

# 磁弹效应力传感器回线误差初探

金属物理教研室 武兵书 吴 兵 苏世漳

## 摘 要

回线误差是影响磁弹效应力传感器综合精度的一项重要误差。为了探索这类误差产生的原因,本文设计了3%Si—Fe冷轧Goss织构电工钢片单晶体拉应力试样。实验结果表明,随着样品工作区中单晶体的 $[100]$ 方向与应力 $\sigma$ 之间的夹角 $\theta$ 的变化,样品的回线误差不但有数值大小的变化,而且回线误差的类型也不同。一种是,当卸载时,传感器的输出电压值高于加载到同一载荷时传感器的输出电压值,另一种则与此相反。本文分析了这类材料的传感器在工作状态下,单晶体内部磁畴分布的变化过程,认为回线误差大小及类型随 $\theta$ 角的变化,是单晶体内部晶体缺陷与铸壁相互作用的结果。

回线误差是影响磁弹效应力传感器综合精度的一个重要因素,不少研制单位对此作过工作,其中苏联公开发表的资料较多[1], [2], [3]。但资料中介绍的产品的精度并不高,其中回线误差在0.3%~0.5% [1]。从实际产品的精度上看,目前以瑞典ASEA公司的精度最高(综合精度0.05%,其中回线误差0.05%以下[4])。但是由于技术保密,它的研究资料未见公开发表过。

对于磁弹效应力传感器回线误差产生的物理过程,过去的看法基本采用了文献[2]的观点,或是以[2]观点为基础的扩展。[2]的作者认为,磁弹滞后现象是两个过程的结果:(1)弹性后效引起的力学滞后过程,这个过程发生在任何大小的机械应力之下,(2)磁化过程引起的磁滞后过程。

我国国内对磁弹效应力传感器的研究起步较晚,对于回线误差产生原因的研究基本上采用了[2]的观点。但最近也有人通过实验,指出磁弹效应力传感器的回线误差与直流磁化矫顽力关系比较弱,在制造高精度力传感器时可以不考虑矫顽力的影响[5]。

随着工业自动化程度的迅速发展,对力传感器的精度要求也越来越高,因此能否进一步降低回线误差,提高力传感器的精度,就成了进一步发挥磁弹效应力传感器的优势,扩大这类传感器在冶金、矿山,交通运输等重载测力场合的应用范围的重要课题。

本文准备就以3%Si冷轧取向硅钢片为材料制作的传感器样品的试验结果,对这类传感器回线误差的产生原因作一初步探讨。

## 试样的制备

为了尽量减少样品的机械加工和粘结应力对实验结果的影响,本实验采用了单晶单片

拉应力试样（见图1）。样品的工作区（四孔中心部分）为一单晶体。样品经电解浸蚀的方法（电解液为饱和磷酸—铬酸酐溶液）显示出晶界后，经X—光定向，然后在数控钼丝

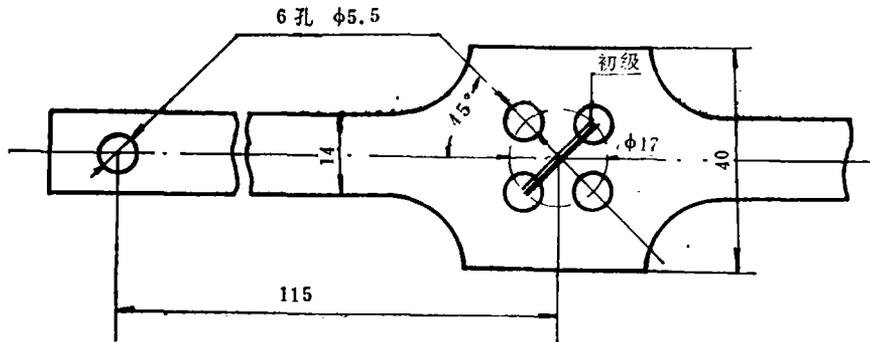


图1 样品尺寸图

切割机床上加工而成。样品按应力 $\sigma$ 与工作区单晶体的 $[100]$ 之间的夹角 $\theta$ 的不同分为三组，见表1。

表1

样品编号	S5	S6	S1	S15	S7	S8
$\theta$ (度)	0	0	90	90	45	45
$\phi$ (度)	2.5	4.0	4.0	2.5	7.0	7.0

注： $\phi$ 角为单晶体表面与 $(110)$ 面之间的夹角。

样品加工完后，在氢气氛中进行去应力退火，退火工艺见图2。

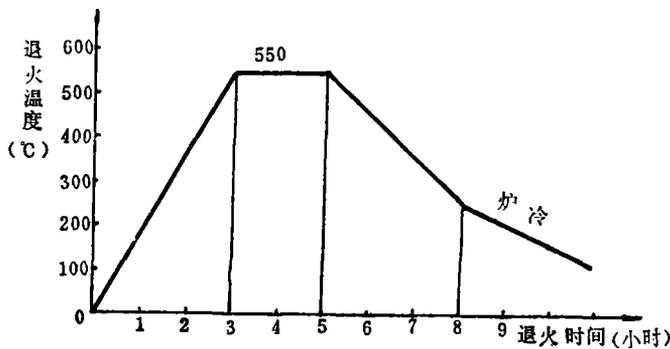


图2 去应力退火工艺

样品的初级（激磁）线圈和次级（测量）线圈成 $90^\circ$ 交叉绕制（见图1）。初级45匝， $\phi 0.27$ 电磁线双线并绕，次级200匝， $\phi 0.09$ 电磁线单线。

## 实验装置及结果

实验用激磁电源为0.2%交流稳压电源，加力装置采用质量精度为0.1%的砝码，样品

次级线圈的输出信号经线性整流后，由PZ8型直流数字电压表测量，PZ8电压表标称精度0.02%。

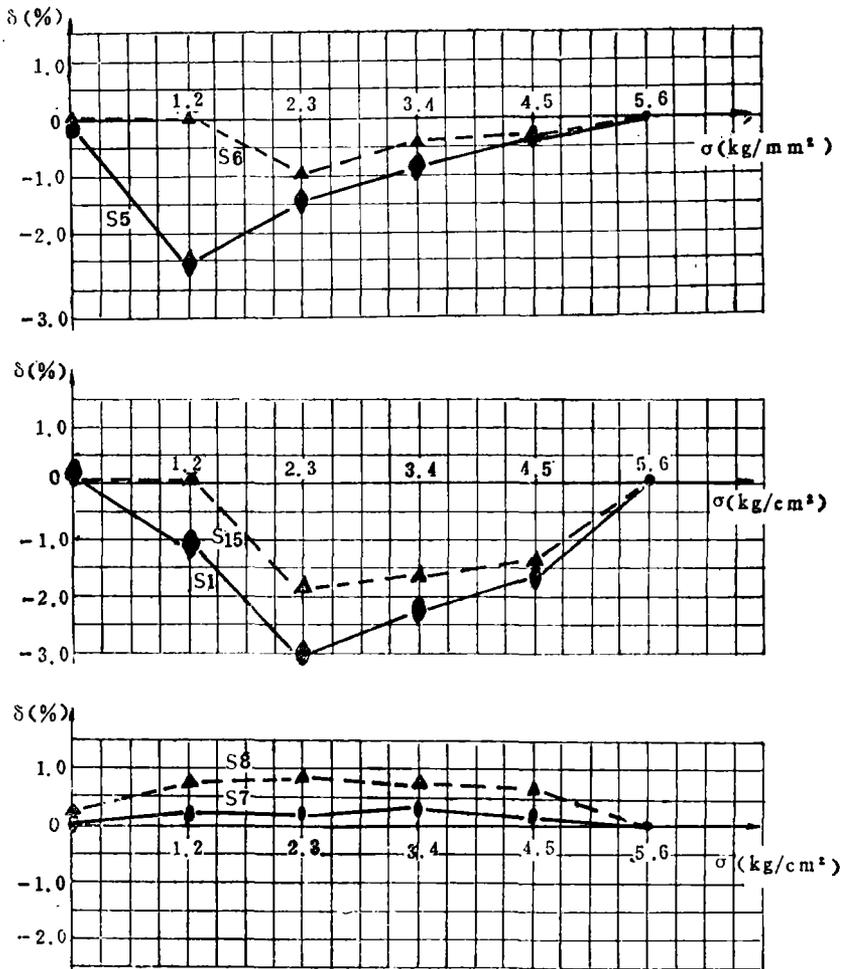


图 3 回线误差试验结果

图 3 是回线误差的实验结果。回线误差 $\delta$ 定义为：

$$\delta = \frac{\text{减载时电压输出} - \text{加载时电压输出}}{\text{额定载荷时样品净输出电压}} \times 100\%$$

## 讨 论

从图 3 给出的实验结果可以看出，3%SiGoss 织构硅钢片单晶单片拉应力磁弹效应传感器的回线误差不仅有正的（即样品减载时特性曲线相对于加载时特性曲线是滞后的），而且有负的。这种回线误差的分布类型与样品的 $\theta$ 角有着强烈的依赖关系，同时回线误差的绝对值也随 $\theta$ 角的不同而具有明显的变化。对于 $\delta > 0$ 这样一种回线误差分布类型及其产生原因，不少文章曾提及 [2]，[5] [6]，对 $\delta < 0$ 这一类型，只有 M·H·ГУМАНИО К 在作电源频率对回线误差影响时得到 $\delta < 0$ 的结果，但未加任何讨论和解释 [7]。

以往人们对于磁弹效应力传感器回线误差产生原因的讨论, 由于只是简单地套用了直流磁化时不可逆过程的形成理论, 而忽略了传感器是交流激磁这样一个特定条件, 因此这种理论难以解释  $\delta < 0$  这样的实验结果, 也就是可以理解的了。同时这种矛盾也启示我们, 认真分析  $\delta < 0$  这一现象, 将有助于进一步弄清回线误差产生的原因。

当传感器在工作时, 其中有三个过程在进行:

- (1) 交变磁场作用下的磁化过程;
- (2) 应力作用下的弹性变形过程;
- (3) 磁学量与力学量之间的相互作用过程。

现在就分别讨论这三个过程:

(1) 样品在工作时, 激磁磁场提供的静磁能和应力提供的应力能的总和比 3%Si—Fe 合金的磁各向异性常数  $K_1$  小一到二个数量级, 因此样品在工作时, 其中的磁化状态的改变只是由于畴壁移动造成的。(详细论述见 [8]) 在一定应力下, 样品的输出电压是在交流磁场作用下畴壁的往复运动使得二次线圈内磁通量的不断变化而产生的。在这个过程中由于畴壁的不可逆运动, 在不考虑应力作用下样品的变形时, 会引起回线的滞后。

(2) 在样品材料的弹性极限内, 应力可以引起样品的弹性形变。但由于滞弹性的存在, 即当应力恢复后, 材料的微观状态并不能完全恢复。这种微观状态的不能恢复主要是指位错组态由于脱钉和弓出而形成的滞弹性行为。[9] 图 4 是这个过程的示意图。

(3) 铁磁体在磁化时, 畴壁的可动性对晶体缺陷(特别是位错)是很敏感的。文献 [10] 推导了畴壁与位错相互作用能表达式:

$$\Phi_{d1} = -\frac{3}{2}\lambda_{100}(\gamma_1^2\sigma_{11} + \gamma_2^2\sigma_{22} + \gamma_3^2\sigma_{33}) - 3\lambda_{111}(\gamma_1\gamma_2\sigma_{12} + \gamma_2\gamma_3\sigma_{23} + \gamma_3\gamma_1\sigma_{31}) \quad (I)$$

$\sigma_{ij}$ : 位错应力场应力张量分量,

$\gamma_i$ : 磁化矢量的方向余弦。

同时还给出了畴壁运动时的矫顽场统计表达式, 其简化式为:  $H_c \propto (\rho L)^{1/2}$  (I)

$\rho$ : 晶体内位错密度

$L$ : 位错与畴壁的相互作用长度

从上两式可知: 位错应力场越大, 畴壁运动受位错阻力越大; 畴壁与位错相互作用长度越大, 畴壁运动受位错阻力越大。

下面我们根据上述三个过程的特征, 分析一下当样品受应力时, 晶体内位错组态在加载时与减载到同一载荷时的不重合现象对样品输出电压的影响。

(a) 当一个平面畴壁与图 4 中的 c 和 d 两种位错组态相遇时, 畴壁和位错之间的相互作用也会变化(图 5)。

显然减载时, 畴壁在磁场力作用下容易弯曲成位错相同的半径(关于这一点, 只要考虑到畴壁弯曲时会产生等效的表面张力, 利用简单的静力学平衡关系, 就可以

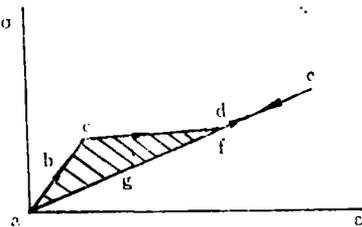
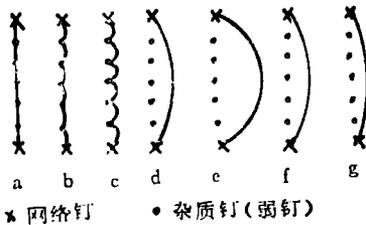


图 4 滞弹性过程示意图(取自[9])

得到  $F_H = \frac{T}{R}$ 。  $F_H$ : 单位长度畴壁受到的磁场力;

$R$ : 畴壁弯曲的曲率半径;  $T$ : 畴壁弯曲时产生的等效线张力), 这样位错与畴壁相互作用长度就变大了, 因此减载时位错对畴壁运动的阻力变大了。

(b) 当位错群沿畴壁法线方向穿过畴壁时, 如图 6, 这时由于减载时位错群中某两个相邻位错间距变小, 如果这两个位错同号时, 其应力场相互叠加。这样在减载时, 局部区域内畴壁运动受到位错阻力的最大值要比加载时的大(两位错反号时, 局部区域位错阻力最大值不变)。

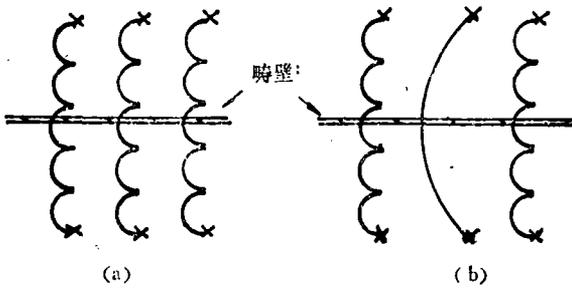


图 6 位错与畴壁相互作用示意图。

壁作用力合力。

因此我们可以看出, 由于位错组态不重合, 减载时畴壁运动所受阻力增大, 减载时畴壁往复运动区间变小, 从而在一个交变周期内, 样品二次线圈内的磁通量变化减少, 其输出的电动势也就随之减小, 这样就出现了样品的减载输出特性曲线“超前”于加载特性曲线, 也就是  $\delta < 0$ 。

综合上述讨论, 可以得到如下看法, 即实测得到的传感器回线误差是磁化过程引起的滞后与滞弹性引起的回线“超前”的合效应。当前者大于后者时,  $\delta > 0$ , 反之,  $\delta < 0$ 。实验结果中回线误差的类型及其数值大小随样品  $\theta$  角的变化, 也正说明了上述分析的合理性。

首先来看  $\theta$  角不同的样品, 其中单晶体内位错组态在加载到同一应力时, 发生不重合现象的机会和幅度。我们知道, 位错要发生脱钉和弓出, 就必须在其所在滑移系上得到分切应力才有可能。显然哪个位错所在的滑移系得到的分切应力大, 则那一个位错发生这种脱钉和弓出的机会也就多。根据分切应力定理:

$$\tau = \sigma \cos \phi \cos \lambda$$

$\sigma$ : 外应力

$\phi$ : 应力轴与滑移面间夹角

$\lambda$ : 滑移方向与应力轴之间夹角。

由此可以看出, 不同  $\theta$  角样品内滑移系所得到的分切应力取决于因子  $\Omega = \cos \phi \cos \lambda$ 。下面我们把不同  $\theta$  角的样品的取向因子  $\Omega$  的计算值列在下表内: (表 2)

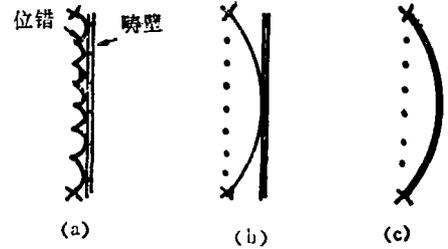


图 5 畴壁与不同位错组态相互作用

由以上两种情况的讨论可以看出, 由于位错组态的不重合, 会造成在减载时畴壁运动阻力大于加载到同一载荷时畴壁运动所受阻力。由于畴壁在交变场作用下作往复运动时, 在运动的边界处成立:

$$2H_l F \cos \varphi = \Sigma (Z)$$

$H_l$ : 外加磁场,  $I_s$ : 自发磁化矢量,  $\varphi$ :  $H$  与  $I_s$  之间夹角,  $F$ : 畴壁面积,  $\Sigma (Z)$ : 所有晶体缺陷对畴壁

表 2

$\theta$	$0^\circ$	$90^\circ$	$45^\circ$
$\rho_1$	0.4714	0.4714	0.2496
$\rho_2$	0.4714	0	0.1386
$\rho_3$	0.4714	0.4714	0.2496
$\rho_4$	0.4714	0	0.1940
$\rho_5$		0	0.2881

从上表可以看到： $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$ 两种样品的取向因子为0.4714，而 $\theta = 45^\circ$ 样品的取向因子的最大值为0.2881，前二者为后者的1.64倍。这说明在相同的应力下， $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$ 的样品比 $\theta = 45^\circ$ 样品内位错发生脱钉和弓出的机会要大，根据上面的讨论，这样的样品的回线“超前”的幅度也就大。

从表2还可以看到 $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$ 的样品，其中的滑移系对于应力轴来说是等效的，即当分切应力达到某一值后，所有滑移系中的位错将同时发生脱钉过程（由于位错的基本特性在这些样品中是相同的），但 $\theta = 45^\circ$ 样品就不一样，其滑移系对应力轴来讲是非对称的，它存在一个最大值，因此这种样品中脱钉和弓出的位错要比 $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$ 的样品少3—6倍，与此相对应， $\theta = 45^\circ$ 的样品的回线误差，也应比 $\theta = 90^\circ$ 和 $\theta = 0^\circ$ 样品的回线误差小3~6倍。表3是各类样品实验结果的对比：

表 3

样品 $\sigma(\text{kg/mm}^2)$	$\theta = 0^\circ$ $(\xi_{01} + \xi_{02})/2$	$\theta = 90^\circ$ $(\xi_{91} + \xi_{92})/2$	$\theta = 45^\circ$ $(\xi_{41} + \xi_{42})/2$	$\delta(0^\circ)/\delta(45^\circ)$	$\delta(90^\circ)/\delta(45^\circ)$
0.1	0	0.11	0.13	0	0.88
1.2	-1.23	-0.61	0.48	2.58	1.27
2.3	-1.67	-2.45	0.51	3.30	4.84
3.4	-0.63	-1.95	0.55	1.15	3.55
4.5	-0.34	-1.51	0.45	0.76	3.36

把表3的实验结果和上面的理论计算对照一下，可以看出还是符合得较好的。但是也有一些不符合，例如，从计算看 $\theta = 0^\circ$ 应比 $\theta = 90^\circ$ 有较大的回线误差，但实验结果还不能明显看出这一差别，对此可能有如下原因：

- 1) 样品表面对(110)的偏离；
- 2) 样品工作区单晶体并非一个园片，其退磁因子比较复杂；
- 3) 实验设备中加力装置不能保证加载和减载到同一载荷时，样品内部应力分布完全一致。

## 结 论

以 3%Si 冷轧取向电工钢片为材料的单晶体单片磁弹效应力传感器,其回线误差 ( $\delta$ ) 可以是正的 ( $\delta > 0$ ), 也可以是负的 ( $\delta < 0$ )。这种回线误差的分布类型决定于应力  $\sigma$  与晶体 [100] 之间的夹角  $\theta$ , 当  $\theta = 0^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$  时, 回线误差为负值 ( $\delta < 0$ ), 当  $\theta = 45^\circ$  时, 回线误差为正值 ( $\delta > 0$ ), 并且其绝对值远远小于  $\theta = 0^\circ$  和  $\theta = 90^\circ$  样品的回线误差, 因此在其它条件不变时, 选择适当的取向角  $\theta$ , 是降低这类力传感器回线误差的有力途径。

## 致 谢

本实验承北京钢铁学院理化系金属物理实验室, 基础部力学实验实以及校办工厂机工车间和自动化车间的大力协助, 在此一并表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 《苏联磁弹性力传感器专利集》(1) 1980.11,
- [2] И.И.Узиков: «О Погрешностях магнитоупругих преобразователей», труды ленинградского политехнического института, 1956, No.184.
- [3] В.Б.Гинзбург: «магнитоупругие датчики», 1970.
- [4] ASEA, Catalogue, YM21-1E, Edition 4, 1980-06.
- [5] 张统一, 《压磁式力传感器回线误差》, 研究生毕业论文, 1982.
- [6] 吴兵, 《压磁式力变换器的基本原理和材料的选择》。
- [7] М.Н.Гуманюк, «Магнитоупругие датчики В автоматике», 1972.
- [8] 徐祖雄, 《取向硅钢片压头的工作机理, 工作特性及取向的影响》, 研究生毕业论文, 1981.
- [9] 冯端等, 《金属物理》, 下册, 科学出版社, 1975.
- [10] «Magnetism and Metallurgy», Vol.2, Edited by AMI·E·Berkowitz and Eckart Kneller, 1969.

## A Preliminary Discussion on the Hysteresis Error of the Magneto-elastic Force Transducer

Wu Bingshu Wu Bing Su Shizhang

### Abstract

Hysteresis error is one of the most important factors by which the precision of the magnetoelastic effect force transducer is affected. For the sake of investigating the origin of the hysteresis error, a 3%Si-Fe cold rol-

led single oriented electric sheet sample was used. In the measurement region of the sample, there was only one crystal. The results showed that both of the magnitude and the type of the hysteresis error of the sample varied with  $\theta$ , the angle between the [100] of the crystal and the direction of the stress  $\sigma$ . There were two kinds of hysteresis error, one of which was positive and the other negative. In this article the authors analysed the processes of the change in magnetic domains distribution of the sample. It seems that the variation of the magnitude and type of hysteresis error of the sample is due to the interactions between domain walls and crystal defects, particularly dislocations.