DOI: 10.3901/JME.2019.17.029

数字图像相关法焊接热影响区应变原位测量及应力计算*

宋育林^{1,2} 白旭东^{1,2} 陈小奇^{1,2} 陈善本^{1,2} 陈华斌^{1,2}

(1. 上海交通大学材料科学与工程学院 上海 200240;

2. 上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室 上海 200240)

摘要: 提出了焊接热影响区全场高温应变在线测量及评价方法,设计了一种新型具有抗高温烧损、随机分布特征的散斑点阵。为解决焊接电弧强弧光干扰问题,采用脉冲激光辅助光源和近红外窄带滤光系统获取清晰焊缝热影响区散斑图像。针对焊接热影响区焊接变形复杂性,开发了基于二阶形函数与双三次插值的反向组合型 Gauss-Newton 算法,获得焊接热影响区全场高温应变场。建立多维应力、应变空间加载规律的弹塑性增量本构关系,定量求解焊接热影响区的残余应力分布。结果表明,所研制的焊接全场高温应变视觉测量系统,为焊接接头全场高温应变测量及可靠性评估提供了高效、准确的表征手段。

关键词: 焊接热影响区; 数字图像相关; 原位测量; 残余应力

中图分类号: TG404

Calculation and In-situ Measurement of HAZ Stress Based on Digital Image Correlation Method

SONG Yulin^{1,2} BAI Xudong^{1,2} CHEN Xiaoqi^{1,2} CHEN Shanben^{1,2} CHEN Huabin^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;

2. Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: An in-situ measurement and evaluation methods are proposed about the high temperature full field strain in the welding heated affected zone (HAZ). A novel speckle preparation method is developed. The random speckle pattern can survive at temperatures up the melt point of the base metal. A pulsed laser based auxiliary illumination and near infrared filtering system are utilized to suppress the intense welding arc and obtain the clear speckle pattern image in the HAZ during arc welding process. The inverse compositional Gauss-Newton algorithm with the second-order shape function and bi-cubic interpolation is developed for the welding deformation complexity in the HAZ. The incremental constitutive relations is built considering the multi-dimensional stress and strain space, and the full-field residual stress is calculated quantitatively in the HAZ. The results show that the digital image correlation (DIC) system setup can provide an effective and accurate characterization method for the full-field strain measurement and reliability assessment of the welded joint.

Key words: welding heated affect zone; digital image correlation; in-situ measurement; residual stress

0 前言

焊接是一个牵涉到传热传质、流体流动、电磁、熔化-凝固、组织演变、塑性变形等热、冶金和力多因素强耦合、非线性的复杂过程。因此,准确理解、描述焊接物理现象本质有助于优化工艺设计、控制

焊接质量、提高焊接效率^[1-3]。焊接过程中,由于工件经历高温移动热源局部加热、快速冷却,受周围冷金属约束产生焊接应力和变形,定量掌握焊接接头应力-应变演变规律对于前期工艺设计和提高产品焊接质量是至关重要的。目前,主要采用有限元计算焊接残余应力进行焊接结构评估,但是焊接残余应力的计算结果受材料应变硬化模型影响非常大。残余应力的测量通常有衍射法和应力释放法两种模式:应力释放法主要有盲孔法、深孔法和轮廓

* 国家自然科学基金资助项目(51575348)。20181201 收到初稿,20190426 收到修改稿

法等;衍射法主要有 X 射线衍射和中子衍射法,其思想是基于布拉格定律,计算衍射的晶面间距变化而测出弹性应变,但其受材料成分变化、组织结构变化的影响较大。随着光力学检测技术在学术界和工业界的不断发展及广泛应用,特别是激光技术、图像采集及处理技术的发展和改进,光力学试验技术的应用领域不断扩大,如云纹干涉法、激光散斑干涉法和数字图像相关法等。其中,数字图像相关法由于其简单的试验设置和非接触测量操作,已被广泛应用于科研和工程中的应变测量^[4-10]。

本文自主开发了数字图像相关法(Digital image correlation, DIC)视觉测量系统,设计了一种新型耐高温的随机散斑图像,解决了高温散斑图像焊接电弧强弧光干扰问题,获取了焊接热影响区全场高温应变。本文还首次通过 DIC 测量的应变定量求解焊接热影响区的残余应力分布。

1 数字图像相关法应变测量系统

1.1 高温散斑图制备

数字图像相关法进行表面测量,其表面必须具有变形随机灰度场,散斑图像的质量影响着数字图像相关法测量精度。焊接热影响区高温应变原位测量的散斑图像应具有特定属性:制备好的散斑在高温条件下不与材料表面发生滑移、脱落和变色,且应该保持随机性和各向同性。

首先在不考虑灰度变化的情况下,使用二值散斑图像从散斑尺寸、密度等对变形测量产生影响的因素对散斑制备算法进行评估^[8]。为未发生变形的参考图样设定四种位移,图样变形公式如下

$$\begin{cases} x'_k = x_k + u_0 + u_x \Delta x + u_y \Delta y \\ y'_k = y_k + v_0 + v_x \Delta x + v_y \Delta y \end{cases} \quad (1)$$

式中, (x_k, y_k) 、 (x'_k, y'_k) 分别为斑点中像素点位移前后的坐标, u_0 、 v_0 为中心点沿 X 轴、Y 轴方向发生的位移, u_x 、 v_x 、 u_y 、 v_y 分别为 X、Y 方向上的位移梯度, Δx 、 Δy 为散斑像素点距其中心的距离。设定的四种位移条件如表 1 所示。

表 1 随机散斑位移参数

试验序号	m_1	m_2	m_3	m_4
位移 u /像素	1.0	0.0	2.0	3.0
位移 v /像素	3.0	1.0	0.0	2.0

在保持其余参数一致条件下,不同散斑尺寸(3~26 像素)或密度(0.10~0.46)的散斑图分别产生对应表 1 中的变形,并分别计算测量得到的变形与

实际变形间的误差。从密度相同的散斑图中选取尺寸分别为 10、15、20、25 像素的散斑图用于展示,如图 1 所示,从尺寸相同的散斑图中选取密度分别为 0.1、0.2、0.3、0.4 的散斑图用于展示,如图 2 所示。

图 1 不同尺寸的散斑

图 2 不同密度的散斑

试验得到的应变测量误差随尺寸、密度的变化趋势分别如图 3、4 所示。数字图像相关法在匹配时要求区域间灰度分布存在差异性,散斑尺寸增大会使在同一区域内斑点数减小,甚至整个区域被同一个斑点占据,匹配特征极度减小导致错误匹配,故在一定范围内增大散斑尺寸会使误差增大(图 3);反之,由于散斑密度增大可增加区域内匹配特征,减小匹配误差,但在密度增加到一定程度后误差减小量趋于稳定(图 4)。

图 3 散斑尺寸误差对比

图4 散斑密度误差对比

基于上述研究的结果,可选取最佳尺寸与密度生成散斑图。同时为满足数字图像相关算法中对散斑图像随机、各向同性的要求,还对散斑生成算法的随机性与各向同性等方面进行改进。算法使用的随机散斑图样生成函数为

$$R(x, y) = \begin{cases} (x-r)^2 + (y-r)^2 \leq r^2 \\ |x-r| + |y-r| \leq r \quad x, y \in [0, 2r] \\ |x-r| + (y-r)^2 \leq r^2 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $R(x, y)$ 是散斑生成随机函数,算法中不断产生随机数,将随机数事先进行分类并依据其种类可以为斑点图样随机选择这 3 种不同图案, r 是散斑点尺寸(单位:像素)。本文采用一种新的耐高温制备法在不锈钢钢板表面制造随机散斑图,生成的随机散斑图如图 5 所示。

图5 高温散斑图制备

散斑生成算法避免了散斑点过于聚集或者大量重叠混杂的情况,99.9%的散斑互不接触,同时变形前后图像的随机分布斑点灰度保持一致。理论上,确保了生成的散斑点多样性以及高温下抗变形能力,满足焊接热影响区的表面变形和焊接应变子区种子点跟踪精度。

1.2 焊接应变原位测量试验系统

采用前述方法在 304 不锈钢表面进行高温散斑图制备,开发了数字图像相关焊接高温应变原位测量系统。

为了有效抑制焊接中强弧光干扰,获取近焊缝边缘的应变场散斑图像,采像系统引入了激光辅助光源进行照明,滤光系统选用近红外窄带滤光片滤除部分电弧光。散斑图像采集选用 CMOS 高速相机,最大帧数可达 125 帧/s,分辨率 1280 像素×1024

像素,通过 UNO 开发板实现 CMOS 相机、辅助光源同步触发,获取焊接热影响区高温散斑图。系统还使用红外相机获取焊接过程中热影响区温度场信息,试验系统示意图如图 6 所示。

图6 试验系统及热影响区散斑图

试验选用 304 不锈钢,焊接试板尺寸为 200 mm×70 mm×6 mm,坡口角度 90°,钝边尺寸 2 mm,采用钨极氩弧焊(Gas tungsten arc welding, GTAW)对接,焊接参数如表 2 所示。

表2 304 不锈钢 GTAW 焊接参数

参数	数值
焊接电流/A	170
送丝速度/(cm/min)	25
焊接速度/(cm/min)	180
根部间隙/mm	2

为准确获取温度场信息,事先在试验板上喷涂高温黑体漆,喷涂区域大小与散斑区域一致并与其相对称,黑体漆的辐射系数为 0.9。开展焊接工艺试验,在焊缝一侧通过 CMOS 相机实时获取焊缝热影响区散斑图像,对称另一侧通过红外摄像机测量热影响区温度场信息。焊接过程中 CMOS 相机拍摄到的热影响区高温散斑图像如图 6 所示。分别在热影响区中距离焊缝中心约 10 mm(P_1 点)、25mm(P_2 点)处提取红外相机拍摄得到的整个焊接过程中的温度变化信息如图 7 所示, P_1 点温度峰值约为 630 K。

图7 焊接温度曲线

2 焊接高温应变原位测量及表征

第 1 节中,通过自主研制的焊接应变原位测量

系统获取了 304 不锈钢 GTAW 焊接热影响区的全场散斑图, 接下来对获取的散斑图像采用数字图像相关方法进行处理。

首先, 把起弧前热影响区位置的散斑图像作为参考图像, 选取分析区域。考虑到焊接热影响区表面变形的复杂性, 文中选用二阶形函数^[11]描述子区的变形情况。

$$x' = x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Delta x^2 + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \Delta x \Delta y + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Delta y^2 \quad (3)$$

$$y' = y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \Delta x^2 + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \Delta x \Delta y + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \Delta y^2 \quad (4)$$

式中, u 、 v 是中心点在 x 和 y 方向上的位移, Δx 和 Δy 是坐标点 (x, y) 到参考子区中心点的距离, $\frac{\partial u}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial u}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial v}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial v}{\partial y}$ 为图像子区位移的一阶梯度, $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ 、 $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$ 、 $\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$ 、 $\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}$ 是图像子区位移的二阶梯度。

其次, 考虑到焊接过程中应变计算需要更高精度位移, 如 0.01 级别, 需要对图像进行灰度插值, 亚像素插值算法为双三次插值法^[12], 使得灰度值及其 1 阶、2 阶导数连续。本文采用了具有较高计算效率的反向组合型 Gauss-Newton(GN)匹配策略^[13], 反复迭代求解。反向组合算法是为了实现当前图像与参考图像的最优匹配, 即图像能够尽可能地对齐, 即使得式(5)最小

$$\sum_{x \in T} [I(W(x; p)) - T(x)]^2 \quad (5)$$

式中, $I(x)$ 是需要匹配的图像, $T(x)$ 是参考图像, x 为列矢量, $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)^T$ 为参数矢量, $W(x; p)$ 是在待匹配图像上与参考图像对应位置的重采样。反向组合的方法无须对参数矢量进行更新, 只须对 $W(x; p)$ 更新即可。为了比较变形前后图像子区灰度相似程度, 引入平方和相关函数^[13]作为搜索过程中的相关准则函数。

最后, 结合数字图像相关算法原理, 采用 C++ 自主开发了焊接热影响区应变分析程序, 能够实现对变形前参考图像, 变形后图像, 设置 ROI 区域和子区大小, 开始分析并计算总应变(热应变和机械应变), 结果如图 8 所示。

图 8 焊接热影响区高温应变表征

从图 8 中可以看出, 当电弧经过待测区域一焊接热影响区的高温散斑点保存完好, 可以清晰获取近焊缝区的应变。其中, 纵向应变沿焊缝方向, 横向应变垂直于焊缝。图 8 中间一列图展示了在焊接过程中电弧到达 ROI 区域时的应变场, 在沿焊缝方向上, 由于电弧刚到达区域受热膨胀向两侧挤压, 电弧未到达区域产生负向位移(应变), 电弧已经过区域产生正向位移(应变), 远离焊缝区域的应变小于近焊缝区。在垂直于焊缝方向上的位移是两种因素相加的结果: 第一, 电弧加热母材使其向焊缝两侧膨胀产生垂直于焊缝向外(正向)的位移, 第二, 熔池周围金属由于焊接时发生塑性变形, 冷却后向焊缝中心收缩, 将母材向焊缝方向拉伸, 产生垂直于焊缝向内(负向)的位移。综合以上两种因素, 当膨胀量大于收缩量时产生正向位移, 当收缩量大于膨胀量时产生负向位移, 远离焊缝区域的母材由于膨胀量小, 表现为负向位移; 电弧未到达区域, 由于已焊焊缝的收缩, 其产生负向位移(应变)。

3 焊接残余应力计算

图 8 是焊接热影响区的总应变云图, 包括焊接热应变和机械应变, 而机械应变又包含弹性和塑性应变。通常, 在获得不同温度下的热膨胀系数条件下, 焊接热应变计算相对简单。焊接过程中, 材料受到不均匀的温度场, 产生弹塑性应变, 其中引起塑性应变的原因与加热载荷有关。在弹塑性的状态下, 材料的应力应变关系是非线性的。在弹性区域中, 应力与应变关系遵从广义胡克定律; 在塑性区域中, 应变不仅与最终的应力状态有关, 而且还依赖于加载的历史。材料的弹性模量 E 、泊松比 μ 、膨胀系数 α 和屈服应力 σ_s 等与温度相关, 通过试验确定这些材料热物理性能常数^[10, 12], 试验所用不锈钢热物理性能参数如图 9 所示, 在不同温度下 304

不锈钢的屈服应力与塑性应变关系如图 10 所示。

图 9 304 不锈钢热物理性能参数

图 10 304 不锈钢屈服应力于塑性应变关系

热弹塑性问题的应力-应变增量关系，应该遵照当 $\bar{\sigma} \leq \sigma_s$ ($\bar{\sigma}$ 为等效应力， σ_s 为屈服应力) 时加载与卸载都是线性的；当 $\bar{\sigma} > \sigma_s$ 加载是非线性而卸载仍是线性的规律，进而对应变/应力进行跟踪分析并求解^[14]。

加载时热塑性区域中的应力-应变增量关系

$$d\sigma = D_{ep}(d\epsilon - d\epsilon_0) + d\sigma_0 \quad (6)$$

加载时热弹性区域中的应力-应变增量关系

$$d\sigma = D_e(d\epsilon - d\epsilon_0) \quad (7)$$

式中， $d\sigma$ 为总应力增量， D_e 为弹性刚度矩阵， D_{ep} 为弹塑性矩阵， $d\epsilon$ 为总应变增量， $d\epsilon_0$ 为温度引起的应变增量， $d\sigma_0$ 为温度引起的应力增量。其中 $D_{ep} = D_e - D_e$ ， D_p 为塑性矩阵。

$$D_p = \frac{D_e \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \right)^T D_e}{H'_T + \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \right)^T D_e \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma}} \quad (8)$$

式中， H'_T 物理意义是 T 温度下的屈服应力对等效塑性应变总量的偏导。考虑到等向强化材料米塞斯屈服准则对任何应力状态均成立，因此通过单轴试验热拉伸方法测定材料屈服应力-总应变曲线，可容易得出三维屈服应力-塑性应变关系。式(9)、(10)反映了由于温度变化 dT 引起的应变、应力增量。

$$d\epsilon_0 = \left(\alpha + \frac{dD_e^{-1}}{dT} \sigma \right) dT \quad (9)$$

$$d\sigma_0 = \frac{D_e \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \frac{\partial H}{\partial T} dT}{H'_T + \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \right)^T D_e \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma}} \quad (10)$$

在焊接残余应力计算过程中，有两个关键点：一个是应变空间的弹塑性本构关系应变增量斜率的确定，另一个是应力状态的判别。基于上述原则，文中开发了焊接复杂应力状态下的残余应力计算程序。

开展 304 不锈钢 GTAW 焊接试验，通过自主开发的视觉传感系统和 DIC 计算软件获取了热影响区的全场总应变，基于上述弹塑性增量本构关系和开发的焊接残余应力计算程序，计算图 8 中的 P_1 和 P_2 点焊接应力变化曲线，如图 11 所示，其中正值表示拉应力，负值表示压应力。

图 11 P_1 和 P_2 点焊接残余应力

从图 11 中可以看出，起弧后横向(垂直于焊缝)应力、纵向应力均迅速变为压应力，这是由于 P_1 、 P_2 点未在起弧处，起弧后电弧所在部分发生膨胀，将 P_1 、 P_2 所在处进行压缩，产生了压应力。在电弧经过前后 P_1 、 P_2 点的压应力状态短暂变为拉应力后又恢复至压应力。在焊缝冷却至室温过程中，横、纵向应力均缓慢变为拉应力直至稳定水平，横向应力在焊接过程中出现最大值，而纵向应力在逐渐冷却过程中出现最大值。 P_1 、 P_2 点的切应力在焊接过程中幅值较横、纵向应力小得多，在焊缝冷却至室温过程中趋于稳定。热影响区冷却至室温后， P_1 点

横向残余应力为 174 MPa, 纵向残余应力为 351 MPa, P_2 横向残余应力为 169 MPa, 纵向残余应力为 325 MPa, 两者残余应力差别不大。在整个焊接过程中, P_1 、 P_2 点的应力变化曲线反映出热影响区的应力状态变化较为复杂。

4 结 论

(1) 本文研制了焊接热影响区全场高温应变在线测量系统, 并开发了相应的应变计算软件。结果表明, 特殊制备的散斑, 具有多样性及高温下抗变形能力, 满足焊接应变子区种子点跟踪精度。

(2) 选用二阶形函数描述焊接热影响区子区的复杂变形情况, 通过双三次插值的反向组合型 GN 算法, 实现当前图像与参考图像的最优匹配, 并完成焊接热影响区全场高温应变的精确计算。

(3) 基于一般加载规律的多维增量理论的本构关系, 构建了热弹塑性问题的应力-应变增量加载规则, 开发了焊接残余应力计算程序。本文的研究结果对焊接关键结构焊缝全场应变演化机制和接头可靠性评估具有指导意义和参考价值。

参 考 文 献

- [1] DAVID S A, DEBROY T. Current issues and problems in welding science[J]. Science, 1992, 257, 497-502.
- [2] FENG Zhili. Processes and mechanisms of welding residual stress and distortion[M]. Sawston: Woodhead Publishing, 2005.
- [3] ZHANG W J, ZHANG Y M. Dynamic control of the GTAW process using a human welder response model[J]. Welding Journal, 2013, 92(5): 154s-166s.
- [4] WITHERS P, BHADSHIA H. Residual stress. Part 1—measurement techniques[J]. Materials Science and Technology, 2001, 17(4): 355-365.
- [5] MABE W R, KOLLER W J, HOLLOWAY A M, et al. Deep hole drill residual stress measurement technique experimental validation[J]. Materials Science Forum, 2006, 524-525: 549-554.
- [6] NEERAI T, GNAUPEL-HEROLD T, PRASK H J, et al. Residual stresses in girth welds of carbon steel pipes: Neutron diffraction analysis[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2011, 16(3): 249-253.
- [7] PAN Bing, QIAN Kemao, XIE Huimin, et al. Topical review, two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review[J]. Measurement Science & Technology, 2009, 20(6): 152-154.
- [8] 周凯荣. 基于数字图像相关法的焊接全场高温应变视觉表征方法[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
ZHOU Kairong. Research on full field high temperature strain visualization characterization of welding based on digital image correlation[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [9] DE STRYCKER M, LAVA P, VAN PAEPEGEM W, et al. Measuring welding deformations with the digital image correlation technique[J]. Welding Journal, 2011, 90(6): 107s-112s.
- [10] CHEN J, YU X, MILLER R G, FENG Z. In situ thermal strain and temperature measurement and modeling during arc welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2015, 20(3): 181-188.
- [11] SUTTON M A. Image correlation for shape, motion and deformation measurements[M]. New York: Springer Science, Business Media, 2009.
- [12] 周雪. 基于数字图像相关法的焊接高温应变在线测量及熔池图像分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
ZHOU Xue. Research on high temperature online strain measurement of welding based on digital image correlation and analysis of welding pool images[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [13] 高越. 三维数字图像相关法的关键技术及应用研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2014.
GAO Yue. Research on key technologies and applications of three-dimensional digital image correlation and analysis of welding pool images[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [14] 刘正兴. 计算固体力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2010.
LIU Zhengxing. Computational solid mechanics[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2010.

作者简介: 宋育林, 男, 1993 年出生。主要研究方向为焊接自动化与智能化技术。

E-mail: songyulin@sjtu.edu.cn

陈华斌(通信作者), 男, 1977 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为材料精密成型及智能制造。

E-mail: hbchen@sjtu.edu.cn