

doi: 10.3788/gzxb20124101.0077

基于数字相关法的应力应变检测技术及应用

米红林

(上海应用技术学院 机械工程学院, 上海 201418)

摘 要:借助高准确度数字散斑相关技术并结合标记点法,对工作的热风炉进行了实时位移和应变检测.测试了环向和轴向位移和应变,得出热风炉壳的位移场等直线,即环向位移呈现竖向条纹,轴向位移总体呈现水平状位移等值线,并且位移数据较为均匀.由位移场得到了应变场,由于温差变化不大,由此产生的最大热应力为 63.85 MPa.数字散斑相关技术所测结果与标记点法所测数据吻合.现场检测表明,炉壁外表面,由热交换引起的应力远小于钢材的许用应力,所以结构运行安全.

关键词:数字散斑相关技术;高炉热风炉;位移;应变

中图分类号: TB931; O348.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)01-0077-5

0 引言

高炉热风炉安全稳定运行对炼钢质量至关重要.在宝钢 1 号高炉大修中,需对热风炉的主体结构炉壳进行评估.本文采用数字散斑相关技术实现了对 1 号高炉的 2 号、4 号热风炉在运行过程中的燃烧、送风和切换三个状态下热风炉的三大主体—燃烧室、蓄热室和混合室测试区域的炉壳的环向、轴向位移及应变进行了全面综合检测和非接触式测试,得到了一些重要数据,给评估分析提供分析依据.

数字散斑相关技术是目前实验力学领域最具有现场实用价值的实验方法之一.在单碳纳米管、碳纤维布加固钢筋混凝土、铝合金对接缝测量^[1-3]以及纸浆模塑材料拉伸、竹材板弯曲实验^[4-5],此外,在压力容器变形、疲劳裂纹预测、单轴压缩时的混凝土形变测试^[6-9]中也得到了广泛应用.尤其在数字相关技术方法的研究中相关学者也进行了深入研究^[10-11].本文在以上文献基础上,将数字散斑相关技术应用于高炉热风炉的现场检测中,不仅扩大了该技术的使用领域,而且为相关的领域研究提供了测试手段和方法.

1 变形测量原理

数字散斑相关法(Digital Speckle Correlation Method, DSCM)由 Peters 和 Sutton 等提出,是根据物体表面随机分布的粒子的反射光强度分布在变形前后的概率统计相关性来确定物体表面位移和应

变,后又经过大量的改进和发展.在实际应用中,主要在于比较试件变形前后两幅散斑图像的相关性来确定试件的变形量.

用相关迭代测量方法处理数字散斑图时,首先在变形前的散斑图中选取一个子区,作为测量的参考图像,图像灰度分布为 $f(x_i, y_j)$,表示加载前散斑图中某个微小子集的灰度值;然后,在变形后的散斑图中去寻找目标图像,图像灰度分布为 $g(x_i^*, y_j^*)$,表示加载后对应子集的灰度值,其中 x^* 、 y_j^* 2 个量是含有待求位移及其一阶和两阶导数的未知量,这两个值确定是关键. x_i^* 、 y_j^* 作为子区变形后任意一点,其坐标可用该点在变形前的坐标 (x_i, y_j) 表示

$$x_i^* = x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} (\Delta x)^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} (\Delta y)^2 + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \Delta x \Delta y \quad (1)$$

$$y_j^* = y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} (\Delta x)^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} (\Delta y)^2 + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \Delta x \Delta y \quad (2)$$

式中 u 、 v 是子区中心点的位移.

根据统计学原理计算参考图像与目标图像之间的相关性,它是反映两个图象相似程度的一个数学指标.统计学上定义 S 为相关因子,其表达式为

$$S(u, \frac{\partial u}{\partial x}, \dots, \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \Delta x \Delta y; v, \frac{\partial v}{\partial x}, \dots, \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y}) = 1 - \frac{\sum f(x, y) \cdot g(x^*, y^*)}{\sqrt{\sum f^2(x, y) \cdot \sum g^2(x^*, y^*)}} \quad (3)$$

基金项目:上海市教育委员会一般项目(No.06OZ028)和上海应用技术学院教改项目(No.1020T100036)资助

作者简介:米红林(1974—),男,副教授,博士,主要研究方向为实验固体力学. Email:mihonglin@sit.edu.cn

收稿日期:2011-07-20;修回日期:2011-08-29

式中 $0 \leq S \leq 1$, $S=0$ 相关, $S=1$ 不相关.

实验中,用于数字散斑相关测试分析的实验装置见图1,主要由 CCD、相关分析软件、计算机等组成.实验前,测试系统首先用钢板进行了拉伸标定实验,准确度可达到 0.01 像素.

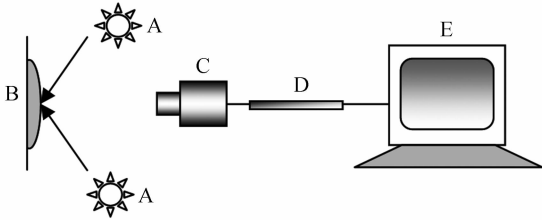


图1 数字散斑相关系统测量示意图
Fig. 1 Schematic of DSCM system

2 实验过程

现场散斑图如图2所示,测试采集区域为 $22 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,测试分两个阶段,第一阶段是燃烧阶段;第二阶段是送风阶段时间.由于温度的变化,载荷为温度差引起的炉壁表面环向和轴向张力,本次热应力测试试验,采集分5次进行,按时间先后顺序,燃烧阶段在外炉壁 $102 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 分别进行了数据采集,送风阶段在 $94 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $93 \text{ }^\circ\text{C}$ 进行了采集,最后在送风燃烧转换时刻炉壁温度为 $93 \text{ }^\circ\text{C}$ 时进行最后一次采集数据.为了形成较好的散斑场,测试区域进行了人造散斑场,在测试区域交替喷涂少量黑色和白色漆,形成了黑白相间随机散斑模式,每个像素代表位移为 0.0448 mm/Pixel .

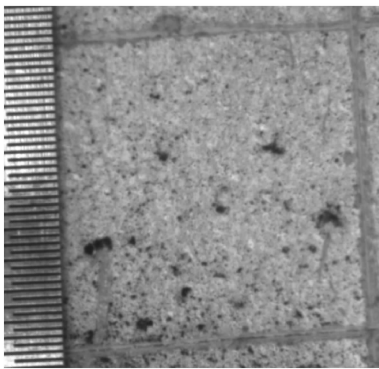


图2 炉壁散斑图
Fig. 2 Speckle of measured object

3 实验数据和分析

本文 DSCM 软件测量系统^[11]采用最新的采图及数据显示技术、新的灰度迭代算法 IGGA 及有限元光滑技术,经多项重大工程实践证明,该 DSCM 测量系统可以应用于各种科学研究、工程测量.

3.1 送风阶段炉壳表面的位移场和应变场

燃烧时,在初始温度 $102 \text{ }^\circ\text{C}$,采集一幅散斑图,为了测定温度引起的应力在 $94 \text{ }^\circ\text{C}$ 时采集一幅散斑

图,然后对此两幅图进行数字相关处理后得到了 U 、 V 位移场以及 ϵ_x 和 ϵ_y 应变场(图3和图4为 U 位移场和应变场).

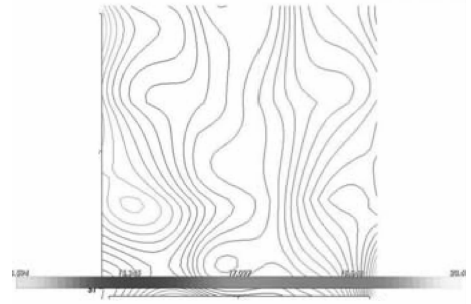


图3 U 场位移等值线
Fig. 3 Contour of U displacement fields

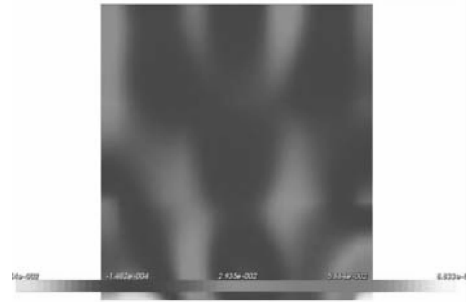


图4 ϵ_x 应变场
Fig. 4 Strain fields of ϵ_x

经过处理后,得到环向平均 u_x 位移增量为 0.0073 mm ,环向平均 ϵ_x 应变为 $143 \mu\epsilon$,轴向平均 u_y 位移增量为 0.006 mm ,轴向平均 ϵ_y 应变为 $22 \mu\epsilon$.

3.2 燃烧阶段炉壳表面的位移场和应变场

在 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度时,采集一幅散斑图,然后与最初一幅散斑图($102 \text{ }^\circ\text{C}$)进行数字相关处理,得到了 U 、 V 位移场以及 ϵ_x 和 ϵ_y 应变场(图5和图6为 V 位移场和应变场).经过处理后,得到光测环向平均 u_x 位移增量为 0.021 mm ,环向平均 ϵ_x 应变为 $36 \mu\epsilon$,轴向平均 u_y 位移增量为 0.005 mm ,轴向平均 ϵ_y 应变为 $29 \mu\epsilon$.



图5 V 位移场位移等值线
Fig. 5 Contour of V displacement fields

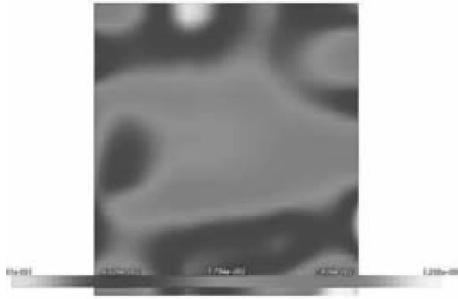


图 6 ϵ_y 应变场
Fig. 6 Strains fields of ϵ_y

3.3 送风阶段炉壳表面的位移场和应变场

3.3.1 送风阶段第一次采集

送风阶段第一次采集时,热风炉壳外表面温度为 94 ℃,与最初一幅散斑图(102 ℃)进行数字相关处理,得到了 U 、 V 位移场以及 ϵ_x 和 ϵ_y 应变场(图 7 和图 8 为 U 、 V 位移场)。



图 7 U 场位移等值线
Fig. 7 Contour of U displacement fields



图 8 V 场位移等值线
Fig. 8 Contour of V displacement fields

经过处理后,得到光测平均 u_x 位移增量为 0.16 mm,环向平均 ϵ_x 应变为 154 $\mu\epsilon$,平均 u_y 位移增量为 0.20 mm,轴向平均 ϵ_y 应变为 24 $\mu\epsilon$ 。

3.3.2 送风阶段第二次采集(93 ℃)

由于外界因素影响,采集的两幅图灰度差别较大,无法进行自动相关运算,采用手工进行相关运算.方法如下:将标记点 1 和 2 之间的区域作为被测应变区域,其间距为 l ,最初一幅采集的散斑图(如图 9),温度变化后在燃烧到送风过渡状态 93 ℃时再采集一幅散斑图(如图 10).然后将图 9 的标记点 1 和标记点 2 分别与图 10 对应标记点作相关运算,得

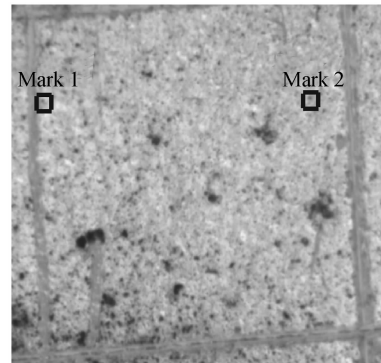


图 9 最初时的散斑图
Fig. 9 The original speckle pattern

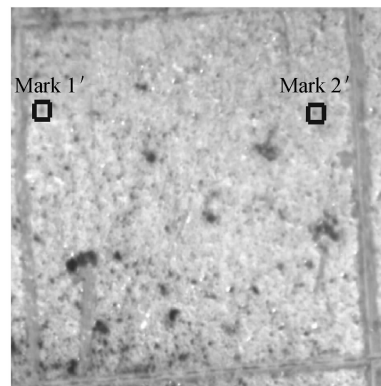


图 10 燃烧到送风过渡状态 93 ℃时的散斑图
Fig. 10 The speckle of transitional states when 93 ℃

到标记点 1 的位移 u_1 , 标记点 2 的位移 u_2 ,则由于温度引起的标记点之间的变形量 $\Delta u = u_1 - u_2$,于是应变为

$$\epsilon = (u_1 - u_2) / l$$

图 10 中两标记点之间距离为 411 pixel,实际位移像素 $u_1 = 3.2$ pixel, $u_2 = 5.1$ pixel. 经过处理后,得到光测 ϵ_x 为 271 $\mu\epsilon$, y 方向平均应变 ϵ_y 为 65 $\mu\epsilon$. 由数字散斑相关法得到的热风炉环向和轴向位移和应变如表 1.

表 1 光测数据

Table 1 The data of DSCM

| Temperature difference | 8 ℃ | 8 ℃ | 9 ℃ | 9 ℃(102~93) ℃ |
|------------------------------|------------|------------|------------|----------------------------|
| Displacement & strain | (102~94) ℃ | (102~90) ℃ | (102~93) ℃ | Wind transition combustion |
| Internal time/min | 18 | 38 | 68 | 106 |
| u_x /mm | 0.007 3 | 0.021 | 0.16 | 0.19 |
| u_y /mm | 0.006 | 0.005 | 0.20 | 0.24 |
| ϵ_x / $\mu\epsilon$ | 143 | 36 | 154 | 271 |
| ϵ_y / $\mu\epsilon$ | 22 | 29 | 24 | 65 |

4 光测法所测应变与焊接固定点所测结果比较

为了与 DSCM 所测数据互验,采用焊接固定点测量位移法对热风炉在燃烧、送风、切换三种不同状态下蓄热室炉壳的环向和轴向变形量进行了测量.

采用固定点测位移求应力的基本原理:固定点位移测量方法是在炉壳测量区焊接四个凸头,如图 11. 在送风、燃烧等工况下,量取点的位移 δx 、 δy , 利用广义胡可定律计算出结构表面的应变和应力.

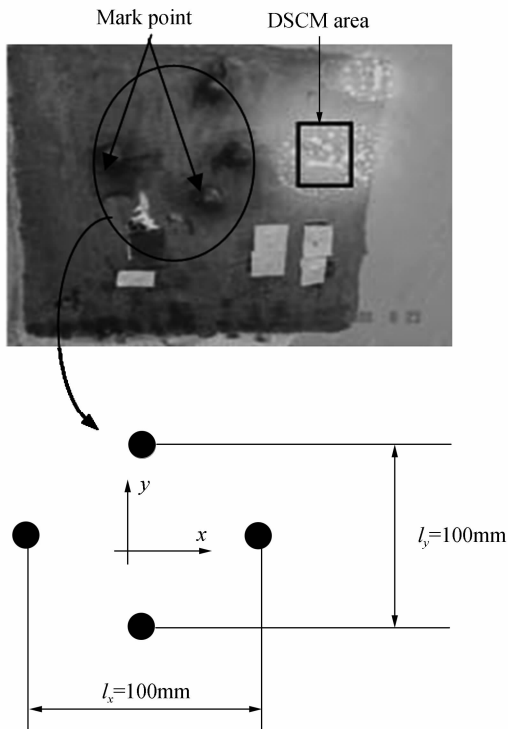


图 11 焊接固定点标距示意图

Fig. 11 Schematic of welding fixed point

对于炉壳问题,由于其是一个细长的薄壁结构,因此可以近似地用薄壁桶应力状态概念来分析,即炉壳表面的一点应力是出在平面应力状态,两个主应力方向是平行壳体的环向和轴向,所以 $\delta_x = \delta_1$, $\delta_y = \delta_2$.

根据平面问题的胡克定律

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_2), \epsilon_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu\sigma_1) \quad (4)$$

E 和 ν 为炉壳的弹性模量和泊松比. 而应变与位移的关系为

$$\epsilon_1 = \frac{\delta_1}{l_x}, \epsilon_2 = \frac{\delta_2}{l_y} \quad (5)$$

将式(5)带入到式(4)中,整理得

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_1 + \nu\epsilon_2) = \frac{E}{1-\nu^2}\left(\frac{\delta_1}{l_x} + \nu\frac{\delta_2}{l_y}\right) \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_2 + \nu\epsilon_1) = \frac{E}{1-\nu^2}\left(\frac{\delta_2}{l_y} + \nu\frac{\delta_1}{l_x}\right) \quad (7)$$

式中 δ_1 和 δ_2 为炉壳的环向与轴向位移, σ_1 与 σ_2 为相应的环向与轴向应力, l_x 与 l_y 为环向与轴向的标距长度. 从式(6)和式(7)中可以看到,如果能测取 δ_1 和 δ_2 的位移量,应用式(5)~(7)可求得测点的应变、应力值. 表 2 为光测与焊接固定点数据比较,结果较为吻合.

表 2 光测与焊接固定点数据比较

Table 2 The data comparison between DSCM and fixed point

| Picking condition | Circumferential strain/ $\mu\epsilon$ | | Axial strain/ $\mu\epsilon$ | |
|---------------------------|---------------------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|
| | DSCM | Weld fixed point | DSCM | Weld fixed point |
| | First pickup combustion | 143 | 136 | 22 |
| Second pickup combustion | 36 | 30 | 29 | 25 |
| First pickup sending wind | 154 | 146 | 24 | 20 |

5 结论

本文借助了高准确度数字散斑相关技法,并结合标记点法对高炉热风炉力学进行了测试,可以直接且独立准确地测出由于温度引起的热风炉壳的位移场和应变场. 由测试结果得出热风炉壳的位移场等直线,即环向位移呈现竖向条纹,趋势较为明显,位移数值较为均匀,轴向位移总体呈现水平状位移等值线,并且位移数据较为均匀. 由位移场得到了应变场,由于温差变化不大,由此产生的最大热应力为 63.85 MPa,结果表明:炉壁外表面,由热交换引起的应力远小于钢材的许用应力,所以结构运行安全. 总的来说,本次测试数据有效,为高炉热风炉的实测提供了经验.

致谢:感谢上海第二工业大学瞿志豪教授和清华大学金观昌教授在实验过程和软件使用中的指导!

参考文献

- [1] XIE Hui-min, LIU Zhang-wei, ZHU Hong-wei, et al. Study on mechanical behavior of single-wall carbon nanotubes by using digital speckle correlation method(DSCM)[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(4): 449-454.
谢惠民,刘战伟,朱宏伟,等.单壁碳纳米管力学行为的数字散斑相关法实验研究[J]. *光学技术*, 2004, **30**(4): 449-454.
- [2] LIU Ning, ZHAO Ying-hua, JIN Guan-chang, et al. Experimental study of concrete beams strengthened with carbon fiber sheet using digital speckle correlation method[J]. *Engineering Mechanics*, 2004, **21**(4): 179-83.
刘宁,赵颖华,金观昌,等.碳纤维布加固钢筋混凝土梁的 DSCM 实验研究[J]. *工程力学*, 2004, **21**(4): 179-83.
- [3] YANG Guo-biao, ZHU Qi-rong, ZENG Wei-ming, et al. The strain measurement study on welded connections in statically load aluminum alloy structures with moire intervention & digital correlation method[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2007.

- 28(3): 198-201.
杨国标,朱启荣,曾伟明,等. 铝合金对接缝几何云纹干涉测量法和数字相关法应变测试研究[J]. 计量学报, 2007, 28(3): 198-201.
- [4] JI Hong-wei, YU Ben-nong, PING You-mei, *et al.* Investigation of the mechanical properties of molded pulp with DICM[J]. *Packing Engineering*, 2004, 25(4): 168-170.
计宏伟,余本农,平幼妹,等. 用数字相关测量方法研究纸浆模塑材料拉伸时的力学性能[J]. 包装工程, 2004, 25(4): 168-170.
- [5] XU Man-qiong, YAO Xue-feng, WANG Ge, *et al.* Experimental studies on bending failure mechanics of bamboo laminate[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2004, 19(3): 347-352.
徐曼琼,姚学峰,王戈,等. 竹材层合板弯曲破坏机理的实验研究[J], 实验力学, 2004, 19(3): 347-352.
- [6] YAO Xue-feng, MENG Li-bo, JIN Guan-chang, *et al.* Full-field deformation measurement of fiber composite pressure vessel using digital speckle correlation method[J]. *Polymer Testing*, 2005, 24(2): 245-251.
- [7] TANG Chen, WANG Lin-lin, YAN Si, *et al.* Displacement field analysis based on the combination digital speckle correlation method with radial basis function interpolation[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(24): 4545-4553.
- [8] GUO Li-ping, SUN Wei, HE Xiao-yuan, *et al.* Application of DSCM in prediction of potential fatigue crack path on concrete surface[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(3-4): 643-651.
- [9] WENG Wei, PENG Rui-dong, LIU Hong-bin, *et al.* Automatic measurement of concrete deformation field under uniaxial compression based on DSCM[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 320: 58-63.
- [10] PAN Bing, XIE Hui-min, WANG Zhao-yang. Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching[J]. *Applied Optics*, 49(28): 5501-5509.
- [11] 孟立波. 数字散斑相关方法的研究和应用[D]. 北京:清华大学, 2005: 114-115.

Application and Technology of Stress and Strain Measurement Based on Digital Speckle Correlation Method

MI Hong-lin

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: The stress states are measured for hot wind furnace of balst in working and reliable data are supplied for safety operation. Displacements and strains of shell of hot wind furnace are measured by digital speckle correlation method (DSCM) in real time. Simultaneously, mark point method is also adopted for measuring the displacements and strains of hot wind furnace shell in order to compare the results obtained by DSCM. In the experiment, displacements and strains of circular and axial direction for furnace shell are obtained successfully. And the results obtained by DSCM and mark point method agree well. Through on-the-spot test, it can be concluded that the working stresses are lower than permissible stresses under different working states for hot wind furnace. So the operation of the hot wind furnace is safety.

Key words: Digital speckle correlation method(DSCM); Hot wind furnace; Displacement; Strain