

激光与光电子学进展

TA2 工业纯钛激光焊接的数值模拟分析

季齐宝^{1,2}, 王文焱^{1,2*}, 张帅锋³, 吕逸帆³, 谢敬佩^{1,2}, 王爱琴^{1,2}, 柳培^{1,2}¹河南科技大学材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023;²有色金属新材料加工与先进加工技术省部共建协同创新中心, 河南 洛阳 471023;³中国船舶集团有限公司第七二五研究所(洛阳船舶材料研究所), 河南 洛阳 471023

摘要 为优化 TA2 工业纯钛的激光焊接工艺,以 ABAQUS 软件为平台,采用有限元分析法建立了非线性瞬态热力耦合模型。分析厚度为 6 mm 的 TA2 工业纯钛激光焊接过程的热应力场。考虑了材料热物理性能参数的温度依存性,利用 FORTRAN 编程实现了移动高斯面热源和圆锥体热源复合的加载。通过实验验证了复合热源的可靠性,并对比分析了不同工艺参数下熔池内不同位置的最高温度及不同温度区间内的冷却速度。结果表明,激光功率和焊接速度对熔池的最高温度和不同温度区间的冷却速度均有较大影响,且熔池受焊接速度的影响更大。

关键词 激光光学; 激光焊接; 工业纯钛; 数值模拟; 工艺参数; 温度场

中图分类号 TG456.7 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1714011

Numerical Simulation Analysis of TA2 Industrial Pure Titanium Laser Welding

Ji Qibao^{1,2}, Wang Wenyan^{1,2*}, Zhang Shuaifeng³, Lü Yifan³, Xie Jingpei^{1,2},Wang Aiqin^{1,2}, Liu Pei^{1,2}¹School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China;²Provincial and Ministerial Co-Construction of Collaborative Innovation Center for Non-Ferrous Metal New Materials and Advanced Processing Technology, Luoyang 471023, Henan, China;³Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, Henan, China

Abstract In order to optimize the laser welding process of industrially pure titanium TA2, a nonlinear transient thermal coupling model is established by finite element analysis method on the platform of ABAQUS software in this paper. The thermal stress field during laser welding of TA2 industrial pure titanium with a thickness of 6 mm is analyzed. Considering the temperature dependence of the material thermophysical property parameters, and the combined loading of the moving Gaussian surface heat source and the cone heat source is realized by FORTRAN programming. The reliability of the composite heat source is verified by experiments, and the maximum temperature at different positions in the molten pool and the cooling rates in different temperature ranges under different process parameters are compared and analyzed. The results show that both the laser power and the welding speed have a great influence on the maximum temperature of the molten pool and the cooling rate in different temperature ranges, and the molten pool is more affected by the welding speed.

Key words laser optics; laser welding; industrially pure titanium; numerical simulation; process parameters; temperature field

1 引言

钛及其合金具有低密度、高比强度、耐高温、耐腐蚀、无磁性等优异性能,已广泛应用于航空航天、海洋工程和石油化工等领域^[1-4]。为了实现可靠的焊接和

最小的形变,针对钛合金在不同领域的应用前景,人们考虑了多种技术。目前,可采用的焊接技术有钨极惰性气体(TIG)保护焊、熔化极惰性气体(MIG)保护焊、激光焊接、激光-MIG 复合焊、电子束焊接等。相比其他方法,激光焊接具有效率高、焊缝窄、热变形

收稿日期: 2022-03-24; 修回日期: 2022-04-26; 录用日期: 2022-06-09

基金项目: 郑洛新国家自主创新示范区创新引领型产业集群专项(201200211400)

通信作者: *wangwy1963@163.com

小、生产成本低、加工速度快等优势,在工业生产中备受青睐^[5-8]。但激光焊接是一个极其复杂的过程,其焊接机理尚未研究透彻,焊接过程中,作用在金属上的激光能量高、光斑移动速度快,熔池高温停留时间极短,以目前的实验手段难以测得准确的相关数据,且实验成本极高^[9]。

近年来,随着计算机技术的飞速发展,数值模拟已成为研究激光焊接过程的主要方式之一^[10-12]。焊接数值模拟采用热源模型描述激光对金属材料的作用,依据能量守恒建立传热控制方程,借助有限元软件进行求解^[13],计算结果可为优化激光焊接工艺参数提供依据。Li等^[14]将数值模拟和实验相结合,研究了工艺参数对不同厚度 Ti6Al4V 合金薄板对接激光焊熔池形貌的影响,结果表明,激光功率、脉冲频率等参数对焊缝质量的影响较大。李兴宇等^[15]使用光纤激光器对厚度为 0.9 mm 的 TA2 进行激光焊接研究,并通过正交试验分析每个单因素,获得了相关工艺参数对焊件组织性能的影响规律。李镇等^[16]使用完全正交法进行工业纯钛激光焊接实验。上述研究主要分析了薄板的焊接情况,而厚板焊接的工况更加复杂,焊接工艺与薄板相差甚远。Akbari等^[17]对厚度为 3 mm 的 Ti6Al4V 进行激光焊接,并分析了焊接速度、焊缝熔宽和最高温度之间的关系,提出通过控制温度和脉冲激光工艺参数对焊接过程进行精确控制,但其采用的脉冲激光器并不适用于激光深熔焊,相关理论有待完善。张峰^[18]采用激光自熔焊对厚度为 4.2 mm 的工业纯钛开展堆焊实验,但相关实验存在一定局限性,还需进一步探究工艺参数对焊缝的具体影响方式。这些研究为优化钛合金厚板的激光焊接工艺奠定了基础,基于此,本文以厚度为 6 mm 的 TA2 工业纯钛为对象进行激光焊接实验,并通过数值模拟分析焊接温度场、热循环曲线及不同工艺参数下熔池最高温度、冷却速度的变化情况,通过大量计算总结出一般规律进而优化焊接工艺。

2 数值模拟

2.1 网格模型

为兼顾计算时间和精度,采用 6 面体扫掠的网格划分方式:对温度梯度较大的熔池和热影响区采用较密集的网格,最小单元尺寸为 0.3 mm×0.3 mm×0.3 mm;焊缝到热影响区的过渡区域使用 1:3 的过渡网格划分,在确保计算精度的情况下,提高计算效率。模型尺寸为 40 mm×54 mm×6 mm,网格划分模型如图 1 所示。

2.2 热源模型

焊接热源模型是实现焊接过程数值模拟的基本条件,计算结果的准确性取决于热源模型是否合适^[19]。激光深熔焊产生的热量极高,会瞬间形成小孔,使金属蒸发电离并在上表面形成等离子团簇对其进行二次加热,同时激光会在小孔内壁多次反射起到增强效果,因

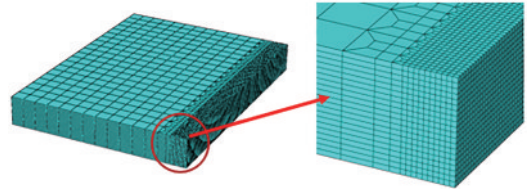


图 1 网格划分模型

Fig. 1 Model of the meshing

此采用常规的双椭球热源很难计算得到理想的熔池轮廓。根据 TA2 焊接实验焊缝横断面的几何形状特点,采用“高斯面热源+圆锥体热源”的复合式热源,如图 2 所示。通过高斯面热源模拟等离子团簇对焊件上表面的二次加热,通过圆锥体热源模拟深度方向上的加热作用。面热源可表示为

$$q_f(x, y) = \frac{3Q_0\eta f_1}{\pi R^2} \cdot \exp\left(-3\frac{x^2 + y^2}{R^2}\right), \quad (1)$$

式中: q_f 为面热源功率; Q_0 为激光功率; R 为热源作用半径; f_1 为面热源功率占总功率的比例; η 为焊接热效率; (x, y) 为点坐标。体热源可表示为

$$q_b(x, y, z) = \frac{9Q_0\eta f_2}{\pi(1 - e^{-3})(z_c - z_i)(r_c^2 + r_e r_i + r_i^2)} \cdot \exp\left(-3\frac{x^2 + y^2}{r_c^2}\right), \quad (2)$$

$$r_c = f(z) = r_i + (r_e - r_i) \cdot \frac{z}{(z_c - z_i)}, \quad (3)$$

式中: q_b 为体热源功率; e 为自然常数,约为 2.7; $H = (z_c - z_i)$ 为热源高度; r_c 为 H 的热分配系数; f_2 为体热源功率占总功率的比例; r_e 和 r_i 分别为圆锥上下表面的半径。

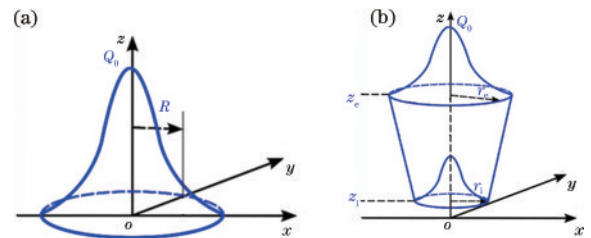


图 2 热源模型。(a)高斯面热源;(b)圆锥体热源^[20]

Fig. 2 Heat source model. (a) Gaussian surface heat source; (b) cone heat source^[20]

2.3 边界条件

热传导遵循傅里叶定律,可表示为

$$q_n = -k \frac{dT}{dx}, \quad (4)$$

式中: q_n 为热流密度; T 为焊件表面的温度; k 为导热系数;负号表示热量流向温度降低的方向。将初始温度设定为环境温度,除对称面外,模型所有自由表面均考虑对流散热与辐射散热,热对流可用牛顿冷却方程描述为

$$q_n = -\alpha_c(T - T_0), \quad (5)$$

式中: α_c 为对流换热系数; T_0 为环境温度。热辐射用

斯蒂芬-玻尔兹曼方程计算,可表示为

$$q_m = -\sigma\epsilon(T^4 - T_0^4), \quad (6)$$

式中: σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数; ϵ 为辐射系数。

机械边界条件的设置如图3所示。焊件侧面被完全固定(ENCASTRE),在焊缝对称面施加关于Y轴垂直的平面对称约束(YSYMM),且该约束在冷却至室温的过程中一直存在。

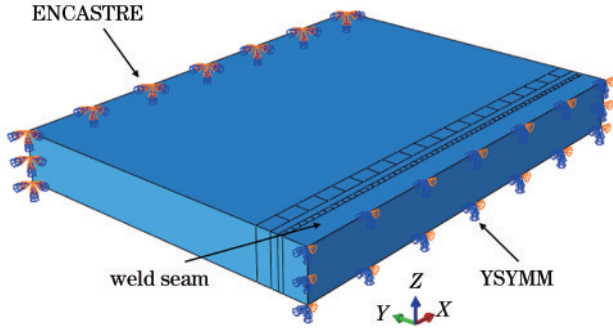


图3 有限元模型的机械边界条件

Fig. 3 Mechanical boundary conditions for finite element models

2.4 实验设备及参数设置

实验装置:激光焊接采用YLS-2000 IPG激光器、KR 60 HA库卡机器人、FLW-D50焊接头;侧吹保护气体选择质量分数为99.99%的氩气,正面与背面保护气体的流速均为20 L/min;用JSM-5610LV扫描电子显微镜对试样进行金相组织显微观察;模拟中的初始温度设置为20℃,辐射系数 ϵ 为0.85,斯蒂芬-玻尔兹曼常数 σ 为 5.67×10^{-8} ,对流换热系数 α_c 为 $20 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{C})$ 。激光深熔焊温度梯度极大,材料的热物性能参数会对模拟结果的准确性产生影响,考虑到材料热物性能与温度的依存性,纯钛的热物性参数

根据文献[21]给出。

2.5 温度场的计算结果与实验验证

结合实验得到的焊缝宏观形貌,通过大量试算校核热源参数。结果表明,面热源和圆锥体热源功率分配比例为2:8时,模拟结果较好。激光功率为7500 W,焊接速度为25 mm/s时(后续未加说明的模拟实验数据均为该参数)计算的焊缝形貌和实验得到的焊缝如图4所示。其中,NT11为节点温度输出变量,1650℃以上为熔合区(FZ),880~1650℃为热影响区(HAZ),880℃以下为母材区(BM)。可以发现,仿真计算和实验得到的焊缝区吻合较好,但模拟结果的热影响区比实验结果窄。原因是模拟图截取的是最大熔池横截面积,此时热量尚未充分传递。表1为不同工艺参数下焊缝横截面形状的计算结果和实验结果。其中: W_t 、 W_m 和 W_l 分别为焊缝的上、中、下宽度; E_R 和 S_R 分别为实验结果和模拟结果。可以发现,整体上计算结果比实验结果略小,而其他工艺下模拟结果与实验结果的吻合度均较好。原因是模拟忽略了熔池流动对温度场的影响。

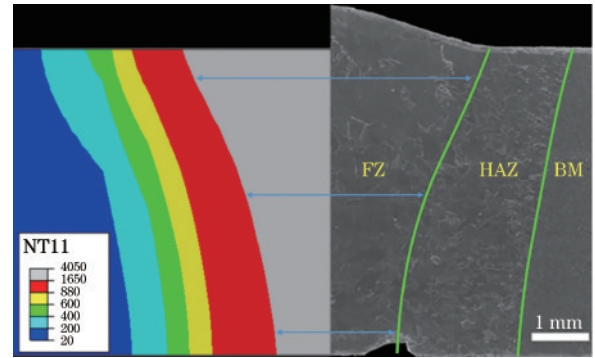


图4 实验与模拟得到的焊缝形貌

Fig. 4 Weld morphology obtained by experiment and simulation

表1 实验与模拟得到的焊缝尺寸

Table 1 Weld dimensions obtained by experiment and simulation

No.	Laser power / W	Welding speed / (mm·s ⁻¹)	Defocusing distance	W _t / mm		W _m / mm		W _l / mm	
				E _R	S _R	E _R	S _R	E _R	S _R
①	7500	20	+5	3.20	3.13	2.22	2.15	1.61	1.54
②	7500	25	+5	2.82	2.70	1.63	1.60	1.25	1.20
③	7500	30	+5	2.41	2.33	1.38	1.36	0.88	0.82
④	6500	25	+5	2.61	2.52	1.54	1.42	0.97	0.85
⑤	8500	25	+5	3.12	2.91	2.10	1.95	1.51	1.40

3 分析与讨论

3.1 模拟结果分析

钛合金激光焊接过程中,加热阶段依次发生 α - β 相变、熔化、蒸发、电离等转变,冷却阶段则发生相反顺序的转变^[17],对温度场中焊缝组织的转变过程进行分析有助于获得性能更优良的焊件。图5为焊接过程中温度场随时间的变化云图。其中,处于纯钛沸点3500℃以上的区域为小孔口,1650~3500℃温度范围

为焊接熔池区域,880~1650℃范围为热影响区。可以发现:焊接时间 $t=0.2 \text{ s}$ 为热源加载焊件表面初始阶段,焊缝区域温度急剧上升,在短时间内进入熔融状态,高温集中在焊缝区域,熔池为圆形,熔池周围温度尚未完全传递;随着焊接的进行, $t=0.8 \text{ s}$ 时,熔池基本成型,整体呈水滴状,焊缝高温逐渐向四周扩散; $t=1.6 \text{ s}$ 时焊接进入准稳态,熔池及热影响区整体较狭窄,原因是激光作用范围小,TA2热导率小,热传导较慢,热量集中在焊缝附近; $t=2.0 \text{ s}$ 时,焊接即将结束,

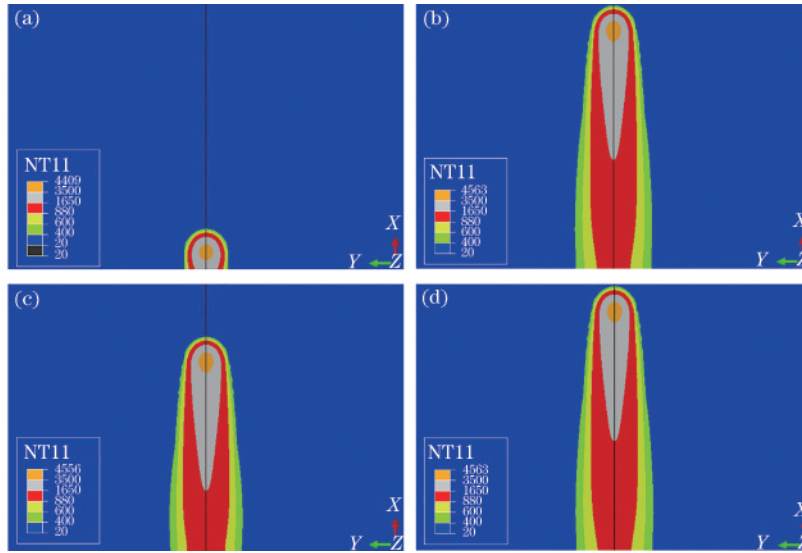


图 5 焊接过程的温度场分布。(a) $t=0.2\text{ s}$; (b) $t=0.8\text{ s}$; (c) $t=1.6\text{ s}$; (d) $t=2.0\text{ s}$

Fig. 5 Temperature field distribution of welding process. (a) $t=0.2\text{ s}$; (b) $t=0.8\text{ s}$; (c) $t=1.6\text{ s}$; (d) $t=2.0\text{ s}$

热源中心附近区域的温度分布与 $t=1.6\text{ s}$ 时基本一致,但尾端温度扩散范围略有增加。

3.2 热循环曲线分析

热循环数据可为焊件的相关分析提供数据支撑,如预测焊缝和热影响区中的微观结构以及焊缝开裂的敏感性^[22],因此焊接过程中热循环曲线的分析显得尤为重要。为方便对比焊缝不同位置的热循环曲线,从深度、宽度和长度三个不同方向上取不同点分析热循环曲线,取点位置如图 6 所示(长度单位为 mm)。各节点的热循环曲线如图 7 所示。从图 7(a)可以发现:焊缝中心从 A1 到 A4 点的温度变化趋势一致,焊缝在极短时间内达到最高温度,加热速度远大于冷却速度;冷却过程中,温度降到液相线时,由于液态转变为固态需要释放热量,冷却速度首次突变锐减,降低到固相线时,冷却速度再次突变。从图 7(b)可以发现,沿深度方向上不同节点曲线峰值变化较大,深度越深节点最高温度越小,加热和冷却时间越短。从图 7(c)可以发现,宽度方向上各节点整体温度变化趋势和深度类似,最高温度均随节点与焊缝上表面中心距离的增加而减小。对比 B2 与 C2、B3 与 C3 节点的热循环曲线可以发现,深

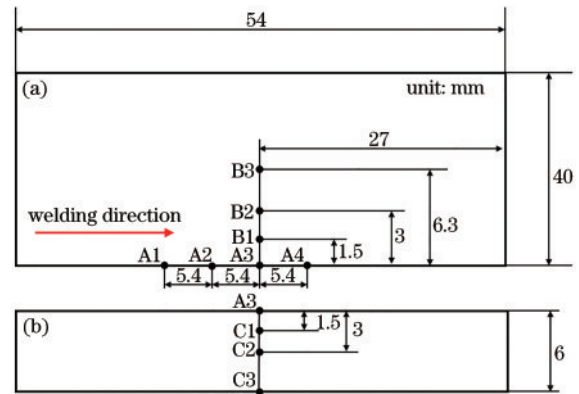


图 6 焊接热循环曲线取点示意图。(a) 上表面; (b) 焊缝截面
Fig. 6 Schematic diagram of welding thermal cycle curve taking points. (a) Top surface; (b) weld cross section

度方向上的最高温度及高温停留时间远大于宽度方向。原因是深度方向存在激光热源的加热作用,而宽度方向上热源作用范围以外仅靠热传导使温度升高,相比深度方向,沿宽度方向上温度变化更剧烈。这表明在宽度方向上,焊缝组织不均匀,且性能差异较大,焊接过程中应尽可能地使宽度方向上的温度变化平缓。

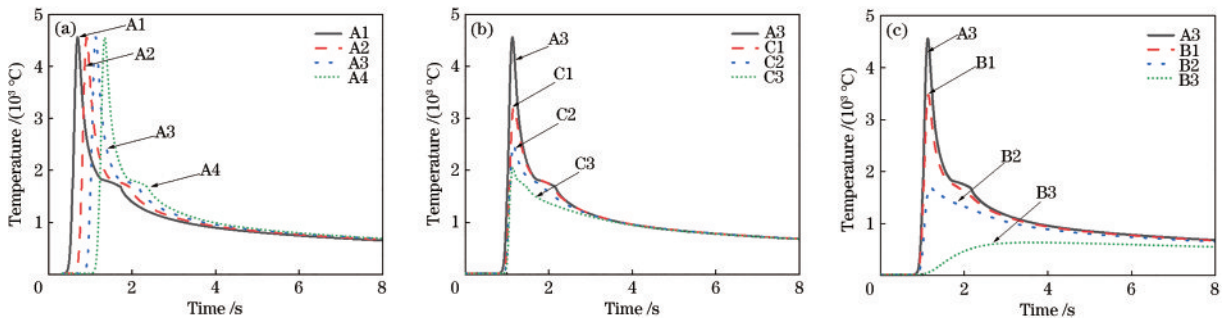


图 7 不同节点的热循环曲线。(a) 长度方向; (b) 深度方向; (c) 宽度方向

Fig. 7 Thermal cycle curves of different nodes. (a) Welding direction; (b) depth direction; (c) weld direction

3.3 工艺参数对最高温度的影响

图 8 为工艺参数对熔池不同位置最高温度的影响。从图 8(a) 可以发现: 熔池不同位置的最高温度随激光功率的增加而升高, 且节点与上表面的距离越远, 激光功率对最高温度的增幅越小; 当焊接速度为 25 mm/s, 激光功率从 6000 W 增加到 9000 W 时, A3 点的最高温度从 3650 °C 升到 5003 °C, 而 C3 点的最高温度从 1760 °C 升到 2383 °C。从图 8(b) 可以发现, 熔池内不同

节点处的最高温度随焊接速度的增加而降低, 且节点与上表面的距离越远, 焊接速度对最高温度的影响越小。激光功率为 7500 W, 焊接速度从 10 mm/s 增加到 40 mm/s 时, A3 点的最高温度从 5830 °C 降到 3478 °C, 而 C3 点的最高温度从 3747 °C 降到 1662 °C。这表明相比于激光功率, 焊接速度对最高温度的影响相对较大。因此可通过增大焊接速度减小最高温度, 宽度方向上温度梯度随之减小, 从而使焊缝组织性能得到改善。

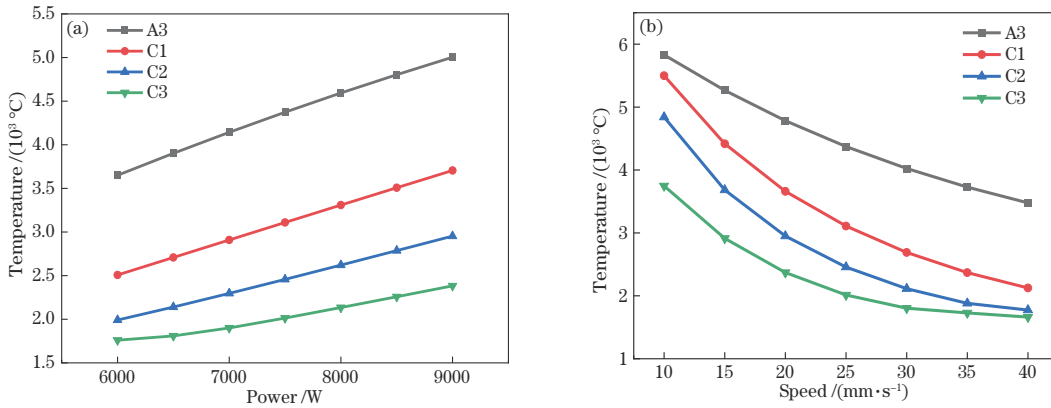


图 8 工艺参数对最高温度的影响。(a) 功率对最高温度影响; (b) 焊速对最高温度影响

Fig. 8 Influence of process parameters on the maximum temperature. (a) Influence of power on maximum temperature; (b) influence of welding speed on maximum temperature

3.4 工艺参数对冷却速度的影响

在凝固时, 凝固温度范围内的冷却速度会影响焊

后组织的晶粒尺寸^[23]。以平衡态为例, 分析激光功率对不同温度范围内平均冷却速度的影响。图 9(a) 和

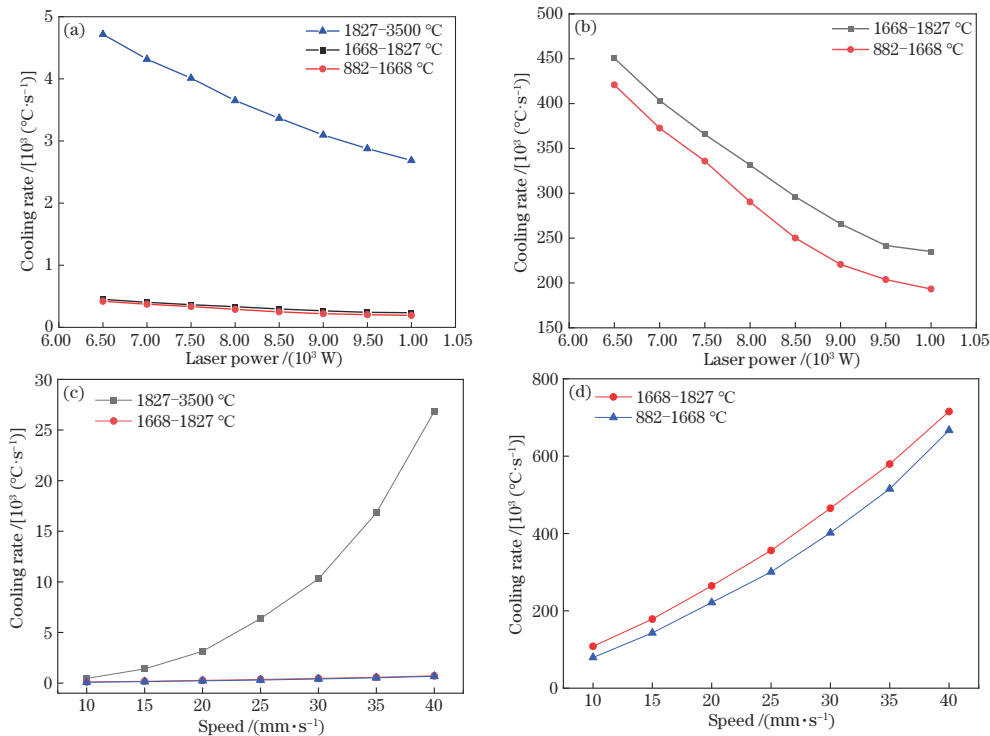


图 9 工艺参数与冷却速度的关系。(a) 激光功率与冷却速度的关系; (b) 882~1827 °C 范围内激光功率与冷却速度的关系; (c) 焊接速度与冷却速度的关系; (d) 882~1827 °C 范围内焊接速度与冷却速度的关系

Fig. 9 Relationship between process parameters and cooling rate. (a) Relationship between laser power and cooling rate; (b) relationship between laser power and cooling rate in the range of 882-1827 °C; (c) relationship between welding speed and cooling rate; (d) relationship between welding speed and cooling speed in the range of 882-1827 °C

图 9(b)为冷却速度与激光功率的关系。焊接速度为 25 mm/s,激光功率由 6500 W 增加至 9500 W,熔池金属处于液相线和沸点之间(1827~3500 °C)、固相线和液相线之间(1668~1827 °C)以及相变温度和固相线之间(882~1668 °C)。可以发现,随着激光功率的增大,热输入增加,各温度区间平均冷却速度均随之减小,沸点到液相线温度区间的平均冷却速度受激光功率变化的影响远大于液相线以下温度区间的冷却速度。图 9(c)和图 9(d)是激光功率为 7500 W 时焊接速度对冷却速度的影响。可以发现,当焊接速度为 10 mm/s 时,各区间冷却速度相近,随着焊接速度的增加,沸点到液相线的平均冷却速度剧增,而液相线以下冷却速度变化较小。对比发现,焊接速度对冷却速度的影响远大于焊接功率,对于工业纯钛热导率的影响极小,减小激光功率不会对温度变化造成较大的影响,而增大焊接速度能使单位面积上热输入时间减少,增大热传递速度,导致冷却速度变化更大。

3.5 焊后应力场的分析

焊接后冷却至室温时的应力场分布如图 10 所示。由纵向应力分布(S_{11})云图可知,焊缝中心为拉应力,最大拉应力出现在热影响区,远离焊缝中心的母材区为压应力,最大拉应力为 257.6 MPa。由横向应力分布(S_{22})云图可知,焊缝中心拉应力较小,最大拉应力出现在热影响区,起焊点和焊接结束点为压应力,最大拉应力为 359.9 MPa。拉应力主要集中在热影响区,要想获得性能优异的焊件,应尽可能减小热影响区范围或减小拉应力。图 11 为沿焊缝方向的应力分布曲线。可以发现,纵向残余应力在起焊点与结束点都出现较小压应力,远离起焊点时,压应力逐渐转化为拉应力,拉应力缓慢增大,焊接达到稳定时应力趋于定值,随后逐渐减小。由横向残余应力可以发现,在焊接开始和结束时,都出现压应力,在焊缝中间一段为拉应力,最大横向应力出现在焊缝路径中间。

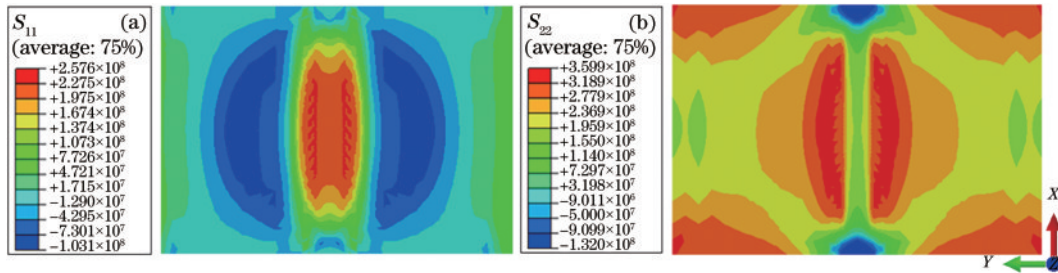


图 10 应力分布。(a)纵向残余应力;(b)横向残余应力

Fig. 10 Stress distribution. (a) Longitudinal residual stress (b) transverse residual stress

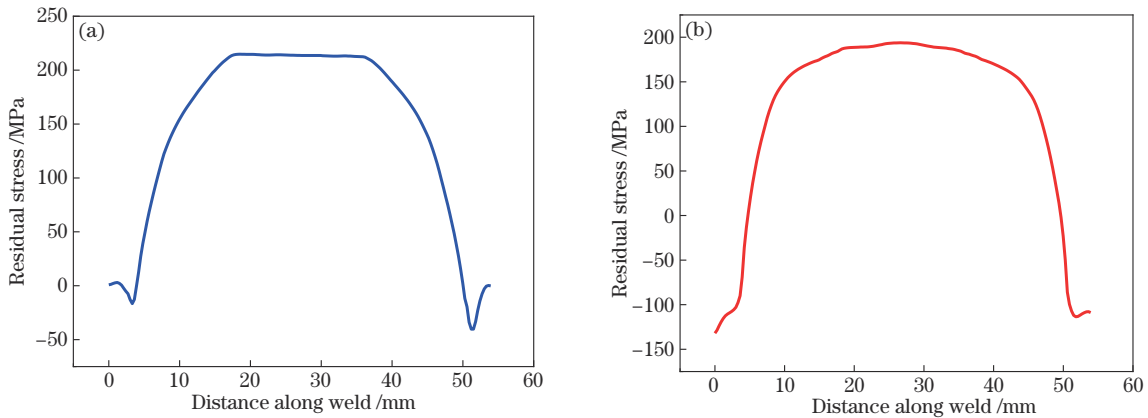


图 11 沿焊缝方向残余应力分布。(a)纵向残余应力;(b)横向残余应力

Fig. 11 Residual stress distribution along the weld direction. (a) Longitudinal residual stress; (b) transverse residual stress

4 结 论

以厚度为 6 mm 的 TA2 工业纯钛为对象,用 ABAQUS 对激光焊接过程中的温度场和工艺参数对熔池的影响进行了计算分析和实验验证,验证结果如下。

1) 模拟计算获得的熔池形状、尺寸与实验获得的

焊缝基本吻合,验证了复合热源模型的合理性。

2) 焊接过程中的准稳态区间内:激光功率增加,熔池内温度升高,上表面增幅最大,且不同温度区间冷却速度均减小,高温区冷却速度减小量最大;随着焊接速度的增加,熔池最高温度逐渐减小,不同温度区间的冷却速度也逐渐减小,最大残余应力主要分布在热影响区。

3) 为使焊件性能更优异,焊接过程应尽量采用较高的焊速,以降低焊缝的最高温度,增大冷却速度。

参 考 文 献

- [1] Chen S L, Luo S X, Yu H, et al. Effect of beam defocusing on porosity formation in laser-MIG hybrid welded TA2 titanium alloy joints[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 58: 1221-1231.
- [2] Yang X W, Li W Y, Fu Y, et al. Finite element modelling for temperature, stresses and strains calculation in linear friction welding of TB9 titanium alloy [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(5): 4797-4818.
- [3] Zhan X H, Peng Q Y, Wei Y H, et al. Experimental and simulation study on the microstructure of TA15 titanium alloy laser beam welded joints[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 94: 279-289.
- [4] Zhang Y, Chen Y K, Zhou J P, et al. Experimental and numerical study on microstructure and mechanical properties for laser welding-brazing of TC4 Titanium alloy and 304 stainless steel with Cu-base filler metal[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(1): 465-477.
- [5] Liu J Z, Zhan X H, Gao Z N, et al. Microstructure and stress distribution of TC4 titanium alloy joint using laser-multi-pass-narrow-gap welding[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 108(11): 3725-3735.
- [6] Xiong L D, Mi G Y, Wang C M, et al. Numerical simulation of residual stress for laser welding of Ti-6Al-4V alloy considering solid-state phase transformation[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(6): 3349-3360.
- [7] Geng S N, Jiang P, Guo L Y, et al. Multi-scale simulation of grain/sub-grain structure evolution during solidification in laser welding of aluminum alloys[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 149: 119252.
- [8] 郭顺, 彭勇, 朱军, 等. 钛/铝激光焊接的微观组织及力学性能[J]. *中国激光*, 2018, 45(11): 1102010.
Guo S, Peng Y, Zhu J, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded Ti/Al alloys[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1102010.
- [9] 胡林西, 周怙武, 贾骁, 等. Zr - Sn - Nb - Fe 铝合金薄板激光对接焊及数值模拟[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0702002.
Hu L X, Zhou D W, Jia X, et al. Numerical simulation and laser butt welding of Zr-Sn-Nb-Fe zirconium alloy sheets[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0702002.
- [10] Dal M, Fabbro R. An overview of the state of art in laser welding simulation[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 78: 2-14.
- [11] 陈嘉伟, 熊飞宇, 黄辰阳, 等. 金属增材制造数值模拟[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2020, 50(9): 104-128.
- Chen J W, Xiong F Y, Huang C Y, et al. Numerical simulation on metallic additive manufacturing[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2020, 50(9): 104-128.
- [12] 陈德宁, 刘婷婷, 廖文和, 等. 扫描策略对金属粉末选区激光熔化温度场的影响[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0403003.
Chen D N, Liu T T, Liao W H, et al. Temperature field during selective laser melting of metal powder under different scanning strategies[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0403003.
- [13] 吴迪. 合金钢激光熔化沉积成形温度场和应力场有限元分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
Wu D. Finite element analysis for temperature and stresses in the alloy steel laser melting deposition process [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [14] Li Z X, Rostam K, Panjehpour A, et al. Experimental and numerical study of temperature field and molten pool dimensions in dissimilar thickness laser welding of Ti₆Al₄V alloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 49: 438-446.
- [15] 李兴宇, 李芳, 华学明, 等. 工业纯钛 TA2 板激光焊接工艺[J]. *电焊机*, 2018, 48(7): 19-24, 35.
Li X Y, Li F, Hua X M, et al. Laser welding technology of industrial pure titanium TA2[J]. *Electric Welding Machine*, 2018, 48(7): 19-24, 35.
- [16] 李镇, 石岩, 刘佳, 等. 工艺参数对工业纯钛激光焊接接头组织性能的影响[J]. *应用激光*, 2016, 36(1): 53-57.
Li Z, Shi Y, Liu J, et al. Effect of laser welding parameters on microstructure and mechanical properties of commercial pure titanium[J]. *Applied Laser*, 2016, 36(1): 53-57.
- [17] Akbari M, Saedodin S, Toghraie D, et al. Experimental and numerical investigation of temperature distribution and melt pool geometry during pulsed laser welding of Ti₆Al₄V alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 59: 52-59.
- [18] 张峰. 工业纯钛 TA2 激光焊接工艺及其气孔形成机理研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.
Zhang F. Study on the mechanism of porosity formation and laser welding technology of commercial pure titanium TA2[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2017.
- [19] 吴向阳, 宿浩, 孙岩, 等. 激光+GMAW 复合热源焊接过程热-力耦合数值分析[J]. *焊接学报*, 2021, 42(1): 91-96, 103.
Wu X Y, Su H, Sun Y, et al. Thermal-mechanical coupled numerical analysis of laser + GMAW hybrid heat source welding process[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2021, 42(1): 91-96, 103.
- [20] Kik T. Heat source models in numerical simulations of laser welding[J]. *Materials*, 2020, 13(11): 2653.
- [21] 王博士, 孔谅, 王敏, 等. TA2 薄壁钛管双 TIG 焊温度场和残余应力分布对接头组织性能的影响[J]. *电焊机*, 2021, 51(4): 8, 14-19.
Wang B S, Kong L, Wang M, et al. Influence of temperature field and residual stress distribution on

- microstructure and properties of pure titanium TA2 thin-walled pipe by tandem TIG welding[J]. *Electric Welding Machine*, 2021, 51(4): 8, 14-19.
- [22] Tsirkas S A. Numerical simulation of the laser welding process for the prediction of temperature distribution on welded aluminium aircraft components[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 100: 45-56.
- [23] 薛志清. 铜-铝异种金属激光焊熔池流体动力学模拟与焊缝组织特征研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- Xue Z Q. Fluid dynamics simulation of laser-welded Cu/Al molten pool and researches on joint microstructure characteristics[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.