

# 静载荷下硅钢片的磁畴结构变化

郑初华,潘强华,任吉林,宋 凯,刘昌奎

(南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室,南昌 330063)

**摘要:**利用 Bitter 粉纹法观察了未经磁化、受力程度不同的无取向硅钢片试件的磁畴结构,对比分析了应力对磁畴及磁场值  $\Delta B$  的影响。结果表明:无取向硅钢试件在未受力或应力集中较小时,晶粒内磁畴以  $180^\circ$  剑状畴为主,同一晶粒内畴壁相互平行;随着应力集中程度增加,畴壁长度和间距发生改变,出现了迷宫畴,并且随着应力集中程度越大,迷宫畴的数量越多,表面磁场值  $\Delta B$  越大。试验为探讨磁记忆检测的微观机理提供了依据。

**关键词:**磁畴结构;Bitter 粉纹法;迷宫畴;畴壁

中图分类号:TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2011)07-0011-04

## Magnetic Domains Structure Chang of Silicon Steel Sheet Under Static Loads

ZHENG Chu-Hua, PAN Qiang-Hua, REN Ji-Lin, SONG Kai, LIU Chang-Kui

(Key Lab of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** The magnetic domains of silicon steel sheet, which was not magnetized and was loaded on different intensity or direction, were observed with the Bitter method. The effect of stresses on magnetic domains and the magnetic signals  $\Delta B$  was then analyzed. The results show that there mainly exist  $180^\circ$  gladiate domains for the silicon steel sheet with low load or no load, with their walls being small in the same crystalline grain. Then, with the load enhancing, the domain walls length and space are changed and the mazy domains appear. The number of the mazy domains and the magnetic signals of  $\Delta B$  increase with the load increasing.

**Keywords:** Magnetic domain structure; Bitter method; Mazy domain; Domain wall

铁磁机械构件在使用过程中承受各种载荷作用,其内部形成的应力集中易产生位错、滑移变形,诱发裂纹,导致蠕变、疲劳、腐蚀的加速,从而导致金属构件或机械设备失效甚至发生重大事故<sup>[1-2]</sup>。因此,尽早发现铁磁机械承力构件的应力集中和损伤区域,并进行有针对性的无损检测和状态监测,对于早期预防构件的断裂故障和防止重大恶性事故的发生具有重要意义<sup>[3-4]</sup>。铁磁构件在周期疲劳载荷的作用下,会在构件内部组织产生应力能,根据能量最小原则,为保持其内部组织的自由能最小,在地磁场的激励下会产生磁致伸缩性质的形变,引起磁畴壁

的位移,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。这种在应力和地磁场的作用下,铁磁体内产生的晶粒转动和磁致伸缩逆效应,引起磁畴组织定向和不可逆转的重新取向,在宏观上表现为磁特性改变的现象称为铁磁材料的力-磁效应<sup>[5-6]</sup>。笔者通过对无取向硅钢片试件进行拉伸试验后,进行静载荷下硅钢片磁畴组织结构变化的试验研究,以探讨受载铁磁材料应力集中区域磁畴组织结构及磁特性的变化规律,为进行基于铁磁材料力-磁效应的磁记忆检测微观机理的研究提供理论基础。

## 1 试验方案及条件

以铁磁性金属材料 Fe-3%Si 冷轧取向硅钢片为研究对象,其试件尺寸及形状如图 1 所示,试件的厚度为 0.5 mm,主要性能参数见表 1。

收稿日期:2010-11-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51065022);教育部 NDT 重点实验室开放基金资助项目(ZD200729012)

作者简介:郑初华(1968—),男,副教授,主要研究方向为计算机、测控和无损检测。

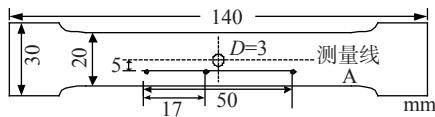


图 1 含中心小孔试件的尺寸及形状

表 1 Fe-3%Si 硅钢片材料性能指标

主要化学成分/%				屈服点 /kN	抗拉强度 /kN	伸长率 /%
C	Si	Mn	S			
0.06	3	0.15	0.025	1.2	2.73	24

试件由微机控制电子式万能试验机加载,载荷-位移曲线如图 2 所示。将试件的应力-应变曲线分为 A,B 和 C 三部分,其中 A 为弹性阶段,B 为均匀塑性变形阶段,C 为不均匀塑性变形阶段。分别在 A,B 和 C 三阶段内选取载荷点对试件进行加载。根据各种试件的载荷-位移曲线,分别在 A,B 和 C 阶段选取载荷点,在同一拉伸速率作用下,对试件进行不同程度的拉伸(拉伸速率  $0.02 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ),以产生不同程度的残余变形和残余应力,部分试验参数及结果如表 2 所示。

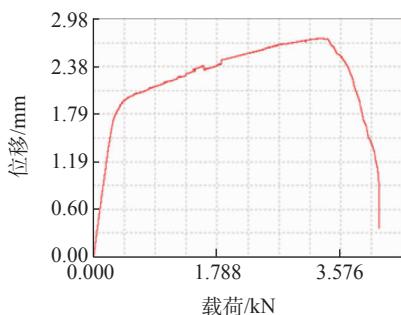


图 2 载荷-位移曲线

表 2 部分试验参数及结果

试件号	载荷/kN	试件号	载荷/kN	试件号	载荷/kN
1	0	5	1.40	9	2.36
2	0.5	6	1.64	10	2.60
3	0.725	7	1.72	11	2.73
4	1.2	8	2.15		

## 2 含小孔平板单向拉伸的应力集中<sup>[7]</sup>

如图 3 所示,平板在  $x$  轴方向受均匀分布的拉应力  $\sigma_0$  作用,并在板中开有半径为  $a$  的小圆孔,结果引起应力的重新分布,在离孔很近的区域内产生很大的局部应力,在离孔边缘几倍圆孔直径处,可以忽略其影响。

通过弹性力学计算方法,可以获得含小孔平板

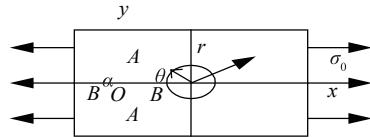


图 3 平板圆孔的应力集中

在单向拉伸时,板中任意一点  $P$  处的应力分量表达式为:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{\sigma_0}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_0}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_0}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_0}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \\ \sigma_{\theta\theta} &= -\frac{\sigma_0}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta\end{aligned}\quad (1)$$

将极坐标方程组(1)转换为直角坐标,根据弹性力学可得应力分量为:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_0 - \frac{3\sigma_0}{2} a^2 \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2} - \sigma_0 a^2 \frac{x^4 - 6x^2 y^2 + y^4}{(x^2 + y^2)^3} \\ &\quad + \frac{3\sigma_0}{2} a^4 \frac{x^4 - 6x^2 y^2 + y^4}{(x^2 + y^2)^4} \\ \sigma_y &= -\frac{\sigma_0}{2} a^2 \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2} + \sigma_0 a^2 \frac{x^4 - 6x^2 y^2 + y^4}{(x^2 + y^2)^3} \\ &\quad - \frac{3\sigma_0}{2} a^4 \frac{x^4 - 6x^2 y^2 + y^4}{(x^2 + y^2)^4} \\ \sigma_{xy} &= -\sigma_0 a^2 \frac{xy}{(x^2 + y^2)^2} - 4\sigma_0 a^2 \frac{xy(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^3} \\ &\quad + 6\sigma_0 a^4 \frac{xy(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^4}\end{aligned}\quad (2)$$

将某点的坐标值代入,即可求得该点的应力分量值大小,可与有限元解进行对比。

对方程组(1)进行分析,在孔边  $r=a$  处,有:

$$\begin{aligned}\sigma_\theta &= \sigma_0 - 2\sigma_0 \cos 2\theta = \sigma_0 (1 - 2\cos 2\theta) \\ \sigma_r &= 0, \sigma_{\theta\theta} = 0\end{aligned}\quad (3)$$

在孔边的  $\theta=\pi/2$  及  $\theta=3\pi/2$  两点,  $\sigma_\theta$  达最大值,有  $\sigma_{\theta\max}=3\sigma_0$ ;而在孔边的  $\theta=0$  及  $\theta=\pi$  两点,  $\sigma_\theta$  为负值,有:  $\sigma_{\theta\min}=-\sigma_0$ ,它的几个重要数值如表 3 所示。

表 3 孔边  $\sigma_\theta$  值

$\theta$	$\sigma_\theta$	$\theta$	$\sigma_\theta$	$\theta$	$\sigma_\theta$
$0^\circ$	$\sigma_0$	$45^\circ$	$\sigma_0$	$90^\circ$	$3\sigma_0$
$30^\circ$	0	$60^\circ$	$2\sigma_0$		

根据缺口试样在弹塑性状态下的应力分布,弹塑性状态下缺口根部轴向应力  $\sigma_y$  最大,随着离开根部距离的增大,  $\sigma_y$  不断下降,而横向拉应力  $\sigma_x$  在根部时则为零,随着离开根部距离的增大先增加后减小;塑性状态下当缺口内侧截面上局部区域产生塑性变

形后,最大应力已不在缺口根部,而在其内侧一定距离处。

### 3 试验结果与分析

对试件中心圆孔部位出现 $45^\circ$ 滑移线的应力集中部位进行切割、退火、打磨和抛光等金相处理,使试件满足金相观察要求;再将配置好的磁悬液<sup>[8]</sup>滴在试件观察面上,等待磁悬液的水分自然蒸发,此时,由于样品表面的磁畴分界线上有散磁场的存在,在数分钟内铁磁粉末会被散磁场吸聚在磁畴界限上<sup>[9]</sup>,显示出畴壁,从而可以方便地观察到磁畴形貌。

对8块硅钢片钢分别施加0,0.75,1.2,1.64,2.36,2.6和2.73 kN的载荷至断裂,然后通过Bitter粉纹法对磁畴进行观察,图4是在600倍显微镜下测量线上17 mm处的磁畴形貌。在拉应力的作用,中心圆孔缺陷部位周围出现了 $45^\circ$ 的滑移线;在无内应力的情况下,晶粒之间磁畴方向不同,晶粒内部磁畴结构为 $180^\circ$ 片状畴;在载荷进入均匀的塑性变形阶段, $90^\circ$ 壁逐渐增加,开始产生迷宫畴,且平行于拉应力方向磁畴数量减少,垂直方向上磁畴逐渐增多;在载荷进入不均匀塑性变形阶段,迷宫畴的数量逐渐增加,并且由于试件内部应力集中程度的不同,大部分磁畴的宽度也随之发生变化。这一试验结果说明,由于外应力的作用,使系统的能量增加,

为了重新使系统稳定,能量要重新分布,使得磁畴要发生转动、移动和畴壁的消失来降低能量。正是由于加载铁磁性材料存在力-磁效应,使得加载铁磁体会产生磁致伸缩性质的形变,引起内部磁畴在环境地磁场中产生畴壁位移甚至不可逆的重新取向排列,改变其自发磁化的方向以增加磁弹性性能,来抵消应力能的增加;而当外部动载荷消除后,由于材料内部存在内耗效应,使得加载在金属内部所形成的应力集中区也得以保留,为抵消应力集中区的残余应力能,磁畴组织的重新排列取向也会保留下,并在试件表面形成漏磁场。

为了研究试件表面漏磁场与试件内部磁畴组织结构之间的关系,在应力集中区选取了17 mm处的点(图1),试件表面此点漏磁场的变化如表4所示。

表4 试件表面17 mm处点的磁场值

试件 编号	磁场值/ $\times 10^{-4}$ T		
	未加载	加载后	相减后(C01)
3	0.18	0.034	-0.146
4	0.134	-0.016	-0.15
6	0.268	0.029	-0.0239
9	0.285	-0.098	-0.383
10	0.209	-0.331	-0.54
11	0.233	-0.347	-0.58

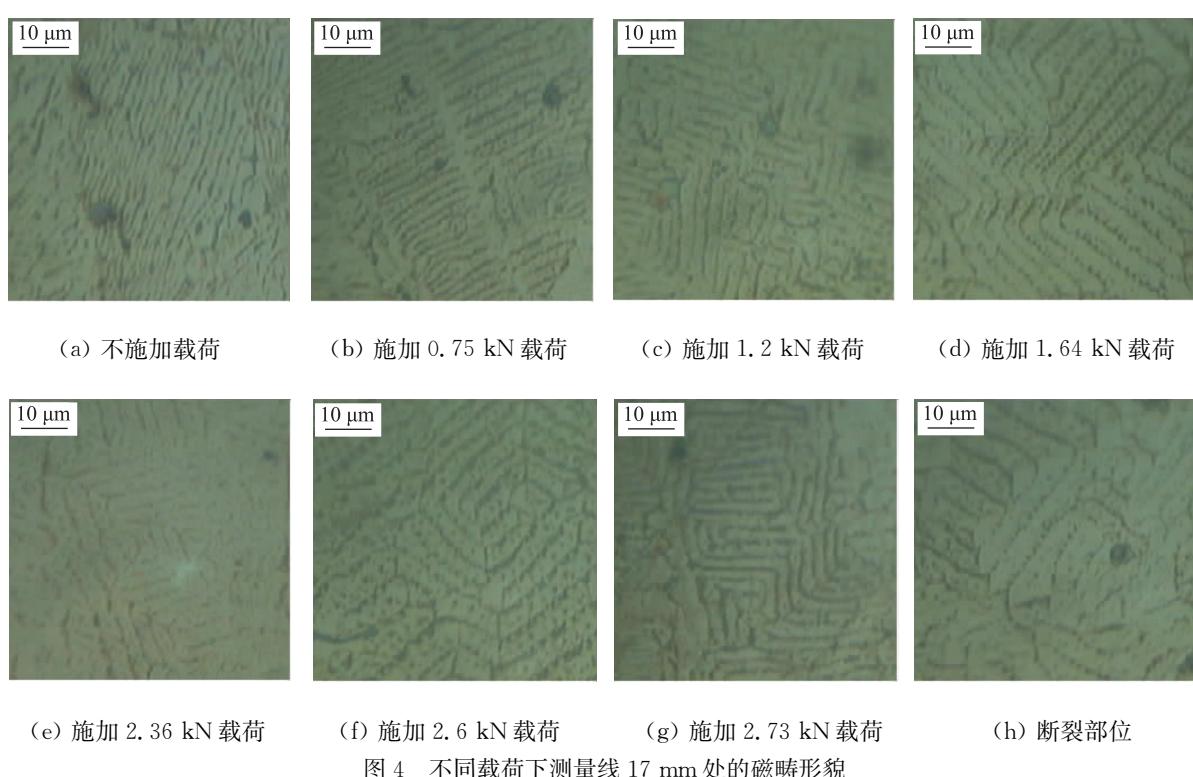


图4 不同载荷下测量线17 mm处的磁畴形貌

由表4可见,该点在未加载荷时的磁场值变化趋势是相差不大的。但在受载荷后,该点的磁场值变化较大,且随着载荷的增加,磁场值的变化越大。图5是不同载荷下该点 $\Delta B$ 的变化情况,可见随着载荷的增大, $\Delta B$ 也增大。从图4(a)看到,在没有受载荷的情况下,几乎所有的磁畴都是 $180^\circ$ 片状畴;当载荷达到屈服应力,部分 $180^\circ$ 片状畴转向 $90^\circ$ 畴;随着载荷的继续增加,进入塑性变形阶段,从图4(e)~(g)看到,出现了大量的迷宫畴,并且磁畴的长宽及体积也发生了明显的变化。可见,由于试件受到不同拉应力的作用,其内部磁畴结构会发生变化,从而导致试件表面磁场的畸变。由此可知,磁畴组织结构的变化和试件表面的磁场值存在着某种必然的联系。

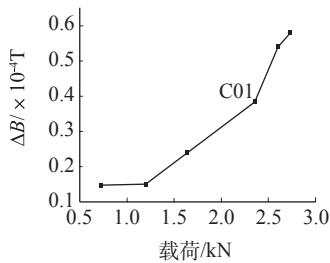


图5 不同载荷下测量线17 mm处 $\Delta B$ 的变化曲线

铁磁体在受力状态下,会表现为应力各向异性。应力的存在使得晶体增加了应力能,它对磁畴磁化强度的方向产生了影响,使得磁化方向不能任意取向。同时应力引起的形变增加了磁弹性性能,使铁磁体产生了磁致伸缩性质的形变,从而引起磁畴壁的位移发生变化,而应力各向异性和磁晶各向异性其本质类似,只是影响系数不一样。当晶体存在应力时,畴壁能将会增大,在畴壁内磁矩角度的变化率也将增大,因此会导致畴壁厚度的减小。

## 4 结论

金属磁记忆检测技术对于预防构件的断裂故障和防止重大恶性事故的发生具有重要意义。为进一步探讨这一检测方法的微观机理,通过带有中心圆孔缺陷的硅钢片试件的加载试验,然后进行静载荷下硅钢片磁畴组织结构变化的试验研究,以观察磁畴组织结构的变化规律,得出如下结论:

(1) 中心带圆孔缺陷的缺口试样在弹塑性状态下的应力分布,弹性状态下缺口根部轴向应力 $\sigma_y$ 最大,随着离开根部距离的增大, $\sigma_y$ 不断下降,而横向拉应力 $\sigma_x$ 在根部时则为零,随着离开根部距离的增

大先增加后减小;塑性状态下当缺口内侧截面上局部区域产生塑性变形后,最大应力已不在缺口根部,而在其内侧一定距离处。

(2) 无内应力晶粒之间磁畴方向不同,晶粒内部磁畴结构为 $180^\circ$ 片状畴。载荷进入均匀的塑性变形阶段, $90^\circ$ 壁逐渐增加,产生迷宫畴,垂直于应力方向的磁畴也逐渐增多。进入不均匀塑性变形阶段,迷宫畴的数量逐渐增加,并且由于试件内部应力集中程度的不同,磁畴的宽度也随之发生变化。

(3) 随着拉应力的增大,试件表面的磁场信号 $\Delta B$ 也增大,迷宫磁畴的数量也随即增多。

(4) 由于外应力的作用,使系统的能量增加,为了重新使系统稳定,能量要重新分布,使得磁畴要发生转动、移动和畴壁的消失来降低能量,并且使得畴壁能以及畴壁厚度也都发生变化。

上述结论可为解释在应力和地磁场的作用下,铁磁体内产生的晶粒转动和磁致伸缩逆效应,会引起磁畴组织定向和不可逆转的重新取向,以致在宏观上表现为磁特性的改变,为磁记忆检测技术的微观机理提供很好的依据。

## 参考文献:

- [1] 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,2000:44—78.
- [2] 邱新杰,李午申.金属磁记忆在焊接缺陷检测领域的研究现状及发展[J].焊接技术,2009,38(2):2—4.
- [3] 耿荣生.磁记忆检测技术在飞机结构件早期损伤监测的应用前景[J].无损检测,2002,24(3):118—122.
- [4] Withers P J, Turski M, Edwards L, et al. Recent advances in residual stress measurement[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85(3): 118—127.
- [5] 张丽慧,安颖.磁畴结构是来源于能量最小原理的定性分析[J].河北理工学院学报,2005,27(3):105—121.
- [6] 杨全民.铁磁性的物理本质[J].连云港师范高等专科学校学报,2004,6(2):89—91.
- [7] Shindo Y, Komatsu T. Magnetic stress intensity factor for an edge crack in a soft ferromagnetic elastic half-plane under tension[J]. Acta Mechanica, 2006: 182—184.
- [8] 任吉林,白鹭,范振中,等.航空铁磁材料磁记忆检测新方法[J].航空学报,2009,11(30):2224—2228.
- [9] 钟文定.铁磁学(中册)[M ].北京:科学出版社,2000: 37—48.