

# 基于自然磁化现象的损伤定量无损检测方法

李红梅<sup>1,2</sup>, 赵天飞<sup>1</sup>, 陈振茂<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学强度与振动教育部重点实验室, 710049, 西安; 2. 宁夏职业技术学院机电工程系, 750002, 银川)

**摘要:** 为了开发对材料裂纹产生前的早期损伤程度进行定量无损检测的新方法, 探讨自然磁化机理, 以核能设备中常用的常磁性材料——奥氏体不锈钢 SUS304 为研究对象, 通过实验对不同形状和厚度的材料试样进行多次拉伸, 测量相应的自然磁化漏磁场磁感应强度和残余应变分布, 从而建立了基于自然磁化现象的机械损伤与其磁化漏磁场的定量关系, 进而证明了可以通过检测自然磁化漏磁场强度实现对奥氏体不锈钢材料损伤程度的定量检测和评估. 基于实验所建立的机械损伤与自然磁化漏磁场的定量关系, 结合磁记忆检测方法的优点, 提出了一种较为简单但更为全面的对局部缺陷损伤程度进行定量检测的方法. 奥氏体不锈钢的自然磁化机理可以初步认为是机械损伤引起的位错堆积导致了奥氏体不锈钢中马氏体含量和位错能的增加, 由于材料的各向异性致使在铁磁属性的马氏体组织内产生了自然磁化, 从而使材料整体呈现自然磁化特性.

**关键词:** 自然磁化; 损伤检测; 定量关系

**中图分类号:** TH17 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)01-0058-06

## Quantitative Nondestructive Evaluation of Mechanical Damages Based on the Phenomena of Natural Magnetization

LI Hongmei<sup>1,2</sup>, ZHAO Tianfei<sup>1</sup>, CHEN Zhenmao<sup>1</sup>

(1. MOE Key Laboratory for Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Ningxia Vocational and Technical College, Yinchuan 750002, China)

**Abstract:** To develop a new nondestructive testing (NDT) method for nondestructive evaluation of mechanical damage before the initiation of macro cracks and reveal the mechanism of natural magnetization, the quantitative correlation between the natural magnetization and the mechanical damage was experimentally investigated for a typical austenitic stainless steel SUS304, which is extensively used in nuclear power plants. In the experiments, simple tensile loading was performed to initialize plastic damages in specimens under different states. The corresponding leakage magnetic field due to natural magnetization and the residual strain distribution were measured after each loading cycle. The quantitative relation between mechanical damage and leakage magnetic field was established based on the phenomenon of natural magnetization, which shows the possibility to quantitatively detect mechanical damages in the austenitic stainless steel by measuring the natural magnetic field. Following the above results and combining with the advantages of metal memory measurement, a new mechanical damage detection method via NDT is presented.

**Keywords:** natural magnetization; damage detection; quantitative relation

机械损伤是诱发材料和结构发生破坏的主要原因, 有效地把握材料内部宏观裂纹产生前的机械损

伤程度对于预测和预防破坏、确保结构安全非常重要. 工业中成熟的无损检测方法(射线、超声、涡流)

收稿日期: 2010-07-17. 作者简介: 李红梅(1975—), 女, 博士生, 副教授; 陈振茂(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60977070); 国家“973 计划”资助项目(2007CB707702, 2006CB601206, 2009GB104002).

网络出版时间: 2010-10-19

网络出版地址: [http://www.cnki.net/kcms/detail/61-1069\\_T.20101019.2211.015.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/61-1069_T.20101019.2211.015.html)

主要集中在对宏观缺陷的检测. 近几年发展起来的巴克豪森磁噪声检测方法在原理上可用于某些铁磁性材料的损伤程度评价,但其对铁磁材料弹性范围内的变形反应较灵敏,而对塑性范围内的损伤的检测能力较弱<sup>[1]</sup>. 到目前为此,尚无普遍认可的能够对奥氏体不锈钢在宏观缺陷产生前的机械损伤程度进行定量无损检测的有效方法.

近年来,研究者们发现了一种新的电磁机械耦合特性——在一些碳素钢或奥氏体不锈钢构件中的裂纹或断口附近存在集中磁化现象<sup>[2-3]</sup>,即在没有外加激励磁场的条件下(地磁除外),在裂纹附近区域可检测到明显的漏磁场变化,这种现象被称为损伤诱发磁化现象,也称为自然磁化现象<sup>[3-4]</sup>. 虽然就这一现象的机理研究者们尚未给出一致的解释,但其在无损检测中的应用已有较多研究成果,对于强磁性材料开发了磁记忆检测方法,但是磁记忆检测方法发展到现在,只能实现对损伤的有无检测,不能达到对多种机械损伤的程度进行定量检测的目的<sup>[5]</sup>.

虽然研究者们对损伤诱发磁化的机理解释不同,但都认为磁化产生的原因是裂纹区域的机械损伤而非宏观裂纹本身,即诱发磁化在宏观裂纹产生前已经存在. 这意味着如果能够确定材料内部的磁特性(磁化状态)和机械损伤(塑性变形、疲劳损伤、蠕变损伤等)状态的关联性,则有可能通过检测材料附近的自然磁化漏磁场来推测材料内部的损伤状态. 由于不需要施加外部磁场,这将构成一种被动型损伤无损检测方法,可以简化检测系统,也可避免激励源引起的额外噪声.

基于上述背景,本研究以核能设备中常用的常磁性材料——奥氏体不锈钢 SUS304 为研究对象,通过实验研究了其损伤诱发漏磁场强度与塑性损伤程度的定量关系,以期能为开发宏观裂纹形成前机械损伤程度的定量无损检测方法提供基础,进一步确保核电站结构和系统的安全可靠性.

## 1 实验方法

### 1.1 试样选材及加工尺寸

试样选材为典型的奥氏体不锈钢材料 0Cr18Ni9(SUS304). 图 1 所示为制作的 A、B 和 C 型试样,均采用工业级冷轧奥氏体不锈钢板切割而成. 根据拉伸试验机的载荷能力、夹具的结构尺寸和材料的强度,试样的长、宽分别定为 160 mm 和 25 mm,其中 A 型试样厚 2 mm, B、C 型试样厚 3 mm. 为实现对不同形式损伤的实验测量, A 型试样无预

置缺陷, B 型试样中心部位加工有直径为 6 mm 的通孔, C 型试样中部两边各切割了宽为 2 mm、深为 6 mm、底部半径为 1 mm 的槽. 实验中选取 A、B、C 型试样各 2 个(编号分别为 A2、A3、B1、B2、C1、C2), 共计 6 个试样,进行了损伤导入和漏磁场分布、应变分布测量.

### 1.2 实验设备和实验过程

试样的拉伸方向为图 1 所示  $y$  轴方向. 由于自然磁化漏磁场强度较小,实验中采用了磁场分辨率为 1 nT 的单轴磁通门磁强仪(Bartington Mag-01H)对其进行测量,磁强仪配备的磁通门探头的空间分辨率为 1 mm. 探头垂直于试样表面装夹,并固定在三维扫描台的工作台上,用来测量试样表面自然磁化漏磁感应强度的法向分量  $B_z$ . 扫描时,卸载后的试样由夹具保持并固定不动,扫描台带动探头对与试样表面平行的测量区域进行二维扫描. 另一方面,在试样拉伸过程中通过非接触光学三维应变测量系统(ARAMIS)对测量区域内  $y$  方向的残余应变进行全场测量,测量区域如图 1 所示.

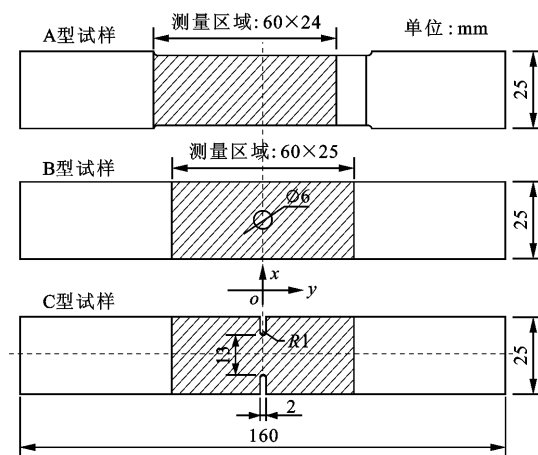


图 1 3 类试样的外形、尺寸及应变测量区域示意图

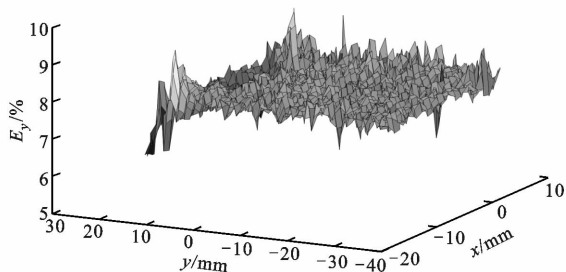
在对每个试样进行第 1 次拉伸之前,采用消磁器(Hozon-hc-33)对其进行消磁处理,消除加载前试样的磁化履历. 拉伸实验采用应变控制加载、载荷控制卸载方式. 实验中,对 2 个 A 型试样各进行 7 次拉伸,加载累计最大应变分别为 2%、4%、7%、11%、16%、24%和 32%;对 B、C 型试样各进行 4 次共计 16 次拉伸, B 型试样的加载累计最大应变分别为 2%、4%、6%和 8%, C 型试样的加载累计最大应变分别为 2%、5%、7%和 9%. 每次拉伸过程中均采用非接触式光学三维应变测量系统对测量区域内的全场残余应变  $E_y$  进行测量,卸载后采用磁通门磁强仪对应变诱发漏磁场的法向磁感应强度  $B_z$  进行

测量.

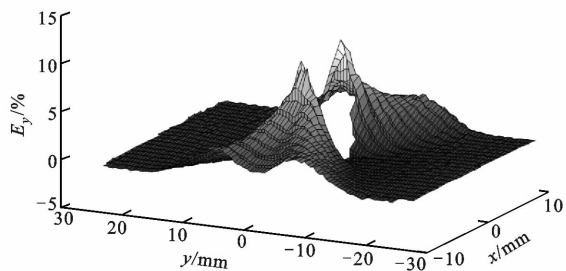
## 2 实验结果和分析

### 2.1 残余应变分布测量结果

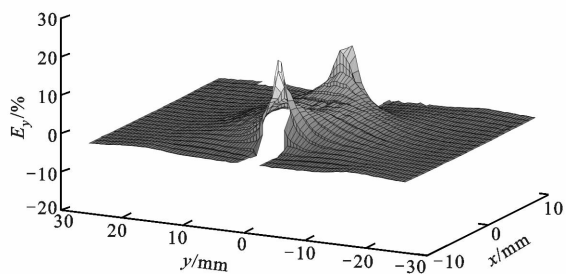
采用非接触式光学三维应变测量系统对试样卸载后的  $y$  方向残余应变  $E_y$  进行测量区域内的全场测量. 图 2a 为 A3 试样第 4 次拉伸后的残余应变分布测量结果, 其他 6 次拉伸的残余应变分布结果与此类似; 图 2b 为 B2 试样第 1 次拉伸后的残余应变分布测量结果, 其他 3 次拉伸的结果与此类似; 图 2c 为 C2 试样第 1 次拉伸后的残余应变分布测量结果, 其他 3 次拉伸的结果与此类似. 由图 2 可见, 在 A 型试样的中部发生了较为均匀的残余应变, 在 B 型试样中部孔的边缘处、C 型试样中部槽的边缘处 ( $y=0$  mm) 发生了较大的局部塑性损伤, 并且随着总应变的增加, 以上损伤程度都在增加.



(a) A 型试样第 4 次拉伸后



(b) B 型试样第 1 次拉伸后

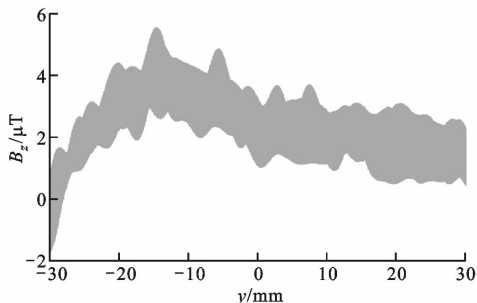


(c) C 型试样第 1 次拉伸后

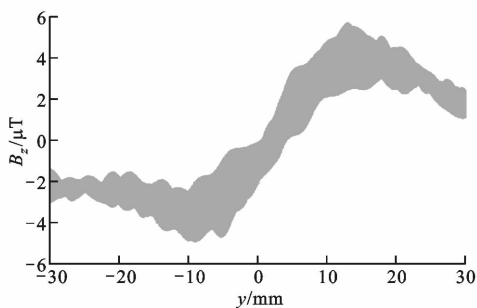
图 2 拉伸后试样的残余应变分布测量结果

### 2.2 自然磁化漏磁场法向磁感应强度分布的测量结果

试样每次拉伸结束卸载后, 采用磁通门磁强仪对自然磁化漏磁场的法向磁感应强度  $B_z$  进行试样全长范围内的自动测量, 并对试样中部长为 60 mm 的测量区域内的测量数据进行提取. 由于沿着试样  $x$  方向测量所得  $B_z$ - $y$  曲线的分布形状基本相似, 只是试样中部的幅值相对较大一些, 边界幅值相对较小一些, 所以为了更清楚地观察  $B_z$  的幅值变化, 选择在  $B_z$ - $y$  平面观察. 图 3 所示为试样拉伸后测得的  $B_z$  信号经滤波后的结果.



(a) A 型试样第 7 次拉伸后



(b) C 型试样第 4 次拉伸后

图 3 试样拉伸后自然磁化漏磁场法向磁感应强度分布的测量结果

由图 3a 可见, A 型试样的  $B_z$  测量结果发生了平台型的抬起. 另外 6 次同类实验结果证实: 随着总拉伸应变的加大, 抬起的高度增加. B 型试样和 C 型试样的  $B_z$  分布形状基本类似, 如图 3b 所示, 出现了明显的波峰与波谷, 并且其幅值随着拉伸的继续而增强.

观察 B、C 型试样的实验结果, 可以发现明显的磁记忆检测方法的拾取特征, 即在应力集中处 ( $y=2$  mm, 槽或孔所在的位置) 出现了明显的  $B_z$  过零点. 磁记忆检测方法认为,  $B_z$  信号的过零点处即是发生了应力集中的地方, 因此这对应力集中位置的

检测具有积极意义。对于 A 型试样,因其没有预置缺陷,所以在拉伸过程中没有出现集中损伤,只是发生了拉伸平面内较为均匀的损伤。由图 3a 的结果可见, $B_z$  在测量区域内并没有出现过零点,因此 A 型试样的损伤是磁记忆检测方法不能检测到的。也就是说,磁记忆检测方法只能较好地实现对集中塑性损伤的位置检测,并不能实现对多种损伤形式的损伤程度的检测。

### 2.3 损伤残余应变与自然磁化漏磁场之间的定量关系

由以上实验结果可知,当损伤较为均匀时, $B_z$  的幅值分布也较为均匀,呈现整体大于 0 的平台型抬起,当有局部更大程度的集中损伤时,在该集中损伤处的  $B_z$  幅值也较大,呈现出局部的峰值并散射开来,可见  $B_z$  信号的幅值可能与局部损伤程度存在更本质的稳定联系。因此,为了进一步明确机械损伤和自然磁化漏磁场的关系,并考虑实际工程的需要(能够进行局部损伤程度的评定),以试样的局部塑性变形量  $E_y$  表征试样的损伤程度,以自然磁化漏磁场法向磁感应强度  $B_z$  的幅值表征自然磁化漏磁场的强度,对实验所得 A、B、C 型试样的  $E_y$  和  $B_z$  的幅值进行了提取和分析。在提取过程中,为避免个别噪声点对整个实验结果的影响,设置了数据提取窗口,对提取窗口内的数据进行平均作为该点的测量值。 $E_y$  的提取窗口尺寸为  $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}(x \times y)$ ,  $B_z$  的提取窗口尺寸为  $4\text{ mm} \times 2\text{ mm}(x \times y)$ 。数据提取结果见图 4。

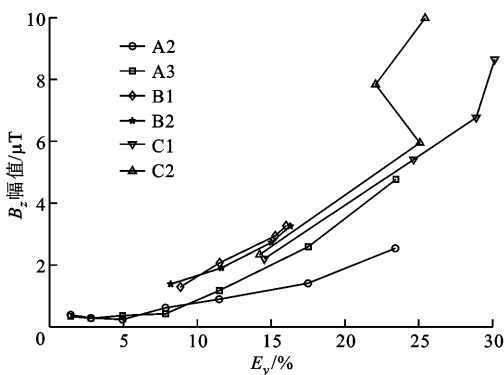


图 4  $B_z$  幅值与  $E_y$  的关系图

在采用非接触光学应变测量系统对试样应变进行测量时,为了能够很好地识别试样表面的局部微小位移变化,对试样进行了黑、白 2 种颜色的微小散点喷漆处理。由于漆膜厚度的影响,当试样变形量较大时漆膜和试样表面可能脱离,造成测量错误。对于图 4 中 C2 试样的结果,当局部应变超过 25% 时,由

于漆膜的剥离,使得第 3、第 4 次更大程度的拉伸后测量所得的局部变形量小于第 2 次拉伸后的测量结果,出现了明显的测量错点;对于 C1 试样,也怀疑第 4 个测量点由于同样原因误差较大;对于 B 型试样,由于局部变形量相对较小,漆膜与试样结合较好,故测量结果很好地体现了试样的局部变形特征。

通过以上分析,剔除掉 C1 试样的第 3、第 4 个测量点以及 C2 试样的第 4 个测量点,对余下的 B1、B2 试样的 4 个测量点和 C1、C2 试样的前 2 个测量点进行归纳分析,可以得到以下结论:①在相同的拉伸加载条件下,B1 和 B2 试样、C1 和 C2 试样的测量结果基本一致,这一方面验证了实验的正确性,另一方面也说明了测量结果的可重复性;②测量所得  $B_z$  幅值与  $E_y$  之间呈单调递增的对应关系,这证明两者之间的定量表述是合理的;③具有不同形状、尺寸缺陷的 B 型和 C 型试样的  $B_z$  幅值与  $E_y$  的关系曲线在局部应变约为 15% 处的重叠区域呈现出很好的线性连接,并且取向和取值一致,这说明本文所建立的这 2 个参量之间的关系较好地实现了对旁生因素(如缺陷形状、尺寸等因素)的分离,得到了较本质的属性。由此可以认为: $B_z$  幅值与局部塑性变形量  $E_y$  之间存在一种稳定的联系,可以建立两者之间的定量关系;通过检测损伤诱发的漏磁场磁感应强度,可以实现对奥氏体不锈钢材料在裂纹产生前的损伤程度进行定量检测和评估,从而可为奥氏体不锈钢材料在裂纹产生前的机械损伤程度检测和评估提供一种新方法。

A 型试样的厚度比 B 型、C 型试样的薄 1 mm,测量条件有所不同,不能将其漏磁场磁感应强度的测量结果与 B 型、C 型试样的测量结果做等量级的比对,但是由图 4 可以看出,在  $E_y$  大于 8% 的范围内,A3 试样的  $B_z$  幅值与  $E_y$  关系曲线的斜率与 B 型、C 型试样的斜率相近,另一方面,A2 与 A3 试样的测量结果却并不完全一致。我们下一步将研究在相同的局部残余应变范围内,对于有缺陷与无缺陷试样,其局部损伤与诱发漏磁场强度之间的定量关系是否一致。

## 3 讨论

### 3.1 奥氏体不锈钢材料损伤诱发磁化机理分析

奥氏体不锈钢因呈现顺磁特性而表现为无磁性。但是,已有的研究表明,对于以 304 为代表的亚稳态奥氏体不锈钢,形变会促进其部分奥氏体组织转变为马氏体组织,即发生马氏体相变,而马氏

体组织呈现铁磁性. 由图4可见, 虽然A2与A3试样的测量结果并不完全一致, 但都呈现出一个趋势: 随着材料局部变形量的增加, 漏磁场强度的增加是先相对平缓后相对陡峭. 这与文献[6]所表述的SUS304的拉伸变形量与马氏体相含量的关系所呈现的趋势相似. 基于对以上研究结果的分析, 可以认为自然磁化的强度依赖于材料中的马氏体含量, 即铁磁性的马氏体组织是自然磁化的载体, 其含量在某种程度上影响了自然磁化的强度. 有研究认为, 马氏体相变是由形变导致的位错引起的<sup>[7]</sup>.

然而, 材料仅具有铁磁性的组织并不能导致自然磁化, 因为常态下铁磁性材料中的磁畴分布是无序的, 整体呈现无磁特性, 但在机械损伤的作用下, 变形量的增加使材料的内部积累了较大的位错能, 导致自由能增加. 根据能量存在最小原则, 一些磁畴的方向会发生变化来抵消自由能的增加, 而磁畴方向的变化就导致了自然磁化, 因此自然磁化的产生是与材料的各向异性有关联的.

综上所述, 我们可以认为是机械损伤导致了材料中位错的产生和堆积, 而位错又导致了奥氏体不锈钢中马氏体含量的增加和位错能的增加, 由于材料的各向异性, 致使在铁磁属性的马氏体组织内产生了自然磁化, 从而使材料整体呈现自然磁化特性.

### 3.2 新型机械损伤程度检测方法的构成和应用

由图3的测量结果可以得出结论: 应用磁记忆检测方法实现对奥氏体不锈钢材料应力集中位置的检测是可行的. 也有人尝试将 $B_z$ 过零点处的 $dB_z/dy$ 作为自然磁化漏磁场的特征, 来建立其与损伤程度(加载应力)之间的定量关系, 但结果发现两者之间的关系在材料变形的弹性阶段是单调一一对应的, 但是在塑性阶段对应关系不唯一, 说明这种方法并不可行<sup>[1]</sup>. 况且, 由于受缺陷形状、尺寸等因素的影响, 拉伸时的加载应力与实际缺陷处的损伤程度并不存在定量的对应关系, 所以该方法并不能实现对旁生因素的有效剥离而得到本质特性. 另一方面, 在实际工程检测中, 对制造、使用等因素造成的局部缺陷的及早发现和对缺陷发展程度的检测比对零件均匀分布损伤的检测更具有现实意义, 因此以零件的整体承载应力作为损伤程度的评判标准在实际工程中意义不大. 图4也表明, 机械损伤与其自然磁化漏磁场的定量关系是存在的, 基于这种定量关系可以实现对材料局部缺陷损伤程度的检测和评定, 而材料局部缺陷损伤的检测和评定在实际工程中更有意义.

因此, 基于本次实验所获得的 $B_z$ 幅值与 $E_y$ 的定量关系, 结合磁记忆检测方法的优点, 本文发展了一种较为简单但更为全面的对局部缺陷损伤程度进行检测的方法, 即通过对损伤材料的自然磁化漏磁场强度的测量, 首先观察漏磁场磁感应强度法向分量有没有出现过零点, 以此来判断局部缺陷是否存在及缺陷存在的位置; 然后对于检测中认为存在局部缺陷的位置, 通过对其 $B_z$ 幅值进行提取并与已标定好的 $B_z$ 幅值- $E_y$ 关系图进行比对, 从而判断该处的损伤程度.

不可否认的是, 上述测量方法所测得的 $B_z$ 幅值还受到测量提离、磁场环境的影响, 好在这些影响都是可以通过事先标定解决的, 即检测中首先要明确该部件的使用环境是不是处于地磁场环境下, 如果是, 则处理起来较为简单, 只需获得地磁场环境下某种提离状态的 $B_z$ 幅值- $E_y$ 关系图即可; 如果使用环境为非地磁环境, 则还需要对该环境下的 $B_z$ 幅值- $E_y$ 关系图重新进行标定. 结合标定, 本文提出的方法是在实际工程中应用的.

## 4 结 论

(1) 基于自然磁化现象的机械损伤与其自然磁化漏磁场的定量关系是存在的, 由此证明了通过检测损伤诱发漏磁场磁感应强度实现对奥氏体不锈钢材料在裂纹产生前的损伤程度进行定量检测和评估的可行性.

(2) 奥氏体不锈钢的自然磁化机理可以初步认为是机械损伤引起材料中位错的产生和堆积, 而位错又导致了奥氏体不锈钢中马氏体含量的增加和位错能的增加, 由于材料的各向异性, 致使在铁磁属性的马氏体组织内产生了自然磁化, 从而使材料整体呈现自然磁化特性.

(3) 基于本次实验所建立的漏磁场磁感应强度幅值-局部应变的定量关系, 结合磁记忆检测方法能够对应力集中的有无和位置进行检测的优点, 本文发展了一种较为简单但更为全面的对局部缺陷损伤程度进行检测的新方法. 对此新型机械损伤程度检测方法的原理和应用所进行的分析表明, 这种方法在实际工程检测中是可行的.

### 参考文献:

- [1] WANG Ping, ZHU Shougao, TIAN Guiyun, et al. Stress measurement using magnetic barkhausen noise and metal magnetic memory testing [J]. Measurement

- Science and Technology, 2010, 21(5):1-6.
- [2] DOUBOV A A. Diagnostics of metal and equipment by means of metal magnetic memory [C]//Proceedings of 7th Conference on NDT and International Research Symposium. Shanghai, China: Non-Destructive Testing Institution, 1999: 181-187.
- [3] CHEN Zhenmao, AOTO K, NADAE Y, et al. A study on the correlation of magnetization and damages in SUS304 stainless steel [J]. Int J Appl Electromagn Mech, 2003, 16(3/4): 197-206.
- [4] CHEN Zhenmao, AOTO K, MIYA K. NDE of fatigue damages in austenitic stainless steel by measuring and inversion of damage-induced magnetic field [J]. Studies Appl Electromagn Mech, 2002, 23:127-134.
- [5] LI Hongmei, CHEN Zhenmao, ZHAO Tianfei. Studies on the correlation between natural magnetization and mechanical damages of an austenitic stainless steel [C]// ASME Proceedings of ICONE 18. New York, USA: ASME, 2010:1-5.
- [6] 胡钢,许淳淳,张新生. 奥氏体 304 不锈钢微观组织变化与冷加工的关系[J]. 黄冈师范学院学报, 2002, 22(3):17-19.
- HU Gang, XU Chunchun, ZHANG Xinsheng. The relationship between microstructure change of austenitic 304 stainless steel and cold-working [J]. Journal of Huanggang Normal University, 2002, 22(3): 17-19.
- [7] HÄNNINENH E. Influence of metallurgical variables on environment-sensitive cracking of austenitic alloys [J]. International Metals Reviews, 1979, 24: 85-136.
- (编辑 葛赵青)