

金属磁记忆检测技术机理模型

徐敏强, 李建伟, 冷建成, 徐明秀

(哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001, ljw2050933@yahoo.com.cn)

摘要: 研究了铁磁构件在应力和地磁场共同作用下的磁记忆检测机理, 从磁记忆的原理出发, 根据铁磁材料所具有的自发磁化和磁畴的特点以及磁的产生机制, 提出一种新的磁记忆检测技术的机理模型. 以此模型为基础, 得出试件表面所测得的磁场是缺陷处产生的漏磁场、试件本身感应磁场以及环境磁场矢量叠加的结果, 并以矩形槽为例用 matlab 对磁场进行了仿真, 很好的解释了磁记忆检测过程中的现象.

关键词: 磁记忆; 机理模型; 漏磁场; 磁畴

中图分类号: TG115.28+4

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)01-0016-04

Physical mechanism model of the metal magnetic memory testing technology

XU Min-qiang, LI Jian-wei, LENG Jian-cheng, XU Ming-xiu

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, ljw2050933@yahoo.com.cn)

Abstract: The mechanism of metal magnetic memory on ferromagnetic materials under loading and geomagnetic field was studied. Based on the principle of magnetic memory, the ferromagnetic materials with characteristics of spontaneous magnetization and magnetic domain, as well as the magnetic mechanism, we propose a new physical mechanism model of magnetic memory testing. Based on this model, we can conclude that the tested magnetic field on the surface is the result of vector superposition of the leakage magnetic field generated by defects, the inductive magnetic field of the specimen itself, and the environmental magnetic field. The magnetic field of a rectangular slot was simulated by matlab. The phenomena in the course of magnetic memory testing can be explained well.

Key words: magnetic memory; physical mechanism model; magnetic leakage field; magnetic domain

1997年,在美国洛杉矶举办的第50届国际焊接学术会议上,俄罗斯学者杜波夫首先提出了金属应力集中区—金属微观变化—磁记忆检测技术的相关学说,得到了国际学术界的认可,1999年在汕头召开的第七届无损检测学术年会上,杜波夫发表一篇题为“Diagnostics of Metal Items and Equipment by Means of Metal Magnetic Memory”的学术论文,引起了国内无损检测界的广泛关注^[1]. 该技术由于能有效地对铁磁构件的早期损伤,尤其是能对隐性不连续变化进行诊断,正日益受到人们的重视.

经过中外学者多年的探讨,关于其机理本质

的解释研究方面形成了以杜波夫为代表的基于机械效应的“自有漏磁场”学说^[2-3],南昌航空学院任吉林等代表的基于铁磁学的“能量平衡”学说^[4-5],南京燃气轮机研究所仲维畅代表的基于电磁学的“电磁感应”学说^[6],周俊华等利用“唯象理论”定量计算建立漏磁场数学模型^[7]等较为成熟的理论,它们分别从不同角度来解释磁记忆方面的一些现象.

机理的研究是技术的支撑点,由于金属磁记忆机理研究的复杂性,很多学者提出了一些原理图形来解释磁记忆现象. 其中出现了磁记忆检测原理图^[8]、压磁效应原理图^[9]、管件缺陷或应力集中区域磁场分布示意图^[10]、应力集中区的磁畴在工件内外磁场分布图^[11]等. 它们的提出给机理研究带来了新的活力,试图解释缺陷区或者应力

收稿日期: 2008-11-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10772061).

作者简介: 徐敏强(1960—),男,教授,博士生导师.

集中区的磁场特性和漏磁场的产生原因,给出的结论基本上是在应力集中区的磁场切向分量具有最大值,而法向分量改变符号且具有零值点,然而它们对磁记忆实验中出现的现象却不能给出完美的解释.本文在前人的基础上提出了一种新的机理模型图,以此解释磁记忆检测中出现的现象.

1 机理相关理论

金属磁记忆的原理是基于铁磁性金属构件运行时,在地磁场和载荷共同的作用下,在应力集中区域会发生具有磁致伸缩性质的磁畴定向和不可逆的重新取向,这种磁状态的不可逆变化在工作载荷消除后不仅会保留,还与最大作用应力有关^[12],由于应力集中的作用,显然缺陷处的应力是最大作用应力,产生了与作用应力相关的磁记忆.

铁磁学研究指出,根据磁介质的麦氏关系、循环关系以及居里定律,并取单位体积 $\omega = dV$,且定义 m 为单位质量的磁化强度,则得压磁效应关系式^[13]

$$\left(\frac{\partial \omega}{\partial H}\right)_{P,T} = -\rho \left(\frac{\partial m}{\partial P}\right)_{H,T}.$$

式中: ρ 为铁磁体的密度, H 为外磁场强度, P 为外加压力, T 为物体热力学温度.

该式左边显示的是等压力恒温条件下的磁致伸缩现象,右边显示的是恒外加磁场恒温条件下的压磁效应,压磁效应与磁致伸缩互为逆效应.该式表明:由于压磁效应的存在,当在外磁场环境下对铁磁材料施加力的作用时,材料的磁化状态要发生改变,这个公式可以作为金属磁记忆存在的一个重要依据.金属磁记忆检测是利用的压磁效应.

铁磁材料的基本特点是自发磁化和磁畴,在外加载荷及外磁场共同作用下,通过改变自发磁化矢量的取向分布及磁畴结构便可以影响该材料的磁性特征,这是金属磁记忆存在的必要条件.金属磁记忆检测实质上是从金属表面拾取地磁场和载荷共同作用下的金属构件“漏磁场”信息,即若材料表面存在裂纹或坑点等缺陷,则局部磁导率降低,缺陷区域会形成一个高磁阻区,磁力线通过该区域时受阻,在缺陷区域形成不均匀的磁势差,使原均匀分布的磁力线出现聚焦或畸变,由于金属与空气磁导率的差异,会在金属与空气边界出现磁导率跃变,这将导致内部磁场会在缺陷处“泄露”到试件表面^[14].

2 机理模型

由于磁晶体微观结构的特点,在裂纹缺陷的尖端区域和应力集中部位,一般以位错的形式存

在^[15].在文献[2]的基础上,这里先给出几点假设,假设试件受到地磁场和拉伸载荷的共同作用,且只有一个缺陷,除缺陷处外,其他试件部分是均匀的、连续的,这时就会产生如图1所示的机理模型图.

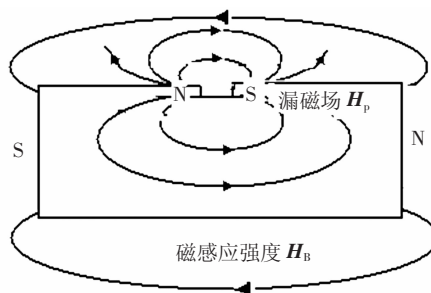


图1 应力集中区的磁畴磁场与试件极性

由此模型可以得到以下结论:

1) 试件表面所测得的磁场 H 是缺陷处产生的漏磁场 H_p 与试件本身感应磁场 H_B 以及环境磁场 H_e 矢量叠加的结果,即

$$H = H_p + H_B + H_e.$$

当磁性体被磁化后在其表面或内部不均匀处将产生磁荷^[15].漏磁场 H_p 是由于地磁场与缺陷处的应力共同作用于该处的磁畴,使其产生定向的不可逆重新取向,产生固定节点,进而产生磁极而产生的,试件本身的感应磁场是地磁场和应力共同作用使得受载试件在应力轴线上磁化产生的.环境磁场包括地磁场和其他构件和设备产生的磁场,在特定范围内,地磁场是一个常值,在检测的时候也可以消除.检测到的磁场由其他构件和设备产生的磁场、漏磁场和试件磁场组成,而漏磁场与试件磁场是相反的,试件感应磁场强度小于漏磁场强,缺陷处的磁场主要由漏磁场来决定.

2) 对于缺陷在试件中间位置的情形,由图中模型可以解释,磁场的切向分量 $H_p(x)$ 具有最大值,而法向分量 $H_p(y)$ 改变符号且具有零值点.把缺陷简化成规则的矩形槽,如图2所示,则会在矩形槽与拉应力平行的两侧形成等效带偶极子,

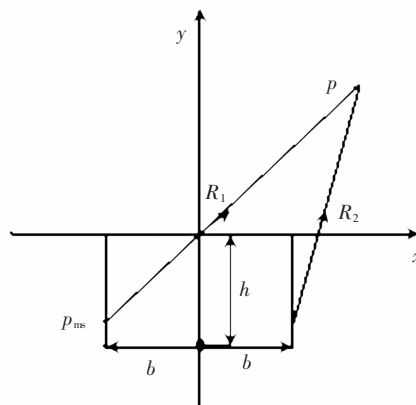


图2 矩形槽缺陷形成等效带偶极子

面磁荷度 p_{ms} 看作常数,则在槽壁上具有宽度为 dh 的面元上在 p 点产生的场强为^[14]

$$dH_1 = (2p_{ms}dh/R_1^2)R_1,$$

$$dH_2 = (2p_{ms}dh/R_2^2)R_2.$$

可以通过积分叠加得到其法向分量及切向分量,然后利用 matlab 画出相应的图形,如图 3 所示,漏磁场的切向分量 $H_p(x)$ 具有最大值,而法向分量 $H_p(y)$ 改变符号且具有零值点。

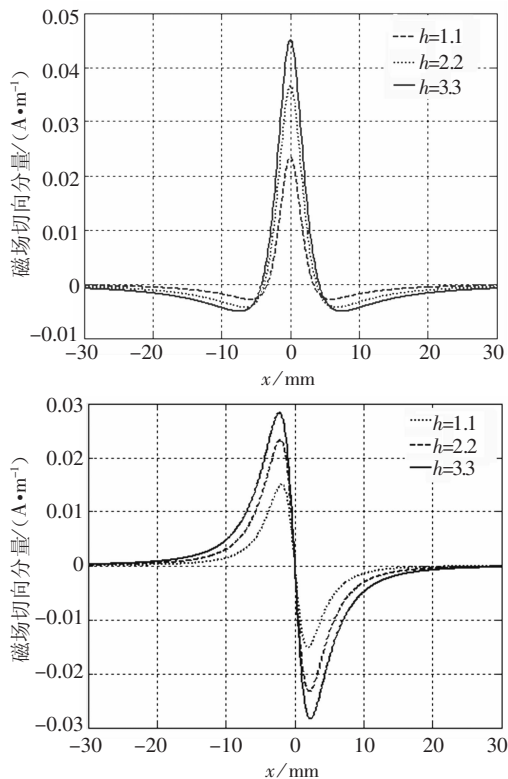


图3 矩形槽漏磁场 $H_p(x)$ 和 $H_p(y)$ 的分布曲线

3) 考虑到原试件磁场的影响,可以推断若缺陷不在试件的中间位置,在断裂前的过零点是与缺陷处有一定距离的,而且有两个。这个距离可由试件磁场与极化磁场以及缺陷距离中间位置的远近共同决定,关于这一点可以通过一个试验得到证明,图4所示的是缺陷不在中间位置的试件以及检测得到的 $H_p(y)$ 曲线图。

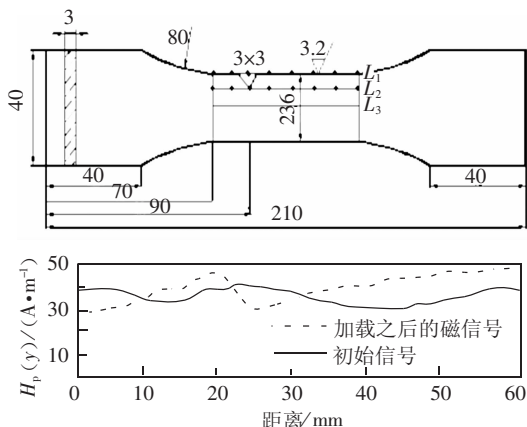


图4 缺陷不在中间位置的试件以及检测得到的 $H_p(y)$ 曲线

4) 应力 σ 与漏磁场法向分量 $H_p(y)$ 有一定的对应关系,如图5所示,其定量的关系现在仍是本方向的一个难点。应力将导致缺陷处磁畴变化,并导致其重新取向,磁畴的变化平行于拉力方向或垂直于压力方向,也可理解为应力的增大将导致磁荷的增加,但是由于贴磁体具有的磁饱和的特性,故其增强到某一饱和值后将会有所改变。

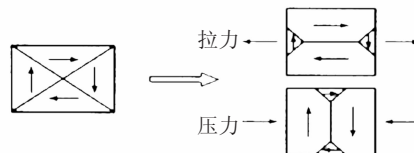


图5 应力引起磁畴的重新取向

5) 试件断裂时磁场形成突变的原因是在两个断面形成了磁极,显然磁极处磁力线是最为密集的。故会在试件断裂时断口处磁信号激变,形成较大梯度的变化,关于这一点文献[12,16]给出了详细的讨论。在这里只给出结论,如图6所示。

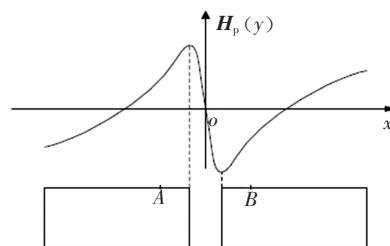


图6 试件断裂后法向分量 $H_p(y)$ 激变

6) 随裂纹深度的变化,切向分量的峰值在逐渐变大,法向分量的峰值、峰峰值、梯度、曲线斜率都朝着变大的趋势发展。同样增强到一定饱和值后也将发生变化。

3 结 论

磁记忆机理的研究是一个广泛关注的难点,机理理论研究涉及到磁物理学、金相学、铁磁学、弹塑性力学、断裂力学等多学科,是一个比较复杂的问题,很多问题有待于解决,就目前而言,机理方面的研究远落后于技术应用,由于机理的基础性作用,必须加以更深入的研究。

参考文献:

- [1] WANG Li, FENG Meng-li, DING Hong-sheng, *et al.* Theory and application of testing for metal magnetic memory [J]. Physics Examination and Testing, 2007, 25(2):25-30.
- [2] YIN Da-wei, XU Bin-shi, DONG Shi-yun, *et al.* Magnetic memory testing for medium carbon steel under the condition of fatigue experiment [J]. Chinese Journal of Mechanical engineering, 2007, 43(3):60-65.

- [3] 刘桂良. 磁记忆检测技术在典型钢结构无损检测中的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2006.
- [4] REN Ji-lin, WU Guan-hua, SONG Kai, *et al.* Study on the mechanism of metal magnetic memory testing [J]. *Nondestructive Testing*, 2002, 24(1): 29 – 31.
- [5] REN Shang-kun, LI Xin-lei, REN Ji-lin, *et al.* Studies on physical mechanism of metal magnetic memory testing technique[J]. *Journal of Nanchang HangKong University*, 2008, 22(2): 11 – 17.
- [6] ZHONG Wei-chang. Theoretical fundamentals of the metal magnetic memory diagnostics: sponyaneous magnetization of ferromagnetic materials by elastic – plastic strain [J]. *Nondestructive Testing*, 2001, 23(10): 424 – 426.
- [7] ZHOU Jun-hua, LEI Yin-zhao. The theoretical discussion on magnetic memory phenomenon about positive magneto – strictive ferromagnetism materials[J]. *Journal of Zhengzhou University*, 2003, 24(3): 101 – 105.
- [8] YIN Da-wei, Xu Bin – shi, DONG Li-hong, *et al.* Change of magnetic memory signals under different testing environments[J]. *Acta Arm Amentar*, 2007, 28(3): 319 – 323.
- [9] 任吉林, 林俊明. 金属磁记忆检测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [10] 唐德东, 周鹏. 磁记忆技术在管件裂纹检测中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(4): 255 – 256.
- [11] 蹇兴亮. 金属磁记忆无损检测技术[J]. *现代物理知识*, 2005, 17(6): 33 – 34.
- [12] 徐明秀. 基于磁记忆检测技术的铁磁性材料旋转弯曲疲劳损伤诊断研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [13] XING Hai-yan. The Research of Metal Magnetic Memory Technology on Stress Detection [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [14] 咎会萍. 磁性材料退磁场理论的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [15] XU Zhang-ying, XU Ying, WANG Jian-bin, *et al.* The Principle and Application of Crack Leakage Magnetic Quantitative Test [M]. Beijing: National Defence industry Press, 2005.
- [16] WANG Dan, DONG Shi-yun, XU Bin-shi, *et al.* Study on metal magnetic memory testing of stress concentration position [J]. *Failure and analysis*, 2007, 2(2): 12 – 15.

(编辑 张 宏)

(上接第15页)

载很大,会造成粘弹性材料发生破坏,所以阻尼器对隔振器的可靠性也需要进行讨论和分析. 从图5中可以看出,虽然有阻尼器失效,但是隔振器一阶共振峰的隔振效果并没有明显降低. 不过,固有频率发生了一定的漂移. 这就表明,虽然粘贴粘弹性材料的阻尼板失效后对隔振效果没有显著影响,但是对整星系统的固有频率有部分影响.

5 结 论

从实验结果可以看出,添加整星隔振器以后,从运载火箭到卫星的传递率有明显的降低,且降低幅值很大. 此外,在有阻尼器失效的同时,整星隔振器的传递率以及固有频率没有明显变化,其隔振性能及可靠性完全满足实际发射要求.

参考文献:

- [1] WINTHROP F, COBB R G. Survey of state-of-the-art vibration isolation research and technology for space applications[C]//*Proceedings of SPIE on 2003 Smart Structures and Materials*. San Diego: [s. n.], 2003, : 13 – 26.
- [2] BICOSA S, JOHNSON C D, DAVIS L P. Need for and benefits of launch vibration isolation[C]//*Proceeding of SPIE*. San Diego: [s. n.], 1997: 14 – 19.
- [3] STEWART D. A platform with six degree of freedom [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1965, 180(15): 371 – 386.
- [4] JOHNSON C D, WILKE P S, DARLING K R. Multi-axis whole-spacecraft vibration isolation for small launch vehicles[C]//*Proceeding of SPIE*. San Jose: [s. n.], 2001: 153 – 161.
- [5] 张军, 谌勇, 华宏星, 等. 卫星减振的试验研究[J]. *应用力学学报*, 2006, 23(1): 76 – 79.
- [6] 陈阳, 方勃, 曲秀全, 等. 新型整星隔振器隔振性能分析[J]. *宇航学报*, 2007, 28(4): 986 – 990.
- [7] ZHANG Y M, WEN B C, LIU Q L. Reliability sensitivity for rotor – stator systems with rubbing[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 259(5): 1095 – 1107.
- [8] ZHANG Yi-min, HE Xiang-dong, LIU Qiao-ling, *et al.* Robust reliability design of banjo flange with arbitrary distribution parameters[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2005, 127: 408 – 413.
- [9] LEVY E C. Complex curve fitting [J]. *IRE Transaction on Automatic Control*, 1959, 4(3): 37 – 43.

(编辑 张 宏)