

基于 EMAT 原理的钢铁材料应力及硬度分析

周 静

(南京铁道职业技术学院, 江苏 南京 210031)

摘要: 近年来我国钢铁产量占比超全球一半, 钢铁材料的广泛应用, 让其在生产、加工、使用过程中安全隐患也在不断增加。尤其是钢铁材料的应力集中和微观组织结构缺陷带来的危害影响极大, 甚至存在人身安全的威胁。因此, 对钢铁材料的应力状态及微观组织结构特性的无损检测十分必要。本文提出利用磁致伸缩原理的 EMAT 来对被测试件内部应力及硬度特性进行检测分析。

关键词: EMAT; 磁致伸缩; 应力检测; 硬度分析

根据 2021 年世界钢铁协会公布的数据, 中国钢材、生铁、粗钢产量占全球总产量的 52%。

为了从源头减少钢铁材料生产加工过程中出现的缺陷, 实现生产过程中的产品质量监控十分必要。传统意义上的无损检测技术把检测对象固定在已经发生缺陷或者损伤的被测材料上面, 但从未来发展方向来看, 希望可以在材料还未发生显著缺陷时, 就能够检测材料状态(疲劳、应力分布、塑性变形等), 因此, 本文提出了提出利用磁致伸缩及磁滞回线原理的 EMAT 来对被测试件内部应力及微观特性进行检测分析, 实现提前对钢铁材料的健康监测和智能预防技术。

一、原理分析

在偏执磁场中放置铁磁性试件, 根据磁致伸缩效应, 被测钢铁材料会在逐渐增强磁场的磁化方向伸长, 直到获得最大磁致伸缩量 λ_L 之后又逐渐减小。下图 1 展示了不同微观结构的铁磁体与马氏体的磁致伸缩曲线。

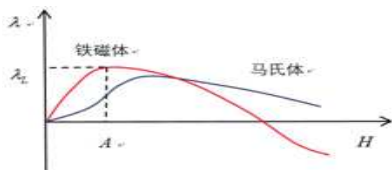


图 1 铁磁体与马氏体的磁致伸缩曲线

磁致伸缩曲线不仅会被材料自身微观特性的影响, 还会因为外界施加应力或本身残余应力而发生变化。下图 2 展现了在不同性质应力状态下的磁致伸缩曲线。图中实线部分 D 点为无应力状态下的磁致伸缩曲线应变最大值 λ_{max} ; 右侧虚线中的 E 点为受到压应力时获得的磁致伸缩曲线应变最大值 λ_{max} ; 左侧虚线中的 C 点为受到拉应力时获得的磁致伸缩曲线应变最大值 λ_{max} 。即给被测材料加载压应力时曲线向上移动, 加载拉应力时曲线向下移动。

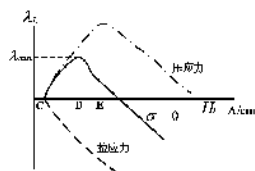


图 2 拉应力与压应力下的磁致伸缩曲线

根据上面的理论分析, 我们可以反推出磁致伸缩效应会因为被测试件应力的变化而变化, 继而应力会改变材料的磁致伸缩系数的大小。

当被测材料加载外应力时, 由于磁化效应的影响, 其内部晶格形状会发生形变。在试件磁化过程中, 磁感应强度 B 与磁场强度 H 之间有一定的特性关系, 叫作 $B-H$ 曲线。外界施加应力大小以及应变性质的变化会影响被测试件磁阻和磁导率大小, 如果材

料中磁动势不变, 而磁路中的磁阻发生改变时, 会影响磁通的大小, 继而影响接受线圈中的感应电动势大小。钢铁材料中相对磁导率和应力大小的关系称为磁力学模型, 公式关系如下式:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{2k}{B^2} \sigma \mu \quad (2.1)$$

上式模型中: B 是磁感应强度, k 是磁致伸缩系数, μ 是磁导率, σ 是应力大小。

因此, 当被测试件的磁致伸缩系数发生变化时, 材料的阻尼系数、磁导率也会随之发生改变, 继而影响电磁超声接收端超声信号幅值的大小。所以, 我们可以利用接收端超声信号的变化, 来反映被测试件磁致伸缩系数的大小变化。

二、EMAT 换能器原理模型

基于磁致伸缩原理的电磁超声模型结构如图 3 所示, 其换能模型中包括回折型激励线圈、提供静态磁场的 U 型磁轭、被测铁磁性试件。图 4 分析了被测试件内部激发的感应涡流与磁致伸缩力。其中, 磁致伸缩力产生的方向, 是由高频感应电流与静态磁场决定的。在此模型中, 有三个必要条件一定要满足:

(1) 被测试件必须具有磁性, 即为钢铁材料。

(2) 在钢铁材料中形成的涡流 I_{ω} 方向, 与外加恒定磁场 B_0 的方向互相平行, 这样就规避了由洛伦兹力原理所产生的超声波的影响。

(3) EMAT 换能器需要静态偏置磁场, 即 U 型磁轭。磁致伸缩效应是在磁化之后才能展现出来, 如果没有提供静态偏置磁场, 即使给被测材料加载应力, 动态磁场也不会存在。

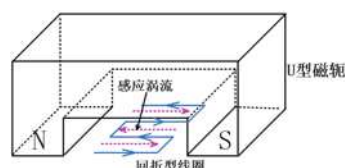


图 3 基于磁致伸缩方法的 EMAT 换能器模型图

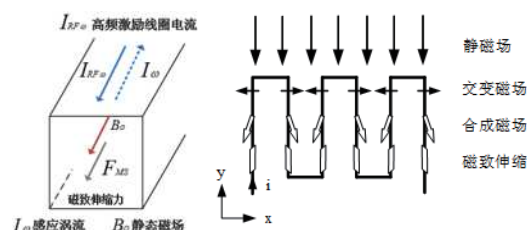


图 4 感应涡流方向与磁致伸缩力方向示意图

当静态磁场方向垂直于材料表面且垂直于线圈电流方向磁致伸缩力, 此时磁致伸缩力垂直于材料表面, 产生的超声波主要为体波和 λ 波; 当静态磁场方向平行于材料表面且垂直于线圈电流方向, 此时磁致伸缩力方向平行于材料表面, 产生的超声波主要为 λ 波和表面波; 当静态磁场方向平行于材料表面且平行于线圈电流方向, 此时磁致伸缩力方向平行于材料表面, 产生的超声波主要为 SH 波。在本课题中, 基于磁致伸缩效应的 EMAT 主要运用的第三种方式, 即采用 SH 波检测钢铁材料应力。

三、电磁超声发射与接收模块设计

电磁超声系统分成三个模块: 提供激励信号的超声发射端、电磁超声换能器、接收超声信号的接收端。其系统框图如下图 5 所示。

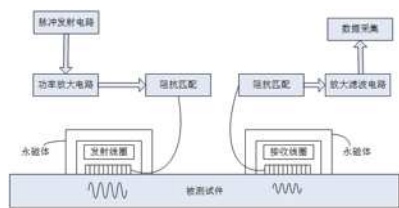


图 5 EMAT 系统框图

发射端由微控制器编程获得高频猝发脉冲串，脉冲串经过放大电路之后进入发射线圈中。在偏执磁场的作用下，发射线圈中的脉冲电流在被测试件表面激发出同频率的超声振动信号。在电磁超声的接收端会接收到激励的超声波，由于电磁感应原理接收端感应出微弱的电动势，此电动势经过滤波放大之后即为超声电压信号。超声电压信号可以送入 PC 机进行数据处理分析。

（一）电磁超声发射模块

电磁超声发射端是利用 FPGA 编程的方法得到激发的是猝发脉冲串，这种脉冲串的激发方式相比于单脉冲激发更有利于提高能量的转换效率。EMAT 激励端框图如下 6 所示：

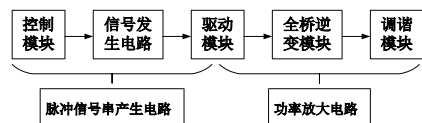


图 6 EMAT 激励端电路系统框图

为了得到较强的超声电压信号，在电磁超声的发射端需要对猝发脉冲串进行放大，所以我们利用全桥逆变器对电路中的发射功率进行放大，使得发射端的激励瞬时电流信号达到数十安培的量级。这样就可以非常有效的激励出超声信号。

（二）电磁超声接收模块

当电磁超声发射端激励出来的超声波在被测试件中传播时，由于声波信号的衰减特性，接收端收集到的超声振动信号非常的微弱，同时微弱的振动信号经过电磁感应变换成电压信号之后，信号强度更是微乎其微。因此在 EMAT 换能器的接收端就需要相应的阻抗匹配电路、滤波放大电路的配合，来使得最后的超声电压信号增大。电磁超声接收电路系统框图如下图 7 所示。



图 7 电磁超声接收电路系统框图

超声信号的数据处理我们采用的是时域平均算法，也称为检波法。这种信号处理方法，是将得到的带有干扰噪声的周期信号进行周期性算法平均的手段。主要的处理方法如下：首先，将采集到的超声信号截取周期性片段得到离散信号，然后将离散信号进行算数平均，最后求得的离散信号就能抑制随机信号分量以及信号的非周期分量。

四、钢铁材料试验研究

从前面的原理探讨、硬件系统电路设计我们搭建了基于 EMAT 原理的应力检测机微观特性参数分析设备。利用试验结果来验证此方法的可靠性。

经过现场试验分析，在 EMAT 发射端激励的高频猝发脉冲电压信号峰峰值在 600V 上下，其中，激励线圈的激励电流瞬时大小，经过检测为 10 安培左右，此时钢铁材料的内部会激励出振动的超声信号。在微秒的时间级别内超声信号到达接收端并被接收线圈拾取，从而感应出电动势。感应出的电动势经过接收电路的调理，在由时域平均算法将超声信号进行数据处理，就得到如下图 8、9 所示的接收超声电压信号，其峰值的大小为 4V 左右。

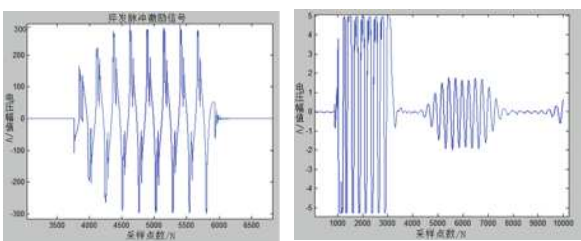


图 8 发射端的激励信号 图 9 接收端的超声电压信号

应力加载试验被测试件为钢铁材料，其尺寸大小为：1mm*140mm*350mm（厚度*宽度*长度）。在试验中采用悬臂梁的模型进行应力加载。本系统试验是绘制磁感应强度与超声电压关系曲线（简称 B-V 曲线），其中，横坐标磁感应强度大小是由直流电磁铁提供，并且利用特斯拉计测量其大小。在无应力和有压应力情况下，连续调节发射端电磁铁的磁场大小，分别采集接收端线圈中超声信号的幅值，并进行多次测量，绘制关于发射端磁感应强度 - 接收端超声信号幅值关系曲线。如图 10 所示：

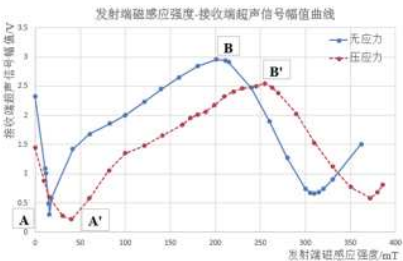


图 10 压应力与无应力 B-V 曲线对比图

从试验结果我们可以分析得到，在对钢铁材料施加压应力的情况下，B-V 关系曲线向右平移的同时也向下平移。同时，我们也观察到无论被测钢铁材料是否有压应力，B-V 曲线都有两个特别拐点。经过多次测量取平均值，得到第一谷值点和第一峰值点对应的横坐标磁感应强度和纵坐标超声信号幅值大小，其参数如下表 1 所示。

表 1 不同应力条件下特征参数表

无应力	发射端磁感应强度 /mT	接收端超声信号幅值 /V
第一谷值	14.2	0.05
第一峰值	202	2.91
压应力	发射端磁感应强度 /mT	接收超声信号幅值 /V
第一谷值	46.8	0.045
第一峰值	256	2.53

五、结果分析

在研究铁磁性试件内部加载应力试验时，通过磁致伸缩效应原理来分析应力与 EMAT 检测的关系。试验的过程中，我们通过提取 B-V 曲线的第一谷值点和第一峰值点的磁感应强度来研究加载压应力与特征值对应磁感应强度的关系。并且得到当被测试件中存在压应力时，第一谷值点与第一峰值点的磁感应强度是增大的，但接收端超声信号幅值却在减小。

在分析铁磁性试件微观特性参数硬度的试验时，利用磁致伸缩效应强烈依赖于材料微观内部状态的原理，可知当钢铁材料的硬度越小时，基于磁致伸缩机理的 EMAT 电压信号幅值越大。钢铁材料硬度越大，接收端接收到的超声信号幅值就越小。验证了基于磁致伸缩机理的 EMAT 检测材料应力和微观特性（硬度）的可行性和实用性。

参考文献：

[1] 朱振邦. 基于电磁超声的冷轧带钢应力检测技术研究 [D]. 南京航空航天大学, 2020.
[2] 韩笑. 基于电磁超声的铁磁性材料机械特性参数检测的研究及实现 [D]. 南京航空航天大学, 2019.