

基于 DIC 的镍基焊材焊接接头局部材料本构研究

彭 剑^{1,2}, 薛智超¹, 代 巧^{2,3}, 缪新婷^{1,2}, 刘雪东^{1,2}

(1. 常州大学 机械与轨道交通学院, 江苏 常州 213164)

(2. 江苏省绿色过程装备重点实验室, 江苏 常州 213164)

(3. 江苏理工学院 机械工程学院, 江苏 常州 213001)

摘 要: 通过显微组织分析、数字图像相关技术 (DIC) 试验以及硬度测试, 研究了 15CrMoR 母材与镍基焊材焊接接头各区域的局部力学性能。基于 DIC 方法获取了镍基焊材焊接接头拉伸过程的全场应变云纹, 发现焊缝区域应变较小且不均匀, 母材区域应变量大, 热影响区均匀过渡。在此基础上构建了焊接接头不同区域的局部应力-应变曲线, 并揭示了焊接接头局部力学性能参数的分布规律。由焊接接头显微组织的分析可知, 局部力学性能参数的分布与显微组织的分布存在密切联系。最后, 结合显微硬度与强度参量在焊接接头的分布规律, 构建了两者的关联方程, 便于镍基焊材焊接接头局部力学参数的估算。

关键词: 镍基焊材焊接接头; 数字图像相关技术; 局部应力应变曲线; 显微硬度

中图分类号: TG407

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)05-1667-07

焊接接头显微组织、硬度、强度等参量的不均匀性对整体的力学性能有着复杂的影响, 也对焊接构件的结构完整性造成影响^[1], 其中最薄弱区域的组织和性能决定了焊缝整体强度和塑性^[2]。强度不均匀分布还会导致焊接接头在受力变形的过程中产生应变局部化最终导致颈缩失效^[3]。传统的力学性能表征无法精确地描述焊接接头的局部力学性能, 因此有必要探索合适的方法来描述焊接接头的局部力学性能及其分布规律^[4-6]。数字图像相关技术 (DIC) 为探究局部不均匀的力学性能提供了有效的试验技术, 通过比较变形前后试件表面数字图像, 从而实现高精度变形测量, 并提供亚像素精度的全场位移和全场应变, 可实现微、纳米尺度的变形测量^[7,8]。DIC 首先被 Peters 和 Ranson^[9]在材料科学的研究中采用, 随后在应变局部化以及裂纹扩展方面得到应用^[10,11]。尤为注意的是 DIC 技术为焊接接头局部力学性能表征提供了有益的选择。Gao 等人^[5]采用了 DIC 方法对比了采用激光焊接和传统熔覆焊接获得的薄钛合金板焊接接头力学性能的差异, 为薄钛合金板焊接工艺的选用给出了建议。Leitão 等人^[12]利用 DIC 技术获取铝合金母材搅拌摩擦焊的横向焊缝拉伸的局部应变场, 并考虑局部应变数据和试样厚度变化, 计算了应力分布。Sun 等人^[13]通过数字图像相关技术, 获得纯钛 (TA2) 焊接接头母材、热影响区与焊缝区域的应力应变曲线, 并对力学性

能进行评价。Saranath 等人^[14]基于 DIC 技术对不同焊接工艺参数下的低碳钢焊接接头局部应力应变曲线进行表征, 得到不同微区力学性能分布规律。Peng 等人^[15]运用 DIC 技术对结构钢局部应力应变进行表征并外推得到局部的抗拉强度。由此可见, DIC 试验技术对非均质材料力学性能, 特别是焊接接头局部力学性能表征上具有良好的前景, 受到研究人员的关注。

石化行业常采用补焊^[16]对含缺陷结构进行焊接修复, 例如为了延长焦炭塔装置的服役寿命, 对 Cr-Mo 钢制焦炭塔装置裙座焊缝在服役过程中产生的裂纹, 采用镍基焊材进行补焊。为了保障焊接结构的完整性, 有必要研究镍基焊材焊接接头的局部力学性能, 并构建焊接接头不同区域的拉伸性能曲线。这里将通过显微组织分析、DIC 试验技术以及硬度分析方法, 研究 15CrMoR 母材与镍基焊材的焊接接头局部力学性能特征, 在此基础上构建强度参数与硬度的关联方法, 为镍基焊材焊接接头的分析与应用提供强度表征方法与数据支撑。

1 实 验

选用工程中焦炭塔装置材料 15CrMoR 作为母材, 采用镍基焊材 ENiCrMo-3, 通过手工电弧焊 (SMAW) 获得焊接接头实验材料。焊接前使用砂纸打磨清除板材表面污染物, 用无水乙醇清洗并吹干, 确保杂质不进入焊

收稿日期: 2021-07-09

基金项目: 国家自然科学基金 (52075050); 江苏省自然科学基金 (BK20201448); 江苏省研究生科研创新计划 (KYCX19-1759)

作者简介: 彭 剑, 男, 1987 年生, 博士, 副教授, 常州大学机械与轨道交通学院, 江苏 常州 213164, E-mail: joepengjian@163.com

接区域。如表 1，焊接采用平板对接的形式，采用 V 型坡口，开口角度为 35°，钝边为 2 mm，焊接方向与板材轧制方向垂直，焊道采用多层多道焊，焊接工艺与炼化工厂焦炭塔焊接工艺一致，其中，预热温度控制在 100℃，道间温度控制在 100~300℃，焊后不进行热处理，焊接结束后采用射线检测未发现焊接缺陷。

为了分析焊接接头各区域显微组织的差异，使用盐酸（HCl）和硝酸（HNO₃）按照体积比 3:1 配成的腐蚀液进行腐蚀，然后通过超景深光学显微镜（OM，VHX-700F）观察各区域的显微组织，并采用扫描电镜（SEM）观察组织形貌以及成分差异。

焊接接头拉伸试样尺寸为 60（标距）mm×14（宽度）mm×3（厚度）mm，单轴拉伸试验在 MTS880-100kN 伺服液压试验机上进行，试验采用位移速率（0.85 mm/min）控制。由于传统拉伸试验方法仅能获得焊接接头整体的拉伸性能曲线以及最弱区的强度参量，本实验依托 DIC 方法的优势^[17]实现焊接接头局部应变场测量。试验前对试样标距段进行散斑喷涂，在拉伸试验过程中，通过成像装置获取试样表面散斑图像，并采用基于 DIC 的 GOM 非接触应变测量系统结合散斑图像计算焊接接头的全场应变分布。试验开始前，移动测试系统摄像机，使其在拉伸试验过程中保持对待观察区域的覆盖。相机采集图像分辨率为 6000×4000 像素，DIC 计算所采用的小平面尺寸为 24 像素，点距设置为 12 像素，计算时亚像素采用双三次插补，最大交互偏差为 0.3 像素。基于 DIC 方法获取的焊接接头局部应变场云图如图 1 所示，由应变场云图可有效识别出焊缝区轮廓。

为了获得焊接接头的硬度分布规律并与强度参数进行关联，采用 HVS-1000 数显显微硬度仪对焊接接头进行维氏显微硬度测试，测试区域沿焊缝中心向两侧展开，每测点间隔 0.2 mm，测试范围包含母材、热影响区以及焊缝区。

2 结果与讨论

2.1 镍基焊材焊接接头显微组织分析

由于镍基焊材焊接接头受到焊接热循环的影响，各部分的金相显微组织存在较大差异，图 2a 将此焊接接头分为母材区、热影响区（粗晶区、细晶区）与焊缝，图 2b~2e 分别给出了各区域的显微组织。图 2b 为 15CrMoR 母材区（BM），以铁素体与珠光体组织为主，其中较亮的为铁素体，较暗的为珠光体。图 2c 为由细小珠光体与铁素体晶粒组成的细晶热影响区（FGHAZ）组织，该区域组织相当于热处理后的正火处理，在铁素体与珠光体转变为奥氏体后，受到加热温度范围的影响，奥氏体晶粒尚未长大，冷却后形成了如图 2c 所示的均匀而细小的铁素体和珠光体。由于晶粒细化的作用，该区域的力学性能将优于母材。图 2d 为粗晶热影响区（CGHAZ），该区域为过热区，由于加热温度高，在固相线附近，奥氏体严重长大，冷却后形成粗大组织，图中粗大晶粒为残余奥氏体、贝氏体组织与少量低碳马氏体，部分过热区域由于冷却速度慢，在晶界形成的黑色网团状屈氏体。该区域粗大的组织将导致材料的塑性与韧性降低。图 2e 给出的焊缝区域（WM）显微组织主要为枝晶，枝晶的取向、间距和形态因所在位置（即温度梯度）和化学成

表 1 焊接参数及射线检测结果

Table 1 Welding parameters and radiographic test results

Welding method	Joint type	Voltage/V	Current/A	Welding speed/mm s ⁻¹	Inspection method	Test standard	Grade
SMAW	Butt joint	20~25	100~160	1~2	Radiological examination	NB/T 47013-2015	I

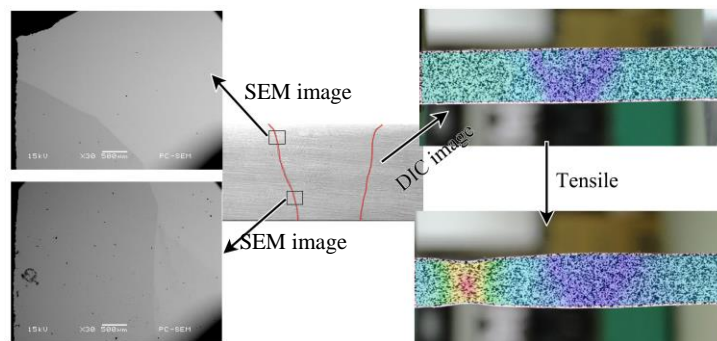


图 1 基于 DIC 的焊接接头局部应变场测量

Fig.1 Local strain field measurement for welding joint based on DIC

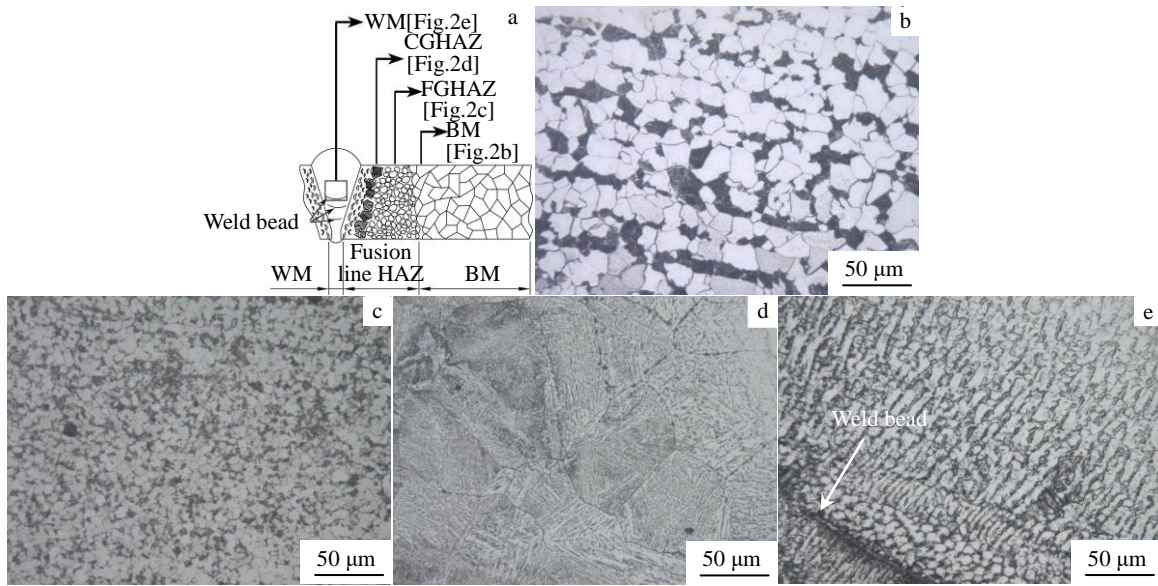


图 2 焊接接头金相显微组织

Fig.2 Microstructures of welding joint: (a) metallographic distribution, (b) base metal zone, (c) fine grain zone, (d) coarse grain zone, and (e) welding zone

分而异^[18,19]。靠近母材的熔合区由于熔池与固相界面温度梯度较小，微观结构主要是胞状枝晶，随着温度梯度减小，胞状枝晶向内延伸形成柱状枝晶，当温度梯度进一步降低时，在靠近焊缝中心的位置被柱状和等轴枝晶结构的组合所取代。如图 2e，在焊接冷却过程中，焊缝以熔合线上局部半熔化的晶粒为核心向内生长，生长方向为散热最快方向，随后长成方向性很强的柱状晶，焊道附近为等轴晶。等轴晶的形成是由于后一层焊缝相对前一层焊缝进行加热，使其发生相变再结晶，从而柱状晶消失，形成细小的等轴晶。通过测量枝晶臂间距，发现枝晶臂间距存在较大差距，靠近焊道附近的枝晶臂间距平均 4.1 μm，在焊缝中心以上位置存在枝晶臂间距平均 12.3 μm，因此，在焊道附近的晶粒存在晶粒细化现象。

焊缝处枝晶结构的不同与 Nb/Mo 浓度分布存在关

系。图 3 给出了焊缝内微观组织的 SEM-EDS 元素 Nb 面扫描。在枝晶间区域，观察到第二相成分，通过 EDS 分析，显示为 Nb 与 Mo 的富集。枝晶间相被认为是由枝晶间 Nb 溶质在枝晶生长过程中形成^[20]。熔合区至焊缝枝晶结构的变化可归因于 Nb/Mo 浓度分布的改变。通过能谱分析 (EDS) 的计算，熔合线附近 Nb/Mo 含量较低，远离熔合线的区域 Nb/Mo 含量较高。研究人员发现^[21,22]，增加焊缝金属的 Nb/Mo 含量会导致枝晶臂间距变密，二次枝晶臂加长，微观结构从胞状变为柱状和等轴枝晶结构的组合。如图 3，在靠近熔合线的区域，析出物呈团状。随着熔合区 Nb/Mo 含量的增加，析出物的形状变得更加不规则。第二相析出的程度也随 Nb/Mo 含量的增加而增大。Terjesen^[23]研究发现更密集的枝晶臂间距可提高屈服强度，而 Samuel 等人^[24]指出合金元素和枝晶臂间距

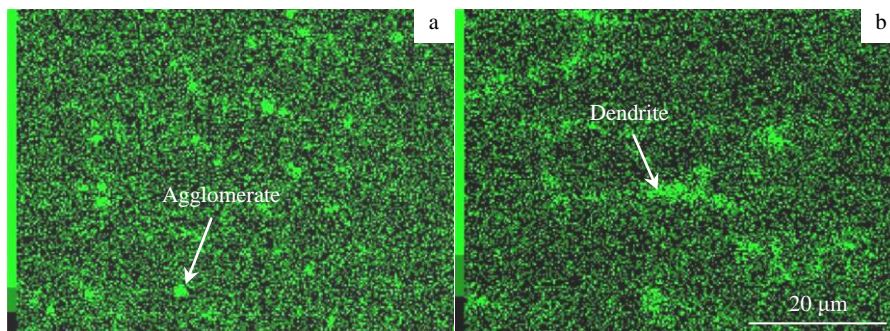


图 3 焊缝区 Nb 元素 EDS 面扫描

Fig.3 EDS mapping of element Nb of welding zone: (a) Nb solute precipitates in the form of agglomerate and (b) Nb solute precipitates in the form of dendrite

对 Al-Si-Cu-Mg-Fe-Mn (380) 铝合金压铸组织和硬度产生显著影响。因此，由于 Nb/Mo 含量的离散性导致二次枝晶臂间距不同，使焊缝同时存在密集的网络状二次枝晶组织与缺少二次枝晶组织的粗大柱状枝晶，这将引起焊缝处力学性能出现离散性。基于焊接接头显微组织的分析可以发现：从母材、热影响区至焊缝的显微组织存在差异，这将引起焊接接头各区域力学性能产生区别，因此需对母材、细晶区、粗晶区以及焊缝进行局部力学性能研究。

2.2 基于 DIC 的镍基焊材焊接接头局部应力应变曲线

2.2.1 基于 DIC 的焊接接头应变场分布

采用引伸计方法可获得焊接接头室温单轴应力应变曲线，在标距段长度 60 mm 下，焊接接头弹性模量为 85156.9 MPa，屈服强度为 373.42 MPa，抗拉强度为 653 MPa，断后延伸率为 25.3%。采用传统方法得到的焊接接头拉伸力学参数涵盖了母材、热影响区、焊材的综合力学性能，无法表征不同区域的差异。为了获取焊接接头局部应力应变曲线，这里采用 DIC 方法测量焊接接头的全场应变分布如图 4。

图 4a 给出了不同加载位移下焊接接头应变场分布云图，在各载荷作用下应变主要集中于母材区域，焊接接头的应变量较小，在热影响区较均匀过渡。随着载荷的增加，缩颈发生在母材，随后应变变化主要集中于缩颈区域。值得注意的是在焊缝区域应变场存在不均匀性，不均匀性产生的原因包括多个方面：(1) 根据图 2e 焊缝区域显微组织的分析可知，焊缝处枝晶的取向、间距和形态因所在位置而异，焊缝显微组织的差异会造成力学性能的不均匀；(2) 根据图 3 Nb 元素 EDS 面扫描分析可知，Nb 浓度和枝晶结构在焊缝区域存在不均匀，焊缝处化学成分和枝晶结构的差异也会导致力学性能产生离散性；(3) 在拉伸过程中焊缝区表面易产生褶皱不平，褶皱不平区域会出现几何不连续而产生的变

形协调现象，这也可影响应变场的均匀性。图 4b 从定量的角度给出了在不同加载位移下应变在焊接接头上表面的分布曲线，可发现：随着载荷增加，焊缝区域应变变化量小，母材区域变化显著，在热影响区与母材过渡位置，应变量迅速变化；在缩颈前母材区域应变基本一致，而焊缝区域在各载荷下均存在应变的波动。选取图 4a 中母材缩颈点 A、母材非缩颈点 B、热影响区点 C 和焊缝点 D，获取各特征点应变随载荷变化曲线如图 4c。可发现：母材点 A 与 B 的应变量随着加载位移的增加速度显著高于热影响区和焊材；并且随着载荷位移增加，应变基本呈线性增长；在颈缩发生之后颈缩点处的应变呈现指数升高。

2.2.2 镍基焊材焊接接头局部应力应变曲线

局部应力由实时载荷和瞬时截面积确定^[15]，可表示为：

$$\sigma^i = \frac{F}{A^i} \quad (1)$$

$$A^i = A_0^i \exp(-\varepsilon^i) \quad (2)$$

其中， A_0^i 是初始横截面积， A^i 是局部的瞬时横截面积， ε^i 是局部应变， σ^i 是局部应力， F 为实时载荷。上述理论基于金属体积不变假设，因此适用于材料颈缩前。金属颈缩后应力三轴度迅速增加，截面扭曲，金属体积不变假设无效^[25-28]，局部应力式 (1) 和 (2) 不能用于颈缩后的应力应变关系描述。

结合 DIC 局部应变与局部应力，可构建焊接接头、热影响区以及母材的局部应力应变曲线，如图 5 所示，距焊缝中心距离 ± 7.2 mm 为焊缝区，超出 ± 12 mm 为母材区，两者之间为热影响区。由真应力等值线可看出焊缝区域的应力-应变曲线与母材区域的应力-应变曲线存在明显差异。母材区域断裂位置附近的应力-应变响应较为完整，焊缝区域应力-应变曲线仅包含有限的应变范围。这是由于焊缝区域强度较高，在拉伸过程中未发生颈缩和断裂现象，因此焊缝得到的局部应力-应变曲线不完整。

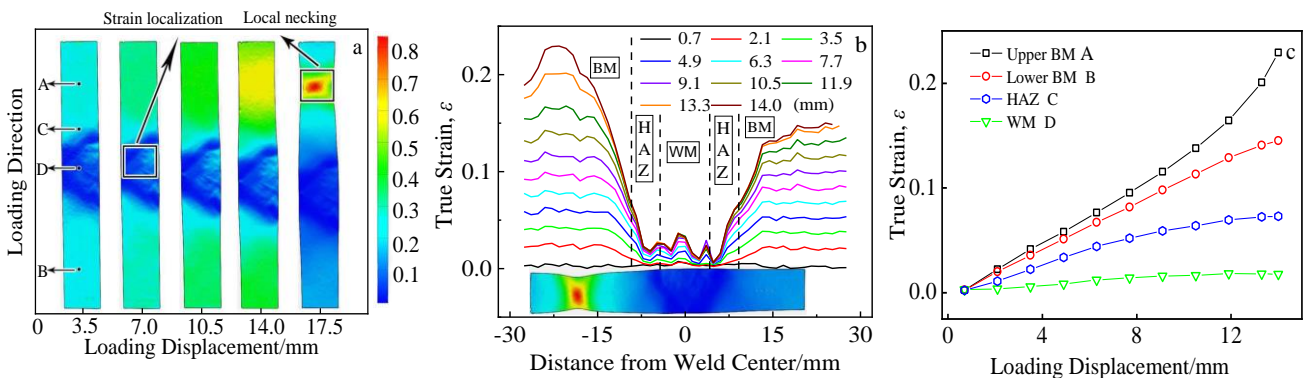


图 4 基于 DIC 获得的焊缝、母材与热影响区的局部应变结果

Fig.4 Local strain results of welding zone, base metal and HAZ obtained by DIC: (a) strain field distribution nephogram; (b) quantitative strain distribution curve; (c) true strain-loading displacement curves at each region

基于局部应力-应变曲线可得到焊接接头各区域拉伸力学性能参数，其中弹性模量、屈服强度、试样断裂时的应变由试验结果获得，而应变硬化指数和抗拉强度由 Hollomon 模型计算。图 6 给出了屈服强度的分布规律：焊缝屈服强度最大，热影响区次之，则母材最小，这种变化规律与图 4 中局部应变的变化规律相反；并且焊缝区域的屈服强度存在明显的波动，最低值为 441 MPa，最高值为 535 MPa，可由图 2e 焊缝处枝晶结构的差异与图 3 的 Nb 浓度分布进行解释。

由图 5 可知除缩颈位置，其他区域的局部应力应变曲线不完整。为了构建完整的应力应变曲线，采用外推方法构建各区域的应力应变曲线。基于 Hollomon 模型对局部应力应变曲线进行表征，如式 (3)：

$$\sigma = k\varepsilon^n = \sigma_0 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^n \tag{3}$$

其中， σ_0 是线弹性极限， ε_0 是对应于线弹性极限的应变， n 是应变硬化指数。采用式 (3) 对局部应力-应变曲线进行数据拟合得到各区域应变硬化指数，该指数由母材至焊缝递减。根据 Considère 准则，抗拉强度 σ_t 可由应

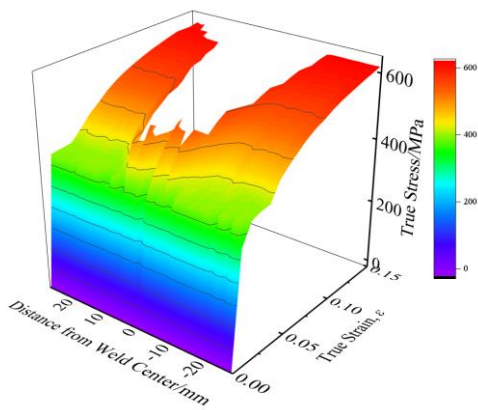


图 5 焊缝各区域的局部应力-应变曲线

Fig.5 Local stress-strain curves at different welding areas

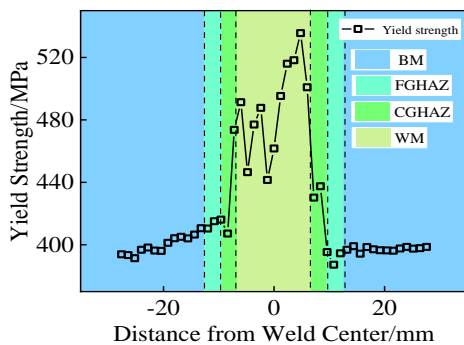


图 6 焊接接头屈服强度分布

Fig.6 Yield strength distribution of welded joint

变值等于应变硬化指数时的应力^[15]估算，因此抗拉强度 σ_t 可表示为：

$$\sigma_t = K(\varepsilon_t)^n = Kn^n \tag{4}$$

通过式 (3) 对拉伸应力-应变曲线进行外推，根据式 (4) 抗拉强度作为曲线终止点，即可绘制出焊接接头不同区域的完整应力-应变曲线，如图 7 所示。图中给出缩颈点附近母材的应力-应变曲线，基于 Considère 准则与 Hollomon 模型预测得到的局部应力-应变曲线与 DIC 试验曲线相吻合。通过对比不同区域完整应力-应变曲线可知：焊缝完整的应力-应变曲线与母材以及热影响区均存在显著差异；细晶热影响区的力学性能与母材基本接近，粗晶热影响区的力学性能介于母材与焊缝之间。

2.3 镍基焊材焊接接头硬度分布以及与强度的关联

与局部应力-应变曲线相比，更容易获得硬度参数在焊缝区域的分布规律^[29]。图 8 给出了焊接接头维氏显微硬度值分布情况。维氏硬度由母材至焊缝呈递增发展，其中细晶区与焊缝位置的硬度呈现阶梯式提升，硬度最高值出现在焊缝金属位置，并且在焊缝区域硬度出现较大的波动。

同时图 8 对比了焊接接头硬度分布与屈服强度分布规律，发现两者正相关，因此可将硬度与强度参量进行关联。已有研究表明硬度值与屈服强度和抗拉强度存在密切的相关性，研究人员提出了相应的经验方程^[30,31]，实现通过硬度数据估算强度参量。Cahoon^[30]提出了通过硬度与应变硬化指数表征屈服强度的经验方程，即式 (5)，其中 A 与 B 是通过数据拟合得到的材料常数。

$$\sigma_y = \left(\frac{H}{A}\right)(B)^n \tag{5}$$

Pavlina 等人^[31]对非奥氏体亚共析钢进行分析得到硬度与屈服强度关联方程，即式 (6)，其中 C 与 D 可通过数据拟合确定。

$$\sigma_y = CH_v + D \tag{6}$$

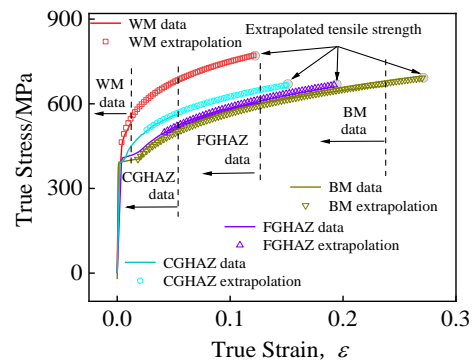


图 7 外推完整应力-应变曲线

Fig.7 Extrapolated complete stress-strain curves

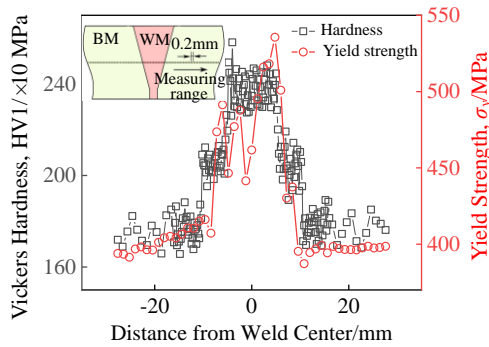


图 8 焊接接头硬度与屈服强度分布规律

Fig.8 Distributions of hardness and yield strength of welding joint

由图 8 可知，镍基焊材焊接接头硬度和屈服强度线性相关，因此可采用 Pavlina 等人^[31]提出的式(6)进行关联得到 $C=1.38, D=159.74$ 。图 9a 利用此方程对母材至焊缝的屈服强度进行表征并与 DIC 结果进行对比，发现吻合得较好。

硬度与抗拉强度同样存在相关性，Cahoon^[32]根据式(4)结合 Tabor^[33]经验式提出相关应变硬化指数的关联式(7)：

$$\sigma_T = \left(\frac{H}{A}\right)\left(\frac{n}{B}\right)^n \quad (7)$$

Pavlina^[31]采用线性方法关联硬度与抗拉强度，即：

$$\sigma_T = D + CH_v \quad (8)$$

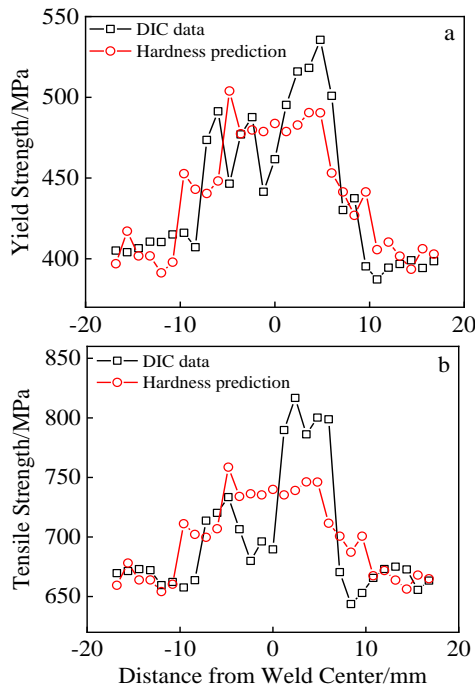


图 9 硬度估算结果与 DIC 数据对比

Fig.9 Comparison of data predicted by hardness with DIC data:

(a) yield strength and (b) tensile strength

Lu 等人^[34]采用该方程实现了 TC4-DT 合金及其电子束焊接接头硬度与抗拉强度的关联。同时抗拉强度与硬度的关联方程应用于 GB/T1172-1999 标准中。根据 DIC 结果外推得到的抗拉强度与硬度值进行关联，将母材与焊缝区域利用式(8)进行线性回归分析，得到 $C=1.28, D=439.4$ ，图 9b 对抗拉强度与 DIC 外推结果进行对比，在焊缝区域存在一定误差，在母材区关联性较好。

3 结论

1) 对镍基焊材焊接接头的显微组织分析发现，母材、细晶和粗晶热影响区以及焊缝的显微组织与化学成分存在显著差异；焊缝区枝晶组织在焊道附近由柱状晶发展为等轴晶，部分组织晶粒细化，同时柱状晶的二次枝晶组织生长不均衡，并与 Nb 相的析出存在关联；而焊接接头显微组织与化学成分的局部化将引起力学性能的局部化。

2) 基于 DIC 得到镍基焊材焊接接头的全场应变云图，并构建了焊接接头局部应力-应变曲线；基于不同区域的屈服强度可知，屈服强度由母材至焊缝递增，在焊缝位置存在一定离散性；通过 Considère 准则外推得到镍基焊材焊接接头各区域的抗拉强度与完整的应力-应变曲线。

3) 镍基焊材焊接接头的硬度由母材至焊缝递增，将硬度与屈服强度以及抗拉强度关联，得到镍基焊材焊接接头硬度与屈服强度和抗拉强度的关联方程。

参考文献 References

[1] Wang Zhicheng(王志成), Qiao Jisen(乔及森), Chen Jianhong(陈剑虹) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2009, 30(1): 21

[2] Simar A, Bréchet Y, De Meester B et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 486(1-2): 85

[3] Qiao Jisen(乔及森), Chen Jianhong(陈剑虹), Zhu Liang(朱亮). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(S): 196

[4] Chen Hongsheng(陈洪胜), Wang Wenxian(王文先), Nie Huihui(聂慧慧) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(2): 392

[5] Gao X L, Zhang L J, Liu J et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 559: 14

[6] Ning J, Zhang L J, Yang J et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2019, 270: 168

[7] McCormick N, Lord J. *Materials Today*[J], 2010, 13(12): 52

[8] Pan B, Qian K, Xie H et al. *Measurement Science & Technology*[J], 2009, 20(6): 152

[9] Peters W H, Ranson W F. *Optical Engineering*[J], 1982, 21(3): 427

- [10] Eskandari M, Zareihanzaki A, Yadegari M *et al. Optics and Lasers in Engineering*[J], 2014, 54: 79
- [11] Fagerholt E, Borvik T, Hopperstad O S. *Optics and Lasers in Engineering*[J], 2013, 51(3): 299
- [12] Leit ão C, Galv ão I, Leal R M *et al. Materials & Design*[J], 2012, 33: 69
- [13] Sun P Y, Zhu Z K, Su C Y *et al. Optics and Lasers in Engineering*[J], 2019, 115: 161
- [14] Saranath K M, Sharma A, Ramji M. *Optics & Lasers in Engineering*[J], 2014, 63(4): 30
- [15] Peng Y, Wu C, Gan J *et al. Construction and Building Materials*[J], 2018, 171: 485
- [16] Jiang W C, Wang B Y, Gong J M *et al. Materials & Design*[J], 2011, 32(5): 2851
- [17] Lockwood W D, Tomaz B, Reynolds A P. *Materials Science and Engineering A*[J], 2002, 323(1-2): 348
- [18] Yuan T, Luo Z, Kou S. *Acta Materialia*[J], 2016, 116: 166
- [19] Berkdemir A, Guenduez M. *Applied Physics A*[J], 2009, 96(4): 873
- [20] Shariatpanahi A M, Farhangi H. *Advanced Materials Research*[J], 2010, 83-86: 449
- [21] Lee H, Jeng S, Kuo T Y *et al. Metallurgical and Materials Transactions A-physical Metallurgy and Materials Science*[J], 2003, 34(5): 1097
- [22] Xu Z, Dian Z L, Yi Y L *et al. Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*[J], 2016, 29(10): 928
- [23] Terjesen G. *Aluminium*[J], 2003, 79(9): 748
- [24] Samuel A M, Samuel F H. *Journal of Materials Science*[J], 1995, 30(7): 1698
- [25] Ling Y. *AMP Journal of technology*[J], 1996, 5(1): 37
- [26] Jia L J, Kuwamura H. *Journal of Structural Engineering*[J], 2014, 140(5): 472
- [27] Jia L, Ge H, Shinohara K *et al. Journal of Bridge Engineering*[J], 2016, 21(5): 04 016 008
- [28] Jia L J, Ikai T, Shinohara K *et al. Construction and Building Materials*[J], 2016, 112: 69
- [29] Luo Hailong(罗海龙), Zhang Min(张 敏), Mu Erlong(慕二龙) *et al. Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2019, 40(1): 147
- [30] Cahoon J R, Broughton W H, Kutzak A R. *Metallurgical Transactions*[J], 1971, 2(7): 1979
- [31] Pavlina E J, Tyne C J V. *Journal of Materials Engineering & Performance*[J], 2008, 17(6): 888
- [32] Cahoon J R. *Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 1972, 3(11): 3040
- [33] Tabor D. *The Journal of the Institute of Metals*[J], 1951, 79: 1
- [34] Lu W, Shi Y, Li X, *et al. Journal of Materials Engineering & Performance*[J], 2013, 22(6): 1694

Research on Local Material Constitutive Model of Nickel-based Welding Joint Based on Digital Image Correlation

Peng Jian^{1,2}, Xue Zhichao¹, Dai Qiao^{2,3}, Miao Xinting^{1,2}, Liu Xuedong^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

(2. Jiangsu Key Laboratory of Green Process Equipment, Changzhou 213164, China)

(3. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract: The local mechanical properties of the welding joint for 15CrMoR base metal and nickel based welding metal were studied by microstructure analysis, digital image correlation (DIC) test and hardness test. Based on DIC method, the whole field strain nephogram was obtained for the welding joint of nickel based welding metal during tensile process. It was found that the strain in the welding area is small and inhomogeneous, but it is large in base metal area, while it is uniformly varied in the heat affected zone. Then, the local stress-strain curves of different regions for the welding joint were constructed, and the distribution of local mechanical properties parameters in the welding joint was revealed. Based on the microstructure analysis of welding joint, the distribution of local mechanical properties parameters is closely correlated to the distribution of microstructure. Finally, combining the distributions of microhardness and strength parameters in the welding joint, the correlation equations of them were established, which were convenient to estimate the local mechanical parameters for the welding joint of nickel based welding metal.

Key words: welding joint of nickel based welding metal; digital image correlation technology; local stress-strain curve; microhardness

Corresponding author: Peng Jian, Ph. D., Associate Professor, School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213164, P. R. China, E-mail: joepengjian@163.com