因此该区域整体硬度也会相应地提高。

在实际废旧零部件激光熔覆过程中，追求整体高硬度是再制造的目的之一，探寻当熔覆层整体硬度最高时最佳层间停光时间和熔覆层数的关系是必要的。从图 1 中整体硬度分布可以看出，当熔覆层数不同，熔覆区域到达最大整体硬度时的最佳层间停光时间是变化的，将这个变化投影至“熔覆层数—时间”平面上，即可得到熔覆区域整体硬度最高时，最佳层间停光时间与熔覆层数的关系，如图 3 所示。随着熔覆层数的增加，最佳层间停光时间值先增加，随后趋于稳定。

图 2 各层微观硬度变化规律图

图 3 最佳层间停光时间与熔覆层数的关系

图 4 多区域多层激光熔覆示意图

2.2 数学模型

2.2.1 模型假设

多区域多层激光熔覆路径规划问题, 是对熔覆头总作业时间进行优化, 需要考虑每层激光熔覆时间和多个区域间切换移动的时间。结合实际加工情况和本文的研究目的, 给出如下几点假设。

(1) 熔覆头在工作时工艺参数不变且工作状态保持稳定。

(2) 熔覆头激光扫描时和空行程移动时均为匀速运动。

(3) 熔覆区域的三维信息如: 熔覆区域三维尺寸包括区域形状、区域高度、区域面积区域体积等能够由三维扫描系统准确获取。

(4) 由于激光熔覆成形的单层厚度一般不到

2 多区域多层激光熔覆路径规划模型

2.1 问题描述

废旧零部件在预处理后, 通过三维扫描技术可获取零部件及其损伤区域三维模型。废旧零部件上有多个损伤区域, 其大小和深浅不一, 如图 4 所示。三维扫描系统对损伤区域进行三维扫描建模, 获取其位置、大小、形状和深度信息, 熔覆头负责对损伤区域进行多区域多层激光熔覆。

熔覆头主要执行激光扫描和空行程移动两种操作, 扫描过程即为熔覆过程。对于激光扫描操作, 熔覆头到达损伤区域边界, 根据三维扫描系统给出的熔覆方案, 对该区域进行即激光扫描, 该过程熔覆头移动速度较慢。当熔覆头完成该区域的单层激光扫描后, 激光扫描操作结束; 对于空行程移动, 在对某个区域完成激光扫描操作后, 熔覆头在不工作的状态移动至下一个损伤区域的边界, 该过程熔覆头的移动速度较快。

1 mm, 因此, 忽略熔覆头在多区域移动时在垂直方向上的时间变化。

2.2.2 熔覆层数 k 和单层激光扫描时间 t^s

对每个损伤区域进行扫描分析后, 可模拟出熔覆区域三维仿真模型, 如图 5 所示。

图 5 损伤区域三维模型示意

图6 双向直线扫描路径规划图

熔覆层数 k 由具体损伤区域模型的深度以及激光熔覆层的厚度确定，单层激光扫描时间由具体扫描方式确定，即为

$$k = H / h \quad (1)$$

式中， h 为单层高度； H 为损伤区域深度。

激光扫描路径不同，该区域的整体硬度也不相同。在选择扫描路径时，一般选用拐点较少、单道扫描较长的路径，这样可有效减少拐点热量堆积问题，从而提高整体硬度。可选用熔覆效果较好的双向直线扫描方式，对损伤区域进行激光扫描^[15]。根据双向直线扫描的路径分析，熔覆头沿着直线 $L_1, L_2, \dots, L_n$ 箭头方向进行扫描，如图6所示。扫描时间为

$$t^s = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{v_s} = \frac{S}{2r(1-\eta)v_s} \quad (2)$$

式中， S 为当前所需激光扫描的层面积； r 为激光光斑半径； η 为搭接率； v_s 为激光扫描速度。

2.2.3 最佳层间停光时间 t^c

根据图3的曲线变化趋势，在满足熔覆区域整体硬度最大的条件下，最佳层间停光时间随熔覆层数的增加呈非线性增长。根据曲线形状，采用logistics回归模型对曲线进行拟合，得到最佳层间停光时间 t^c 与熔覆层数 k 之间的函数关系。

$$t^c = a - \frac{b}{\exp(k)} \quad (k \geq 2) \quad (3)$$

式中， a 为最佳停光时间的上限值； b 为影响因子；当 $k=1$ 时，不存在层间停光时间。 a 与 b 的取值为熔覆目标预先进行的熔覆实验所拟合的结果。

2.2.4 熔覆头空行程移动时间 t^m

熔覆区域之间的距离 d 决定熔覆头的移动路径以及移动时间，熔覆头在空行程移动应是从上一个区域某层的扫描终点移动至下一个区域某层的扫描起点

$$d_{i(p)j(q)} = \sqrt{(x_{j(q)} - x'_{i(p)})^2 + (y_{j(q)} - y'_{i(p)})^2} \quad (4)$$

$$t_{i(p)j(q)}^m = \frac{d_{i(p)j(q)}}{v_m} \quad (5)$$

式中， $d_{i(p)j(q)}$ 为 i 区域上第 p 层的扫描终点至 j 区域上第 q 层的扫描起点的距离； $x_{j(q)}$ ， $y_{j(q)}$ ， $x'_{i(p)}$ ， $y'_{i(p)}$ 分别为 i 区域第 p 层的扫描起点和 j 区域第 q 层的扫描终点坐标； $t_{i(p)j(q)}^m$ 为熔覆头从 i 区域上第 p 层的扫描终点至 j 区域上第 q 层的扫描起点的时间； v_m 为熔覆头移动的平均速度。

2.2.5 停光等待时间 t^w

熔覆头在对上一个区域熔覆完毕之后存在不能立即对下一个区域进行熔覆的情况，此时是否需要停光等待由是否满足最佳层间停光时间来判定。熔覆头到达下一目标后，若两次访问目标区域的时间间隔超过该区域所需最佳层间停光时间，则可直接进行激光扫描操作；若两次访问目标区域的时间间隔小于该区域所需最佳层间停光时间，则需要就地等待。因此，熔覆头的停光等待时间可计算如下

$$T_{i(p+1)} = t_{ol(1)}^m + t_{1(1)}^s + \dots + t_{s(*)i(p)}^m + t_{i(p)}^w + t_{i(p)}^s + \dots + t_{s(*)i(p+1)}^m + t_{i(p+1)}^w \quad (6)$$

$$\Delta T_{i(p-1)i(p)} = T_{i(p)} - T_{i(p-1)}, p \geq 2 \quad (7)$$

$$t_{i(p)}^w = \begin{cases} t_{i(p-1)}^c - \Delta T_{i(p-1)i(p)} & p \geq 2, \Delta T_{i(p-1)i(p)} < t_{i(p-1)}^c \\ 0 & p \geq 2, \Delta T_{i(p-1)i(p)} \geq t_{i(p-1)}^c \\ 0 & p = 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中， $T_{i(p+1)}$ 为访问 i 区域第 $p+1$ 层之前的累积工作时间； $\Delta T_{i(p-1)i(p)}$ 为连续两次访问 i 区域时的间隔时间； $t_{i(p)}^s$ 为 i 区域第 p 层的扫描时间； $t_{i(p)}^w$ 表示熔覆头在开始扫描 i 区域的第 p 层之前需要停光等待的时间； $t_{i(p-1)}^c$ 为 i 区域第 $p-1$ 层熔覆完成后需要的最佳层间停光时间。

2.2.6 路径规划模型

熔覆头对多损伤区域进行激光熔覆的过程可看作一个TSP问题，要求熔覆头能够以最短的路程经过所有熔覆区域。但比传统TSP问题更复杂的是：熔覆头需要对某些区域进行多次访问，并且两次访问同一个区域的间隔时间要保证熔覆区域在成型后的硬度满足要求。在考虑每个熔覆区域的整体硬度最高的条件下，以最佳层间停光时间为约束，以熔覆总时间最优为目标，建立多区域多层激光熔覆路径规划模型。目标函数为

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^{k_i} \sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^{k_j} (t_{i(p)j(q)}^m \cdot x_{i(p)j(q)}) + \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^{k_i} t_{i(p)}^s + \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^{k_i-1} t_{i(p)}^w \quad (9)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^{k_i} x_{i(p)j(q)} = 1 \quad j \in n, q \in k_j \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^{k_j} x_{i(p)j(q)} = 1 \quad i \in n, p \in k_i \quad (11)$$

$$\sum_{i \in n} \sum_{j \in n} x_{i(p)j(q)} \leq \sum_{i=1}^n k_i + 1 \quad (12)$$

$$0 \leq t_{i(p+1)}^w < t_{i(p)}^c \quad (13)$$

$$\Delta T_{i(p)i(p+1)} > 0 \quad (14)$$

$$\Delta T_{i(p)i(p+1)} \geq t_{i(p)}^c \quad (15)$$

$$t_{i(p)j(q)}^m \geq 0 \quad (16)$$

$$x_{i(p)j(q)} = \begin{cases} 1 & i \text{ 区域的第 } p \text{ 层到 } j \text{ 区域的第 } q \text{ 层} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式(9)为目标函数;式(10),式(11)代表每个熔覆区域中的每层被访问的次数有且只有一次;式(12)表示熔覆头总共访问的次数;式(13)表示停光等待时间的取值范围;式(14)表示熔覆头对某区域熔覆时必须进行逐层扫描;式(15)保证目标区域可以进行激光熔覆;式(16)表示熔覆头可以选择对同一区域连续熔覆。

3 基于改进蚁群算法的模型求解

蚁群算法(Ant colony algorithm, ACA)是一种正反馈群智能优化算法,它在解决路径规划问题上具有并行性、适应性、强鲁棒性等特点,并且拥有较易与其他算法相结合的优点。但是在求解最优路径时,传统蚁群算法(Traditional ant colony algorithm, TACA)在运算初期易出现局部最优解的情况,并且在寻优时的运算效率较低。因此,考虑TACA的优缺点,对其改进以求在给定约束条件下,更快更准的寻出最优路径。

3.1 编码规则

熔覆头在作业过程中,要对每个熔覆区域上的所有熔覆层都访问一次,需要对每个熔覆区域以及

熔覆层数分别进行,因此采用双层整数编码方式进行编码。如图7所示,在每条路径的编码方式中,最后一位数表示层数(k),其他位数表示区域(i)。同时,为了确保熔覆头对熔覆区域的逐层访问,靠后访问的区域的层数应比靠前访问区域的层数大。

图7 双层整数路径编码图

如路径{(11), (21), (31), (12), (32), (13)}的访问次序为:区域1的第1层→区域2的第1层→区域3的第1层→区域1的第2层→区域3的第2层→区域1的第3层。

3.2 路径选择策略

根据废旧零部件上损伤部位损伤程度各不相同的特点,熔覆头在作业过程中需要对某些区域进行多次扫描操作。因此,本文算法在路径寻优的过程中,应考虑到蚂蚁可能会在几个区域之间来回运动的情况。故提出路径选择策略,该算法中蚂蚁在选择移动路径时应遵从如下三个规则(图8)。

规则1:熔覆头依次从距离路径最短的区域中选择满足最佳层间停光时间间隔的区域,或未访问过的区域作为下一目标。

规则2:若无符合条件的区域则熔覆头移动至路径最短的区域上,等待至超过最佳层间停光时间后进行激光扫描操作。

规则3:若仅剩一块区域且有多层未熔覆,则熔覆头在该区域的某层扫描完成后,原地等待至超过最佳层间停光时间,再继续对后一层进行激光扫描操作。

图8 空行程移动路径挑选规则

3.3 激励函数

在作业过程中,熔覆头在移动到下一个路径点过程有可能出现以下三种情况:

(1) 熔覆头正常移动至下一个目标区域进行扫

描操作。

(2) 熔覆头移动至下个区域上等待再进行扫描操作。

(3) 熔覆头不移动, 原地等待再进行扫描操作。

对于以上三种情况, 情况1与情况2是较为符合本模型的规划目标, 而情况3会使熔覆头工作时间大大增加。因此尽量避免情况3出现, 令熔覆头优先选择剩余所需熔覆层数较多的区域。

TACA 在选择下一个目标点的概率是根据每条路径上的信息素含量, 通过启发函数计算得来的。为了使熔覆头更倾向于选择剩余层数较多的区域, 令蚂蚁 k 从 i 点转移到 j 点, 定义激励函数

$$\mu_{ij}^k = n_{j,rest}^x / (n - i) \quad (17)$$

式中, μ_{ij}^k 为激励函数; $n_{j,rest}^x$ 为熔覆头选择下一个目标区域的剩余熔覆层数。

因此, 改进算法的状态转移概率为

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \times [\eta_{ij}(t)]^\beta \times [\mu_{ij}^k]^\gamma}{\sum_{s \in allowed_k} [\tau_{ij}(t)]^\alpha \times [\eta_{ij}(t)]^\beta \times [\mu_{ij}^k]^\gamma} & s \in allowed_k \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

式中, $\tau_{ij}(t)$ 为 i 至 j 的路径上的信息素浓度, α 为信息素因子, $[\tau_{ij}(t)]^\alpha$ 作为分子, 意味着两点之间留下的信息素的数量与 $P_{ij}^k(t)$ 正相关; $\eta_{ij}(t)$ 为启发函数, $\eta_{ij}(t) = 1 / (t_{ij}^m)$, β 为启发因子, $[\eta_{ij}(t)]^\beta$ 作为分母, 意味着两点之间的路径越短, 蚂蚁在寻优时就越有机会选择这条路径。 $allowed_k$ 表示待访问的目标点集合。

3.4 信息素分配机制改进

TACA 会在每代全部蚂蚁遍历完所有路径点之后更新信息素信息, 其中距离越短的路径遗留下的信息素浓度越多, 从而影响到迭代过程中蚁群选择这条路径的概率。随着信息素的不断累积, 后代蚂蚁的寻优路径都将不断收敛, 直至最后收敛成为一条路径, 即为全局最优路径。然而, 路径最短仅仅只考虑了蚂蚁的移动时间, 却没有考虑蚂蚁在目标区域上的停留时间, 导致某些路径距离很短、停留时间很长的路径信息素的数量增多, 对蚁群反而起着误导作用。所以, 信息素的分配机制应与路径的距离无关, 而是与遍历总时间有关系。

同时, 考虑到 TACA 存在寻优效率较低、寻优速度较慢以及易陷入局部最优的缺点。改进的蚁群

算法, 通过增强优质蚂蚁对后代蚁群的影响、降低普通蚂蚁对后代蚁群的影响、消除劣质蚂蚁对后代蚁群的影响等措施, 以提高算法的收敛速度。并且, 将最优秀蚂蚁留下的信息素为标准对其他蚂蚁进行分配, 提高同样也较为优秀蚂蚁的信息素量, 以此避免算法陷入局部最优。具体信息素分配及更新机制如下

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{T_{best}} & \text{耗时处于前30\%的蚂蚁} \\ 0 & \text{耗时处于后30\%的蚂蚁} \\ \frac{1}{3} \cdot \frac{Q}{T_{best}} & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \begin{cases} \sum_{k=1}^{0.7m} \Delta\tau_{ij}^k(t) & \text{耗时在前70\%的蚂蚁} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

式中, $\Delta\tau_{ij}^k$ 为第 k 只蚂蚁在 i 点至 j 点路径上遗留的信息素; $\Delta\tau_{ij}(t)$ 为第 t 次迭代时 i 点至 j 点路径上信息素的总浓度; m 为蚁群数量; T_{best} 为最短时间。

3.5 改进蚁群算法流程

熔覆头需要在多个区域之间来回移动, 以完成对所有区域的每个熔覆层的激光扫描操作, 因此, 在算法选择路径时不仅需要考虑路径最短, 同时还需要遵循路径挑选规则(图8)。具体 IACA 的运算步骤如下所述。

步骤1: 初始化参数, 输入需要熔覆区域的相关信息矩阵, 并对不同区域上的每个熔覆层按照编码规则(图7)进行编码。

步骤2: 在原点布置 m 只蚂蚁, 重置待访问表。

步骤3: 根据状态转移概率(式(18))以及信息素分配机制(式(19)、(20))进行下一个节点的选择。若待访问表为空(规则3), 则记录停光等待时间, 将目前所在节点所处区域的后一节点置入禁忌表。

步骤4: 判断下一目标点是否满足两次访问同一区域的时间间隔大于或等于该层层间停光时间(规则1)。若满足, 则修改禁忌表, 将选择目标点置入禁忌表中, 同时将目标点所在熔覆区域上的所有节点暂时置入临时禁忌表中, 以保证下次挑选时不会挑选到同一区域的目标点; 若不满足, 则先将该点从待访问表中暂时移除, 再返回步骤3重新计算, 直至待访问表为空。

步骤5: 将暂时从待访问表中移除的目标点重新放回, 根据(式(18)、(19)、(20))进行下一个节点的选择(规则2), 记录停光等待时间。

步骤 6: 更新禁忌表和待访问表, 重复步骤(3)~(5), 直至遍历完所有目标点, 求出当代最优路径。
步骤 7: 不断循环步骤(2)~(5), 直至

$iter \geq iter_max$ 时, 停止运算;

步骤 8: 比较每代最优路径, 输出全局最优路径。

图 9 IACA 流程图

4 案例仿真分析

4.1 数据及算法参数设置

本文以上文所提合金钢的激光熔覆工艺为案例, 研究该材料在多区域激光熔覆时的路径规划, 工艺参数分别为: 激光功率 $P=2\ 000\ \text{W}$, 熔覆头激光扫描速度以及空行程移动速度分别为 $v_s=3\ \text{mm/s}$ 和 $v_m=20\ \text{mm/s}$, 光斑半径 $r=4\ \text{mm}$, 搭接率 $\eta=25\%$, 单层熔覆高度 $h=0.5\ \text{mm}$ 。损伤区域的位置和三维尺寸等信息通过三维扫描系统分析得到, 根据式(1)和式(2)分别计算出各个损伤区域的熔覆层数以及各层熔覆时间。这里直接采用表 1 所获取的数据, 经拟合计算可得: $a=230$, $b=394.2$ 。因此该合金钢的最佳层间停光时间与熔覆层数的关系为 $t^c = 230 - \frac{394.2}{\exp(k)}$ ($R^2=0.98$; $RMSE=0.025$) 损伤区域相关信息如表 2 所示。

采用 Matlab 编程软件进行仿真计算, 运算平台配置为 Intel(R) Core(TM) i7-7700HQ CPU@2.80 GHz, 运行内存为 16.0 GB RAM。本文算法的参数设置为: 信息素影响因子 $\alpha=1.1$; 启发式影响因子 $\beta=5$; 激励函数影响因子 $\gamma=2$; 信息素挥发因子 $\rho=0.2$; 每代蚂蚁数量 $m=100$; 最大迭代次数 $iter_max=100$ 。

表 2 损伤区域相关信息

编号	层数	熔覆起点坐标 /mm		熔覆终点坐标 /mm		熔覆时间/s	最佳层间停 光时间/s
		X 坐标	Y 坐标	X 坐标	Y 坐标		
1	1	42	32	73	62	53	210
	2	40	30	75	65	58	
	3	38	27	76	65	63	
2	1	391	468	446	484	62	176
	2	390	467	448	487	65	
3	1	290	238	306	275	57	210
	2	286	235	308	276	59	
	3	284	235	310	278	60	
4	1	176	89	186	130	72	222
	2	173	86	190	133	76	
	3	170	83	193	136	80	
	4	169	81	198	141	83	
5	1	165	272	181	304	62	227
	2	163	270	186	305	70	
	3	160	268	191	306	76	
	4	158	268	193	308	82	
	5	156	264	198	310	85	
6	1	305	135	339	75	76	210
	2	302	131	340	77	82	
	3	301	131	342	78	86	
7	1	345	374	383	336	60	176
	2	345	374	386	338	63	
8	1	46	121	76	136	61	176
	2	42	114	79	141	72	
9	1	77	416	116	448	62	210
	2	77	416	118	450	64	
	3	76	413	119	450	68	
10	1	476	87	490	32	62	227
	2	473	88	493	30	69	
	3	470	93	493	30	75	
	4	468	95	496	28	84	
	5	468	96	496	27	88	

4.2 仿真实验结果与分析

为了验证所提算法和模型的有效性，使用本文算法分别对以下三种不同多区域多层激光熔覆方案求解。

(1) 在不考虑层间停光的情况下，熔覆头的总作业时间，即仅考虑熔覆头空行程移动时间最短，且对每个区域由下至上连续进行激光扫描操作。此时最佳层间停光时间与停光等待时间均等于 0。

(2) 在考虑层间停光的情况下，熔覆头对逐个区域进行激光扫描操作的总作业时间，即仅考虑熔覆头空行程移动时间最短，且对每个区域由下至上间断扫描。此时停光等待时间等于层间停光时间。

(3) 本文模型下的熔覆方案，即考虑层间停光熔覆头在不同区域之间来回进行激光扫描操作的时间，目的是追求停光等待时间最小。

表 3 三种方案结果对比

方案	熔覆时间/s	停光等待时间/s	空行程移动时间/s	作业总时间/s	熔覆时间占比(%)	路径
1	2235	0	168.801 9	2 403.801 9	93	00-11-12-13-81-82-41-42-43-44-51-52-53-54-55-91-92-93-21-22-71-72-31-32-33-61-62-63-101-102-103-104-105-00
2	2235	6734	168.801 9	9 137.801 9	24	
3	2235	0	314.138 1	2 549.138 1	88	00-11-81-51-91-21-71-31-52-92-22-72-32-53-93-82-12-41-61-101-42-62-102-43-63-103-44-54-104-33-55-105-13-00

由表 3 可得，方案 1 的熔覆头作业总时间最少，这是因为熔覆头作业过程中不需要考虑相邻两层的熔覆时间间隔，可以做到连续多层熔覆，熔覆头有效作业时间占比达 93%，但熔覆整体硬度会有所降低；方案 2 虽然考虑了层间停光使得熔覆整体硬度有所提高，但在对损伤区域逐个进行熔覆时浪费了大量时间用于停光等待上，熔覆头的有效作业时间占比仅为 24%；方案 3 在考虑层间停光的前提下，又考虑熔覆头在各个损伤区域之间的来回熔覆，期间大大减少了停光等待时间，熔覆头的有效作业占比为 88%，仅比方案 1 低了 5%，在熔覆整体硬度最高时，有效作业占比比方案 2 高 64%。综合比较三个方案，方案 3 较 1 和 2 更为优越。

另外，为了验证本文所提 IACA 较 TACA 更为优越，以本文模型为研究对象，控制其他参数不变，分别将 IACA 与 TACA 进行仿真运算，如图 10 和图 11 所示。本文算法和 TACA 最终求出的最优路径总时间分别为 2 547.681 1 s 和 2 607.188 4 s，达到最优路径时的迭代次数分别为 53 次和 26 次。本文算法经过多次迭代之后平均时间大幅度下降，而传统算法的平均时间随着反复迭代反而越发增大。可见，本文算法在设置激励函数之后，路径规划结果优于传统算法的结果；在改进信息素的分配制度后，蚁群的全局寻优能力大幅提升。

图 10 两种算法的收敛图

图 11 两种算法的结果图

5 结论

(1) 在分析多层激光熔覆层间停光时间与层数对整体硬度影响的基础上,建立了整体硬度最大时最佳层间停光时间和熔覆层数的关系模型,根据熔覆层数确定当熔覆层整体硬度最高时的最佳停光时间。

(2) 在各熔覆区域整体硬度最高的条件下,以最佳层间停光时间为约束,以熔覆时间最少为目标,建立了多区域多层激光熔覆路径规划模型。

(3) 针对熔覆头多区域往复移动的特点,改进了传统蚁群算法。采用多层整数编码方式,克服了不同区域的不同熔覆层编码混乱的问题;建立路径选择策略引入激励函数,增大了剩余层数较多的熔覆区域的选择概率;改进了信息素分配机制,避免了算法陷入局部最优,提高了收敛速度。

(4) 以某合金钢的激光熔覆工艺为案例,针对多损伤区域多熔覆层的路径规划问题进行了仿真模拟和方案对比分析,结果表明本熔覆路径规划方案提高了作业效率和熔覆区域整体硬度。

参 考 文 献

- [1] WANG Lei, XIA Xuhui, CAO Jianhua, et al. Improved ant colony-genetic algorithm for information transmission path optimization in remanufacturing service system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(6): 96-107.
- [2] 姚巨坤, 朱胜. 再制造升级[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
YAO Jukun, ZHU Sheng. Remanufacturing upgrade[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [3] 舒林森, 王家胜, 白海清, 等. 磨损轴面激光熔覆过程的数值模拟及试验[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9):

217-223.

SHU Linsen, WANG Jiasheng, BAI Haiqing, et al. Numerical and experimental investigation on laser cladding treatment of wear shaft surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(9): 217-223.

- [4] 宋建丽, 李永堂, 邓琦林, 等. 激光熔覆成形技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 29-39.
SONG Jianli, LI Yongtang, DENG Qilin, et al. Research progress of laser cladding forming technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 29-39.
- [5] 许明三, 李剑峰, 李驊登, 等. 激光熔覆粉料和工艺参数对 45 钢基体与熔覆层结合强度的影响研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(9): 209-216.
XU Mingsan, LI Jianfeng, LEE Hwateng, et al. Influence on powders and process parameters on bonding shear strength in laser cladding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(9): 209-216.
- [6] CHEN J L, LI J, SONG R, et al. Effect of the scanning speed on microstructural evolution and wear behaviors of laser cladding NiCrBSi composite coatings[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 72: 86-99.
- [7] YAO Jianhua, ZHANG Jie, WU Guolong, et al. Microstructure and wear resistance of laser cladded composite coatings prepared from pre-alloyed WC-NiCrMo powder with different laser spots[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 101: 520-530.
- [8] XU G, LUO K Y, DAI F Z, et al. Effects of scanning path and overlapping rate on residual stress of 316L stainless steel blade subjected to massive laser shock peening treatment with square spots[J]. Applied Surface Science, 2019, 481: 1053-1063.
- [9] KHAMIDULLIN B A, TSIVILSKIY I V, GORUNOVA I, et al. Modeling of the effect of powder parameters on laser cladding using coaxial nozzle[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 364: 430-443.
- [10] BOURAHIMA F, HELBERT A L, REGE M, et al. Laser cladding of Ni based powder on a Cu-Ni-Al glassmold: influence of the process parameters on bonding quality and coating geometry[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 771: 1018-1028.
- [11] SHI Yan, LI Yunfeng, LIU Jia, et al. Investigation on the parameter optimization and performance of laser cladding a gradient composite coating by a mixed powder of Co50 and Ni/WC on 20CrMnTi low carbon alloy steel[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 99: 256-270.
- [12] 李胜, 曾晓雁, 胡乾午. 多层熔覆对激光熔覆层微观组织和硬度的影响[J]. 金属热处理, 2007, 32(7): 44-47.
LI Sheng, ZENG Xiaoyan, HU Qianwu. Effect of multilayer cladding on microstructure and hardness of

- laser cladding layer[J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32(7): 44-47.
- [13] 张德强, 牛兴林, 李金华, 等. 层间停光时间对多层激光熔覆影响实验研究[J]. 机床与液压, 2015(6): 114-118. ZHANG Deqiang, NIU Xinglin, LI Jinhua, et al. Research on influence of time interval on Q235D multilayer laser cladding[J]. Hydromechatronics Engineering, 2015(6): 114-118.
- [14] KERIN M, PHAM D T. A review of emerging industry 4.0 technologies in remanufacturing[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 237: 117805.
- [15] 张德强, 刘贤德, 张文博, 等. 扫描路径对单层激光熔覆层质量影响的研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(20): 149-152. ZHANG Deqiang, LIU Xiande, ZHANG Wenbo, et al. Study on the influence of scanning path on the quality of laser cladding[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(20): 149-152.
- [16] ENOCH A L, REN Xudong, SAMUEL A G, et al. Effects of scanning path gradient on the residual stress distribution and fatigue life of AA2024-T351 aluminium alloy induced by LSP[J]. Results in Physics, 2019, 13: 102-123.
- [17] CHEN Qian, LIU Jikai, LIANG Xuan, et al. A level-set based continuous scanning path optimization method for reducing residual stress and deformation in metal additive manufacturing[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2020, 360: 112719.
- [18] 马国帅. 大型复杂零部件激光熔覆机械臂路径规划研究[D]. 徐州: 中国矿业大学(江苏), 2019. MA Guoshuai. Research on path planning of laser cladding manipulator for large complex parts[D]. Xuzhou: China University of mining and Technology (Jiangsu), 2019.
- [19] WANG Zhangqi, ZHU Xiaoguang, HAN Qingyao. Mobile robot path planning based on parameter optimization ant colony algorithm[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 2738-2741.
- [20] DAS P K, BEHERA H S, DAS S, et al. A hybrid improved PSO-DV algorithm for multi-robot path planning in a clutter environment[J]. Neurocomputing, 2016, 207: 735-753.
- [21] JIAO Zhuqing, MA Kai, RONG Yiling, et al. A path planning method using adaptive polymorphic ant colony algorithm for smart wheelchairs[J]. Journal of Computational Science, 2018, 25: 50-57.
-
- 作者简介: 王蕾, 女, 1987 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为制造系统工程、再制造服务、逆向供应链服务。
E-mail: wanglei1987@wust.edu.cn
- 周楚建, 男, 1996 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为再制造服务。
E-mail: zhouchujian@vip.qq.com
- 张泽琳(通信作者), 男, 1988 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为制造系统工程、绿色制造技术及装备、智能选矿技术及装备。
E-mail: zhangzelin@wust.edu.cn
- 刘翔, 男, 1983 年出生, 博士研究生, 工程师。主要研究方向为制造系统工程、再制造服务。
E-mail: liuxiang@wust.edu.cn
- 张欢, 女, 1990 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为制造系统工程、材料成形。
E-mail: zhanghuan0217@hotmail.com
- 夏绪辉, 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为制造系统工程、逆向供应链管理、再制造服务。
E-mail: xiaxuhui@wust.edu.cn