

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.02.012

超薄板焊接熔池流场数值模拟

吉永丰¹, 何建萍^{1*}, 王付鑫², 林杨胜蓝¹, 宗小彦¹

(1. 上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620; 2. 上海工程技术大学 基础教学学院, 上海 201620)

摘要:为了研究超薄板焊接质量差的问题,根据流体力学和传热学原理,建立超薄板焊接熔池的二维数值分析模型。电弧热源模型采用高斯热源分布模型,模型考虑了超薄板固态金属的热传导、熔池与外部环境的对流辐射、熔池内部液态金属质点的热传递、材料的热物理性能参数部分随温度变化等因素。采用 FLUENT 对超薄板微束等离子焊接熔池模型进行求解,得出了熔池温度场、流场分布,并讨论了几种作用力对超薄板熔池流场的影响。研究结果表明表面张力是超薄板熔池内部液态金属流动的主要驱动力。

关键词:超薄板;熔池;温度场;流场;数值模拟

中图分类号: TG111.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2015)02-0047-05

Numerical Simulation of Flow Field of Ultra-thin Plate Weld Pool

JI Yongfeng¹, HE Jianping^{1*}, WANG Fuxin², LIN Yangshenglan¹, ZONG Xiaoyan¹

(1. School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. School of Fundamental Studies, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to study the problem of the poor quality of thin plate welding and according to the theories of fluid mechanics and heat transfer, a two-dimensional numerical analysis model of the ultra-thin plate weld pool was established. Gaussian distribution model was used to describe the heat source of arc. Many factors were considered in the model, such as the thermal conductivity of solid metal of the ultra-thin plate, the convection and radiation between the ultra-thin plate puddle and external environment, the heat transfer of the liquid metal, some thermal physical properties of the material changed with temperature and so on. The temperature field and flow field were given, and the influence of the flow field of ultra-thin plate weld pool by several forces was discussed by using FLUENT to calculate the model of the ultra-thin plate weld pool of micro-plasma arc welding.

Key words: ultra-thin plate; weld pool; temperature field; flow field; numerical simulation

随着超薄不锈钢片、带等材料在医疗器械、工业品及日用器皿中的应用越来越广泛,超薄不锈钢材料的焊接问题也愈加突显。由于材料太薄,焊接难度显著增大。而微束等离子焊有功率密度高、能量集中、热输入小、焊缝窄和变形小等优点^[1-3],较为适合焊接超薄板。而采用实验方法研究控制超薄板焊接质量的问题,花费的人力、物力、财力都较大。FLUENT 是目前国际上比较流行的商用 CFD (computational fluid dynamics) 软件,可以广泛地应用于流体、热传递及化学反应等有关数值模拟,在焊接过程的数值模拟方面

也有较好的应用^[4]。

本研究应用 FLUENT 对超薄板微束等离子弧焊接熔池流场进行数值模拟,着重分析了超薄板的熔化过程,熔池的扩张及各作用力对熔池内部液态金属流动的影响,对改进超薄板的焊接工艺具有重要意义。

1 数学模型的建立

在微束等离子弧焊接超薄板的数值模拟中,超薄板材料采用 304 不锈钢(0Cr18Ni9),工件尺寸为 100 mm × 60 mm × 0.1 mm;焊接电流为 2 A,电弧电压为 24 V;材料的热物理性能参数部分随温度变化,部

收稿日期:2014-11-13;修回日期:2014-12-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275283);上海市科委基础研究重点资助项目(14JC1402700)

作者简介:吉永丰(1989),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事微束等离子弧超薄板焊接熔池动态过程的研究。通信作者:何建萍, E-mail: janejphe@sues.edu.cn

分为常数,见文献^{[5]59}。根据流体力学及传热学原理,建立了超薄板微束等离子焊接熔池的二维模型。

如图1所示,描述了超薄板焊接熔池模型示意图。 x 轴为超薄板的宽度方向, y 轴为厚度方向。计算区域的中间是超薄板,这部分是计算区域的核心部分。

根据超薄板微束等离子弧焊接过程的实际情况,为简化计算,做如下假设:

- 1) 在焊接过程中,熔池和电弧关于焊接中心轴对称;
- 2) 熔池中液态金属为黏性连续不可压缩层流状态^[6];
- 3) 电弧的热源模型采用高斯热源模型;
- 4) 熔池的自由表面为平面,电流从薄板底部中心进入,熔池中液体所受的力主要为电磁力、浮力、表面张力以及电弧压力。

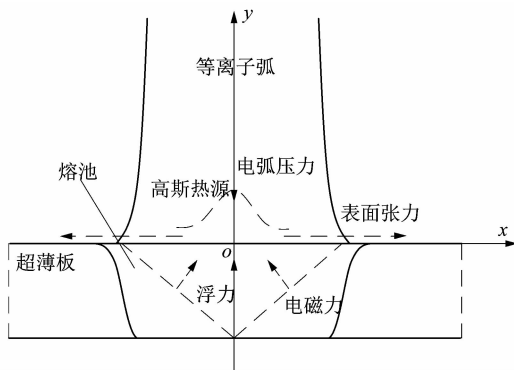


图1 超薄板焊接熔池示意图

Figure 1 Schematic of ultra-thin plate weld pool

1.1 控制方程

超薄板流体流动需要满足质量守恒、动量守恒以及能量守恒定律。在二维直角坐标系下,其分别表示为连续性方程(公式(1))、动量守恒方程(公式(2)和公式(3))、能量守恒方程(公式(4))。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = S_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = S_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \quad (3)$$

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + H. \quad (4)$$

式中: x, y 为求解域某点的坐标, u, v 分别为 x, y 方向的流体速度分量; ρ 为金属的密度; t 为时间; S_x, S_y 分别为体积力在 x, y 方向上的分量; p 为流体内的压力; μ 为液态金属的动力黏度系数; c 为比热容; T 为温度; λ 为导

热系数; H 为求解域内热源。

1.2 定解条件

假定热源作用于整个表面,工件受热熔化形成熔池,熔池内存在液态质点流动时所引起热传递;熔池与母材间固液金属的热传导;工件表面与周围介质的对流换热及辐射换热,其上表面和其他面的热边界条件分别如公式(5)和公式(6)所示:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\eta UI}{2\pi\sigma_j^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right) - h_c(T - T_0), \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = -h_c(T - T_0). \quad (6)$$

式中: η 为电弧功率有效系数; U 为电弧电压; I 为焊接电流; r 为径向距离; σ_j 为热流分布参数; h_c 为对流和辐射联合换热系数; T 为工件温度; T_0 为环境温度。

在熔池自由表面上,由于温度差的存在而产生的表面张力,与表面流体的剪切力相平衡,超薄板上表面和其他面的动量边界条件分别为公式(7)和公式(8)。

$$\mu \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (7)$$

$$u = v = 0. \quad (8)$$

式中 $\frac{\partial \gamma}{\partial T}$ 为表面张力温度系数。

将起弧时刻作为初始时刻,此时,超薄板处于室温下,内部不存在液体的流动,其初始条件为公式(9)和公式(10):

$$T = T_0, \quad (9)$$

$$u = v = 0. \quad (10)$$

1.3 熔池流体流动的作用力分析

在此研究中,超薄板微束等离子焊接熔池液态金属所受的作用力主要考虑了电磁力^[7,9-10](公式(11)和公式(12))、浮力^{[5]37}(公式(13))、表面张力^[8](公式(14))和电弧压力^[9-10](公式(15))。

$$F_x = -\frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 L r^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\right] \left(1 + \frac{y}{L}\right)^2, \quad (11)$$

$$F_y = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 L r^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\right]^2 \left(1 + \frac{y}{L}\right)^2, \quad (12)$$

$$F_s = \rho g \beta (T - T_1), \quad (13)$$

$$\gamma = \gamma_1 + \frac{\partial \gamma}{\partial T} (T - T_1) \quad (14)$$

$$p_{\text{arc}} = -\frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 \sigma_j^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right). \quad (15)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; L 为超薄板厚度; g 为重力加速度; β 为熔池液态金属体积膨胀系数; γ_1 为 T_1 时刻表面

张力系数; T_l 为熔池金属熔点时刻。

2 数值计算结果分析与讨论

2.1 温度场特征

焊接过程中,超薄板通过吸收等离子弧能量,表面温度急速升高,达到熔点后,固态金属熔化形成熔池。假设起弧后,等离子弧瞬间到达超薄板,超薄板的焊接熔池温度场分布如图2所示,温度场分布关于y轴对称,靠近热源处的温度高,然后向两端发散,温度分布呈阶梯状递减。

图2(a)所示,为超薄板加热0.026 s时的温度场分布,为了方便观察,将加热中心区域放大,此时,热源正下方区域温度刚刚到达1 727 K,超薄板熔化,但超薄板内部的传热方式仍主要为固体金属间的热传导。随着热源的不断加热,当加热时间到达0.028 s时,如图2(b)所示,熔池得到迅速增长,熔深已超过超薄板的一半,此时超薄板的传热方式除了固体金属的热传导,还存在着液态金属质点流动产生的热传递。在等离子弧的继续作用下,温度场温度持续升高,热影响区也在不断增大,当加热时间达到0.03 s时,超薄板熔透。

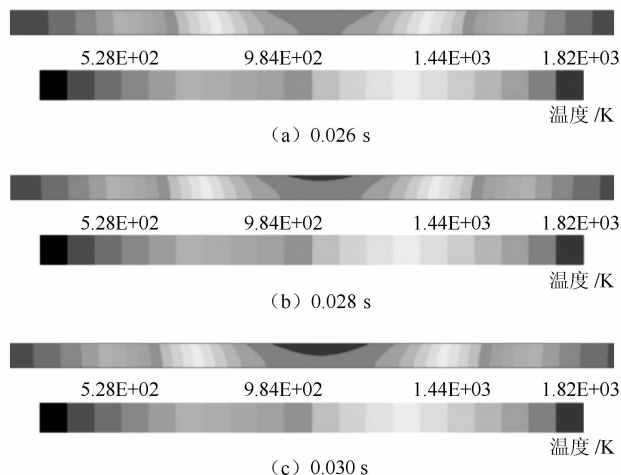


图2 焊接熔池的温度场

Figure 2 Temperature field of the welding pool

2.2 流场特征

在等离子弧的持续作用下,超薄板受热熔化形成熔池,熔化的液态金属在各种作用力的驱动下在熔池中流动,带动热量的传递。图3为超薄板焊接熔池形状及流场随时间的动态演变过程,为方便观察,流场图已放大至熔池区域。

如图3(a)所示,此时超薄板刚开始熔化,液态金属主要向熔池两边扩散。随着热量的增加,熔池的熔深及熔宽都不断增加,在图3(b)中,超薄板熔化至板中心左右,熔池内液态金属主要存在两个趋势的运动:

熔池上部中心向熔池边缘流动;熔池底部及四周向中心流动。当 $t=0.030$ s时,如图3(c),熔池已熔化至超薄板底部,可以发现熔池中液态金属的流动慢慢的形成了一个关于y轴对称的回路:以热源输入中心点为原点,液态金属向熔池边缘流动,到达熔池边缘后,沿着固液界面流向熔池底部,最后从熔池底部又回到了熔池表面,整个过程带动了热量的传递。

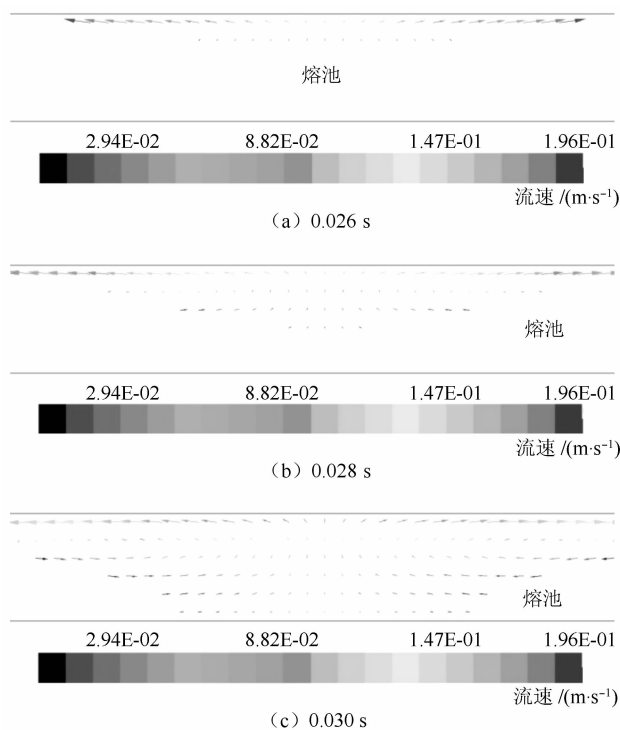


图3 焊接熔池形状及流场的动态演变过程

Figure 3 Dynamic evolution process of welding pool shape and flow field

2.3 各作用力对流场的影响

为了进一步探索几种作用力对熔池中液态金属流动的影响,本研究分别对表面张力、电磁力、浮力以及电弧压力作用下的熔池做了数值分析,如图4~7所示。

图4表示的是表面张力作用下超薄板焊接熔池的流场分布。熔池表面的温度分布不均,表面张力分布也不均匀,离热源中心越近,温度越高,表面张力越小,液态金属质点从表面张力小的区域流向表面张力大的区域。 $t=0.026$ s时,熔池开始熔化,液态金属在表面张力的作用下,在熔池表面向两边流动,如图4(a)所示。随着热量的增加,熔池增大,图4(c)中超薄板完全熔化,可以观察到熔池中形成了一个关于y轴对称的回路:到达熔池边缘的液态金属沿着固液界面向下,推动熔池底部金属向中心流动。此时,熔池中最大流速可达到0.195 m/s。同时,可以发现表面张力作用下的

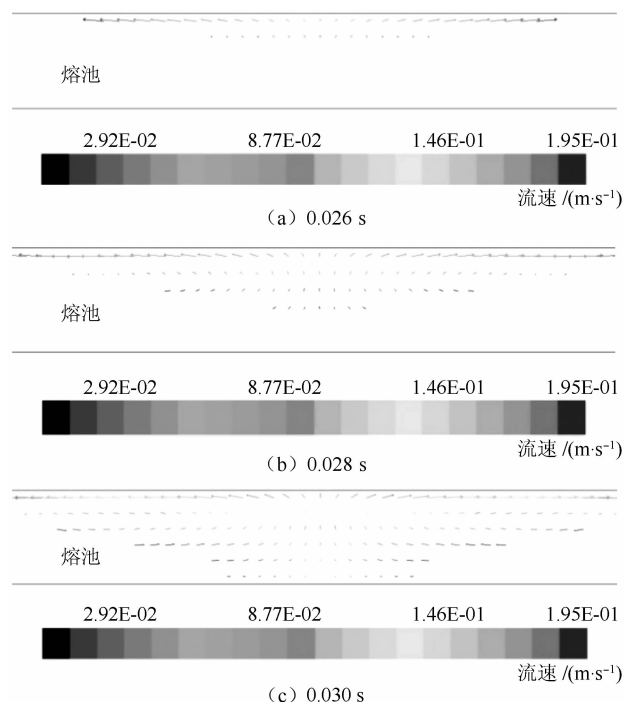


图4 表面张力作用下的流场

Figure 4 Flow field by effects of surface tension

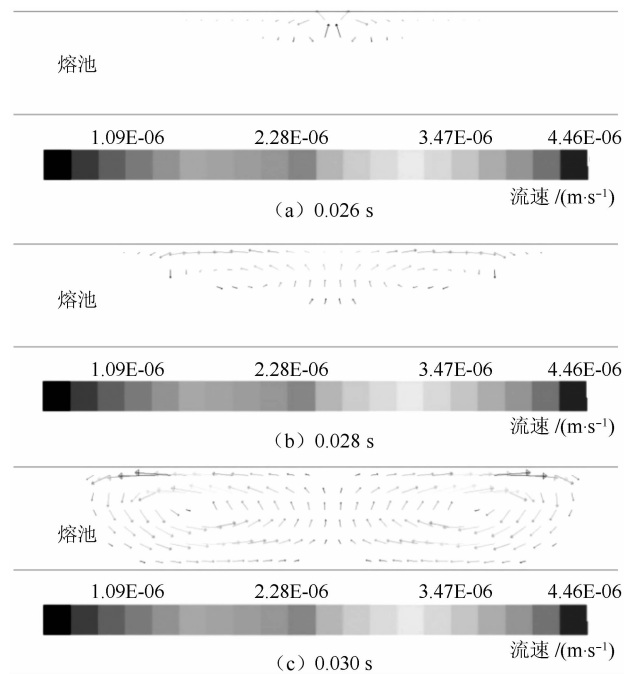


图5 电磁力作用下的流场

Figure 5 Flow field by effects of electromagnetic force
熔池动态过程跟合力共同作用下的熔池变化很接近,说明表面张力是熔池中液态金属流动的主要作用力。

图1中,电磁力的作用方向与电流方向垂直,在其作用下,熔化的液态金属向熔池中心聚集,在图5中,电磁力推动着熔池中的液态金属流向熔池中心,熔池

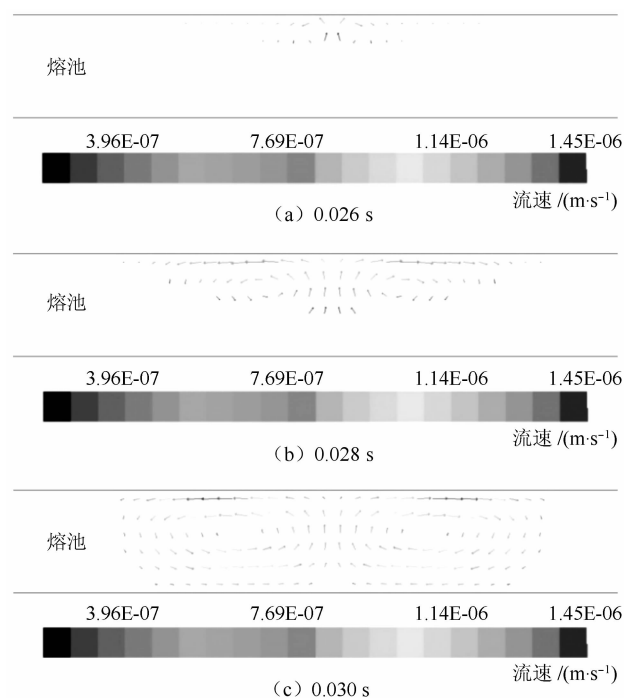


图6 浮力作用下的流场

Figure 6 Flow field by effects of buoyancy

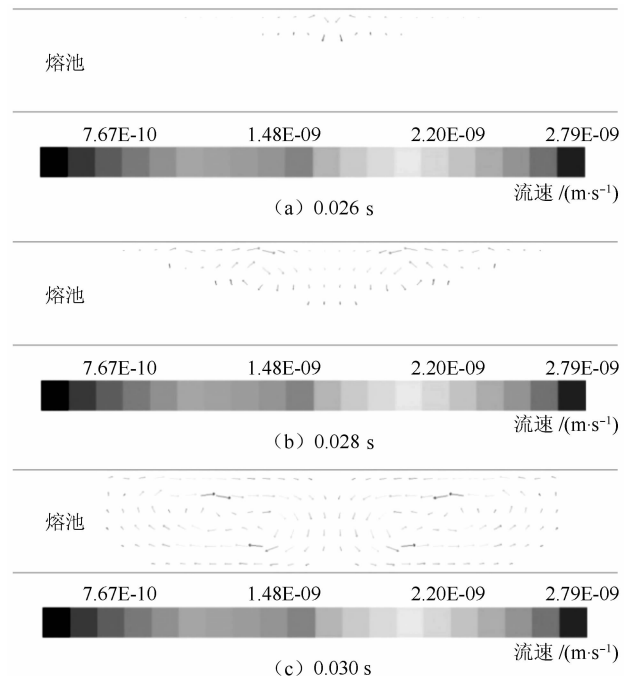


图7 电弧压力作用下的流场

Figure 7 Flow field by effects of arc pressure
中心的液态金属受到挤压,从熔池表面向两边流去。在图5(c)中,可以看到液态金属沿固液界面又返回到熔池底部,形成了一个回路。此时,液态金属最大流速为 $4.46 \times 10^{-6} \text{ m/s}$,作用方向与表面张力作用下的类似,但电磁力的推动作用要远远小于表面张力的作用。

熔池中温度分布不均匀,因此熔池中金属密度分布也不均匀,一般采用 Boussinesq 模型来处理非等温流动现象引起的热浮力^{[5]37}。图 6 为浮力作用下超薄板焊接熔池的流场:熔化的液态金属受到浮力的作用有向上运动的趋势,初始阶段如 6(a) 所示,此时液态金属的流速很小,随着熔池的不断增大,熔池底部的液态金属向上流动推动熔池表面的金属向两边流动,从而推动了整个熔池中液态金属的流动。浮力作用下熔池内部的液态金属流动方向与表面张力作用下的相似,但其最大流速只有 $1.44 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。

图 7 为电弧压力对超薄板焊接熔池中液态金属的流场影响。电弧压力的作用方向正好与浮力的相反,可以看到熔池中液态金属在电弧压力的推动下向下流动,到达熔池底部后沿着固液界面向上。微束等离子焊电流较小,受此影响,电弧压力非常小,当超薄板完全熔化后,最大流速只有 $2.59 \times 10^{-9} \text{ m/s}$,相比于其他作用力,其影响可忽略不计。

通过对图 4~7 中几种作用力对熔池流场的作用进行比较,可以看出:表面张力是熔池中的主要驱动力,电磁力和浮力次之,电弧压力对熔池中液态金属的流动影响非常小;表面张力、电磁力、浮力作用下的液态金属流动方向相似,与电弧压力下的流动方向相反。

3 结 语

1) 建立了二维超薄板微束等离子焊接熔池的数值模型,综合考虑了表面张力、电磁力和电弧压力影响,利用 FLUENT 软件求解出了熔池的温度场及流场随时间变化的动态过程。

(上接第 46 页)

3 结语

目前,国内外机械零件厂商在机械零件表面缺陷检测方面大部分还是人工检测方式,不能做到 100% 的缺陷检测正确率,人工检验易产生视觉疲劳,因此检测效率低、精度低,应用范围狭窄^[8-10]。本文把粒子群优化算法的加权模糊 C 均值聚类机械零件缺陷边缘智能检测算法应用于检测系统中,实现对机械零件表面 5 类瑕疵的检测。该算法实现了对瑕疵区域有效定位和对瑕疵类别的正确识别。由于采用了很好的图像分割和模式识别的方法,因此在瑕疵类型识别的成功率和定位精确性上相对普通方法具有更明显的优势。

参考文献:

[1] 陈廉清,崔治,王龙山. 基于差影和模板匹配的微小轴承表面缺陷检测[J]. 中国机械工程,2006,17(10):1019-1022.

2) 当 $t=0.026 \text{ s}$ 时,超薄板开始熔化,熔池中液态金属在各作用力的作用下开始流动;当 $t=0.030 \text{ s}$ 时,超薄板完全熔化,此时熔池中形成了关于 y 轴对称的流场回路。

3) 表面张力作用下的液态金属流动方向与电磁力、浮力作用下的流动方向相同,与电弧压力作用下的流动方向相反,且流速数值要远远大于其他几个作用力,结果表明表面张力是超薄板熔池内部液态金属流动的主要驱动力。

参考文献:

[1] 何建萍. 微束等离子焊小电流问题的研究[J]. 上海工程技术大学学报,1999,13(2):97-99.
[2] 王付鑫,何建萍,向锋. 微束等离子弧焊焊接不锈钢筛网的研究[J]. 金属铸锻焊技术,2010,39(1):128-133.
[3] 汤革新. 试论微束等离子弧焊接技术[J]. 特种设备安全技术,2006(3):49-50.
[4] 朱立奎. 基于 FLUENT 在焊接模拟中的应用[J]. 电焊机,2007,37(8):13-19.
[5] 张涛. PAW 焊接熔池-小孔流场与热场动态行为的数值分析[D]. 济南:山东大学,2011:37.
[6] WU C S, ZHAO P C, ZHANG Y M. Numerical simulation of transient 3-D surface deformation of a completely penetrated GTA weld pool[J]. Welding Journal, 2004, 83(12):330-335.
[7] 武传松. 焊接热过程与熔池形态[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
[8] 袁章福. 金属及合金的表面张力[M]. 北京:科学出版社,2006.
[9] ZHAO P C, WU C S, ZHANG Y M. Numerical simulation of the dynamic characteristics of weld pool geometry with step-changes of welding parameters[J]. Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering,2004, 12(5):765-780.
[10] LIN M L, EAGAR T W. Influence of arc pressure on weld pool geometry[J]. Welding Journal,1985,64(6):163-169.

[2] 张振祥,陈永清. 基于线阵 CCD 的轴承外圆表面缺陷检测[J]. 轻工机械,2010,28(4):70-72.
[3] 王岩松,金伟其,钟克洪. 随机纹理表面缺陷检测方法与应用[J]. 中国图象图形学报,2009,14(1):131-135.
[4] 刘青,张进华,黄军勤. 基于机器视觉的钢球表面缺陷检测和分类[J]. 轴承,2013(10):44-48.
[5] 朱敏琛,魏祯. 一种基于粒子群的模糊聚类图像分割算法[J]. 福州大学学报:自然科学版,2010,38(1):32-35.
[6] 颜学颖,焦李成. 一种结合粒子群算法和自适应加权窗的二维 Otsu 图像分割新方法[J]. 计算机科学,2013,40(3):295-298.
[7] 胡慧君,李元香,刘茂福,等. 基于机器学习的带钢表面缺陷分类方法研究[J]. 计算机工程与设计,2014,35(2):620-624.
[8] MARTÍNEZ S S, ORTEGA J G, GARCÍA J G, et al. A machine vision system for defect characterization on transparent parts with non-plane surfaces[J]. Machine Vision and Applications,2012,23(1):1-13.
[9] 孙伟,韩建海,赵书尚,等. 轴承内径尺寸机器视觉在线检测技术[J]. 河南科技大学学报:自然科学版,2007,28(5):10-12.
[10] 虞佳佳. 基于机器视觉的人体识别系统[J]. 轻工机械,2014,32(3):60-62.