

# 平面应力状态的磁声发射效应与强度分布\*

华中理工大学 马咸尧 孙大千 袁新华

本文研究了宽板试样拉伸时磁化场方向对磁声发射强度的影响,不同方向接收磁声发射强度值的变化,由此提出了确定平面应力的主应力方向的方法,找出了磁声发射信号在平面应力场中以磁化区为中心沿角分布的规律。此外,还测量了应力对磁声发射强度的影响。

**关键词:** 平面应力, 主应力, 磁化方向, 磁声发射强度, 角分布

## 一、前言

铁磁材料在磁化过程中,内部磁畴壁运动,导致磁声发射。磁畴的运动受材料的结构、内部缺陷、杂质及存在应力等诸因素的影响和限制<sup>[1]</sup>,所以磁声发射行为的改变也反映了材料内部状态及性质的变化,弄清磁声发射行为同材料中某种状态变化的关系,就可以利用磁声发射(MAE)无损测量相应的性质,要使MAE行为确切地反应材料的性质变化,还必须考虑检测MAE行为时的磁化场强度及方向、检测位置及探头的方位因素的影响。由于影响MAE行为的因素很多,目前人们对它的认识还比较肤浅,特别是对检测状态的研究很少,要将MAE技术作为常规无损检测技术,还有许多工作要做。不过,经过多年的研究,MAE技术已在测量铁磁材料的残余应力等方面有了好的开端<sup>[2]</sup>。本文对宽板试样在拉伸状态下应力大小、磁化方向和探头方位对MAE振铃计数的影响进行了研究;探讨了平面应力状态下主应力方向和MAE强度的分布方向性等问题。

## 二、实验技术

### 1. 试样

试样用厚5.8mm的08钢板制成,其形状和尺寸见图1。试样经退火后的金相组织为:白色等轴晶粒,晶界上分布着三次渗碳体,基体上有灰黑色颗粒状夹杂物。

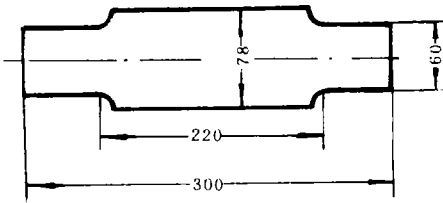


图1 试样形状及尺寸

### 2. 实验装置

实验装置如图2所示。磁化器为自制高性能的磁化装置,磁化场强度为35kA/m,磁化区为1cm<sup>2</sup>;探头中心

频率为120kHz,所处位置总是保持在距离磁化中心位置40mm远的圆周上。实验中,测定了应力对MAE强度的影响,同时分别固定或改变磁化方向和探头位置进行测量。测量仪器为AE-400B声发射仪,使用Apple-I计算机进行控制和计算。AE测量时,门限值取0.7V。试样在WJ10型拉伸机上进行,加载在弹性极限 $\sigma_e=196\text{MPa}$ 范围内变化。

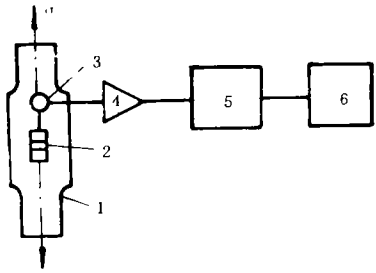


图2 实验装置图

## 三、实验结果

### 1. 磁声发射强度随应力的变化

磁化场方向与试样的轴线(拉伸方向)平行,探头位置在磁化方向上与磁化器中心距离为40mm,MAE计数率与应力的关系曲线如图3所示。从曲线可见,开始MAE振铃计数率随应力增加而迅速下降,在 $\sigma=87\text{MPa}$ 后,计数率又有所上升,当 $\sigma=152\text{MPa}$ 后,计数率再次下降。

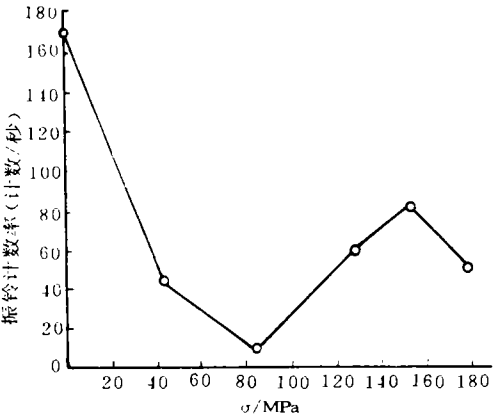


图3 MAE强度与应力的关系

\* 国家自然科学基金资助项目

## 2. 磁声发射强度随磁化方向的变化

实验中,选定拉伸应力 $\sigma=128\text{MPa}$ ,分别固定探头方向 $\theta$ (探头到磁化区中心的连线与试样轴线之间夹角),改变磁化方向 $\psi$ (磁化场方向与试样轴线之间的夹角),测量其振铃计数率。测量结果示于图4。由图可见,3条曲线的一个共同点是: $\psi=45^\circ$ 时声发射强度最低,而当 $\psi=90^\circ$ 时,MAE强度最高。

## 3. 磁声发射强度随探头方位 $\theta$ 的变化

实验中,选定拉伸应力为 $128\text{MPa}$ ,分别固定磁化方向 $\psi$ 为某定值,改变探头方位 $\theta$ ,测量MAE的振铃计数率变化规律,如图5所示。从图可看出,3条曲线的共同特点是: $\theta=45^\circ$ 时,MAE的振铃计数率最大; $\psi=90^\circ$ 曲线的计数率对 $\theta$ 的变化率很大,而其它两条的变化率很小且几乎相同。

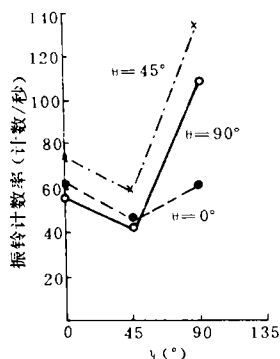


图4 MAE强度与磁化方向的关系

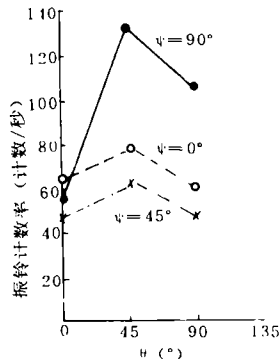


图5 MAE强度随探头方位变化关系

## 四、结果分析

### 1. 试样受力分析

由于采用宽板试样,虽然在试样两端施加轴向拉应力 $\sigma_Y$ ,则在试样表面上所受的应力是平面应力。根据平面应力公式:

$$\begin{cases} \epsilon_X = \frac{1}{E}(\sigma_X - \nu\sigma_Y) \\ \epsilon_Y = \frac{1}{E}(\sigma_Y - \nu\sigma_X) \end{cases} \quad (1)$$

$$\nu = \epsilon_X / \epsilon_Y \quad (2)$$

式中 $\epsilon_X$ 、 $\epsilon_Y$ 分别为X、Y方向的应变,E为材料的杨氏弹性模量, $\nu$ 为泊松比。对钢铁材料,一般取 $E=200\text{GPa}$ , $\nu=0.3$ ,若 $\sigma_Y=128\text{MPa}$ ,可求得 $\sigma_X=70\text{MPa}$ 。如果设 $\sigma_X$ 与 $\sigma_Y$ 为平面内的两个主应力,根据公式:

$$\begin{cases} \sigma_\alpha = \frac{1}{2}(\sigma_X + \sigma_Y) + \frac{1}{2}(\sigma_X - \sigma_Y)\cos 2\alpha \\ \tau_\alpha = \frac{1}{2}(\sigma_X - \sigma_Y)\sin 2\alpha \end{cases} \quad (3)$$

可求出如图6所示的与 $\sigma_X$ 方向成 $\alpha$ 角的任何方向的应力值。

### 2. 应力对MAE强度的影响<sup>[3,4]</sup>

由于磁畴壁运动,引起磁声发射,所以畴壁运动速度材料工程

直接影响MAE强度。一般情况,应力增加阻碍磁畴壁运动,降低磁声发射强度。MAE的振铃计数率来源于声子的发射数。图3中在曲线开始阶段,随着应力增大,应力对磁畴壁运动限制逐渐增加,振铃计数率下降。但是,当应力增加到一定值后, $90^\circ$ 畴壁逐渐转变成 $180^\circ$ 条状畴壁,附加畴减少,振铃计数率变得很低;随着应力继续增加, $180^\circ$ 条状畴壁开始细化,引起振铃计数率再度增加;当应力增加到接近弹性极限时,原已细化的条状畴开始变宽并趋于稳定,磁畴壁运动减弱,材料内的缺陷和晶界的不均匀的应力场也扩大,对畴壁运动的阻碍也加剧,因此振铃计数率又呈下降趋势。

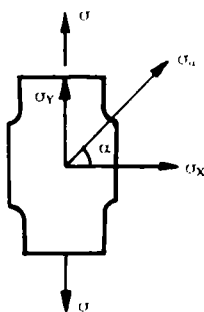


图6 试样受力状态

### 3. 磁化方向 $\psi$ 对MAE强度的影响

根据式(3)可知, $\sigma_\alpha$ 、 $\tau_\alpha$ 都随 $\alpha$ 而变化,当 $\alpha=45^\circ$ 时, $\sigma_\alpha$ 、 $\tau_\alpha$ 均有最大值。按照 $\psi$ 和 $\alpha$ 的定义,它们刚好是互为余角,所以 $\alpha=45^\circ$ 时, $\psi=45^\circ$ 。由此可推知,在 $\psi=45^\circ$ 的方向上应力最大,应力对畴壁的抑制作用最强。可见,此时MAE强度应最低。在 $\alpha=0^\circ$ 、 $90^\circ$ 时, $\tau_\alpha=0$ , $\sigma_X$ 分别等于 $\sigma_X$ 和 $\sigma_Y$ ,即此两方向的应力为主应力。可见,找出了MAE强度最低的方向,就能确定 $\psi=45^\circ$ 的方向,由此亦可确定 $\psi=0^\circ$ 和 $\psi=90^\circ$ 的方向便是平面应力的主应力 $\sigma_Y$ 和 $\sigma_X$ 的方向。

$\psi=90^\circ$ 方向时,MAE振铃计数强度最高,这可能是试样的磁化方向与拉伸方向垂直,此时 $\sigma_X$ 为压应力,试样内出现横向附加畴<sup>[5]</sup>,畴壁运动比较活跃;另一个原因是 $\sigma_X < \sigma_Y < \sigma_\alpha + \tau_\alpha$ ,这两个原因都导致了MAE强度比其它方向的高。

### 4. 探头位置对MAE强度的影响

声发射波主要通过横向体内波和表面波传播<sup>[6]</sup>。表面波在试样表面传播,一般以裂纹源为中心向四周辐射,其振幅A和能量E按下式变化<sup>[6]</sup>:

$$\begin{cases} A \sim (d/x)^{1/2} & x > d \\ E \sim \frac{d}{x} \end{cases} \quad (4)$$

其中,d为试样厚度;X为源和探头之间的距离。由此可见,A和E均随X增大而减小。体内波在试样中传播,则按下面规律变化<sup>[6]</sup>:

$$\begin{cases} A \sim \frac{d}{x} f(\varphi) & x > d \\ E \sim \left(\frac{d}{x}\right)^{3/2} f'(\varphi) \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $d$ 、 $X$  意义与式 (4) 同;  $f(\varphi)$ 、 $f'(\varphi)$  是  $\varphi$  的函数;  $\varphi$  是裂纹表面法线与探头之间的夹角。其裂纹产生 AE 信号的传播方向花样如图 7 所示。

如果将磁化区作为一个声发射源, 则它也相当于一个裂纹源, 其裂面与磁化方向平行。由于磁化深度一般有 2~3mm 深, 因此, 声发射源不仅在试样表面, 也在试样内一定深度发出声波, 这说明探头接收的声波是表面波和体内波的合成。将图 5 与图 7 对照, 可以认为 MAE 波的组成主要是横波成分, 它表现出  $\theta=45^\circ$  方向的 MAE 强度最大, 对于图 5 中曲线  $\psi=45^\circ$  出现  $\theta=45^\circ$  方向 MAE 强度最大, 好象不符合横波花样方向分布规律。这可能是该方向应力最大使 MAE 强度变得最低, 造成强度最大值与最小值之间差别很小, 致使这个差别在测量误差范围内; 也可能由于表面波和纵波作用所造成。

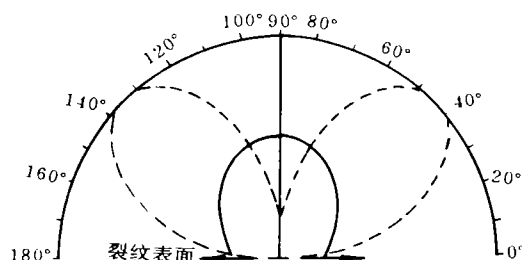


图 7 裂纹产生体内波信号传播的方向花样分布  
---横波, ——纵波

## 五、结 论

1. MAE 的振铃计数率随拉应力增加, 其总的趋势是下降, 但在整个过程中, 因附加畴出现而使强度一度出现上升趋势。

2. 磁化方向在  $\psi=45^\circ$  处强度最低, 此方向对应着最大应力值。根据式 (3) 和图 6 可推断出两个主应力方向分别在  $\psi=0^\circ$  和  $\psi=90^\circ$  的方向上。

3. 探头接收方位改变, MAE 振铃计数率也发生变化, 当磁化方向  $\psi=90^\circ$  时, 探头在  $\theta=45^\circ$  方向计数率最大, 似乎证明 MAE 波主要以横波的形式传播。 $\psi=45^\circ$  方向磁化时, 因应力很大和其它类型波型的作用, 振铃计数率变化不很明显。

## 参考文献

1. 马咸尧等, 拉应力对磁畴运动及磁声发射行为的影响, 华中理工大学学报, 1992, 20 (6): 25~29
2. 马咸尧等, 16Mn 钢中残余应力的磁声发射效应, 华中理工大学学报, 1992, 20 (3): 51~56
3. Ono K, Shibata M., Magnetomechanical Acoustic Emission for Residual Stress and Prior Strain Determination, Magneto-mechanical A-

coustic Emission, Anaheim, California: Dunhart, Publishers, 1981, 154~174

4. 罗阳, 王振琴, 晶粒取向 3% Si-Fe 畴结构的应力效应, 金属学报, 1983, 19 (2): A125~133
5. 罗阳, 王振琴, 晶粒取向 3% Si-Fe 畴结构的应力效应, 金属学报, 1983, 19 (3): A183~189
6. Waschkes E., Holler P. Interpretation of Acoustic Emission Signals, Int. J. Pres. Ves & Piping, 15 (1984) 151~157

\* \* \* \* \*

(上接第 26 页)

2. 对于包铝材料, 在涂保护胶之前, 通过阿洛丁 1500 处理可以改善化铣试样的线偏离。这主要是因为通过氧化处理增强了基体与保护胶的结合力和提高了试样在涂保护胶前的清洁度。

3. 通过我们的工艺试验攻关表明: 只要我们按 DPS 和 PSR 的各项要求从原材料、人员资格、工艺流程、工艺流程、槽液温控等各个方面进行全面准备, 严格按照工艺规范进行试验, 则化铣工艺技术就一定能够达到麦道的要求。

4. 铣切前, 表面缺陷的修整也是影响化铣后表面光洁度的主要因素之一。

5. 在化铣工艺过程中, 增加出光工序, 可以改善化铣表面的光洁度。

\* \* \* \* \*

(上接第 33 页)

内, 在本实验的高应力水平下所产生的残余压应力很快“消失”, 对疲劳裂纹萌生寿命无明显影响。这与实验所得结果相吻合。

从残余应力测试结果看, 随缺口根部的半径减小, 残余应力值增大。1600kg 预压的残余应力值比 1200kg 预压的大, 但累积损伤也大。喷丸试样在表面产生一平均残余应力层, 所以测试值一样。

## 四、结 论

1. 经过喷丸、预压, 材料在同一交变载荷下, 其缺口半径  $\rho$  与疲劳裂纹萌生寿命  $N_i$  存在如下关系:

$$\lg N_i = a + b \cdot \rho$$

2. 经过预压的试样, 对其疲劳性能的影响存在着双重因素: 残余压应力和累积损伤程度。当前者作用大时, 对提高疲劳裂纹萌生寿命有利, 反之则不利, 且作用大小与  $\sigma_s/\Delta\sigma_n$  有关。

3. 残余压应力在高应力水平下“消失”快。

4. 预压产生残余应力值的大小与缺口根部半径的大小有关, 半径大, 应力值小。

## 参考文献 (略)