

基于红外热像的网架焊接空心球节点疲劳试验研究

张建丽, 靳世宏, 雷宏刚

(太原理工大学 建筑与土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 焊接空心球网架结构被广泛使用在带悬挂吊车的工业厂房中。悬挂吊车带来的往复交变荷载会造成网架焊接节点的疲劳破坏。在焊接空心球节点的疲劳试验过程中, 借助红外热像仪记录试件表面的温度, 得到了试件表面的温升分布, 温升高区位于钢管与焊接球的焊接连接球面焊趾处, 此区域对应节点最后的疲劳破坏位置。在疲劳试验过程中, 焊趾处的温升高区位置几乎不变, 当疲劳裂纹穿透球壁厚时, 温升高区的位置发生变化。试验表明: 红外热像仪可以实时记录焊接空心球节点试件在疲劳试验过程中表面的温度, 通过分析温升高区在没有可见裂纹的情况下就可预测疲劳破坏发生的位置, 温升高区位置的变化对应裂纹贯穿球壁时节点试件的疲劳寿命。

关键词: 焊接空心球节点; 疲劳破坏; 红外热像法; 穿透裂纹

中图分类号: TN219; TU391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0804002

Research on fatigue test of welded hollow spherical joints in grid structure based on infrared thermography

Zhang Jianli, Jin Shihong, Lei Honggang

(College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The grid structure with welded hollow spherical joints has been widely used in industrial buildings with suspending cranes. The alternating and reciprocating action of the suspending crane causes fatigue failure to welded hollow spherical joints. During the fatigue test, temperature of the surface of welded hollow spherical joint was detected by infrared thermal imager. The higher temperature rise area was located at the weld toe of the sphere in the welded parts. This area corresponded to the final fatigue failure position. During the test, the location of the temperature rise area at the weld toe was almost constant. When the fatigue crack penetrated the wall thickness of the sphere, the position of the temperature rise area changed. The experimental results show that the temperature rise of the surface of the joint can be recorded in real time by infrared thermal imager. By analyzing the temperature rise in those area, the location of fatigue fracture can be predicted without any visible cracks. The fatigue life of the joints when the crack penetrates the wall of the sphere corresponds to the change of the position of the temperature rise area at weld toe.

Key words: welded hollow spherical joints; fatigue failure; infrared thermography; through-thickness crack

收稿日期: 2018-03-05; 修订日期: 2018-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(51578357)

作者简介: 张建丽(1978-), 女, 讲师, 硕士, 主要从事钢结构疲劳与断裂方面的研究。Email: zhang_jli@163.com

通讯作者: 雷宏刚(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事钢结构与空间结构方面的研究。Email: lhgang168@126.com

0 引言

焊接空心球网架结构在国内得到广泛应用,因生产的需求,在网架上悬挂吊车,可谓一大创举,但与此同时也带来了网架结构的疲劳问题^[1]。

在交变荷载作用下,局部的循环塑性应变是产生疲劳损伤的根本原因^[2]。疲劳过程中,塑性变形能大部分以热能的形式释放出来,造成试件表面温度的变化,而红外热像仪可以非接触、实时、全局检测试件表面的温度,结合损伤理论表征疲劳过程中的能量耗散特征。近年来,国内外的学者^[3-11]已将红外热像法应用于材料的疲劳研究之中,但将红外热像用于足尺建筑结构试件的疲劳试验鲜有报道。

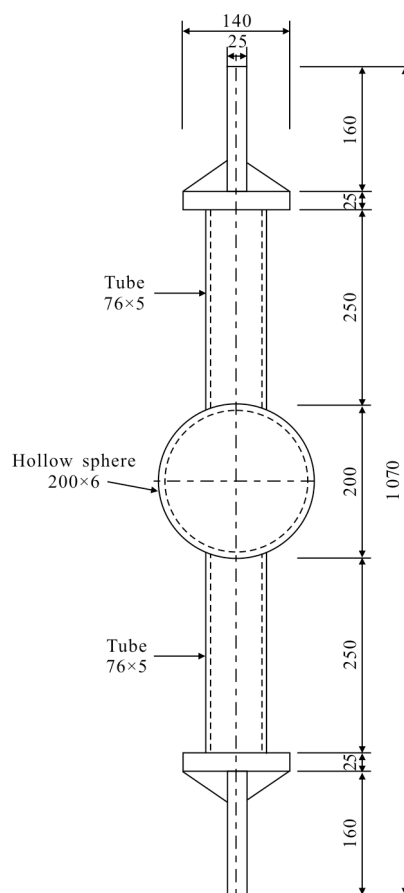
文中将红外热像应用于足尺网架结构焊接空心球节点的疲劳试验研究中。焊接空心球节点实际是钢管与焊接空心球焊接连接节点。焊接节点在交变荷载作用下,钢管和球的名义应力均处于材料的屈服极限以下,但焊趾处因焊接残余应力,焊接缺陷,焊接件尺寸的变化等原因存在高应力集中区域。在这些区域,局部的应力超出了屈服极限,交变荷载作用下以循环塑性变形为主。塑性能以热能形式释放,造成焊趾处局部区域的温度升高。在焊接空心球节点疲劳试验过程中,借助高灵敏度红外热像仪记录试件表面的温度,得到表面的温升分布,通过分析温升高区,在没有可见裂纹的情况下预测疲劳破坏发生的位置;在疲劳试验的后期通过分析焊趾处温升高区位置的变化,确定节点试件裂纹穿透球壁时的疲劳寿命。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

《空间网格结构技术规程》(JGJ7--2010)^[12]中规定了管球匹配的基本原则:网架和双层网壳的空心球外径和壁厚之比 25~45,单层网架取 20~35;空心球外径与钢管外径之比 2.4~3.0;空心球壁厚与主钢管壁厚之比 1.5~2.0;空心球壁厚不宜小于 4 mm。基于此原则,本次试验采用 WS2006 焊接球和 $\phi 76 \times 5$ 钢管,材料均为 Q235B,质量符合行业标准《钢网架焊接空心球节点》^[13]的规定。钢管端开坡口,焊条采用 E43 型。试件表面涂一层黑色亚光漆,增加试件表

面的热辐射率,试件见图 1。



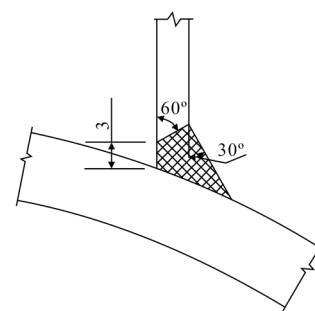
(a) 试件尺寸(单位:mm)

(a) Dimensions of specimen(Unit:mm)



(b) 试件照片

(b) Photo of specimen



(c) 焊脚尺寸

(c) Size of fillet

图 1 试验试件

Fig.1 Test specimen

1.2 试验方法

疲劳试验在 MTS 疲劳试验机上进行,试验机最大平均负荷为 ± 500 kN。试验中采用力控模式,拉-拉循环载荷,应力比 $R=0.3$,加载频率 $f=15$ Hz。

疲劳试验时测温设备为 NEC 红外热像仪, 热图像像素为 320×240, 帧频 60 帧/s, 30℃时的测量灵敏度为 0.06℃, 工作波长 8~14μm。用红外热像仪对疲劳试验过程中试样表面温度进行测量, 采用 MIKRON® 软件对红外数据进行处理。试验在室温中进行, 图 2 为试验中采用的加载装置及红外测温系统。



图 2 疲劳试验中的 MTS 与红外系统
Fig.2 MTS and infrared system in fatigue test

2 结果与讨论

2.1 预测焊接空心球节点疲劳破坏位置

焊接空心球与钢管焊接接头的焊趾部位为应力集中部位, 在载荷作用下, 裂纹容易在该部位成核并且扩展。整个试验过程中, 红外热像仪重点观测焊接接头的焊趾部位。在环形焊趾处由于热塑性效应, 局部的塑性功以热量形式释放, 造成局部的表面温度升高, 塑性变形程度越高, 试件的损伤程度越严重, 温升值越大。由于对塑性功有表征的量不是表面温度, 而是表面的温升, 因而不直接采用测量热像图, 而是采用热像差分得到的温升热像图, 即 t 时刻的温升热像图是 t 时刻热像图减去 t_0 初始时刻的热像图, 如图 3 所示。

图 3(c) 是差分得到的试件表面的温升热像图, 整个试件中球上部焊趾处的温升值最高, 温升高区沿着焊趾环向分布, 此区域为节点疲劳损伤最严重

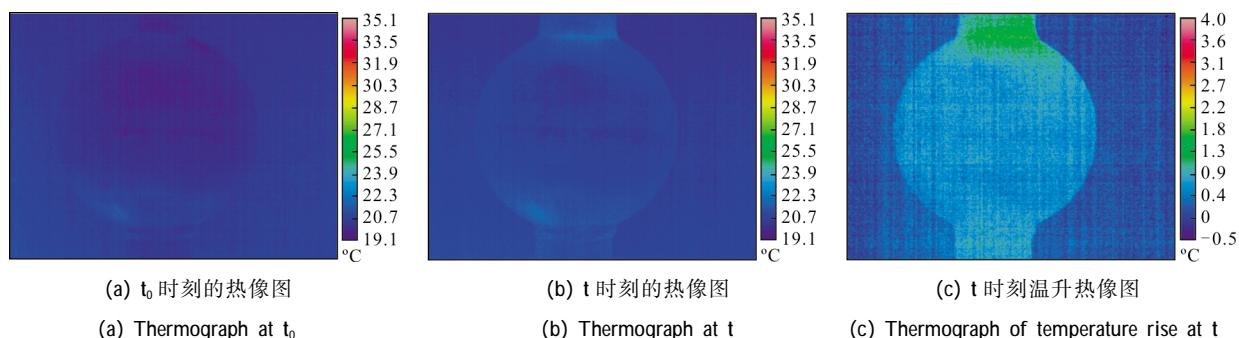


图 3 热像图

Fig.3 Thermograph

的区域, 是试件的主裂纹所在位置, 与图 4 所示试件最终的疲劳破坏位置相对应。

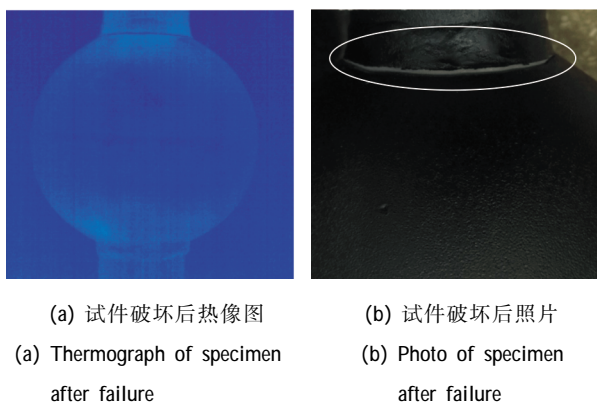


图 4 试件破坏图

Fig.4 Images of specimen after failure

如图 4 所示, 最后的破坏位置发生在焊接接头的球面焊趾处, 裂纹沿着焊趾处环向开裂, 此破坏位置与参考文献[14]的 15 个焊接节点的疲劳试验, 参考文献[15]的 29 个焊接节点的疲劳试验破坏位置一致。

在焊接节点的疲劳试验过程中, 采用红外热像仪记录试件表面温度, 通过分析温升高区, 在可见裂纹没有出现的情况就可判定疲劳破坏发生的位置。

2.2 确定裂纹贯穿球壁时试件的疲劳寿命

一般采用 S-N 曲线来表达疲劳特性。S 是作用应力, N 是对应的寿命, 也就是此应力对应的破坏时的循环次数。对应不同破坏准则寿命 (循环次数) 也不相同, 如出现可见裂纹的循环次数, 穿透裂纹 (裂纹贯穿球壁) 的循环次数和试验结束时的循环次数。

可见裂纹的大小和试验结束的指标没有统一的标准，而对于此节点从疲劳断口分析中得到选择裂纹贯穿球壁对应的疲劳寿命是合适的。

图 5 为钢管名义应力幅为 100 MPa 试件的疲劳断口，图 5(a)为宏观断口，从图中看到疲劳断口具有两个区域，一个为光滑区域，颜色较灰，是裂纹的顶部和底部摩擦造成；一个为光亮粗糙区域，是材料快速失效时的拉断区域。疲劳区域的中心位置，几乎整个壁厚都呈现灰色，由中心向两边，壁厚范围内灰色

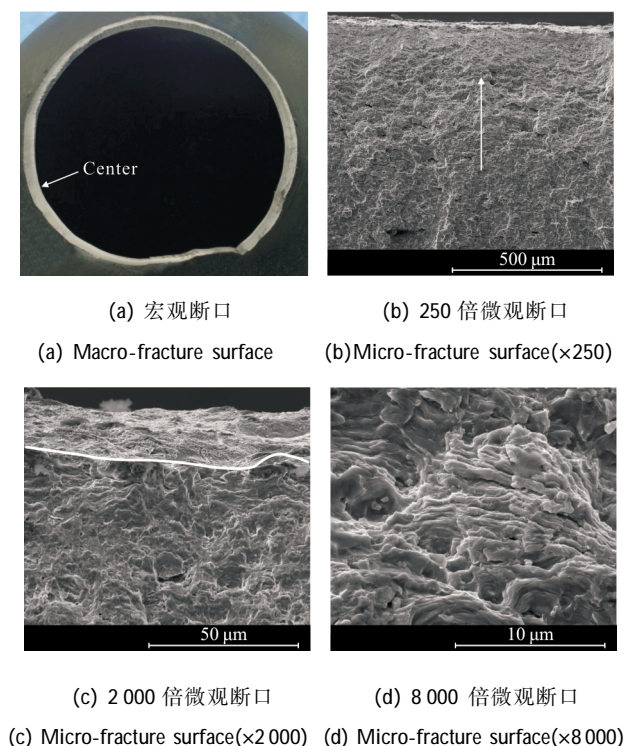


图 5 疲劳断口

Fig.5 Fatigue fracture surface

光滑疲劳区域减少，粗糙光亮瞬断区域增加。图 5(b)是中心区靠近内壁位置 250 倍的微观图，沿着图中白线微观形貌发生变化，由具有疲劳条带的疲劳区变成了具有韧窝的瞬断区，将变化部分放大得到图 5(c)的 2 000 倍微观图。由图 5(c)中可看到断口内存在一条明显的分界(图中白线)，白线到球内壁不到 20 μm 的微观形貌特征是大小不等的圆形凹坑-韧窝，此区域是最后的延性瞬断区域。其他区域是疲劳区域，图 5(d)是疲劳区域放大 8 000 倍的微观图，此区域的微观形貌特征是一条一条的疲劳条带。由断口分析得到节点的疲劳破坏起始于表面，沿着壁厚向内扩展同时沿着环向扩展，当裂纹几乎穿透球壁厚时，试

件的有效截面减少，应力增加，最后所剩截面瞬时拉断，此时试件破坏，裂纹沿着焊趾环向快速撕裂。

实时的热像图表征了这个疲劳的过程。图 6 给出了焊趾处从循环 1 500~61 000 次焊趾处 (117~175 pixel) 的温度分布曲线，从循环 6 000~61 000 次循环(试验结束循环数 61 403 次)温升高区始终处于虚线的 152~159 pixel 区域，此时的温升值低于 2 $^{\circ}\text{C}$ ，是裂纹稳定的扩展阶段。当裂纹穿透球壁厚时，裂纹沿着环向撕裂，撕裂造成裂纹尖端温升值大幅提高，图 7 热像图演示了这一过程。如图 7 所示，焊趾处的温升值不断增加，当裂纹贯穿球壁后，焊趾处的温升高区位置发生变化，随着裂纹沿着焊趾环向撕裂，焊趾处的温升高区不断左移，最后撕裂时温升值大于 6 $^{\circ}\text{C}$ 。

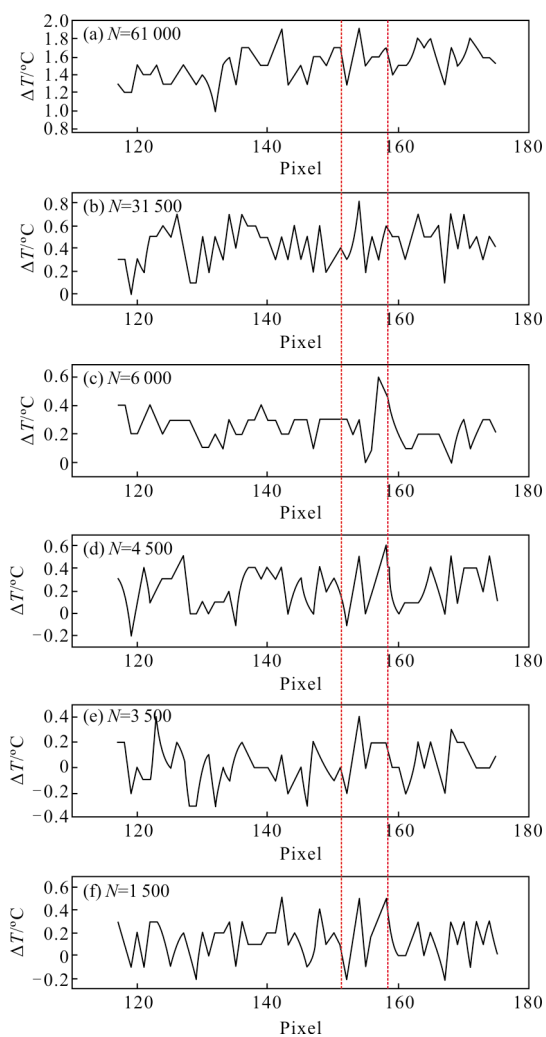


图 6 焊趾处温度分布

Fig.6 Temperature distribution at weld toe

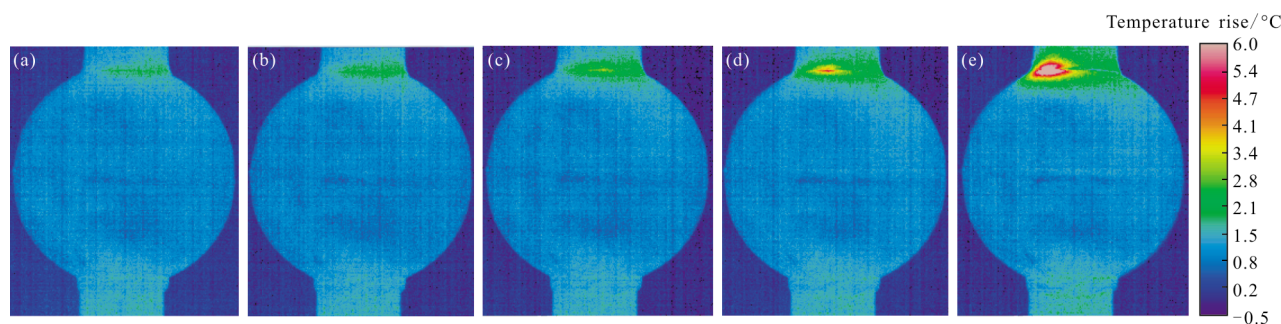


图 7 疲劳试验中红外热像图

Fig.7 Infrared thermograph in fatigue test

焊趾处温升高区在整个疲劳试验过程中位置几乎不变,且温升幅度不大。当裂纹贯穿球内壁时,温升值升高,温升高区的位置开始沿着环向焊趾变化,此时的循环次数对应裂纹贯穿球壁的疲劳寿命。

在参考文献[16]中采用充气泄露法测量钢管焊接的管结构对应的裂纹穿透钢管壁厚的疲劳寿命。在此方法中事先在钢管内充入气体,用气体泄漏来指示管壁被贯穿。采用红外热像法测量穿透壁厚对应的疲劳寿命无须提前在管内(或球内)充气,对于试件没有特殊要求,且具有实时、非接触的优点。

3 结 论

在足尺焊接空心球节点的整个疲劳试验过程中,采用红外热像仪记录试件的表面温度。温升最高区域位于钢管与焊接空心球焊接连接球面的焊趾部位,对应于试件最后疲劳破坏的位置。试验表明对于足尺结构节点试件的疲劳试验,红外热像法能够用于在试件没有可见裂纹的情况下预测疲劳损伤位置最大的区域。红外热像法可以作为一种非接触式的无损检测技术应用于结构的在线监测。

在节点的疲劳试验过程中,红外热像图显示温升高区固定在一个小的区域,但当裂纹贯穿球内壁时,裂纹快速地向两边撕裂,温升高区沿着焊趾环向变化,此时的循环次数对应裂纹贯穿球壁的疲劳寿命。此方法具有实时、非接触的优点。红外热像仪可以作为足尺结构节点疲劳试验有效的试验检测手段之一。

参考文献:

[1] Lei Honggang, Fu Qiang, Liu Xiaojuan. Research progress of

steel structure of steel structure fatigue in past 30 years in China[J]. *Journal of Building Structures*, 2010(S1): 84-91. (in Chinese)

[2] Suresh S. 材料的疲劳 [M]. 2 版. 王中光等译. 北京: 国防工业出版社, 1999.

[3] Charles J A, Appl F J, Francis J E. Using the scanning infrared camera in experimental fatigue studies [J]. *Experimental Mechanics*, 1975, 15(4): 133-138.

[4] La Rosa G, Risitano A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components [J]. *International Journal of Fatigue*, 2000, 22(1): 65-73.

[5] Fargione G, Geraci A, La Rosa G, et al. Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method [J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, 24(1): 11-19.

[6] Luong M P. Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique[J]. *Mechanics of Materials*, 1998, 28(1-4): 155-163.

[7] Crupi V, Guglielmino E, Ristano A, et al. Different methods of fatigue assessment of T welded joints used in ship structures[J]. *Journal of Ship Research*, 2007, 51(2): 151-159.

[8] Williams P, Liakat M, Khonsari M M, et al. A thermographic method for remaining fatigue life prediction of welded joints[J]. *Materials & Design*, 2013, 51: 916-923.

[9] Fan Junling, Guo Xinglin, Zhao Yanguang, et al. Predictions of S-N curve and residual life of welded joints by quantitative thermographic method [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2011(12): 29-33. (in Chinese)

[10] Yan Zhifeng. Fatigue fracture behavior and assessment theory of magnesium alloy base on infrared thermography [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014. (in Chinese)

[11] Liu Hao, Zhao Jun, Ding Hua. Experimental method of high-speed determination of fatigue limit for 45 steel [J]. *Physics*

- Examination and Testing, 2008, 26(2): 42-48.
- [12] Technical specification for space frame structures JGJ7-2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [13] Welded hollow spherical node of space grid structures GJ/T11-9 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [14] Lei Honggang. Research on static and fatigue behavior of welded hollow spherical joints in space trusses [J]. Journal of Building Structure, 1993(1): 2-7. (in Chinese)
- [15] Yan Yajie. Theory analysis and testing study on fatigue properties of the steel pipe-welded hollow spherical joints in space latticed structure [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [16] Zhu Jun. Fatigue behaviour of welded T-joints of concrete filled circular hollow sections [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)