

文章编号: 1001-4888(2018)01-0134-07

低碳钢应变场与温度场的耦合试验分析^{*}

赵亚军^{1,2}, 窦远明¹

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 河北工程大学土木工程学院, 邯郸 056038)

摘要: 为研究应变场与温度场之间的耦合关系, 对低碳钢平板试样开展静态拉伸试验。利用数字图像相关 (Digital Image Correlation, DIC) 方法与红外热成像 (Infrared Thermography, IR) 方法获得试样表面位移/应变场和温度场。试验结果表明: 在弹性变形阶段, 试样表面温度有小幅下降; 在塑性变形阶段, 应变越大, 温度越高, 应变场与温度场的变化都呈现相似的局部性; 峰值后的颈缩阶段, 颈缩部分的应变和温度都出现骤增现象。最大温升与最大应变呈非线性关系, 其变化规律分为 3 个阶段: 弹性变形阶段的微小降温、塑性变形阶段的急剧升温 and 颈缩阶段的平缓升温。

关键词: 数字图像相关; 红外辐射温度; 耦合分析; 颈缩

中图分类号: TH114; O348

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-134

0 引言

非接触全场测量技术已广泛应用于工程测试, 其中数字图像相关方法 (Digital Image Correlation, DIC) 方法^[1]与红外热成像 (Infrared Thermography, IR) 方法^[2]成为近年来常用的测试方法。DIC 方法用于测试构件表面全场位移、应变, 在工程结构的静态测量^[3-5]与动态测量^[6]中已取得很大进展, Huňady 等^[7]利用高速 DIC 技术对平板进行的振动模态参数的分析。IR 技术是一种非接触式和非破坏性检测技术, 用于测试构件表面红外辐射温度场, 可以生成热图像来显示物体表面的温度分布^[8,9], 程腾等^[10]利用热成像无损检测技术对囊体布热合缺陷进行了检测, 符师桦^[11]与 Hu^[12]等分别应用 DIC 技术和 IR 技术研究了合金的 PLC 效应。

金属材料在单向拉伸时会引起表面位移、应变的变化, 同时变形过程中伴随着能量耗散, 又会引起表面温度的变化^[13], 采用 DIC 技术和 IR 技术相结合的测试方法可以直观地研究应变场和温度场的相关性。本文将通过对低碳钢平板试样进行拉伸试验, 采用 DIC 方法和 IR 技术得到拉伸过程中的表面应变场和温度场的变化规律, 进一步分析应变场和温度场之间的关系, 同时用夹式引伸计对 DIC 方法测试结果进行矫正。

1 DIC 与 IR 技术试验原理

1.1 DIC 方法原理

DIC 技术的优势在于全场测量、非接触、光路简单, 可以用于监测大表面积。DIC 方法处理的是变形前后记录的两幅数字图像, 通常将变形前的数字图像称为“参考图像”, 变形后的数字图像称为“变形后图像”。它的基本原理如图 1 所示。在参考图像中取以某待求点 (x, y) 为中心的大小为 $(2m+1)$ pixel

^{*} 收稿日期: 2017-06-21; 修回日期: 2017-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51378169); 河北省交通运输厅项目 (Y-2012046) 资助

通讯作者: 窦远明, 男, 教授, 博导, 博士, 主要从事结构工程及岩土工程研究。Email: douyuanming@163.com

$\times(2m+1)$ pixel 的矩形参考图像子区, 在变形后的图像中取一目标图像子区, 则目标图像子区和参考图像子区具有一定的相关性, 可用相关系数表达。按照一定的搜索方法找到一个以 (x', y') 为中心的目标图像子区, 这种相关性达到了最大值, 参考图像子区在变形后就一一对应于该目标图像子区, 根据两点的坐标差值即可得到该点的位移信息。

数字图像相关方法相关系数 C 表达式为:

$$C = \frac{\sum \sum [f(x, y) - \bar{f}] \cdot [g(x', y') - \bar{g}]}{\sqrt{\sum \sum [f(x, y) - \bar{f}]^2 \cdot \sum \sum [g(x', y') - \bar{g}]^2}} \quad (1)$$

式中, $f(x, y)$ 为参考图上坐标 (x, y) 点的灰度; $\bar{f}$ 为参考图像子区域的平均灰度; $g(x', y')$ 为目标图上坐标为 (x', y') 点的灰度; $\bar{g}$ 为目标图像子区域的平均灰度。

1.2 红外热像技术原理

任何物体温度高于绝对零度时, 都会产生红外辐射, 红外辐射即红外线, 是指波长为 $0.78 \sim 1000 \mu\text{m}$ 的电磁波, 用红外热像仪能够提供精确的非接触全场温度测量功能。红外热像技术就是基于热传导方程与辐射定律发展而来^[14]。

红外辐射能计算公式:

$$P = \delta \zeta T^4 \quad (2)$$

式中, P 为辐射能, W/cm^2 ; δ 为玻尔兹曼常量, $\delta = 5.673 \times 10^{-12} \text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K}^4)$; ζ 为普通物体的发射率, $0 < \zeta < 1$; T 为物体表面的热力学温度, K 。

热传导微分方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \cdot \alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (3)$$

式中, t 为时间; α 为导热系数, m^2/s ; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$; ρ 为密度; c 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

2 试验方案

2.1 试样的制备

试样为低碳钢平板拉伸试样, 根据金属材料 GBT228—2002 拉伸试样国家标准, 试样厚度 3mm , 外形尺寸如图 2。

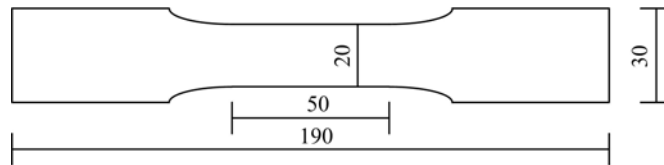


图 2 试样形状尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Specimen shape and dimensions(unit: mm)

由于低碳钢红外辐射系数很小, 只有约 0.05 , 且受到表面粗糙度等因素的影响, 因此, 试验之前, 试样表面需要喷涂一层辐射系数大的油漆, 以确保温度测量的精度。首先喷涂一层白色哑光漆, 再用专业制斑工具在表面制作黑色斑点, 用于 DIC 测量。

2.2 仪器设备

加载设备采用济南试金集团的 WDW-100 电子万能试验机, 红外辐射照片采集采用美国 FLUKE 红外热像仪, 3D-DIC 测量采用美国 CSI 公司的 500 万像素 CCD 相机及图像处理系统。

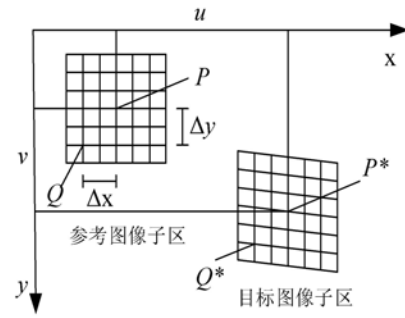


图 1 数字图像相关方法原理
Fig. 1 The principle of digital image correlation method

2.3 试验方案

万能试验机采用等速位移方式加载,加载速率为 3mm/min,夹式引伸计标距为 50mm,最大量程 25mm。为便于试验数据对比,DIC 图像与红外热像图同时采集,由于试样表面为喷漆处理,因此辐射系数设为 0.95,背景温度为 15℃。

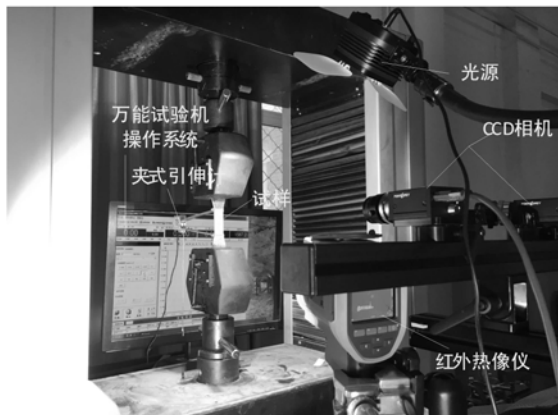


图 3 试验装置

Fig. 3 Experimental facility

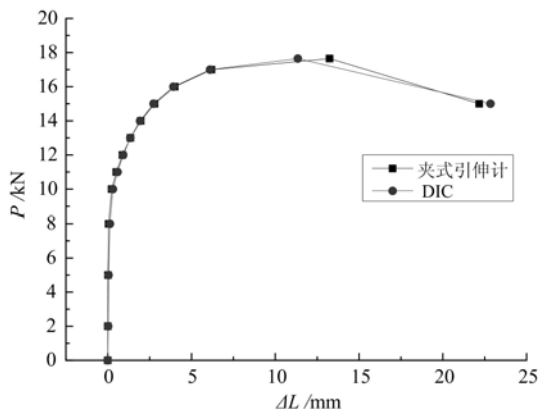


图 4 P— ΔL 曲线

Fig. 4 P— ΔL curve

3 试验结果分析

3.1 材料的力学性能

通过对低碳钢平板试样进行拉伸试验,得到材料的力学性能,见表 1。采用夹式引伸计和 DIC 方法分别得到 P— ΔL 曲线,如图 4 所示,通过对比,试验结果吻合良好,说明了基于 DIC 方法的位移/应变测量系统的可靠性和准确性。图 4 所示 P— ΔL 曲线无明显屈服平台,是由于试样为平板试样,厚度较小所致。

表 1 材料的力学性能表

Tab. 1 The mechanics properties of the materials table

屈服荷载/kN	屈服应力/MPa	极限荷载/kN	极限应力/MPa	最大延伸率/%
10.5	174	17.65	295	49

3.2 基于 3D-DIC 的应变测试结果

图 5 为拉伸断裂全过程的轴向应变云图,由图 5 可知,在弹性变形范围内(图 5(a)(b)),测量区域的轴向应变 ϵ_y 是均匀分布的,云图呈现彩虹状轴向分布说明横截面上拉应变分布不均匀,原因是试样略有偏心拉伸,致使一侧拉力和应变较大,但沿轴线方向的应变值是相等的。进入塑性变形阶段后(图 5(c)-(j)),开始出现应变不均匀分布,随着荷载增加,局部应变开始逐渐增大,应变集中区域越来越向试样中间靠拢,至荷载峰值时(图 5(e)),轴向应变分布已呈现明显局部化现象,越靠近试样中部,应变越大,但两端应变较小。

荷载峰值过后,进入颈缩阶段(图 5(f)-(j)),颈缩阶段应变局部化现象更加明显,整体应变都有增加,但是颈缩部分应变增长明显,断裂前,局部变形过大已导致散斑模糊无法计算。

图 6 是荷载峰值前分析区域沿轴线方向的应变分布图,坐标 y 轴表示计算区域轴线方向计算点。由图 6 可见,弹性变形范围内应变分布均匀且应变很小,10kN 时应变约为 0.005。塑性变形阶段应变开始大幅增加,并出现应变非均匀分布,靠近中部的位置应变明显大于两端,至峰值 17.65kN 时,中部最大应变达到 0.269。

图 7 是颈缩阶段颈缩部分的应变分布图,可看到由于颈缩导致的应变骤增。图 7 中曲线图 5(i)不连续是由于变形过大导致散斑模糊而无法计算,可算部分最大应变已达到 2.0。

传统试验方法,如电阻应变计测试法,最大只能测 $5000 \sim 8000 \mu\epsilon$,对于本次拉伸试验,进入塑性变形阶段电阻应变计就已失效,而夹式引伸计只能得到标距范围的平均变形和平均应变,无法得到局部应变。相比传统试验方法,DIC 方法能够得到全场位移、应变,能够发现应变集中区域,对预测变形及破坏起到很大帮助。

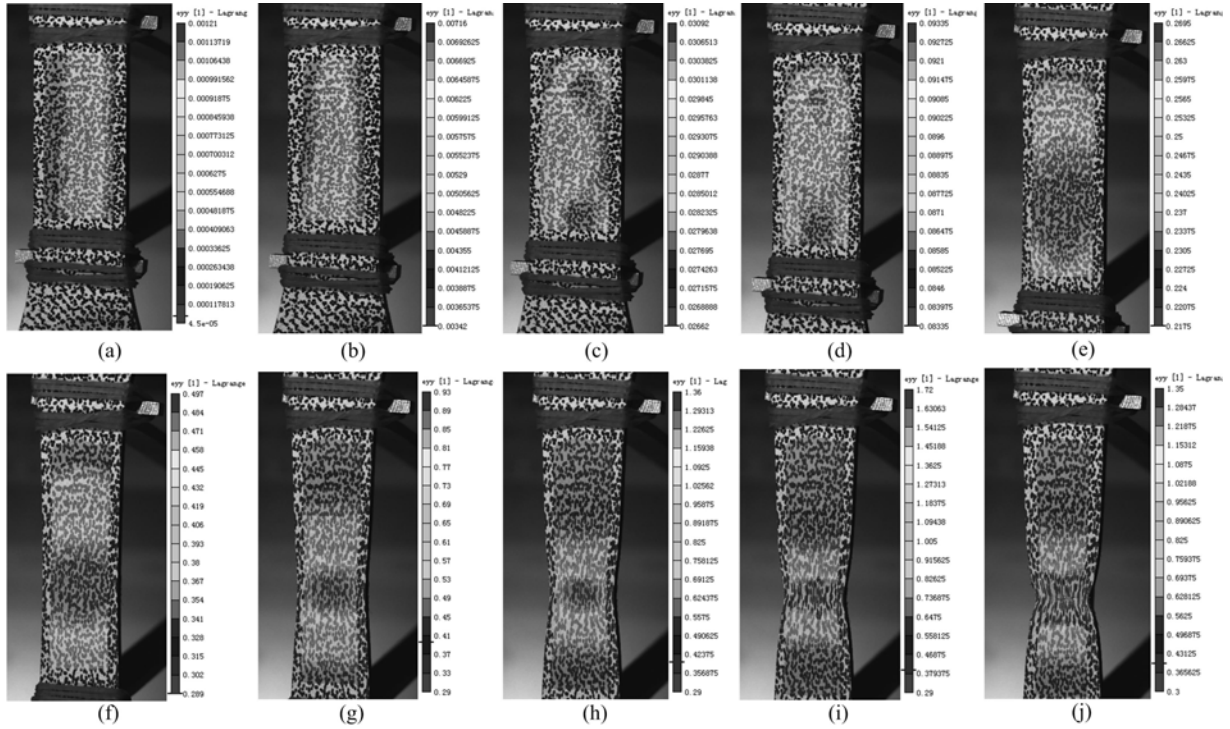


图 5 拉伸过程 ϵ_y 云图

(a)5kN; (b)10kN; (c)13kN; (d)16kN; (e)17.65kN; (f-j)颈缩断裂过程

Fig. 5 Strain nephogram of stretching process

(a)5kN; (b)10kN; (c)13kN; (d)16kN; (e)17.65kN; (f-j)Necking fracture process

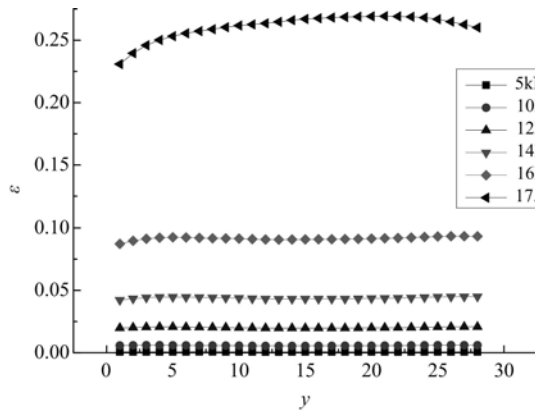


图 6 峰值前应变沿轴线分布图

Fig. 6 Strain distribution along the axis before peak load

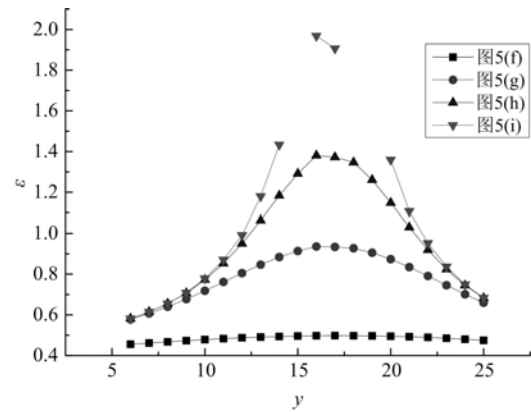


图 7 颈缩部分应变沿轴线分布图

Fig. 7 Strain distribution along the axis of necking

3.3 基于红外热像仪的红外辐射温度的测定结果与分析

由 Kelvin 公式^[15]可知,在弹性范围内,温度 T 与应变张量的关系可用公式(4)表示:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right\} = \rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} + T \beta_{ij} \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial t} \quad (4)$$

式中, x_i 为几何坐标; k_{ij} 为热导率张量; β_{ij} 为材料性能张量; ϵ_{ij} 为应变张量; ρ 为密度; c_v 为等容比热; t 为

时间。

在绝热情况下,式(4)变为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{T \beta_{ij}}{\rho c_v} \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial t} \quad (5)$$

式(5)表明,在弹性范围内,金属弹性变形会产生吸热效应,表面温度会降低,这在本次试验中得到验证,如图 8(a)(b)所示,弹性变形阶段,温度场分布较为均匀,温度随变形略有降低,最大温升为 -0.5°C ,如图 11 所示第一阶段。

图 8 为拉伸过程红外热像图,图 8 中(a)-(j)与图 5(a)-(j)为试验过程相应状态。试验前试样的初始温度为 16.5°C ,温升为试样温度减去初始温度。

塑性变形阶段,温度开始升高,并表现出温度场分布不均匀,越靠近中间塑性变形较大区域,温度越高。至负荷最大值 17.65kN 时,最高温度达到 19.6°C ,温升为 3.1°C 。峰值后进入颈缩阶段(图 8(f)-(i)),颈缩区域温度开始骤增,断裂前最高温度 25.5°C ,最大温升 9°C ,断裂后温度回落(图 8(j))。

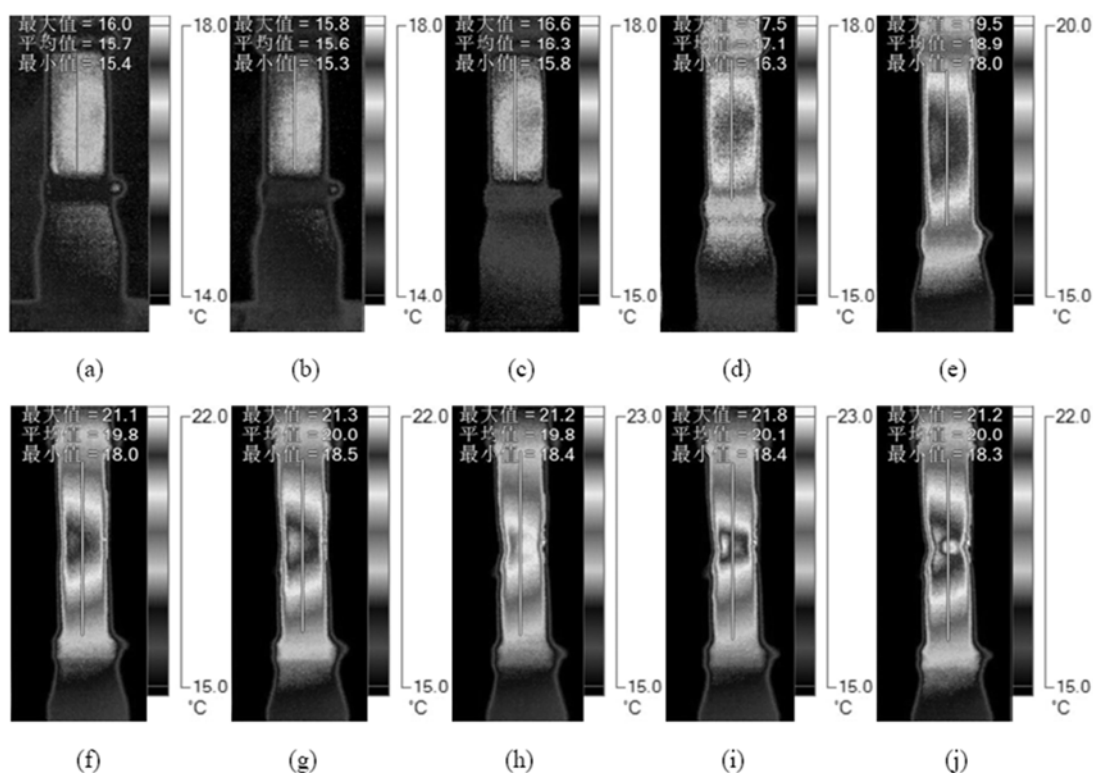


图 8 拉伸过程红外热像图

(a)5kN; (b)10kN; (c)13kN; (d)16kN; (e)17.65kN; (f-j)颈缩断裂过程

Fig. 8 Infrared thermogram of stretching process

(a)5kN; (b)10kN; (c)13kN; (d)16kN; (e)17.65kN; (f-j)Necking fracture process

图 9、图 10 为图 8 中所示直线上各点温度,由于试样拉伸变形较大,可见图 8、图 9 中各状态的 y 坐标大小不一。由图 9 可见,12kN 之后温升才为正,温度开始大幅增加,且分布越来越不均匀,越靠近中部温度越高。图 10 为颈缩阶段轴线温度分布,可见颈缩部位温度骤增。温度变化与应变变化现象一致,应变越大,温度越高。

低碳钢轴向拉伸过程红外辐射温度的变化规律分为 4 个阶段,如图 11,分别是弹性变形阶段的微小的温度降低阶段、塑性变形时的稳定增加阶段、颈缩时温度急剧增加阶段、断裂后降温阶段。

图 12 为测试区域最大温升与最大轴向应变的关系,由图可知,最大温升与最大应变呈非线性关系,其变化规律分为 3 个阶段,分别是弹性变形阶段的微小降温、塑性变形阶段的急剧升温、颈缩阶段的平缓升温。

图 12 与图 11 升温速率的不同主要是由于颈缩阶段时间较短,而此过程中产生的局部应变很大。

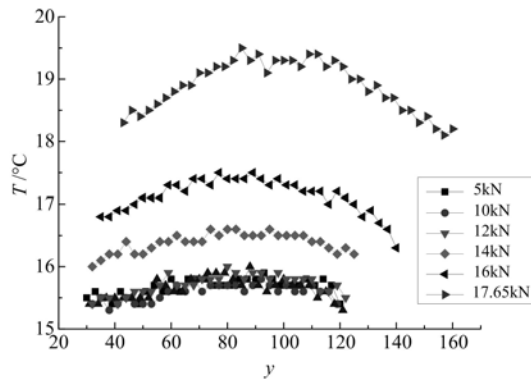


图 9 峰值前温度沿轴线分布图

Fig. 9 Temperature distribution along the axis before peak load

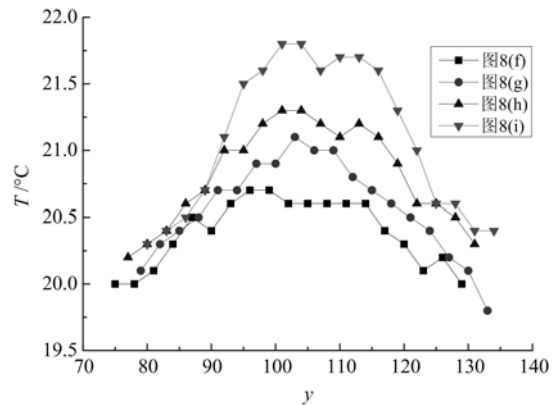


图 10 颈缩部分温度沿轴线分布图

Fig. 10 Temperature distribution along the axis of necking

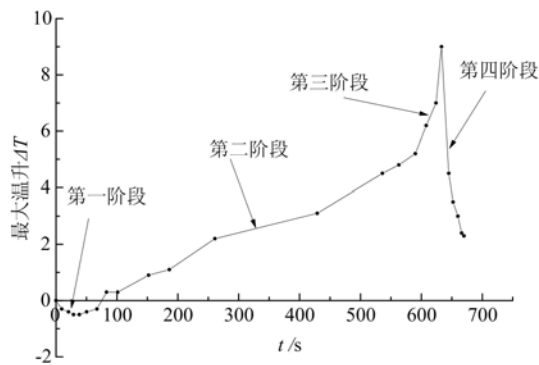


图 11 $\Delta T_{\max} - t$ 曲线

Fig. 11 $\Delta T_{\max} - t$ curve

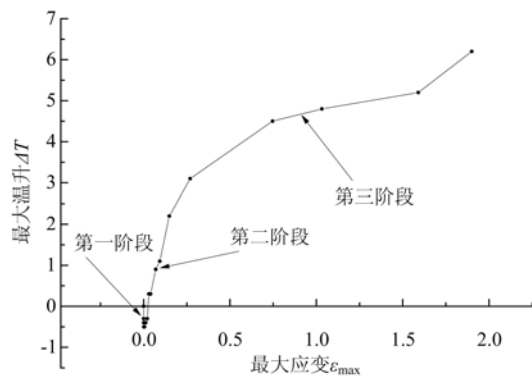


图 12 $\Delta T_{\max} - \epsilon_{\max}$ 曲线

Fig. 12 $\Delta T_{\max} - \epsilon_{\max}$ curve

4 结论

将 DIC 方法与红外热像技术相结合对材料的应变场和温度场进行耦合分析,能够精确获得分析区域的应变分布和温度分布,对比研究表明,应变场与温度场间呈现强烈的非线性关系,具有明显的阶段特性。在弹性阶段,应变场和温度场分布较为均匀,由于金属弹性变形的吸热效应,温度随应变增大略有下降,而在塑性变形阶段,应变场和温度场呈现相似的不均匀分布,应变越大,温度越高。由温升峰值与应变峰值的变化关系得到 3 阶段模型:弹性变形阶段的微小降温,塑性变形阶段的急剧升温,颈缩阶段的平缓升温。该模型能够为金属材料的应变-热效应研究提供参考依据。

参考文献:

- [1] Peters W H, Ranson W F. Digital image techniques in experimental mechanics[J]. Optical Engineering, 1982, 21 (3): 427—431.
- [2] 郭天太. 红外热成像技术在无损检测中的应用[J]. 机床与液压, 2004, 2: 110—111 (GUO Tiantai. Application of infrared thermal imaging technique in non-destructive testing[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2004, 2: 110—111 (in Chinese)).
- [3] Yates J R, Zanganeh M, Tai Y H. Quantifying crack tip displacement fields with DIC[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77: 2063—2076.
- [4] Hamrat M, Boulekbache B, Chemrouk M, et al. Flexural cracking behavior of normal strength, high strength and high strength fiber concrete beams, using Digital Image Correlation technique[J]. Construction and Building

- Materials, 2016, 106:678—692.
- [5] Tahreer M Fayyad, Janet M Lees. Application of digital image correlation to reinforced concrete fracture[J]. Procedia Materials Science, 2014, 3:1585—1590.
- [6] Mahal M, Blanksvärd T, Täljsten B, et al. Using digital image correlation to evaluate fatigue behavior of strengthened reinforced concrete beams[J]. Engineering Structures, 2015, 105:277—288.
- [7] Huñady R, Hagara M. A new procedure of modal parameter estimation for high-speed digital image correlation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 93:66—79.
- [8] Risitano A, Risitano G. Cumulative damage evaluation of steel using infrared thermography[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2011, 54(2):82—90.
- [9] Datcu S, Ibos L, Candau Y, et al. Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography[J]. Infrared Physics & Technology, 2005, 46(6):451—467.
- [10] 程腾, 吴健雄, 张勇, 等. 囊体布热合缺陷的锁相热成像无损检测技术研究[J]. 实验力学, 2015, 30(5):581—586 (CHENG Teng, WU Jianxiong, ZHANG Yong, et al. On the lock-in thermography non-destructive testing of heat sealed capsule body cloth defect[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(5):581—586 (in Chinese))
- [11] 符师哗, 高越, 潘华烨, 等. 数字散斑相关法研究镍钴基高温合金中的 PLC 效应[J]. 实验力学, 2012, 27(5):581—586 (FU Shihua, GAO Yue, PAN Huaye, et al. Investigation on Portevin-Le Chatelier Effect in a Ni-Co based superalloy base on digital speckle correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(5):581—586 (in Chinese))
- [12] Hu Q, Zhang Q, Cao P, et al. Thermal analyses and simulations of the type A and type B Portevin-Le Chatelier effects in an Al-Mg alloy[J]. Acta Materialia, 2012, 60(4):1647—1657.
- [13] 薛书文, 雷雨, 陈习权. 脉冲红外热成像无损检测的物理检测机理[J]. 电子科技大学学报, 2005, 34(3):320—322 (XUE Shuwen, LEI Yu, CHEN Xiquan. Physical basis and detecting principles of the real pulse video thermography nondestructive testing[J]. Journal of UEST of China, 2005, 34(3):320—322 (in Chinese))
- [14] 王凯, 严伯刚, 张泓源, 等. 红外热像无损评估技术在建筑工程中的应用[J]. 混凝土, 2015, 5:154—160 (WANG Kai, YAN Bogang, ZHANG Hongyuan, et al. Infrared thermograph nondestructive evaluation technique and its application in construction engineering[J]. Concrete, 2015, 5:154—160 (in Chinese))
- [15] Fung Y C. Foundation of solid mechanics[M]. London: Prentice-Hill Inc, 1965:388.

Coupling experimental analysis of strain field and temperature field of low carbon steel

ZHAO Ya-jun^{1,2}, DOU Yuan-ming¹

(1. School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: In order to study the coupling relationship between strain field and temperature field, a static tensile experiment was carried out for plate specimen made of low carbon steel. The displacement/strain field and temperature field on specimen surface were obtained by using digital image correlation (DIC) method and infrared thermography (IRT) method. Experimental results show that on the elastic deformation stage, the temperature on sample surface decreases slightly. On the plastic deformation stage, the greater the strain is, the higher the temperature, the variation of strain field and temperature field presents similar locality. On the necking stage after peak value, the strain and temperature of necking part show a sudden increase. The maximum temperature rise and the maximum strain exhibit nonlinear relation. Its variation can be divided into 3 stages: the temperature decreases on elastic stage, the temperature rises sharply after yielding and rises slightly on necking stage.

Keywords: digital image correlation; infrared radiation temperature; coupling analysis; necking