

Zr-Sn-Nb-Fe 钎合金薄板激光对接焊及数值模拟

胡林西 周惦武 贾 骁 卢源志 谭 哲 姜德富

湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082

摘要 焊接过程中钎合金板材的温度在 300 °C 以上时钎合金易吸收氢、氧、氮等气体杂质, 这些气体杂质使得钎合金的力学性能急剧下降, 加强焊缝及热影响区的隔离保护和合理制定焊接工艺参数是获得优良焊接质量的关键。以光纤激光器为热源, 对厚度为 0.7 mm 的 Zr-Sn-Nb-Fe (钎-锡-铌-铁) 合金薄板进行激光对接焊试验, 采用 ANSYS 有限元软件, 建立激光对接焊非线性三维传导有限元模型, 模拟计算 Zr-Sn-Nb-Fe 合金薄板的温度场分布。结果表明: 模拟计算获得的熔池形状、尺寸与实际焊缝基本吻合, 验证了采用高斯面热源模型来模拟 Zr-Sn-Nb-Fe 合金薄板激光对接焊温度场的合理性; 温度场最终呈现流星状的稳定分布, 焊缝附近等温线密集, 焊缝熔宽窄, 热影响区小, 板材表面温度在 300 °C 以上的区域的宽度随激光功率的增大而增大, 随焊接速度的增加而减小; 在激光功率为 1300~1500 W, 焊接速度为 50~70 mm/s, 离焦量为 +1~+2 mm, 氩气保护喷嘴直径为 8~12 mm 的条件下, Zr-Sn-Nb-Fe 合金焊接试样的抗拉强度与母材基本相当, 获得了良好的焊缝质量, 焊缝无气孔、裂纹等缺陷, 晶粒细小, 主要元素含量相对母材无明显变化, 焊接试样具备较高力学性能。

关键词 激光技术; 激光对接焊; 数值模拟; 温度场; Zr-Sn-Nb-Fe 合金; 焊接工艺

中图分类号 TG456 . 7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0702002

Numerical Simulation and Laser Butt Welding of Zr-Sn-Nb-Fe Zirconium Alloy Sheets

Hu Linxi Zhou Dianwu Jia Xiao Lu Yuanzhi Tan Zhe Jiang Defu

State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University,
Changsha, Hunan 410082, China

Abstract Hydrogen, oxygen, nitrogen and other gas impurities can be easily absorbed by zirconium alloys above 300 °C during the laser welding process, thus the mechanical property is drastically reduced. The key to ensuring the quality of zirconium alloy welding is to establish reasonable welding process parameters and strengthen the isolation protection for the welding seam and heat affected zone. Laser butt welding test on the 0.7 mm Zr-Sn-Nb-Fe alloy sheet with fiber laser as thermal source is carried out. Based on the ANSYS software, a nonlinear three dimensional (3D) transient heat conduction model is established by means of the finite element analysis. Simulation is done to get the temperature field distribution of the Zr-Sn-Nb-Fe alloy thin sheet. The results show that the weld profile and dimension obtained by simulations are basically consistent with those of the real welds, which verifies the rationality of adopting Gaussian heat source model to simulate the temperature field of Zr-Sn-Nb-Fe alloy thin sheet by laser butt welding. The temperature field presents a stable meteor-shaped distribution, the isotherms are dense near the weld, and the heat affected zone is narrow. The width of the area above 300 °C increases with the increment of laser power, but decreases with the increment of the welding speed. When the laser power is 1300~1500 W, the welding speed is 50~70 mm/s, the defocusing amount is +1~+2 mm, and the argon gas protection nozzle diameter is 8~12 mm, the tensile strength of Zr-Sn-Nb-Fe alloy welded specimens roughly equals to that of the base metal. The weld quality is good, air holes and cracks do not exist, the grain is small, and the contents of the main elements have no obvious changes if compared with that of parent metal. The welded specimens with a high

收稿日期: 2016-01-26; 收到修改稿日期: 2016-03-17

基金项目: 国家高技术研究发展计划重点项目(2012AA111802)

作者简介: 胡林西(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事金属激光焊接方面的研究。E-mail: lingxi507@163.com

导师简介: 周惦武(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事汽车轻量化材料计算与设计理论、异种材料连接技术与机理等方面的研究。E-mail: ZDWe_mail@126.com(通信联系人)

mechanical property are obtained.

Key words laser technique; laser butt welding; numerical simulation; temperature field; Zr-Sn-Nb-Fe alloy; welding process

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 000.6850; 160.3900

1 引 言

锆合金与核燃料具有较好的相容性,加工和力学性能好,尤其在高温水蒸气环境中具有良好抗腐蚀性,被广泛应用于水冷动力堆的元件包壳及堆芯结构件中^[1-3]。第三代核电 AP1000 技术,以其安全、经济等特点受到全球核电用户的普遍关注,而锆合金定位格架是核反应堆的核心部件,特殊工作环境对其薄板的焊接质量提出了严格要求。锆合金化学活性强,焊接时易与空气中的氢气、氧气、氮气等气体发生反应,在温度为 315 °C 时强烈吸收氢气,400 °C 时吸收氧气,800 °C 以上时吸收氮气,其中,氧气对材料塑性和韧性影响较大,氮气对材料耐蚀性影响较大^[2]。当锆合金吸收一定量氮气、氢气、氧气等气体杂质后,力学性能及抗腐蚀性能急剧下降,这会严重影响核反应堆的安全运行。在真空环境下焊接锆合金板材,可避免气体污染,但成本高,且真空箱体积有限,仅适合小尺寸零件焊接;在大气环境下焊接锆合金板材,成本低,但为避免气体污染,需对板材焊接部位温度在 300 °C 以上的区域采取保护措施,加强焊缝及热影响区的隔离保护和合理制定焊接工艺参数是获得锆合金板材优良焊接质量的关键。

激光作为一种焊接能量源,具有效率高、焊缝(WZ)窄、热变形小、热影响区(HAZ)小等特点^[4],很适合锆合金薄板的焊接^[2,5]。国内外学者利用脉冲激光对锆合金进行焊接,发现焊缝易生成气孔、裂纹,采用脉冲点焊,焊件力学性能低,不能满足工况要求^[6-7]。连续光纤激光焊接速度快,焊缝质量高,有望成为实现锆合金优质高效连接的重要方法,目前国内外还未见到相关报道。由于焊接是一个快速而又不均匀的热循环过程,焊缝附近温度梯度大,而熔池温度场分布对焊接结构件质量和性能有重要影响,但采用目前的试验手段测量熔池温度比较困难,并且成本高,因此对焊缝温度场进行数值模拟以控制焊接质量显得十分必要^[8]。

选择定位格架常用的 Zr-Sn-Nb-Fe(锆-锡-铌-铁)合金作为研究对象,以光纤激光器作为焊接热源,对厚度为 0.7 mm 的 Zr-Sn-Nb-Fe 合金薄板进行激光对接焊试验,采用 ANSYS 有限元软件,对 Zr-Sn-Nb-Fe 合金薄板温度场进行数值模拟,充分考虑材料热物性参数的温度相关性、保护气体的强制对流和相变潜热等因素的影响,将模拟熔池的形状、尺寸与实际焊缝进行对比,在验证了模拟方法可靠的基础上,研究温度在 300 °C 以上的区域的温度场分布与焊接工艺参数之间的关系,并将仿真预测结果与激光对接焊试验结果进行了比较验证。研究结果为加强焊缝及热影响区的隔离保护和合理制定焊接工艺参数以获得优良锆合金焊接质量提供了理论和试验依据。

2 试 验

试验选用 Zr-Sn-Nb-Fe 合金平板试件,尺寸为 100 mm×30 mm×0.7 mm,该合金中 $W(\text{Sn})=0.8\% \sim 1.2\%$, $W(\text{Nb})=0.9\% \sim 1.1\%$, Fe 和 O 为少量, Zr 为余量,其中 $W(\cdot)$ 为质量分数。激光对接焊示意图如图 1 所示。试验采用光纤激光器(YLR-4000-CL, IPG Photonics 公司,美国),最大输出功率为 4000 W,激光器为 TEM₀₀ 模式连续输出,波长为 1.06 μm。焊前用砂纸打磨试件,再用 $V(\text{HNO}_3):V(\text{HF}):V(\text{H}_2\text{O})=45:10:45$ 的混合酸清洗试件 30~50 s[其中 $V(\cdot)$ 为体积],去除表面氧化层,最后用丙酮清洗表面,去除表面油污杂质。采用纯度大于 99.9% 的 Ar(氩)气作为保护气体,分别从轴向、侧向、背部对焊缝进行隔离保护,焊接工艺参数基于模拟计算的预测结果进行选取,焊接时激光光束沿图 1 所示的 x 方向移动。焊接后利用线切割机将试样切割成标准拉伸试样,其尺寸如图 2 所示,其中 R' 为过渡弧半径。同时将线切割后所得的焊缝横截面进行打磨、抛光,制成 6 mm×8 mm 的金相试样,用 $V(\text{HNO}_3):V(\text{HF}):V(\text{H}_2\text{O})=17:5:78$ 的混合酸进行腐蚀,采用立体显微镜观察焊缝的表面形貌,利用卧式金相显微镜观察试样横截面的显微组织,利用配有能谱仪的扫描电镜分析母材(BM)及焊缝的主要元素相对含量,利用微机控制电子万能试验机,采用 1 mm/s 的拉伸速率,测试焊接试样和母材的抗拉强度。

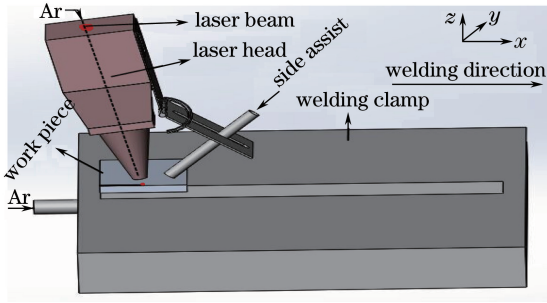


图 1 钎合金激光对接焊示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser butt welding zirconium alloys

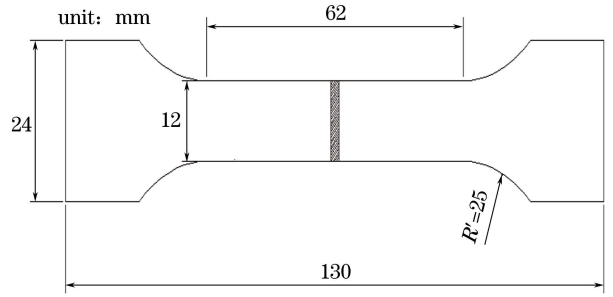


图 2 拉伸试样尺寸

Fig. 2 Size of tensile sample

3 温度场的模拟

3.1 基本假设

激光焊接钎合金过程复杂,熔池良好的流动性是形成焊缝和提高组织均匀性的必要条件,通过实际焊接试验发现,钎合金薄板激光焊接类型为传导焊,因此为了简化计算且更好的将模拟结果与试验结果进行对比,在利用 ANSYS 软件进行钎合金温度场模拟时,对建立的非线性瞬态有限元模型作了如下基本假设:1) 忽略熔池内部流动;2) 认为材料各向同性,其热物性参数随温度的变化而变化;3) 考虑焊接过程中的相变潜热;4) 材料表面对激光的吸收率假定为常数;5) 忽略焊件因为热膨胀系数的差异所带来的焊后冷却过程中的焊缝收缩。

3.2 有限元模型

合理的有限元模型不仅可以提高计算精度还能节约计算时间^[9],由于激光焊接光斑直径较小,选取焊缝附近尺寸为 30 mm×8 mm×0.7 mm 的一小块区域建立几何模型。由于激光焊接热影响区小而焊缝区温度梯度较大,在划分网格时,焊缝区采用加密映射网格,远离焊缝区的区域则选择相对稀疏的映射网格,两者之间采用自由网格划分的形式。在单元选择上,焊缝与远离焊缝区的区域选取可用于三维稳态和瞬态热分析的热实体单元 SOLID70,过渡区则选用热实体单元 SOLID90,利用 ANSYS 模拟计算时,热流密度和热对流边界条件不能同时施加在同一实体单元表面,因此引入三维表面效应单元 SURF152,网格划分结果如图 3 所示。

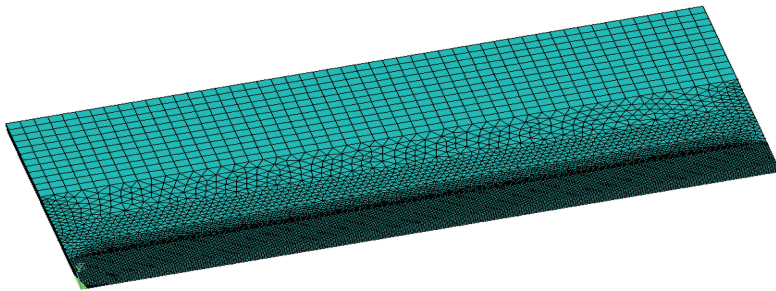


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

3.3 热源模型

对于不同性质材料在不同工艺参数条件下焊接的数值模拟,热源模型的选取对模拟结果的准确性至关重要,通常可以通过比较热源模型所模拟的熔池形状和尺寸与实际焊缝熔合线是否一致来判断该种激光焊接热源模型是否合理^[10]。激光焊接功率密度在 $10^5 \sim 10^6$ W/cm² 范围内属于热传导焊,密度大于 10^6 W/cm² 属于激光深熔焊,对厚度为 0.7 mm 钎合金薄板焊接而言,选用传导焊模式比较合适,为此选取高斯面热源作为激光焊接的热源模型。图 4 所示为高斯热源的热流分布模型,其中 q_m 是热流密度最大值。热流密度函数表达式为

$$q(r) = \frac{3P\eta}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{3x^2 + y^2}{R^2}\right), \quad (1)$$

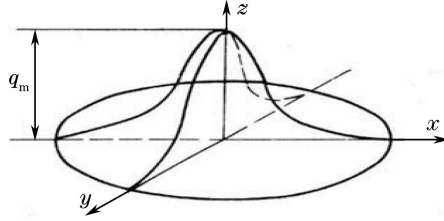


图 4 高斯热源模型

Fig. 4 Gaussian heat source model

式中 $q(r)$ 为距离热源中心 r 处的热流密度, P 为激光功率, η 为激光功率有效系数, R 为激光光斑半径, $x^2 + y^2$ 为所研究的点到光斑中心距离的平方。考虑材料表面对激光的反射作用、光路中聚焦镜和反射镜造成的能量损失, 通过试错法将模拟试验与实际试验不断进行对比修正, 得到钎合金光纤激光传导焊的有效系数在 30%~60% 之间, 模拟试验时 η 值取 48%。

激光光斑半径 R 与离焦量 f 相对应, 决定着激光的功率密度, 虽然光束焦点衍射的最大光斑尺寸可以根据光衍射理论来计算, 但由于聚焦透镜像差的存在, 实际光斑尺寸比计算值偏大。通过试验测试得到所用激光器离焦量与工作表面光斑直径 D 的关系见表 1, 研究中采用的离焦量为 +1 mm, 故 R 值取 0.76 mm。

表 1 离焦量与工作表面光斑直径的关系

Table 1 Relationship between defocusing distance and laser spot diameter on workpiece surface

f /mm	-2	-1	0	+1	+2
D /mm	1.60	1.55	1.41	1.53	1.58

3.4 材料的热物性参数

材料的热物性参数对激光焊接温度场分布有着十分重要的影响, 其数值直接影响温度场的形态分布, 因此模拟计算需给定钎合金材料各项热物性参数随温度的变化值。根据文献[11-13]的相关数据, 并采用 ANSYS 软件提供的线性插值法及替代法, 设置模拟所需的 Zr-Sn-Nb-Fe 钎合金材料的热物性参量, 见表 2。焊接过程中还需考虑相变潜热影响, 包括固态相变潜热和熔化潜热。常用的潜热处理方法有温度回升法、等价比热容法和热焓法。研究中采用等效比热容的方法对固态相变潜热进行处理, 而熔化潜热则通过随温度变化的热焓来体现, 其计算公式为

$$H = \int \rho c(T) dT, \quad (2)$$

式中 H 为焓值, ρ 为密度, $c(T)$ 为随温度变化的比热容。

表 2 Zr-Sn-Nb-Fe 钎合金热物理参数

Table 2 Physical parameters for thermal property of Zr-Sn-Nb-Fe zirconium alloy

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Density /(kg/m^3)	Surface coefficient of	Specific heat	Thermal
		heat transfer /($\text{W}/\text{m}^2/^{\circ}\text{C}$)	capacity /($\text{J}/\text{kg}/^{\circ}\text{C}$)	conductivity /($\text{W}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$)
20	6560	20	277.2	13.65
100	6560	35	283	14.75
200	6560	82.4	294.6	15.95
400	6551	182	316.4	19.26
600	6480	352	339.8	21.31
800	6460	417	865.3	23.52
1000	6450	438	372.6	25.67
1600	6360	485	396.5	44.97
1800	6260	492	436.8	55.39
2000	5730		460.2	67.62

3.5 初始条件与边界条件

焊接前,设置模型的初始温度 T_0 与周围环境温度相同($T_0=20\text{ }^\circ\text{C}$)。焊接过程中焊件表面与周围介质发生热交换,为计算方便,设置一个总换热系数,除对称面外,工件的三个侧面与空气进行自然对流换热的对流边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial i} = \alpha_1(T - T_0), \quad i = x, y, \quad (3)$$

式中 T 为焊件表面温度, α_1 为表面换热系数, λ 为沿边界法线方向的热导率。

焊接过程中板材的上表面不仅有激光的作用还有氩气的作用,这属于气体强制对流换热,所以工件上表面的对流边界为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \begin{cases} q + \alpha_2(T - T_0), & r \leq R \\ \alpha_2(T - T_0), & r > R \end{cases}, \quad (4)$$

式中 α_2 为考虑气体强制对流的总换热系数,取 $\alpha_2 = \alpha_1 + 350$ ^[14], q 为激光热流密度, r 为工件上表面任意一点到激光束中心的距离。工件下表面无激光作用,故对流边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_2(T - T_0). \quad (5)$$

4 结果分析

4.1 温度场特征及分析

为验证高斯面热源模型用于模拟 Zr-Sn-Nb-Fe 合金薄板激光焊接温度场的合理性,将模拟熔池的形状、尺寸与实际焊缝进行了对比,如图 5,6 所示,其中 P 为激光功率。从图 5 可看出,模拟得到的熔池边界与试验所得焊缝截面的熔合线基本一致。从图 6 可看出,模拟熔池的深度、宽度与实际十分接近且误差在 6% 以内,在高热输入条件下,模拟值与试验值较吻合,但在低热输入时,模拟值偏高,主要是因为模拟时激光的有效系数假定不变,但在实际低热输入时,激光有效系数有所下降。因此,采用高斯面热源模型作为 Zr-Sn-Nb-Fe 合金薄板激光焊接的热源模型进行焊接接头温度场的数值模拟是合理可行的,该模拟方法可靠。

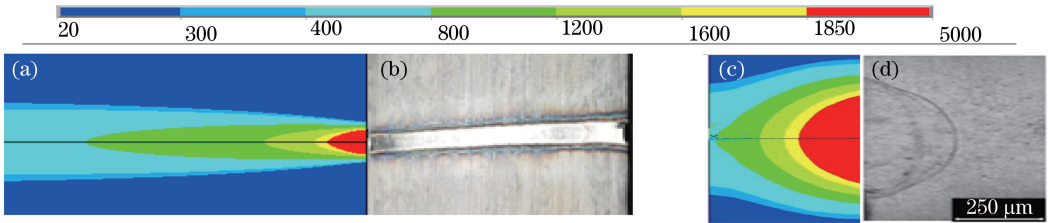


图 5 试验与模拟的焊缝形貌对比。(a) 模拟表面形貌; (b) 试验表面形貌; (c) 模拟截面形貌; (d) 试验截面形貌
Fig. 5 Comparison between experimental and simulated welding seam topographies. (a) Simulated surface topography; (b) experimental surface topography; (c) simulated cross sectional morphology; (d) experimental cross sectional morphology

图 7~9 分别给出了热源移动到离原点 6,12,18 mm 时 Zr-Sn-Nb-Fe 合金薄板温度场的分布情况。可以看出随着焊接过程的进行,热源向前平移,模型表面形成类似流星状的温度场,热源前方等温线较为密集,温度梯度较大,而后方等温线相对稀疏,温度梯度相对较小。激光焊接过程中的焊缝熔宽和热影响区都比较小。

4.2 温度在 300 °C 以上的区域的温度场分布与焊接参数之间的关系

如引言部分所述,锆合金化学活性强,易与空气中的氢气、氧气、氮气等气体发生反应,为保证焊接质量,需对温度在 300 °C 以上的区域采取保护措施,为此进一步研究了 Zr-Sn-Nb-Fe 合金在温度为 300 °C 以上的区域的温度场分布与焊接工艺参数之间的关系。图 10 所示为热循环曲线取点示意图,焊接时光束照射到工件表面,并从 a 点移动到 b 点,所取点为焊缝表面 cd(垂直于焊缝方向 ab)上 8 个点,编号依次为 1~8,所选取的点距离焊缝中心距离依次为 0.00,0.60,0.70,0.80,1.20,1.60,3.00,3.20 mm。

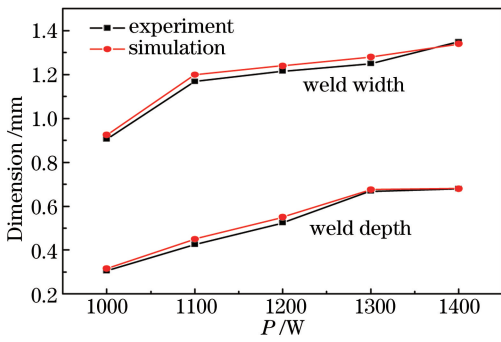


图 6 试验与模拟的焊缝尺寸对比

Fig. 6 Comparison between experimental and simulated weld dimensions

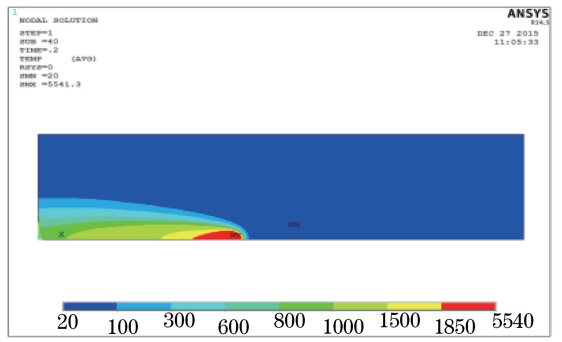


图 7 6 mm 处的温度分布

Fig. 7 Temperature distribution at 6 mm

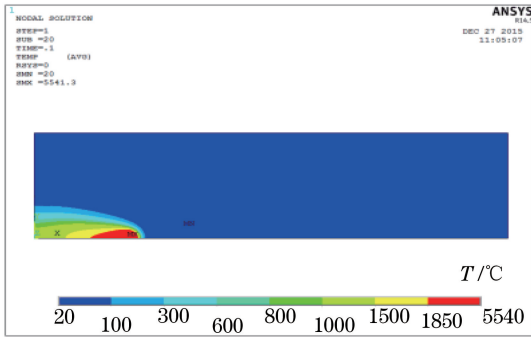


图 8 12 mm 处的温度分布

Fig. 8 Temperature distribution at 12 mm

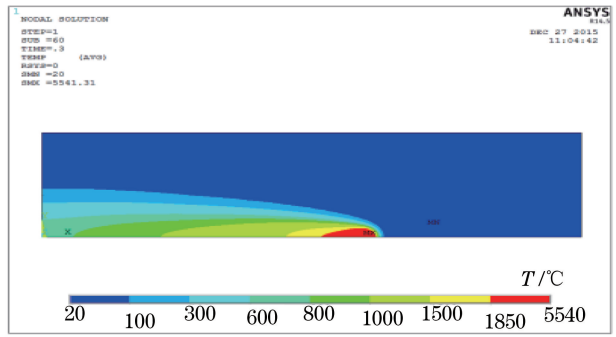


图 9 18 mm 处的温度分布

Fig. 9 Temperature distribution at 18 mm

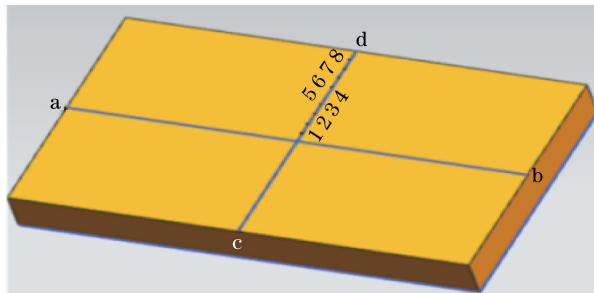


图 10 工作表面取点示意图

Fig. 10 Schematic diagram of sampling points on the workpiece surface

图 11 所示为工件表面宽度方向各点温度 T 随时间的变化曲线,从图中可以看出,模型体现了激光焊接快热快冷的特性,但相比加热过程,冷却的速度要缓和得多。从图 11 中还可以看出,距离焊缝中心 0.60 mm 的点的最高温度高于铝合金材料熔点(1850 °C),而 0.70 mm 的点的最高温度低于熔点,可推断出模拟所得的焊缝熔宽在 1.20~1.40 mm 之间,这也与焊接试验结果相吻合。

通常薄板焊接采用正离焦量^[15],研究中选用+1 mm 的离焦量,对焊件温度在 300 °C 以上的区域的宽度与激光焊接参数的关系进行分析,所得结果如图 12 所示。从图中可以看出,当焊接速度一定时,温度在 300 °C 以上的区域的宽度随激光功率增大而增大;当激光功率一定时,宽度随焊接速度增加而减小。激光对接焊时,线能量必须保证熔深达到板材厚度,而在低速时,由于速率减小较快,因此应选择较小的激光功率和较快的焊接速度。

此外,由图 11 可知,距离焊缝中心 3.20 mm 处的点的最高温度小于 300 °C,所以可以得出温度在 300 °C 以上的区域的宽度小于 6.4 mm;由图 9 的等温线可看出,温度在 300 °C 以上的区域的长度较长,焊接时要保证对后端焊缝的保护;由图 11 中可知,从开始加热升温到迅速冷却至 300 °C 以下,整个周期大概持续

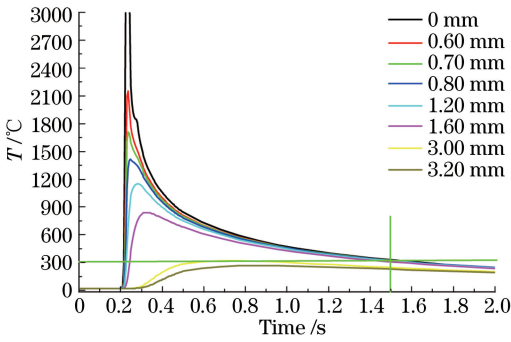


图 11 工件表面宽度方向各点温度随时间的变化曲线

Fig. 11 Temperature versus time curves of points along the width direction of workpiece surface

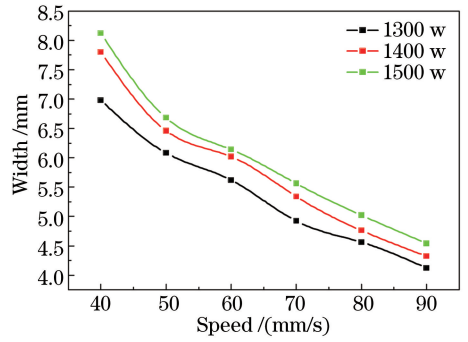


图 12 不同激光功率下,温度在 300 °C 以上的区域的宽度与焊接参数之间的关系

Fig. 12 Width of welds above 300 °C versus welding speed for at different laser powers

1.5 s,焊接速度较快,因而焊接时也要保证对后端焊缝的保护,故焊接过程中采用氩气“先进后退”的形式且侧吹喷嘴直径不小于 6.4 mm。

4.3 试验验证

由上述研究可知,在激光功率为 1300~1500 W,焊接速度为 50~70 mm/s,离焦量为 +1~+2 mm,侧吹保护气喷嘴直径不小于 6.4 mm 的条件下,可获得较好的焊缝质量。为验证仿真预测结果,对 Zr-Sn-Nb-Fe 合金板材进行激光对接焊试验。基于温度在 300 °C 以上的区域的温度场分布与焊接参数之间关系的模拟分析结果,保护区域对应喷嘴直径 $\Phi=8\sim 12$ mm。图 13 是激光功率为 1400 W、焊接速度为 60 mm/s、离焦量为 +1 mm、轴向气流量为 15 L/min、侧向气流量为 20 L/min、背部气流量为 20 L/min 时,10 mm 喷嘴直径保护、4 mm 喷嘴直径保护和无保护三种条件下的焊缝外观形貌。从图 13 可以看出, $\Phi=10$ mm 时,焊缝及热影响区保护效果最好,焊缝为银白色; $\Phi=4$ mm(不在保护区域尺寸范围内)时,焊缝为金黄色,带有明显的蓝色氧化层,且焊缝周边氧化严重,这是由于喷嘴直径太小氩气保护不到整个焊缝区,另外喷嘴吹出的氩气流的外围与空气接触,导致氩气流外围纯度不够,所以焊缝周边有氧化现象,这是模拟与试验存在误差的重要原因;无保护时,整个焊缝氧化严重,温度在 300 °C 以上的区域被氧化,热影响区的宽度明显变大。



图 13 不同喷嘴直径保护下的焊缝外观形貌。(a) $\Phi=10$ mm; (b) $\Phi=4$ mm; (c) 无保护

Fig. 13 Weld appearance with protection of nozzle for different diameters.

(a) $\Phi=10$ mm; (b) $\Phi=4$ mm; (c) without protection

对 Zr-Sn-Nb-Fe 合金母材及在保护区域范围内的焊接试样进行拉伸试验,发现拉伸断裂位置均出现在母材,如图 14 所示。从图 15 所示的母材与焊缝的应力应变曲线可知,焊接试样平均抗拉强度为 528 Mpa,母材为 532 Mpa,焊接试样性能与母材基本相当。图 16,17 所示为在保护区域范围内的焊接试样横截面的显微组织及其电镜扫描图,焊缝区没有发现气孔、裂纹等缺陷。图 18 所示为母材和焊缝的金相组织,由图可发现焊缝区与母材相比,晶粒较小。表 3 为图 16 所示的各部位焊缝和母材的能谱分析仪(EDS)分析结果,发现焊缝区 Zr、Sn、Nb、Fe 等 Zr-Sn-Nb-Fe 合金主要元素相对含量相对母材无明显变化。因此加强焊缝及热影响区的隔离保护和采用模拟计算方法优化焊接工艺参数,可获得良好焊缝质量,焊缝无气孔、裂纹等缺陷,焊缝区晶粒细小,主要元素含量相对母材无明显变化,这是 Zr-Sn-Nb-Fe 合金焊接试样具有较高力学性能的主要原因。

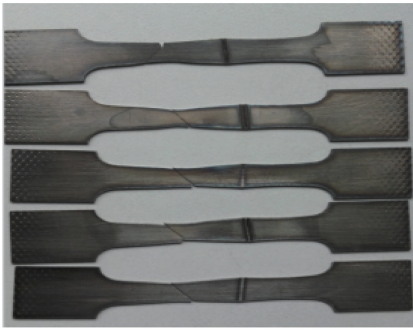


图 14 断裂位置

Fig. 14 Fracture location

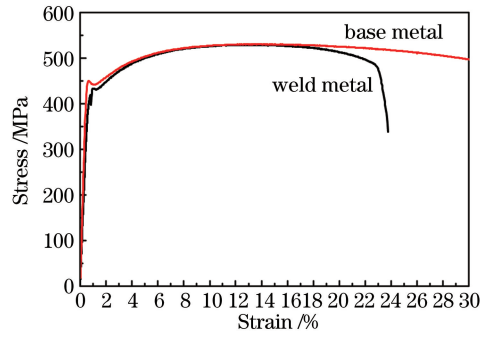


图 15 母材与焊接式样的应力应变曲线

Fig. 15 Stress strain curves of parent metal and welded specimen

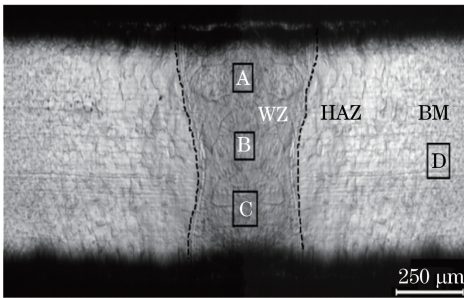


图 16 焊缝横截面显微组织

Fig. 16 Microstructure of weld cross-section

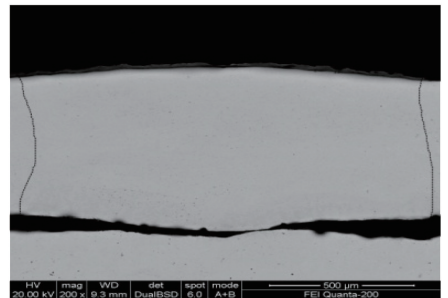


图 17 焊缝横截面电镜扫描图

Fig. 17 SEM image of weld cross-section

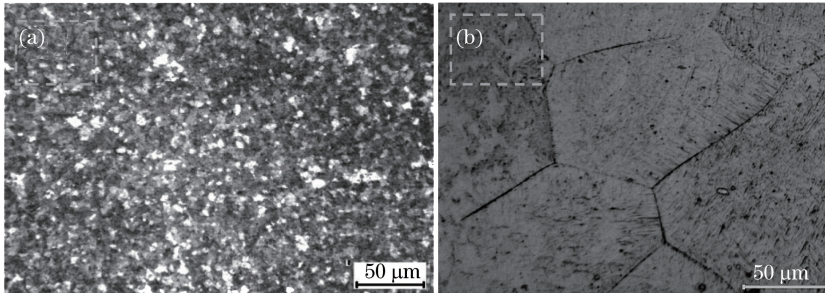


图 18 (a)母材与(b)焊缝的金相组织

Fig. 18 Microstructure of (a) parent metal and (b) weld

表 3 EDS 分析结果(质量分数,%)

Table 3 Analysis results with EDS (mass fraction, %)

Locatoin	Element			
	Zr	Sn	Nb	Fe
A	91.86	6.37	1.24	0.53
B	91.56	6.56	1.28	0.60
C	91.17	6.97	1.16	0.70
D	89.90	7.30	2.10	0.70

5 结 论

- 1) 模拟计算获得的熔池形状、尺寸与实际焊缝基本吻合,验证了采用高斯面热源模型来模拟 Zr-Sn-Nb-Fe 合金薄板激光对接焊温度场的合理性;
- 2) Zr-Sn-Nb-Fe 合金温度场由非稳态向稳态发生转变,最终呈现流星状的稳定分布,焊缝附近等温线密

集,焊缝窄,热影响区小,温度在 300 ℃ 以上的区域的宽度随激光功率增大而增大,但随焊接速度增加而减小;

3) 在激光功率为 1300~1500 W,焊接速度为 50~70 mm/s,离焦量为 +1~+2 mm,氩气保护喷嘴直径为 8~12 mm 条件下,Zr-Sn-Nb-Fe 合金焊接试样的抗拉强度与母材基本相当,焊缝质量良好,无气孔、裂纹等缺陷,晶粒细小,主要元素含量相对母材无明显变化,是试样具有较好力学性能的主要原因。

参 考 文 献

- 1 Yang Wendou. Reactor material science[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2000: 19-30.
杨文斗. 反应堆材料学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 19-30.
- 2 Cai Chuang, Li Ruifeng, Tao Wang, *et al.*. Characteristics of laser pulsed welding intersected points of zircaloy-4 alloy [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0803008.
蔡 创, 李瑞丰, 陶 汪, 等. 锆 4 合金交叉焊点的脉冲激光焊接特性[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0803008.
- 3 Xu Qidi, Huang Jiao, Yao Meiyi, *et al.*. Effect of S addition on the second phase particles of Zr-Sn-Nb-Fe zirconium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(1): 122-125.
徐启迪, 黄 娇, 姚美意, 等. 添加 S 对 Zr-Sn-Nb-Fe 锆合金中第二相的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(1): 122-125.
- 4 Tang Duo, Wang Chunming, Tian Man, *et al.*. Contrasting study on quality of SUS301L-HT joints in fiber laser welding and MIG welding [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0703003.
唐 舵, 王春明, 田 曼, 等. SUS301L-HT 不锈钢激光焊接与 MIG 焊接对比试验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0703003.
- 5 Chuang C, Wang T, Li L Q, *et al.*. Weld bead formation and corrosion behavior of pulsed laser welded zirconium alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(1-4): 621-628.
- 6 Wang Zeming, Wang Jun, Tang Bin, *et al.*. Effect of welding processing parameters on porosity formation and prevention mechanism analysis of zircaloy sheet by YAG laser welding [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(11): 2782-2786.
王泽明, 王 军, 唐 彬, 等. 焊接工艺参数对锆合金薄板 YAG 激光焊接气孔形成的影响及控制机理分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(11): 2782-2786.
- 7 Song K N, Kim S S. Determination of optimum laser welding parameters and the development of a laser welding technique to enhance the lateral impact strength of a spacer grid assembly for a PWR fuel assembly [J]. Materials Science Forum, 2008(580-582): 147-150.
- 8 Chen Hao, Wang Xiao, Liu Huixia, *et al.*. Numerical simulation-driven optimization of laser transmission welding process between PET and 304L stainless steel [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403006.
陈 浩, 王 霄, 刘会霞, 等. 数值模拟驱动的激光透射焊接 PET 与 304L 不锈钢的优化研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403006.
- 9 Yu Shurong, Fan Ding, Xiong Jinhui, *et al.*. CO₂ laser welding of tailored aluminum alloy sheets with different thickness and numerical simulation [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1795-1800.
余淑荣, 樊 丁, 熊进辉, 等. 铝合金不等厚板的 CO₂ 激光拼焊及数值模拟[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1795-1800.
- 10 Chu Qingchen, He Xiuli, Yu Gang, *et al.*. Numerical simulation and analysis on temperature field for laser welded stainless steel lap joint [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(12): 3180-3186.
褚庆臣, 何秀丽, 虞 钢, 等. 不锈钢激光搭接焊接头温度场数值模拟及分析[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3180-3186.
- 11 Chen Fangquan, Lin Zuwei, Liang Guowei, *et al.*. Numerical simulation of special resistance welding temperature field of nuclear power zirconium tube [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(6): 93-96.
陈方泉, 林祖伟, 梁国伟, 等. 核电用锆管特种电阻焊温度场的数值模拟[J]. 焊接学报, 2011, 32(6): 93-96.
- 12 Huang Boyun, Li Chenggong, Shi Likai, *et al.*. Non-ferrous metals handbook (below) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 63-80.
黄伯云, 李成功, 石力开, 等. 有色金属材料手册(下)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 63-80.
- 13 Kim S, Lee W-J, Han Q H, *et al.*. Pulsed laser induced mechanical behavior of zircaloy-4 [J]. Journal of Materials Research, 2015, 30(04): 556-565.
- 14 Liu Xixia, Huang Rui, Yao Gang, *et al.*. Numerical simulation of the temperature field of laser butt welding of titanium alloy sheet [J]. Laser Technology, 2013, 37(5): 700-704.
刘西霞, 黄 锐, 姚 刚, 等. 钛合金薄板激光对接焊温度场的数值模拟[J]. 激光技术, 2013, 37(5): 700-704.
- 15 Chen Yanbin. Modern laser welding technology [M]. Beijing: Science Press, 2005: 42-45.
陈彦斌. 现代激光焊接技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 42-45.