

有关大地磁场对金属磁记忆信号影响的数值模拟

苏三庆, 马小平, 王 威, 杨熠奕

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 利用 ANSYS 有限元模拟软件, 结合力-磁耦合关系, 分别模拟三种放置方式下, 试件沿轴转动时初始状态和屈服后的法向和切向磁信号。对比得出以下结论: 首先, 当地磁场与试件加载方向不平行或与检测面出现夹角时, 法向磁信号相比切向磁信号更为准确。地磁场方向对屈服后试件的影响要比初始状态大, 尤其在缺陷附近应力集中区域。其次, 当试件不是正南正北放置, 而是东西放置或者与地磁场存在一定夹角时, 按原来方向的法向和切向信号判断试件应力集中将不再准确, 因此找到此时磁场方向下试件表面的法向和切向磁信号是做出准确检测的前提条件。另外, 当大地磁场完全垂直于试件表面时, 无论切向还是法向磁信号都基本为一直线, 只有在缺陷处有些许变化, 原来过零点和极大值的现象都不再出现。所以在实际工程中, 要尽可能避免试件检测面与大地磁场完全垂直, 否则以法向信号过零点和切向信号极大值为依据的经验判断方法将不再适用。

关键词: 金属磁记忆检测; 大地磁场; 法向磁信号; 切向磁信号; 力-磁耦合

中图分类号: TU 391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)04-0463-08

Numerical simulation about the influence of geomagnetic field on metal magnetic memory signals

SU Sanqing, MA Xiaoping, WANG Wei, YANG Yiyi

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The normal and tangential magnetic signals of the specimen at initial state and yield state have been simulated by using ANSYS finite element simulation software, combining with the relationship of magneto-mechanical coupling when placed at three ways as well as rotating along the axis. The conclusions are as follows by comparison. Firstly, when the geomagnetic field hasn't paralleled with the loading direction of specimen or has included angles with inspection face, normal magnetic signals are more accurate compared with tangential magnetic signals. The influence of geomagnetic field direction on specimen at yield state is bigger than that at initial state, especially at the stress concentration zone of defects. Secondly, when the specimen isn't placed in a south-north direction, whereas in a east-west direction it has included angles with the geomagnetic field, the normal and tangential magnetic signals of original direction cannot be used to judge the stress concentration of specimen accurately, so the precondition of accurate testing is finding the normal and tangential magnetic signals of the specimen at this direction of magnetic field. Finally, when the geomagnetic field is absolutely perpendicular to the surface of specimen, whether the normal or tangential magnetic signal is basically a line, or it only changes in defects, so the original phenomenon like zero crossing point(ZCP) and maximum value don't appear. Therefore, it should be avoided that the testing face of specimen is absolutely perpendicular to geomagnetic field in practical engineering, otherwise the experience judgment way based on ZCP of normal magnetic signal and maximum value of tangential magnetic signal cannot be used.

Key words: metal magnetic memory testing (MMMT); geomagnetic field; normal magnetic signals; tangential magnetic signals; magneto-mechanical coupling

20 世纪 90 年代末俄罗斯学者 Doubov 等提出了一种新型的无损检测方法, 即金属磁记忆检测技术^[1-3], 该技术能有效的对铁磁构件的早期损伤(尤其是隐性不连续变化)进行诊断。金属磁记忆

检测方法的检测依据是铁磁构件在运行时, 受工作载荷和地磁场共同作用, 在应力和变形集中区域内会发生磁滞伸缩性质的磁畴组织定向和不可逆的重新取向, 从而造成应力集中区域漏磁场改

收稿日期: 2018-05-03

修改稿日期: 2019-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878548, 51578449); 陕西省自然科学基金基础研究计划重点基金(2018JZ5013); 陕西省教育厅省级重点实验室科研计划项目(14JS044)

第一作者: 苏三庆(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事结构健康检测及混凝土等方面的研究. E-mail: sussq@xauat.edu.cn

变, 即磁场的切向分量 $H_p(x)$ 具有最大值, 而法向分量 $H_p(y)$ 改变符号出现过零点现象并且其梯度值 K 出现极大值. 这种磁状态的不可逆变化在工作载荷消除后继续保留, 从而通过漏磁场法向分量 $H_p(y)$ 及其梯度 K 的测定, 便可准确判断工件的应力集中部位及缺陷所处位置.

目前, 金属磁记忆检测技术已经被应用到了轨道、管道、钢结构等以铁磁性构件为主的结构安全检测当中. 国内外学者针对不同因素对磁记忆信号的影响进行了大量数值模拟研究工作. Ivanov^[4]等曾利用 ANSYS 有限元软件模拟在球形压强载荷作用下铁磁性管道产生的残余应力和大内凹形变后管件表面附近的漏磁通分布, 模拟结果与实际情况基本一致. 任吉林等^[5]通过模拟 18CrNi4A 钢的力-磁耦合过程得到在不同载荷下的磁记忆信号变化规律, 并与试验结果有较好的契合. 姚凯等^[6-8]通过数值模拟的方式分析了塑性变形与磁记忆信号之间的关系以及不同缺陷宽度、不同缺陷埋深、不同提离值、不同检测方向对磁记忆信号的影响. 任尚坤等^[9]也通过有限元模拟分析了环境磁场对 20# 钢力-磁效应影响, 指出虽然大地磁场强度不高, 但其对金属磁记忆信号的影响很大. 高庆敏等^[10]也通过有限元模拟分析了磁记忆信号与检测方向及提取路径的关系.

通过之前学者的模拟及试验研究, 为金属磁记忆力-磁耦合关系^[11]的确定以及磁记忆信号与损伤的量化分析提供了一定的参考和帮助. 但是由于材料参数、载荷条件、检测环境^[12]等各种因素的影响机制尚未明确, 将该技术应用于早期损伤评估领域的方式、途径尚不够清楚, 建立特定结构的评估模型非常困难. 目前该方法只作为铁磁构件潜在危险位置的初步排查手段, 还无法做到量化评估.

相比其他漏磁检测手段, 金属磁记忆检测方法是地磁场作为唯一激励源, 其优势在于检测后无需退磁处理, 检测过程也比较方便. 但在磁记忆检测过程中, 大地磁场^[13]属于不可控因素, 无法对其进行人为控制, 而大地磁场方向变化对磁记忆信号的影响仍然不可忽略. 铁磁构件在制造及服役过程中表面会产生复杂的杂散磁场信号, 完全遮盖了地磁场的影响, 而排出冗余信号或设计完全屏蔽地磁场的试验又存在一些困难.

因此, 本文通过 ANSYS 有限元模拟软件, 对不同大地磁场方向中铁磁性构件应力集中区的磁记忆信号进行了数值模拟, 得到大地磁场的方向

变化对磁记忆信号规律的影响, 总结出在实际检测过程中需要注意的情况, 为今后更为准确地检测磁记忆信号提供理论依据, 也为定量评估金属磁记忆信号奠定基础.

1 基本理论

根据铁磁学的研究可知, 在无应力作用的情况下, 处于稳定状态的磁晶体内总的自由能为

$$E = E_k + E_{ms} + E_{el} + E_n + E_d \quad (1)$$

式中: E_k 为磁晶体各项异性能; E_{ms} 为磁弹性能; E_{el} 为弹性能; E_n 为外磁场能; E_d 为退磁能.

当铁磁性构件受外力的作用时, 晶体将发生相应的应变, 产生较大的应力能, 此时晶体内总自由能为

$$E = E_k + E_{ms} + E_{el} + E_n + E_d + E_\delta \quad (2)$$

式中: E_δ 为材料受到外界应力时产生的应力能.

从能量的角度来看, 当铁磁体有外应力作用时, 其会产生磁滞伸缩性质的形变, 必然会引起磁畴壁的迁移, 从而改变其自发磁化的方向以增加磁弹性能, 来抵消应力能的增加. 而这种在应力场和地磁场的共同作用下, 铁磁体内所产生的晶粒转动和磁滞伸缩逆效应, 将会引起材料宏观磁特性的不连续分布^[14].

这里由于应力引起的材料宏观磁特性改变, 主要是指材料相对磁导率的改变. 根据文献^[15]可知的铁磁材料磁导率和塑性应变存在线性递减关系. 因此, 本文模拟过程采用俄罗斯动力诊断公司根据经验数据所提出的弱磁场条件下铁磁构件的力-磁耦合模型, 此模型可以较好的反映弹塑性阶段材料内部应力和磁导率的关系, 公式如下.

$$\mu = \mu_T(1 + bH/\mu_T)[a_0 + a_1 |\sigma|^m \cdot e^{n|\sigma|}] \quad (3)$$

式中: μ 为施加应力后的磁导率; μ_T 为无应力状态下的初始磁导率; b 为与材料本身性质相关的常数; a_0, a_1, m, n 为与载荷方向和应力值有关系数.

2 力-磁耦合效应模拟

本次模拟所选用的试件钢材为 Q235 钢, 是一种具有良好的机械性能和弹塑性能的低碳钢, 被广泛用于建筑钢结构当中. 为制造应力集中区域, 在标准试件中间人为开一小孔, 其基本尺寸如图 1 所示, 试件厚度 5 mm. 通过有限元模拟软件计算得到试件的应力集中系数为 2.95. 垂直于试件表面的方向为 y 方向, 法向磁记忆信号提取路径为 y

方向, 切向磁信号提取路径为沿检测线方向(x 方向). 其初始相对磁导率 285, 矫顽力为 $376\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$, 空气相对磁导率为 1. 其试件基本属性见表 1.

表 1 试件基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the specimen			
材料	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa
Q235	2.01×10^5	0.3	250

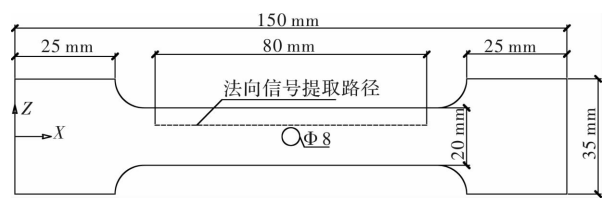


图 1 试件尺寸详图

Fig. 1 The size of specimen

ANSYS 模拟过程分为静力学分析和静磁学分析两部分. 静力场采用 SOLID186 单元, 在端面施加 70 MPa 的面荷载, 保证试件进入塑性变形阶段, 计算并提取此载荷下的单元等效应力并利用公式(3)力-磁耦合模型求解对应磁导率. 静磁学分析包括两个方面, 第一次静磁学分析采用磁实体标量单元 SOLID96, 直接求解并提取初始状态下的磁记忆信号. 第二次则将静力学求解及计算得到的单元磁导率导入模型中, 计算并提取磁记忆信号. 流程图见图 2.

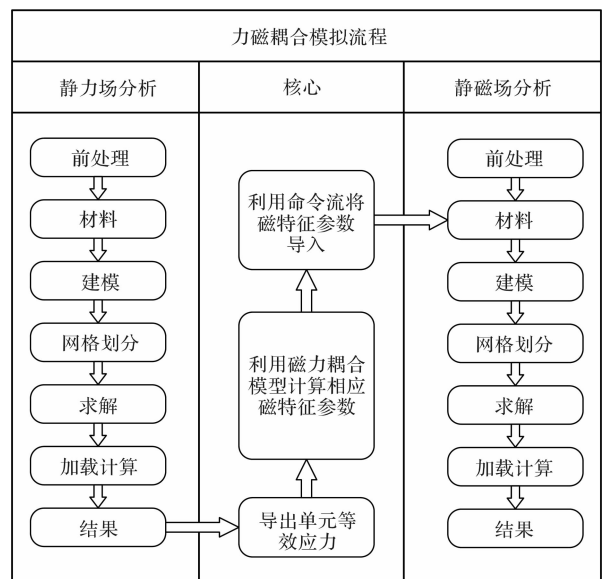


图 2 力-磁耦合流程图

Fig. 2 The follow charts of magneto-mechanical coupling

网格划分采用自由划分, 在考虑计算精度及计算机的计算效率的情况下, 只对圆孔与空气层接触的位置进行网格加密, 并且由于试件沿 x 轴对称, 所以只取 $1/2$ 结构计算. 试件有限元模型如图 3 所示.

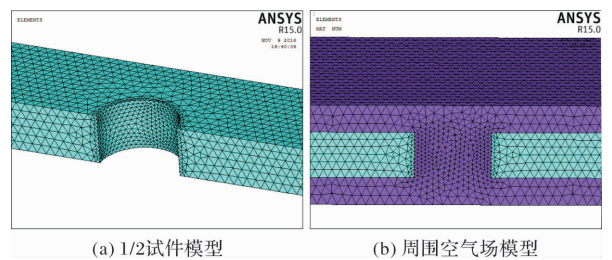
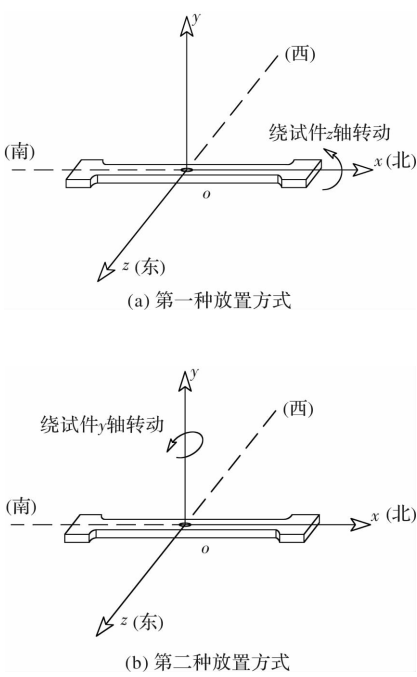


图 3 ANSYS 有限元模型

Fig. 3 ANSYS finite element model

3 模拟结果及分析

为研究当大地磁场与试件夹角变化时, 试件应力集中区附近的磁记忆信号变化情况. 假定大地磁场方向沿正南正北方向, 现分别将初始状态及施加载荷的试件按三种方式放置并沿轴转动, 从而变化与大地磁场的夹角, 并提取试件表面路径上的磁记忆信号, 以此间接反映在不同大地磁场方向下磁信号的变化规律. 此处模拟过程不考虑试件自身剩磁, 并且忽略大地磁场磁倾角的影响, 只对单一变量地磁场方向进行分析. 试件三种放置方式如图 4. 图中 xyz 坐标为试件本身的局部坐标, 随试件转动而转动.



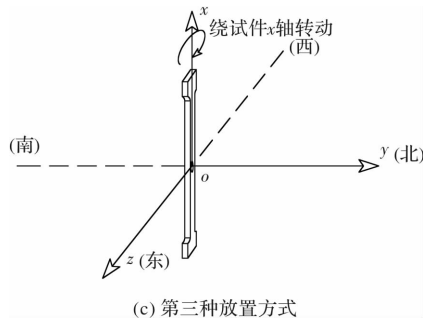


图 4 试件三种放置方式

Fig. 4 The three placing ways of specimen

表 2 第一种放置方式下不同转动角度所对应地磁场矫顽力

Tab. 2 The coercive force of earth magnetic in different rotation angles at first placing way

		矫顽力		
		MGXX(x 方向)	MGYY(y 方向)	MGZZ(z 方向)
旋转 角度	0°	40	0	0
	30°	34.6	20	0
	60°	20	34.6	0
	90°	0	40	0

表 3 第二种放置方式下不同转动角度所对应地磁场矫顽力

Tab. 3 The coercive force of earth magnetic in different rotation angles at second placing way

		矫顽力		
		MGXX(x 方向)	MGYY(y 方向)	MGZZ(z 方向)
旋转 角度	0°	40	0	0
	30°	34.6	0	20
	60°	20	0	34.6
	90°	0	0	40

表 4 第三种放置方式下不同转动角度所对应地磁场矫顽力

Tab. 4 The coercive force of earth magnetic in different rotation angles at third placing way

		矫顽力		
		MGXX(x 方向)	MGYY(y 方向)	MGZZ(z 方向)
旋转 角度	0°	0	40	0
	30°	0	34.6	20
	60°	0	20	34.6
	90°	0	0	40

如图 5 所示,按第一种放置方式,地磁场方向从沿着试件受力且平行于检测面的方向变化到垂直于检测面的过程中,初始状态的磁信号变化规律与屈服后变化有相似之处.如:①法向信号 $H_p(y)$ 随着转过角度的增加,由最初的过零点逆时针转到近乎水平的状态;②初始状态切向信号 $H_p(x)$ 随着角度的变化,磁信号整体强度有所降低.

但是在靠近试件缺口的位置(40 mm)处,初始状态与屈服后磁记忆信号却有明显不同.如:①初始状态下缺陷附近的法向磁信号变化并不明

显,但屈服后法向信号在缺陷附近由左波谷右波峰变化为两边都为波谷,并且随着转过角度增大,变化幅值有所增加;②切向磁信号在缺口附近变化剧烈,随着转过角度的增加,初始状态切向信号极值点逐渐减小,到地磁场方向垂直于试件检测面时,磁信号几乎为一直线,而屈服后切向磁信号在地磁场角度变化时,原有的极值点出现了波峰一波谷,并且当地磁场接近垂直于试件检测面的时候,波峰一波谷幅值变化最大;③试件屈服后,法向磁信号和切向磁信号的整体幅值相比

试件放置方式分为三种:①试件沿南北放置,检测面法向为 y 方向,试件绕 z 轴转动,取转动变化角度分别为 0° 、 30° 、 60° 、 90° ;②试件沿南北放置,检测面法向为 y 方向,试件绕 y 轴转动,转动变化角度同上;③试件垂直放置,检测面法向为正北方向,试件绕 x 轴转动,转动变化角度同上.具体施加方案见表 2~4.

如图 5~8 所示,在三种不同放置方式下,试件在初始状态下和进入屈服状态后沿同一条检测线上所提取法向磁记忆信号 $H_p(y)$ 和切向磁记忆信号 $H_p(x)$.

显,但屈服后法向信号在缺陷附近由左波谷右波峰变化为两边都为波谷,并且随着转过角度增大,变化幅值有所增加;②切向磁信号在缺口附近变化剧烈,随着转过角度的增加,初始状态切向信号极值点逐渐减小,到地磁场方向垂直于试件检测面时,磁信号几乎为一直线,而屈服后切向磁信号在地磁场角度变化时,原有的极值点出现了波峰一波谷,并且当地磁场接近垂直于试件检测面的时候,波峰一波谷幅值变化最大;③试件屈服后,法向磁信号和切向磁信号的整体幅值相比

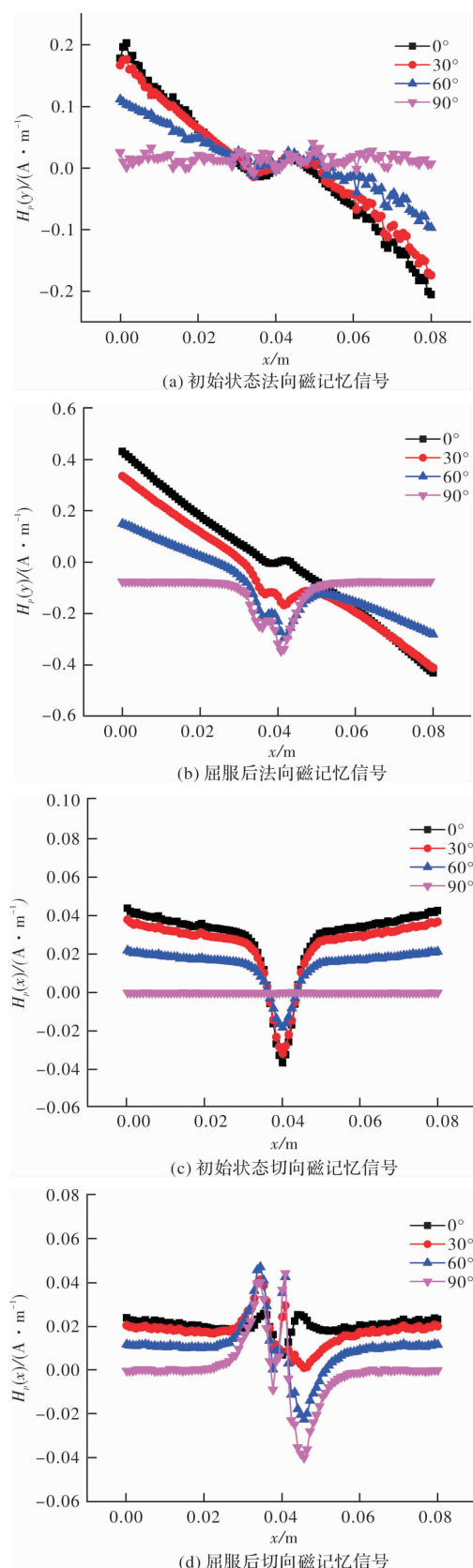


图5 第一种放置方式下磁记忆信号分布

Fig. 5 The magnetic memory signal distribution in first placing way

初始状态都是反向增大的。

可以看出,按第一种放置方式变化时,相比法向信号而言,切向信号随着地磁场方向变化会

出现较为剧烈的浮动,且屈服后在缺陷位置附近会出现波峰一波谷的异常变化。因此,只有初始状态且保证地磁场方向与试件检测面不垂直的情况下,或者试件屈服后地磁场与加载方向一致时,切向磁信号才会出现极值点的现象。而法向信号无论是初始状态还是试件屈服之后,当地磁场方向按第一种方式变化时,只要保证地磁场方向与试件检测面不垂直,其过零点现象会一直存在,与理论相符。

此外,当试件与大地磁场夹角变化时,初始状态的法向信号只沿着对称中心转动,其幅值并没有像切向磁信号那样变化剧烈。屈服后试件表面法向磁信号的整体幅值反向增加,是由于塑性变形增加,磁导率降低,从而导致磁场强度增加,而且磁场强度是矢量,所以可能会发生方向的变化而反向增加,因此,无论是哪种放置方式、哪种磁信号,屈服后的信号在数值上要比初始状态小。排除塑性变形对信号幅值的影响,对于切向磁信号而言,大地磁场方向的变化不仅会造成磁信号整体规律变化,而且对其幅值也会有很大影响。而对于法向磁信号,大地磁场方向的变化只对磁信号曲线的整体斜率有影响,对其幅值影响不大,过零点的判别标准依然可用。

综上所述,在实际检测过程中,当地磁场与试件加载方向不平行或与检测面出现夹角时,法向磁信号相比切向磁信号更为准确。地磁场方向对屈服后试件的影响要比初始状态大,尤其在缺陷附近应力集中区域。

如图6所示,按第二种方式放置试件,与图5相似,无论法向还是切向磁信号在初始状态和屈服后随着大地磁场角度的变化都表现出相似的现象。如:①法向磁信号一开始存在过零点现象,但随着地磁场与试件侧面夹角的增大,过零点现象消失,并且整体信号幅值的绝对值随之增大;②切向磁信号只有在开始时存在极值点,但随着地磁场角度逐渐增大,在初始状态和屈服后都出现了顺时针转动。

但是初始状态与屈服后磁记忆信号在试件与地磁场夹角发生变化时也存在一些明显差异。如:①当试件与地磁场发生转动,初始状态法向磁信号产生波动,而屈服后的信号却比较平稳,而且在缺陷附近有微小突起;②屈服后切向磁信号相比初始状态有明显的波动,并且在缺陷处磁信号出现波峰一波谷的异常现象,波峰一波谷幅值随转过角度的增大而增加。

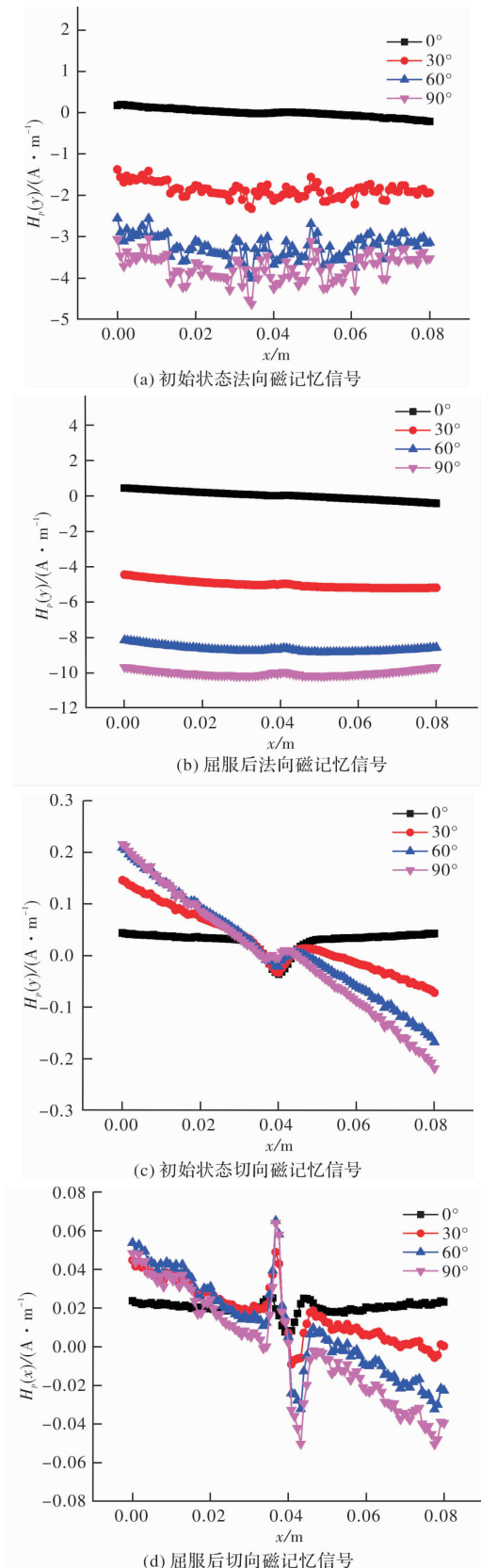


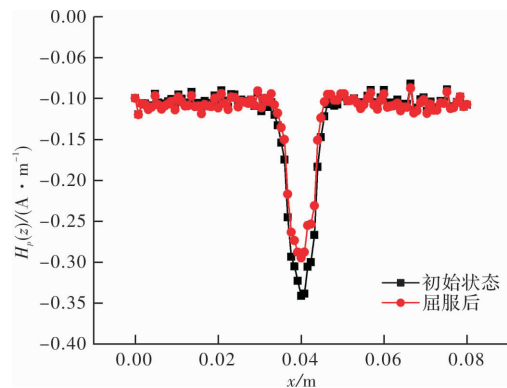
图 6 第二种放置方式下磁记忆信号分布

Fig. 6 The magnetic memory signal distribution in second placing way

可以看出,按第二种放置方式进行转动,即当大地磁场方向与试件检测面平行,但与加载方向有一定夹角时,试件表面法向磁信号过零点和切

向磁信号极大值的现象消失,因此还按照原来的经验依据判断试件应力集中区的位置和范围将变得不再准确.但从切向磁信号的变化规律来看,当试件由南北放置慢慢转到东西放置时,其分布规律类似于南北放置时试件法向磁信号的分布.分析其原因,可能是当试件为东西放置时,原来以检测线方向(x 方向)为切向的磁信号现在是垂直于地磁场方向,而垂直于检测线的 z 方向平行于大地磁场方向,所以沿 z 方向的磁信号会出现过零点的现象.

如图 7 所示,为按第二种方式旋转 90° 时(即试件沿东西放置)初始状态和屈服后的 z 方向信号.可以看到有明显的极大值现象,与南北放置时试件切向磁信号有相同的现象.

图 7 试件东西放置时沿 z 方向的磁信号Fig. 7 The magnetic signals of specimen along z direction when placed at the east-west direction

因此,当试件东西放置时,其法向磁信号方向为沿检测线方向且垂直于地磁场,而切向信号为试件表面垂直于检测线的方向,即图 1 中 z 方向.同时,可以看到屈服后切向磁信号相比初始状态反而变小了,其原因可从磁畴机理的角度分析,塑性变形所产生的微裂缝起到钉扎作用,阻碍铁磁材料的磁化并降低了其磁导率,所以切向磁信号在屈服后会有所降低.进一步说明该方向为理论上的切向磁信号方向.

我国市场上应用较为广泛的金属磁记忆检测仪提供的检测参量只有漏磁场法向分量 $H_p(y)$ 值(垂直于检测材料表面的漏磁场分量)、磁场变化梯度 K 值($dH_p(y)/dx$)两个参量,所以当试件南北放置时,如图 4(a), y 方向为法向磁信号方向, x 方向为切向磁信号方向.但是,通过上面分析可得,只通过与试件检测面的垂直和平行所提取的法向和切向磁信号已经不存在所对应的过零点和极大值现象,其法向和切向方向应该综合考虑大地磁场的方向来确定.

所以在实际检测过程中,当试件不是正南正

北放置,而是东西放置或者与地磁场存在一定夹角时,按原来方向的法向和切向信号判断试件应力集中可能存在误差,因此找到此时磁场方向下试件表面的法向和切向磁信号是做出准确检测的前提条件.如东西放置时,沿检测线方向(x 方向)出现过零点的现象,垂直于检测线(z 方向)有极大值现象,所以此时法向磁信号为沿检测线方向且垂直于地磁场,切向磁信号为试件表面垂直于检测线的方向且平行于大地磁场.

如图8所示为第三种放置方式下磁记忆信号分布,与前面相似,无论切向信号还是法向信号,试件在初始状态和屈服后都有相同的变化规律.如:①在初始状态和屈服后,法向信号整体幅值的绝对值随着地磁场绕 y 轴的旋转角度的增大而增大,并且法向信号过零点的现象在这种放置方式下没有出现;②在初始状态和屈服后,切向信号随着地磁场绕 y 轴的旋转角度的增大而顺时针转动,并且切向磁信号极大值的现象在这种放置情况下也没有出现.

但初始状态和屈服后,试件在缺陷位置附近的信号出现差异.如:①初始状态法向磁信号随夹角的增加,出现无规律的波动,而屈服后法向磁信号在缺陷附近出现微小突变;②切向磁信号在屈服后相比初始状态,信号波动也较大,并且缺陷处出现明显的波峰一波谷现象.

可以看出,按第三种放置方式时,即大地磁场垂直于试件表面,让试件沿长度方向(x 方向)所在轴线转动,无论初始状态还是屈服状态,原来试件表面的法向和切向磁记忆信号都不再有零点现象.因此和前面一样,确定此时大地磁场下切向和法向磁信号的方向是确保磁记忆检测信号准确的前提条件.

另外,按第三种方式放置时,切向磁信号出现了类似于南北放置时的法向信号分布规律,原因同上.当试件转过 90° 时,与东西放置无异,沿检测线方向(x 方向)出现过零点的现象,试件表面垂直于检测线方向(z 方向)出现极大值的现象,所以此时法向磁信号为沿检测线方向且垂直于地磁场,切向磁信号为试件表面垂直于检测线的方向且平行于大地磁场.

但也可以看到当大地磁场完全垂直于试件表面时,无论切向还是法向磁信号都基本为一直线,只有在缺陷处有些许变化,原来过零点和极大值的现象都不再出现.所以在实际工程中,要尽可能避免试件检测面与大地磁场完全垂直,否则以

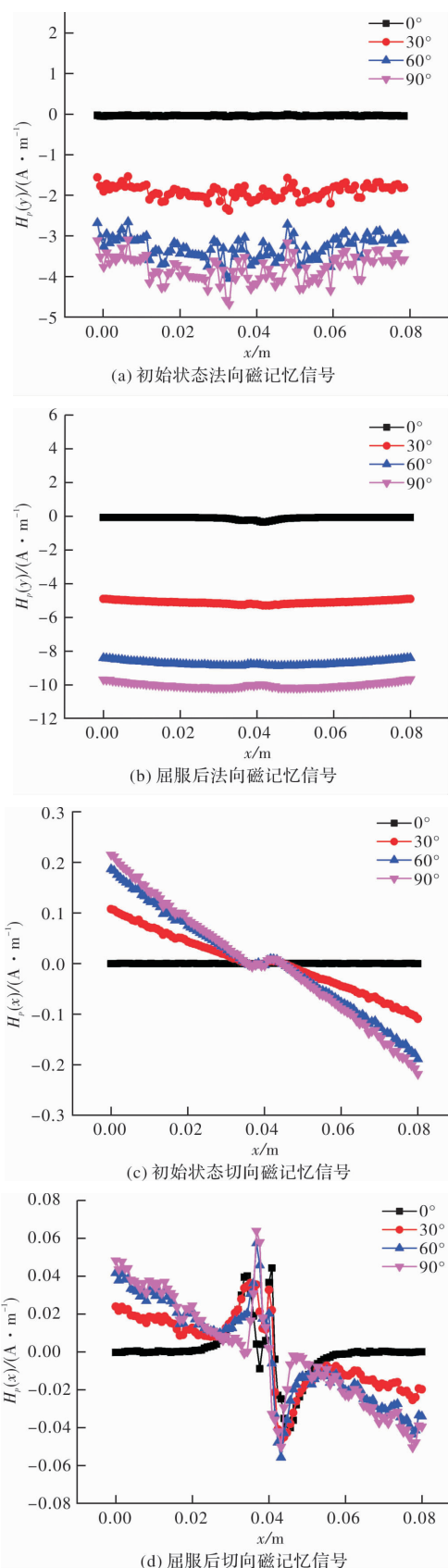


图8 第三种放置方式下磁记忆信号分布
Fig. 8 The magnetic memory signal distribution in third placing way

法向信号过零点和切向信号极大值为依据的经验判断方式将不再适用.

4 结论

(1)在实际检测过程中,当地磁场与试件加载方向不平行或与检测面出现夹角时,法向磁信号相比切向磁信号更为准确。地磁场方向对试件屈服后的影响要比初始状态大,尤其在缺陷附近应力集中区域。

(2)在实际检测过程中,当试件不是正南正北放置,而是东西放置或者与地磁场存在一定夹角时,按原来方向的法向和切向信号判断试件应力集中将不再准确,因此要综合考虑大地磁场的方向,找到此时磁场方向下磁信号的法向和切向方向是做出准确检测的前提条件。如东西放置时,沿检测线方向(x 方向)出现过零点的现象,垂直于检测线(z 方向)有极大值现象,所以此时法向磁信号为沿检测线方向且垂直于地磁场,切向磁信号为试件表面垂直于检测线的方向且平行于大地磁场。

(3)当大地磁场完全垂直于试件表面时,无论切向还是法向磁信号都基本为一直线,只有在缺陷附近应力集中处有些许变化,原来过零点和极大值的现象都不再出现。所以在实际工程中,要尽可能避免试件检测面与大地磁场完全垂直,否则以法向信号过零点和切向信号极大值为依据的经验判断方式将不再适用。

参考文献 References

- [1] DOUBOV A A. A study of metal properties using the method of magnetic memory[J]. Metal Science and Heat Treatment, 1997, 39(9/10): 401-402.
- [2] DOUBOV A A. Screening of weld quality using the magnetic metal memory effect[J]. Welding in The World, 1998, 41: 196-198.
- [3] DOUBOV A A. Development of a metal magnetic memory method[J]. Chemical and Petroleum Engineering, 2002, 47(11/12): 837-839.
- [4] IVANOV P A, ZHANG V, YEOH C H, et al. Magnetic flux leakage modeling for mechanical damage in transmission pipelines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 34(5): 3020-3023.
- [5] 任吉林, 舒铭航, 伍家驹, 等. 18CrNi4A 钢力-磁效应的 ANSYS 模拟[J]. 材料工程, 2001(11): 40-44.
REN Jilin, SHU Minghang, WU Jiaju, et al. Simulation of stress-magnetization effect on 18CrNi4A steel by ANSYS[J]. Materials Engineering, 2001(11): 40-44.
- [6] 姚凯, 王正道, 邓博, 等. 金属磁记忆技术的数值研究[J]. 工程力学, 2011, 28(9): 218-222.
YAO Kai, WANG Zhengdao, DENG Bo, et al. Numerical study on metal magnetic memory technique[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(9): 218-222.
- [7] YAO Kai, DENG Bo, WANG Zhengdao. Numerical studies to signal characteristics with the metal magnetic memory-effect in plastically deformed samples[J]. NDT&E International, 2012, 47: 7-17.
- [8] YAO Kai, SHEN Kai, WANG Zhengdao, et al. Three-dimensional finite element analysis of residual magnetic field for ferromagnets under early damage[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2014, 354: 112-118.
- [9] REN Shangkun, FU Renzheng, LI Xinlei, et al. Influence of environmental magnetic field on stress-magnetism effect for 20 steel ferromagnetic specimen[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2009, 51(12): 672-675.
- [10] 高庆敏, 丁红胜, 刘波. 金属磁记忆信号的有限元模拟与影响因素[J]. 无损检测, 2015, 37(6): 86-91.
GAO Qingmin, DING Hongsheng, LIU Bo. The finite element simulation and influence factors of metal magnetic memory signals[J]. Nondestructive Testing, 2015, 37(6): 86-91.
- [11] 苏三庆, 高波, 王威, 等. 建筑钢板件力磁效应的 ANSYS 有限元模拟研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(6): 771-775.
SU Sanqing, GAO Bo, WANG Wei, et al. Research on ANSYS finite element simulation of stress-magnetization effect on tensile steel plate[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2016, 48(6): 771-775.
- [12] 徐滨士, 董丽红. 再制造质量控制中的金属磁记忆检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 3-4.
XU Bingshi, DONG Lihong. Metal magnetic memory testing method in remanufacturing quality control[M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2015: 3-4.
- [13] 苏三庆, 马小平, 王威, 等. 基于 ANSYS 有限元模拟的钢丝绳单丝拉伸力-磁耦合研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(3): 309-316, 331.
SU Sanqing, MA Xiaoping, WANG Wei, et al. Research on magneto-mechanical coupling on tensile monofilament steel wire rope based on ANSYS finite element simulation[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(3): 309-316, 331.
- [14] 任吉林, 林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 377-378.
REN Jilin, LIN Junming. Electromagnetic nondestructive testing[M]. Beijing: Science Press, 2008: 377-378.
- [15] IORDACHE V E, HUG E, BUIRON N. Magnetic behavior versus tensile deformation mechanisms in a non-oriented Fe-(3wt.%)Si steel[J]. Materials Science and Engineering, 2003, A359: 62-74.

(编辑 桂智刚)