

AH36 船舶钢激光焊接热源模拟优化与 残余应力仿真分析

谌 伟^{1,2}, 郭嘉兴^{1,2}, 殷 乐³

(1. 高性能船舶技术教育部重点实验室(武汉理工大学), 武汉 430063; 2. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 武汉 430063; 3. 中国舰船研究设计中心, 武汉 430000)

摘 要: 针对船舶制造过程中激光焊接的热源狭窄且深长, 在提高焊接穿透力和焊接率的同时更容易造成热量聚集和残余应力集中的不足, 本文以 AH36 高强钢为研究对象, 通过有限元模拟对激光焊接的熔池形状展开研究, 选取并定义 10 种移动热源形式, 分别得出各个热源模型达到稳定焊接状态时的剖面形状图, 并将其与激光焊接实际形成的熔池形状进行对照, 优选出最适用于对接接头激光焊接的热源模型。此外, 通过热力耦合的方式模拟得到激光焊接对接板的焊接变形和残余应力分布, 并与试验所得数据进行对比。结果表明, 残余应力的有限元仿真结果与试验结果在数值量级及趋势上吻合较好, 可以为后续激光焊接工艺优化和激光焊接结构疲劳评估奠定理论基础。

关键词: 激光焊接; 热源模型; AH36 高强钢; 残余应力; 疲劳评估; 熔池形状

中图分类号: U663.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)01-0140-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240657

Simulation optimization of laser welding heat source and residual stress simulation analysis of AH36 marine steel

SHEN Wei^{1,2}, GUO Jia-xing^{1,2}, YIN Yue³

(1. Key Laboratory of High Performance Ship Technology (Wuhan University of Technology), Ministry of Education, Wuhan 430063, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 3. China Ship Research and Design Center, Wuhan 430000, China)

Abstract: In shipbuilding, the laser-welding heat source is intrinsically narrow and deep; while this favors penetration depth and travel speed, it also promotes localized heat accumulation and residual-stress concentration. Focusing on AH36 high-strength steel, this study employs finite-element simulation to characterize the melt-pool geometry in laser welding. Ten moving-heat-source patterns are selected and defined; the cross-sectional shapes at steady-state welding are extracted for each model and compared with the actual melt-pool profile observed in laser welds, allowing the optimum heat-source model for butt-joint laser welding to be identified. Furthermore, thermo-mechanical coupling simulations are performed to

收稿日期: 2024-06-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609185).

作者简介: 谌伟(1986-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 结构安全性与可靠性评估, 船体结构健康监测, 先进复合材料结构. E-mail: shenwei_abc@163.com

predict the welding distortion and residual-stress distribution in laser-welded butt plates, and the predictions are validated against experimental measurements. Good agreement is achieved in both magnitude and trend, providing a reliable theoretical basis for subsequent optimization of laser-welding procedures and fatigue assessment of laser-welded structures.

Key words: laser welding; heat source model; AH36 high-strength steel; residual stress; fatigue evaluation; weld pool shape

0 引言

相较于传统焊接技术^[1],激光焊接的能量密度大,加热和冷却速度快致使热影响区和变形小^[2],因此广泛应用于航空航天、汽车、电子和军工等多个行业。AH36作为一种高强度结构钢,是美国船级社(American bureau of shipping, ABS)规范中一款常见的船用钢。由于其优秀的力学性能、韧性及抗腐蚀性能,在船舶的舱口角隅、舱壁、甲板结构、主要骨材得到广泛应用。

Chen等^[3]研究了超窄间隙激光焊接工艺在高强钢上的应用,试验选用S960和S700两种高强钢材料进行比较分析,结果表明超窄间隙激光焊接具有更高的焊接效率、熔透率和较小的热变形。Wahba等^[4]采用激光电弧复合焊接工艺对厚度分别为14、17 mm的K36D钢板进行了试验研究,结果表明激光电弧复合焊接头的平均冲击韧性达到148 J,远高于船用标准的最小要求,满足制造要求。Joo等^[5]针对AH32船用高强钢和304L不锈钢这两种异种金属,采用激光-熔融极气体保护电弧焊复合焊接方法对其进行了研究,通过控制不同的焊接参数,发现其屈服强度与同种材料的焊接接头性能几乎相同。这说明激光焊接在工程结构制造过程中拥有强大的发展潜力与应用价值,并已逐渐替代一些传统焊接工艺。

随着计算机技术的快速发展和有限元方法(Finite element method, FEM)在焊接分析中的应用,部分试验分析方法逐渐被数值方法所取代。热源形状通常与焊缝处的剖面形状密切相关,为了使数值分析的结果更加精确,因此衍生出一系列的热源模型公式。Pavelic等^[6]提出了高斯(Gaussian)热源模型,其温度分布在剖面上以高斯分布的形式从热源中心向周围逐渐降低,能够对热源附近的温度场进行预测。考虑到激光的能量在焊接穿透过程中会发生衰减,清华大学的吴甦等^[7]提出了高斯旋转体热源模型。Goldak等^[8]

提出了双椭球热源模型,将模型拆分为前后两个不同的1/4椭球。除此之外,还有诸多组合热源,有些热源已经被证实可以用于非熔化极惰性气体保护电弧焊(Tungsten inert gas, TIG)、熔化极活性气体保护电弧焊(Metal active gas, MAG)等的分析^[9,10]。与电弧焊接相比,激光焊接的热源狭窄且深长,在提高焊接穿透力和焊接率的同时更容易造成热量聚集和残余应力集中,因此对于激光热源的准确模拟至关重要。

焊接过程中,热作用会导致焊件在焊缝及其附近区域产生应力集中,从而出现应力分布不均匀的状况,影响焊件的使用^[11,12],这些应力会加速接头裂纹的扩展速率并影响其疲劳性能^[13]。与此同时,不均匀的应力分布还会引起宏观翘曲、角变形及边缘波浪等几何缺陷,给后续装配精度、船体线型控制以及总体强度带来一系列连锁问题。因此,准确预测并合理调控激光焊接过程中的温度场与应力场,已成为提升船舶高强钢焊接质量、保障远洋航行安全的关键技术环节。本文将优选合理的热源模型,结合数值模型进行热力学仿真分析,得到激光焊接板的温度场分布,并进一步模拟得到激光焊接对接板的焊接变形和残余应力分布,为船用高强钢激光焊接的热力学模拟提供参考。

1 热源模型理论

由于本文所分析的金属材料对激光的吸收率较低,因此需要对激光的吸收率进行判断,激光的吸收大致发生在金属表面1~5 μm深度范围内^[7],其热源可以表示为:

$$Q_{V(x,y,z,t)} = AI_0(x,y,t)\delta(z) \quad (1)$$

式中: A 为材料对激光的吸收率; $I_0(x,y,t)$ 为激光强度作用在结构表面的分布函数; $\delta(z)$ 为狄拉克函数。

本节对目前的一些焊接热源模型进行了分析,采用的组合热源公式^[6-8,14-19]如表1所示,参数含义见对应参考文献。

表 1 组合热源公式
Table 1 Combined heat source formula

热源名称	热源密度分布公式
高斯(Gaussian)热源	$\begin{cases} q(x, y, z, t) = q_0 \cdot \exp\left[-3 \frac{(x^2 + (y - vt)^2)}{R^2}\right] \\ q_0 = \frac{3}{\pi R^2} \cdot Q \end{cases}$
高斯旋转体热源	$q(x, y, z, t) = q(0, 0) \cdot \exp\left[\frac{-3c_s}{\lg \frac{h}{z}} (x^2 + (y - vt)^2)\right]$
双椭球热源	$\begin{cases} q_f(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3} f_f Q}{abc_f \pi^{3/2}} \cdot \exp\left[-3 \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(z - vt)^2}{c_f^2}\right)\right] \\ q_r(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3} f_r Q}{abc_r \pi^{3/2}} \cdot \exp\left[-3 \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(z - vt)^2}{c_r^2}\right)\right] \end{cases}$
双高斯圆柱热源	$\begin{cases} q_1(x, y, z, t) = \frac{Q_1}{\pi R_1^2 h_1} \cdot \exp\left[-\frac{(x^2 + (y - vt)^2)}{R_1^2}\right] u(z) \\ q_2(x, y, z, t) = \frac{Q_2}{\pi R_2^2 h_2} \cdot \exp\left[-\frac{(x^2 + (y - vt)^2)}{R_2^2}\right] u(z) \end{cases}$
高斯圆柱热源	$q(x, y, z, t) = \frac{Q}{\pi R^2 h} \cdot \exp\left[-\frac{(x^2 + (y - vt)^2)}{R^2}\right] u(z)$
高斯圆锥热源(I)	$q(x, y, z, t) = \frac{Q}{\pi R^2 h} \cdot \exp\left[\left(-\frac{(x^2 + y^2 + (z - vt)^2)}{R^2}\right)\left(1 - \frac{z}{d}\right)\right]$
高斯圆锥热源(II)	$\begin{cases} q(x, y, z, t) = Q \cdot \exp\left[-\frac{(x^2 + (z - vt)^2)}{r_0(y)^2}\right] \\ r_0(y) = r_e + \frac{r_i + r_e}{y_i - y_e} (y - y_e) \end{cases}$
圆锥吸收系数热源	$q(x, y, z, t) = \frac{\alpha Q (1 - R_{\text{reflect}})}{2\pi R^2} \cdot \exp\left[-\frac{(x^2 + (y - vt)^2)}{2\pi R^2} - \alpha z\right]$
圆锥光束热源	$q(x, y, z, t) = \frac{\alpha Q (1 - R_{\text{reflect}})}{\pi \sigma_x \sigma_y} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \alpha z\right)$
抛物线热源	$\begin{cases} q(x, y, z, t) = Q \cdot \exp\left[-\frac{3(x^2 + (z - vt)^2)}{r_0(y)}\right] \\ r_0(y) = R \cdot \sqrt{\frac{y + h}{h}} \end{cases}$

2 温度场仿真分析

参数根据文献[20,21]及试验测定得到,见表2。

2.1 几何模型

本文以常见的 AH36 对接板为例,开展激光焊接温度场和残余应力场模拟。如图 1 所示,焊接时采用填丝方法,保护气体选用 Ar 与 CO₂ 的混合气体,其比例为 (83~87)/(13~17),并委托上海外高桥集团股份有限公司代为对对接板进行测试,其尺寸为 740 mm×420 mm×14 mm。材料



图 1 激光焊接对接板试样

Fig. 1 Laser welded butt plate specimens

表 2 AH36 材料性能参数
Table 2 AH36 material properties

温度/ ℃	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ 10^5 MPa	泊松比	导热系数 $/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{℃}^{-1})$	热膨胀 系数/℃	比热容 $/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{℃}^{-1})$	屈服 强度/MPa
22	7 880	2.10	0.27	50	1.15	480	400
100	7 880	2.00	0.27	45	1.20	500	340
200	7 880	2.00	0.28	40	1.30	520	315
400	7 800	1.70	0.28	36	1.42	650	230
600	7 760	0.80	0.29	34	1.45	750	110
800	7 600	0.35	0.30	25	1.45	1 000	30
1 000	7 520	0.20	0.31	26	1.45	1 200	25
1 200	7 390	0.15	0.32	28	1.45	1 400	20
1 400	7 300	0.10	0.32	57	1.45	1 600	18
1 550	7 250	0.10	0.32	67	1.45	1 700	15
1 800	7 180	0.10	0.32	215	1.45	1 770	10
2 000	7 180	0.10	0.32	280	1.45	1 800	10

2.2 有限元模型

根据试验测量得到的焊后熔池形状,对熔化区进行综合考虑。建模时,将开口深度定义为 4 mm,开口角度定义为 30° ,开口角以下正对齐,并在焊缝两侧预留 5 mm 宽的网格过渡区域;为了准确描述激光焊接热源作用下对接板的热效应,

需考虑激光焊接功率密度高、加热区域小的特性,因此网格划分的基本尺寸为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$;考虑到激光热源的移动方向为坐标系 Z 方向,且位于左右两侧两块对接板的中心,需对焊缝路径位置进行局部加密,加密的网格尺寸为 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,如图 2 所示。

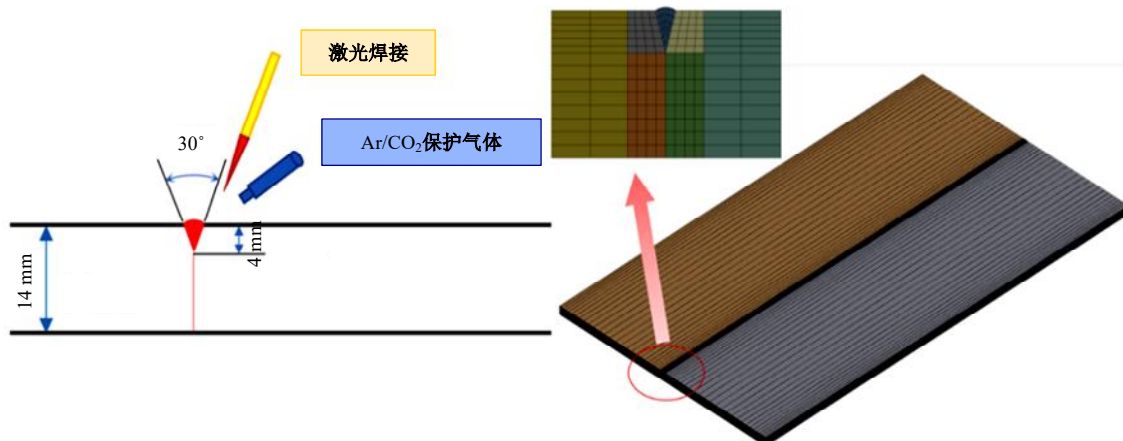


图 2 焊缝尺寸及有限元模型网格示意图

Fig. 2 Weld size and grid diagram of finite element model

2.3 初始条件和荷载约束

采用激光焊接的热输入功率为 8.4 kW,实际输入电流为 306 A,电压为 27.5 V,热输入为 0.72 kJ/mm。对于本文研究的对接焊接板,其整体焊接时间约为 20 s,计算得到其平均焊接速度为 37 mm/s,送丝速度为 15 mm/s,如图 3 所示。

由于不同热源的热输入功率 Q 的计算公式不同,可根据激光有效吸收系数 η 进行换算折减,以得到相同的温度峰值。在瞬态温度场计算中,

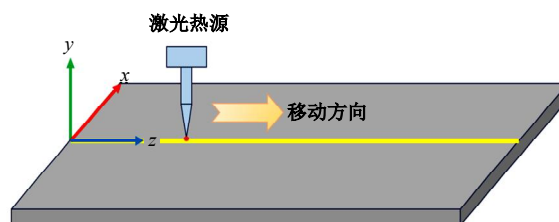


图 3 激光焊接示意图

Fig. 3 Laser welding diagram

还需要考虑结构件的原始温度,该值通常取环境温度,本文中定义环境温度为 $22\text{ }^\circ\text{C}$ 。

焊接结束后,在焊接结构的冷却降温过程中,冷却是通过结构表面与环境之间的热对流和热辐射实现的,除去焊缝以外的外表面为作用面。热对流通通常是与温度相关的参数,在环境温度为22℃的情况下,AH36与空气自然对流参数可按照图4取值^[23];而辐射率与结构表面粗糙度相关,对于未经抛光打磨的钢结构,可取0.3^[22]。

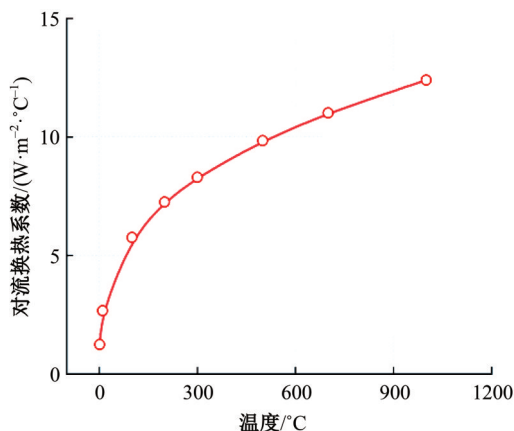


图4 空气对流换热系数曲线

Fig. 4 Convection heat transfer coefficient curve of air

3 温度场结果分析

3.1 激光焊接温度场分布趋势

根据前文热源模型进行计算,得到其不同时刻的温度场分布云图,本文以双椭球热源模型为例进行说明。图5为双椭球热源模型在不同时刻下的温度场分布云图,图6为其温度-时间曲线。双椭球热源在1~18 s内温度达到稳定值,其温度峰值为1630℃,以激光焊接的中间时刻10 s为例,此时金属表面及一定深度形成的熔池已达到最高温度。

从图6可以看出,结构全局最小温度从22℃开始缓步上升,最大温度则迅速下降,同时熔池温度降低并发生凝固。在1500 s附近时,热传导传递的能量低于热对流和热辐射散发的能量,最小温度将再次缓慢回落到环境温度附近。

在2000 s时,整体温度分布已经较为均匀,温度梯度差较小。在此之后,整个焊接结构件的温度分布趋势将不会有较大的变化,仅温度峰值逐渐接近环境温度。在焊接结束时,温度会有上升趋势,这与实际焊接过程相吻合^[20,22-25]。

如图7~9所示,选取试样板中心剖面处上表面距焊缝不同距离和不同深度的节点作为观测

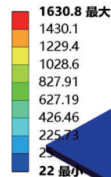
C:Goldak Double ellipsoid_1

温度 2

类型:温度

单位:°C

时间:10 s



(a)10 s时温度场分布云图

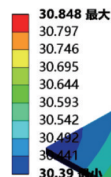
C:Goldak Double ellipsoid_1

温度 2

类型:温度

单位:°C

时间:2 000 s



(b)2 000 s时温度场分布云图

图5 双椭球热源温度场分布云图

Fig. 5 Cloud picture of temperature field distribution of double ellipsoidal heat source

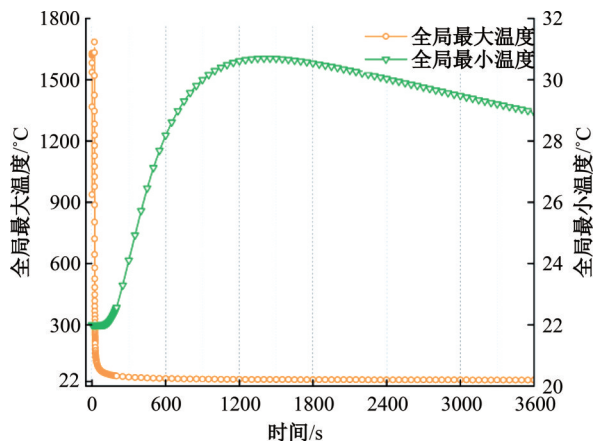


图6 温度-时间变化曲线

Fig. 6 Temperature-time curve

对象(仍以 $t=10$ s处作为观测点)。从图7~9可以看出,在热源移动期间,热源中心作用区域的点温度变换速率远高于其他位置,且在冷却时温度下降也更为迅速。相对于图8中沿厚度方向温度变化曲线的陡峭变化,图7中沿垂直于焊缝方向温度变换曲线随着距焊趾距离的增加而逐渐平稳,且曲线的斜率在升温过程中呈先增大后减小

的趋势,但是两者都能体现出降温速率相对于升温过程更缓慢。

当热源消失后,高温区仍会持续向低温区进行热传导和热辐射,但传递速度相对缓慢许多。对比图 9 中沿焊缝方向不同位置的节点温度变化曲线,会发现各节点的温度变化曲线基本相似。

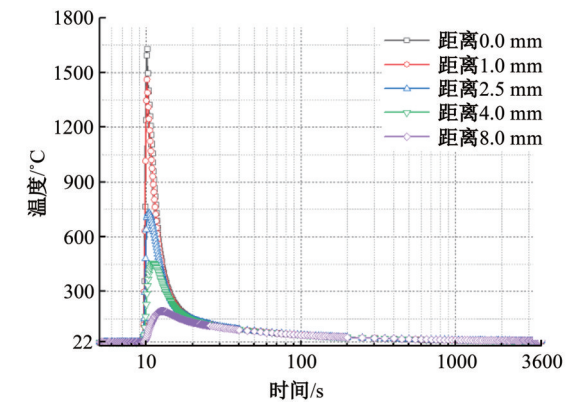


图 7 垂直于焊缝(X)方向典型节点的温度-时间变化曲线

Fig. 7 Temperature-time curve of typical nodes perpendicular to direction of weld (X)

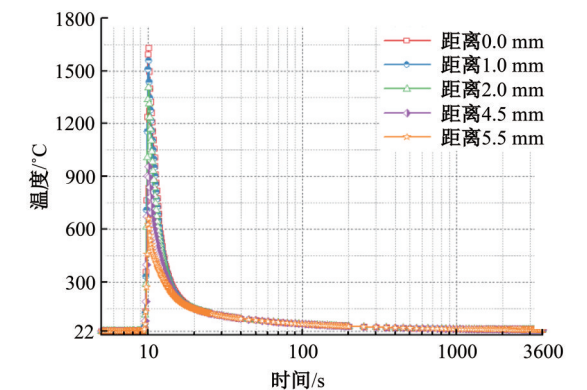


图 8 厚度(Y)方向典型节点的温度-时间变化曲线

Fig. 8 Temperature-time curve of typical nodes in thickness direction (Y)

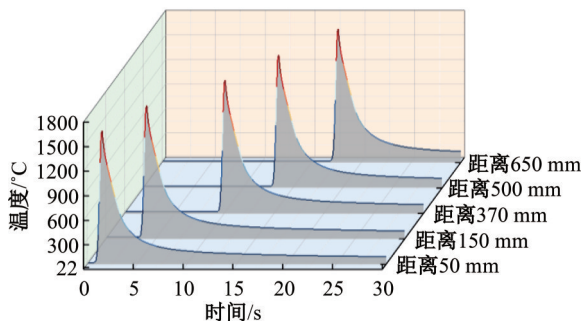


图 9 沿焊缝(Z)方向典型节点的温度-时间变化曲线

Fig. 9 Temperature-time curve of typical nodes along direction of weld (Z)

3.2 不同热源模型温度场对比

图 10 为不同热源模型的最大最小温度分布曲线。从图 10(a)可以看出,不同热源模型在升温阶段具有相似的温度曲线分布趋势,在金属的熔点温度附近或以上达到最大,而在焊接即将结束时,温度会有一次小的二次上升,然后迅速下降。从图 10(b)可以看出,在冷却过程中,焊接结构件主要通过热传导、与空气的辐射及热对流进行散热,但受热源形状的影响,在冷却阶段同一时刻达到的温度并不相同。

从上述对比可以看出,不同热源模型的焊接温度场的分布不同,但整体趋势相同。为了更精确地揭示激光焊接结构的残余应力及其对后续疲劳性能的影响,需选取合适的热源模型进行后续分析。

仍以达到稳定焊接状态的 $t=10\text{ s}$ 时刻为例,截取不同热源的XY剖面形状与实际熔池形状进行对比。如表 3 所示,实际熔池的深层形状为激光热源作用下完全熔化的近似柱状,而上层则由于存在焊接坡口角,形状与下层不同。根据熔池形状可观察到,激光焊接为完全熔融焊,即被焊接的材料在高温作用下完全熔化,形成熔池,金属熔化区从上表面完全贯通至下表面。

与热源理论模型相比,高斯热源、双椭球热源作用深度不足,不适用于熔透的激光焊接;而对于

表 3 不同热源的剖面形状

Table 3 Profile shapes of different heat sources

热源类型	XY 剖面	热源类型	XY 剖面
高斯热源		高斯圆锥热源 (I)	
高斯旋转体热源		高斯圆锥热源 (II)	
双椭球热源		圆锥吸收系数热源	
高斯圆柱热源		圆锥光束热源	
双高斯圆柱热源		抛物线热源	
实际试样			

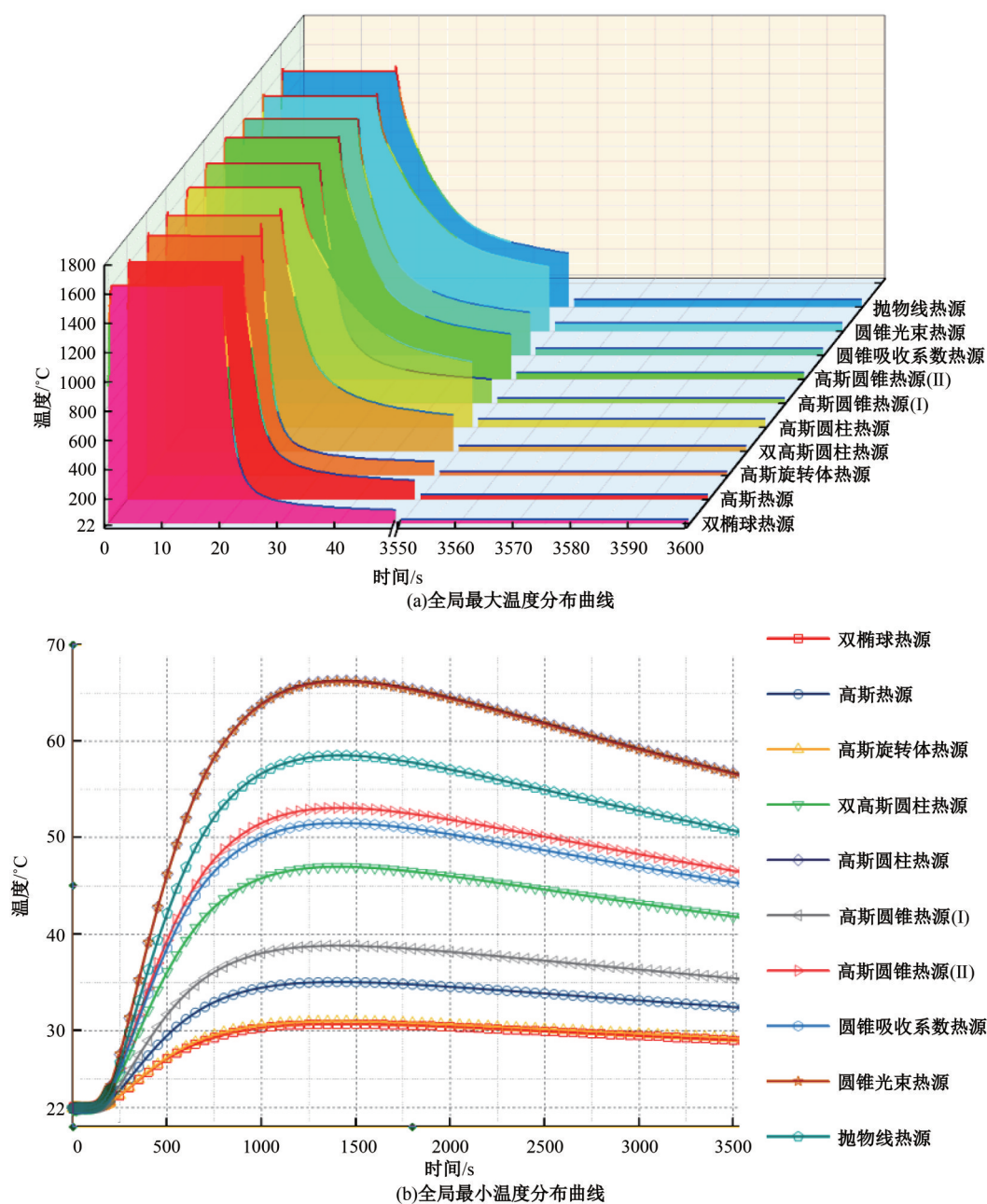


图 10 不同热源模型的温度-时间变化曲线

Fig. 10 Temperature-time curves of different heat source models

几种圆锥形热源,其形状较为相似,且能较好地模拟出激光热源在厚板上的作用深度。激光焊接表面的坡口形状导致上下熔池形状不同,圆柱热源或圆锥热源无法进行模拟。圆柱热源的上下温度分布一致,无法体现几何形状的影响,而圆锥热源虽可观察到温度随深度变化发生衰减,但对焊接开口角度的影响考虑较少,因此更适用于开口角度较小或近似为无开口角的焊接结构。

根据以上对比结果可以发现,采用在空间平面上呈高斯分布的热源,如形状最为贴合实际焊

接试样板的双高斯圆柱热源,因其存在开口角度,所以能够实现上下熔融区形状的不同,且能够实现在一定深度下的热源穿透,还能够较为合理地模拟激光热源移动加热时被焊接构件的温度场分布与变化情况,整个瞬态温度场的结果可用于瞬态应力场的残余应力分析。

4 残余应力场模拟结果

本文采用盲孔法进行残余应力测试,测点位置、应变片及贴片示意图如图 11 和图 12 所示。

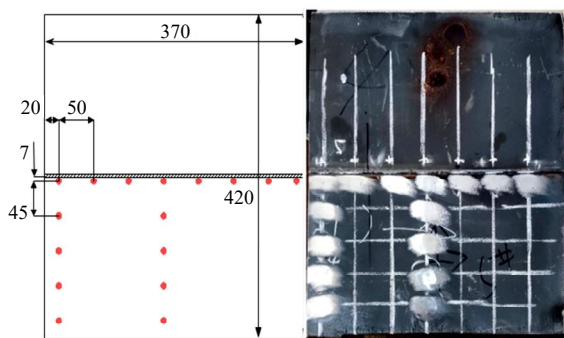


图 11 测点位置示意图

Fig. 11 Location diagram of measuring points

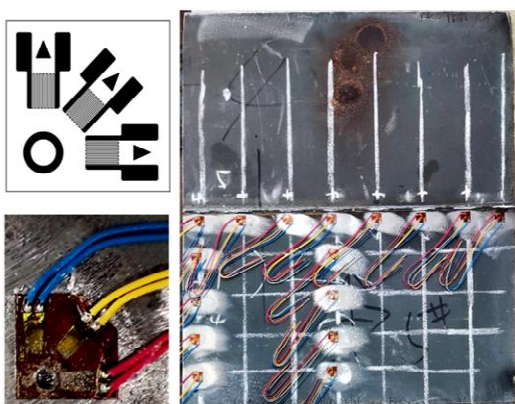


图 12 B型应变片及贴片示意图

Fig. 12 B-type strain gauge and patch diagram

以形状最为贴合实际焊接试样板的双高斯圆柱热源为参考开展温度场模拟,并在温度场的基础上,进一步开展残余应力场数值模拟,如图 13 所示。

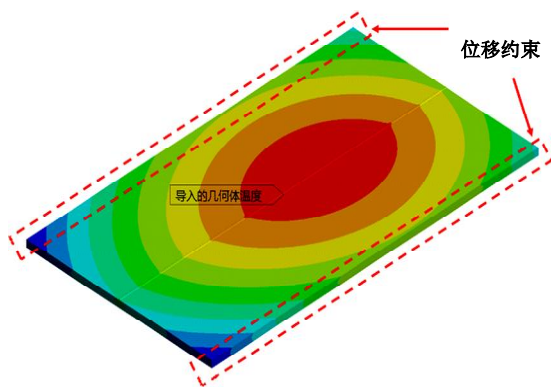
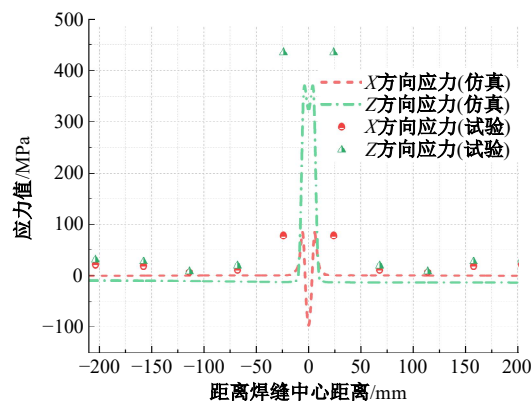


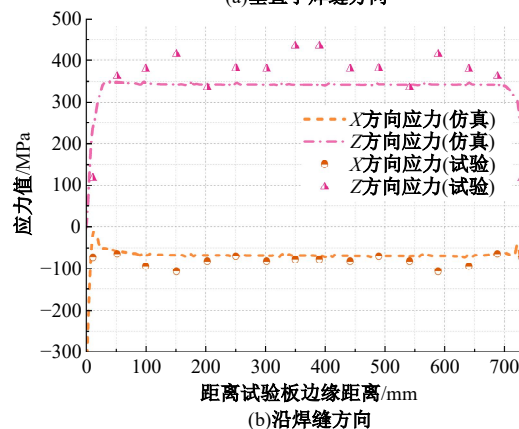
图 13 应力场计算边界条件示意图

Fig. 13 Schematic diagram of boundary conditions for stress field calculations

如图 14 所示,将仿真结果与试验结果绘制在一起进行对比。根据试验采样点和仿真计算的结果分布趋势可发现,试验结果与仿真结果在残余应力数值量级及分布趋势上基本保持一致。



(a)垂直于焊缝方向



(b)沿焊缝方向

图 14 试验与仿真残余应力结果对照曲线

Fig. 14 Comparison curve of residual stress results between test and simulation

5 结 论

(1)温度场分析中,峰值温度在激光热源输入的半球形区域内,其值为 1630°C ,大于金属的熔化温度;而在垂直于焊缝方向上温度迅速下降,说明焊接热源产生的热效应对焊缝区域以外的影响较小。

(2)通过对比不同热源函数在温度场分布中的差异可知,相对于应用在传统焊接工艺上的高斯热源和双椭圆热源,双高斯圆柱热源更适合模拟激光深熔焊的熔池形状。

(3)残余应力的有限元仿真结果与试验结果在数值量级及分布趋势上吻合较好,并在多个方向的应力值上得到验证。

参考文献:

- [1] Yun L Q, Ju D, Quan H, et al. Electron beam welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of titanium sheet[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 280(1): 177-181.

- [2] Xue X, Pereira A B, Amorim J, et al. Effects of pulsed Nd: YAG laser welding parameters on penetration and microstructure characterization of a DP1000 steel butt joint[J]. *Metals*, 2017, 7(8): 292.
- [3] Chen H C, Pinkerton A J, Li L, et al. Gap-free fibre laser welding of Zn-coated steel on Al alloy for light-weight automotive applications[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(2): 495-504.
- [4] Wahba M, Mizutani M, Katayama S. Microstructure and mechanical properties of hybrid welded joints with laser and CO₂-shielded arc[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25: 2889-2894.
- [5] Joo S M, Bang H S, Kwak S Y. Optimization of hybrid CO₂ laser-GMA welding parameters on dissimilar materials AH32/STS304L using Grey-based Taguchi analysis[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, 15: 447-454.
- [6] 莫春立, 钱百年, 国旭明. 焊接热源计算模式的研究进展[J]. *焊接学报*, 2001(3): 93-96.
Mo Li-chun, Qian Bai-nian, Guo Xu-ming. Research progress of welding heat source calculation model[J]. *Welding Journal*, 2001(3): 93-96.
- [7] 吴甦, 赵海燕, 王煜, 等. 高能束焊接数值模拟中的新型热源模型[J]. *焊接学报*, 2004(1): 91-95.
Wu Su, Zhao Hai-yan, Wang Yu, et al. A new heat source model for numerical simulation of high energy beam welding[J]. *Welding Journal*, 2004(1): 91-95.
- [8] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources[J]. *Metallurgical Transactions B*, 1984, 15: 299-305.
- [9] 陈大江, 张大斌, 陈素, 等. “GAUSS+半椭圆”热源模拟激光焊接[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2022(5): 174-177, 186.
Chen Da-jiang, Zhang Da-bin, Chen su, et al. "GAUSS+semi-ellipsoid" heat source simulates laser welding[J]. *Combined Machine Tools and Automated Processing Technology*, 2022(5): 174-177, 186.
- [10] 王清龙. 船用钛合金中厚板激光电弧复合热源焊接工艺及数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 2022.
Wang Qing-long. Study on laser arc composite heat source welding technology and numerical simulation of marine titanium alloy medium thick plate[D]. Harbin: School of Ship Engineering, Harbin Engineering University, 2022.
- [11] 吴树森, 刘玉起. 材料成型原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [12] 李庆庆, 宋建岭, 彭江涛, 等. 2219铝合金TIG焊接接头残余应力分布[J]. *焊接*, 2016(1): 54-57.
Li Qing-qing, Song Jian-ling, Peng Jiang-tao, et al. Residual stress distribution of 2219 aluminum alloy TIG welded joint[J]. *Weld*, 2016(1): 54-57.
- [13] 罗家元, 李鑫, 谭超. 焊接残余应力对高强钢点焊接头裂纹扩展及疲劳性能的影响[J]. *机械强度*, 2024, 46(2): 439-445.
Luo Jia-yuan, Li Xin, Tan Chao. Effect of welding residual stress on crack growth and fatigue properties of spot welded joints of high strength steel[J]. *Mechanical Strength*, 2024, 46(2): 439-445.
- [14] 徐坤, 范彩霞, 韩二阳. 热源模型对Q420厚板焊接残余应力和变形预测精度的影响[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(23): 222-226.
Xu Kun, Fan Cai-xia, Han Er-yang. Influence of heat source model on prediction accuracy of residual stress and deformation in welding of Q420 thick plate[J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(23): 222-226.
- [15] 陈家权, 肖顺湖, 杨新彦. 焊接过程数值模拟热源模型的研究进展[J]. *装备制造技术*, 2005(3): 10-14.
Chen Jia-quan, Xiao Shun-hu, Yang Xin-yan. Research progress of heat source model for numerical simulation of welding process[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2005(3): 10-14.
- [16] 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.
- [17] 曾志, 王立君, 王月. 5A06铝合金间断焊温度场的数值模拟[J]. *天津大学学报*, 2008, 34(7): 849-853.
Zeng Zhi, Wang Li-jun, Wang Yue. Numerical simulation of temperature field in intermittent welding of 5A06 aluminum alloy[J]. *Journal of Tianjin University*, 2008, 34(7): 849-853.
- [18] Liu Y, Jiang P, Ai Y W, et al. Prediction of weld shape for fiber laser welding based on hybrid heat source model[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Material, Mechanical and Manufacturing Engineering, Guangzhou, China, 2015.
- [19] Raftar H R, Ahola A, Lipiäinen K, et al. Simulation and experiment on residual stress and deflection of cruciform welded joints[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2023, 208: No. 108023.
- [20] 姚相林. AH36的焊接残余应力数值模拟及实验研

- 究[D]. 镇江:江苏科技大学船舶与海洋工程学院, 2021.
- Yao Xiang-lin. Numerical simulation and experimental study on welding residual stress of AH36[D]. Zhenjiang: School of Shipbuilding and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, 2021.
- [21] 崔爱永, 胡芳友. 激光超声振动焊修技术[M]. 北京: 化工工业出版社, 2018.
- [22] 高健. AH36 船舶钢激光-电弧复合焊工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学材料科学与工程学院, 2020.
- Gao Jian. Study on laser arc composite welding technology of AH36 marine steel[D]. Nanjing: School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [23] 梁融. 基于热流固耦合的激光焊接数值模拟方法研究[D]. 上海: 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 2019.
- Liang Rong. Research on numerical simulation method of laser welding based on heat-fluid-structure coupling[D]. Shanghai: School of Shipbuilding, Oceanography and Architectural Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [24] 李卓. 考虑焊接残余应力影响的正交异性钢桥面板疲劳性能评估[D]. 南京: 东南大学土木工程学院, 2020.
- Li Zhuo. Fatigue performance evaluation of orthotropic steel bridge panels considering welding residual stress[D]. Nanjing: School of Civil Engineering, Southeast University, 2020.
- [25] 杨明. 考虑焊接残余应力的应变能密度法碳钢接头疲劳性能研究[D]. 长春: 吉林大学机械与航空航天工程学院, 2022.
- Yang Ming. Study on fatigue properties of carbon steel joints by strain energy density method considering welding residual stress[D]. Changchun: School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, 2022.