

轧辊埋弧堆焊过程多场耦合数值模拟方法研究*

李 昌 黄庆春 陈馨雪 刘兆泰 韩 兴
(辽宁科技大学机械工程与自动化学院 鞍山 114051)

摘要: 埋弧堆焊是冶金行业轧辊修复的重要方法,目前多是对轧辊埋弧堆焊过程中温度场或应力场的单一场进行研究,而埋弧堆焊流场的研究极少。堆焊中的电磁力、温度梯度与熔池内流动密切相关,基于热-弹-塑性理论和流体动力学计算方法(CFD),建立轧辊堆焊过程热-弹-塑-流多场耦合模型,获取堆焊过程温度场、应力场和流场的演变规律,分析表面张力、电磁力、浮力对堆焊熔池流动状态及形貌的影响规律,同时对堆焊工艺进行材料学表征分析。研究成果对预测埋弧堆焊过程多物理场的变化规律、熔池流场演变机理和有效预防堆焊开裂具有一定的实践意义。

关键词: 埋弧堆焊; 温度场; 流场; 应力场

中图分类号: TG455

Multi Field Coupling Numerical Simulation of Roll Submerged Arc Surfacing Process

LI Chang HUANG Qingchun CHEN Xinxue LIU Zhaotai HAN Xing

(School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

Abstract: Submerged arc surfacing is an important method for roll repair in metallurgical industry. The single field of temperature field or stress field in the process of submerged arc welding of roller has been studied, but few researches on submerged arc welding flow field are carried out. The electromagnetic force and temperature gradient are closely related to the flow in the weld pool. Therefore, based on the thermo elastic plastic theory and CFD method, a thermo elastic plastic fluid multi field coupling model of roll surfacing process is established. The evolution laws of temperature field, stress field and flow field were obtained. The influence of surface tension, electromagnetic force and buoyancy on the flow state and morphology of weld pool was analyzed. At the same time, the surfacing process was analyzed by material characterization. This research has a certain practical significance to predict the change law of multi physical field, the evolution mechanism of molten pool flow field, and effectively prevent surfacing cracking.

Keywords: submerged arc welding; temperature field; flow field; stress field.

0 前言

堆焊是一种自动化程度高的焊接技术,从1935年开始在我国逐步推广^[1],堆焊技术包含埋弧堆焊、焊条堆焊、熔化极气体保护堆焊、等离子堆

焊^[2]。堆焊是通过热源将特定材料熔化,经冷却凝固后熔敷在工件表面,使其获得优异的使役性能^[3],如图1所示。目前针对冶金行业轧辊再制造多数采用埋弧堆焊,自动化程度高、易实现大尺寸修复,对交变应力工况具有较好适应性。但埋弧堆焊

* 国家自然科学基金(E050402/51105187)、公安部消防重点实验室开放(KF201704)、辽宁省自然科学基金(2019ZD0277)、辽宁科技大学创新团队建设(601009830-02)和辽宁省高等学校创新人才支持计划(20201020)资助项目。

Fund: National Natural Science Foundation of China (E050402/51105187), Open Project of the Key Laboratory of Fire Protection of the Ministry of Public Security (KF201704), Natural Science Foundation of Liaoning Province(2019ZD0277), Innovation Team Construction Project of University of Science and Technology Liaoning (601009830-02), and Innovation Talent Support Plan of Colleges and Universities in Liaoning Province (20201020).

20210214 收到初稿,20210609 收到修改稿

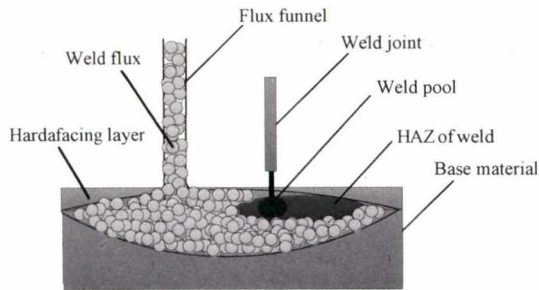
过程中,热输入较大,应力过大易导致修复开裂,且堆焊熔池始终处于焊剂、焊渣的淹没之下,难以观察其流动特性^[4-6]。堆焊过程涉及复杂的传热、电磁、传质、流动、相变等物理化学变化,多场耦合相互影响,如图2。1983年,EAGAR等^[7]研究表明,焊接电流、弧长、速度和材料热扩散率对焊缝形状有显著影响。2004年,PATHAK等^[8]发现焊接温度对焊件性能有显著影响。焊接中微观结构变化、晶粒生长、硬度和残余应力非常依赖于温度分布和冷却速率。2009年,陆善平等^[9]模拟了SUS304 TIG焊的浮力、电磁力、表面张力对熔池形貌的影响。2012年CHEN等^[10]对双丝埋弧焊温度场进行模拟。2016年,IBRAHIM等^[11]提出厚度大于50 mm钢板自动埋弧焊数值模拟方法,预测了焊缝热应力引起的裂

纹萌生。2017年,GHOSH等^[12]研究了气体弧焊中电极倾角对瞬态温度、热影响区和焊缝形状的影响。YADAV等^[13]提出一种考虑三维流动和体热源传热的埋弧焊接数值模型。研究了熔池自然对流和Marangoni对流,考虑了熔化和凝固过程中的相变,熔池自然对流和Marangoni对流。但这些研究均未考虑活性元素对流动的影响和堆焊材料热物性参数的温变影响。因此,对轧辊埋弧堆焊过程热-弹-塑-流多场耦合研究,对优化堆焊工艺、提高堆焊质量具有重要实践意义和应用价值。

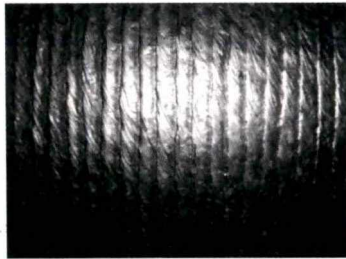
1 埋弧堆焊工艺与材料

1.1 试验方法

基体材料为Q235,化学成分(质量分数)如表1。堆焊材料为Lk458焊丝,直径4 mm,化学成分如表2。埋弧堆焊工艺参数如表3。



(a) Schematic diagram of submerged arc surfacing welding process



(b) Roll surfacing cladding layer diagram

图1 埋弧堆焊过程示意图及轧辊堆焊层

Fig. 1 Schematic diagram of submerged arc surfacing process and roll surfacing layer

表1 Q235 化学成分

Table 1 Q235 material elements

C	Si	Mn	Cr	S	P	Ni	Fe
0.18	0.3	0.54	0.3	0.05	0.045	0.3	Balance

表2 Lk458 焊丝化学成分

Table 2 Lk458 wire composition

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
0.15	0.5	0.5	0.02	0.02	10	0.4	Balance

表3 埋弧堆焊工艺参数

Table 3 Technological parameters of submerged arc surfacing

Voltage/V	Electric current/A	Speed/(mm/s)	Welding wire/mm
38	430	7.5	4

2 埋弧堆焊过程数值计算

2.1 条件假设

埋弧堆焊建模基于如下假设:

- (1) 熔池为不可压缩流体,且为层流;
- (2) 材料为各向同性;
- (3) 材料服从 Mises 屈服准则;
- (4) 堆焊处于局部热动态平衡;
- (5) 不考虑固态相变效应对应力的影响;
- (6) 塑性区服从塑性流动准则和强化准则;
- (7) 熔池与堆焊焊剂、焊渣、基体间的传热用不同的对流换热系数表征。

2.2 几何模型建立与网格划分

建立1/4轧辊切片模型,堆焊层采用自由四面体网格,网格大小为普通物理较细化。对焊道扫描

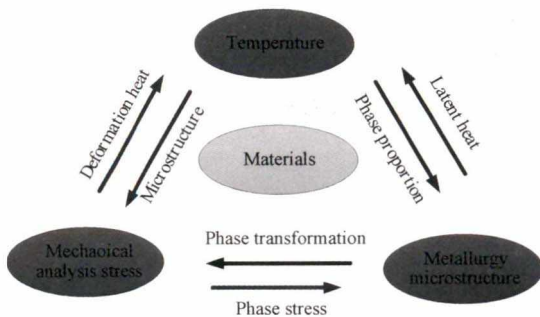


图2 埋弧堆焊多场耦合相互影响作用

Fig. 2 Interaction of multi field coupling in submerged arc surfacing

方向加密处理,设置单元数为 300 个。堆焊基体采用常规化网格,共包含 127 680 个域单元、22 579 个边界元和 1 201 个边单元,如图 3 所示。计算熔池流体时,对网格要求较高,采用自由四面体网格,上表面和纵向截面网格设置最大单元为 0.1 μm ,最小单元 0.003 6 μm ,最大单元增长率为 1.2,曲率因子 0.6。对基体采用较粗化网格,共包含 219 526 个域单元、36 458 个边界元和 660 个边单元,为保证计算收敛性,求解器设置自动重新划分网格,模型如图 4 所示。表 4 为数值模拟过程中设置的材料性能。

序,计算得出基体和堆焊层的热物性参数温变曲线分别如图 5 所示。



图 4 埋弧堆焊熔池流动几何模型网格划分
Fig. 4 Grid division of flow geometry model of submerged arc surfacing weld pool

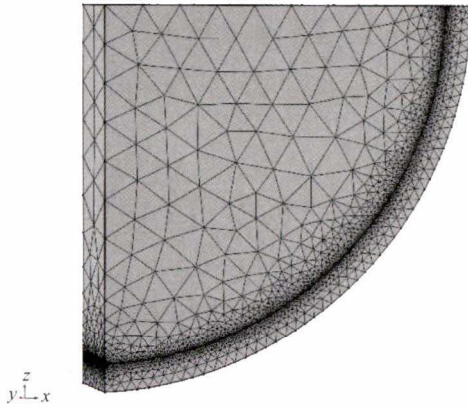


图 3 轧辊几何模型网格划分
Fig. 3 Grid division of roll geometric model

表 4 埋弧堆焊材料性能

Table 4 Material properties of the of submerged arc surfacing

Properties	Q235	Lk458
Solidus temperature/K	1 760	1 735
Liquidus temperature/K	1 790	1 767
Effective viscosity/(Pa·s)	0.06	0.06
Latent heat/(kJ·kg ⁻¹)	230	230
Convective heat transfer coefficient/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	20	3
Surface emissivity	0.8	0.8
Initial temperature/°C	20	20

为有效考虑焊接中材料参数的温变影响,利用 CALPHAD 方法计算温变参数,将数据导入计算程

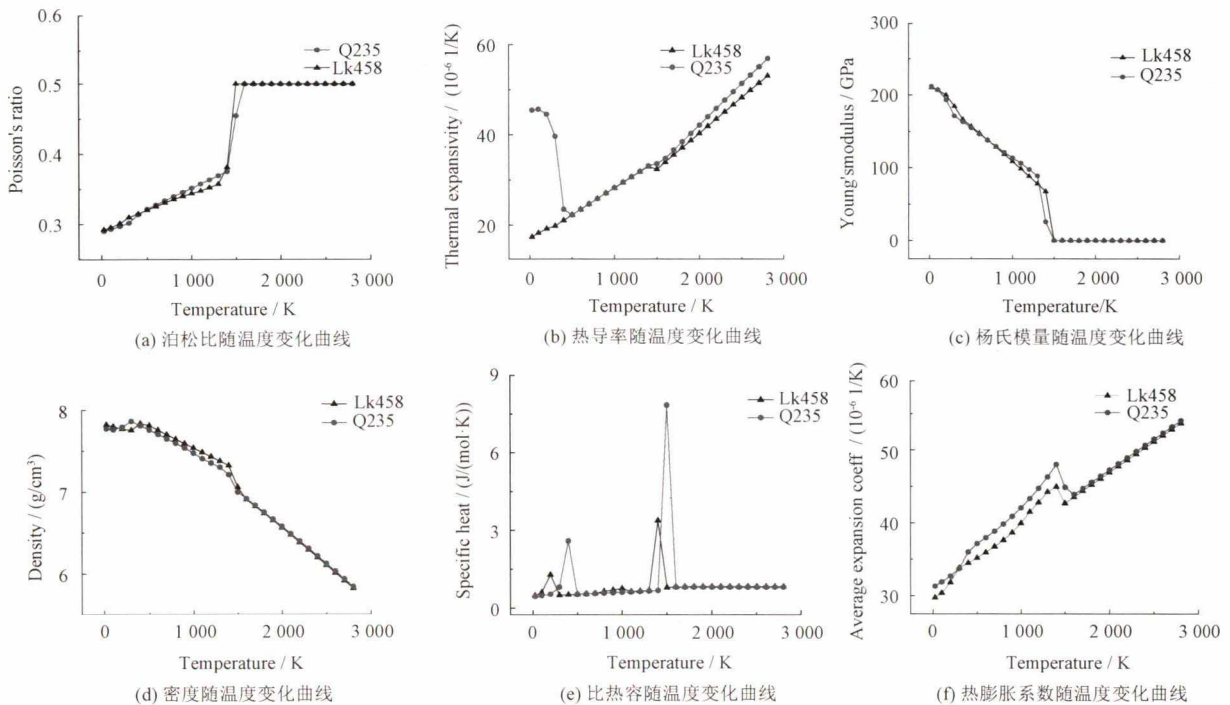


图 5 轧辊基体和堆焊层的物性参数随温度变化曲线

Fig. 5 Variation curve of physical parameters of roller substrate and hardfacing

2.3 埋弧堆焊过程总体控制方程

2.3.1 热源模型

埋弧堆焊过程中,堆焊基体与堆焊层的热输入主要来自于电弧热,GOLDAK等^[14]提出双椭球型热源模型,该模型适用于手工焊、电弧焊、埋弧焊等,已得到学界广泛认可,双椭球热源模型为

$$\begin{cases} q_1(x,y,z,t) = \frac{6\sqrt{3}UI\eta f_1}{\pi a_1 b c \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3(x-x_0 \cos \omega t)^2}{a_1^2} - \frac{3(y-y_0 \sin \omega t)^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right) \\ q_2(x,y,z,t) = \frac{6\sqrt{3}UI\eta f_2}{\pi a_2 b c \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3(x-x_0 \cos \omega t)^2}{a_2^2} - \frac{3(y-y_0 \sin \omega t)^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中, x, y, z 分别代表热源中心坐标; q_1, q_2 分别代表前、后半轴热流密度分布; a_1, a_2 分别是沿堆焊方向热源前、后半轴长度; b, c 分别是椭球体其余两半轴长度; f_1, f_2 是前、后椭球体热流密度分布系数,且 $f_1 + f_2 = 2$; ω 为角速度; η 是有效热功率; U 为堆焊电压; I 为堆焊电流。

2.3.2 初始条件和边界条件

轧辊初始温度与外界环境温度相同,设置为293.15 K。

能量守恒方程为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + q \quad (3)$$

式中, ρ 为密度, kg/m^3 ; k 为热导率, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; u 为速度, m/s ; C_p 为恒压热容; ∇T 为堆焊温度与环境温度的差值; Q 为体积热通量。

在埋弧堆焊中熔渣几乎覆盖整个焊缝,限制了熔池表面的热辐射和蒸发,因此堆焊层熔池与外界之间的热对流系数相对较小,设置为

$$q_c = -h(T)(T_{\text{sur}} - T_0) \quad (10)$$

式中, q_c 为向内热通量, h 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1})$,堆焊层对流换热系数为 $3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1})$, T_{sur} 为工件表面温度, T_0 是环境温度。

堆焊中与周边环境发生热辐射交换,用 Stefan-Boltzmann 定律描述它们之间的净热量传递

$$q_r = -\varepsilon \sigma A_1 F_{12} (T_{\text{sur}}^4 - T_0^4) \quad (11)$$

式中, ε 为物体表面辐射率, σ 为 Boltzmann 常数, A_1 为辐射面1的面积, F_{12} 为由辐射面1到辐射面2的形状系数。

在本模型中,采用基于经典混合理论 1988 年 BRENT 等^[15]和 2009 年 PATHAK 等^[16]来模拟熔池中的熔化和凝固相变。埋弧堆焊流场的初始条件是熔池流速为 0。

连续性方程为

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

流体流动控制方程为不可压缩 Navier-Stokes 动量守恒方程为

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + (\rho u \cdot \nabla) u = -\nabla p + \quad (4)$$

$$\nabla \cdot [\mu(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F_s + F_N$$

式中, F_s 是糊状区域的动量耗散, F_N 为浮力, μ 液态金属动力粘度, p 为流体内的压力。

$$F_s = -\frac{(1-f_1)^2}{f_1^3 + d} Cu \quad (5)$$

式中, C 表示糊状区常数, u 为速度, d 是数值很小的常数(取 10^{-6}), f_1 是液体分数。

浮力方程为

$$F_N = \rho g \beta_r (T - T_0) \quad (6)$$

式中, g 为重力加速度, β_r 为热膨胀系数, T_0 为环境温度。

f_1 是液体分数,其公式如下

$$f_1 = \begin{cases} 0, & T \leq T_s \\ \frac{T - T_1}{T - T_2}, & T_s < T < T_1 \\ 1, & T > T_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中, T 为系统温度, T_1 液相线温度, T_s 固相线温度。

由 Marangoni 对流引起的顶部自由表面的边界条件为

$$\tau_{xz} = -\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) = \left(\frac{\partial \gamma}{\partial T} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (8)$$

$$\tau_{yz} = -\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) = \left(\frac{\partial \gamma}{\partial T} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (9)$$

式中, τ_{xz}, τ_{yz} 为剪切应力, γ 为表面张力。

埋弧堆焊过程总应变方程为

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{th} \quad (12)$$

式中, ε 是总应变, ε_{el} 弹性应变, ε_{pl} 塑性应变, ε_{th} 是热应变。

热应变为

$$\varepsilon_{th} = \alpha(T - T_0) \quad (13)$$

式中, α 为热膨胀系数, T_0 为环境温度, T 为工作瞬时温度。

基于小塑性应变假设的各向同性硬化模型为

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_{\text{pe}} + \frac{\sigma_{\text{eff}}}{E} \quad (14)$$

$$\sigma_{\text{hard}} = \sigma_{\text{exp}} \left(\varepsilon_{\text{pe}} + \frac{\sigma_{\text{eff}}}{E} \right) - \sigma_{\text{ys}} \quad (15)$$

式中, σ_{exp} 为试验应力参数, σ_{ys} 为屈服应力, ε_{pe} 为有效塑性应变, E 为弹性模量。

埋弧堆焊应力场初始条件为

$$\begin{cases} \sigma(x, y, z, t_0) = 0 \\ \varepsilon(x, y, z, t_0) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

2.4 数值计算结果分析

2.4.1 埋弧堆焊过程温度场

埋弧堆焊温度分布对熔池流速、残余应力均有重要影响,埋弧堆焊熔池始终受到焊剂和焊渣保护,

冷却速度较慢。不同的冷却速度直接影响金相组织的形成与演变。基于固体传热模块对堆焊过程温度场进行计算,利用 DELL 40 核塔式工作站进行计算,分别提取 $t=0.1, 0.5, 1, 5, 10, 1\ 500$ s 时刻温度场如图 6。计算表明,在 0.1~0.5 s 内,随着热源不断加热,基体和堆焊层温度不断升高直至形成准稳态温度场, $t=1$ s, 熔池最高温度为 2 000 K。在轧辊基体与堆焊层间形成“椭球状”熔池,各个时刻温度最高点出现在椭球中心位置,温度稳定在 2 100 K 左右,明显高于基材熔点。随着堆焊热源的移动,熔池内温度变化明显,从熔池中心到熔池边缘温度呈梯度递减,逆着焊接方向形成“彗星尾”状分布。

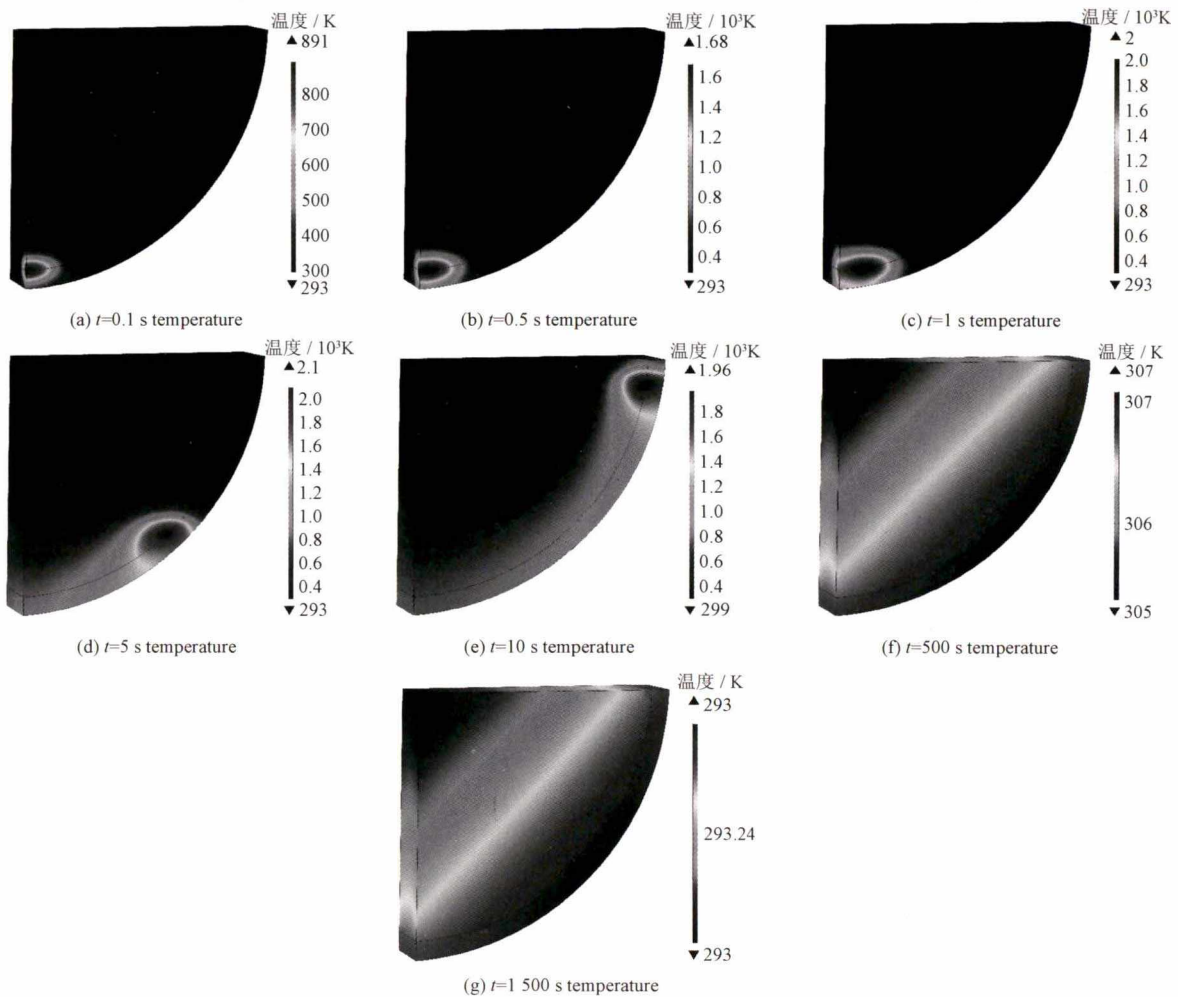


图 6 埋弧堆焊过程温度变化

Fig. 6 Temperature change during submerged arc surfacing

随着热源离开焊件,温度逐渐下降。整个冷却过程堆焊层温度明显高于轧辊基体,这是由于焊剂、焊渣的保温作用所致。实际轧辊堆焊过程中,轧辊体积巨大,其升温、降温仅是局部温变过程。当 $t=$

1 500 s 时,轧辊最高温度为 293.15 K,认为此刻焊件已冷却至室温。

为了进一步揭示堆焊熔池内不同位置温度场变化情况,如图 7 设置三条温度采集轨迹线,1 号轨迹

线横向贯穿熔池方向(与y轴正方向相同)。2号轨迹线,纵向贯穿熔池,沿着熔池深度方向。3号轨迹线与焊道扫描方向相同。

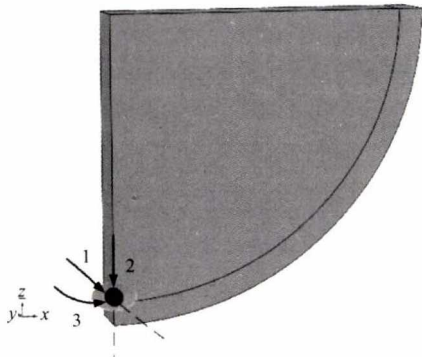


图7 沿轧辊不同方向温度采集线轨迹
Fig. 7 Track of the line is collected along the different temperature direction of the roll

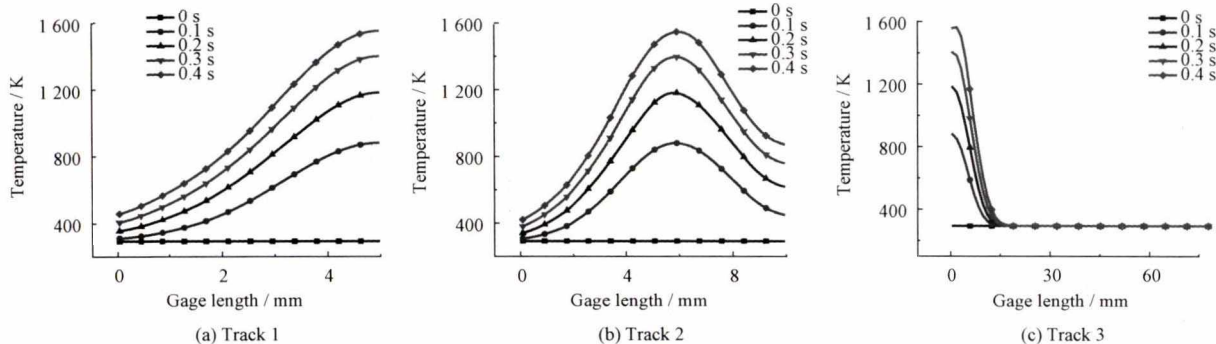


图8 沿不同采集线温度变化曲线

Fig. 8 Temperature change curves along different acquisition lines

2.4.2 埋弧堆焊过程应力场

为直观反映不同时刻埋弧堆焊过程中 von Mises 应力演变规律,分别取 $t = 0.1, 0.5, 1, 5, 10$ s 时刻的 von Mises 应力分布如图9。计算表明,随着焊接加热的进行,基体和焊丝熔化形成熔池,熔池的 von Mises 应力较低,熔池边界周围热影响区应力较大,由熔池向外呈梯度递减,沿焊缝形成塑性应力带。轧辊基体和堆焊层的应力差异较大,这是因为基体(Q235)、堆焊层(Fe-Cr-Ni 合金)二者屈服强度不同。

为揭示堆焊从开始到稳态过程中 von Mises 应力的变化规律。沿图7所示扫描方向提取焊接应力,沿不同轨迹线应力变化如图10a沿1号扫描线提取的应力变化图,沿1号扫描线,应力呈先升高再降低的趋势。接近熔池,应力快速降低。随着焊接的进行,不同时刻应力峰值略有下降,这是由于冷却过程,应力逐渐释放。 $t = 0.1$ s 时, von Mises 应力最大峰值达到 619 MPa。图10b为沿2号扫描线提取

图8分别为沿不同扫描方向的温度变化曲线。沿1号轨迹线方向,不同时刻焊接温度均呈现升高趋势,在 $t = 0.1$ s 时熔池最高温度为 889 K。随着焊接的进行,沿1号轨迹,0~0.4 s 内不同时刻温度峰值不断递增。沿2号轨迹线,温度呈先上升后下降的变化趋势,接近热源中心位置,温度达到最高。与熔池芯部等距位置的外侧堆焊层温度明显高于内侧堆焊基体温度,这是因为堆焊的焊渣保温效果导致熔池向外界散热效应小于熔池向轧辊内部的热传导所致。随着焊接的进行,各时刻峰值呈现递增趋势。沿3号轨迹线上不同时刻温度出现峰值分布,沿轨迹线方向温度逐渐降低。这种现象很好地揭示了双椭圆焊接热源在升温过程中不断沿轨迹前移的过程。

的应力变化图。沿2号扫描线从基体到堆焊层,应力呈先降低再升高的趋势。接近熔池,不同时刻应力呈降低趋势,中间应力最低处为熔池区域。至堆焊层一侧应力明显上升。

随着热源移动呈现出明显“驼峰”分布的应力变化图。沿2号扫描线从基体到堆焊层,应力呈先降低再升高的趋势。接近熔池,不同时刻应力呈降低趋势,中间应力最低处为熔池区域。至堆焊层一侧应力明显上升,随着热源移动呈现出明显“驼峰”分布。10c为沿3号扫描线提取的应力曲线。应力呈现先升高再降低的单峰分布,随堆焊进行,应力不断升高至峰值,堆焊基体自身受热膨胀且受堆焊层压应力影响,使得 von Mises 应力超过其屈服强度。 $t = 0.1$ s 时 von Mises 应力达 374 MPa,而熔池处应力较低。在各个不同时刻,峰值变化趋势相近,不同时刻出现的峰值随着焊接的进行不断规律性前移,揭示了焊接热源移动对应力分布变化的影响。

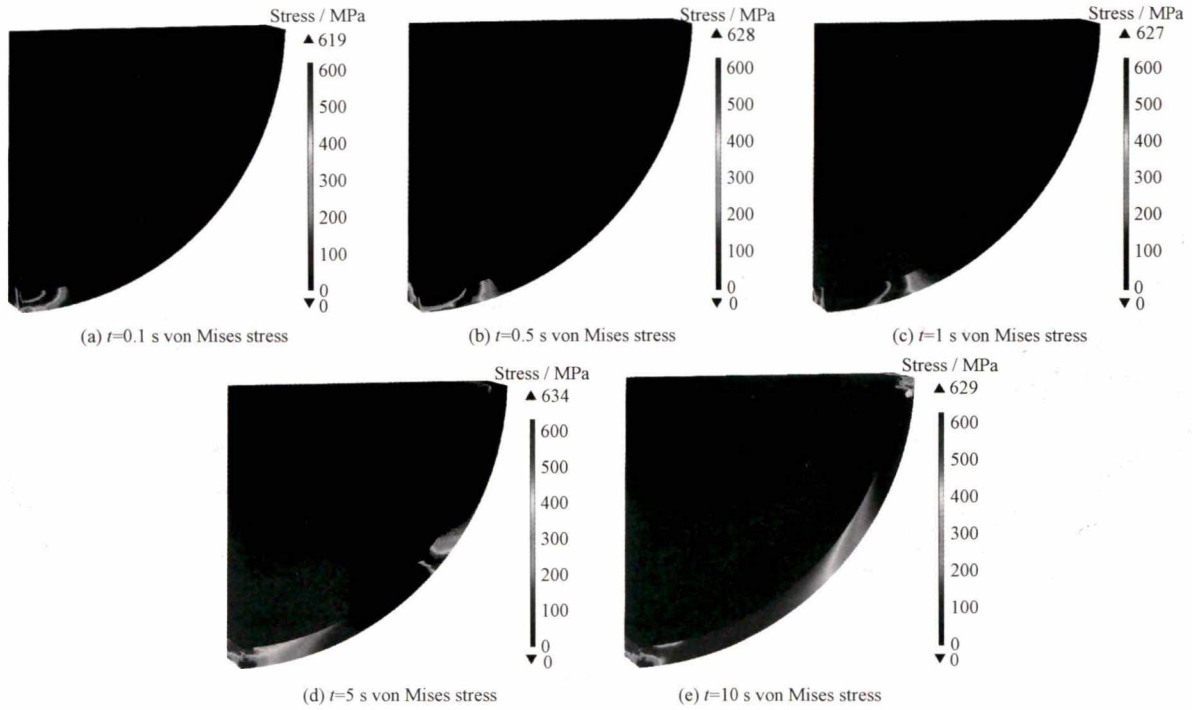


图 9 埋弧堆焊过程应力变化

Fig. 9 Stress variation during submerged arc surfacing

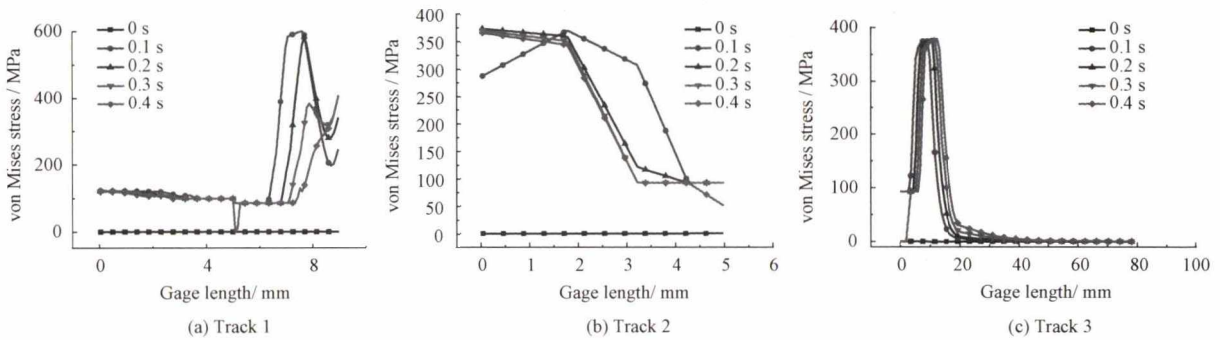


图 10 沿不同轨迹线埋弧堆焊应力变化

Fig. 10 Stress variation of submerged arc surfacing along different track lines

2.4.3 埋弧堆焊过程流场

因埋弧堆焊熔池始终处于焊剂、焊渣的包覆之中,难以通过常规试验进行观测。因此,建立埋弧堆焊过程热-流耦合模型,考虑了重力、浮力、电磁力、表面张力对熔池流速的影响。忽略热源移动对熔池流动的影响,模拟了堆焊过程熔池的形成与演变规律,分析了堆焊熔池的形状和流动特点。

埋弧堆焊熔池主要受到表面张力和电磁力的作用,其中表面张力和温度梯度使得熔融金属由温度较高的上表面向温度较低的熔池边缘流动,形成 Marangoni 效应,加速熔池内金属元素的扩散,其原理如图 11。同时 Marangoni 效应又影响流体流动和温度分布。熔池内的金属流动是影响熔池形状和元

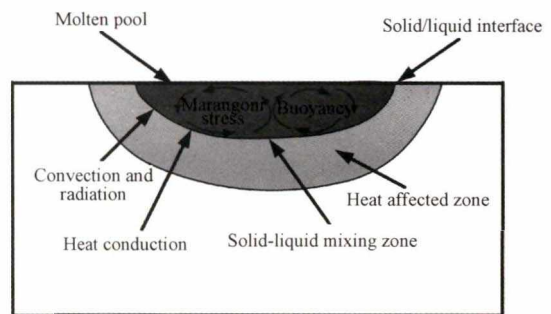


图 11 埋弧堆焊熔池原理图

Fig. 11 Schematic diagram of submerged arc surfacing welding pool

素分布的主要因素,对堆焊组织和性能有重要影响。当表面张力温度系数为负时,熔池中心处于低

压,熔池边界区域处于高压。这种压力差导致熔融流体从外部区域流向熔体池的中心,可见在熔池内部形成左、右对称的两个环形涡流,熔池形貌变得更加宽而浅。为研究埋弧堆焊熔池内瞬态流动变化,取 $t=300, 400, 500, 600, 700$ ms 时刻熔池流速分布,如图 12。在 $0\sim 300$ ms,电弧燃烧持续加热,基体和焊材不断吸收能量。 $t=300$ ms 开始形成堆焊

熔池,此时,熔池流速为 0.19 m/s,随着能量积累,熔化区域不断发展扩大,从 300 ms 到 600 ms 熔池流速一直增大,熔池还处于发展状态。在 600 ms 时熔池内金属流速达到 0.33 m/s,之后流速变化较小,形成准稳态流场。在焊接熔池纵向切面内,熔融金属从熔池上边缘向熔池底部流动,形成两个环型涡流。

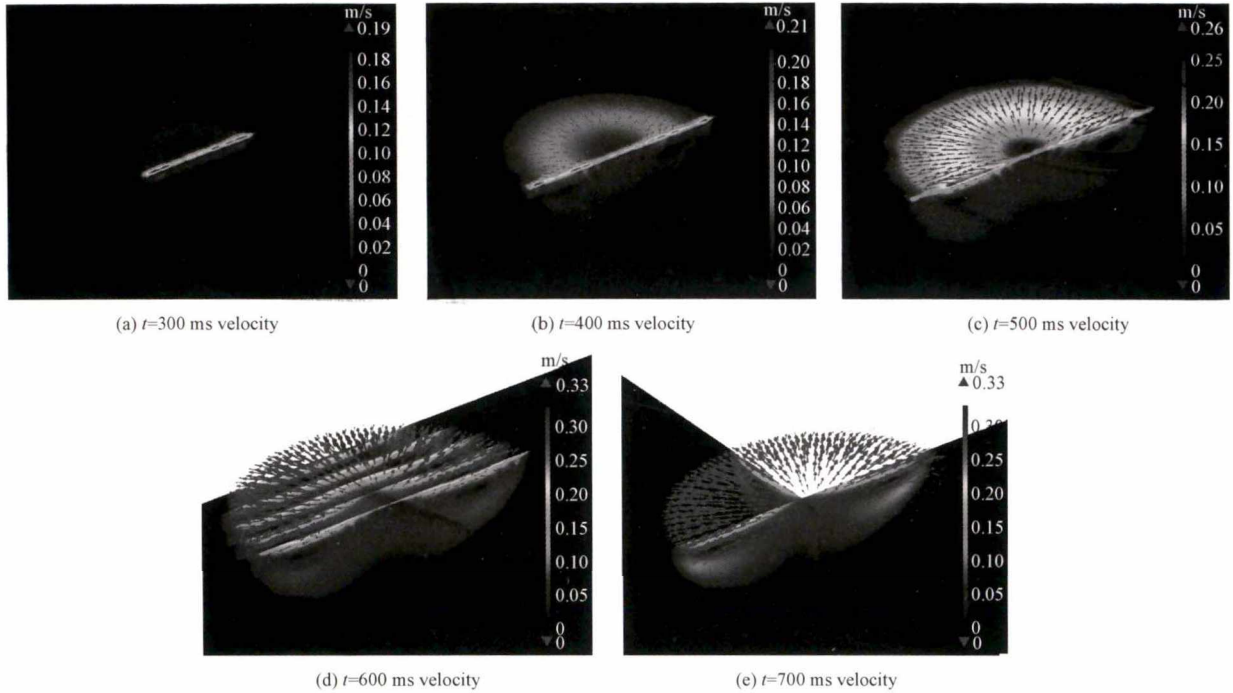


图 12 埋弧堆焊熔池流速变化

Fig. 12 Variation of flow velocity of submerged arc surfacing welding pool

为更好地揭示熔池流动过程流速变化规律,选择如图 13,沿不同采集线方向提取熔池流场变化规律。4号扫描线为 y 向的反向,5号扫描线为 x 向的反向,6号扫描线沿 z 轴方向,竖直向上。图 14 流速变化曲线,计算表明:沿 4号轨迹方向,熔池边缘没发生熔化,区域流速为零,沿轨迹方向,流速逐渐增大,在熔池中心处流速减小。随着热源移动,熔池前方区域开始熔化流速较小,已熔化区域流速较大。随着焊接的进行,熔池流速不断增大,这体现了熔池逐渐发展并形成稳态流场的过程。沿 5号轨迹方向,流速关于熔池中心线呈对称分布,熔池流速呈现先增大后减小再增大的趋势,这是由于熔融金属受表面张力推动从熔池中心流向熔池边缘,造成熔池中心速小,边缘流速大。沿 6号轨迹方向,从熔池底部向上流速不断增加,接近熔池上表面,流速减小。熔池底部流速小是由于远离熔池表面,电磁力和表面张力对熔融金属的驱动力逐渐减小,流速变慢。

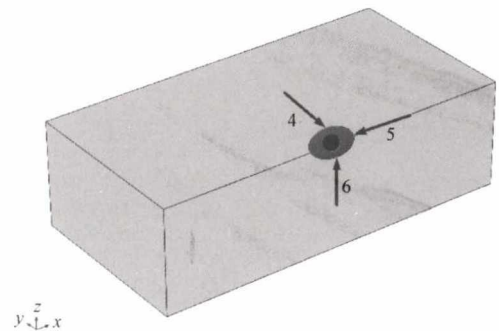


图 13 沿不同方向流速采集线轨迹

Fig. 13 Track of the acquisition line along different directions of flow velocity

埋弧堆焊材料中含有 S 等活性元素,使得熔池表面张力温度系数将发生逆转,由负变正。堆焊熔池 $x-z$ 截面流场分布由图 15a 转变为图 15b。此时表面张力温度系数为正,压力场反向产生一个高压区域在熔体池的中心,低压区域在熔池边缘区域。这种压力差导致熔融金属从熔池的边缘区域流向熔池中心区域,熔池几何形貌变得更加窄而深。图

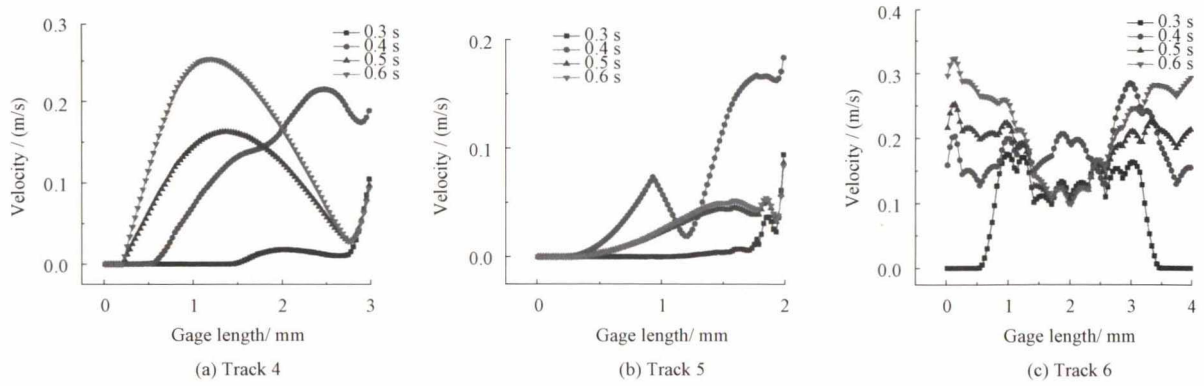


图 14 埋弧堆焊熔池流速变化

Fig. 14 Variation of flow velocity of submerged arc surfacing welding pool

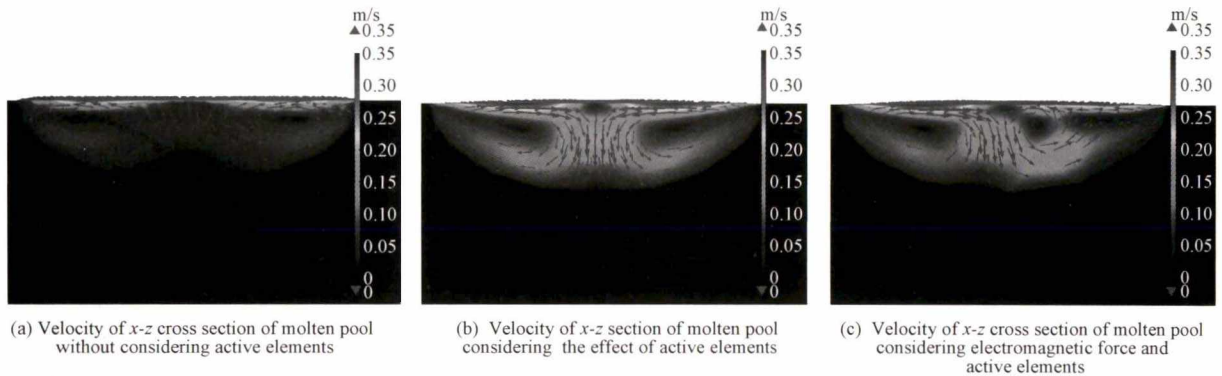


图 15 不同条件下 $x-z$ 截面流速对比

Fig. 15 Comparison of $x-z$ cross section velocity under different conditions

15c 为考虑电磁力作用下,堆焊熔池流速及形貌,在熔池中轴线处,液态金属流向熔池根部,电磁力的作用会影响到熔池环流的形成,因电磁力的作用方向垂直熔池向下,推动着高温的液态金属流向熔池底部,将作用于熔池表面的电弧热量带入熔池根部,导致底部涡流的形成,有利于增加熔深。

2.4.4 埋弧堆焊过程相变

埋弧堆焊过程中,焊缝区母材与熔覆层均要经历固相、熔化、凝固、新稳态组织等几个阶段。相变和传热是密不可分的,相变依赖于温度的变化,同时温度也会受到各相特性和相变潜热的影响。在埋弧堆焊冷却过程中马氏体相变与焊缝组织及产品质量密切相关,因此有必要在焊接过程的数值模拟中考虑马氏体相变的影响。

奥氏体相变模型:碳钢奥氏体相变是随时间逐渐发生的,它涉及到一种微观扩散机制,非等温情况下奥氏体形成的转化动力学假设服从 JMAK 方程^[17-20]。由 JOHNSON、MEHL、AVRAMI 等建立的等温动力学数学模型为

$$f = 1 - \exp[-K(T)t^n] \quad (17)$$

式中, f 是新相体积分, t 是相变时间, K 为与新相

形核率有关常数, T 为瞬时温度, n 为新相形核率及长大速度有关的常数。

马氏体相变模型:碳钢中的奥氏体向马氏体转变开始于一个确定的温度 M_s ,当温度低于该温度且持续冷却将完成相变过程。焊后冷却过程中,马氏体相变转化是置换过程,用 KOISTINEN-MARBURGER 模型描述^[21]。该模型认为,奥氏体转化为马氏体过程中,转化的数量取决于可用奥氏体的比例和低于马氏体起始温度 M_s 的过冷度。马氏体形成速率与温度冷却速率、奥氏体瞬时分数成正比。

$$f_M = 1 - \exp(-\alpha(M_s - T)) \quad (18)$$

式中, M_s 为马氏体相变开始温度, α 为成分相关常数。

图 16 是计算得出的埋弧堆焊层冷却至室温时的马氏体分布云图。其中,红色为马氏体、蓝色为铁素体。随着堆焊热源的移动,在靠近热源的区域温度先达到奥氏体转变温度,铁素体发生向奥氏体的转变。随着热源的离开,温度开始快速下降,奥氏体相转变为马氏体相。

由图 16 可知,马氏体主要集中分布在焊缝及热影响区域。远离焊缝的区域温度没能达到材料的奥

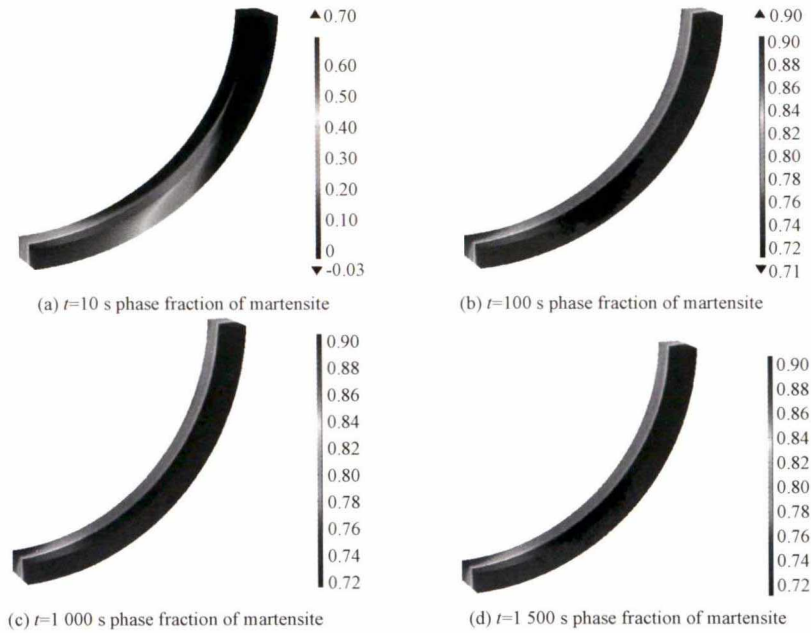


图 16 埋弧堆焊过程马氏体相体积分数的变化

Fig. 16 Change of volume fraction of martensite phase during submerged arc surfacing

氏体转变开始温度,没发生组织转变。过渡区是堆焊过程中温度介于奥氏体转化开始和结束温度之间,有部分奥氏体转化为马氏体。堆焊温度超过堆焊材料的奥氏体转变结束温度的区域,其焊缝组织绝大多数为淬火马氏体,马氏体体积分数占 90% 以上。

2.5 埋弧堆焊金相组织试验

堆焊试件形貌如图 17 所示。观察发现:埋弧堆焊后的 Q235 基体钢表面观察到焊材与基体融合区域,堆焊材料与基体相互扩散明显,熔池较深,二者冶金结合良好。对埋弧堆焊试样进行抛光,用浓盐酸和浓硝酸 3 : 1 的王水腐蚀处理,利用 Zeiss-ΣIGMA HD 场发射扫描电子显微镜观察堆焊金相组织,如图 18 所示。可见,图 18a 焊区域中 c、d 区

域为马氏体+少量铁素体,e 区域为堆焊过程中形成的黑色碳化物。图 18b 为图 18a 中 d 区域的放大图。金相组织为针状马氏体。与数值模拟计算结果相吻合。

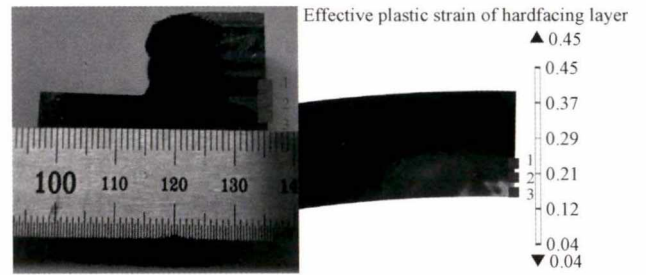


图 17 埋弧堆焊试件纵切面与数值模拟硬度测试位置
Fig. 17 Longitudinal section of submerged arc surfacing specimen and numerical simulation hardness test position

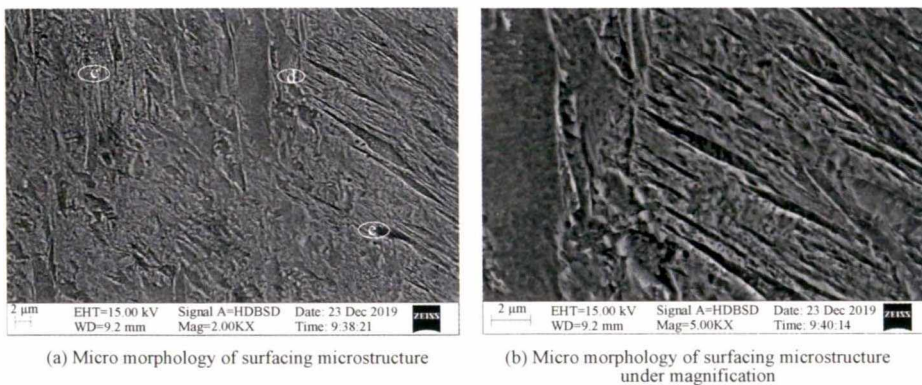


图 18 埋弧堆焊层金相组织

Fig. 18 Metallographic structure of submerged arc surfacing coating

3 埋弧堆焊层硬度试验

在堆焊层选取等距的 3 个不同位置进行硬度试验与数值模拟计算硬度,通过二者对比验证数值模型的有效性。硬度测试位置如图 17 所示。

材料维氏硬度计算公式^[22]为:

$$HV = CK(\varepsilon_{repr} + \varepsilon_{pl})^n / 9.8 \quad (19)$$

式中, HV 为维氏硬度。本文所选材料为 Lk450, K 是强度因子,取 1 152, n 是应变硬化指数 0.576。由压头引入应变 ε_{pl} 为 0.08, C 取 3.3; ε_{repr} 为数值模拟计算得出的等效塑性应变。

将数值模拟计算的等效塑性应变代入式(19),计算出硬度值如表 5 所示。

表 5 表面硬度数值计算结果

Table 5 Numerical results of surface hardness

Measured data points	1	2	3
Equivalent plastic strain	0.245	0.278	0.301
Hardness value/HV	194.1	205.2	212.4

试验采用 Q10 的维氏硬度仪,测得试件堆焊层剖面 3 处不同位置点的硬度,每个点随机测量 5 次取均值,如图 19 所示,测得硬度值,测量数据如表 6 所示。

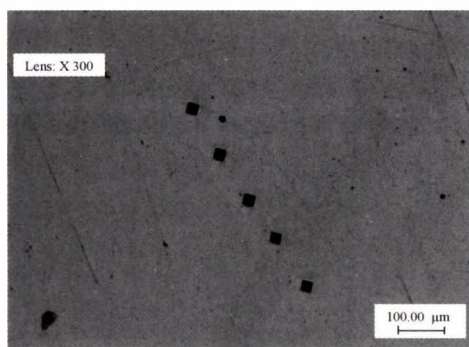


图 19 测试位置处显微硬度点分布

Fig. 19 Distribution of microhardness points at test location

表 6 试验硬度值

Table 6 Experimental hardness value

Random point	Position		
	1	2	3
1	183	192	201
2	175	175	190
3	180	185	189
4	170	190	183
5	169	183	194
Verage value	175.4	187.6	191.4

将试验硬度值与数值模拟计算结果进行对比,如表 7,对比结果表明,二者相对误差在 11% 以内,

证明了所建模型的有效性。

表 7 试验硬度与数值计算硬度的对比

Table 7 Comparison of experimental hardness and numerical calculation hardness

Data point	1	2	3
Numerical calculation of hardness	194.1	205.2	212.4
Hardness test	175.4	187.6	191.4
Relative error/%	10.6	9.3	10.9

4 结论

(1) 提出一种轧辊埋弧堆焊过程热-力耦合模型,再现了轧辊埋弧堆焊过程中温度和应力的演变过程,熔池中活性元素 S 与熔池流向和形状密切相关,当熔池中存在活性元素时,液态金属从熔池边缘流向熔池中心,熔池窄而浅。电磁力的主要作用是推动着高温的熔融金属流向熔池底部,有利于增加熔深。

(2) 利用 Zeiss-ΣIGMA HD 场发射扫描电子显微镜观察堆焊金相组织,绝大部分区域为马氏体+少量铁素体,黑色区域为堆焊过程中形成的碳化物。

参 考 文 献

[1] 沈凤刚,刘景凤. 冶金轧辊堆焊技术综述[J]. 中国表面工程, 2006, 19(3): 14-19.
SHEN Fenggang, LIU Jingfeng. Summarization of hard surfacing technology for metallurgical rollers [J]. China Surface Engineering, 2006, 19(3): 14-19. (in Chinese)

[2] 张滢月,包晔峰,蒋永锋,等. 轧辊堆焊的现状和发展趋势[J]. 电焊机, 2010, 40(10): 17-20.
ZHANG Yingyue, BAO Yefeng, JIANG Yongfeng, et al. Present status and development trend of roll surfacing technology [J]. Electric Welding Machine, 2010, 40 (10): 17-20. (in Chinese)

[3] MURUGAN N, PARMAR R S, SUD S K. Effect of submerged arc process variables on dilution and bead geometry in single wire surfacing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1993, 37(1-4): 767-780.

[4] 吴义党,杨志鹏,刘鸣宇,等. 核岛主设备带埋弧堆焊层残余应力研究[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2016, 30(3): 103-108.
WU Yidang, YANG Zhipeng, LIU Mingyu, et al. Study on residual stress of submerge arc strip cladding layer of nuclear island main equipment [J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2016, 30(3): 103-108. (in Chinese)

[5] 洪永昌. 连铸辊表面堆焊层开裂原因分析[J]. 热加工工艺, 2006 (1): 70-72.

- HONG Yongchang. Analysis on cracking of surfacing layer of continuous casting roller [J]. Hot Working Technology, 2006 (1): 70-72. (in Chinese)
- [6] 郭小燕. 冶金轧辊堆焊层表面开裂失效分析及其有限元分析 [D]. 大连: 大连海事大学, 2011.
GUO Xiaoyan. Failure analysis on cracked hardfacing layer of metallurgical roller and finite element calculation [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011. (in Chinese)
- [7] EAGAR T W, TSAI N S. Temperature fields produced by traveling distributed heat sources [J]. Weld. Res. Suppl, 1983, 62(12): 346-355.
- [8] PATHAK A K, DATTA G L. Three-dimensional finite element analysis to predict the different zones of microstructure in submerged arc welding [J]. Proceeding of the Institute of Mechanical Engineers. Part B. Journal of Engineering Manufacture, 2004, 218(3): 269-280.
- [9] 陆善平, 董文超, 李殿中, 等. 电弧特性及其对熔池形貌影响的数值模拟 [J]. 物理学报, 2009, 58(S1): 94-103.
LU Shanping, DING Wenchao, LI Dianzhong, et al. Numerical simulation of arc properties and their effects on the weld shape [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(S1): 94-103. (in Chinese)
- [10] CHEN Jianmin, CAO Zhenping, LI Jun, et al. Double wires submerged arc welding temperature field simulation [C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT-2012), Shenyang(CN), 2012: 1530-1533.
- [11] IBRAHIM O A, LIGNOS D G, ROGERS C A. Proposed modeling approach of welding procedures for heavy steel plates [J]. Engineering Structures, 2016, 127: 18-30.
- [12] GHOSH A, YADAV A, KUMAR A. Modelling and experimental validation of moving tilted volumetric heat source in gas metal arc welding process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 239: 52-65.
- [13] YADAV A, GHOSH A, KUMAR A. Experimental and numerical study of thermal field and weld bead characteristics in submerged arc welded plate [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017: 262-274.
- [14] GOLDAK J, CHAKRAVARTI A, BIBBY M. A new finite element model for welding heat sources [J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15(2): 299-305.
- [15] BRENT A D, VOLLER V R, REID K J. Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal [J]. Numerical Heat Transfer, 1988, 13(3): 297-318.
- [16] PATHAK N, KUMAR A, YADAV A, et al. Effects of mould filling on evolution of the solid-liquid interface during solidification [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(17): 3669-3678.
- [17] JOHNSON W A, MEHL R F. Reaction kinetics in processes of nucleation and growth [J]. Trans. AIME, 1939, 135: 416-458.
- [18] AVRAMI M. Kinetics of phase change. I: General theory [J]. Journal of Chemical Physics, 1939, 7(12): 1103-1112.
- [19] AVRAMI M. Kinetics of phase change II: Transformation-time relations for random distribution of nuclei [J]. Journal of Chemical Physics, 1940, 8(2): 212-224.
- [20] AVRAMI M. Kinetics of phase change. III: Granulation, phase change and microstructure [J]. Journal of Chemical Physics, 1941, 9(2): 177-184.
- [21] KOISTINEN D, MARBURGER R, KOISTINEN D P, et al. A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels [J]. Acta Metallurgica, 1959, 7(1): 59-60.
- [22] 路彦君. 镍基高温合金 Inconel718 微铣削残余应力与加工硬化研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
LU Yanjun. Researches on residual stress and work hardening on micro-milling nickel-base superalloy Inconel 718 [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)

作者简介: 李昌(通信作者),男,教授,博士,硕士研究生导师。研究方向为机械可靠性工程、激光熔覆及激光表面处理、焊接可靠性、超音速喷涂。

E-mail:lichang2323-23@163.com