

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107730

含夹渣缺陷 Q245R 钢的声发射特性和 DIC 研究*

杜永刚¹ 周伟¹ 刘翔¹ 刘亚萍² 刘佳¹ 马连华¹

(1. 河北大学 质量技术监督学院 保定 071002; 2. 河北省特种设备监督检验研究院保定分院 保定 071002)

摘要: 焊接缺陷对钢焊接结构的工作运行会造成严重损伤。为了研究弯曲载荷下焊接缺陷对 Q245R 钢损伤演化的影响,分别对无缺陷和含夹渣缺陷的 Q245R 钢试件进行弯曲实验,并利用声发射技术和数字图像相关方法进行实时监测。结果表明:与无缺陷试件相比,含夹渣缺陷试件的声发射信号幅度、累计撞击数和能量等特征参数都有大幅度增高,含夹渣缺陷试件的幅度和能量分别高达 80.5 dB 和 231.2 mV·ms。在 3.3 kN 载荷下,含夹渣缺陷试件的最大位移比无缺陷试件提高约 21.093 mm。实验结果可以为钢焊接结构健康监测提供参考。

关键词: Q245R 钢;焊接;夹渣;声发射技术;数字图像相关

中图分类号: TG406 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4

Acoustic emission characteristics and digital image correlation of steel Q245R with slag inclusion defect

Du Yonggang¹ Zhou Wei¹ Liu Shuo¹ Liu Yaping² Liu Jia¹ Ma Lianhua¹

(1. School of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China;

2. Baoding Branch of Hebei Special Equipment Supervision and Inspection Institute, Baoding 071002, China)

Abstract: Welding defects can cause serious damage to the working operation of the steel welded structure. In order to study the influence of welding defects on the damage evolution of Q245R steel under bending load, bending experiments were carried out on Q245R steel specimens without defects and slag inclusion defects, and real-time monitoring was carried out using acoustic emission technology and digital image correlation methods. The results show that compared with the non-defect specimens, the characteristic parameters of the acoustic emission signal amplitude, the cumulative number of impacts and the energy of the slag inclusion specimens are greatly increased, and the amplitude and energy of the slag inclusion specimen are as high as 80.5 dB and 231.2 mV·ms, respectively. Under a load of 3.3 kN, the maximum displacement field of the slag inclusion specimen is increased by 21.093 mm. The experimental results can provide a reference for the health monitoring of steel welded structures.

Keywords: Q245R steel; welding; slag; acoustic emission technology; digital image correlation

0 引言

随着钢铁行业的发展,钢结构被广泛应用于生活中的各行各业^[1]。焊接是钢结构实际应用中常见的加工工艺方法^[2]。但是,由于焊接技术存在局限性,无论是机械焊接还是手工焊接,都会在焊接过程中产生裂纹、气孔、夹渣和未焊透等焊接缺陷^[3]。如果焊接缺陷在钢结构工作过程中不能被及时发现,可能会影响钢结构的正常服役工作,甚至会引发重大安全事故,造成人员伤亡^[4]。无损检测技术可以在不破坏钢结构、不影响正常工作生产的前提下,对表面和内部的焊接缺陷进行检测^[5]。因此,利用无损检测技术

检测钢焊接结构中的焊接缺陷有重要意义。

传统的无损检测方法包括渗透检测、磁粉检测、射线检测和超声波检测等。这些无损检测方法各有其优点,但大都很难检测微小和内部深处的焊接缺陷^[6-7]。而且,传统的无损检测方法只适用于钢结构停机检测,无法在钢结构工作时进行实时检测^[8]。声发射(acoustic emission, AE)技术和数字图像相关法(digital image correlation, DIC)作为无损检测新技术可以在不停机的情况下对钢结构进行在线实时检测。AE技术作为在线监测结构完整性的重要无损检测技术,也被应用于材料结构内部损伤过程监测^[9-11]。然而,在实际工作中,背景噪声会严重影响 AE 检测结果,

收稿日期:2021-08-30

* 基金项目:河北省特种设备监督检验研究院保定分院重点项目“制冷压力容器声发射检测技术研究”(2019ZC08)项目资助

只采用 AE 技术对钢焊接结构损伤特性分析存在一定局限性,所以必须结合其他无损检测方法来提高检测精度。DIC 方法是一种非接触式的应变测量技术,可以对材料的表面变形场和位移场信息进行分析^[12-13]。使用 AE 技术实时监测材料内部损伤变化,DIC 方法用来识别材料表面应变场和位移场信息,二者结合互补技术可以更好地检测钢焊接结构的损伤变化。

国内外研究者将 AE 和 DIC 技术结合起来研究材料损伤演化规律。涂郡成等^[14]利用 AE 和 DIC 技术原位监测了已预制横纹裂纹木材试件的三点弯曲损伤过程,成功构建了基于 AE 和 DIC 技术的原位监测含横纹裂纹木材构件裂纹损伤演化的测量和评价体系。王恩和等^[15]采用 AE 和 DIC 技术开展了 4130X 钢拉伸断裂损伤演化监测试验。结果表明,获得的应变场和位移场信息可以准确反映试件的损伤变化规律,再结合 AE 的时域经历特征参数分析,可以较好地识别和评价 4130X 钢拉伸断裂的损伤演化规律。司刚强等^[16]开展 TC4 钛合金循环加载过程的 AE 和 DIC 技术监测实验,研究表明 DIC 监测方法能够有效获取结构件的疲劳损伤状况,AE 对疲劳裂纹扩展敏感,有效实现在线监测疲劳裂纹活动状况,两者结合实现对 TC4 合金疲劳状态的动态监测与损伤演化过程的有效表征。Qing 等^[17]采用 AE 和 DIC 技术表征了伯里亚砂岩的断裂过程。Zhou 等^[18]采用 AE 和 DIC 结合的技术对不同体积分数的三维编织碳纤维复合材料在拉伸过程中的力学行为和损伤演化进行了监测。Kadhum 等^[19]采用 AE 技术来表征裂纹演化过程中的损伤,并通过 DIC 方法证实了测量结果。

本研究采用 AE 和 DIC 技术对无焊接缺陷和含夹渣缺陷两种 Q245R 钢试件的三点弯曲实验进行实时监测。通过 AE 特征参数分析和频域分析研究了夹渣缺陷对 Q245R 钢试件三点弯曲损伤演化的影响,并根据 DIC 方法分析试件表面应变场和位移场特征,进一步验证了 AE 技术对含夹渣缺陷的 Q245R 钢损伤演化的检测分析结果,试验结果为含夹渣缺陷的 Q245R 焊接结构在弯曲载荷作用下损伤演化规律研究提供了依据。

1 材料与方 法

1.1 试件制备

试件由两块 Q245R 钢板对接焊接而成,厚度为 8 mm,切割成长 222 mm,宽 39 mm 的标准试件。试件分两类:试件 A 是无焊接缺陷试件;试件 B 是由专业技术人员在焊道人为引入夹渣缺陷的焊接试件。为获取 Q245R 钢焊接试件弯曲加载过程中的变形场信息,在试件侧面中间区域喷涂 80 mm×8 mm 的黑白散斑。Q245R 钢试件示意图如图 1 所示。

1.2 实验装置和实验过程

图 2 所示为 Q245R 钢试件弯曲实验现场图。Q245R 钢试件的弯曲实验在万能拉压试验机(LD26)上进行,并采

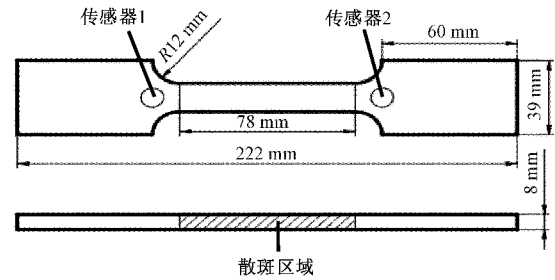


图 1 Q245R 钢试件

用声发射仪(DS2-8A)和 CMOS 相机(MER-500-14U3M)对实验进行实时监测。实验采用位移控制,加载速率为 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。本文研究中采用的 AE 传感器型号为 VS900-RIC,其频率范围为 100~900 kHz,内置前置放大器为 5 mV (34 dB),两个 AE 传感器通过胶带固定在试件表面,间距为 130 mm。AE 传感器与试件之间使用真空硅脂充分贴合,以确保能够实现良好的声耦合,降低噪声的影响。为了达到更好的监测结果,设置采样频率为 3 MHz。峰值鉴别时间为 200 s,撞击鉴别时间为 800 s,撞击锁闭时间为 1 000 s。另外,本次实验使用的 CMOS 相机的分辨率为 $2\,592 \text{ pixel} \times 1\,944 \text{ pixel}$,并用冷光源对黑白散斑区域进行照明以消除实验过程中热变形的影响。

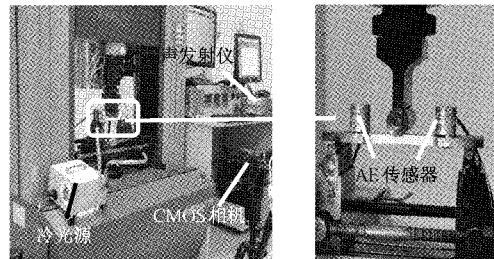


图 2 实验现场图

2 结果与讨论

2.1 弯曲响应声发射特征

AE 信号的活性和强度是 AE 检测结果判定的两个主要依据。累计撞击数可以表征 AE 信号活性,而幅度、能量和频率可以反映 AE 信号的强度。因此,本文选择 AE 信号的幅度、能量、频率和累计撞击数等特征参数进行研究,为了更好地表征夹渣缺陷对弯曲载荷下 Q245R 钢试件的 AE 技术检测结果的影响,也研究 AE 信号的频谱图。

图 3 所示为 Q245R 钢焊接试件弯曲加载过程中 AE 信号幅度和累计撞击数的时间变化图。由图 3 可知 Q245R 钢试件在前 270 s 几乎没有 AE 信号产生,说明实验开始后试件内部产生少量的不均匀变形,造成微小的局部损伤,而且随着实验的进行,微损伤不断累积。试件在 270 s 后产生大量的 AE 信号,AE 信号持续产生直至实验结束。对比图 3 中试件 A 与试件 B 可以发现,试件 B 的 AE 信号数和累计撞击数远高于试件 A。试件 A 的累计撞击数为 497,

而试件 B 的累计撞击数为 3 096。试件 A 的 AE 最高幅度为 70 dB,而试件 B 的 AE 最高幅度为 80.5 dB。可见,夹渣缺陷的存在使得 Q245R 钢焊接试件在弯曲载荷下的 AE 技术监测结果发生了明显变化,夹渣试件的 AE 信号数量、累计撞击数以及最高幅度均高于无缺陷试件。

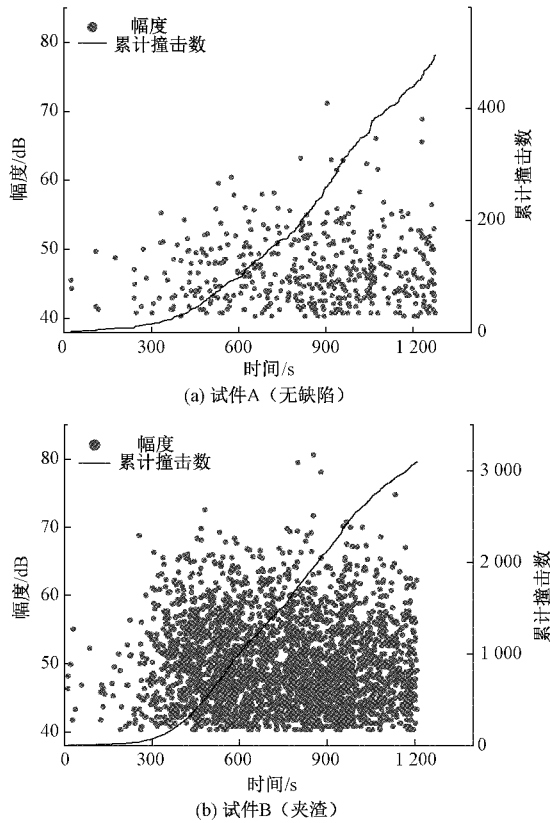


图 3 AE 幅度和撞击累计数时间变化图

图 4 为 Q245R 钢焊接试件弯曲加载过程中 AE 信号能量和累计能量的时间变化图。可以观察到试件 A 和试件 B 的最高能量差别很大,试件 A 的最高能量为 41.72 mV·ms,而试件 B 的最高能量为 231.2 mV·ms,且试件 B 有多个 AE 信号能量高于 41.72 mV·ms。而且试件 B 的累计能量也远高于试件 A。表 1 为 Q245R 钢焊接试件 AE 信号参数统计表,表中试件 B 的 AE 信号 3 种参数均高于试件 A。

表 1 AE 信号最高参数

AE 参数	最高幅度/ dB	累计 撞击数	最高能量/ (mV·ms)
试件 A	70.0	497	41.72
试件 B	80.5	3 096	231.20

图 5 为 AE 信号幅度和能量的关联图。可以发现, Q245R 钢在弯曲加载中产生的 AE 信号幅度和能量呈现近似指数函数关系,高幅度信号对应高能量。之前有研究表

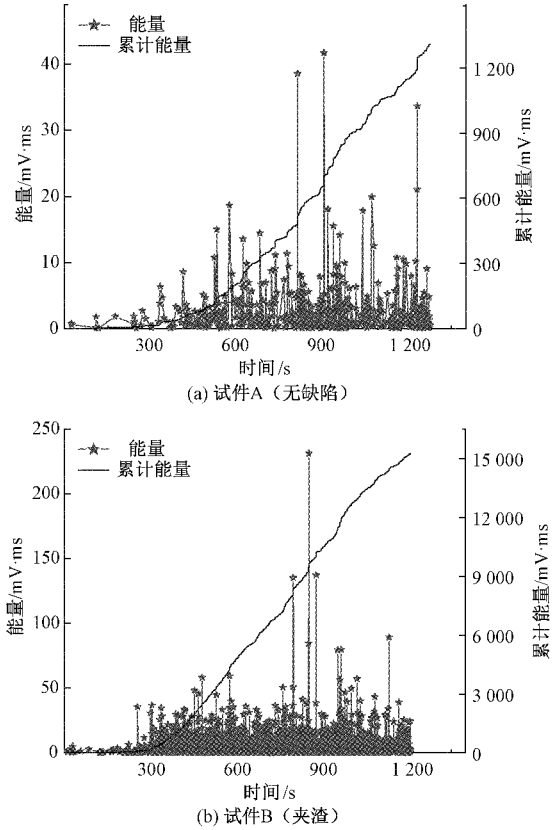


图 4 AE 能量和累计能量时间变化图

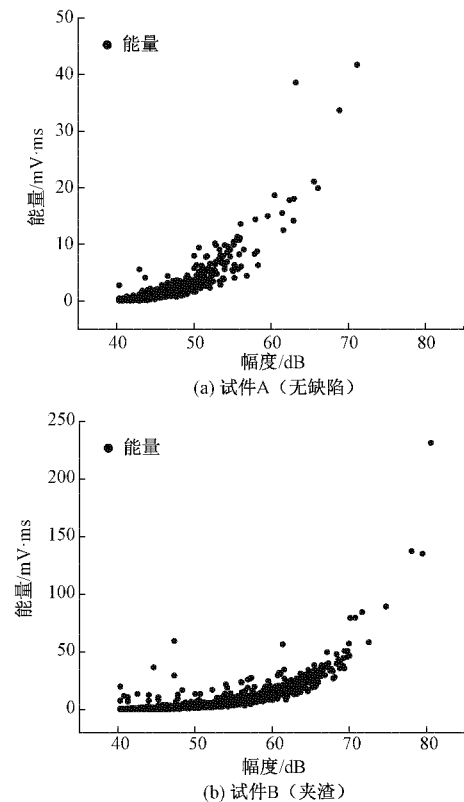


图 5 AE 幅度和能量关联图

明由于夹渣会在加载中相互摩擦,甚至爆裂,产生高能量的 AE 信号^[10]。所以,本研究中试件 B 的超高能量、高幅度声发射信号可能是因夹渣而产生的。

图 6 为 Q245R 钢焊接试件弯曲加载过程中的 AE 信号频率和幅度关联图。可以看出,Q245R 钢试件的 AE 信号频率主要集中在 40~240 kHz。频率为 40~60 kHz 范围的声发射信号只出现在试件 A 中,噪声引起的声发射信号多为低频信号^[20],所以这些低频信号可能是由于噪声引起的。试件 B 的最高信号频率为 240 kHz,试件 A 的最高信号频率为 187.5 kHz。试件 B 的高频 AE 信号数量远大于试件 A。夹渣缺陷的存在也能致使 Q245R 钢试件在弯曲加载中产生高频率的 AE 信号。与图 5 不同的是,频率高的 AE 信号多为低幅度信号。

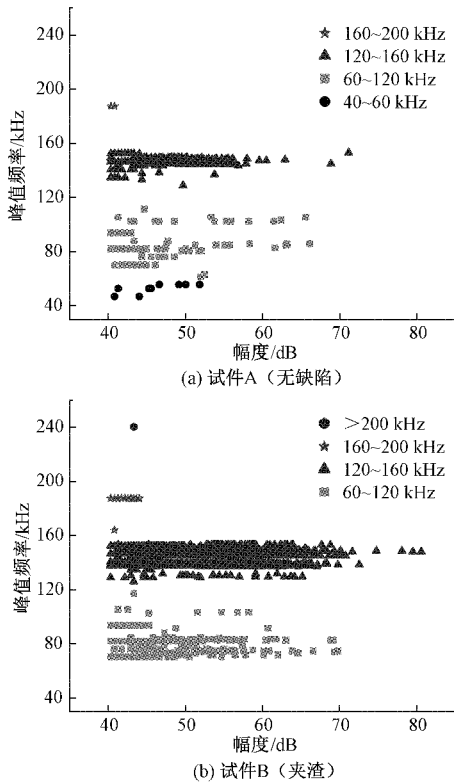


图 6 AE 幅度和频率关联图

图 7 为经过快速傅里叶变换处理后 Q245R 钢焊接试件在弯曲载荷下典型的 AE 信号频域图。可以看出试件 A 峰值频率主要集中在 15~50 kHz,而试件 B 的峰值频率集中在 15~65 kHz,且试件 B 的大部分峰值幅度都高于试件 A 的最高峰值幅度。试件 A 的最高峰值幅度为 0.004 mV,试件 B 的最高峰值幅度为 0.028 mV,试件 A 和试件 B 的最高峰值频率都在 50 kHz 左右。因此,在弯曲载荷下含夹渣缺陷试件 B 的 AE 检测结果的波形峰值频率范围以及波形幅度都高于无焊接缺陷的试件 A。表 2 为 AE 信号最高峰值频率和幅度统计表,可以看出在这两种参数上试件 B 高于试件 A。

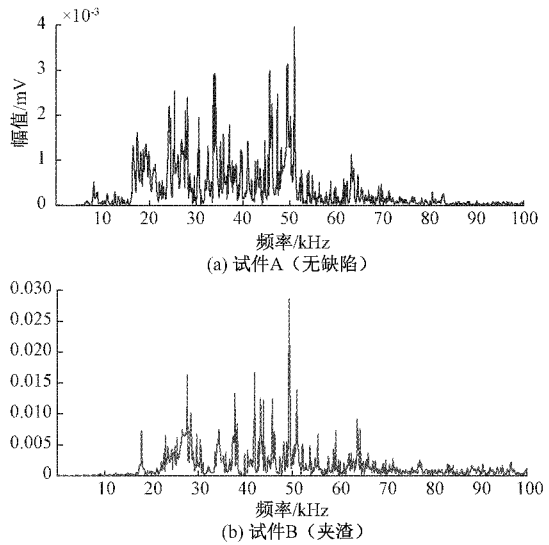


图 7 AE 频域图

表 2 AE 信号最高峰值频率和幅度

AE 参数	最高峰值频率/ kHz	最高峰值幅度/ mV
试件 A	187.5	0.004
试件 B	240.0	0.028

通过以上分析可以发现,AE 信号的幅度、累计撞击数、能量和频率等特征参数以及频域图可以很好地表征夹渣缺陷对 Q245R 钢在弯曲载荷下损伤的影响。然而仅仅通过声发射检测结果来描述夹渣缺陷对 Q245R 钢弯曲损伤的影响比较局限,为了提高检测精度,本研究利用 DIC 分析方法获取 Q245R 钢试件弯曲载荷下表面应变场信息。

2.2 Q245R 钢应变场与位移场分析

在三点弯曲实验中,使用 CMOS 相机对 Q245R 钢焊接试件表面散斑图像进行采集,采集速率为 2 帧/s。利用 GOM 软件得到得的试件表面位移场和应变场来评估含夹渣缺陷和无焊接缺陷的 Q245R 钢试件在弯曲过程中的损伤特征。本研究选取 2.4、2.7、3.0 和 3.3 kN 4 个弯曲载荷下的位移场和应变场来进行分析。

图 8 为 Q245R 钢焊接试件在弯曲方向的位移图。从图 8 中可以看出,在加载初期试件的位移变化量较小,与加载初期 AE 能量较低且声发射信号较少一致。随着载荷的增加红色区域(最大位移场)越来越集中,试件损伤变大,同时伴随着 AE 信号的增加。试件 A 在 2.4、2.7、3.0 和 3.3 kN 4 个弯曲载荷下的最大位移场分别是 0.028、0.190、0.356 和 2.306 mm。试件 B 在 2.4、2.7、3.0 和 3.3 kN 4 个弯曲载荷下的最大位移场分别是 0.046、0.530、9.248 和 23.399 mm。可以看出试件 B 的最大位移场在每个载荷下都比试件 A 大,这是因为试件 B 含夹渣缺陷,降低了抗弯强度。表 3 为 Q245R 钢试件最大位移场差

统计表。可以看出,试件 A 在 2.4~2.7 kN 和 2.7~3.0 kN 两个阶段的最大位移场变化不大,在 3.0~3.3 kN 才有了明显的变化。而试件 B 从第一个阶段开始最大位移场就有了明显的变化,而且远大于试件 A。同样的,试件 B 在这 3 个阶段变化中 AE 信号的数量和能量都远高于试件 A。这一结果可以说明,AE 技术采集的内部损伤破坏情况与 DIC 方法分析得到的表层变形场信息,两者吻合良好。

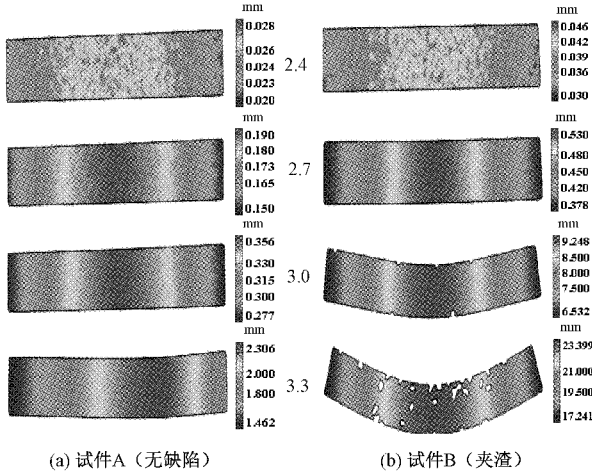


图 8 Q245R 试件弯曲方向位移场

表 3 Q245R 钢试件最大位移场差

载荷/kN	2.4~2.7	2.7~3.0	3.0~3.3
试件 A/mm	0.162	0.166	1.950
试件 B/mm	0.484	8.718	14.151

在图 8 中可以发现,试件 A 在 3.3 kN 时红色区域相对于在前面 3 个载荷时有所偏移。焊接试件的焊道强度一般高于其他区域^[21],这可能是造成这一现象的原因。而试件 B 由于焊道内含夹渣缺陷,导致焊道的强度降低,所以其红色区域没有偏移。

图 9 为 Q245R 钢焊接试件在弯曲方向的应变图。可以发现,试件 A 在 3.0 kN 时的应变场仍然是均匀分布的,

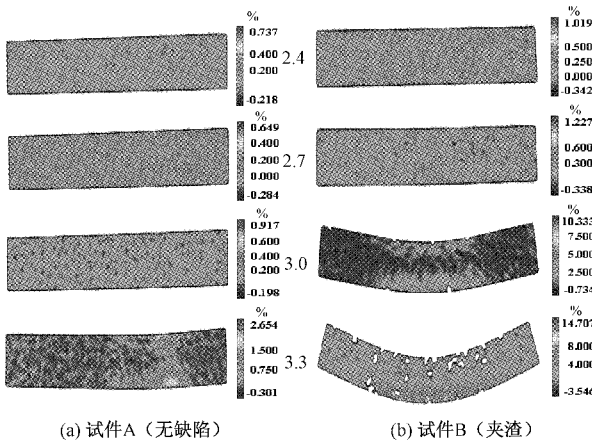


图 9 Q245R 试件弯曲方向应变场

而试件 B 在 3.0 kN 时已经有了应变集中。且试件 B 的最高应变为 14.707%,试件 A 的最高应变为 2.654%。在 3.3 kN 时,试件 A 的最大应变场与位移场一样发生偏移,而试件 B 保持不变。由此可以看出由 DIC 方法得到的试件表面位移场和应变场变化清晰地反映了夹渣缺陷对 Q245R 钢损伤变化的影响。

3 结 论

利用 AE 技术和 DIC 方法对 Q245R 钢焊接试件弯曲载荷下的内部损伤和表面应变场、位移场进行实时监测,研究夹渣缺陷对 Q245R 钢焊接试件损伤变化的影响,结果表明:

1) Q245R 钢焊接试件在弯曲载荷较低时有少量 AE 信号产生,随着载荷的增加,损伤逐渐增加,AE 信号在 270 s 后开始产生大量 AE 信号。Q245R 钢焊接试件弯曲损伤的 AE 信号幅度、累计撞击数、能量和频率等特征参数可以表征夹渣缺陷对试件损伤演化的影响。

2) 含夹渣缺陷试件 AE 信号特征参数的活性和强度都高于无缺陷试件,且含夹渣缺陷试件在弯曲载荷下产生的 AE 信号数远大于无缺陷试件。含夹渣缺陷试件在弯曲过程中产生了 70~80 dB 高幅度、41.72~231.2 mV·ms 的高能量和 240 kHz 的高频率 AE 信号,其峰值幅度也远高于无缺陷试件。

3) 利用 DIC 方法得到的 Q245R 钢焊接试件弯曲过程中表面的应变场和位移场信息,可以较好地反映 Q245R 钢试件损伤演化的影响。相同载荷下,含夹渣缺陷试件的最大应变场和位移场都高于无缺陷试件,且产生较早的应变集中。无缺陷试件的最大应变区域会发生偏移。

4) 结合 AE 技术和 DIC 方法,通过分析 AE 特征参数、频域图和表面应变场、位移场信息,较好地表征了夹渣缺陷对 Q245R 钢焊接试件损伤演化的影响,为 Q245R 钢焊接结构健康监测提供了参考依据。

焊接缺陷检测是钢结构健康监测的重要环节,焊接缺陷分很多种,然而本研究只研究了夹渣缺陷对检测结果的影响,所以在以后的研究中可以对比不同类型的焊接缺陷对检测结果的影响。另外,本研究的研究条件是正常工况。然而,在实际工作中存在各种各样的工况,所以可以研究不同工况下焊接缺陷对检测结果的影响。

参考文献

- [1] 蔡智超,陈澜,赵振勇,等.电磁声谐振对 Q235 钢压缩形变评价研究[J].仪器仪表学报,2019,40(5):153-160.
- [2] 刘建,卜旭辉,梁嘉琪,等.迭代学习控制在 GTAW 焊接过程中的应用研究[J].电子测量与仪器学报,2017,31(7):1061-1066.
- [3] ABOALI A, EL-SHAIB M, SHARARA A, et al. Screening for welding defects using acoustic emission

- technique[J]. *Advanced Materials Research*, 2014: 7-12.
- [4] 苏三庆, 孙灏江, 王威. 弯曲荷载作用下焊接钢板件金属磁记忆效应试验研究[J]. *西安建筑科技大学学报*, 2017, 49(6): 771-776.
- [5] 张辉, 宋雅男, 王耀南, 等. 钢轨缺陷无损检测与评估技术综述[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(2): 11-25.
- [6] 季玉坤, 高向东, 刘倩雯, 等. 焊接缺陷磁光成像卷积神经网络识别方法[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(2): 107-113.
- [7] 王成飞, 刘泽, 霍继伟, 等. 电磁层析高铁空心轴缺陷检测方法研究[J]. *国外电子测量技术*, 2020, 39(6): 132-136.
- [8] KOLOKOLNIKO S, DUBOV A, MEDVEDEV A, et al. Comprehensive inspection of refrigerated ammonia storage tank welded joints by the metal magnetic memory technique and conventional NDT methods[J]. *Welding in the World*, 2020, 64(10): 1659-1670.
- [9] 罗奕, 郭瑜, 伍星, 等. 基于声发射信号的行星轮轴承内圈故障包络分析方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(5): 164-170.
- [10] 苗帅杰, 宋颖, 张文涛, 等. 混凝土损伤随机光纤激光声发射检测系统[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(10): 237-244.
- [11] 阳能军, 王新刚, 王蒙, 等. HHT在复合材料损伤声发射信号处理中的应用[J]. *电子测量技术*, 2011, 34(8): 45-47.
- [12] 陈登旭, 刘吉, 武锦辉, 等. 基于自阈值粒子群算法和爬山算法的DIC形变分析[J]. *国外电子测量技术*, 2020, 39(5): 11-16.
- [13] 陈少轩, 陈诚, 张宏儒, 等. 复合柔性电子变形失配数字图像相关研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(6): 48-53.
- [14] 涂郡成, 赵东, 赵健. 应用AE和DIC原位监测含横纹裂纹木构件的裂纹演化规律试验研究[J]. *北京林业大学学报*, 2020, 42(1): 142-148.
- [15] 王恩和, 刘鹏, 李彩瑞, 等. 基于数字图像和声发射技术的4310X钢拉伸断裂损伤状态监测[J]. *无损检测*, 2021, 43(6): 19-23.
- [16] 司刚强, 李伟, 徐海丰, 等. 基于DIC和声发射的TC4合金疲劳损伤状态监测方法[J]. *东北石油大学学报*, 2020, 44(3): 119-126.
- [17] QING L, BIN W, YAN W, et al. Unifying acoustic emission and digital imaging observations of quasi-brittle fracture[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2019(103): 102301.
- [18] ZHOU W, HAN K N, QIN R, et al. Investigation of mechanical behavior and damage of three-dimensional braided carbon fiber composites [J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(8): 085624.
- [19] KADHUM S, SAFAA K A, RHYS P, et al. On the use of acoustic emission and digital image correlation for welded joints damage characterization[J]. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 2019, 5(2): 381-389.
- [20] 叶辉. 紧凑拉伸Q245R焊接试样的声发射特性研究[J]. *化学工程与装备*, 2017(6): 153-157.
- [21] 张一辉, 张文斌, 许飞云, 等. Q235B钢板拉伸损伤试验的声发射特性[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(15): 156-161.

作者简介

杜永刚, 硕士研究生, 主要从事制冷压力容器用钢焊接缺陷声发射检测研究。

E-mail: dyg69908@126.com

周伟(通信作者), 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事复合材料声学及光学无损检测技术研究。

E-mail: zhouwei@126.com