

预热温度对火焰筒激光沉积质量影响的数值模拟研究



张莹¹, 梁帅¹, 罗睿敏^{1,2}

1. 中国民航大学, 天津 300300

2. 中国商飞民用飞机试飞中心, 上海 200232

摘要:航空发动机火焰筒极易出现各类损伤,因此研究其修复技术具有重要意义。为研究预热温度对激光沉积修复火焰筒内壁质量的影响,使用某有限元分析软件对火焰筒模型进行了顺序热力耦合数值模拟。结果表明,预热基体可以有效减小残余应力的分布范围,并消除局部应力集中现象;预热后基体表面的残余应力峰值升高,分布范围增大,但局部应力集中现象减少;沉积层周围沿径向方向的残余应力峰值降低,沿径向方向残余应力随距离减小。通过研究不同预热温度下火焰筒模型激光沉积后的残余应力,得到火焰筒激光沉积修复的最佳预热温度为 300°C,为实际修复过程提供了预热温度参考。

关键词:火焰筒; 激光沉积; 数值模拟; 预热; 残余应力场

中图分类号: TG442

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.12.008

燃烧室是现代航空发动机的主要动力来源。火焰筒作为燃烧室的重要组成部分,是燃烧发生的主要场所,其性能直接决定航空发动机的推重比^[1]。然而火焰筒长期服役在高温高压的恶劣环境中,较容易出现烧穿、烧蚀等严重损伤,此时需要采取一定的手段对其进行修复以恢复适航性能。激光沉积技术作为一种先进的增材制造手段,已广泛应用于航空发动机结构件的修复中^[2]。但由于火焰筒具有薄壁特性,加之内部结构复杂、刚性较差,因此需要对激光沉积过程中的残余应力进行控制,以避免对后续的加工及装配产生影响^[3],其中,预热基体是一种控制残余应力的有效方法,国内外许多学者已经对此进行了研究。苏宇航等^[4]研究了基体预热温度对机匣等离子喷涂残余应力场的影响,发现对基体进行预热可以有效减小最大等效应力;渠志刚等^[5]分析了不同的基体预热温度对涂层制备后残余应力的影响,发现基体预热温度在一定范围内可以使残余应力最小;王冉等^[6]对不同基体预热温度下在钛合金表面制备熔覆层的性能进行了分析,发现预热可以有效降低应力集中;Asadi 等^[7]对不同焊管材料和焊条材

料的多道次惰性气体保护电弧焊(TIG)的焊缝温度场和残余应力场进行了数值模拟,发现随着基体预热温度的升高,残余应力值会相应减小。综上所述,对基体进行预热可以有效控制残余应力的分布范围与大小,减小残余应力对涂层或焊缝区域性能的影响。但目前的研究多针对机匣的热喷涂、焊接或者平板基体模型的激光熔覆涂层性能,针对高温镍基合金火焰筒激光沉积过程的研究较少,而研究预热基体对火焰筒激光沉积后残余应力分布规律有利于指导实际修复应用。

因此,对不同预热温度下 IN718 合金火焰筒模型激光沉积过程进行研究,通过某仿真软件获得沉积过程中的温度场数据,使用顺序热-力耦合法获得沉积结束后的残余应力场数据,从而得出预热温度对沉积后残余应力的影响,改善激光沉积修复火焰筒的性能。

1 数值模拟

本文所提研究的主要流程如图 1 所示。首先在前处理中建立热力耦合模型,选择热源模型并建立火焰筒有限

收稿日期: 2024-06-05; 退修日期: 2024-08-26; 录用日期: 2024-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(52172360)

引用格式: Zhang Ying, Liang Shuai, Luo Ruimin. Numerical simulation of influence of preheating temperature on laser deposition quality in flame tube[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(12): 60-66. 张莹, 梁帅, 罗睿敏. 预热温度对火焰筒激光沉积质量影响的数值模拟研究[J]. 航空科学技术, 2024, 35(12): 60-66.

元模型。随后通过预定义场功能对火焰筒模型施加不同的预热温度,之后进行顺序热力耦合模拟,得到过程温度场及残余应力场,对数据进行后处理分析,最终得到最佳基体预热温度。

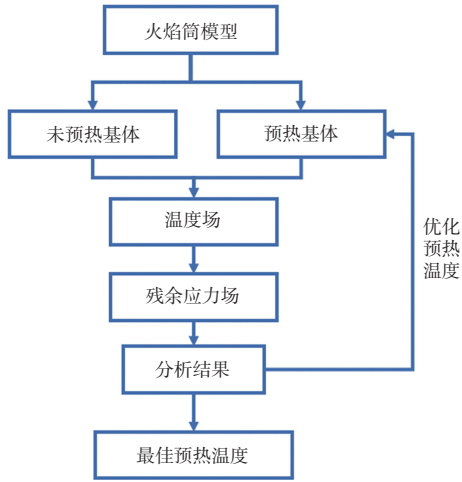


图1 研究内容流程

Fig.1 Research content flow chart

1.1 热力耦合模型

激光沉积过程中熔池温度变化迅速,其温度场的计算属于非线性瞬态热传导问题,热传导方程可由非线性传导热方程表示

$$\frac{\partial \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} + H(T) - \rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

式中, λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别为镍基合金基体材料在 x 、 y 、 z 方向上的热导率; $H(T)$ 为材料的相变潜热; $\rho(T)$ 为材料密度; $c(T)$ 为比热容; T 为温度场分布; t 为时间。

在温度场计算过程中,考虑基体与沉积层对周围环境介质存在的对流辐射热交换,其中热对流可以用牛顿方程描述

$$q_a = -h_a(T_s - T_a) \quad (2)$$

式中, q_a 为基体与涂层对周围空气介质的热交换; h_a 为热对流交换系数,设置为 $10 \times 10^{-6} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; T_s 为基体与涂层表面温度, T_a 为周围环境温度,设置为 20°C 。

考虑到通过热辐射向周围环境损失的热量,其表达式为

$$q_r = -\varepsilon \sigma \left[(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4 \right] \quad (3)$$

式中, ε 为热辐射系数,取 0.8; σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数,其数值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

在温度场分析结束后,采用顺序热-力耦合方式对应力应变场进行分析,计算中时间增量步内材料总应变增量 $d\varepsilon$ 可表示为

$$d\varepsilon = d\varepsilon_e + d\varepsilon_p + d\varepsilon_T \quad (4)$$

式中, $d\varepsilon_e$ 为弹性应变增量; $d\varepsilon_p$ 为塑性应变增量; $d\varepsilon_T$ 为热应变增量。此外,时间增量步内的热应力增量可以表示为

$$d\sigma = D_e d\varepsilon_e = D_e (d\varepsilon_e - d\varepsilon_p - d\varepsilon_T) \quad (5)$$

式中, $d\sigma$ 为应力增量; D_e 为弹性刚度矩阵。

残余应力是一种存在于自由体中且边界上没有外力或约束的自平衡内应力^[8],在激光沉积的过程中,由于熔池温度急升急降,温度梯度较大,故残余应力的主要表现为热应力,其表达式如下^[9]

$$\sigma_T = \frac{E_c E_s t_s \times (\alpha_c - \alpha_s) \times \Delta T}{(1 - \nu)(E_s t_s + E_c t_c)} \quad (6)$$

式中, σ_T 为基体中的残余热应力, ΔT 为熔池温度与基体初始温度之差,无预热时初始温度为室温, α 为热膨胀系数, E 为杨氏模量, t 为基体与沉积层厚度, ν 为泊松比。当 $\alpha_c < \alpha_s$ 时,基体内会产生压应力,当 $\alpha_c > \alpha_s$ 时,基体内会产生拉应力。由式(1)可知,通过预热基体的方式可以减小熔池温度与基体之间的温度梯度,进而减小基体中的残余热应力。

1.2 热源模型

热源模型的选择直接影响温度场的计算结果与精准度^[10],激光沉积过程中的热源可以使用高斯热源来近似描述,其表达式如下^[11]

$$q(r) = q_m \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) \quad (7)$$

$$q_m = \frac{3}{\pi R^2} Q \quad (8)$$

$$Q = \eta k p \quad (9)$$

式中, $q(r)$ 为距离圆心 r 处的热流密度大小; R 为光斑直径; Q 为有效激光功率; η 为能够作用在涂层表面的有效功率因数; k 为高斯热源功率与整个系统激光功率的比值; p 为实际的激光功率。

1.3 有限元模型

根据发动机手册建立的简化后火焰筒扇形段模型如图2所示,其中火焰筒壁厚度为 2.5mm,内壁直径为 664mm,单段宽度为 46.5mm,预制槽长度为 11.6mm,宽度为 4mm,倾斜角为 60° ,深度为 0.4mm。网格划分后的模型如图3所示,其中结点总数 207354 个,单元总数 131975 个,沉积层单元类型为六面体单元 DC3D8,火焰筒基体单元类型为四面体单元 DC3D10,对沉积区

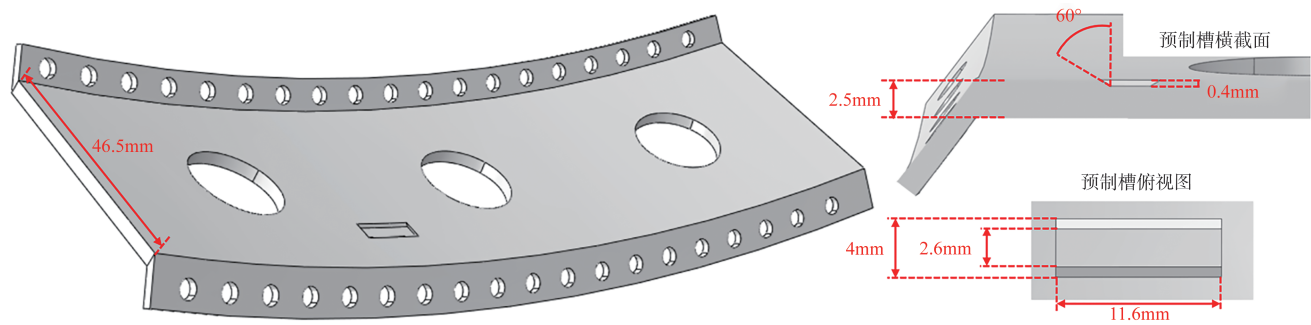


图2 有限元模型
Fig.2 Finite element model

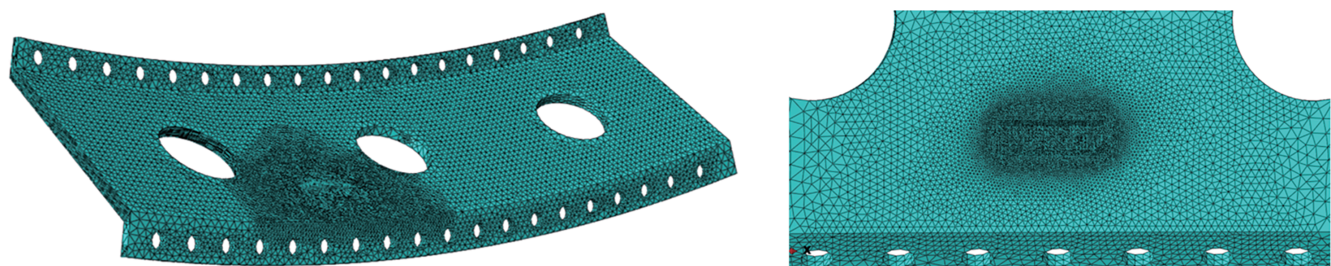


图3 模型网格划分
Fig.3 Model meshing

域附近进行加密处理。在热分析步中分别设置未预热状态及 100~500℃(间隔为 50℃)共 10 种预定义温度场以模拟基体预热状态,将热源施加在沉积层上。激光沉积结束后散热 1000s 以冷却至室温。在热分析结束后,将二者单元类型转换为力学分析单元进行顺序热力耦合分析^[12]以获得沉积过程及冷却过程中的残余应力场。

为研究预热火焰筒基体对激光沉积修复后残余应力的规律,在基体表面设置两条参考路径,分别为沿水平方向的参考路径 1 及沿深度方向的参考路径 2,如图 4 所示。

火焰筒一般由高温镍基合金制成,故模拟中选用的材料为 IN718 合金,其材料参数见表 1。

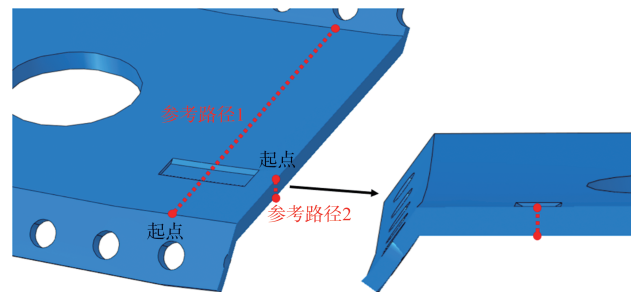


图4 参考路径设置
Fig.4 Reference path setting

表1 材料化学成分

Table 1 Chemical composition of material

化学成分	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Mn	C	Al
成分	基体	53.25	18.79	18.57	5.22	3.01	1.00	0.15	—
占比/%	粉末	52.6	18.75	余量	5.25	3.03	0.97	0.03	0.042

2 结果分析

2.1 温度场

图 5 为未预热基体下的温度场过程云图,激光功率为 1900W,扫描速度为 8mm/s。数值模拟过程中熔池温度达到 IN718 合金熔点,熔池形状均呈现有彗尾形的近似圆形形状,符合高斯热源的特点,其中熔池最高温度为 1585℃。由于采用短边回型向内扫描方式^[13],单道移动路径较短,且前后两道沉积之间距离较远,加之激光沉积具有急冷急热的特点,因此产生的热累积量较小,从而热影响区较小。

2.2 残余应力场

在激光沉积过程中,火焰筒材料受热膨胀并在冷却过程中收缩,这种热循环会导致残余应力产生,且火焰筒由于其较高的表面积与体积比,更容易受热变形。图 6 为未预热基体下的残余应力场结果。可以看出,火焰筒基体在未进行预热时冷却 1000s 后的残余应力场分布范围较大,主要

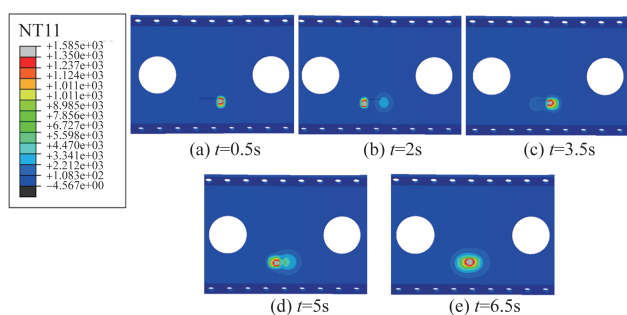


图5 温度场云图

Fig.5 Temperature field nephogram

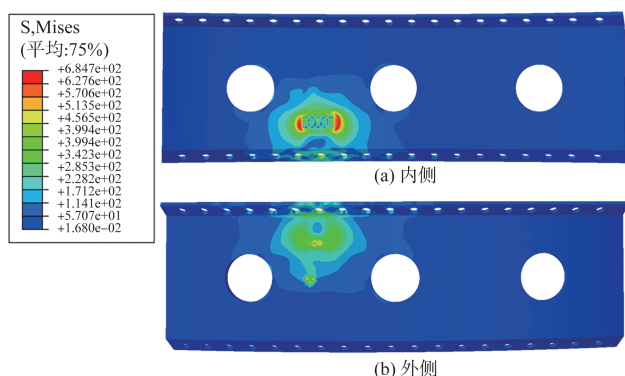


图6 完全冷却后的残余应力场云图

Fig.6 Nephogram of residual stress distribution after complete cooling

包括沉积层附近、上侧装配孔及下侧冷却孔,可能导致装配孔与冷却孔变形、裂纹等不良后果,且存在一定的应力集中现象,主要位于沉积层首道与末道两侧。

分别对 100~500℃ 预热下的基体进行顺序热力耦合数值模拟,结果如图 7 所示。由图 7 可知,预热条件下基体的残余应力分布范围较为接近,均为沉积层周围及下侧部分冷却孔附近。对基体进行预热处理可以明显减小残余应力分布范围,且可以消除沉积层首道与末道附近的应力集中现象。这是由于预热可以减少沉积过程中沉积层材料与火焰筒基体的温度梯度,而较小的温度梯度会使得热应力的分布更加均匀,从而消除局部区域应力集中,同时残余应力会在更大范围内分布在火焰筒壁面其他区域中,而非集中在沉积层附近,故残余应力的集中范围减小。同时,在预热条件下,材料更容易发生塑性变形和应力松弛,在沉积过程中更容易发生塑性流动,也会使得沉积层附近的应力分布范围减小。

提取不同预热温度下冷却至室温后参考路径 1 上的应力分布情况,如图 8 所示。由图 8 可以看出,基体预热后沿水平方向残余应力较未预热状态增大,在沉积层附近出现

峰值,随后逐渐降低,远离沉积层处残余应力降至接近 0,这是由于预热基体后,整个基体和沉积层的温度提高,温度梯度相对较小,但同时表面材料在加热和冷却过程中也会经历更大的热膨胀和收缩,导致更大的热应力积累,因此残余应力值增大。预热温度为 100℃ 时残余应力峰值最高达到 610MPa,预热温度为 200℃ 时残余应力峰值降至 550MPa,预热温度为 300℃ 时残余应力峰值进一步降至 476MPa,预热温度为 400℃ 时残余应力峰值较预热温度 300℃ 升至 527MPa,预热温度为 500℃ 时残余应力峰值为 550MPa。残余应力峰值出现了先减小后增大的非线性变化,这是由于随着预热温度的增加,熔池与周围基体的温度差值随之降低,基体冷却速率放缓,能够更好地适应沉积层的热收缩,使得残余应力峰值减小;但随着预热温度进一步升高至临界值时,基体材料会在高温下产生更大的热膨胀,同时材料的强度进一步减弱,导致应力更容易集中,从而在冷却过程中产生了更高的热应力,冷却后的残余应力峰值反而会逐渐增大。因此预热温度为 300℃ 时基体残余应力峰值最低,分布范围最小。同时,预热后沉积层附近的应力循环曲线波动较未预热状态更加平缓,未出现局部应力集中现象,原因在于预热导致的较小的温度梯度会使热应力在基体内和沉积层内分布更为均匀,从而使得局部应力集中减少,有利于减小激光沉积修复对火焰筒壁面力学性能产生的不利影响。

提取不同预热温度下冷却至室温后参考路径 2 上的应力分布情况,如图 9 所示。参考路径 2 位于未预热状态的应力集中位置。由图 9 可以看出,沿深度方向残余应力随距离逐渐减小,且 9 种预热温度下起点处残余应力值均较未预热状态降低,表明预热基体可以有效减小应力集中现象,这是由于在预热条件下,基体材料更容易发生塑性变形,沉积层周围应力集中处的径向残余应力由于塑性变形效应而得以部分释放,从而表现为较未预热状态下残余应力峰值减小。其中未预热状态该点处的残余应力值为 654MPa,预热 100℃ 时的残余应力值为 576MPa,预热 200℃ 时的残余应力值为 517MPa,预热 300℃ 时的残余应力达到最低值 436MPa,预热 400℃ 时的残余应力值转而升高至 441MPa,预热 500℃ 时残余应力峰值为 450MPa,预热温度为 300℃ 时较未预热状态残余应力值减小 33.3%,有效减小了火焰筒壁面沿厚度方向的残余应力,有利于保持火焰筒薄壁结构的力学性能。

为进一步说明预热对激光沉积后残余应力分布情况的影响,取未预热状态与预热 300℃ 状态下的沉积层横截面如

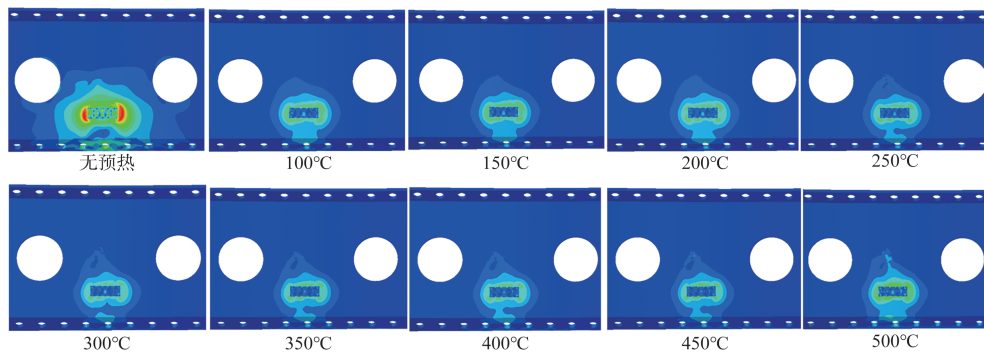


图7 不同预热温度下的残余应力分布情况

Fig.7 Residual stress distribution at different preheating temperatures

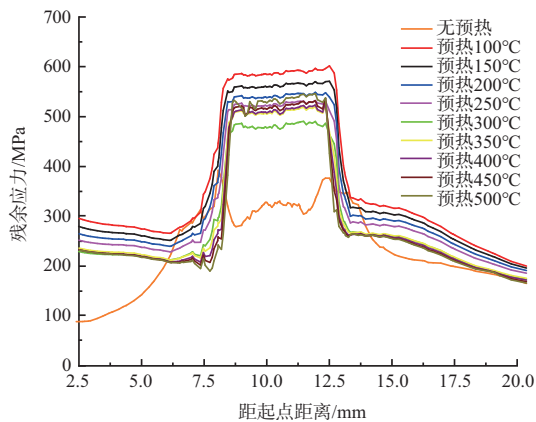


图8 参考路径1上的残余应力分布曲线

Fig.8 Residual stress distribution curve on reference path 1

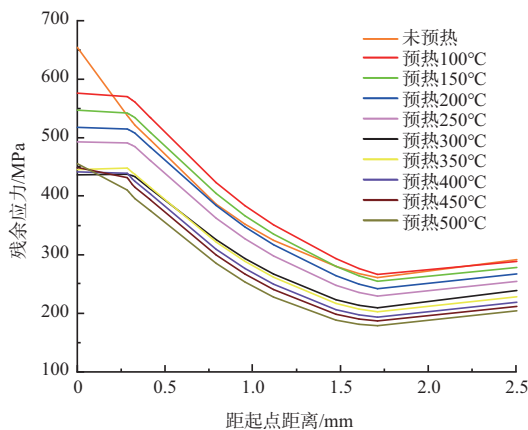


图9 参考路径2上的残余应力分布曲线

Fig.9 Residual stress distribution curve on reference path 2

图10所示。由于预热会使残余应力在更大范围内分布在火焰筒壁面内,同时残余应力值会增大,故预热300°C状态下的火焰筒壁面内残余应力相对集中范围较未预热状态减小,沉积层与基体接触面附近的应力集中现象有所消除,可

以在一定程度上避免裂纹的产生。同时预热后残余应力的集中范围在径向上有所减小,下侧冷却孔附近的应力集中现象也有所减小,有利于减小热应力导致的塑性变形范围,避免火焰筒薄壁结构特性改变。

3 结论

通过研究,可以得出以下结论:

(1)预热基体可以有效减小火焰筒激光沉积后的残余应力集中范围,并且消除沉积层首道与末道附近的应力集中现象,有利于减小激光沉积修复过程对火焰筒力学性能的影响。

(2)预热基体会使得基体表面的残余应力增大,同时会使径向方向残余应力降低。预热温度为300°C时残余应力分布范围较小,应力峰值较低,针对激光沉积修复火焰筒壁面过程的基体预热温度应为300°C左右。

AST

参考文献

- [1] 张宝诚. 航空发动机燃烧室的现状和发展[J]. 航空发动机, 2013, 39(6): 67-73.
Zhang Baocheng. Status and development of aeroengine combustors[J]. Aeroengine, 2013, 39(6): 67-73. (in Chinese)
- [2] 刘珍峰, 李正佳. 激光熔覆技术在航空工业中的应用[J]. 航空精密制造技术, 2007, 43(1): 37-40.
Liu Zhenfeng, Li Zhengjia. Application of laser cladding in aviation industry[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2007, 43(1): 37-40. (in Chinese)
- [3] 孔宪俊, 刘世文, 侯宁, 等. 激光加热辅助车削高温合金薄壁件变形仿真及试验研究[J]. 航空科学技术, 2024, 35(2): 75-80.
Kong Xianjun, Liu Shiwen, Hou Ning, et al. Simulation and ex-

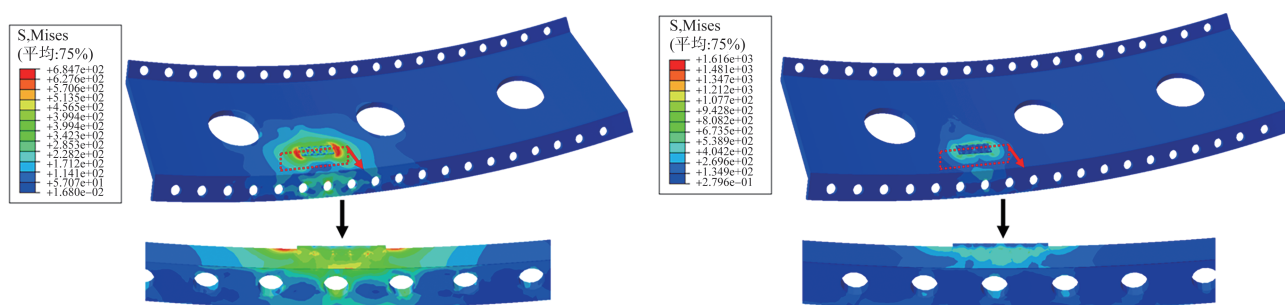


图10 参考路径2上的残余应力分布情况

Fig.10 Residual stress distribution on reference path 2

perimental study on deformation of thin-walled superalloy parts in laser-assisted turning[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024,35(2):75-80. (in Chinese)

- [4] 苏宇航, 温祯洪, 罗军明, 等. 预热温度对机匣等离子喷涂铝硅可磨耗封严涂层应力场影响的数值模拟[J]. 表面技术, 2023,52(10):335-349.

Su Yuhang, Wen Zhenhong, Luo Junming, et al. Effect of substrate preheating temperature on residual stress of aluminum-silicon abrasion-sealing coatings by plasma spraying [J]. Surface Technology, 2023,52(10):335-349. (in Chinese)

- [5] 渠志刚, 贺辛亥, 刘江南, 等. 基体预热温度对涂层表面形貌及残余应力影响的数值模拟[J]. 表面技术, 2017,46(7):57-64.

Qu Zhigang, He Xinhai, Liu Jiangnan, et al. Numerical simulation of influence of substrate preheating temperature on coating morphology and residual stress[J]. Surface Technology, 2017,46(7):57-64. (in Chinese)

- [6] 王冉, 王玉玲, 姜芙林, 等. 基体预热对激光熔覆制备 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 陶瓷涂层裂纹敏感性的影响[J]. 表面技术, 2022,51(3): 342-352.

Wang Ran, Wang Yuling, Jiang Fulin, et al. Effect of substrate preheating on crack sensitivity of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ ceramic coating prepared by laser cladding[J]. Surface Technology, 2022,51(3): 342-352. (in Chinese)

- [7] Asadi P, Alimohammadi S, Kohantorabi O, et al. Effects of material type, preheating and weld pass number on residual stress of welded steel pipes by multi-pass TIG welding[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2020, 16:100462.

- [8] Noyan I C, Cohen J B. Residual stress: measurement by diffraction and interpretation[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1987.

- [9] Kadolkar P B, Watkins T R, De Hosson J T M, et al. State of residual stress in laser-deposited ceramic composite coatings on aluminum alloys[J]. Acta Materialia, 2007, 55(4): 1203-1214.

- [10] 张平, 马琳, 赵军军. 激光熔覆数值模拟过程中的热源模型[J]. 中国表面工程, 2006, 19(Z1): 161-164.

Zhang Ping, Ma Lin, Zhao Junjun, et al. The heat source model of the numerical simulation in the laser cladding[J]. China Surface Engineering, 2006,19(Z1): 161-164. (in Chinese)

- [11] 张天刚, 张倩, 姚波, 等. TC4 表面 Ni 基激光熔覆层温度场和应力场的数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0314003.

Zhang Tiangang, Zhang Qian, Yao Bo, et al. Numerical simulation of temperature field and stress field of Ni-Based laser cladding layer on TC4 surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0314003. (in Chinese)

- [12] 张莹, 罗睿敏, 梁帅. 基于热-力耦合的航空发动机叶片堆焊修复数值模拟[J]. 航空科学技术, 2024,35(7):76-86.

Zhang Ying, Luo Ruimin, Liang Shuai. Numerical simulation of aero-engine blade surfacing repair based on thermal-mechanical coupling[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024,35(7):76-86. (in Chinese)

- [13] 柴蓉霞, 田妍, 周新建, 等. 回字形扫描路径下高速激光熔覆数值模拟及实验研究[J]. 中国激光, 2023, 50(8): 0802205.

Chai Rongxia, Tian Yan, Zhou Xinjian, et al. Numerical simulation and experimental study of high-speed laser cladding under circular scanning path[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(8): 0802205. (in Chinese)

Numerical Simulation of Influence of Preheating Temperature on Laser Deposition Quality in Flame Tube

Zhang Ying¹, Liang Shuai¹, Luo Ruimin^{1,2}

1. Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

2. COMAC Civil Aircraft Test Flight Centre, Shanghai 200232, China

Abstract: The flame cylinder of aeroengine is prone to various kinds of damage, so it is of great significance to study its repair technology. In order to study the effect of preheating temperature on the inner wall quality of flame tube repaired by laser deposition, a finite element analysis software was used to conduct sequential thermal coupling numerical simulation of flame tube model. The results show that preheating matrix can effectively reduce the distribution range of residual stress and eliminate the phenomenon of local stress concentration. After preheating, the peak value of residual stress on the surface of the matrix increases, the distribution range increases, but the local stress concentration decreases. The peak value of residual stress along the radial direction decreases, and the residual stress along the radial direction decreases with the distance. By studying the residual stress after laser deposition of flame tube model at different preheating temperatures, the optimal preheating temperature for laser deposition repair of flame tube is 300°C, which provides a reference for the preheating temperature in the actual repair process.

Key Words: flame tube; laser deposition; numerical simulation; preheat; residual stress field

Received: 2024-06-05; **Revised:** 2024-08-26; **Accepted:** 2024-10-16

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (52172360)