

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210177

材料氢脆涡流评价的有限元仿真研究*

周海婷¹ 叶东东² 朱晨曦¹ 胡沁¹

(1. 中国计量大学质量与安全工程学院 杭州 310018; 2. 安徽工程大学人工智能学院 安徽 241000)

摘要: 针对扩散氢在材料内部渗透和聚集引起的氢脆问题,提出了一种基于涡流信号的表征方法。以电化学充氢试样为研究对象,首先基于 Fick 定律计算了电化学充氢过程中试样的氢分布,然后基于电磁感应原理运用 COMSOL Multiphysics 建立了不同氢分布状态下材料氢脆的涡流检测有限元模型,通过数值计算分析时谐电磁场激励下试样的感生涡流场分布及检测线圈的电磁场量图,并通过原位拉伸实验定量表征氢脆程度,最后分析了氢脆指数-涡流响应信号之间的关联机制,进行实验验证。研究结果表明,金属材料的氢脆程度与所含氢含量密切相关,时谐电磁场作用下的涡流信号与氢脆程度呈现线性相关,验证了材料氢脆涡流评价的有限元模型的有效性。

关键词: 无损评价;涡流检测;有限元仿真;氢脆

中图分类号: O441 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Finite element simulation study on eddy current evaluation of material hydrogen embrittlement

Zhou Haiting¹ Ye Dongdong² Zhu Chenxi¹ Hu Qin¹

(1. School of Quality and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. School of Artificial Intelligence, Anhui Polytechnic University, Anhui 241000, China)

Abstract: Aiming at the problem of hydrogen embrittlement caused by diffusion and accumulation of hydrogen in materials, a characterization method based on eddy current signal is proposed. Taking the electrochemical hydrogen charging sample as the research object, firstly, the hydrogen distribution of the sample in the electrochemical hydrogen charging process is calculated based on Fick's law. Then, based on the principle of electromagnetic induction, the eddy current detection finite element model of material hydrogen embrittlement under different hydrogen distributions is established by using COMSOL multiphysics. The distribution of induced eddy current field of the sample excited by time-harmonic electromagnetic field and the electromagnetic field diagram of the detection coil are analyzed by numerical calculation. The in-situ tensile test quantitatively characterized the degree of hydrogen embrittlement. The correlation mechanism between hydrogen embrittlement index and eddy current response signal was analyzed for experimental verification. The results show that the degree of hydrogen embrittlement of metal materials is closely related to the hydrogen content, and the eddy current signal under the action of a time-harmonic electromagnetic field is linearly related to the degree of hydrogen embrittlement, which verifies the effectiveness of the finite element model for eddy current evaluation of material hydrogen embrittlement.

Keywords: nondestructive evaluation; eddy current testing; finite element simulation; hydrogen embrittlement

0 引言

氢能产业全产业链包括制氢、储氢、输氢等环节,氢能产业的发展是国家能源结构转型的重大需求^[1-2]。随着全国加氢站的落地,氢能产业的发展进入了一个新的时期。

与此同时,储氢、输氢等环节结构件的安全保障显示极为重要。结构件在临氢环境下服役,氢以原子形式进入材料内部,在缺陷、晶界、夹杂等位置复合成分子,会引起材料性能的损失^[3-4]。氢元素的进一步富集,可能导致微裂纹的扩展,引起设备的失效^[5-6]。因此,针对结构件全生命周期安

收稿日期:2022-05-31

* 基金项目:浙江省自然科学基金(Q21E050068)、浙江省市场监管局“雏鹰计划”培育项目(CY2022220)、安徽省重点研究与开发计划(2022a05020004)项目资助

全保障问题,在金属材料早期氢损伤阶段进行氢脆程度的无损检测对于预防结构件的失效具有重要意义。

涡流检测技术是一种基于电磁感应原理的无损检测技术,具有检测速度快、耐高温等特点,广泛应用于各行各业。魏志恒^[7]研究了不同淬火状态下材料的电磁性能变化规律,提出了不锈钢淬火硬度的涡流检测方法。在氢损伤检测方面,Xu等^[8]将多频涡流检测应用于钛合金中的氢浓度检测,结果表明随着氢浓度和频率的增加,输出信号幅值减小。李衍^[9]将相控阵超声检测应用于承压设备氢损伤检测,实现了对微裂纹类小缺陷的检出。刘雪光等^[10]研究了氢蚀程度对声发射信号的影响,研究发现氢损伤程度加剧,高幅声发射信号的振铃计数增加。国内外学者在材料氢损伤检测方面取得了大量的研究成果,但多聚焦于氢致裂纹等中后期氢损伤状态的无损表征。而针对早期氢损伤程度的定量表征目前通常采用慢应变速率拉伸等破坏性力学实验来实现^[11]。超声检测可以实现微裂纹的检出^[12-13],但检测时需要耦合剂;声发射更适用于动态损伤过程^[14]。综上所述,本文将涡流检测技术应用于金属材料早期氢损伤的无损表征,对于临氢服役结构件的失效预防具有重要的研究意义。

本文通过电化学充氢技术及原位拉伸实验获得不同充氢时间下试样的力学性能指标,并通过延伸率这一指标来定量表征材料氢脆程度。基于COMSOL Multiphysics平台建立了材料氢脆涡流检测的有限元模型,通过有限元仿真分析获得了该模型的电磁场量分布,并且将仿真结果与试验结果对比,分析了该模型的可行性。为进一步研究材料氢损伤模型定量反演提供一定的理论基础。

1 试验材料及方法

1.1 试样制备

试样材料选用S500MC碳素合金钢,其化学成分如表1所示。采用激光切割技术加工原位拉伸试样和涡流检测试样,厚度1 mm,尺寸如图1所示。

表1 S500MC的化学成分

元素	Fe	C	S	P	Si	Mn	Ti
含量/%	bal	0.12	0.015	0.025	0.5	1.8	0.15

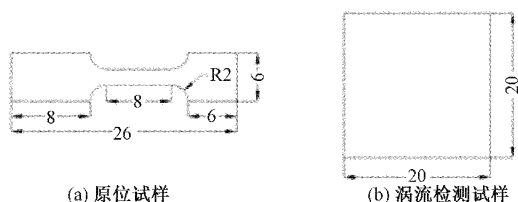


图1 试样尺寸(单位mm)

1.2 实验过程

采用电化学充氢的方式往材料中引入氢,所选用充氢

时间为1~124 h,实验装置如图2所示。通过如图3所示原位拉伸装置测量不同充氢条件下(充氢时间0,1,6,20,144 h)充氢前后试样的拉伸性能(拉伸速率0.2 mm/min),根据延伸率计算相应的氢脆指数^[15],定量表征材料氢脆程度。

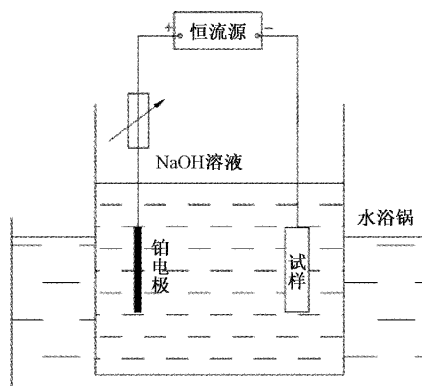


图2 电化学充氢装置示意图

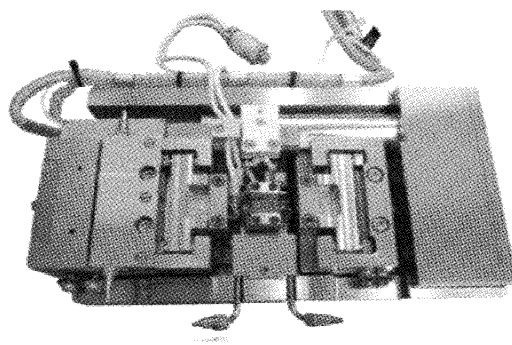


图3 原位拉伸装置示意图

2 涡流检测的有限元仿真

本文采用COMSOL Multiphysics有限元软件进行材料氢脆评价的有限元建模与计算,研究了交变电流激励下的磁场与电场耦合作用^[16],电磁场基本方程:

$$(j\omega\sigma - \omega\epsilon)\mathbf{A} + \nabla \times (\mu^{-1} \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_e \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2)$$

式中: j 为虚部单位量, ω 为角频率, μ 为磁导率, σ 为电导率, ϵ 为介电常数, \mathbf{A} 为矢量磁位, \mathbf{J}_e 为激励电流密度, \mathbf{B} 为磁感应强度。

构建了如图4所示的仿真几何模型。其中被测试样的材料为S500MC碳素合金钢,被测试样的几何尺寸为20 mm×20 mm×1 mm,被测试件试样性能电导率为 4.895×10^6 S/m,相对磁导率为1,相对介电常数为1,系统激励电流密度为 5×10^5 A/m²,激励电流频率为10 kHz。模型中空气层半径为40 mm,高度为80 mm,边界条件为矢量磁位 \mathbf{A} 为0,将求解域设定在空气层尺寸范围内。

氢原子的进入引起材料电阻率的变化,根据马西森定律^[17],假设材料电阻率与氢含量具有线性关系,并基于半

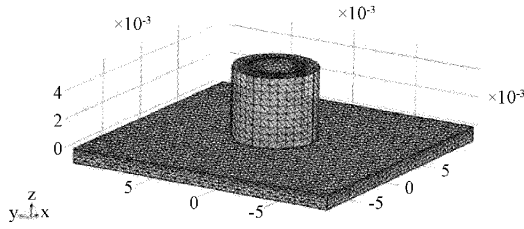


图 4 仿真几何模型

无限源氢扩散模型^[18]设置试样电导率,进而分析该有限元模型,参数设置如图 5 所示。

3 材料氢脆的涡流检测分析

3.1 电磁场量分析

由电磁感应原理可知,在时谐交变电场的激励下,在被测试样中感生形成涡流场,从而反作用于检测线圈形成感生磁场,影响信号输出。而氢进入材料,沿晶界、位错等扩散,从而引起材料主导散射机制的变化,表现为导电性的改变。因此可以通过分析时谐电磁场作用下的检测模型电磁

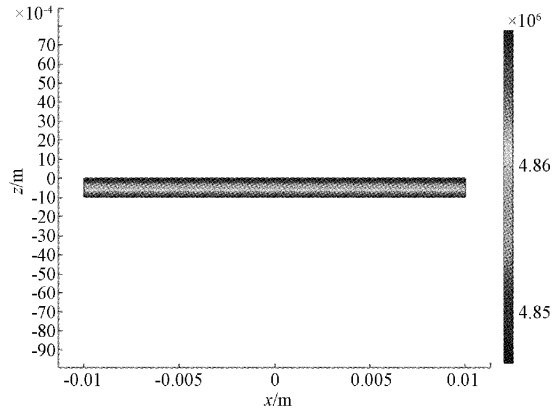


图 5 基于半无限源氢扩散模型的试样电导率分布图

场量的变化来分析材料的氢脆状态。检测模型的磁感应强度分布如图 6 所示。被测试样上表面与检测探头距离最近,磁力线分布最密集,磁感应强度最高。结果表明 10 kHz 激励频率作用下的探头检测深度大于被测试样厚度,检测区域为被测件厚度范围内的材料性能。

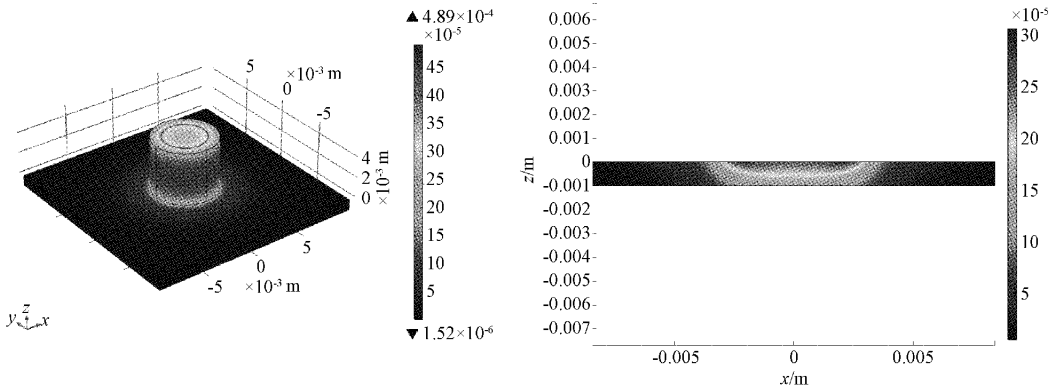
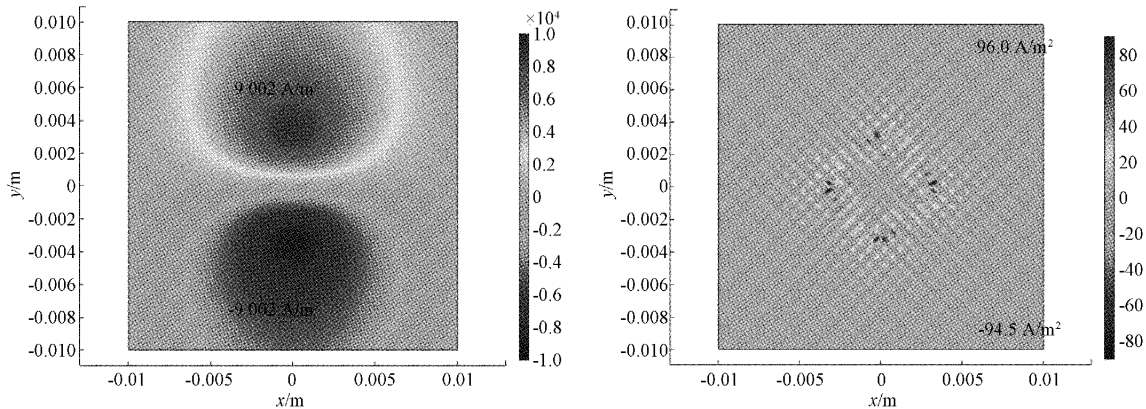


图 6 检测模型磁感应强度云图

检测模型被测试样表面的感生电流密度云图如图 7 所示。由图 7(a)和(b)对比可知,轴对称时谐电场激励作用下在被测试样表面及内部感生出的涡流场呈现轴对称状态;其中同一层界面的感生涡流场电流密度具有 x, y, z 三个分量,其中 x 分量和 y 分量分布状态相同;随着充氢

时间的增加,试样中的含氢量增加,感生电流密度 x, y 分量的幅值降低, z 分量的最大感电流场量变化,正方向幅值降低,负方向幅值增加。由此可知时谐电场作用下,不同充氢条件下的被测试样感生涡流场不同,因此,可进一步分析信号响应机制,建立材料氢脆程度的评价曲线。



(a) 未充氢试样: x 分量和 z 分量

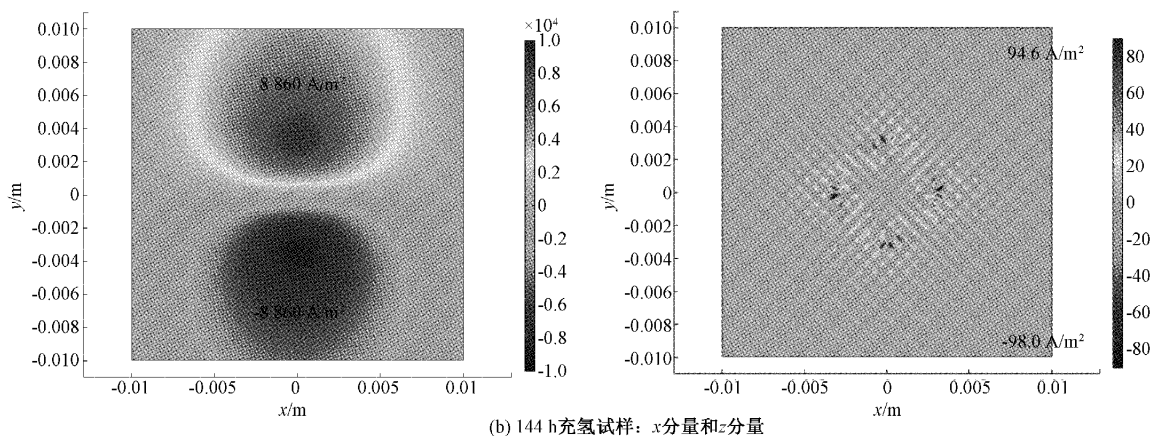


图 7 检测模型感生电流密度云图

3.2 氢脆的定量表征

不同充氢时间下的试样含氢量不同,引起的性能退化程度也不同。根据原位拉伸实验结果构建氢脆敏感性指标来定量表征氢的进入引起的金属材料性能退化状态,如式(3)所示。

$$EI = (E_{CSH0} - E) / E_{CSH0} \times 100\% \quad (3)$$

原位拉伸实验结果如表 2 所示,结果表明,随着充氢时间的增加,氢脆指数增大,材料氢致塑性损失程度提高,呈现指数相关趋势。

表 2 不同充氢条件下的氢脆敏感性指标

序号	断口标距/ mm	伸长率 E/%	氢脆敏感性 指标 EI/%	拟合氢脆 敏感性指标 EI/%
CSH0	10.487	31.086	0	0.232
CSH1	10.451	30.638	1.443	0.906
CSH6	10.406	30.075	3.253	3.472
CSH20	10.32	29.000	6.711	0.944
CSH144	10.295 5	28.694	7.696	7.776

3.3 氢脆的涡流表征

以未充氢试样检测信号为对比信号,进行差分计算得到有限元模型的仿真电场信号输出结果如图 8 和 9 所示。通过最小二乘法拟合分析仿真值与实验值的相关性,结果如图 8 所示。

拟合曲线决定系数(R^2)为 0.807 1,相关系数(r)为 0.898 3,因变量与自变量之间呈现出强相关关系,表明仿真结果与实验结果具有较高的相关性,验证了建立的有限元模型的有效性。

同时,通过建立氢脆指数与检测信号值(仿真结果、实验结果)之间的关系曲线实现材料氢脆的涡流评价,结果如图 9 所示。结果表明,实验值与仿真值均与氢脆指数具有高度的线性相关性;涡流信号值可用于评价材料氢脆程

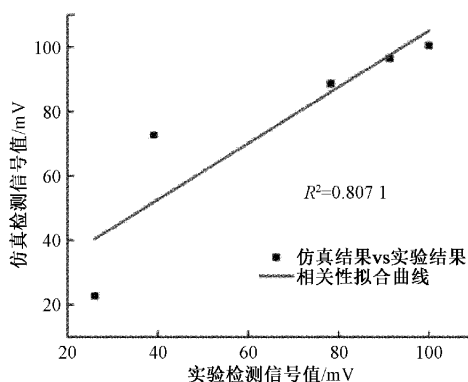


图 8 试验结果与仿真结果对比

度,且氢脆指数越高,即氢脆化程度越高,涡流信号值越大。涡流检测技术可有效得用于评价材料氢脆程度,帮助判定材料早期氢损伤程度。

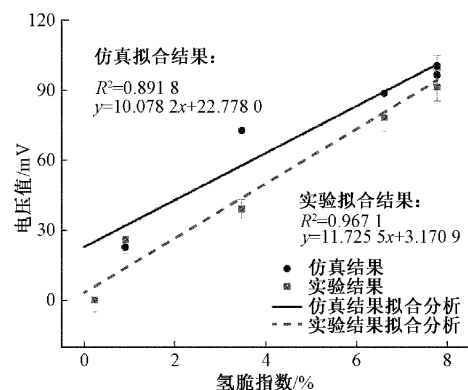


图 9 氢脆程度的涡流信号表征

4 结 论

本文基于 COMSOL 软件建立有限元仿真模型研究和分析了材料早期氢损伤的涡流评价方法,并通过试验验证了有限元模型的有效性,得到了如下的结论:

随充氢时间的增加,用延伸率表征的氢脆指数增大,并在一定充氢时间后氢脆指数趋于恒定值。

基于半无限源氢扩散模型开展的材料氢脆涡流评价的有限元仿真研究表明,涡流信号幅值可用于表征材料氢脆程度,即早期氢损伤程度;且信号幅值与氢脆指数呈线性相关,氢脆指数越高,信号幅值越大,进一步可研究裂纹和氢的交互作用下的电磁响应机制。

参考文献

- [1] 符冠云,熊华文. 日本、德国、美国氢能发展模式及其启示[J]. 宏观经济管理, 2020,(6): 84-90.
- [2] 李跃娟,赵梓茗,姚占辉,等. 中国典型区域车用氢能产业及经济性分析[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(3): 331-344.
- [3] DAS T, BRAHIMI S V, SONG J, et al. A fast fracture approach to assess hydrogen embrittlement (HE) susceptibility and mechanism (s) of high strength martensitic steels [J]. Corrosion Science, 2021, 190: 109701.
- [4] 王贞,刘静,张施琦,等. 应变速率对预充氢 DP780 钢氢脆敏感性的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(1): 106-112.
- [5] 付雷,单龙,温玉霜,等. 氢致裂纹中氢压的理论表征及有限元求解方法[J]. 焊接学报, 2019, 40(11): 8-12,161.
- [6] ZHANG H, TIAN Z. Failure analysis of corroded high-strength pipeline subject to hydrogen damage based on FEM and GA-BP neural network [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 47(7): 4741-4758.
- [7] 魏志恒. 涡流检测技术在 1Cr13 不锈钢淬火硬度检测中的应用[D]. 青岛:山东科技大学, 2019.
- [8] XU S, LARIONOV V V, SOLDATOV A, et al. Analysis for hydrogen concentration in titanium alloys using multifrequency eddy current [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020(99): 1-1.
- [9] 李衍. 全聚焦法用于氢损伤检测和定量[J]. 无损探伤, 2022, 46(2): 1-4.
- [10] 刘雪光,任呈强,鲍明显,等. 金属氢损伤测试方法分析[J]. 材料导报, 2015, 29(17): 117-121,139.
- [11] 兰亮云,孔祥伟,邱春林,等. 基于多尺度力学实验的氢脆现象的最新研究进展[J]. 金属学报, 2021, 57(7): 845-859.
- [12] 王琳,王黎明,聂鹏飞,等. 非连续阻抗结构超声传播特性分析[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(10): 140-144.
- [13] 门平,董世运,程志远,等. 微观组织及测量信号对超声横波评价材料硬度影响[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(9): 146-155.
- [14] 杜永刚,周伟,刘朔,等. 含夹杂缺陷 Q245R 钢的声发射特性和 DIC 研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(18): 1-6.
- [15] ZHOU H T, YE D D, CHEN J J, et al. Discussion on the characterisation of hydrogen embrittlement based on eddy current signals [J]. Insight, 2020, 62(1): 11-14.
- [16] FU Y, UNDERHILL P R, KRAUSE T W. Factors affecting spatial resolution in pulsed eddy current inspection of pipe [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2020, 39(2):1-9.
- [17] KHANGHOLI S N, JAVIDANI M, MALTAIS A, et al. Effects of natural aging and pre-aging on the strength and electrical conductivity in Al-Mg-Si AA6201 conductor alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2021, 820(7): 141538.
- [18] HAJIMOHAMMADI Z, PARAND K. Numerical learning approximation of time-fractional sub diffusion model on a semi-infinite domain[J]. Chaos Solitons & Fractals, 2020, 142:110435.

作者简介

周海婷(通信作者),博士,讲师,主要研究方向为电磁检测理论与方法应用。

E-mail: zhouhaiting@cjlu.edu.cn

叶东东,博士,讲师,主要研究方向为复合材料的太赫兹检测技术。

E-mail: ddyecust@ahpu.edu.cn

朱晨曦,硕士研究生,主要研究方向为材料氢损伤的无损检测技术。

E-mail: 1114299732@qq.com

胡沁,硕士研究生,主要研究方向为电磁信号的智能识别算法。

E-mail: 594876931@qq.com