

张雪, 夏玉峰, 滕海灏, 等. 多道多层堆焊成形数值模拟及残余应力研究[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(3): 408-414

多道多层堆焊成形数值模拟及残余应力研究

张雪, 夏玉峰, 滕海灏, 彭梦霞, 金力
(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要: 本文利用 Marc 有限元软件对高温合金的多道多层堆焊过程进行了数值模拟, 讨论了堆焊厚度和堆焊路径对焊后残余应力的影响。结果表明, 堆焊厚度的增加会导致横向残余应力峰值增大, 并使堆焊层局部应力的方向改变, 从而受到多向应力作用, 因此堆焊层在满足使用要求的前提下, 堆焊厚度不易过大。同时, 由于受到前后焊缝温度的影响, 堆焊层间存在应力释放的现象。另外, 对比了“逐道堆焊”和“逐层堆焊”过程中焊后残余应力分布情况。“逐层堆焊”相比于“逐道堆焊”所产生的残余应力分布更加均匀, 且残余应力峰值更小。

关键词: 堆焊路径; 堆焊厚度; 数值模拟; 残余应力

中图分类号: TG146.3

DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.20200615

文献标志码: A

文章编号: 1003-8728(2023)03-0408-07

Study on Numerical Simulation and Residual Stress in Multi-channel and Multi-layer Surfacing Welding

ZHANG Xue, XIA Yufeng, TENG Haihao, PENG Mengxia, JIN Li

(School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In this paper, the multi-channel and multi-layer surfacing welding process of Superalloy was simulated via Marc finite element analysis software. The effect of the surfacing thickness and surfacing path on the residual stress after surfacing welding was emphatically discussed. The results showed that in the surfacing welding, the increase in surfacing thickness would lead to the increase in the peak value of the transverse residual stress and the change of the local stress direction inside the welding bead, which results in the surfacing layers are subjected to multi-directional stress. Therefore, on the premise of meeting the use requirements, the surfacing thickness is not suitable to be too large. And because of the influence of the temperature of the front and latter layers, there was a phenomenon of stress release between the surfacing layers. In addition, the residual stress distribution in the process of "channel-by-channel surfacing" and "layer-by-layer surfacing" were compared. The residual stress distribution of "layer-by-layer surfacing" was more uniform than that of "channel-by-channel surfacing", and the peak value of residual stress was smaller.

Keywords: surfacing path; surfacing thickness; numerical simulation; residual stresses

堆焊技术具有灵活性高、效率高、成本低等优点, 广泛应用于材料的维修和防护, 尤其是模具表面修复^[1-2]。传统 5CrNiMo 或 H13 材料在模锻难变形材料时, 由于成形温度高、变形抗力大, 模腔出现了

严重变形、磨损和开裂等现象, 导致模具寿命极低^[3]。卢顺等^[4-5]提出了一种基于铸钢基体的双金属梯度堆焊制备锻模的新方法, 该方法以较为廉价、性能较为普通的铸钢作为基体, 采用梯度增材的方法依次堆焊硬度、强度更高的过渡层和强化层材料, 从而在大幅提高工况最为恶劣的模具型腔表面耐磨性以及抗变形能力的同时, 显著降低模具制造成本, 提高模具寿命。张建生^[6]在双金属梯度堆焊的基础上提出了一种大型锻模夹心层制造新方法, 即在模具基体与过渡层之间堆焊一层封闭的塑性比两者更好

收稿日期: 2021-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775068)

作者简介: 张雪(1996-), 硕士, 研究方向为塑性成型工艺、增材制造, 1269764232@qq.com

通信作者: 夏玉峰, 教授, 博士生导师, xyfeng@cqu.edu.cn

的止裂软材料,使得模具寿命大幅度提升的同时降低了近 50% 成本。Xia 等^[7]提出了“拳头式”锻模设计制造新方法,采用铸钢基体双金属梯度堆焊制备的锻模作为“拳头”的“骨头”,再在其表面电弧增材一层常温下硬度较低但具有良好高温稳定性的合金材料作为“拳头”的“皮肤”,以增强模具在高温下成形难变形材料时的耐磨抗变形能力,进一步提高大型难变形材料锻造用锻模的使用寿命。

焊接残余应力是焊接件在焊接热过程中因变形受到约束而产生的残留在焊接结构中的内应力,其中焊缝金属熔化后再凝固、冷却收缩受到约束而产生的热应力是残余应力的主要部分^[8]。在锻模的制造过程中同样会产生较大的焊接残余应力,其大小直接影响着焊后模具的质量及使用性能,较大的堆焊残余应力会降低模具的刚度和稳定性,服役过程中的抗脆断、抗应力腐蚀开裂等能力也会受到影响^[9]。因此如何有效地预测和降低堆焊残余应力就显得尤为重要。而焊接数值模拟技术是目前广泛应用于预测焊后残余应力的方法,对焊接残余应力的预测和变形一直是研究热点^[10-15]。

本文利用有限元软件 MSC.Marc^[16]建立了钴基高温合金堆焊过程的有限元模型,模拟了其堆焊到铁基基体的过程,并分析了堆焊厚度和堆焊路径对焊后温度场及应力场的影响,理解多道多层高温合金增材过程中残余应力的演变规律对其工艺设计具有指导意义。

1 有限元模型的建立

1.1 几何模型的建立及网格划分

图 1a)为堆焊几何模型,基体尺寸为 180 mm × 100 mm × 50 mm,单层单道焊缝尺寸为 100 mm × 10 mm × 2 mm,焊缝道数为 3 道,每道堆焊 10 层。利用灵活性更高的 Hypermesh 软件进行有限元网格的划分,网格类型采用计算精度更高的六面体网格。在受热源影响较大的焊缝位置及热影响区采用较为精密的网格,而在受热源影响较小的基体部位采用较为稀疏的网格,以提高分析的效率,两者之间采用疏密过渡进行焊缝与基体的节点的匹配。最终绘制得到的如图 1b)所示的三维有限元网格模型。

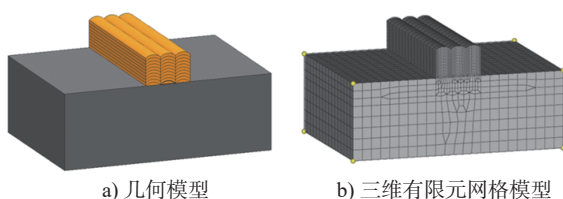


图 1 有限元模型

1.2 材料参数的添加及边界条件的定义

1.2.1 材料参数的定义

选用常温下硬度较高的铁基合金 RMD248 作

为基体材料,化学成分如表 1 所示。堆焊材料选择常温下硬度较低的软焊材钴基高温合金 JLC032,其化学成分如表 2 所示。两种材料在各个温度下的性能参数如表 3 所示^[4,7]。无法从现有资料获知的高温部分数据,根据相关文献,可以综合考虑计算精度和计算效率人为设定^[17]。

表 1 铁基合金 RMD248 各元素的质量分数 %

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	W	V	Fe
0.25	1.61	0.72	0.013	0.004	1.5	5.51	1.69	0.21	1.04	0.24	Bal.

表 2 钴基高温合金 JLC032 各元素的质量分数 %

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe	W	Co
0.21	1	1	0.016	0.007	2.35	27.5	8.75	1.58	0.1	Bal.

表 3 基体材料 RMD248 和堆焊材料 JLC032 性能参数

材料	温度 / °C	热膨胀系数 / $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	弹性模量 / GPa	导热系数 / $[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	比热容 / $[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	屈服强度 / MPa
JLC032	20	11	231	14.8	456	660
	200	12.7	210	16.9	482	636
	400	13.9	197	18.9	522	602
	600	15	181	22.9	573	585
	1000	16.5	160	29.8	685	502
	1500	18.2	68	33.2	825	1
RMD248	20	11.5	34.8		461	1253
	200	13.7	32.5		533	1250
	400	15.2	31.8	24	611	1146
	600	15.7	31.0		778	634
	1000	16.1	21.2		778	202
	1500	16.3	18.5		778	1

1.2.2 焊接热源的选择

本文基于目前广泛采用的电弧增材方法,选用图 2 所示的双椭球热源模型^[18](体积热源)进行堆焊有限元分析。其数学模型以电弧中心所在位置为分界,前后两部分分别用两个 1/4 椭球来描述,双椭球热源的前后两椭球内热源分布的函数如下:

$$q_f = \frac{6\sqrt{3}f_1Q}{\pi a_r b c \sqrt{\pi}} \exp\left(-3\frac{x^2}{a_f^2}\right) \exp\left(-3\frac{y^2}{b^2}\right) \exp\left(-3\frac{z^2}{c^2}\right) \quad (1)$$

$$q_r = \frac{6\sqrt{3}f_2Q}{\pi a_r b c \sqrt{\pi}} \exp\left(-3\frac{x^2}{a_r^2}\right) \exp\left(-3\frac{y^2}{b^2}\right) \exp\left(-3\frac{z^2}{c^2}\right) \quad (2)$$

式中: Q 为焊接总的热输入量; a 、 b 、 c 为椭球形状参数; f_1 、 f_2 为前后椭球热量分布函数, $f_1 + f_2 = 2$ 。

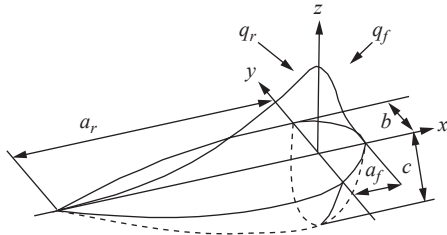


图2 双椭球热源模型

本次分析中热源分别根据焊接路径依次施加在各条焊缝上,每一层焊缝单元采用温度激活的形式,激活位置依靠双椭球热源的热源参数激活,随着热源的移动,在其能量施加范围内的单元逐步被激活,并设置金属熔点温度为 $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2 堆焊厚度对焊接温度场和应力场的影响

2.1 堆焊温度场分析

为了提高基体与堆焊层之间的结合性能,需要确定合理的堆焊层厚度。为了提高计算效率,对堆焊过程的分析模型进行了简化,采用单道多层堆焊有限元模拟分析了堆焊高度对于焊接温度场以及焊后残余应力场的大小及分布的影响规律,一共设置了5组高度参数,依次为 16 mm 、 18 mm 、 20 mm 、 22 mm 和 24 mm 。

图3展示了堆焊高度为 24 mm 时整个模型的温度分布情况。图中温度场随着热源的移动不断变化,在堆焊第一层焊缝时,表层基体受到焊接热源的影响较大,基体熔池位置温度达到了预设金属熔点 $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$,这也使得两种金属之间能够产生较好的冶金结合。

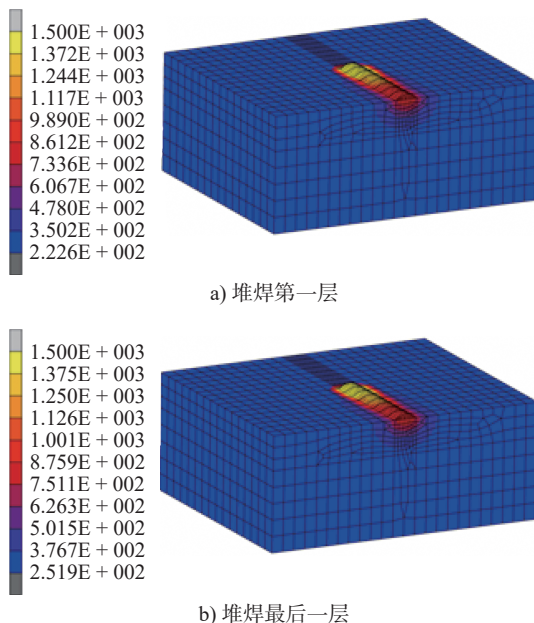


图3 堆焊过程温度场变化

图4为1~5层焊缝表面中点在堆焊过程中的热循环曲线,可以看出,随着堆焊层数的增加,每层焊缝的温度变化愈发平缓。1~5层焊缝的热循环曲线的前两个峰值均达到了熔点温度 $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明在焊接过程中后一层焊缝的热源使前一层焊缝表层发生了重熔,因此两者之间能够实现更好的冶金结合。

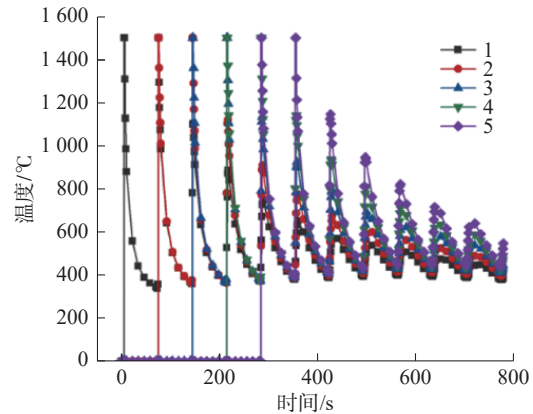


图4 焊缝表层中点热循环曲线

2.2 焊后残余应力场分析

表4为不同高度下的焊后残余应力峰值。随着堆焊高度的增加,横向残余应力峰值从 520 MPa 逐渐上升到了 626 MPa ,增幅达到了 20% 。而堆焊高度的对纵向残余应力峰值的影响则并不明显。

表4 不同高度下的焊后残余应力峰值

堆焊高度/mm	横向残余应力/MPa	纵向残余应力/MPa
16	520.3	710.9
18	544.5	716.6
20	574.0	715.3
22	599.6	715.8
24	626.0	716.4

图5和图6分别为不同堆焊高度下焊件的焊后横向和纵向残余应力分布云图。对于横向残余应力而言,应力较大的区域主要集中在堆焊层焊缝表层以及焊缝与基体连接处。堆焊层上表面以及堆焊层与基体连接处有较大的残余横向拉应力,而堆焊层中间以及堆焊层与基体连接处下方小范围内的材料则主要受残余压应力影响。这是由于远离焊缝的区域对焊缝及其近焊缝区金属的膨胀和收缩存在拘束作用^[19]。当堆焊结束后焊缝温度逐渐降低,上层焊缝由于受到下层焊缝的拘束,其热收缩受到限制而产生拉应力,下层焊缝则受到压应力。而堆焊层与基体连接处则主要受到基体的拘束产生拉应力,连接处下方则受到压应力。同时,随着堆焊高度的增加,堆焊层中部区域由受横向压应力逐渐转变为了受横向拉应力,这将会导致堆焊层受到多向应力的作用,增加了开裂的风险;对于纵向残余应力而

言,高应力区主要集中在堆焊层中上部,且整个焊缝主要受纵向拉应力作用,焊缝与基体连接处及其下

方受纵向压应力作用。堆焊高度对纵向残余应力的分布影响较小。

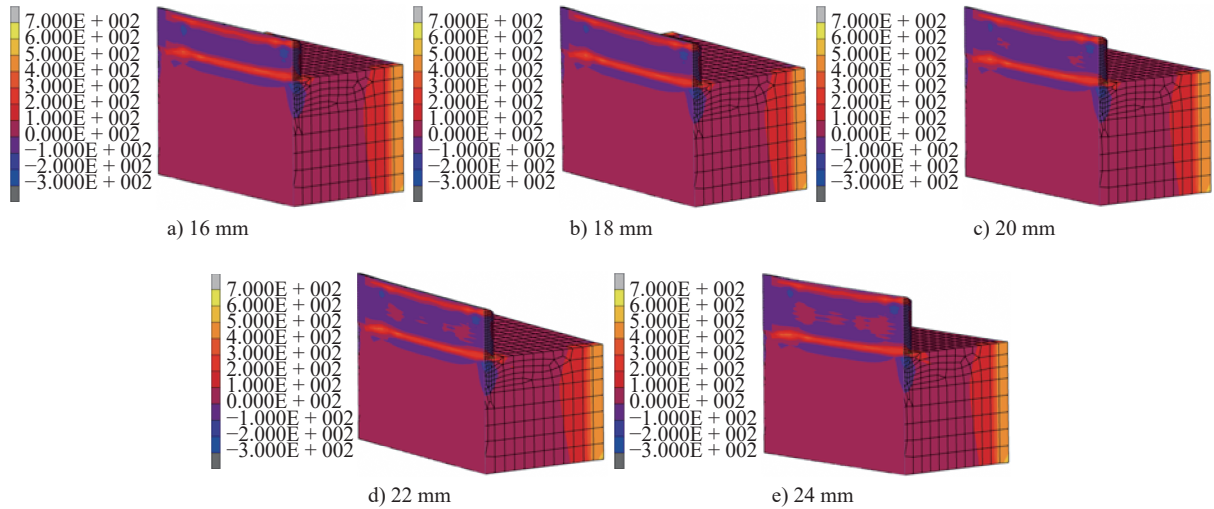


图5 不同堆焊厚度下横向残余应力分布截面图

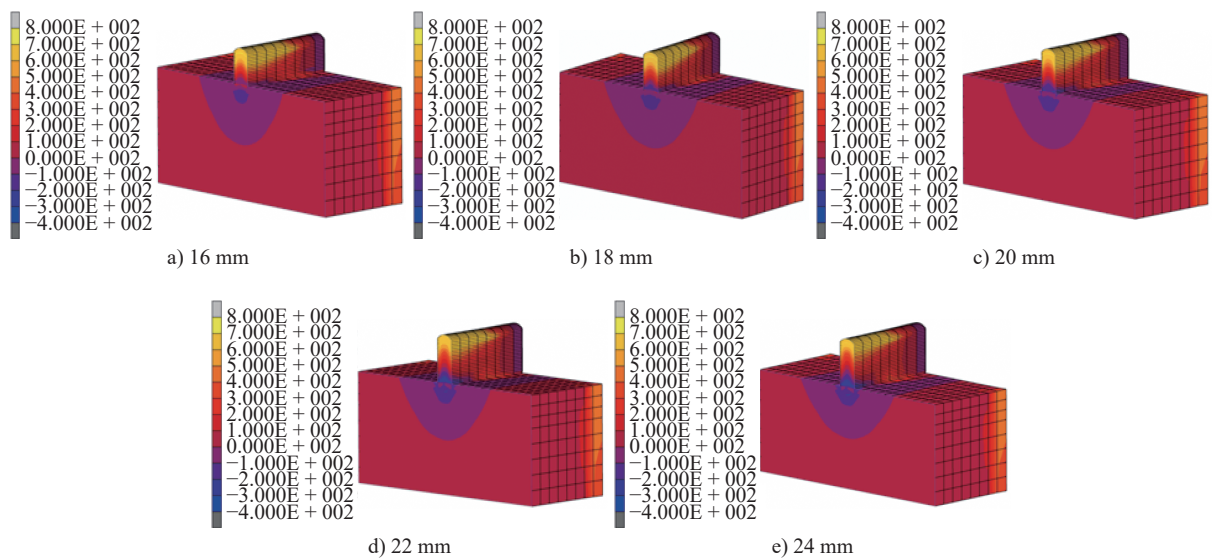


图6 不同堆焊厚度下纵向残余应力分布截面图

取不同堆焊高度下基体与焊道连接处(沿着焊缝)的横向应力,如图7所示,5个堆焊高度的横向应力曲线沿焊接方向的变化规律一致,在靠近起弧点区域出现应力峰值,峰值应力均随着堆焊高度的增加而增大。每增加2 mm的堆焊高度,横向残余应力峰值上升4%~5%。而另一侧,由于热源的加热作用,在靠近终弧点区域则处于应力较小的状态。而焊缝中部的横向残余应力值则随着堆焊厚度的增加而减小。不同高度下取沿着焊缝高度方向的纵向残余应力如图8所示,整个焊缝截面分为纵向拉应力区和纵向压应力区。随着堆焊高度的增加,纵向压应力增大,但纵向拉应力变化不大。对比5个堆焊高度的堆焊层在同一高度位置的纵向残余拉应力大小,堆焊高度越高,其值越小,这主要是由

于受前后焊缝温度的影响,前层对后层进行了预热处理,后层对前层进行了后热处理,导致存在层间应力释放效果^[20]。

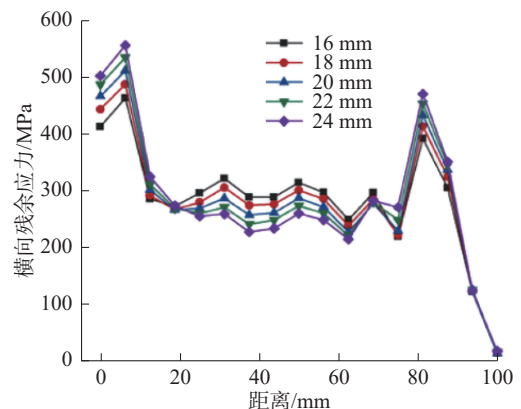


图7 基体与堆焊层连接处横向残余应力分布

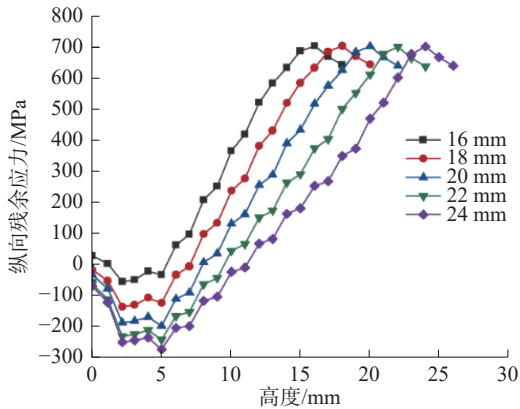


图8 沿堆焊层高度方向焊缝中心纵向残余应力分布

3 堆焊路径对焊接温度场和应力场的影响

3.1 堆焊温度场分析

依据图1的堆焊模型设计了“逐层堆焊”(路径1: 每层从左至右连续堆焊3道, 堆焊10层, 层间冷却时间60 s, 焊后冷却5000 s)和“逐道堆焊”(路径2: 每道连续堆焊10层, 一共3道, 层间冷却时间60 s, 焊后冷却5000 s)两种堆焊方式, 并分别进行了有限元模拟分析。图9为两种堆焊路径下堆焊过程中和冷却完成后的温度场分布。在堆焊过程中, 除了焊缝下层已凝固金属, 焊缝侧面部分金属同样受到热源影响产生重熔。冷却完成后, 两种路径材料的最高温度分别降到了423 °C和436 °C, 焊缝的温度场分布几乎相同。

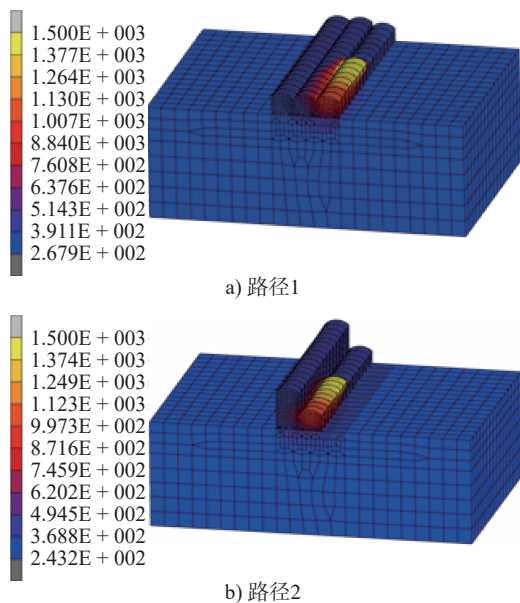


图9 不同堆焊路径温度场分布

3.2 堆焊残余应力场分析

图10展示了两种堆焊路径下焊后整个模型的横向残余应力分布云图。由图10可知: 两者应力分

布情况大体相似, 应力较大的位置均为相邻两道焊缝交界处以及焊缝与基体连接处部分区域; 基体大部分区域和堆焊层表面部分区域受横向残余拉应力, 而堆焊层中间部分则主要分布着较大的残余压应力。相较于第一种堆焊路径, 第二种堆焊路径下横向残余拉应力分布范围更广泛, 横向残余压应力在基体与堆焊层连接下方分布更加不均匀, 增加了堆焊层受到多向应力作用的风险。另外, 图11对比了两种路径下的焊后横向残余应力峰值。“路径2”所产生的拉应力峰值相比于“路径1”增加了22%, 而横向压应力而言, “路径2”产生的峰值比“路径1”减少了11%。

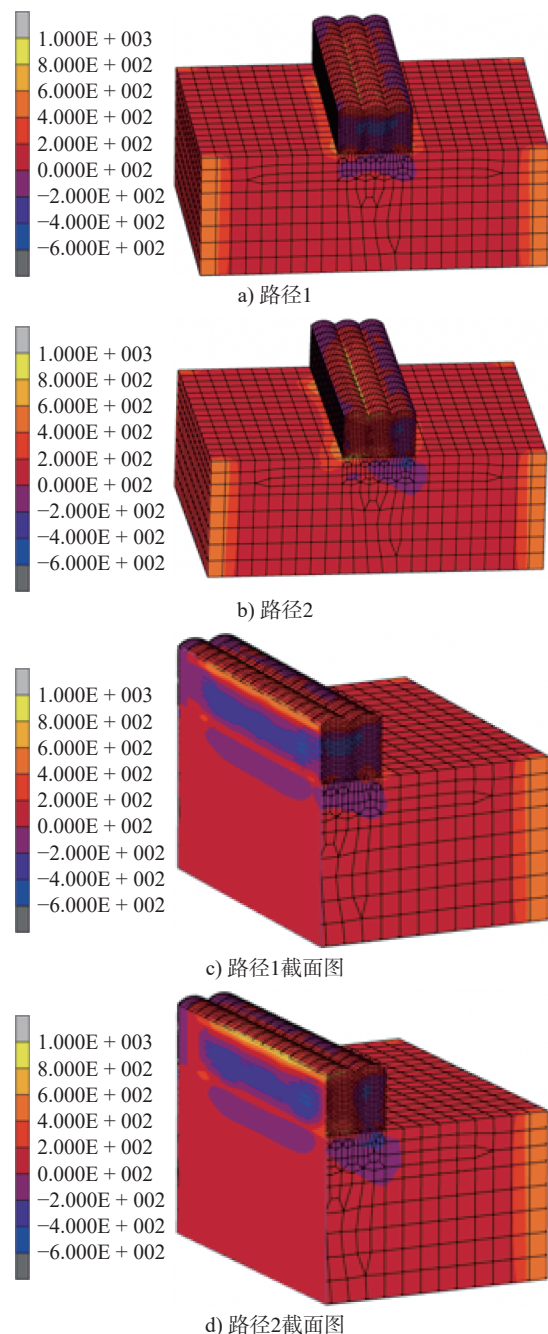


图10 不同堆焊路径下横向残余应力分布

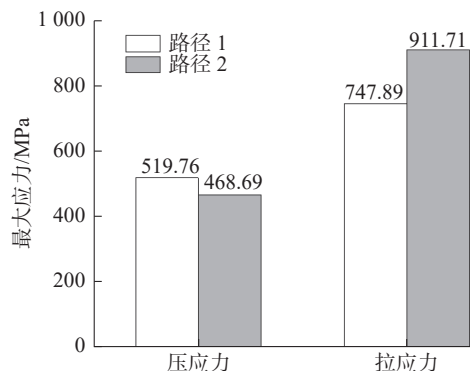


图 11 不同堆焊路径横向残余应力峰值

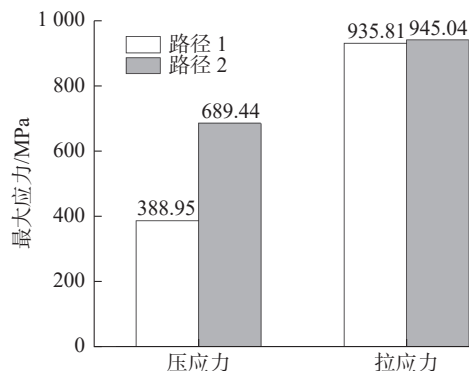


图 13 不同堆焊路径纵向残余应力峰值

图 12 为两种堆焊路径焊后纵向残余应力分布云图。不同堆焊路径下的应力分布有明显差异。对于“路径 1”而言,堆焊层与基体连接处周围主要受纵向压应力,堆焊层上中部分主要受纵向拉应力,并且应力呈现梯度分布,堆焊层自下而上纵向拉应力值逐渐增加,压应力值逐渐减小,且纵向应力均匀分布。而对于“路径 2”而言,焊缝大部分区域受纵向拉应力作用,压应力集中在第一焊道以及堆焊层和基体连接处下方,纵向残余应力分布很不均匀,不利于后续的加工以及应力的消除。图 13 对比了两种路径下的纵向残余应力峰值。由图 13 可知,“路径 2”的纵向残余压应力和拉应力峰值均大于“路径 1”,“路径 2”的纵向拉应力相较于“路径 1”增加了 300 MPa,增加了约 77%。因此,无论从应力值大小还是应力场分布进行分析,“路径 1”均优于“路径 2”。

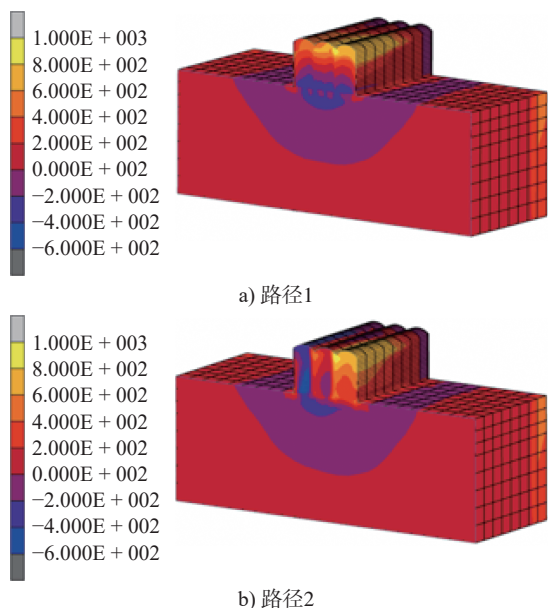


图 12 不同堆焊路径纵向残余应力分布

4 结论

本文利用 Marc 有限元分析软件对在铁基合金表面堆焊多道多层钴基高温合金的过程进行了数值模拟,研究了不同堆焊厚度和堆焊路径下堆焊过程中瞬时温度场以及焊后残余应力分布情况,并对结果进行了对比分析。主要结论如下:

1) 在多道多层焊接过程中,后一层焊缝的热源将使前一层焊缝表层发生重熔,温度场的变化影响着应力场的大小和分布。对于横向残余应力而言,应力较大的区域主要集中在堆焊层焊缝表层以及焊缝与基体连接处,且随着堆焊厚度的增加,堆焊层中部区域由受压应力逐渐转变为了受拉应力,导致堆焊层受到多向应力的作用。同时,其峰值从 520 MPa 逐渐上升到了 626 MPa,增幅达到了 20%。而对于纵向残余应力而言,高应力区主要集中在堆焊层中上部。堆焊厚度对纵向残余应力的分布和峰值影响并不明显。但随着堆焊厚度的增加,堆焊层在同一高度位置的纵向残余拉应力越小,这主要是层间热处理导致的应力释放的结果。

2) 对比了“逐层堆焊”和“逐道堆焊”两种堆焊路径下的焊后残余应力,结果表明,两者横向残余应力分布情况大体相似,横向残余应力较大的位置均为相邻两道焊缝交界处以及焊缝与基体连接处部分区域,但纵向残余应力的分布有较大差异。无论是横向或纵向残余应力,“逐道堆焊”相比于“逐层堆焊”所产生的残余应力分布都更加不均匀,并且增加了堆焊层受多向拉应力作用的风险。同时,“逐道堆焊”所产生的横向拉应力峰值相比于“逐层堆焊”增加了 22%,纵向拉应力峰值增加了 77%。

[参考文献]

[1] 张建生, 卢顺, 董旭刚, 等. 模具堆焊工艺中焊缝形状预测及工艺参数优化研究进展[J]. 锻压装备与制造

- 技术, 2020, 55(3): 126-129.
- ZHANG J S, LU S, DONG X G, et al. Research progress of weld seam shape prediction and process parameter optimization in die surfacing process[J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2020, 55(3): 126-129. (in Chinese)
- [2] 王庆国. 模具的合金堆焊研究[J]. *铝加工*, 2003(4): 44-45.
- WANG Q G. Study on bead welding for die[J]. *Aluminium Fabrication*, 2003(4): 44-45. (in Chinese)
- [3] SHEN L, ZHOU J, XIONG Y B, et al. Study on the combination of cobalt-based superalloy and ferrous alloys by bimetal-layer surfacing technology in refabrication of large hot forging dies[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 714: 338-347.
- [4] LU S, ZHOU J, ZHANG J S. Optimization of welding thickness on casting-steel surface for production of forging die[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76(5-8): 1411-1419.
- [5] 卢顺. 铸钢基体双金属梯度制备锻模新方法基础及应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- LU S. The new method basis and application of the forging die with bimetal gradient layer on cast steel[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [6] 张建生. 大型超高强度钢模锻用锻模夹心层再制造方法基础及应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- ZHANG J S. Basis and application of multiple-layer sandwiched surfacing of large-scale forging die remanufacturing for ultra-high strength steel[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [7] XIA Y F, JIN L, CHENG Q, et al. A comparative study on the microstructures and mechanical properties between surfacing nickel-based superalloy and surfacing cobalt-based superalloy[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(9): 096589.
- [8] 张国政. 基于ANSYS的柱塞堆焊焊接的残余应力分析研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2014.
- ZHANG G Z. Oil well pipe material liquid-solid two-phase flow erosion-corrosion studies[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2014. (in Chinese)
- [9] 安超. 单层熔丝积材残余应力分布规律及打击消除机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- AN C. Study on distribution of residual stress of single-layer fuse-adding and elimination of stress by hammer peening[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)
- [10] 李冬林. 焊接应力和变形的数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
- LI D L. Numerical simulation research on welding stress and deformation[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003. (in Chinese)
- [11] SUN J H, WU C S, CHEN M A. Numerical analysis of transient temperature field and keyhole geometry in controlled pulse key-holing plasma arc welding[J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2013, 64(5): 416-434.
- [12] SVANADZE M Z. The fundamental solution of the oscillation equations of the thermoelasticity theory of mixture of two elastic solids[J]. *Journal of Thermal Stresses*, 1996, 19(7): 633-648.
- [13] MOCHIZUKI M, HAYASHI M, HATTORI T. Welding residual stress estimation by inherent strain analysis and thermal elastic plastic analysis and its verification using neutron diffraction measurement[J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. Part A*, 1997, 63(612): 1675-1680.
- [14] 权国政, 施瑞菊, 刘乔, 等. 电弧熔丝单层单道积材残余应力模拟分析及锤击消除研究[J]. *材料导报*, 2020, 34(14): 14154-14160.
- QUAN G Z, SHI R J, LIU Q, et al. Analysis and elimination of residual stress in single layer and single channel of arc fuse accumulation[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(14): 14154-14160. (in Chinese)
- [15] 黄霜, 杨晓益, 陈辉, 等. 5A06铝合金扫描激光填丝焊接头变形及应力分析[J]. *焊接学报*, 2020, 41(2): 87-92.
- HUANG S, YANG X Y, CHEN H, et al. Analysis of deformation and stress of scanning laser wire filling welded 5A06 aluminum alloy joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(2): 87-92. (in Chinese)
- [16] 张涛, 赵北君, 朱世富, 等. MSC Marc有限元软件在粉末成形中的应用[J]. *新疆大学学报(自然科学版)*, 2008, 25(4): 454-457.
- ZHANG T, ZHAO B J, ZHU S F, et al. Application of MSC Marc in powder-forming[J]. *Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition)*, 2008, 25(4): 454-457. (in Chinese)
- [17] SHI Q Y, LU A L, ZHAO H Y, et al. Effect of material properties at high temperature on efficiency and precision in numerical simulation for welding process[C]//*International Conference on Computational Engineering Science*, 2000: 655-660.
- [18] GOLDAK J, CHAKRAVARTI A, BIBBY M. A new finite element model for welding heat sources[J]. *Metallurgical Transactions B*, 1984, 15(2): 299-305.
- [19] 董杰. 金属堆焊成形工艺参数优化与实验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019.
- DONG J. Optimization and experimental study on process parameters of metal overlay welding[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2019. (in Chinese)
- [20] ZHAO H H, ZHANG G J, YIN Z Q, et al. Three-dimensional finite element analysis of thermal stress in single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(1): 276-285.