

引文格式: 岳玉梅, 韩松, 郭芮秀, 等. 基于 RBFNN-ACO 的铝合金搅拌摩擦搭接焊工艺参数优化[J]. 航空制造技术, 2022, 65(21): 54-61.

YUE Yumei, HAN Song, GUO Ruixiu, et al. Process parameters optimization of aluminum alloy friction stir lap welding by RBFNN-ACO[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(21): 54-61.

基于 RBFNN-ACO 的铝合金搅拌摩擦搭接焊工艺参数优化*

岳玉梅, 韩松, 郭芮秀, 姬书得

(沈阳航空航天大学, 沈阳 110136)

[摘要] 采用尖部半螺纹搅拌针进行 6151 铝合金搅拌摩擦搭接焊试验, 并基于径向基神经网络与蚁群算法相结合的方法优化工艺参数, 达到改善搭接界面结构特征, 进而实现最大化接头承载能力的目的。研究表明, 当转速、焊速和下压量分别为 1504 r/min、207 mm/min 和 0.12 mm 时接头的拉剪载荷最大达 5.06 kN/mm, 比优化前的最大拉剪载荷提高了 6.08%。径向基神经网络与蚁群优化算法相结合的智能方法为优化焊接工艺参数, 进一步提高铝合金搅拌摩擦搭接接头强度提供了一种有效途径。

关键词: 搅拌摩擦搭接焊(FSLW); 尖部半螺纹搅拌针; 径向基神经网络(RBFNN); 蚁群优化算法(ACO); 参数优化
DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.21.054



岳玉梅

教授, 博士, 主要从事搅拌摩擦焊/加工研究。

铝合金是实现结构轻量化的重要金属材料, 在航空航天、轨道交通等领域中广泛应用^[1-2]。采用熔化焊连接铝合金时, 接头易出现热裂

纹与气孔等缺陷, 降低结构件的服役性能^[3-4]。作为一种固相焊工艺, 搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)能有效避免上述缺陷^[5], 且具有高强度、小变形、无污染等优点, 在铝合金连接方面具有巨大优势。其中, 搅拌摩擦搭接焊(Friction stir lap welding, FSLW)适用于连接铝合金搭接结构, 是目前国内外学者的研究热点^[6]。

在 FSLW 过程中, 搭接界面在搅拌针的强搅拌作用下发生迁移, 在前进侧和后退侧分别形成钩状缺陷与冷搭接。钩状缺陷与冷搭接的高度决定了接头的有效搭接厚度(Effective sheet thickness, EST)。EST 是影响 FSLW 接头拉剪性能的关键因素^[7-8]。Liu^[7]和 Aldanondo^[8]等分别研究了 Al-Zn 与 Al-Cu 系高强铝合金 FSLW 工艺, 研究结果均表明其他工艺参数不变的条件下, 钩状

缺陷的高度随转速的增加而提高。Xu 等^[9]指出, 钩状缺陷高度随着焊速的减小呈现先提高后降低的趋势, 冷搭接高度随焊接速度的减小而提高。Li 等^[10]研究表明冷搭接高度随转速的增加呈先提高后降低的趋势。事实上, 焊接工艺参数(焊速、转速等)影响着焊接过程的热输入与材料流动行为, 进而影响钩状缺陷与冷搭接的高度。优化工艺参数可获得钩状缺陷与冷搭接高度较小的接头, 增大接头的 EST, 从而达到提高接头拉剪性能的目的。

响应面法、田口法和正交法等方法常用的优化焊接工艺参数方法^[11-13]。然而, 这些方法在多因素、多层次的 FSLW 工艺条件下难以获得最优的工艺参数组合。神经网络具有较强的适应性、容错能力和自组织能力以及较快的运算速度, 在解决复杂的多维度、非线性问题方面

* 基金项目: 国家自然科学基金(52074184)。

具有优势^[14-15]。文献[16-17]表明,神经网络与智能优化算法相结合可实现FSW焊接工艺参数组合的匹配优化,进而获得高强度的接头。Gupta等^[16]采用了ANN-GA模型预测和优化AA5083-O/AA6063-T6 FSW的焊接工艺参数,最佳工艺参数组合下的接头抗拉强度达到168 MPa。Guo等^[17]采用BP神经网络和GA算法相结合的方法,对不同工艺参数组合下Al-Mg-Si系铝合金FSLW接头的拉剪载荷进行优化,优化后接头拉剪载荷比优化前的最大载荷提高了6.9%。

本文以6151铝合金为研究对象,采用自行设计的尖部半螺纹搅拌针进行不同工艺参数组合下的FSLW试验;利用蚁群算法(Ant colony algorithm, ACO)优化的径向基神经网络(Radial basis function neural network, RBFNN)和多种群蚁群算法(Multi-population ant colony algorithm, M-PACO)协同优化工艺参数组合,以获得高拉剪性能的FSLW接头。

1 试验过程

试验所用材料为轧制态6151铝合金,材料化学成分如表1所示。焊接过程如图1所示,待焊试件尺寸为150 mm×120 mm×2 mm,搭接区域宽度为50 mm。试验前,用砂纸打磨待焊板材表面以去除氧化层。试验使用FSW-3LM-4012宽幅小型搅拌摩擦焊机,焊接方向沿着搭接区域的中心线进行。焊接用的搅拌头形貌结构如图1所示,焊接时搅拌头逆时针转动且倾角为2.5°。转焊比是影响接头力学性能的重要因素^[18],Guo等^[17]在BP-GA优化FSLW工艺参数中的转焊比范围为5~16。由于试验所用铝合金与文献[17]相同,本文适当扩大了文献[17]中的转焊比范围,选取范围为4~16,焊接工艺参数如表2所示。

焊后采用试剂(4 g KMnO₄+2 g H₂O₂+100 mL H₂O)配合25%的HNO₃腐蚀金相样件。使用THV-1MD数显自动转塔显微硬度计测试接头显微硬度,加载载荷为200 g,加载时间为15 s。采用Instron-8801电伺服万能拉伸试验机以前进侧受力的方式进行拉剪测试,拉伸速率为2 mm/min。采用Olympus-GX51光学显微镜观察接头的界面特征和断裂路径。每个工艺参数组合下制备3个拉伸试件,取单位厚度拉剪载荷(表2)的均值表征接头的拉剪性能^[19]。

2 预测和优化

2.1 RBFNN建模与优化

为获得焊接工艺参数与接头性能之间的关系,本文建立以转速、焊速和下压量为输入,拉剪载荷为输出的RBFNN预测模型。同时为提高RBFNN模型的预测精度,采用ACO算法对RBFNN网络参数(测试样本序号、初始输出权值、初始中心扩展速度、中心学习系数、扩展速度学习系数和输出权值学习系数)进行优化。

2.1.1 适应度函数

初始化网络参数,将表2中27组数据导入适应度函数空间,由ACO种群随机抽取3组数据作为测试样本,剩余24组作为训练样本,达到更新训练样本从而优化网络节点参数的目的;其余待优化参数在指定范围(表3)内均由ACO种群指定生成。

将训练样本和测试样本进行数据归一化处理。根据训练样本确定网络模型的输入个数为3,隐含层神经元个数为24,输出个数为1。设置训练次数为5000,均方误差目标值为10⁻³,当网络训练均方误差低于目标值或达到训练次数时,完成网络训练任务。在训练循环中,网络的输出可由式(1)计算。

$$y_i = \sum_{j=1}^h w_{ij} \cdot \exp\left(-\frac{1}{\sigma^2} \|\mathbf{x}_p - C_i\|^2\right) \quad (1)$$

式中, $\mathbf{x}_p = [x_1^p \ x_2^p \ \dots \ x_M^p]^T$ 为第 p 个输入样本, $p=1,2,3,\dots,P$,且 P 为样本总数; $\|\mathbf{x}_p - C_i\|^2$ 为欧氏范数; C_i 为网络隐含层节点的坐标; w_{ij} 为隐含层第 i 个神经元与输出层第 j 个神经元的连接权值, $i=1,2,3,\dots,h$,

表1 6151铝合金化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 6151 aluminum alloy (mass fraction)

Si	Mg	Fe	Cr	Ti	Zn	Cu	Mn	Al
1	0.95	0.51	0.12	0.03	0.06	0.21	0.09	余量

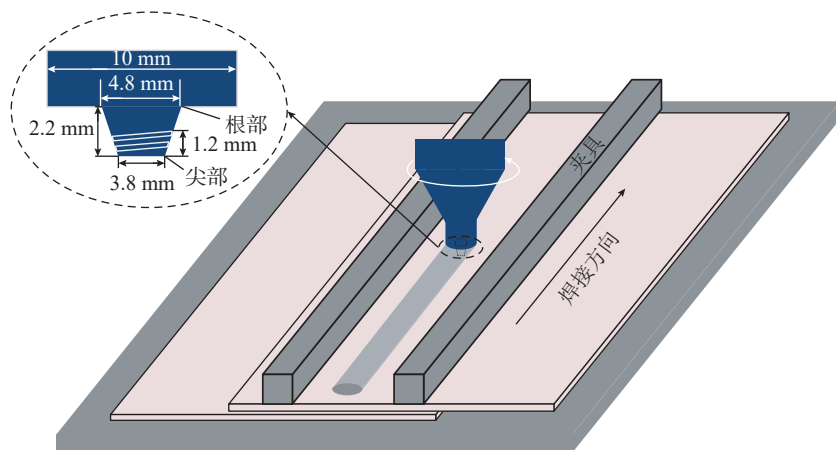


图1 FSLW工艺原理图

Fig.1 Principle diagram of FSLW process

h 为隐含层节点数; y_j 为与输入样本对应网络的第 j 个输出节点的实际输出; σ 为网络的扩展速度。在训练循环中,网络中心、扩展速度和输出权值不断更新,使得网络朝着更高精度的方向逐渐收敛,上述参数可由式(2)计算。

$$\begin{cases} C = x_p + A \cdot (x_p - C_i) \cdot \frac{(x_i - y_i) \cdot y_i}{\sigma^4} \\ \sigma_{(n)} = \sigma_{(n-1)} + B \cdot \|x_p - C_i\|^2 \cdot \frac{(x_i - y_i) \cdot y_i}{\sigma^4} \\ w_{ij(n)} = w_{ij(n-1)} + D \cdot (x_i - y_i) \cdot y_i \end{cases} \quad (2)$$

式中, A 为中心学习系数; n 为训练次数; B 为扩展速度学习系数; D 为输出权值学习系数; x_i 为训练样本的实际输出。训练结束后,对网络的预测性能进行测试;将测试样本中的转速、焊速和下压量导入网络,之后将输出值进行反归一化处理得到预测的拉剪载荷,并计算网络的预测误差。3个预测误差中的最大值作为评价 RBFNN 性能的一项指标。

2.1.2 ACO 算法

根据待优化目标的数值范围生成随机种群并计算该种群的适应度;经过对比,得到最优个体;根据最优个体的位置和当前个体的位置计算个体转移概率;根据不同的转移概率,采用不同的方式进行个体转移。可由式(3)计算蚂蚁转移概率及不同转移方法的个体位置。

$$\begin{cases} P_i = \frac{t_b - t_i}{t_b} \\ k_j = (a + (b - a) \cdot (c - 0.5) \cdot d) \cdot (P_i > P_0) \\ k_j = k_i + (2c - 1) \cdot \frac{1}{e} \quad (P_i < P_0) \end{cases} \quad (3)$$

式中, P_i 为蚂蚁的转移概率; P_0 为设定的转移概率; t_b 为当前种群最佳蚂蚁个体适应度; t_i 为当前蚂蚁个体适应度; k_i 为更新前的蚂蚁个体; k_j 为更新后的蚂蚁个体; a 和 b 为搜索边

表 2 焊接工艺参数样本

Table 2 Samples of welding process parameter

序号	转速 / (r · min ⁻¹)	焊速 / (mm · min ⁻¹)	下压量 /mm	拉剪载荷 / (kN · mm ⁻¹)
1	1200	100	0.05	4.67
2	1200	100	0.1	4.4
3	1200	100	0.15	3.88
4	1200	200	0.05	4.02
5	1200	200	0.1	4.62
6	1200	200	0.15	4.73
7	1200	300	0.05	4.09
8	1200	300	0.1	4.41
9	1200	300	0.15	4.42
10	1400	100	0.05	4.61
11	1400	100	0.1	4.15
12	1400	100	0.15	3.83
13	1400	200	0.05	4.49
14	1400	200	0.1	4.69
15	1400	200	0.15	4.77
16	1400	300	0.05	4.25
17	1400	300	0.1	4.44
18	1400	300	0.15	4.55
19	1600	100	0.05	4.21
20	1600	100	0.1	4.12
21	1600	100	0.15	3.69
22	1600	200	0.05	4.53
23	1600	200	0.1	4.29
24	1600	200	0.15	4.29
25	1600	300	0.05	4.38
26	1600	300	0.1	4.51
27	1600	300	0.15	4.58

表 3 优化参数

Table 3 Optimized parameters

优化参数	搜索边界条件	长度
测试样本序号	1~9	1
初始输出权值	-2~2	24
初始中心扩展速度	-3~3	24
中心学习系数	10 ⁻⁵ ~10 ⁻²	1
扩展速度学习系数	10 ⁻⁵ ~10 ⁻²	1
输出权值学习系数	10 ⁻⁵ ~10 ⁻²	1

界的下界和上界(表 3); c 为一个从 0 到 1 的随机数; d 为常数; e 为当前蚂蚁的移动次数。根据不同优化目标的取值范围和计算原则对这些参数进行调整。种群每转移一次后,重新计算个体的适应度,并与转移前的个体进行对比,优存劣汰,直到转移过程结束得到最佳网络。当种群整体每转移一次后,重新计算种群适应度,可由式(4)计算。

$$t_i(t+1) = Q \cdot F(X) - (1-\rho) \cdot t_i(t) \quad (4)$$

式中, $t_i(t+1)$ 为当蚂蚁 i 移动次数为 $t+1$ 时的个体适应度; Q 为常数, 默认值为 1; $F(X)$ 为当前蚂蚁个体的适应度; ρ 为挥发因子; $t_i(t)$ 为蚂蚁 i 移动次数为 t 时的个体适应度。采用元胞数组对种群变化进行记录, 同时应用保存函数和编号命名程序记录保存神经网络对应运行次数的数据。本网络采用训练均方误差和预测误差综合评价 RBFNN 预测精度。RBFNN 的建立与优化流程如图 2 所示。

随着网络训练的进行, 均方误差逐渐收敛, 并在第 4715 次训练时达到预先设定的精度 6.1×10^{-4} (图 3

(a)), 达到训练条件, 模型构建完成。经过 ACO 算法的优化, RBFNN 的最大相对预测误差达到 0.83% (图 3 (b)), 网络预测精度得到提高。

2.2 参数寻优

为获得更高性能的 FSLW 接头, 本文利用 M-PACO 算法的全局搜索能力结合优化的 RBFNN 进行 FSLW 参数寻优。M-PACO 算法在 ACO 算法的基础上增加了种群数量并应用了两种搜索方案(图 4), 具有更强的全局搜索能力。方案 1 采用区域分块集中搜索策略, 均匀分割转速和焊速的变化区间, 并分别与下压量组成 4 个搜索区域进行区域集中重点搜索; 方案 2 采用整体多种群并行搜索策略, 实现对整个空间的全覆

盖搜索。

首先进行初始化设置, 根据表 4 中各方案的边界条件随机生成 4 个种群, 单种群个体数量为 200, 挥发因子为 1, 个体转移概率为 0.3, 蚂蚁转移次数为 50; 设定元胞数组, 用于记录种群的变化情况。

M-PACO 算法初始化完成后, 利用上述得到的最佳 RBFNN 参数建立 M-PACO 的适应度函数并计算种群个体的适应度, 此时适应度函数的输入数据和评判指标分别为工艺参数(转速、焊速和下压量)和拉剪载荷。个体适应度可由式(5)计算。

$$F(x) = \sum_{p=1}^p w_p \varphi \left(\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \right) \quad (5)$$

式中, x 为输入向量; y 为中心点; w_p 为权值; φ 为径向基函数。种群适应度计算完成后, 计算个体转移概率并进行差异转移(式(3)); 转移完成后进行个体适应度计算(式(4)), 将当前个体与当前种群最优个体进行对比, 优存劣汰; 在有限的蚂蚁转移次数内, 完成对工艺参数的搜索优化, 具体流程如图 4 所示。

在种群的每个转移过程中, 必须根据已建立的边界条件重新定义种群的位置信息, 以免某些个体脱离搜索空间。种群个体的位置坐标由转速、焊速和下压量组成。种群个体的分布直接影响 M-PACO 的全局搜索能力, 因此调控种群个体的分布具有重要意义。为了提高局部搜索能力

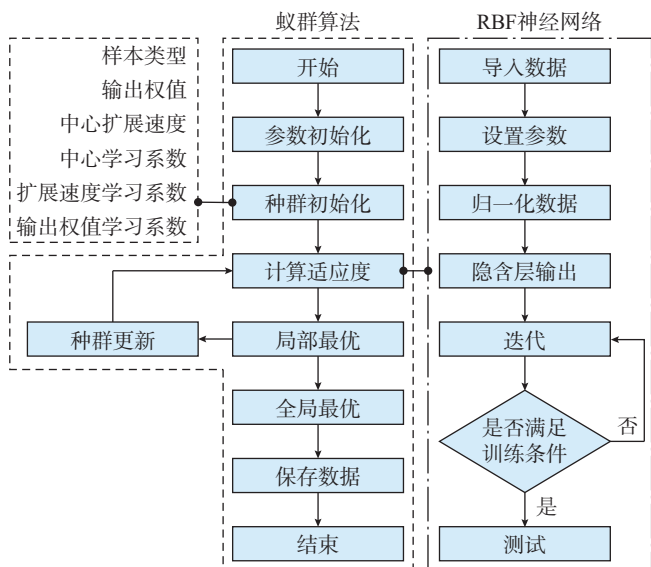


图 2 ACO 优化 RBFNN 流程图

Fig.2 Flow chart of ACO optimized RBFNN

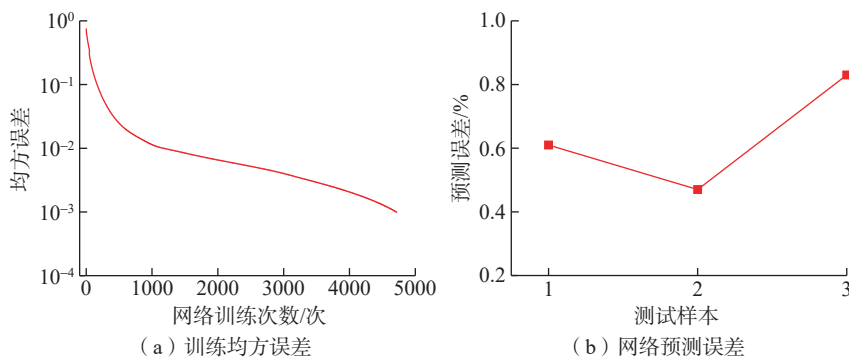


图 3 经 ACO 优化 RBFNN 的误差曲线

Fig.3 Error curves of RBFNN optimized by ACO

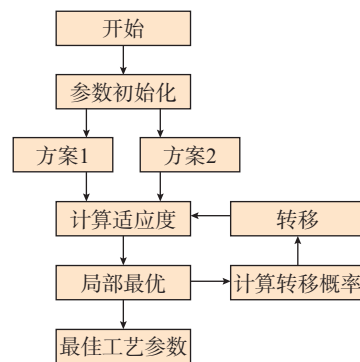


图 4 M-PACO 流程图

Fig.4 Flow chart of M-PACO

和挖掘局部优异个体,方案1采用区域分块集中搜索策略(图5(a)),4个种群的个体弥散分布在各自区域。为了提高全局搜索能力,方案2采用的整体多种群并行搜索策略,4个种群的个体均匀分散在三维空间各处(图5(b))。分析图5可知,两个方案中个体分布情况均满足试验要求。

基于有限的蚂蚁转移次数,采用两种方案优化工艺参数。如图6所示,方案2中第4种群在整个搜索过程中一直处于局部最优状态,此种群的搜索行为失败;其他种群的适应度值均以不同的速度增长,直到得到当前种群最优。经过比对,方案2中第3种群出现全局最优个体,此个体为最终优化结果,其适应度值为5.12 kN/mm。优化后的转速为1504 r/min,焊速为207 mm/min,下压量为0.12 mm,预测值为5.12 kN/mm。采用寻优得到的工艺参数组合进行FSLW试验,所得接头的拉剪载荷为

5.06 kN/mm,试验值与预测值的相对误差为1.17%,进一步证明了ACO优化后RBFNN预测结果的准确性。

3 结果与讨论

3.1 接头横截面

采用优化后的工艺参数组合(转速1504 r/min、焊速207 mm/min、下压量0.12 mm)进行验证试验,得到的FSLW接头横截面如图7所示。根据组织形貌的不同,接头横截面分为搅拌区(Stir zone, SZ)、热机影响区(Thermo-mechanically affected zone, TMAZ)、热影响区(Heat affected zone, HAZ)及母材(Base metal, BM)。搅拌针螺纹槽结构有效提升了搅拌针附近的材料流动速度,且显著影响了接头中沿板厚方向的材料流动^[20]。利用常规全螺纹搅拌针进行铝合金FSLW时,螺纹槽驱动与之接触的材料加速流动, SZ轮廓主要取决于轴肩与搅拌针外轮廓的材料流动,呈上

大下小的“碗”形^[6]。不同于常规全螺纹搅拌针,尖部半螺纹搅拌针只有尖部区域因螺纹槽的存在可加速材料流动,使与尖部区域接触的材料经历比根部区域更高的材料流动速度,促使图7中的SZ呈现中间宽度小的“沙漏”形。在FSLW过程中,搅拌针扎入下板,接头上板材料向下流动并在搅拌针尖端聚集,进而形成的材料集中区会挤压搅拌针尖端的外围材料使其向上流动。向上流动的材料对搭接界面产生向上的挤压作用,因此SZ两侧搭接界面向上弯曲,进而在前进侧形成钩状缺陷;同时塑性流动的铝合金在搅拌针的驱动下不断挤压原始搭接界面,使得搭接界面发生变形并向SZ延伸,最终在接头后退侧形成延伸至SZ的冷搭接^[9]。由于SZ两侧搭接界面所形成的钩状缺陷和冷搭接向上弯曲,导致前进侧的EST(简称为EST_A)与后退侧的EST(简称为EST_R)均小于

表4 搜索参数范围

Table 4 Searching parameter range

参数名称	方案1-1	方案1-2	方案1-3	方案1-4	方案2-1	方案2-2	方案2-3	方案2-4
转速 / (r·min ⁻¹)	1200~1400	1200~1400	1400~1600	1400~1600	1200~1600	1200~1600	1200~1600	1200~1600
焊速 / (mm·min ⁻¹)	100~200	200~300	100~200	200~300	100~300	100~300	100~300	100~300
下压量/mm	0.05~0.15	0.05~0.15	0.05~0.15	0.05~0.15	0.05~0.15	0.05~0.15	0.05~0.15	0.05~0.15

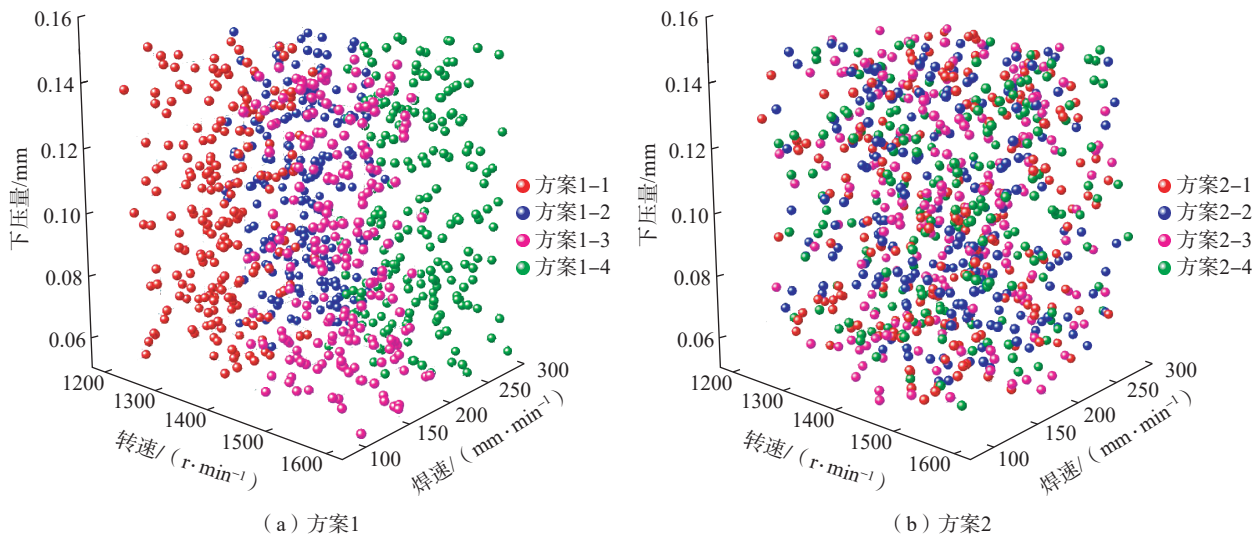


图5 种群空间分布图

Fig.5 Population spatial distribution map

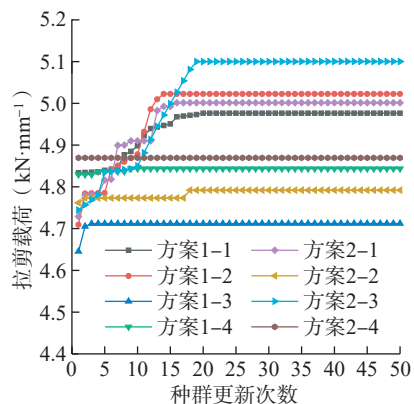


图6 种群最优个体更新曲线
Fig.6 Optimal individual updated curve

上板厚度。

图8为两组不同工艺参数组合下FSLW接头的EST。其中,转速1400 r/min、焊速200 mm/min、下压量0.15 mm参数组合是优化前接头最大载荷的焊接参数(表2)。对比常规全螺纹搅拌针,尖部螺纹驱动与之接触的材料主要沿水平方向流动,有效减小了材料集中区对搭接界面向上的挤压效果,有利于提高EST^[21]。图7中钩状缺陷与冷搭接向上弯曲的高度较小,EST提高。转速1504 r/min、焊速207 mm/min、下压量0.12 mm参数下接头中的EST_A与EST_R分别为1.33 mm和1.53 mm。如前所述,工艺参数是影响钩状缺陷与冷搭接向上弯曲程度的重要因素。与优化后接头相比,转速1400 r/min、焊速200 mm/min、下压量0.15 mm参数下接头的下压量较大,材料集中区对界面的挤压作用更大,致使EST_A与EST_R均较小,其值分别为1.29 mm和1.45 mm。参数优化后,EST提高,利于获得高承载能力的铝合金FSLW接头。

3.2 接头的力学性能

对于转速1504 r/min、焊速207 mm/min、下压量0.12 mm与转速1400 r/min、焊速200 mm/min、下压量0.15 mm两种参数组合,接头的断裂模式一致,其断裂路径如图9所示。在拉剪载荷作用下,裂纹在前进侧钩

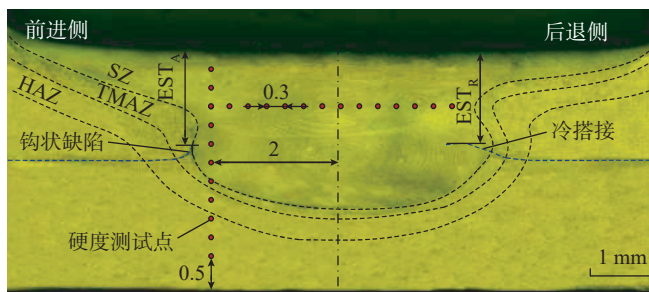


图7 转速1504 r/min、焊速207 mm/min、下压量0.12 mm参数下的接头横截面
Fig.7 Joint cross section under the parameters of 1504 r/min rotating speed, 207 mm/min welding speed and 0.12 mm plunge depth

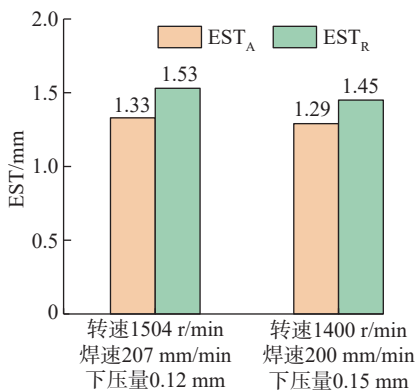


图8 不同参数下接头的EST
Fig.8 EST values of joint under different parameters



图9 转速1504 r/min、焊速207 mm/min、下压量0.12 mm参数下的接头断裂路径
Fig.9 Joint fracture path under the parameters of 1504 r/min rotating speed, 207 mm/min welding speed and 0.12 mm plunge depth

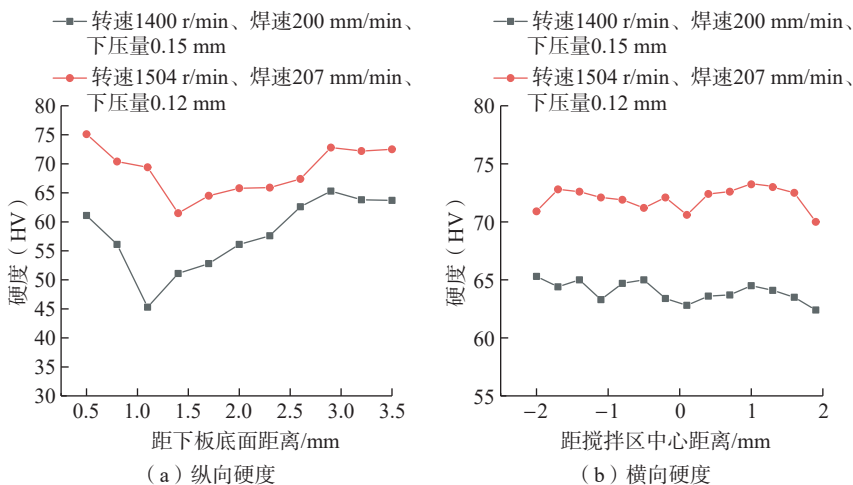


图10 不同参数组合下接头的显微硬度
Fig.10 Microhardness values of joint under different parameters combinations

状缺陷尖端扩展并向上扩展,呈现典型的拉伸断裂特征。由于接头最终在SZ失效,本文的硬度测量点主要位于SZ(图7)。

根据接头的断裂模式和断裂路径可知,显微硬度是影响接头拉

剪性能的又一重要因素。在转速1504 r/min、焊速207 mm/min、下压量0.12 mm和转速1400 r/min、焊速200 mm/min、下压量0.15 mm参数组合下,接头硬度分布如图10所示。6151铝合金是热处理强化型铝

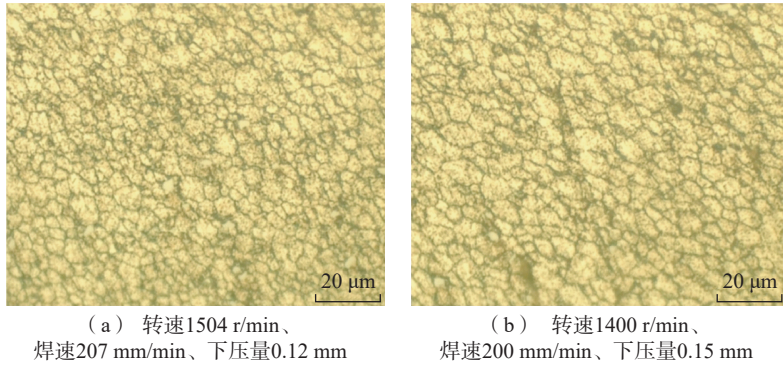


图 11 不同参数组合下 SZ 的显微组织

Fig.11 Microstructures of SZ under different parameters combinations

合金,由于焊接热输入影响,HAZ 与 TMAZ 因晶粒粗化和强化相溶解成为硬度薄弱区域,而发生动态再结晶的 SZ 因晶粒细化使得硬度高于 HAZ 与 TMAZ^[22]。因此,接头测量的显微硬度最低点出现在下板 HAZ (图 10 (a))。同时,由图 10 和 11 可知, SZ 内沿水平方向的硬度差异不大,且 SZ 上半部的硬度值大于下半部。然而,当接头承受拉伸载荷时,裂纹却向显微硬度更高的上板 SZ 扩展,这主要与接头是前进侧受力且钩状缺陷向上弯曲有关。与转速 1400 r/min、焊速 200 mm/min、下压量 0.15 mm 组合相比,转速 1504 r/min、焊速 207 mm/min、下压量 0.12 mm 组合的转速相近但下压量减小,使接头热输入减少^[23],HAZ 晶粒粗化程度变小且强化相的溶解量变少。因此,优化后接头 HAZ 获得更高的显微硬度。对于 FSLW 工艺, SZ 内的晶粒尺寸主要受材料流动速度以及温度两个因素的影响^[22]。较高的材料流动速度以及较低的焊接温度均利于获得更小直径的晶粒。与转速 1400 r/min、焊速 200 mm/min、下压量 0.15 mm 相比,参数优化后接头的转速高且温度低,进而获得小晶粒尺寸的 SZ,如图 11 所示。相比转速 1400 r/min、焊速 200 mm/min、下压量 0.15 mm 参数下接头,参数优化后的转速 1504 r/min、焊速 207 mm/min、下压

量 0.12 mm 接头通过较高的显微硬度和 EST 提高了接头拉剪性能,其拉剪载荷达到 5.06 kN/mm,较优化前的最大拉剪载荷提高了 6.08%。

4 结论

采用尖部半螺纹搅拌针进行 6151 铝合金 FSLW 试验,利用 ACO 优化后的 RBFNN 建立焊接工艺参数与拉剪载荷之间的关系,并进一步协同 M-PACO 进行工艺参数优化以提高接头的拉剪性能,主要结论如下。

(1) 采用 ACO 优化后的 RBFNN 与优化前相比,相对预测精度从 95.5% 提高至 99.17%,且收敛速度更快。

(2) 基于 RBFNN 与 M-PACO 的协同获得的最优工艺参数为转速 1504 r/min、焊速 207 mm/min 和下压量 0.12 mm,且基于 RBFNN-ACO 的预测接头强度与实测接头强度误差仅为 1.17%。

(3) 与优化前最大强度的接头相比,基于优化工艺参数所得的接头具有更大的 EST 与硬度更高的 SZ,进而拉剪载荷从 4.77 kN/mm 提高至 5.06 kN/mm。

参考文献

[1] 李登常,岳玉梅,姬书得,等. 无匙孔搅拌摩擦焊材料流动行为的研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(10): 41-46, 63.
LI Dengchang, YUE Yumei, JI Shude, et al.

Study of materials flow on non-keyhole friction stir welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(10): 41-46, 63.

[2] 李继忠,董春林,赵华夏,等. 钛合金搅拌摩擦焊工艺参数对组织性能的影响[J]. 航空制造技术, 2015, 58(17): 100-103.

LI Jizhong, DONG Chunlin, ZHAO Huaxia, et al. Effect of processing parameter on microstructure and mechanical property of friction stir welded titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(17): 100-103.

[3] 朱海,孙朝伟,孙金睿,等. 2024 铝合金搅拌摩擦焊工艺参数对焊接质量的影响研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(23): 159-162.

ZHU Hai, SUN Chaowei, SUN Jinrui, et al. Study on the influence of friction stir welding process parameters of 2024 aluminum alloy on welding quality[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(23): 159-162.

[4] 王宇,朱天军,叶晓凤,等. 6061 铝合金搅拌摩擦焊工艺寻优[J]. 电焊机, 2014, 44(12): 86-89.

WANG Yu, ZHU Tianjun, YE Xiaofeng, et al. The optimization of friction stir welding process for 6061 aluminum alloy[J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(12): 86-89.

[5] 孟祥晨,曹炳琪,李玉龙,等. 聚合物与铝合金特异性材料搅拌摩擦焊[J]. 航空制造技术, 2021, 64(10): 30-40.

MENG Xiangchen, CAO Bingqi, LI Yulong, et al. Dissimilar friction stir welding between polymers and aluminum alloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(10): 30-40.

[6] 郭晓娟,李光,李丛卿,等. 搅拌摩擦搭接焊界面成形机制及影响因素[J]. 航空制造技术, 2009, 52(12): 62-65.

GUO Xiaojuan, LI Guang, LI Congqing, et al. Joint interface forming and influential factor of friction stir overlap welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(12): 62-65.

[7] LIU H J, ZHAO Y Q, HU Y Y, et al. Microstructural characteristics and mechanical properties of friction stir lap welding joint of alclad 7B04-T74 aluminum alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(9-12): 1415-1425.

[8] ALDANONDO E, VIVAS J, áLVAREZ P, et al. Effect of tool geometry and welding parameters on friction stir welded

- lap joint formation with AA2099-T83 and AA2060-T8E30 aluminium alloys[J]. *Metals*, 2020, 10(7): 872-884.
- [9] XU Z W, LI Z W, LÜ Z, et al. Effect of welding speed on joint features and lap shear properties of stationary shoulder FSLWed alclad 2024 Al alloy[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26(3): 1358-1364.
- [10] LI Z W, YUE Y M, JI S D, et al. Joint features and mechanical properties of friction stir lap welded alclad 2024 aluminum alloy assisted by external stationary shoulder[J]. *Materials & Design*, 2016, 90: 238-247.
- [11] BOZKURT Y. The optimization of friction stir welding process parameters to achieve maximum tensile strength in polyethylene sheets[J]. *Materials & Design*, 2012, 35: 440-445.
- [12] AHMADI H, MOSTAFA ARAB N B, GHASEMI F A. Optimization of process parameters for friction stir lap welding of carbon fibre reinforced thermoplastic composites by Taguchi method[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(1): 279-284.
- [13] ZHAO Y D, LUO Y L, ZHANG Z P, et al. Fractal dimension characterization of joint surface morphology on dissimilar friction stir lap welding of Al/Mg[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2019, 12(23): 3941.
- [14] SHOJAEEFARD M H, AKBARI M, ASADI P. Multi objective optimization of friction stir welding parameters using FEM and neural network[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, 15(11): 2351-2356.
- [15] CHOUDHURY B, CHANDRASEKARAN M. Electron beam welding of aerospace alloy (Inconel 825): A comparative study of RSM and ANN modeling to predict weld bead area[J]. *Optik*, 2020, 219: 165206.
- [16] GUPTA S K, PANDEY K N, KUMAR R. Artificial intelligence-based modelling and multi-objective optimization of friction stir welding of dissimilar AA5083-O and AA6063-T6 aluminium alloys[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2018, 232(4): 333-342.
- [17] GUO R X, HU W, SONG Q, et al. Improving the tensile shear load of Al-Mg-Si alloy FSLW joint by BPNN-GA[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2021, 74(6): 1521-1528.
- [18] 刘志强, 武永亮, 冯存义, 等. 铝合金搅拌摩擦焊在铁路货车上的应用实践[J]. *轨道交通装备与技术*, 2021(3): 11-15.
- LIU Zhiqiang, WU Yongliang, FENG Cunyi, et al. Application of aluminum FSW in manufacture of railway freight car[J]. *Rail Transportation Equipment and Technology*, 2021(3): 11-15.
- [19] YAZDANIAN S, CHEN Z W, LITTLEFAIR G. Effects of friction stir lap welding parameters on weld features on advancing side and fracture strength of AA6060-T5 welds[J]. *Journal of Materials Science*, 2012, 47(3): 1251-1261.
- [20] 姬书得, 孟庆国, 史清宇, 等. 搅拌针形状影响搅拌摩擦焊过程金属塑性流动规律的数值模拟[J]. *焊接学报*, 2013, 34(2): 93-96, 117.
- JI Shude, MENG Qingguo, SHI Qingyu, et al. Numerical simulation of metal plastic flow in friction stir welding affected by pin shape[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(2): 93-96, 117.
- [21] JI S D, LI Z W, ZHOU Z L, et al. Effect of thread and rotating speed on material flow behavior and mechanical properties of friction stir lap welding joints[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26(10): 5085-5096.
- [22] FADAEIFARD F, MATORI K A, TOOZANDEHJANI M, et al. Influence of rotational speed on mechanical properties of friction stir lap welded 6061-T6 Al alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(4): 1004-1011.
- [23] 王金辉, 李积元. 搅拌摩擦焊工艺参数对 6061-T6 铝合金焊缝质量的影响[J]. *青海大学学报*, 2018, 36(4): 36-40.
- WANG Jinhui, LI Ji yuan. The influence of friction stir welding parameters on welding quality of 6061-T6 aluminum alloy[J]. *Journal of Qinghai University*, 2018, 36(4): 36-40.

Process Parameters Optimization of Aluminum Alloy Friction Stir Lap Welding by RBFNN-ACO

YUE Yumei, HAN Song, GUO Ruixiu, JI Shude
(Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

[ABSTRACT] Friction stir lap welding of 6151 aluminum alloy was carried out by using the tip-half-thread pin, and the process parameters were optimized by combining radial basis function neural network (RBFNN) and ant colony optimization (ACO) algorithm, to improve the characteristics of lap interface and maximize the bearing capacity of the joint. The result showed when the rotational velocity, welding speed and plunge depth were 1504 r/min, 207 mm/min and 0.12 mm, respectively, the highest tensile shear load of the joint reached 5.06 kN/mm, which was increased by 6.08% than the highest tensile shear load before optimization. The RBFNN combining with ACO provides an effective way to optimize the welding processing parameters and further enhance the strength of aluminum friction stir lap welding joint.

Keywords: Friction stir lap welding (FSLW); Tip-half-thread tool pin; Radial basis function neural network (RBFNN); Ant colony optimization algorithm; Parameters optimization

(责编 古系)