

引用格式:邢博,王世清. Ti_2AlNb 钛合金电子束焊温度场与应力场有限元分析[J]. 热加工工艺, 2024, 53(7): 47-52+60.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20220224

http://www.rjggjy.net rjggjy@vip.163.com

Ti_2AlNb 钛合金电子束焊温度场 与应力场有限元分析

邢博, 王世清

(西安石油大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710065)

摘要:基于有限元软件,采用高斯面-高斯旋转体复合热源深入研究了 Ti_2AlNb 钛合金电子束焊接头的温度场和残余应力场。结果表明:当电子束流为 10 mA,焊接速度为 360 mm/min 时焊接接头成型较好,优先采用较大电子束流易形成熔宽较大的焊缝。焊缝内部应力为复杂三向应力状态,残余应力以纵向拉应力为主,集中分布于距焊缝中心 3.5 mm 范围内。焊后最大等效力为 635 MPa,小于材料屈服强度,较为安全。

关键词:电子束焊;数值模拟;温度场;残余应力

中图分类号: TG404

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2024)07-0047-06

Finite Element Analysis of Temperature Field and Stress Field of Ti_2AlNb Titanium Alloy during Electron Beam Welding

XING Bo, WANG Shiqing

(College of Material Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: The temperature field and residual stress field of Ti_2AlNb titanium alloy electron beam welding joint were studied by using Gaussian surface and rotary body composite heat source based on finite element software. The results show that the welding joint is well formed when the electronic beam current is 10 mA and the welding speed is 360 mm/min. It is preferred to use a big electron beam current to form welded seam with large weld width. The central area of the weld suffers complex stresses in three directions, and the residual stress is mainly longitudinal tensile stress, which is concentrated within 3.5 mm from the weldline. The maximum equivalent stress after welding is 635 MPa, which is less than the yield strength of the material, so the structure is safe.

Key words: electron beam welding; numerical simulation; temperature field; residual stress

Ti_2AlNb 合金成分通常为 Ti-(22~25)Al-(23~30)Nb (at%), 由于具备先进航空构件服役所需的高比强度, 良好的高温蠕变抗力、塑韧性, 轻质耐高温等特点, 替代镍基高温合金最大可为航空发动机减重 40%, 因而在航空航天领域备受瞩目^[1-3]。其中加入的 β 稳定元素 Nb 在提高合金熔点、改善 α_2 相有序性的同时也增强了焊接接头对环境的敏感性^[4]。

焊接作为制造连接复杂航空构件的关键技术之一^[5], 当前 Ti_2AlNb 合金的焊接方法包括激光焊、电子束焊、扩散焊和点焊等, 研究内容集中在焊缝成型及接头组织演变、再热裂纹诱因机理分析、有限元法模拟残余应力等^[6-9]。有限元分析高效且成本低廉, 考虑焊接参数^[10]、熔池流动演化^[11], 结合实验比较复合热源预测准确度^[12-13]、改进更贴合实际工况的理论模型^[14]等已取得一定进展。通常航空构件对形状尺寸的精度要求苛刻, 焊接残余应力与变形会严重降低构件的服役安全性, 因此分析 Ti_2AlNb 合金电子束焊温度场和应力场理论及其应用意义重大。本文以 Ti-22Al-25Nb 钛合金薄板为研究对象, 基于 ANSYS 有限元软件, 采用复合热源模型研究钛合金电子束焊过程, 采用正交试验法获取最佳焊接工艺参数, 系统分析温度场与应力场规律。

收稿日期: 2022-01-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51975469); 郑州机械研究所新型钎焊材料与技术国家重点实验室开放课题项目(SKLABFMT-2019-04); 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室开放课题项目(AWJ-22M09)

作者简介: 邢博(1996-), 男, 陕西商洛人, 硕士, 主要研究方向: 钛合金焊接及模拟; E-mail: xingbo_edu@foxmail.com

通讯作者: 王世清(1980-), 女, 内蒙古开鲁人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 轻质合金的焊接; 电话: 029-88382607;

E-mail: sqwang@xsyu.edu.cn

1 焊接模型建立

1.1 有限元模型

试验材料为 Ti-22Al-25Nb 钛合金平板,模型尺寸为 100 mm×50 mm×5 mm。采用真空电子束焊工艺,表面聚焦,加速电压为 60 kV,进行电子束流分别为 6、8、10 mA,焊接速度分别为 360、420、480 mm/min 的两因素三水平正交试验。

考虑模型对称性,为提高计算效率取焊缝一侧工件建模,焊件模型网格划分如图 1 所示。焊缝区最小单元尺寸为 0.5 mm×0.5 mm×0.5 mm,远离焊缝采用稀疏网格,最大尺寸为 2 mm×1.67 mm×1.95 mm,两者采用四面体单元过渡。模型单元总数 46068,节点总数 30058。沿 x 轴方向进行电子束焊接,焊缝中心对称面施加绝热边界条件,其他面施加辐射散热边界条件。Ti₂AlNb 钛合金热物理及力学性能参数通过查阅文献[3,6]并进行拟合外推得到,见表 1。采用顺序热力间接耦合计算焊接应力,对称面的 y 向固定,A 点 x、z 方向和 B 点 z 方向固定以限制模型不发生转动和刚性移动。

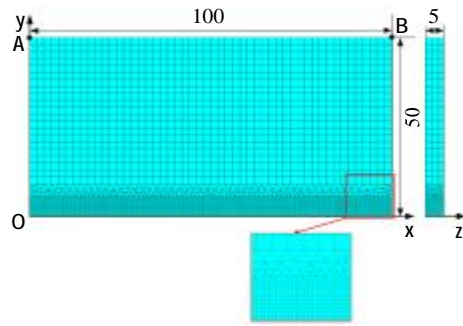


图 1 焊件三维模型网格划分(mm)
Fig.1 Finite element mesh of the weldment model (mm)

1.2 热源模型

电子束焊接的焊缝具有深穿透“匙孔”特征,高斯旋转体热源能较好反映熔池内沿焊缝深度方向的能量衰减分布,但不足以准确描述熔池表面的热流密度分布,通常采用高斯面热源来模拟焊缝表面的热分布。因此本文建立“高斯面-高斯旋转体”复合热源模型模拟电子束焊接过程。

设复合热源总功率为 P,取高斯面热源功率分布系数为 0.3,即占总功率 30%。其热流密度 $q_s(x,y)$ 的数学表达式为:

表 1 Ti₂AlNb 合金热物理及力学性能参数^[3,6]

Tab.1 Thermophysical and mechanical properties of Ti₂AlNb alloy^[3,6]

温度 /℃	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
比热容 / $(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	417	438	465	493	521	548	576	603	631	659	686
热导率 / $(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	5.96	7.25	9.23	11.4	13.7	16	18.1	19.9	21.1	21.6	21.1
泊松比	0.31	0.3	0.3	0.3	0.31	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
弹性模量 /GPa	121	119	118	116	115	113	109	105	101	99	95
线膨胀系数 / $10^{-6} ^\circ C^{-1}$	-	8.3	8.9	9.4	9.6	9.8	10	10.3	10.6	10.8	12
屈服强度 /MPa	980	-	-	-	900	880	835	700	-	270	120

$$q_s(x,y) = \frac{3\eta P_s}{\pi r_1^2} \exp\left[-\frac{3(x^2+y^2)}{r_1^2}\right] \quad (1)$$

高斯旋转体热源的能在中心处达最大值,在深度 z 向迅速递减。其空间各处热流密度 $q_v(x,y,z)$ 的数学表达式为:

$$q_v(x,y,z) = \frac{9\eta P_v}{\pi r_2^2(1-1/e^3)} \exp\left[-\frac{9(x^2+y^2)}{r_2^2 \ln(h/z)}\right] \quad (2)$$

式中:热源总能量输入 $P=\eta UI$,热效率 $\eta=80\%$;面热源加热半径 $r_1=2\text{ mm}$,体热源加热半径 $r_2=0.8\text{ mm}$, $h=5\text{ mm}$ 。

2 模拟结果与分析

2.1 温度场分析

图 2 为焊接速度 360 mm/min,不同电子束流下

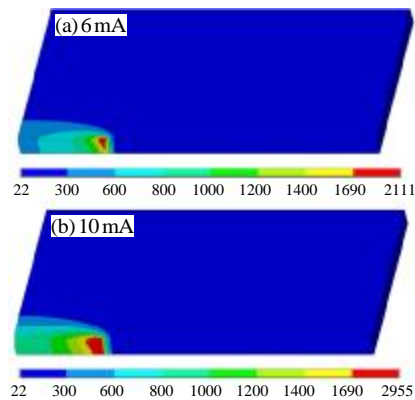


图 2 不同电子束流下的温度场(℃)

Fig.2 Temperature field under different electron beam currents(℃)

的温度场(彩图见电子版,下同)。随电子束流增大,熔池熔化范围增加。当电子束流为 6 mA 时,熔池底

部热输入过低,接头未焊透;当电子束流为 10mA 时,熔池峰值温度为 2955℃,焊透性较好,可实现有效连接。故下文取电子束流 10mA,焊接速度 360 mm/min 的参数进行温度场研究。

图 3 为电子束流 10mA,焊接速度 360 mm/min 下熔池的等温线。随着热源向前推移,熔池前方温度不断升高并形成较大的温度梯度,等温线十分密集。由于热量传递主要依靠热传导,熔池后方金属受到已加热区域的热量传递作用,其温度下降速率逐渐降低。等温线整体呈现出狭长的椭圆状轨迹,分布于热源移动路径上,熔池表现为钉状“匙孔”形貌。

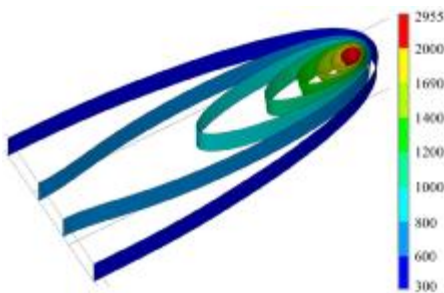


图 3 准稳态下熔池的等温线(℃)

Fig.3 Isothermal line of molten pool in quasi-steady state (℃)

图 4(a)为 8.3s 时沿焊接方向的温度场剖面,在焊缝上间隔取节点 (7、8 点间隔 10mm,8、9 点间隔

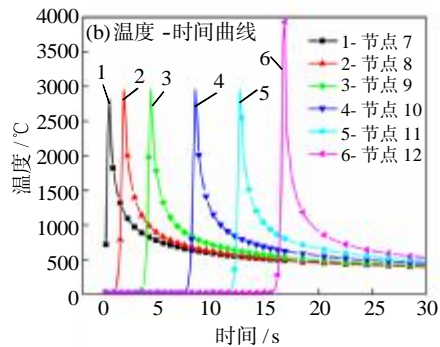
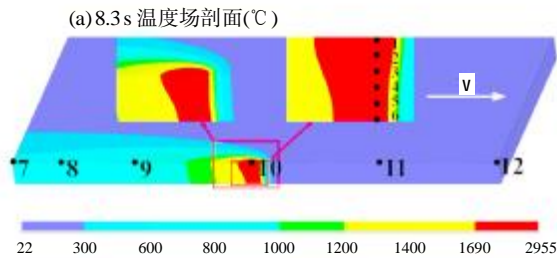


图 4 沿焊接方向节点的温度分布

Fig.4 Temperature distribution of the joints along the welding direction

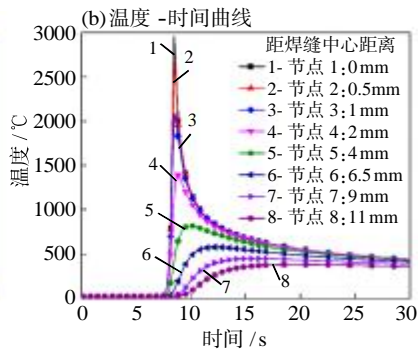
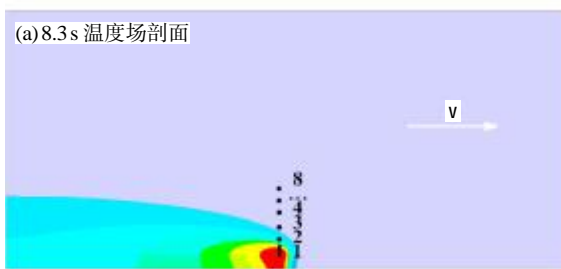


图 5 垂直于焊缝方向节点的热循环曲线

Fig.5 Thermal cycle curves of nodes perpendicular to the weld direction

15 mm,9~12 点相邻点间隔 25 mm) 分析焊接热循环,如图 4(b)所示。初始温度为室温,随热源移动节点温度急剧上升至最高值,然后随热源离开逐渐下降并在一段时间后趋近一致。板材上的最高温度为 2955℃,位于熔池中心节点 1 处,略低于 Ti 的沸点 3285℃,最低温度为 2236℃,位于熔池底部节点 6 处,表明焊件熔透性良好。节点 7 为焊接起始位置,热源未达到稳定状态,峰值温度较低;热源移动 10 mm 后至节点 8 处已达准稳态,热循环曲线和峰值温度与节点 9~11 的相同;节点 12 焊缝末端缺少新材料导热^[15],产生热积累使最高温度达到 3931℃,高于准稳态峰值。温度热循环曲线仅在焊缝始末端产生轻微跳跃,沿焊接方向温度梯度小使纵向局部塑性变形程度小,为焊接应力分布提供了良好基础。但焊接始末端的热循环曲线表明试样在这两处未达到准稳态的理想焊接状态,这种热源能量上的差异易导致焊件熔透性变差,因此在实际工艺中有时会采用引弧板及熄弧板来改善焊缝始末端的熔透性^[16]。

在垂直于焊缝方向以不同间距取节点,其焊接热循环曲线如图 5 所示。各点热循环曲线变化趋势较为一致,出现升温快、降温慢的特点。距焊缝中心

越近峰值温度越高,温度变化速率愈加显著;远离焊缝中心则相反,距离越远峰值温度越低,温度变化速率愈慢。这是由于当电子束聚焦于板材上时,焊缝急剧升温并通过热传导方式向远离焊缝区域传递热量;但真空环境存在辐射散热造成热量损失,即离焊缝越远,能量损失越严重,峰值温度越低。

2.2 电子束焊缝形貌对比

图 6 为不同工艺参数下热源移动至板材正中心时的电子束焊缝截面形貌,将温度高于 1690℃ 的区域定为焊接熔池^[6]。热源附近等温线分布密集,随着焊接速度增加或电子束流减小,单位时间内的焊接热输入减小,熔池尺寸及峰值温度均有所降低。当电子束流较小时,热输入过低,接头难以焊透,会导致

焊缝成型质量差;当电子束流较大时,热输入过大则熔池易塌陷,伴随产生合金元素烧损,会降低接头性能。焊接速度过大时易导致熔池残存气体无法逸出,在焊缝处形成气孔。因此选择合适的工艺参数对于成型出稳定无缺陷的焊接接头尤为重要。

基于网格大小测量焊缝熔宽。为研究焊接接头尺寸受工艺参数的影响规律,选择四因素三水平 $L_9(3^4)$ 正交表分析电子束流和焊接速度对熔宽尺寸的影响,见表 2。结果表明,电子束流对应的极差值 0.58 大于焊接速度的极差值 0.21,说明电子束流对焊缝熔宽的影响最大,焊接速度次之。图 6 中不同参数下的焊缝形貌也能反映这一特点,表明焊接过程中优先采用较大电子束流,易形成熔宽较大的焊缝。

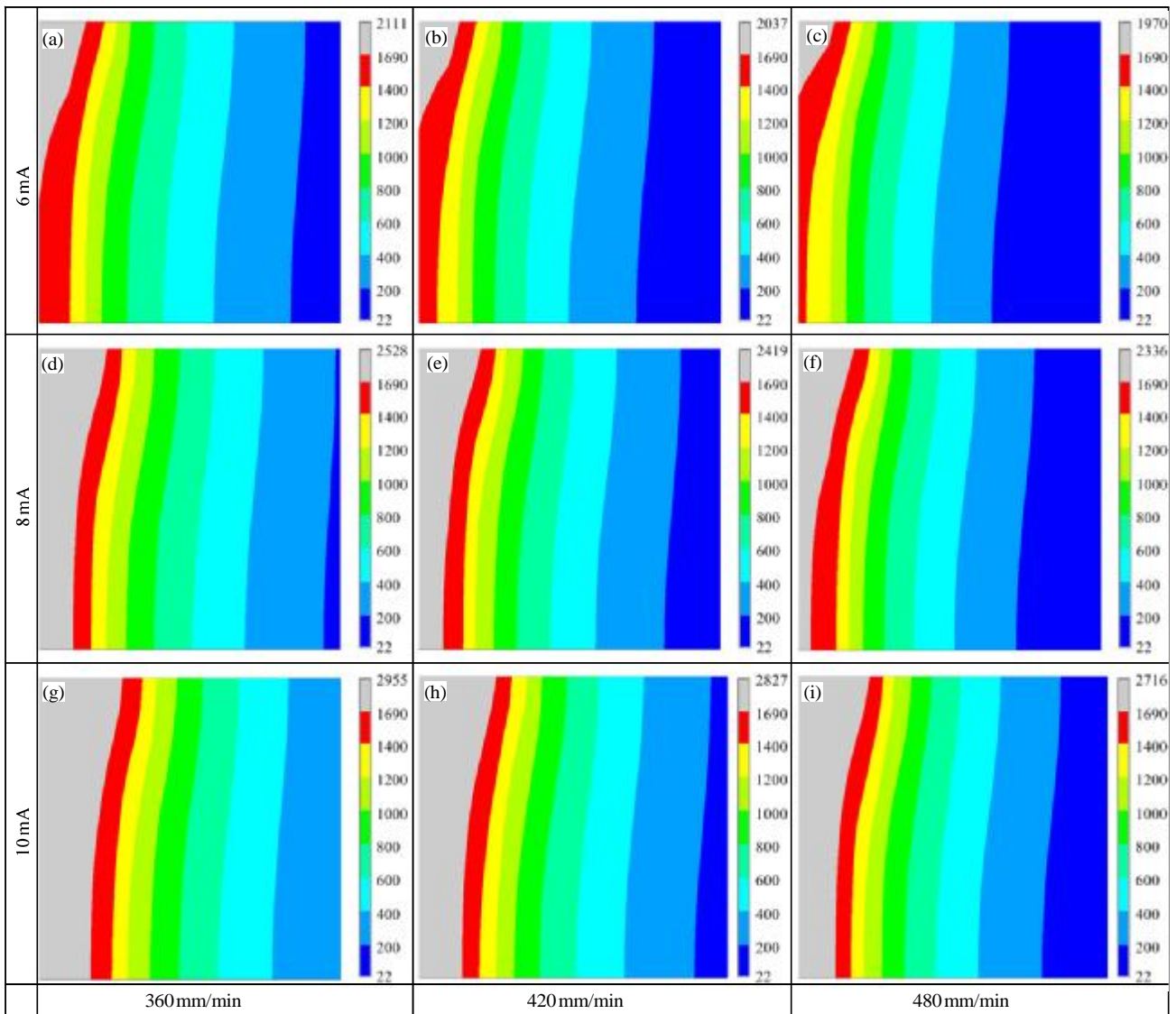


图 6 不同工艺参数下的焊缝截面形貌(℃)

Fig.6 Weld sectional morphologies under different process parameters (℃)

表 2 焊缝熔宽试验结果与极差分析
Tab.2 Range analysis results of weld width

序号	电子束流 /mA	焊接速度 /($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	熔宽 /mm
1	6	360	0.78
2	6	420	0.68
3	6	480	0.60
4	8	360	1.13
5	8	420	1.03
6	8	480	0.92
7	10	360	1.39
8	10	420	1.26
9	10	480	1.15
极差	k_1	0.69	1.10
	k_2	1.03	0.99
	k_3	1.27	0.89
	R	0.58	0.21

2.3 残余应力分析

合适的焊接工艺参数应具备热输入适中,使接头成型良好的特点。电子束流为影响焊接热输入的主要因素,过高的热输入会导致 Ti_2AlNb 合金焊缝形成单一 B2 相,与母材组织不连续,进而降低接头的力学性能。适当减小焊接速度可以增加热源停留时间,并有利于熔池中的气体逸出。基于正交试验和极差分析结果,本研究采用电子束流 10mA,焊接速度 360mm/min 的工艺参数进行残余应力模拟试验。

图 7 为试板 $y=0\text{mm}$ 截面沿焊接方向的残余应力分布,残余应力在焊缝中部基本保持不变,形成了稳定区,为拉应力;在焊缝边缘区残余应力急剧下降,由拉应力转变为压应力。焊接过程中热源分布不均,温度梯度大与材料加热和冷却的不同步是造成残余应力的主要原因。如图 7(a)所示,横向应力在焊缝上下表面处表现为低压应力值,在焊缝起始端和结束端较大,焊缝上下表面残余应力较 1/2 厚

度处的焊缝内部平均低 120MPa。如图 7(b)所示,纵向应力整体表现为拉应力,在焊缝 1/2 厚度处最高值可达 556MPa,焊缝上下表面处残余应力略低于 1/2 板厚处的。横向、纵向应力在焊缝内部与表面有所差别,这是由于焊接过程中上表面金属先于内部金属熔化后冷却,焊缝内部金属受到已凝固金属的约束而表现出残余应力高于焊缝表面的应力状态。法向应力分布与材料厚度密切相关,通常厚板的法向残余应力较大时构件易出现层状撕裂失效,本模型厚度为 5mm,属于薄板,应力值较小。如图 7(c)所示,法向应力以拉应力为主,但峰值应力很小,焊缝内部最高为 52MPa,对材料结构安全影响甚微。由于热源离开板材时温差过大,焊缝末端出现金属凝固收缩作用,最低压应力为 -61MPa。

图 8 为 $x=50\text{mm}$ 处截面沿垂直于焊缝方向的残余应力分布。各向残余应力在近缝热影响区处起伏变化后趋于稳定。如图 8(a)所示,对于上下表面,横向应力在焊缝为压应力,最大值为 -53MPa;近缝热影响区处出现拉应力峰值,最大为 100MPa。对于 1/2 厚度,冷却过程中受到周围金属拘束挤压作用表现为拉应力,最大值为 65MPa;在距焊缝约 3.5mm 处,横向残余应力随距焊缝中心距离的增大逐渐趋于平稳。传统弧焊焊缝熔宽大,横向收缩占主导作用,横向应力在焊缝处常为拉应力,而电子束焊熔宽小,纵向、厚度的收缩力对横向残余应力影响会更为显著,因此横向应力在焊缝内部表现为拉应力、表面为压应力^[3]。如图 8(b)所示,纵向应力在焊缝及近缝区为拉应力,焊缝 1/2 厚度处与上下表面较为接近,最大值为 553MPa;在距焊缝 3.5mm 处迅速下降表现为下抛物线状,而后形成约 70MPa 的低压应力区。薄板受法向应力影响较小,如图 8(c)所示,法向

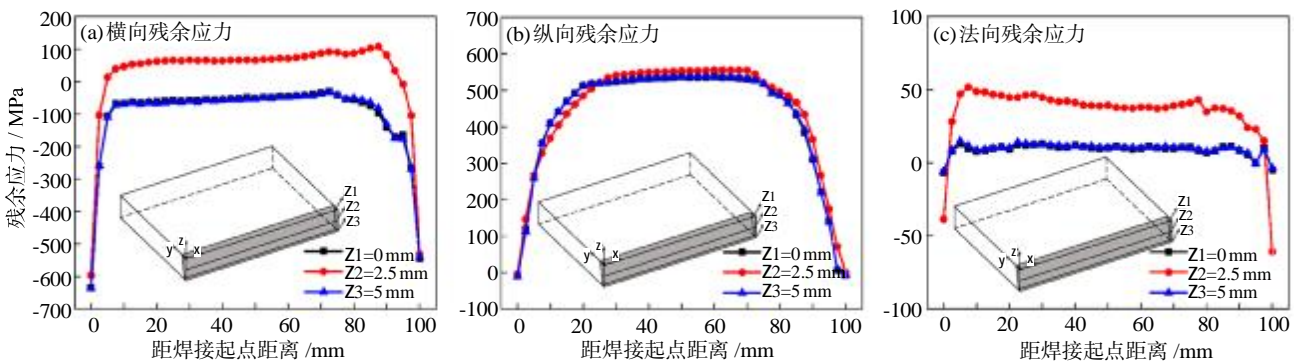


图 7 沿焊接方向的残余应力分布
Fig.7 Residual stress distribution along the welding direction

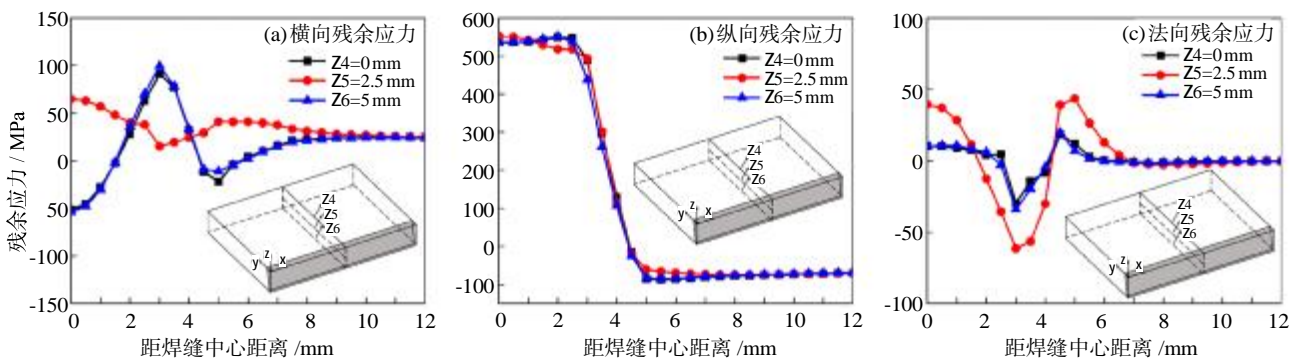


图8 垂直于焊缝方向的残余应力分布

Fig.8 Residual stress distribution along the direction perpendicular to the welding direction

应力在距焊缝 3 mm 处形成了较窄的压应力区,焊缝及近缝区的残余应力在 ± 50 MPa 以内。

综上,残余应力集中分布于距焊缝中心 3.5 mm 内的焊缝和近缝区,以高纵向拉应力为主,热影响区处则为复杂的低横向、法向残余应力,因此材料在纵向的收缩变形会较为显著。由于热源离开熔池后金属先后冷却凝固的差异及焊缝内部剧烈的热胀冷缩作用,焊缝处存在复杂的三向应力。材料最大纵向残余拉应力值为 556MPa,最大 Mises 等效应力为 635 MPa(图 9),未超过材料室温屈服强度 920MPa^[6],结构较为安全。

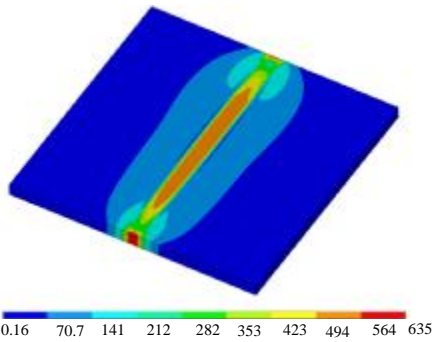


图9 试件的 Mises 等效应力云图(MPa)

Fig.9 Contour of Mises residual stress of the specimen (MPa)

3 结论

(1) 采用高斯面-高斯旋转体复合热源模拟 Ti₂AlNb 合金电子束焊形貌较为准确,等温线集中于热源附近的温度梯度较大。电子束流是影响熔宽的主要因素,电子束流 10 mA 和焊接速度 360 mm/min 下的接头成型较好。

(2) 沿焊接方向,残余应力在焊缝中部分布平稳,接头始末两端处应力值急剧下降,焊缝内部应力值略高于上下表面的;垂直于焊缝方向,各向应力先起伏变化后趋于稳定,由于材料凝固不同步和热胀

冷缩作用近缝区出现较窄的压应力区。

(3) 焊后残余应力集中分布于距焊缝中心 3.5 mm 的区域内,电子束焊的纵向收缩作用较为显著,以纵向拉应力为主。最大等效应力值为 635 MPa,未超过材料室温屈服强度,结构较为安全。

参考文献:

- [1] 冯艾寒,李渤渤,沈军. Ti₂AlNb 基合金的研究进展[J]. 材料与冶金学报,2011(1):34-42.
- [2] 蔡建明,弭光宝,高帆,等. 航空发动机用先进高温钛合金材料技术研究与进展[J]. 材料工程,2016(8):1-10.
- [3] 李艳军,赵玥,吴爱萍,等. Ti₂AlNb 合金电子束熔透焊的数值模拟[J]. 稀有金属材料与工程,2017,46(5):1341-1345.
- [4] 陈玮,李晋炜,史一宁. Ti₂AlNb 合金及其焊接技术研究进展[J]. 航空制造技术,2015(17):136-139.
- [5] 张喜燕,赵永庆,白晨光. 钛合金及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [6] Chen Y, Zhang K, Hu X, et al. Study on laser welding of a Ti-22Al-25Nb alloy: Microstructural evolution and high temperature brittle behavior [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 681: 175-185.
- [7] 刘莹莹,李洁洁,张乐. 电子束焊接工艺参数对 Ti₂AlNb/TC18 接头组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2021,31(3): 699-706.
- [8] 杨蕊鸿,林飞,朱岩,等. TC4/Ti₂AlNb 异种合金扩散连接接头组织与性能研究[J]. 热加工工艺,2020,49(5):20-24.
- [9] Cai D, Chen J, Mao X, et al. Reheat cracking in Ti₂AlNb alloy resistance spot weldments [J]. Intermetallics, 2013, 38 (14):63-69.
- [10] 梁晓燕,罗金华,杜汉斌,等. 基于 ANSYS 平台焊接模拟中不同焊接热源的比较[J]. 电焊机,2003(3):29-32.
- [11] Huang B, Chen X, Pang S, et al. A three-dimensional model of coupling dynamics of keyhole and weld pool during electron beam welding [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115: 159-173.

(下转第 60 页)

层与层之间界限清晰,每层沉积高度基本相同,表面平整,成形质量较好。

3 结论

(1) 对于薄壁墙的堆积,熔覆速度、热量散失等因素造成成形件塌陷、表面不平整等现象,通过实时观察,调整送粉量等方法,得到规则形状的薄壁墙。

(2) 针对激光熔覆方形薄壁试件拐角点存在过堆和翘曲等现象,采用“路径随机”方法,路径起止点以四层为一个周期,其中每周期第一、二、三、四层的起点依次为正方形的四个随机点。通过均匀送粉量和路径规划进行熔覆,零件的成形性能得到了改进,成形零件层间均匀、表面平整。

参考文献:

[1] Yan Z R, Liu W W, Tang Z J, et al. Effect of thermal characteristics on distortion in laser cladding of AISI 316L[J].

Journal of Manufacturing Processes, 2019, 44: 309-318.

[2] Gao J L, Wu C Z, Hao Y B, et al. Numerical simulation and experimental investigation on three-dimensional modelling of single-track geometry and temperature evolution by laser cladding [J]. Optics and Laser Technology, 2020, 129 (3): 106-117.


[3] 李广琪,王丽芳,朱刚贤,等. 扫描方式对中空环形激光熔覆层残余应力及基板变形的影响研究 [J]. 表面技术, 2021, 50 (3): 158-170.

[4] 张德强,刘贤德,张文博,等. 扫描路径对单层激光熔覆层质量影响的研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(20): 149-153.

[5] 张干,乌日开西·艾依提,蒋厚峰. 激光熔覆成形过程中变形控制的研究综述[J]. 热加工工艺, 2019, 48(2): 14-17.

[6] 翟伟,张轲,申屹豪,等. 激光快速成型中扫描路径对成型质量的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(4): 151-154.

[7] 梁志刚,战金明,师文庆,等. 扫描路径对薄壁件激光熔覆涂层形变的影响[J]. 激光技术, 2020, 44(4): 447-450.

[8] 裴明源,乌日开西·艾依提,王胜权. 激光熔覆扫描路径对薄板变形的影响研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 53(17): 1-6. 


(上接第 52 页)

[12] 李小兵. 基于不同热源模型的 Q345 钢中厚板焊接温度场数值模拟[J]. 焊接技术, 2020, 49(10): 19-21.

[13] Chukkan J R, Vasudevan M, Muthukumaran S, et al. Simulation of laser butt welding of AISI 316L stainless steel sheet using various heat sources and experimental validation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 219: 48-59.

[14] Wang H, Wang Z, Bai P, et al. Optimized segmented heat source for the numerical simulation of welding-induced deformation in large structures [J]. Advances in Engineering Software, 2018, 117: 1-7.

[15] 施超,石铭霄,赵健,等. AISI304 钢-铌异种金属激光焊温度场及残余应力研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(23): 59-65.

[16] 余昌莲,苏开浪,张春侠,等. 钢板焊接温度场与应力应变场有限元数值模拟[J]. 焊接技术, 2021, 50(4): 16-20. 

(上接第 56 页)

[7] 从保强,丁佳洛. CMT 工艺对 Al-Cu 合金电弧增材制造气孔的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(12): 3149-3153.

[8] 李权,罗志伟,冯晨,等. 2219 铝合金电弧增材制造组织及力学性能的非均匀性 [J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(11): 3969-3976.

[9] 李承德,顾惠敏,王伟,等. 电弧增材制造(WAAM)Al-7Si-0.6Mg-xFe 组织与性能的研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(6): 1860-1866.

[10] 赵昀,卢振洋,陈树君,等. 薄壁结构冷金属过渡增材制造工艺优化[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(8): 82-89.

[11] 蒋旗,张培磊,刘志强,等. 冷金属过渡加脉冲电弧增材制造 4043 铝合金薄壁件的组织和拉伸性能 [J]. 机械工程材料, 2020, 44(1): 57-61.

[12] Dong Bolun, Cai Xiaoyu, Lin Sanbao, et al. Wire arc additive manufacturing of Al-Zn-Mg-Cu alloy: Microstructures and mechanical properties [J]. Additive Manufacturing, 2020, 36: 101447.

[13] Zhou Yinghui, Lin Xin, Kang Nan, et al. Influence of travel speed on microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured 2219 aluminum alloy [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 37(2): 143-153.

[14] Li Sen, Zhang Linjie, Ning Jie, et al. Comparative study on the microstructures and properties of wire+arc additively manufactured 5356 aluminium alloy with argon and nitrogen as the shielding gas [J]. Additive Manufacturing, 2020, 34: 101206. 