

TC4 表面 Ni 基激光熔覆层温度场和应力场的数值模拟

张天刚^{1*}, 张倩², 姚波², 李宝轩³

¹中国民航大学民航技术研究院, 天津 300300;

²中国民航大学航空工程学院, 天津 300300;

³中国民航大学中欧航空工程师学院, 天津 300300

摘要 采用通快 TruDisk4002 型同轴送粉光纤激光器, 在 TC4 合金基材表面上制备了单道 Ni 基激光熔覆层, 其中 TC4 合金的质量分数为 35%、Ni60 的质量分数为 65%, 涂层无裂纹气孔等缺陷。通过 ABAQUS 软件建立了涂层的有限元模型, 温度场模拟结果显示, 熔池出现“慧尾”现象, 与实际激光热源的运行特点吻合。熔池最高温度为 3200 °C 左右, 激光热源前端的温度梯度大, 热源后端的温度梯度小, 熔池轮廓与涂层的形貌特征基本吻合, 尺寸误差小于 5%。从涂层残余应力场的分布来看, 熔覆层两侧边缘区域和结合区附近的应力集中现象较为严重, 容易萌生裂纹, 熔覆层两侧的裂纹主要与高斯热源的分布特点相关, 结合区的裂纹主要是由熔覆材料的热物性能差异导致的。实验结果表明, 熔覆层的边缘和结合区均出现了明显的裂纹缺陷, 与有限元计算结果一致。

关键词 激光技术; TC4 合金; 激光熔覆; 数值模拟; 应力集中; 裂纹

中图分类号 TG441.8

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0314003

Numerical Simulation of Temperature Field and Stress Field of Ni-Based Laser Cladding Layer on TC4 Surface

Zhang Tiangang^{1*}, Zhang Qian², Yao Bo², Li Baoxuan³

¹*Institute of Civil Aviation Technology, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;*

²*College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;*

³*Sino-European Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China*

Abstract The 35% TC4+65% Ni60 single-pass Ni-based laser cladding layer was prepared on the surface of TC4 substrate by the TruDisk4002 coaxial powder feeding fiber laser, and there were no cracks within the coating. The finite element model of the coating was established by the ABAQUS software. The simulation results of temperature field show that the molten pool has an obvious "coma tail" phenomenon, which is consistent with the motion characteristics of the actual laser heat source. The maximum temperature of the molten pool is about 3200 °C. The temperature gradient is large at the front of the laser heat source, however that at the back end of the heat source is small. The shape characteristics of the molten pool and the coating are basically the same, and the size error is less than 5%. According to the residual stress field distribution of the coating, the stress concentration in the

收稿日期: 2020-06-02; 修回日期: 2020-06-15; 录用日期: 2020-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(51371125)、中央高校基本科研项目(3122018D013)、天津市研究生科研创新项目(2019YJSS077)

*E-mail: 113099506@qq.com

edge area and the bonding zone of the cladding layer is relatively large, where it is easy to form cracks. The cracks on both sides of the cladding layer are mainly related to the distribution characteristics of Gaussian heat source, and the cracks in the bonding zone are mainly caused by the difference of the thermo-physical properties of the cladding materials. The experimental results show that there occur obvious crack defects in both the edge area and the bonding zone of the coating, which is consistent with the finite element calculation results.

Key words laser technique; TC4 alloy; laser cladding; numerical simulation; stress concentration; cracks

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 140.3460

1 引言

近年来,随着航空航天和国防军事等领域的发展,TC4合金以其密度低和比强度高优势而得到广泛的应用。但TC4合金的硬度低、摩擦系数大,这严重限制了其发展和应用^[1-2]。

激光熔覆技术作为一种先进的表面改性技术,其在基于TC4合金表面的多元复合耐磨涂层制备方面已经取得了一系列成果,有效解决了TC4合金在关键摩擦副工况下耐磨性差、服役周期短等问题^[3-5]。但由于激光熔覆速冷速热、熔覆材料的热物性能不匹配等原因,制备的涂层往往会出现裂纹等缺陷,这影响了该类涂层的应用和推广,也是国内外学者广泛关注的问题。研究表明,通过数值模拟激光熔覆过程中的温度-应力关系,可结合实验现象对涂层开裂位置及成因进行分析判断,进而为改善和提升熔覆层的成形质量提供科学依据^[6-7]。赵盛举等^[6]对TC4合金表面的Ni60A-50%Cr₃C₂熔覆层进行了数值模拟,研究表明,仿真结果与实验结果吻合,熔池的冷却速度是影响熔覆层组织和成形质量的重要因素。

本文利用ABAQUS有限元分析软件,对TC4合金表面的TC4+Ni60单道Ni基激光熔覆层的温度场和应力场进行数值模拟,分析了温度场的分布特点,预测了涂层开裂的敏感位置,研究了裂纹成因,并进行了实验验证。

2 有限元模拟

2.1 激光熔覆实验与涂层制备

实验基材选用TC4合金,熔覆材料为TC4球形粉[图1(a)]和Ni60球形粉[图1(b)],熔覆配比是TC4合金的质量分数为35%和Ni60的质量分数为65%。熔覆系统选用通快TruDisk4002型同轴送粉光纤激光器,如图2所示,优化后的激光熔覆工艺参数如表1所示。

图3和图4分别为实验制备的单道激光熔覆层的宏观图和横截面扫描电镜(SEM)形貌图。从图3

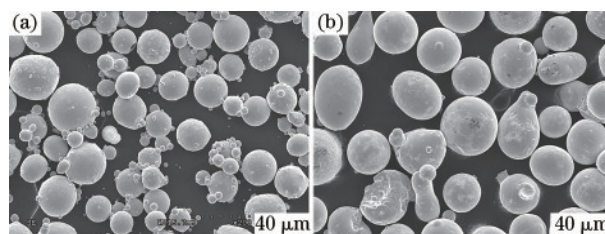


图1 熔覆材料粉末。(a)TC4;(b)Ni60

Fig. 1 Material powders for cladding. (a) TC4; (b) Ni60



图2 TruDisk4002型同轴送粉光纤激光器

Fig. 2 TruDisk4002 coaxial powder feeding fiber laser

表1 激光熔覆工艺参数

Table 1 Process parameters for laser cladding

No.	Parameter	Value	Unit
1	Laser power	1100	W
2	Scanning speed	400	mm·min ⁻¹
3	Spot diameter	3.0	mm
4	Power feeding rate	1.4	r·min ⁻¹
5	Laser focal length	16	mm
6	Flow of powder feeder	7	L·min ⁻¹
7	Flow of protection gas	11	L·min ⁻¹

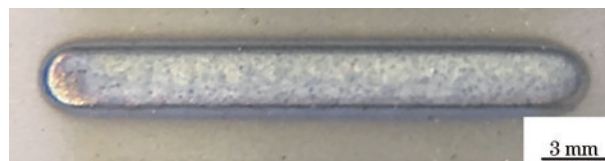


图3 单道熔覆层的宏观形貌

Fig. 3 Macro-morphology of single-pass laser cladding layer

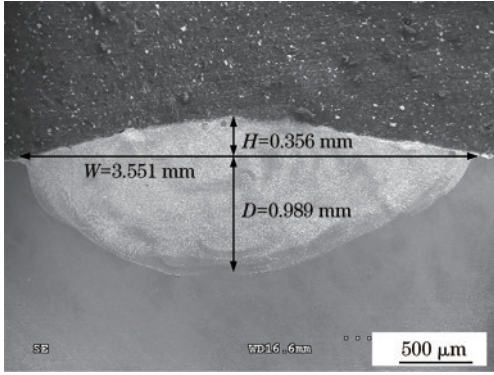


图 4 单道激光熔覆层的横截面 SEM 图

Fig. 4 Cross-sectional SEM morphology of single-pass laser cladding layer

可以看出,涂层表面的平整度较高。图 3 和图 4 中均无明显的气孔裂纹等缺陷。由图 4 计算测得,涂层熔宽 W 、熔高 H 及熔深 D 分别为 3.551, 0.356, 0.989 mm。

2.2 热源模型的选取

在同轴送粉激光熔覆过程中,激光热源把热能传至熔覆材料和基材,使熔覆材料与基材同时熔融并形成冶金结合。在熔覆过程中,激光热源能量的分布特点不同,所制备的涂层形貌特征也有所不同。TruDisk4002 型同轴送粉光纤激光器的激光热源的热流密度分布为高斯分布,如图 5 所示,其中 A' 为高斯激光热源上的任一点, $q(r)$ 为热流密度, r 为 A' 与激光光斑中心的距离, q_m 为激光光斑中心处的最大热流, R 为激光光斑的半径。

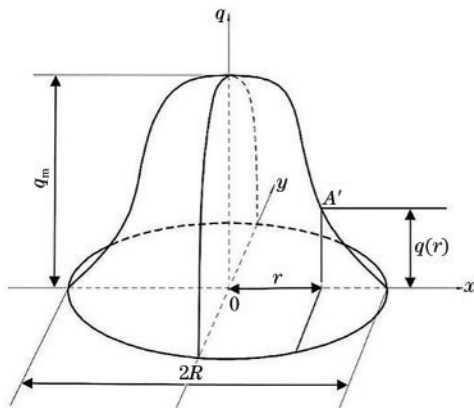


图 5 高斯热源模型

Fig. 5 Gaussian heat source model

在该模型中, A' 处的热流密度^[8]可表示为

$$q(r) = q_m \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right), \quad (1)$$

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

$$Q = \eta k p, \quad (3)$$

式中: Q 为有效激光功率; η 为作用于涂层的有效功率因数; 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。

2.3 有限元模型的建立

实验用 TC4 基材的尺寸为 60 mm × 40 mm × 10 mm, 利用 ABAQUS 有限元软件建立的三维模型如图 6 所示, 在熔覆层附近区域对网格进行了细化处理, 最小网格尺寸为 0.5 mm × 0.5 mm × 1 mm, 利用过渡网格技术对远离熔覆层的区域网格进行粗化处理以减少计算成本和计算时间。

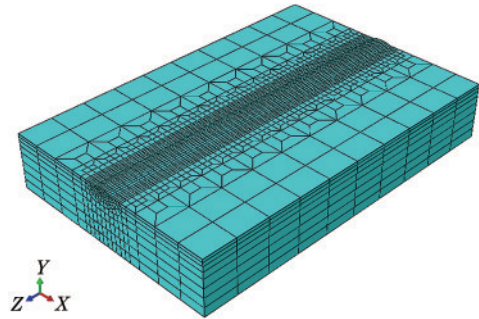


图 6 有限元模型

Fig. 6 Finite element model

整个模拟过程采用顺序非耦合热力有限元模型, 求解的过程分为两个步骤。首先计算涂层的温度场, 再将得到的各节点温度作为热载荷加载到应力计算模型中, 计算得到应力场, 进而获得残余应力的分布。温度场和应力场的模拟计算使用相同的三维几何模型, 分别采用 DC3D8 线性传热单元和 C3D8R 线性减缩积分单元。

为了实现同轴送粉激光熔覆, 利用 ABAQUS 中的“生死单元”技术来实现熔覆层的实时填充: 建立几何模型时先将熔覆层部分建立出来, 在加载热源之前将所有熔覆层单元“杀死”, 对于“杀死”的单元, 将其单元属性乘以 1.0×10^{-6} ^[9], 在受到热源的影响时再重新激活“杀死”的单元。因此, 随着激光光斑扫描的进行, 熔覆层逐步被激活, 形成了实时填充的熔覆层。

2.4 有限元模拟参数

熔覆材料的热物性参数对激光熔覆成形过程的影响较为显著。本文使用的 TC4 合金^[10-15]及 Ni60 粉末^[16-19]随温度变化的热物理性能和力学性能分别如图 7、8 所示。

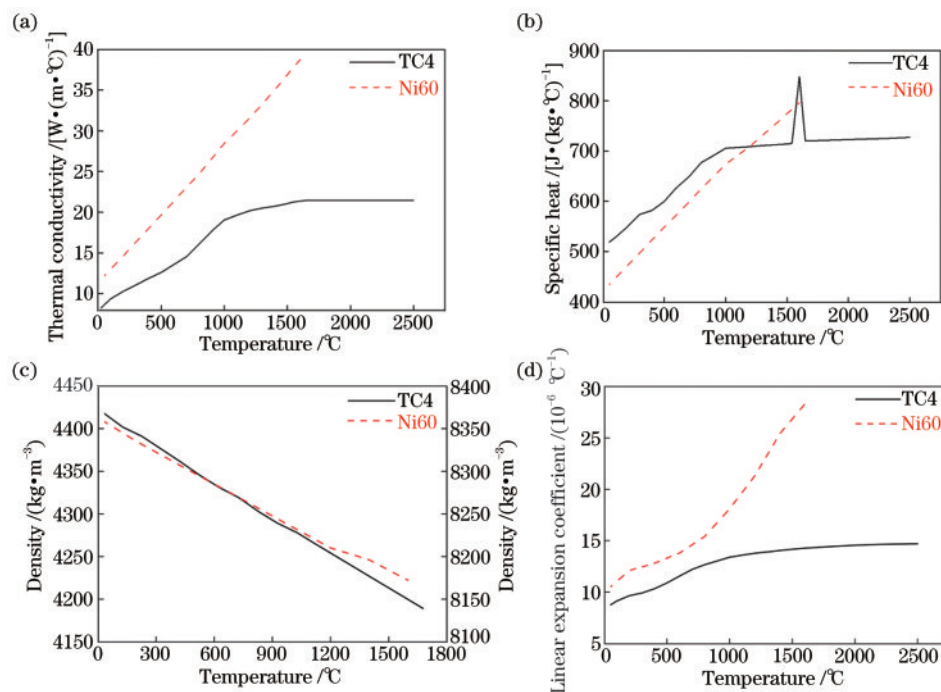


图 7 热物性能参数随温度的变化。(a)导热率;(b)比热容;(c)密度;(d)线膨胀系数

Fig. 7 Thermo-physical performance parameters versus temperature. (a) Thermal conductivity; (b) specific heat; (c) density; (d) linear expansion coefficient

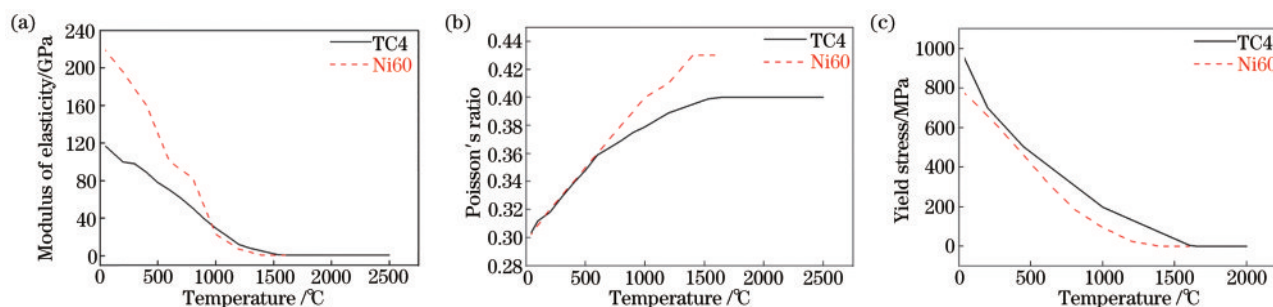


图 8 力学性能参数随温度的变化。(a)弹性模量;(b)泊松比;(c)屈服强度

Fig. 8 Mechanical performance parameters versus temperature. (a) Modulus of elasticity; (b) Poisson's ratio; (c) yield stress

在激光熔覆过程中,热量主要是以自由对流和辐射两种形式散失掉。对流换热导致的热量散失采用牛顿冷却公式:

$$q_c = -h_c(T_s - T_0), \quad (4)$$

式中: q_c 为对流热量; h_c 为空气与涂层表面的对流换热系数; T_s 为涂层表面的温度; T_0 为外界环境的温度。

辐射换热导致的热量散失由 Stefan-Boltzmann 定律计算:

$$q_r = -\epsilon\sigma\left[(T_s + 273.15)^4 - (T_0 + 273.15)^4\right], \quad (5)$$

式中: q_r 为辐射热量; ϵ 为表面辐射发射率; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数,为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

为了计算方便并节省计算时间,统一考虑流换热 q_c 和辐射换热 q_r ,即考虑综合换热系数 h ,这样边界换热损失的热流密度 q 可表示为

$$q = h(T_s - T_0). \quad (6)$$

对对流和辐射进行整合计算,有

$$h = 2.41 \times 10^{-3} \epsilon T^{1.61}, \quad (7)$$

式中: T 为某时刻的材料温度。

表面辐射发射率 ϵ 受材料、表面状态和温度等的影响,常温下多为 0.3~0.5,在材料熔点附近辐射率可达到 0.9^[20]。本文室温下辐射率取 0.3,之后随温度的升高呈线性增长,在达到材料熔点时,取为 0.9。因此,综合换热系数 h 随温度 (T) 的变化如图 9 所示。

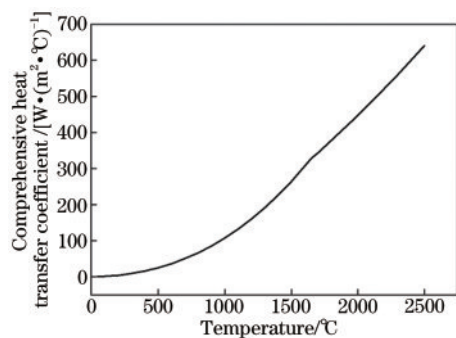


图 9 随温度变化的综合换热系数

Fig. 9 Comprehensive heat transfer coefficient versus temperature

3 分析与讨论

3.1 温度场结果

有限元模型的初始温度设置为 20 °C, 激光热源开始接触基材与熔覆材料的时刻设为 0, 激光热源作用于基体与熔覆材料的时刻为 t 。根据熔覆工艺参数得到 $t=3$ s 和 $t=6$ s 时的温度场分布云图如图 10 所示, 这里 TC4 合金的熔点为 1650 °C (TC4 合金的熔点高于 Ni60), 因此图 10 中的灰色区域 (温度高于 1650 °C 的部分) 为熔池。

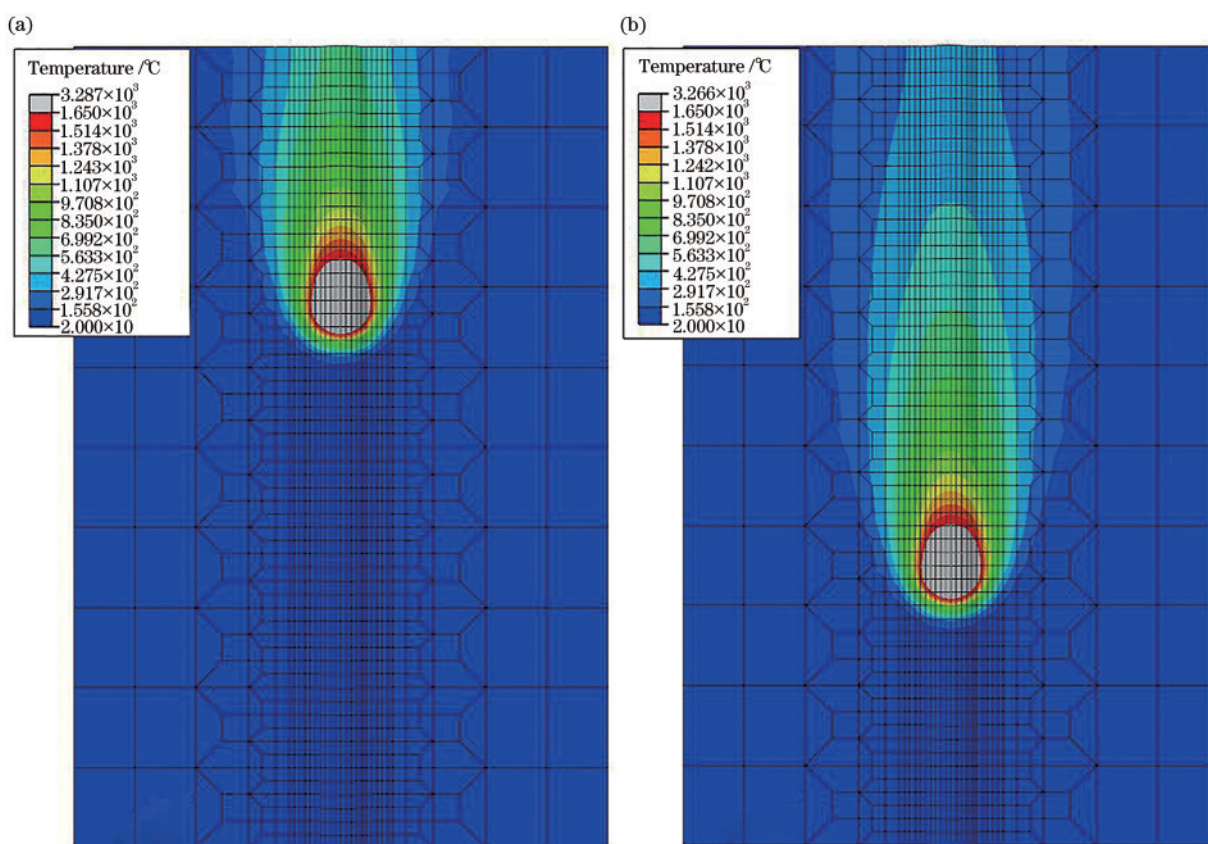


图 10 不同时刻时的温度场云图。(a) $t=3$ s; (b) $t=6$ s

Fig. 10 Temperature contours at different moments. (a) $t=3$ s; (b) $t=6$ s

从图 10 中可以看到, 不同于静止激光热源下形成的圆形熔池, 移动的激光热源在熔覆层表面上所形成的熔池出现“彗尾”现象, 这与激光热源实际的高清运行轨迹相符 (图 11), 且越靠近中心位置, 等温线越接近圆形, 越远离激光光束中心区域, 等温线的“彗尾”现象越严重; 激光辐射区域的温度较高, 在中心处达到最大值, 激光热源加热处前端的等温线密集, 温度梯度大, 激光热源加热处后端的等温线稀疏, 温度梯度小, 且距离热源中心越远,

温度梯度越小。另外, 从图 10(a)、(b) 可以发现, 随着激光热源的移动, 激光光束中心的最高温度和熔池形状都十分稳定。

图 12 为 $t=3$ s 时的局部温度场云图。从图 12(a) 横向截面图可以看出, 模拟生成的熔池轮廓是凸起的椭圆形, 与实验生成的单道熔覆层的形貌特征 (图 4) 基本相同。如图 12(b) 所示, 在沿激光熔覆方向的纵向截面上, 熔池呈“勺子”形状, 熔池前端的等温线密集, 温度梯度大, 后端的等温线稀

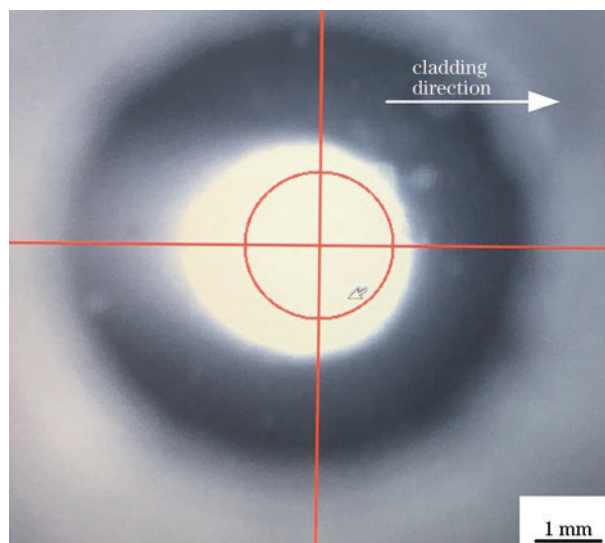


图 11 激光热源实际的高清运行轨迹

Fig. 11 Actual high-definition motion track of laser heat source

疏,温度梯度小,这与图 9 中的熔覆层表面的温度分布规律相同,由此可见,温度场模拟的结果与实际激光熔覆作用下的温度场分布情况吻合。如图 12(c)所示,模拟的熔池宽度、熔池高度及熔池深度分别为 3.389,0.347,1.011 mm,与实际熔覆层的形貌尺寸误差均小于 5%(分别为 4.5%、2.5%和 2.2%),由此可见,本文温度场有限元模拟计算结果具有较高的精度。

3.2 残余应力分布

得到激光熔覆层的温度场模拟结果后,将温度场模拟结果加载到应力场中进行分析计算,就可以获得激光熔覆层冷却至室温(20 °C)后的残余应力分布结果。冷却至室温后的激光熔覆层残余应力(Residual stress)场分布云图如图 13 所示。

由图 13 可以看到,无论是在熔覆层表面[图 13(a)]还是在熔覆层横截面[图 13(b)]上,熔覆

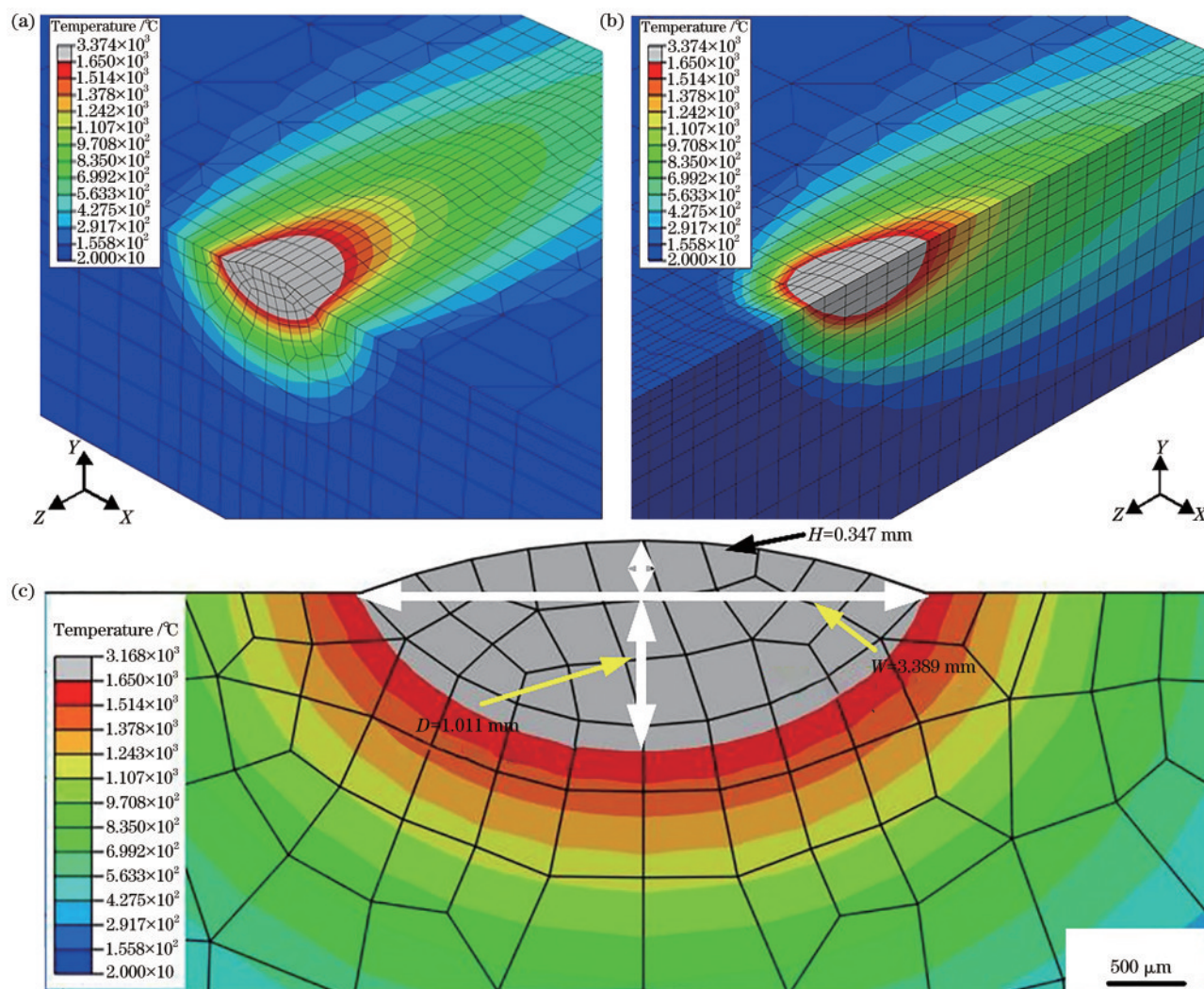


图 12 $t=3$ s 时的局部温度场云图。(a)横截面;(b)纵截面;(c)横截面放大图

Fig. 12 Temperature contours of local area at $t=3$ s. (a) Cross section; (b) longitudinal section; (c) magnification of cross section

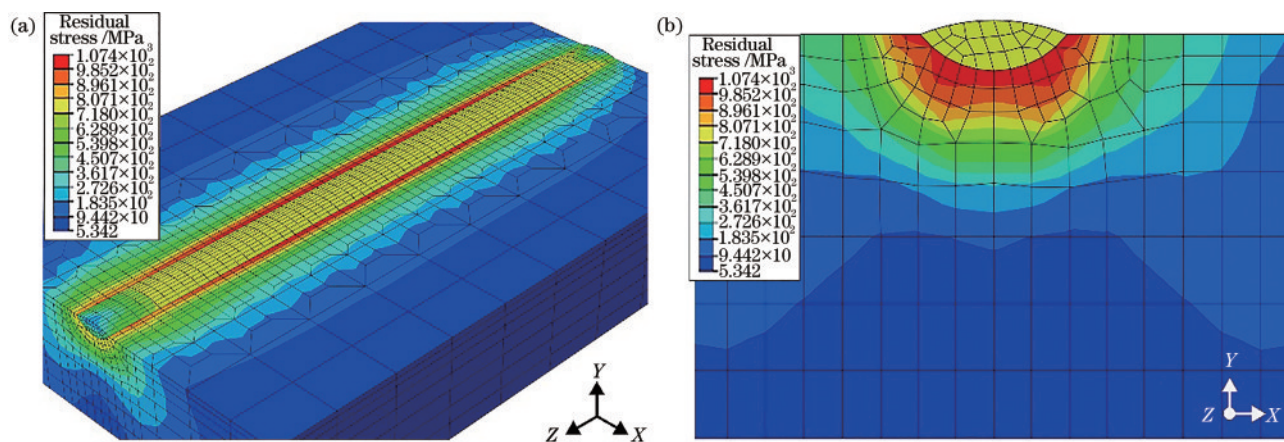


图 13 冷却后的残余应力场分布。(a)表面残余应力;(b)横截面残余应力

Fig. 13 Residual stress contours after cooling. (a) Surface residual stress; (b) cross-sectional residual stress

层两边靠近基材区域的残余应力水平都较高,均达到材料在室温下的屈服强度,应力集中现象严重。如图 13(a)所示,熔覆层两侧的残余应力较为集中,这主要是因为高斯激光热源的中心能量高,两侧逐步降低,因此熔覆层两侧熔池的冷却速度较快,熔池的循环搅拌不够均匀,固相和液相之间的扩散能力不足,熔融合金无法建立完全的平衡状态,残余应力集中,进而诱发裂纹生成^[21]。由图 13(b)可以看出,在熔覆层结合区,应力较为集中,这主要是由于熔覆层材料中 Ni60 合金与 TC4 基材的力学性能不同,因此两种材料的体积收缩存在较大差异,从而产生应力集中;此外,不同材料组织在冷却相变的过程中,相变驱动力大小的不同也会引起局部应力集中。因此,涂层与基材结合区出现裂纹的概率较大。

为了验证上述计算结果,将单道熔覆层边缘和结合区附近的组织进行局部放大,SEM 形貌如图 14 所示。图 14(a)为熔覆层边缘的横截面形貌,可以看到,涂层边缘部位出现了明显的斜向贯穿裂纹,从顶部起裂并连续向下扩展。图 14(b)为熔覆层结合区的放大图,可以看到较为明显的交错状裂纹和局部开裂现象,裂纹贯穿程度有所减缓但数量有所增加。因此,对照有限元模型分析结果和实际实验结果,可以看出,单道激光熔覆层边缘区域和结合区有较严重的应力集中现象,从而涂层易开裂,这为该类单道熔覆层裂纹问题的进一步研究提供了一定的参考。

激光熔覆层的开裂问题已严重影响了该类涂层的应用和推广,因此准确判断涂层中裂纹的敏感位置,设法避免涂层中裂纹的萌生和拓展或降低涂层裂纹敏感性是至关重要的^[22]。目前,降低涂层裂

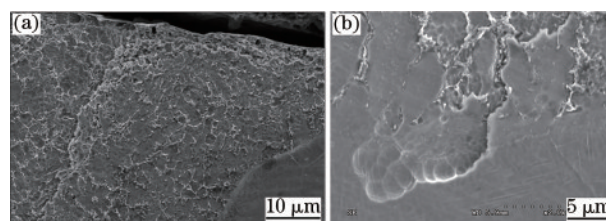


图 14 熔覆层的裂纹形貌。(a)边缘;(b)结合区

Fig. 14 Crack morphology of cladding layer. (a) Edge; (b) bonding area

纹敏感性的方法有:1)优化激光工艺参数,如选取合适的激光功率、扫描速度和送粉率等以降低裂纹的敏感性;2)选取与基材热膨胀系数相近的熔覆材料、预热基材或缓冷涂层以减少残余应力集中现象,从而减少裂纹^[23];3)在熔覆材料体系中加入适量的稀土氧化物来细化涂层组织,有效减少涂层中相变驱动力差异引起的应力集中现象,从而有效避免涂层开裂^[24]。

4 结 论

利用通快 TruDisk4002 型同轴送粉光纤激光器,在 TC4 基材表面制备了 35%TC4+65%Ni60 单道 Ni 基激光熔覆层,涂层无明显的裂纹气孔等缺陷。利用 ABAQUS 软件建立了涂层的有限元模型,温度场显示熔池出现“慧尾”现象,熔池的最高温度为 3200 °C 左右,激光热源前端的温度梯度大,热源后端的温度梯度小,熔池轮廓与实际涂层的形貌特征基本吻合,尺寸误差小于 5%。涂层残余应力模拟结果显示,熔覆层两侧边缘和结合区附近的应力集中现象明显,容易萌生裂纹,与实际实验结果一致。

参 考 文 献

- [1] Xu W F, Ma J, Luo Y X, et al. Microstructure and high-temperature mechanical properties of laser beam welded TC4/TA15 dissimilar titanium alloy joints [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(1): 160-170.
- [2] Wang H, Wu M P, Lu P P, et al. Effect of laser power on the mechanical properties of the cobalt-based/GO composite coatings [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 091405.
王航, 武美萍, 陆佩佩, 等. 激光功率对钴基/GO复合熔覆层力学性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 091405.
- [3] Zhang T G, Zhuang H F, Xiao H Q, et al. Effect of rare earth on microstructure and friction and wear properties of Ti-based laser cladding layer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0903001.
张天刚, 庄怀风, 肖海强, 等. 稀土对 Ti 基激光熔覆层组织与摩擦磨损性能的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0903001.
- [4] Sun R L, Niu W, Lei Y W, et al. Microstructure and tribological properties of laser clad NiCrBSi+Ni/MoS₂ coating on TC4 titanium alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(6): 157-162.
孙荣禄, 牛伟, 雷贻文, 等. 钛合金 TC4 激光熔覆 NiCrBSi+Ni/MoS₂ 涂层组织和摩擦磨损性能[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(6): 157-162.
- [5] Huo H, Liang Z Y, Zhang A F, et al. Anisotropy of mechanical properties of laser-cladding-deposited TC4 titanium alloy containing boron [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1202008.
霍浩, 梁朝阳, 张安峰, 等. 激光熔覆沉积含硼 TC4 钛合金力学性能的各向异性[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1202008.
- [6] Zhao S J, Qi W J, Huang Y H, et al. Numerical simulation study on thermal cycle characteristics of temperature field of TC4 surface laser cladding Ni60 based coating [J]. Surface Technology, 2020, 49(2): 301-308.
赵盛举, 祁文军, 黄艳华, 等. TC4 表面激光熔覆 Ni60 基涂层温度场热循环特性数值模拟研究[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 301-308.
- [7] Guo W, Li K K, Chai R X, et al. Numerical simulation and experiment of dilution effect in laser cladding 304 stainless steel [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(5): 051402.
- 郭卫, 李凯凯, 柴蓉霞, 等. 激光熔覆 304 不锈钢稀释效应的数值模拟与实验[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 051402.
- [8] Zhang S. Fabrication and numerical simulation of cobalt-based composite coating on titanium alloy surface by laser cladding [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
张珊. 钛合金激光熔覆钴基涂层的制备及数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [9] Wang L F, Sun Y X, Zhu G X, et al. Optimization simulation of process parameters on the residual stress in 316L stainless steel by laser cladding [J]. Applied Laser, 2019, 39(3): 376-380.
王丽芳, 孙亚新, 朱刚贤, 等. 激光熔覆 316L 不锈钢残余应力工艺参数的优化模拟[J]. 应用激光, 2019, 39(3): 376-380.
- [10] Lu X F, Lin X, Ma L, et al. Effect of scanning path on thermo-mechanical field of laser solid forming TC4 part [J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(12): 55-62.
鹿旭飞, 林鑫, 马良, 等. 扫描路径对激光立体成形 TC4 构件热-力场的影响[J]. 材料工程, 2019, 47(12): 55-62.
- [11] Wang J Y, Ge Z M, Zhou Y B. Aeronautical titanium alloy [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1985.
王金友, 葛志明, 周颜邦. 航空用钛合金 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
- [12] Wood R A, Favor R J. Titanium alloy handbook [M]. Chongqing: Chongqing Branch of Science and Technology Literature Press, 1983.
Wood R A, Favor R J. 钛合金手册 [M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1983.
- [13] Institute of Metallurgy, Chinese Academy of Sciences. American titanium alloy manual [M]. Shanghai: Shanghai Institute of Science and Technology Information, 1975.
中国科学院冶金研究所. 美国钛合金手册 [M]. 上海: 上海科学技术情报研究所, 1975.
- [14] Peng S D. Experimental and numerical simulation of laser welding for titanium alloy lap welding [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
彭善德. 钛合金激光搭接焊及数值模拟 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [15] Cao J, Gharghour M A, Nash P. Finite-element analysis and experimental validation of thermal residual stress and distortion in electron beam

- additive manufactured Ti-6Al-4V build plates [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 237: 409-419.
- [16] Dai K, Shaw L. Thermal and mechanical finite element modeling of laser forming from metal and ceramic powders[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(1): 69-80.
- [17] Xu Z L. Performance and strength design and engineering application of high temperature metal materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
徐自立. 高温金属材料的性能、强度设计及工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [18] Liu G. Numerical simulation of plasma cladded nickel-based powder process on high manganese steel and the structure properties analysis [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.
刘岗. 高锰钢上等离子熔覆镍基合金数值模拟与组织性能分析[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
- [19] Wang C Q. Solidification microstructure and stress control of Ni-based alloy coatings by mechanical vibration assisted laser cladding [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
王传琦. 机械振动作用下激光熔覆镍基合金涂层凝固组织及应力控制研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [20] Hu M J. Three dimensional numerical simulation of temperature and stress distribution in electron beam welding of 12 mm TC4 titanium alloy plate [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.
胡美娟. 12 mm 厚 TC4 钛合金板电子束焊接温度场应力场三维有限元数值模拟[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [21] Zhang L, Chen X M, Liu W, et al. Formation mechanism and sensitivity of cracks in laser-cladded Ni-based-alloy coatings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 111401.
张磊, 陈小明, 刘伟, 等. 激光熔覆 Ni 基合金裂纹的形成机理及敏感性[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(11): 111401.
- [22] Liu H Q, Ge C, Wang Z W, et al. Research progress on crack control of laser clad composite coating [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2018, 43(8): 228-232.
刘海青, 葛超, 王志文, 等. 激光熔覆复合涂层裂纹控制研究进展[J]. *金属热处理*, 2018, 43(8): 228-232.
- [23] Li M Y, Cai C B, Han B, et al. Numerical simulation of preheating on temperature and stress fields by laser cladding Ni-based ceramic coating[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2015, 36(12): 197-203.
李美艳, 蔡春波, 韩彬, 等. 预热对激光熔覆陶瓷涂层温度场和应力场影响[J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(12): 197-203.
- [24] Zhang T G, Zhuang H F, Xue P, et al. Microstructure refinement mechanism and properties of Ti-based rare earth laser cladding layers[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(9): 423553.
张天刚, 庄怀风, 薛鹏, 等. 钛基稀土激光熔覆层组织细化机制及性能[J]. *航空学报*, 2020, 41(9): 423553.