

DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2021.02.005

本文引用格式: 龚森,戴士杰,王涛.航空超薄压气机叶片堆焊修复关键参数研究[J].机床与液压,2021,49(2):20-25.

GONG Miao,DAI Shijie,WANG Tao.Research on key parameters in surfacing repairing of aero ultra-thin compressor blades[J].Machine Tool & Hydraulics,2021,49(2):20-25.

航空超薄压气机叶片堆焊修复关键参数研究

龚森^{1,2}, 戴士杰², 王涛¹

(1. 中国民航大学航空工程学院, 天津 300300; 2. 河北工业大学机械工程学院, 天津 300041)

摘要: 热源功率、送丝速度、冷却速率是影响超薄压气机叶片堆焊修复质量的关键参数。通过建立数学模型, 计算了不同送丝速度下堆焊高度的数值解。根据合金热物性参数和前期钛合金试验结果, 推导出 Inconel718 合金的热输入范围。针对超薄叶片修复特征, 选择送丝速度为 2.54 mm/s 时进行传热建模, 求解出不同热输入下焊缝截面的最高温度分布曲线, 分析得到与之相匹配的热输入数值。在此基础上, 结合流体传热理论, 求解出不同冷却流速下的流体温度和夹具等温线的变化, 并得到熔池及焊缝截面最高温度随时间的变化曲线。结果显示: 在热输入为 431 W、送丝速度为 2.54 mm/s、流体流速为 4.6 L/min 时, 焊缝可达到较好的热循环效果。研究方法 & 结果为压气机叶片堆焊修复工艺设计提供参考, 具有较好的工程应用价值。

关键词: 超薄叶片; 焊接参数; 堆焊修复; 焊接传热

中图分类号: TG456.2

Research on Key Parameters in Surfacing Repairing of Aero Ultra-thin Compressor Blades

GONG Miao^{1,2}, DAI Shijie², WANG Tao¹

(1. Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300041, China)

Abstract: Heat source power, wire feeding speed and cooling rate are the key parameters that affect the repair quality of ultra-thin compressor blades surfacing. The mathematical model was established, and the numerical solution of surfacing height under different wire feeding speed was calculated. According to the thermal properties of the alloy and the results of the previous titanium alloy test, the heat input range of Inconel718 alloy was derived. According to the repair characteristics of ultra-thin blades, the wire feeding speed 2.54 mm/s was selected to build the heat transfer model. The maximum temperature distribution curve of the weld cross section under different heat input was solved, and the corresponding heat input values were obtained by analysis. On this basis, combined with the theory of fluid heat transfer, the change of fluid temperature and fixture isotherm under different cooling flow rates were solved, and the change curves of the maximum temperature of molten pool and weld section with time were obtained. The results show that when the heat input is 431 W, the wire feeding speed is 2.54 mm/s and the fluid flow rate is 4.6 L/min, better thermal cycling effect can be achieved in the weld zone. The research methods and results provide a reference for the design of surfacing repair process of compressor blades, which has a good engineering application value.

Keywords: Ultra-thin blade; Weld parameters; Surfacing repair; Welding heat transfer

0 前言

压气机叶片长期处于高温高压的工作环境中, 常出现磨损或缺损等损伤, 影响飞行安全。对于 2 mm 以内的损伤, 采用堆焊修复是目前业内认可的修复方法^[1]。相比于激光熔覆设备, 微束等离子弧焊 (Microbeam Plasma Arc Welding, MPAW) 在小电流下优秀的电弧稳定性使其非常适合焊接超薄合金, 是目前叶片焊接修复的主流手段^[2-3]。在超薄合金叶片的

MPAW 堆焊修复过程中, 热源功率、送丝速度、熔池冷却速率是影响修复质量的关键参数。

MANIKANDAN 等^[4-5]研究了冷却效率对熔融带中组织相位形成的影响, 采用恒定电流和复合电流脉冲模式并计算了冷却速率的影响。武传松等^[6]回顾了复合热源焊接过程数值模拟的现状和存在的问题, 探讨了堆焊领域的研究方向和发展趋势, 为焊接工艺优化和过程控制提供了理论依据。韩志勇等^[7]实验分析

收稿日期: 2019-11-01

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFB1311100); 中国民航科技重大专项 (MHRD20130104)

作者简介: 龚森 (1982—), 男, 博士, 主要从事民航特种装备与工艺方面研究。E-mail: mgong69@163.com。

通信作者: 戴士杰 (1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为机电一体化系统设计。E-mail: dsj7176@126.com。

了不同微束等离子弧焊堆焊参数对 TC4 焊接接头的影 响，发现热输入和稀释率对接头成形影响较大。DUROCHER、RICHARDS^[8] 研究指出，热源功率是影响微焊接层裂纹密度的最重要的工艺参数，采用较低的电压和电流值可以降低空洞含量和裂纹密度。良好的热输入率和热循环效率是影响镍基合金焊接质量的关键因素，过高的温度将显著增加焊缝和母材的晶粒尺寸^[9]。此外，熔池的最高温度和冷却速率也是影响材料组织性能的重要因素^[10-12]，当材料厚度较小时，影响更为显著^[13-14]。

本文作者以 Inconel718 超薄镍基压气机叶片为研究对象，通过建立数学模型和有限元模型，求解了送丝速度与热源参数，并借助流体传热理论计算了匹配的冷却参数，对发动机叶片堆焊修复工艺参数设计及优化具有指导意义。

1 堆焊高度的数学模型及求解

使用 MPAW 自动焊接系统进行堆焊后，焊缝区和母材的截面轮廓如图 1 所示。由于自动焊机热输入均匀，截面半径随送丝速度的增加而均匀增加，熔化后的焊丝堆积在基材上表面，形成近似半径为 r 的圆形截面，图中， h 代表焊缝距离堆焊截面中心的高度， W 为母材的宽度。

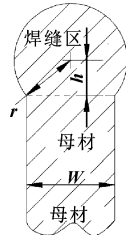


图 1 焊后横截面形貌示意

为了能够准确地模拟不同送丝速度下的堆焊高度，从而计算焊缝的最高温度分布情况。假设焊丝在融化及冷却过程中无损耗，根据质量守恒原理，截面半径 r 与送丝速度 v_2 的关系可推导为

$$\left[\pi r^2 \cdot \frac{360 - 2\arcsin\left(\frac{w}{2r}\right)}{360} + \frac{w}{2} \cdot \sqrt{r^2 - \left(\frac{w}{2}\right)^2} \right] L = \pi R^2 \cdot (L/v_1) \cdot v_2 \quad (1)$$

已知 Inconel718 试片厚度 $w = 1 \text{ mm}$ ，长度 $L = 65 \text{ mm}$ ，焊丝半径 $R = 0.4 \text{ mm}$ ，焊接速度（焊枪的移动速度） $v_1 = 1.27 \text{ mm/s}$ ，送丝速度 v_2 分别取 1.27 mm/s (3 in/min)、 2.54 mm/s (6 in/min)、 3.39 mm/s (8 in/min) 和 4.23 mm/s (10 in/min)，则送丝速度与焊接速度的比值可表示为

$$v_2/v_1 = [3/3, 6/3, 8/3, 10/3] \quad (2)$$

令 r 为自变量即迭代变量，由于求导困难，令式 (1) 转化为

$$r^2 = \left\{ \pi R^2 \cdot \frac{v_2}{v_1} - \left[\pi r^2 \cdot \frac{360 - 2\arcsin\left(\frac{w}{2r}\right)}{360} \right] \right\}^2 \cdot \left(\frac{2}{w} \right)^2 + \left(\frac{w}{2} \right)^2 \quad (3)$$

等式两边对 r 求一阶导数，得：

$$r = \left(\frac{2}{w} \right)^2 \cdot \left\{ \pi R^2 \cdot \frac{v_2}{v_1} - \left[\pi r^2 \cdot \frac{360 - 2\arcsin\left(\frac{w}{2r}\right)}{360} \right] \right\}$$

$$\left[-2\pi r + \frac{\pi}{90} r \cdot \arcsin\left(\frac{w}{2r}\right) - \frac{\pi w}{360} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{w}{2r}\right)^2}} \right] \quad (4)$$

又令：

$$\varphi(r) = \left(\frac{2}{w} \right)^2 \cdot \left\{ \pi R^2 \cdot \frac{v_2}{v_1} - \left[\pi r^2 \cdot \frac{360 - 2\arcsin\left(\frac{w}{2r}\right)}{360} \right] \right\} \cdot \left[-2\pi r + \frac{\pi}{90} r \cdot \arcsin\left(\frac{w}{2r}\right) - \frac{\pi w}{360} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{w}{2r}\right)^2}} \right] = \left(\frac{2}{w} \right)^2 \cdot A \cdot B \quad (5)$$

对 r 求一阶导数，得：

$$\varphi'(r) = \left(\frac{2}{w} \right)^2 \cdot B \cdot B + \left(\frac{2}{w} \right)^2 \cdot A \cdot \left\{ -2\pi + \frac{\pi}{90} \arcsin\left(\frac{w}{2r}\right) - \frac{\pi w}{180} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{w}{2r}\right)^2}} + \frac{\pi w^3}{1440} \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{w}{2r}\right)^2 \right]^{-3/2}} \cdot r^3 \right\} \quad (6)$$

选取 $r = r_0$ 代入 Newton 迭代法公式，计算流程如图 2 所示，其中 ε 是所需精度。堆焊高度 H 可表示为

$$H = r + h = r + \sqrt{r^2 - \left(\frac{w}{2}\right)^2} \quad (7)$$

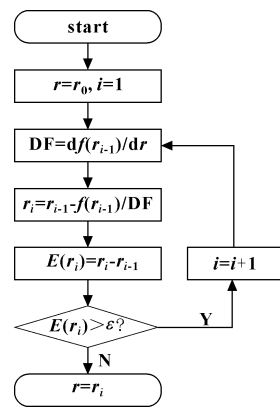


图 2 牛顿迭代法计算步骤

利用 MATLAB 求解，结果如表 1 所示。根据维修标准，建议对磨损程度在 2 mm 以内的压气机叶片进行堆焊修复，修复步骤是先对磨损部分进行堆焊，然后打磨到原来形貌。在实际送修的叶片中，磨损程度多为 0.8~1.9 mm，CFM56 压气机叶片 4~9 级为 Inconel718 合金，叶尖厚度小于 2 mm，部分仅为

1 mm, 属于超薄镍基合金, 堆焊过程中导热率较差, 熔池凝固速率较低会增加 Nb 及其碳化物的偏析, 影响焊后组织性能。因此, 在堆焊时应尽量减少堆焊次数和堆焊高度, 从而降低从叶片到夹具的传热高度, 缩短熔池在高温区的停留时间, 更好地保证叶片的焊接质量。

表 1 不同送丝速度下的增材修复高度计算结果

v_2/v_1	初值/ mm	结果 r_i / (10^{-1} mm)	精度 ε / 10^{-10}	迭代 次数	前次误 差/(10^{-11})	结果 H/mm
3/3	1	5.523 828	1	32	9.824 941	0.78
6/3	1	6.410 283	1	32	5.845 890	1.04
8/3	1	7.003 568	1	31	7.737 799	1.19
10/3	1	7.589 380	1	30	9.592 882	1.33

根据堆焊高度 H 的计算结果, 当送丝速度为 1.27 mm/s 时, 堆焊高度约为 0.78 mm, 堆焊高度较低, 需要进行至少 2 次堆焊, 效率较低且增加了工艺难度。当送丝速度为 4.23 mm/s 时, 堆焊高度较高, 约为 1.33 mm, 需要较大的热输入, 熔池高度较高, 不利于熔池的快速冷却成型。因此, 对于超薄压机机叶片的焊接, 送丝速度为 2.54 和 3.39 mm/s 时的堆焊高度更为适合。当送丝速度为 2.54 mm/s 时, 计算得到堆焊高度约为 1.04 mm, 对于 1 mm 以下的磨损修复, 仅需堆焊一次, 且堆焊高度更为接近。对于接近 2 mm 的磨损, 在同样堆焊 2 次的情况下, 相对于送丝速度为 3.39 mm/s 时 1.19 mm 的堆焊高度, 送丝速度为 2.54 mm/s 时的单次堆焊高度更低, 更有助于熔池的热循环和快速凝固。因此, 以下主要针对 2.54 mm/s 的送丝速度进行研究。

根据前期对相同尺寸的 TC4 合金进行的研究^[15-16]和实验结果, 此次研究所使用的焊丝半径为 0.4 mm, 与之前钛合金焊丝的半径相同。

在相同的送丝速度下, 焊丝的体积是相等的, 假设单位时间送丝体积为 V , 根据比热公式, 单位时间内送丝所需的熔化热 Q 计算公式为

$$Q = C \cdot \rho V \cdot \Delta T \quad (8)$$

式中: ρ 取室温 25 °C 下的密度; ΔT 为从室温到熔点的温差; C 为比热容, 取材料熔化时的最大比热。根据 JmatPro 软件的计算结果, 得到 TC4 焊丝和 Inconel718 焊丝从 20 °C 至完全液态温度 (1 713 °C 和 1 358 °C) 的比热容和密度的平均值, 分别为 $\bar{C}_1 = 0.781 1 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ 和 $\bar{C}_2 = 0.705 7 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$; $\bar{\rho}_1 = 4 306 \text{ g}/\text{cm}^3$ 和 $\bar{\rho}_2 = 7 956 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

2 种合金在相同送丝速度下的热输入比可描述为

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\bar{C}_1 \cdot \bar{\rho}_1 \cdot \Delta T_1}{\bar{C}_2 \cdot \bar{\rho}_2 \cdot \Delta T_2} \approx 0.758 \quad (9)$$

式中: Q_1 和 Q_2 分别为相同体积下 TC4 焊丝和 Inconel718 焊丝熔化所需的热量。根据前期的研究结果, 相同焊丝半径、相同试片外形尺寸的 TC4 合金焊接时热源功率约为 330 W, 考虑到焊接条件相似, 采用 330 W 作为 Q_1 的参考值, 在相同的焊接参数下, 2 种不同合金的导热系数随温度的变化可能影响热输入的分配, 其比值系数在 0.86~1.29 之间, 因此得到 Q_2 的取值范围为 374~561 W。

图 3 为送丝速度为 2.54 mm/s 时, 在不同的热输入功率下, 焊缝截面最高温度随时间的变化曲线。可以看出: 热源功率为 487~555 W 时, 焊缝截面的最高温度范围可达到 1 530~1 926 °C, 超过融化温度较多, 热输入量偏大, 预计熔池高温停留时间较长, 熔池的冷却时间长, 将可能产生较多的元素偏析, 降低焊缝的力学性能^[17]。在热输入功率为 375 W 时, 截面的最大温度平均值为 1 328 °C, 接近融化温度。在热输入量为 431 W 时, 最大温度平均值为 1 464.2 °C, 高于融化温度约 106 °C。从温度波动情况上看, 487 W 以上的热输入功率会产生较大的熔池温度波动, 尤其是在 $t = 35 \text{ s}$ 以后, 温度上升并且波动幅度和波动频率较大。考虑到焊接过程中的热损失, 选择焊缝温度略高于融化温度的 431 W 为热输入功率进行进一步研究。

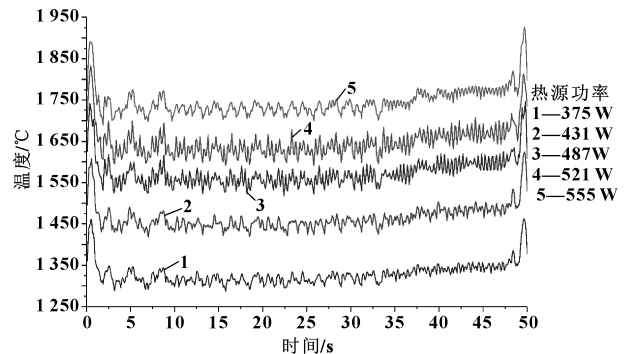


图 3 送丝速度为 2.54 mm/s 时, 不同功率下焊缝最高温度随时间的变化

2 夹具有限元模型

夹具整体结构如图 4 所示。

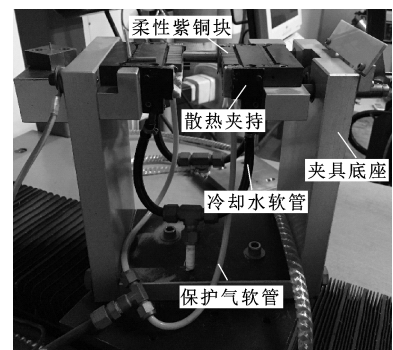


图 4 夹具整体结构

采用共轭传热建立温度场与流场的耦合模型如图5所示。对夹具的一半建模,有限元模型及网格划分如图5所示。完整模型包含357 189个域单元,最大单元尺寸为0.001 79 m,最小单元尺寸为 1.79×10^{-5} m,其中冷却水流域采用边界层网格划分,包含119 882个域单元,网格平均质量为0.765 6。

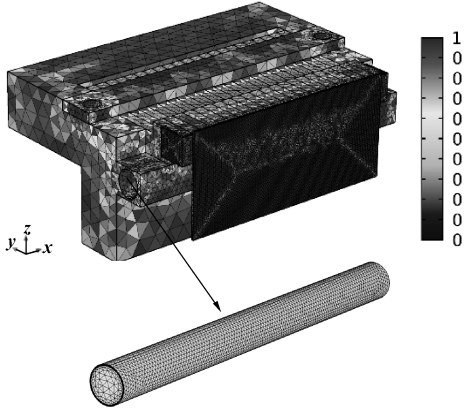


图5 简化后的有限元模型和网格质量分布

3 流体参数及边界条件

改进的MPAW自动焊机的夹具流道尺寸为直径8 mm、长度89.5 mm,冷却介质为水。为减小计算量,忽略流道内壁的粗糙度。由传热学原理可知,当流道尺寸确定后,流体与流道内壁的传热系数与流体温度和速度有关,流体与夹具之间的传热过程属于强制对流换热,管道内流体的雷诺数 Re 可表示为

$$Re = \frac{d \cdot u \cdot \rho}{\mu} \quad (10)$$

式中: u 、 μ 、 ρ 分别为流体的速度、运动黏度、密度; d 为流道的直径。雷诺数 Re 表征流体惯性力和黏滞力的比值大小,流体可根据 Re 分为层流、过渡流和湍流3种流态。层流: $Re < 2\ 300$;过渡流: $2\ 300 \leq Re \leq 10\ 000$;旺盛湍流: $Re > 10\ 000$ 。对于 $Pr > 0.6$ 的流体管道内强制对流换热,应用最广泛的是Dittus-Boelter公式:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (11)$$

式中:当流体被加热时, $n = 0.4$;当流体被冷却时, $n = 0.3$,故此处取值为0.4。

由于入口段局部表面传热系数高于充分发展段,故流体在管道中流动时,需要考虑入口效应。只有当 $l/d > 60$ 时,入口效应可忽略,文中流道长度 $l = 89.5$ mm,直径 $d = 8$ mm, $l/d < 60$,需要引入的修正系数如下:

$$c = 1 + (d/l)^{0.7} \quad (12)$$

当流态为旺盛湍流时,其平均努塞尔数可表示为

$$\overline{Nu} = 0.023 \left[1 + \left(\frac{d}{l} \right)^{0.7} \right] Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (13)$$

而当流态为过渡流时,D-B公式不再适用,其平均努塞尔数应用下式表示:

$$\overline{Nu} = \frac{(f/8)(Re-1\ 000)Pr}{1+12.7\sqrt{f/8}(Pr^{2/3}-1)} \left[1 + \left(\frac{d}{l} \right)^{2/3} \right] e \quad (14)$$

式中:

$$e = (0.05 \sim 20)^{0.01} \quad (15)$$

$$f = (1.82 \lg Re - 1.64)^{-2} \quad (16)$$

由平均努塞尔数可求得冷却水与流道内壁的平均对流换热系数为

$$h = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda}{d} \quad (17)$$

设定流道内流速分别为1.5、3、4.6、5.5 L/min,分析不同流速对焊缝温度的影响。由式(10)得出初始流量对应的雷诺数 Re 分别为3 047、6 093、9 342、11 170,综合考虑光管流道水冷的流动特性计算时间,采用 κ - ε 模型对耦合场进行仿真分析。湍动能和湍动能耗散率的关系为

$$\varepsilon = 0.09 \rho \frac{\kappa^2}{\mu} \left(\frac{\mu_t}{\mu} \right)^{-1} \quad (18)$$

式中: μ_t/μ 为湍动黏度比,正比于雷诺数。

以 κ 和 ε 为未知量的输运方程为

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa - \rho\varepsilon \quad (19)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} G_\kappa - C_{2\varepsilon} \rho\varepsilon^2/\kappa \quad (20)$$

式中: $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 为经验常数; G_κ 为湍动能产生项,其展开式为

$$G_\kappa = \mu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (21)$$

设置相关模型参数为: $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$,对应的湍流强度 I 的表达式为

$$I = u'/u = 0.16 (Re)^{-1/8} \quad (22)$$

将流体计算参数代入模型函数中,建立耦合场,流体边界条件设为:(1)采用实验室自来水,温度为10℃,设为不可压缩流体;(2)右端为入口,采用速度边界条件,将4种流速换算为模型的发展流速;(3)左端为出口,采用压力边界条件,出口压力设置为0,抑制回流;(4)壁面边界条件设为无滑移。

4 仿真结果

通过设置模型参数进行计算,得到不同流速下水冷散热系统的仿真结果,在后处理中取中间时刻 $t = 25$ s,分析流场的最高温度分布。不同流速下流道的温度分布如图6所示,可以看出:随着流速的增加,流体最高温度呈现下降趋势,并且热区范围逐渐缩小,符合流体换热规律。不同流速下夹具前端的传热

等温线计算结果如图 7 所示, 结果显示: 随着流速的增加, 等温线呈现逐渐向后的扩散趋势, 并且流道处等温线数值逐渐降低。取试片中间位置和两侧间隔 10 mm 位置 3 个特征截面为研究对象, 计算得到 4 种流速下截面最高温度如图 8 所示, 图中由上到下分别表示从右到左的截面顺序。可以看出: 随着流道内流速的提升, 3 个截面最高温即熔池温度均有所下降, 但都高于融化温度。当流速为 3 L/min 以下时, 温度下降不明显, 当流速增加到 4.6 L/min 以上时, 温度

呈现明显下降趋势, 说明流速为 4.6、5 L/min 时, 可有效提升冷却效果。

熔池温度的波动可反映热量的瞬态堆积情况^[18-20], 冷却速度较快可能造成较大的温度波动率、缩小熔深, 降低焊缝的最高温度, 进而影响焊缝与母材的融合效果。为进一步研究冷却速度对整个焊接热循环温度的影响, 需要考虑最高温度的波动率和对焊缝位置融化温度的影响。

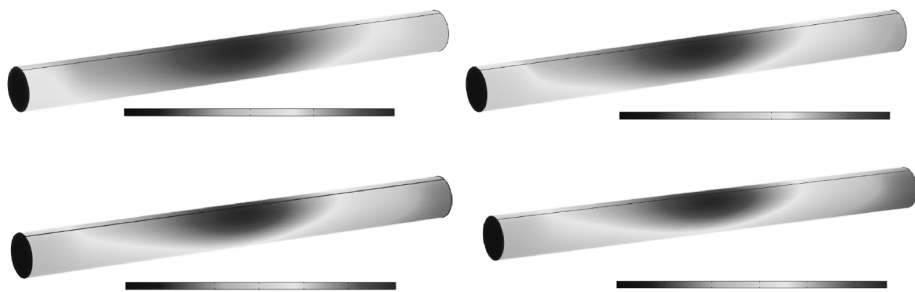


图 6 不同流速下的流道温度分布

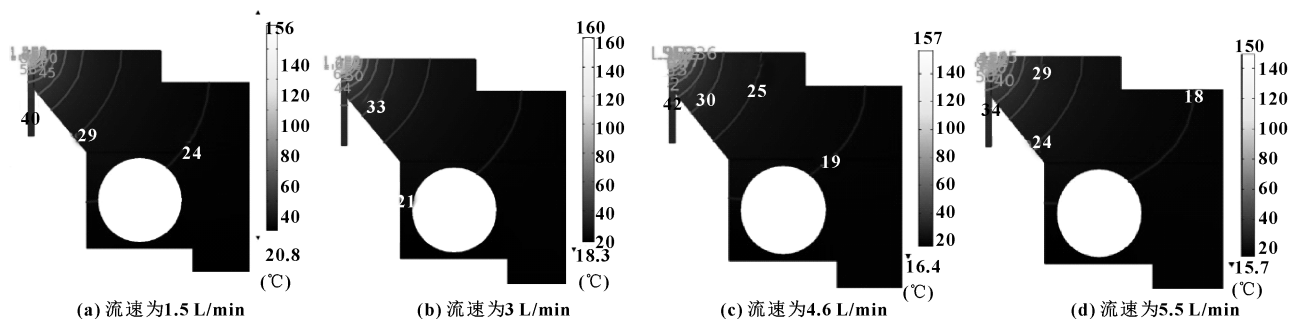


图 7 不同流速下夹具前端的传热等温线计算结果

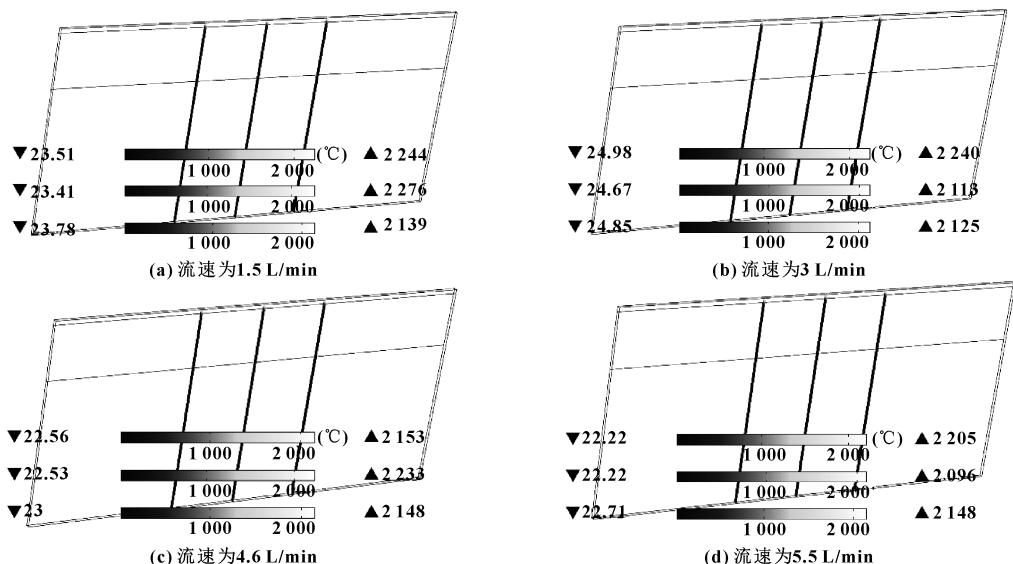


图 8 不同流速下 3 个典型截面的最高温度

图 9 为不同冷却条件下熔池最高温度热循环曲线。焊接过程是快速升温 and 降温的过程, 因此最高温度两侧并不是平滑曲线。根据试片成分报告, 采用

JMatPro 计算得到 Inconel718 合金试片的 γ 相析出临界温度为 980 $^{\circ}\text{C}$, 合金的融化温度为 1 358 $^{\circ}\text{C}$ 。

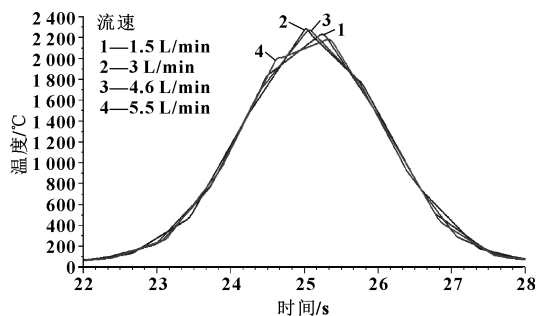


图 9 不同流速下熔池最高温度热循环曲线

由图 9 可知：流速为 5.5 L/min 时，熔池降至室温的速度最快，但热循环过程中峰值两侧温度梯度较大，可推测是由于冷却速度过快造成了熔池温度梯度；当流道内流速分别为 3、4.6 L/min 时，热循环过程较为平稳；在流速为 4.6 L/min 时，熔池降低至 980 °C 的时间最短，有助于控制 γ 相中强化项被偏析的比例。

为进一步研究不同流速对焊缝处的温度影响，根据表 1 中牛顿迭代法计算出送丝速度为 1.27 mm/s 时的焊缝位置，定义此处焊缝截面为截面 D ，计算得到不同流速冷却条件下截面 D 的最高温度随时间的变化曲线如图 10 所示。结果显示：当流速为 4.6 L/min 时，最高温度波动最小，并且焊缝平均温度在焊缝融化温度以上，对焊缝与母材的结合效果影响最小。根据计算结果，当流速为 4.6 L/min 时，与 431 W 的热源功率及 2.54 mm/s 的送丝速度匹配可达到较好的焊接热循环效果。

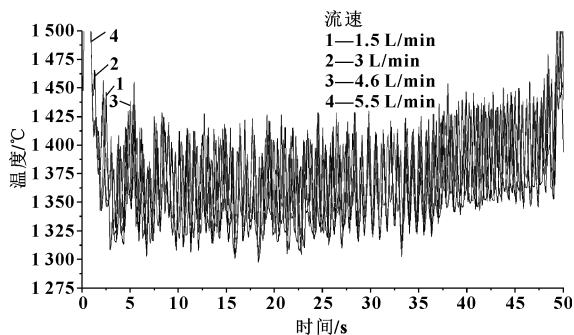


图 10 不同流速下熔池最高温度热循环曲线

5 结论

针对压气机叶片 MPAW 修复过程中送丝速度、热输入功率及冷却速率 3 个重要焊接参数进行理论分析和建模计算，结论如下：

(1) 通过建立送丝速度与堆焊高度的数学模型，计算出不同送丝速度下堆焊高度的数值解，并针对超薄叶片修复特征给出了最佳的送丝速度选择方法；

(2) 通过求解传热模型，得到了特定送丝速度下不同热输入功率时焊缝截面最高温度分布曲线，计算出与选定送丝速度对应的热输入功率；

(3) 结合流体传热理论，计算了不同冷却流速

下的流体温度变化、夹具等温线变化、熔池及焊缝截面最高温度的变化曲线。结果显示，在热输入为 431 W、送丝速度为 2.54 mm/s (6 in/min)、流道内流速为 4.6 L/min 时，焊缝可达到较好的热循环效果。

参考文献：

- [1] 柴桥,李均盛,杨百愚,等.外物形状对航空发动机压气机转子叶片撞击损伤的影响[J].应用力学学报,2014,31(6):825-829.
- [2] CHAI Q,LI J S,YANG B Y,et al.Effects of foreign object shape on the aero-engine compressor blade impacted damage[J].Chinese Journal of Applied Mechanics,2014,31(6):825-829.
- [3] LIU H H,CHEN H J,LIU W J,et al.Numerical analysis of flow-thermal coupling in micro-plasma welding pool of thin-wall part[J].China Welding,2018,27(2):13-18.
- [4] 王昂洋,何建萍,袁鑫韬,等.脉冲微束等离子弧焊电弧的光辐射强度动态分布特征[J].焊接学报,2016,37(7):70-74.
- [5] MANIKANDAN S G K,SIVAKUMAR D,RAO K P,et al.Effect of weld cooling rate on Laves phase formation in Inconel 718 fusion zone[J].Journal of Materials Processing Technology,2014,214(2):358-364.
- [6] MANIKANDAN S G K,SIVAKUMAR D,KAMARAJ M,et al.Laves phase control in Inconel 718 weldments[J].Materials Science Forum,2012,710:614-619.
- [7] 武传松,孟祥萌,陈姬,等.熔焊热过程与熔池行为数值模拟的研究进展[J].机械工程学报,2018,54(2):1-15.
- [8] WU C S,MENG X M,CHEN J,et al.Progress in numerical simulation of thermal processes and weld pool behaviors in fusion welding[J].Journal of Mechanical Engineering,2018,54(2):1-15.
- [9] 韩志勇,秦川,雷娟娟,等.TC4 钛合金微束等离子弧堆焊接头成形研究[J].焊接技术,2015,44(8):10-13.
- [10] HAN Z Y,QIN C,LEI J J,et al.Study on joint forming of TC4 titanium alloy by micro plasma arc welding[J].Welding Technology,2015,44(8):10-13.
- [11] DUROCHER J,RICHARDS N L.Evaluation of the low heat input process for weld repair of nickel-base superalloys[J].Journal of Materials Engineering and Performance,2011,20(7):1294-1303.
- [12] JANAKI RAM G D,VENUGOPAL REDDY A,PRASAD RAO K,et al.Microstructure and tensile properties of Inconel 718 pulsed Nd-YAG laser welds[J].Journal of Materials Processing Technology,2005,167(1):73-82.
- [13] BARUAH M,BAG S.Influence of heat input in microwelding of titanium alloy by micro plasma arc[J].Journal of Materials Processing Technology,2016,231:100-112.

可以加工出排布均匀一致的结构化表面。

(2) 在叶序排布中, 振幅与磨粒叶序系数的比值为 1.482 1 时, 工件表面平台面积近似相等, 网纹均匀一致; 此时增大振幅和叶序系数, 网纹密度就会减小, 单个平台面积增大。

(3) 叶序排布相较于阵列排布和错位排布, 研磨更充分, 平台面积也更均匀。

参考文献:

- [1] LUO Y H, YUAN L, LI J H, et al. Boundary layer drag reduction research hypotheses derived from bio-inspired surface and recent advanced applications [J]. *Micron*, 2015, 79: 59-73.
- [2] XIE J, ZHUO Y W, TAN T W. Experimental study on fabrication and evaluation of micro pyramid-structured silicon surface using a V-tip of diamond grinding wheel [J]. *Precision Engineering*, 2011, 35(1): 173-182.
- [3] MALSHE A, RAJURKAR K, SAMANT A, et al. Bio-inspired functional surfaces for advanced applications [J]. *CIRP Annals*, 2013, 62(2): 607-628.
- [4] BRUZZONE A A G, COSTA H L, LONARDO P M, et al. Advances in engineered surfaces for functional performance [J]. *CIRP Annals*, 2008, 57(2): 750-769.
- [5] DENKENA B, KÄSTNER J, WANG B. Advanced microstructures and its production through cutting and grinding [J]. *CIRP Annals*, 2010, 59(1): 67-72.
- [6] 高作斌, 马伟, 邓效忠, 等. 圆锥滚子定姿态贯穿式超精

研凸度形成机理分析 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(23): 96-104.

GAO Z B, MA W, DENG X Z, et al. Analysis of crown generating mechanism in fixed posture through-feed superfinishing of taper rollers [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(23): 96-104.

- [7] MIKOLAJCZYK T, FAS T, KŁODOWSKI A, et al. Computer aided system for superfinishing process control [J]. *Procedia Technology*, 2016, 22: 48-54.
- [8] CHANG S H, FARRIS T N, CHANDRASEKAR S. Experimental analysis on evolution of superfinished surface texture [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 203(1/2/3): 365-371.
- [9] 申芳芳, 张万里, 李德志. 植物叶序研究的源流与发展 [J]. *东北林业大学学报*, 2006, 34(5): 83-86.
- SHEN F F, ZHANG W L, LI D Z. Origins and development of researches on phyllotaxis [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2006, 34(5): 83-86.
- [10] 车东泽, 吕玉山, 陈天宇, 等. 用磨粒叶序排布砂轮磨削外圆生成的凹坑表面仿真 [J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2019, 39(1): 47-53.
- CHE D Z, LV Y S, CHEN T Y, et al. Simulation of the dimpled surface generated by grinding outer circle with abrasive phyllotactic arrangement wheel [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2019, 39(1): 47-53.

(责任编辑: 张楠)

(上接第 25 页)

- [11] DESAI R S, BAG S. Influence of displacement constraints in thermomechanical analysis of laser micro-spot welding process [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, 16(2): 264-275.
- [12] MANVATKAR V, DE A, SVENSSON L E, et al. Cooling rates and peak temperatures during friction stir welding of a high-carbon steel [J]. *Scripta Materialia*, 2015, 94: 36-39.
- [13] 张冬梅, 崔海超, 杨尚磊, 等. Inconel718 激光焊接接头组织与热影响区裂纹研究 [J]. *材料导报*, 2016, 30(8): 96-99.
- ZHANG D M, CUI H C, YANG S L, et al. Microstructures and microfissuring in the HAZ of Inconel 718 welds by laser welding [J]. *Materials Review*, 2016, 30(8): 96-99.
- [14] GAO X L, ZHANG L J, LIU J, et al. Effects of weld cross-section profiles and microstructure on properties of pulsed Nd:YAG laser welding of Ti₆Al₄V sheet [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 72(5/6/7/8): 895-903.
- [15] DAI S J, GONG M, WANG L W, et al. Research on cooling method in surfacing repair process of aero compressor blade [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 1-19.

- [16] 龚森, 戴士杰, 贾鹏, 等. 航空发动机叶片 MPAW 修复传热建模及冷却方法 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(7): 24-30.
- GONG M, DAI S J, JIA P, et al. Heat transfer modeling and cooling method for aeroengine blade MPAW Repair [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(7): 24-30.
- [17] BENOIT A, JOBEZ S, PAILLARD P, et al. Study of Inconel 718 weldability using MIG CMT process [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2011, 16(6): 477-482.
- [18] NÄSSTRÖM J, BRÜCKNER F, KAPLAN A F H. Measuring the effects of a laser beam on melt pool fluctuation in arc additive manufacturing [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2019, 25(3): 488-495.
- [19] IDOWU O A, OJO O A, CHATURVEDI M C. Microstructural study of transient liquid phase bonded cast Inconel738 LC superalloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2006, 37(9): 2787-2796.
- [20] 唐琪, 陈静青, 陈鹏, 等. 基于有限元的激光增材过程熔化热积累模拟 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(7): 100-104.
- TANG Q, CHEN J Q, CHEN P, et al. Finite element simulation of melting heat accumulation in laser additive manufacturing [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(7): 100-104. (责任编辑: 张楠)