

文章编号:1001-5078(2023)01-0064-06

· 红外技术及应用 ·

基于红外热像法的金属裂纹扩展研究

肖汉斌, 秦佳乐, 祝 锋, 罗洋溢, 裴雪冬, 刘 敏

(武汉理工大学交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:疲劳裂纹是金属结构件在工程实际中常见的失效形式之一, 裂纹的扩展则会导致大部分塑性功以热量的形式耗散, 因此基于红外热像法的金属结构温度监测是实现裂纹扩展评估的有效方法之一。本文分析了金属裂纹扩展过程中材料的热耦合方程, 使用 ABAQUS 软件进行直接热力耦合数值模拟, 揭示了塑性功转化系数、拉伸速度对单轴拉伸载荷下含裂纹的 Q235 试件表面温度变化的影响规律, 并基于红外热像仪测量试验得到了同数值模拟吻合度较高的结果, 以此验证了此规律的正确性。结果显示, 拉伸过程中试件表面温度经过平稳阶段、稳步上升阶段。裂纹扩展过程中, 试件表面温度最高点位于裂纹尖端前方。同时拉伸速度越大, 试件断裂时间短, 裂纹扩展过程中热损失越小, 试件表面温升越大。该结果对金属结构的裂纹监测和预警具有重要意义。

关键词:裂纹扩展; 红外热像法; 单轴拉伸; 有限元分析

中图分类号: TN219 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.01.009

Research on metal crack extension based on infrared thermal imaging

XIAO Han-bin, QIN Jia-le, ZHU Feng, LUO Yang-yi, PEI Xue-dong, LIU Min

(School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Fatigue cracking is one of the most common failure forms of metal structural parts in engineering practice, and the expansion of cracks leads to the dissipation of most of the plastic work in the form of heat. Therefore, an infrared thermal imaging-based temperature monitoring of metal structures is one of the effective methods for assessing crack expansion. In this paper, the thermal coupling equation of the material during the crack growth is analyzed, and the direct thermal mechanical coupling simulation is carried out using ABAQUS software to reveal the effects of plastic work conversion coefficient and tensile speed on the surface temperature evolution of Q235 specimen with cracks under uniaxial tensile load. Finally, based on thermal imaging camera measurements, the correctness of this law is verified by obtaining a good agreement with the numerical simulation. The results show that the surface temperature of the specimen goes through a smooth phase and a steady increase during the tensile process. In the process of crack growth, the highest surface temperature of the specimen is located in front of the crack tip. At the same time, the higher the tensile speed, the shorter the fracture time of the specimen, the smaller the heat loss during crack extension and the higher the temperature rise on the surface of the specimen. The results are instructive for crack monitoring and early warning of metal structures.

Keywords: crack growth; infrared thermal imaging; uniaxial tensile; finite element analysis

作者简介:肖汉斌,男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为港口机械状态监测与故障诊断,机械系统动态设计,特种设备全役健康监测与安全性评价研究,现代港口物流技术与管理等。E-mail: xhbchina@126.com

通讯作者:刘 敏,女,硕士,实验师,主要研究方向为机械故障诊断与安全评价,物流系统优化。E-mail: liumin1989@whut.edu.cn

收稿日期: 2022-01-14; 修订日期: 2022-02-27

1 引言

金属结构故障通常与其加工工艺、作业工况和使用频率密切相关^[1],疲劳断裂是金属结构主要故障之一,而断裂是金属材料裂纹萌生和扩展的结果。金属结构的裂纹缺陷产生原因有很多种,如疲劳损伤、材料应力、异物冲击以及被锋利的物体刮擦等^[2-4]。因此,在金属结构裂纹扩展前期找到一种快速检测裂纹的方法,对避免事故发生和经济损失具有十分重要的意义^[5]。

金属结构中的裂纹在缓慢扩展过程中,裂纹尖端会产生应力集中,同时裂纹生长区会消耗大量的塑性功。伴随着塑性功的耗散,即使是非常缓慢移动的裂纹,金属构件表面也会产生温度场和声发射。基于此,金属结构裂纹扩展时可以产生足够强的温度场来进行测量。

金属结构温度场的探测常用的技术为红外热像检测,该技术因其无接触检测、检测范围大和效率高的特点深受学者的关注和研究。红外热像检测技术具有以下特点^[6-8]:(1)无接触、安全,检测时在设备的表面而不直接接触,可以防止在设备卸载过程中带来的危险;(2)简单、直观,红外热像技术操作较为简单,其检测所得到的结果形象直观;(3)效率高、范围广、检测的速度快,测量的结果精度高。

目前,国内外学者在红外热像检测方面均取得了较为客观的成果。Yang B^[9]等发现影响试件表面温度演化的因素,同时研究出疲劳过程中的温度演化模型。K. S. Bhalla^[10]等研究了302不锈钢I型裂纹扩展中的温度场,计算裂纹的能量通量。Ankang Cheng^[11]等根据断裂过程区累计的释放应变能与储存能之间的关系提出了一种基于能量原理的疲劳裂纹扩展预测模型。王浩^[12]等利用红外热像技术对航空工业发动机的叶片缺陷进行了研究。杜雪雪^[13]等利用红外热像技术对大型起重机械金属结构的裂纹进行检测识别分析。李源^[14]利用红外热像法计算疲劳耗散能,快速评估疲劳性能参数。王晓钢^[15]利用红外热像法研究金属疲劳的能量耗散,建立了一套疲劳评估体系。樊俊铃^[16]等人利用红外热像法建立了快速预测疲劳参数和参与寿命的模型。王为清^[17]等对Q235钢拉伸过程热塑性效应进行试验分析。

本文以Q235试件为研究对象,有限元数值分

析试件在等速位移单轴拉伸工况下的裂纹扩展情况和表面温度场演化过程,讨论不同塑性功转化系数 η 对有数值模拟结果的影响,绘制试件在裂纹扩展过程中的温度演化云图、等效塑性应变云图及损伤云图,更好的了解试件在试验过程中的塑性变化。并通过红外试验验证有限元仿真中试件表面温度演化数据结果的正确。本文的研究显示在拉伸载荷下试件裂纹扩展过程中伴随着大量能量释放,试件表面的温度有明显提高。因此红外检测可作为一种可行的金属结构裂纹快速检测方法。

2 裂纹扩展的热耦合方程

试件在拉伸过程中的热效应主要由热弹性效应、热塑性效应以及热传导组成。当材料发生塑性变形及塑性损伤时,一定伴随着热塑性效应,其中大部分塑性功转换为热并散失掉。热量传递的三种方式分别为热传导、热对流和热辐射。

热弹性部分可以表示为:

$$\dot{Q}_e = -\frac{E\alpha}{1-2\nu}T\dot{\varepsilon}_{kk}^e \quad (1)$$

式中, \dot{Q}_e 为热弹性部分; E 为弹性模量; α 为线膨胀系数; ν 为泊松比; T 为材料温度; ε_{kk}^e 为弹性应变张量;" \cdot "表示对时间的导数。

热塑性部分可以表示为:

$$\dot{Q}_p = \eta\sigma_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}^p \quad (2)$$

式中, \dot{Q}_p 为塑性功转换为热的部分; η 为塑性功转化系数,对金属来说, η 通常选择0.85~0.95; σ_{ij} 为应力张量。

对于密度均匀且各同向性的材料,如果将导热系数、热膨胀系数、密度及比热视为常量,由热力学第一定律、热力学第二定律及材料的本构方程,可推导出材料在拉伸变形时耦合的热传导方程为:

$$\rho c_v \dot{T} = \dot{Q}_e + \dot{Q}_p + K\nabla^2 T - \frac{2}{l}\dot{H}_{\text{loss}} \quad (3)$$

式中, ρ 为密度; c_v 为定容比热; K 为材料的热导率; l 为试件厚度。

公式(3)的右侧各项即分别为材料变形过程中热弹性效应、热塑性效应、热损失(热传导、热对流和热辐射)对温度变化的影响。

3 有限元数值分析

3.1 有限元实现方法

在数值模拟方面,目前对于热力耦合问题

ABAQUS 可以提供非耦合传热分析、顺序耦合热应力分析、完全耦合热应力分析及绝热分析。在拉伸试验过程中,试件表面的温度变化主要由力学变形产生,因此有限元分析选择完全耦合热应力分析。

3.2 有限元分析过程

利用 ABAQUS 模拟试件拉伸过程中的表面温度变化,主要步骤如下:

试件根据 GB/T228.1-2010 采用 Q235 钢标准拉伸板件试样,试样厚度为 2 mm。金属试样通过线切割机在试件一侧加工一条宽 0.5 mm、长 4 mm 的切缝,模拟初始裂纹,试件的尺寸如图 1 所示。

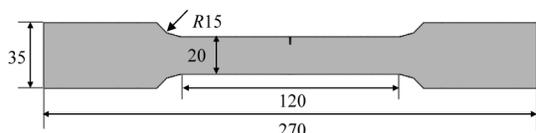


图 1 试件形状

Fig. 1 Specimen shape

试件在模拟拉伸产热的过程中,主要用到的材料参数如表 1 所示。由公式(3)可知,试件在逐步拉伸加载的过程中,热塑性部分是引起试件表面温度变化的主要因素,材料的塑性参数将直接影响数值模拟结果。ABAQUS 中采用塑性硬化模型来定义材料的塑性,本研究中使用 Johnson-Cook 模型,它是一种特殊的 Isotropic 模型,该模型适用于瞬时动态仿真分析。定义材料的失效形式,以及损伤参数,定义好材料属性后将其指定给部件。

表 1 Q235 材料室温性能

Tab. 1 Room temperature properties of Q235 materials

Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7860
Poisson's ratio	0.3
Modulus of elasticity/Gpa	212
Specific heat capacity/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	502
Coefficient of thermal expansion/ K^{-1}	12.2×10^{-6}
Thermal conductivity/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	46

本文数值模拟为温度-位移耦合,结合前文分析,决定采用扫掠网格技术,选用 C3D8RT 单元,以满足数值模拟要求。对裂纹扩展路径上进行网格加密,满足数值模拟精度要求。

3.3 有限元分析结果

图 2 为有限元数值模拟的 30 mm/min 拉伸速度下温度演化云图。由图中可以看出,随着裂纹的

扩展,试件表面温度逐步上升直至试件断裂,在试件断裂瞬间,试件表面温度达到最大值。试件表面的最高温度位于裂纹尖端前方,试件的塑性区为蝴蝶状的对称形状。从图中可以看出,试件表面的最高温度位于裂纹尖端前方,随着裂纹的扩展,试件的温度向两端传递。

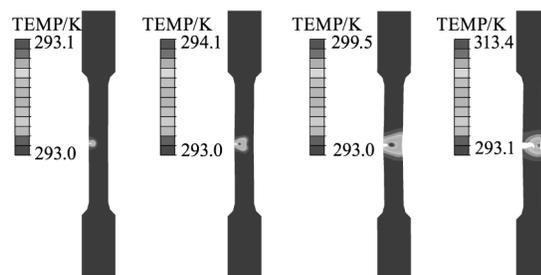


图 2 温度演化云图

Fig. 2 Temperature evolution cloud diagram

图 3 为试件裂纹扩展过程的等效塑性应变云图。本次有限元数值模拟模型采用的是弹塑性模型,可以对试件裂纹扩展过程中的塑性变化规律进行模拟。等效塑性应变代表了裂纹开始扩展前和裂纹开始扩展后一秒对材料的累积损伤,其值越大,表示塑性变形程度越高。

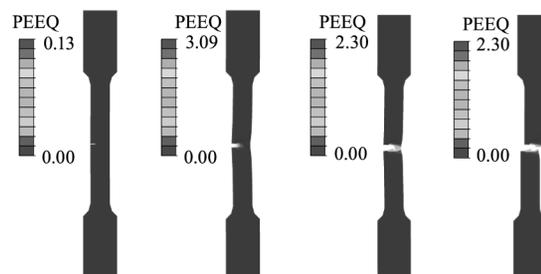


图 3 等效塑性应变云图

Fig. 3 Equivalent plastic strain cloud diagram

图 4 为试件裂纹扩展过程的损伤云图,0 表示没有损失,1 表示完全损失,即断裂。

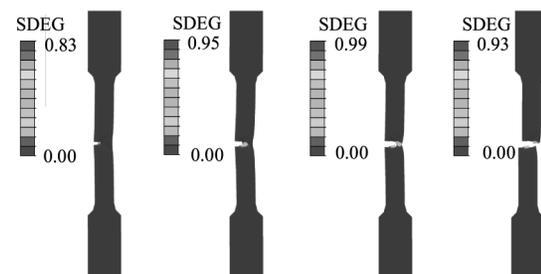


图 4 损伤云图

Fig. 4 Damage cloud diagram

4 有限元和试验对比验证

4.1 试验过程

在电子式万能试验机上使用等速位移控制方式

对试件进行单轴拉伸试验,Q235 试件的拉伸速度为 15 m/min、20 mm/min 和 30 mm/min。

在拉伸试验过程中使用浙江红谱科技 X600 型红外热像仪对试件表面的温度进行测量,并分别由两台计算机记录红外数据及拉伸试验数据,如图 5 所示。为使拉伸试件表面具有较高且均匀的表面发射率,在试件表面喷涂一层黑色的薄漆。最后在试验机上对试件进行加载试验,直至试件断裂,如图 6 所示。

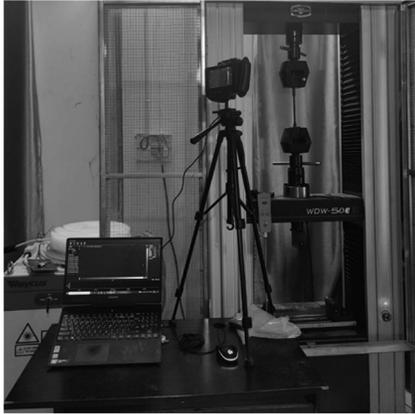


图 5 试验设备图片

Fig.5 Pictures of test equipment



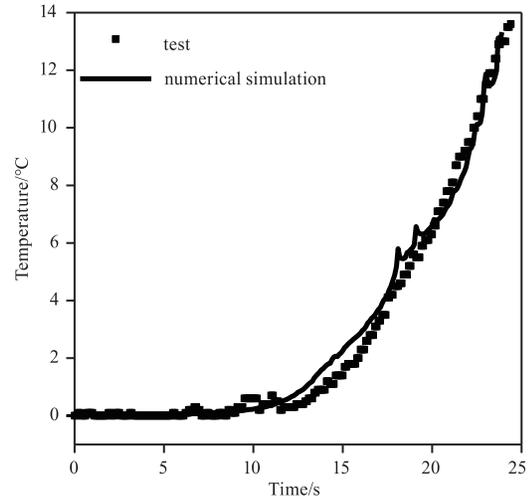
图 6 试件断裂图片

Fig.6 Fracture pictures of specimen

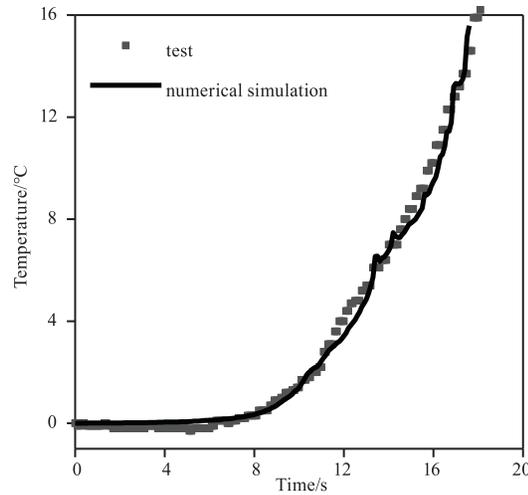
4.2 有限元及试验数据对比

图 7 为在拉伸速度为 15 mm/min、20 mm/min 和 30 mm/min 的试件试验得到的温度曲线和有限元数值模拟温升曲线对比图。从图中可以看出,试验得到的温度曲线与有限元数值模拟结果较匹配,即可以验证有限元数值分析的正确性。从图中可以得到试件拉伸过程中温度变化分为 2 个阶段,第一阶段裂纹扩展前平稳阶段,在这个阶段试件表面温度主要受热弹性影响,由于热弹性引起的温度变化较小,因此此阶段温度变化较平稳。第二阶段为温

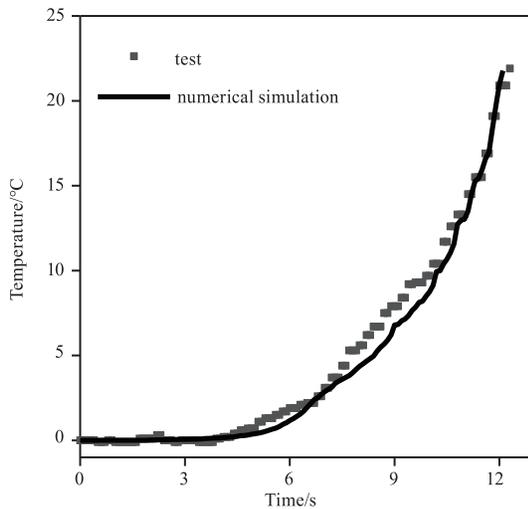
度稳步上升阶段,在这个阶段试件表面温度主要受热塑性影响,试件表面温度逐步上升,直至试件断裂。试件断裂时,试件表面温度达到最大值。同时从图中可以看出,拉伸速度越大,温度上升越高。



(a)拉伸速度15 mm/min



(b)拉伸速度20 mm/min



(c)拉伸速度30 mm/min

图 7 温升曲线的试验和数值模拟对比图

Fig.7 Numerical simulation and testing of temperature rise curves

如图8所示,拉伸速度30 mm/min 试验测得的载荷位移曲线与有限元数值模拟的载合位移曲线吻合良好。此曲线下的区域面积表示输入到材料中的能量,因此载荷位移曲线的吻合表明输入到样本的全局能量匹配良好。即验证了材料数值模拟参数的正确性。

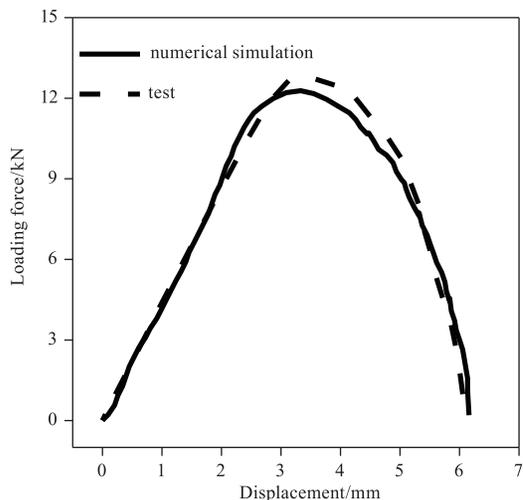
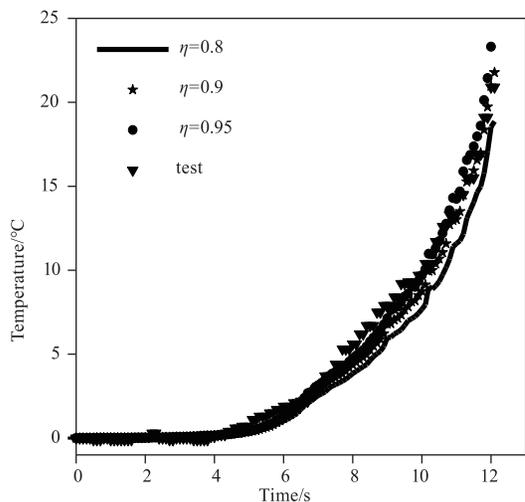


图8 拉伸速度30 mm/min 载荷位移曲线

Fig.8 Tensile speed 30 mm/min load displacement curve

图9为试验得到的温度曲线与塑性功转化系数 η 分别为0.8、0.9、0.95的有限元数值模拟温升曲线对比图,从图中可以看出塑性功转化系数 η 的取值对试件表面的温度变化有较大的影响, η 取值越大,塑性功转化为热量越高,试件表面的温升也越大。对比试验数据与有限元数值模拟结果,当 η 取0.9时,试验结果与数值模拟结果吻合良好。

图9 试验与不同 η 数值模拟对比图Fig.9 Comparison of numerical simulation and testing for different η

5 结论

(1) 对含裂纹 Q235 试件单轴拉伸试验进行了有限元数值分析,获得了不同拉伸速度下裂纹扩展过程中试件表面的温度变化。裂纹扩展过程中试件表面温度经过平稳阶段、温度稳步上升阶段、断裂后温度下降阶段。拉伸速度越大,试件断裂时表面温升越高。

(2) 塑性功转化系数 η 的取值对试件有限元数值模拟结果的温度有比较大的影响,对于 Q235 钢材,塑性功转化系数 η 可取 0.9。

(3) 试验结果和有限元数值分析结果的良好匹配,验证了使用有限元软件对裂纹扩展过程中的温度模拟的通用性。

参考文献:

- [1] Xiao X, Xiao H. Autonomous robotic feature-based free-form fabrication approach [J]. Materials, 2022; 15(1):247.
- [2] Wang J. Analysis of the hazards and causes of fatigue cracking [J]. Metal Processing (Thermal Processing), 2009(14):67-69.
- [3] Zhang Q, Lao W, Cui B, et al. Annual research progress on fatigue 2020 of steel bridges [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering (in English and Chinese), 2021, 43(S1):79-90.
- [4] Wang J, Wei X. Study on the mechanism of cold roll spalling caused by surface cracks [J]. Shanghai Metal, 2021, 43(6):110-114. DOI:10.19947/j.issn.1001-7208.2021.06.017.
- [5] Gao Y, Wang Z, Guo Z. Study on the effect of initial cracking on the fatigue life of ultra-high pressure vessels [J]. Electromechanical Engineering, 2021, 38(11):1506-1512.
- [6] Xiao X, Wang Y, Liu K. Non-destructive testing of process equipment based on infrared thermal imaging technology [J]. Chemical Machinery, 2020, 47(6):742-746.
- [7] Wei J, Liu J, He L, et al. Status of research and development of infrared thermal imaging nondestructive testing technology [J]. Journal of Harbin University of Technology, 2020, 25(2):64-72. DOI:10.15938/j.jhust.2020.02.009.
- [8] He J, Zhang C, Feng Fu, Zhang Y. Research status and application of infrared thermal wave nondestructive testing technology [C]//Proceedings of the 12th National Confer-

- ence on Equipment Fault Diagnosis,2010;299 – 302.
- [9] B Yang,P K Liaw,M Morrison,et al. Temperature evolution during fatigue damage[J]. *Intermetallics*,2004,13(3-4):419 – 428.
- [10] K S Bhalla, A T Zehnder, X Han. Thermomechanics of slow stable crack growth;closing the loop between experiments and computational modeling[J]. *Engineering Fracture Mechanics*,2003,70(17):2439 – 2458.
- [11] Cheng A,Chen N,Pu Y. An energy principles based model for fatigue crack growth prediction [J]. *International Journal of Fatigue*,2019,128:105198
- [12] Wang H,Liu J,Shi Y,Wang T. Research and application progress of active infrared thermal imaging technology in aero-engine blade defect detection[J]. *Laser & Infrared*,2021,51(12):1554 – 1562. (in Chinese)
王浩,刘佳,施亚中,等. 主动红外热像的技术在航空发动机叶片缺陷检测中的研究和应用进展[J]. *激光与红外*,2021,51(12):1554 – 1562.
- [13] Du X,Yin C,Tong X,Chen X. Application of infrared thermal imaging technology in metal crack detection of large cranes[J]. *Modern Manufacturing Engineering*,2021(4):121 – 125,131.
- [14] Li Y. Research on fatigue dissipation energy and its application in rapid prediction of fatigue performance [D]. Chansha:Hunan University,2013.
- [15] Wang X. Life prediction and fatigue analysis based on thermal imaging method[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2009.
- [16] Fan J,Guo X,Zhao Y,Wu C. Quantitative thermal imaging method to predict the S-N curve and residual life of welded joints [J]. *Materials Engineering*,2011(12):29 – 33.
- [17] Wang W,Yang L,Fan C,et al. Experimental study and finite element analysis of thermoplastic effect in Q235 steel tensile process[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2013,42(5):1153 – 1160.