

# 磁记忆检测金属疲劳缺陷

张 凯

江南造船(集团)有限责任公司 上海 201913

**摘 要:** 金属磁记忆检测技术是无损检测领域新兴的检测手段, 由于具有独特的检测理论。早期的检测方法, 只针对已形成的缺陷进行检测, 对于还未形成或者还在萌芽期的缺陷, 早期的无损检测方法很难进行无损检测。而金属磁记忆检测方法被期待能够在铁磁性金属构件早期损伤阶段中能够有效的进行早期诊断。本文通过不同加载方式的疲劳载荷试验, 试件的磁记忆信号随疲劳循环次数的增加, 呈现规律性变化。通过图形能很好的分析出应力集中的程度, 以达到定量分析的目的。

**关键词:** 金属磁记忆; 铁磁材料; 应力; 疲劳载荷

## Magnetic memory testing for metal fatigue defects

Zhang Kai

Jiangnan Shipbuilding (Group) Co., Ltd., Shanghai 201913

**Abstract:** Metal Magnetic Memory Testing Technology is a new testing method in the field of non-destructive testing, because of its unique testing theory. Early detection methods, only for the defects have been formed to detect, for has not yet formed or is still in the bud of the defect, the early non-destructive detection methods are difficult to carry out non-destructive testing. The metal magnetic memory testing method is expected to be effective in the early stage of ferromagnetic metal component damage early diagnosis. In this paper, the magnetic memory signal of the specimen changes regularly with the increase of fatigue cycle times through the fatigue load test under different loading modes. The degree of stress concentration can be well analyzed by means of graphs for Quantitative analysis purposes.

**Key words:** metal magnetic memory, ferromagnetic material, stress, fatigue load

### 1 背景及意义

随着现代社会的快速发展, 现有的无损检测已经远远不能满足工业的发展。在一些特定行业和特殊要求, 原有的常规五大检测方法已经很难满足当今生产建设的需要, 在这种情况下, 研究人员提出了一种新型无损检测方法金属磁记忆检测, 它作为一种新型无损检测技术, 磁记忆检测技术的出现引起了广泛的重视。磁记忆技术是在铁磁性金属的磁记忆(Magnetic Memory Metal)效应基础上提出, 到目前为止, 常规的无损检测方法只能检测出已经存在的宏观缺陷, 对于微观缺陷的检测却显得无能为力。对于新型无损检测方法金属磁记忆检测, 它能满足对微观缺陷的检测, 特别是在检测工件应力集中部位, 容易造成疲劳危害性缺陷的区域, 金属磁记忆检测方法是迄今为止, 唯一被大家公认能对金属铁磁部件进行早期预判的新型无损检测方法<sup>[1]</sup>。

### 2 研究内容

2.1 试验中选取40cr材质的试块, 根据试验要求和材质力学特性设计符合试验要求的试块尺寸, 并对试块进行高周疲劳试验。

2.2 通过利用法向和切向的数据信号显示, 对这些检测

数据信号进行二维分析, 结合特征曲线对处于不同疲劳阶段的模拟试块进行定量分析。

2.3 对处于不同疲劳阶段的试块, 测量试块法向和切向的磁信号, 通过软件将采集的磁信号进行数据处理和分析, 最终通过二维图形得到不同试验阶段的磁信号的变化规律。

### 3 金属磁记忆检测的基本原理

金属磁记忆检测的基本原理: 处于地磁环境下的铁磁性工件受工件载荷的作用, 其内部会发生具有磁致伸缩特性的磁畴组织定向的和不可逆的重新排列取向, 并在应力与变形集中区形成最大的漏磁场 $H_p$ 的变化。及磁场的切向分量 $H_p(x)$ 具有最大值, 而法向量 $H_p(y)$ 改变符号且具有零点。这种磁状态的不可逆变化在工作载荷消除后继续保留, 从而通过漏磁场法向分量 $H_p(y)$ 的测定, 以此测定工件内部应力集中区域<sup>[3]</sup>。

金属材料在长期的交变应力作用下产生疲劳裂纹, 最终导致金属材料出现破坏现象。金属疲劳裂纹的发生一般要经历裂纹的萌生、扩展、断裂三个阶段, 这一过程需要交变应力长期作用下发生。疲劳裂纹具有突发性、局部性以及

环境和缺陷的敏感性等特点，所以疲劳裂纹不易被及时发现且容易造成事故<sup>[2]</sup>。影响金属疲劳的三个主要因素是应力幅值、平均应力大小和循环次数。

#### 4 试块参数要求

在进行加载循环试验中，由于载荷量、循环次数参数大，普通铁磁性金属材料很容易造成金属试块断裂，所以选

用试块材质应该具备良好的强度、抗疲劳能力和硬度。因此金属试块选用40Cr材料，在同等的载荷量、循环次数下，有利于完整测量试块表面的磁记忆信号，可以完整提取在疲劳载荷应力作用下裂纹从无到有的磁信号变化，试块材料性能和具体参数见图1、表1所示。为了消除试块内部残余应力影响，对试块进行退火处理。

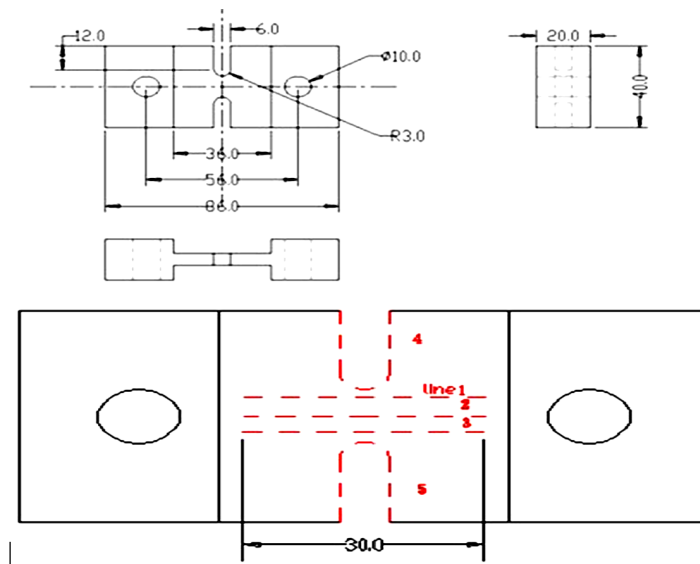


图1 (b)40Cr磁记忆信号检测线

表1 40Cr试件材料参数

Material	Main chemical composition (%)				$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	E/GPa	
	C	Si	Mn	S				
40Cr		0.37	0.27	0.80	0.03	805	915	211

#### 5 试验结果与分析

试验主要是对40Cr试件就行疲劳载荷试验，通过高频疲劳试验机对试件进行不同的载荷和循环次数试验，得出40Cr试件上的磁信号。

在应力作用下，图1中试件1，3号线中央的U型口根部应力集中程度要远远大于2号线中央处的应力集中程度。所

以通过1，3号线和2号线磁记忆信号的对比，就可以反映出应力集中程度对磁记忆信号的影响。由图2、3可知试块U型缺口部位是应力最集中的部位，应力集中也是最大，试块上的2号线与U型口根部的连线相交面积应力值也较大，随着远离相交区域应力值也将越小，并且测量1、2、3号线磁记忆法向分量 $H_p(y)$ 曲线均无过零现象。

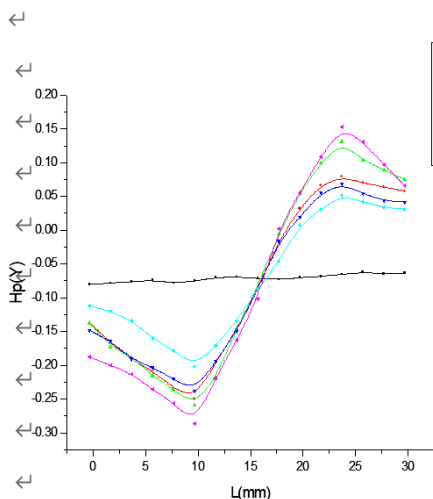


图2 1号检测线上的法向磁信号

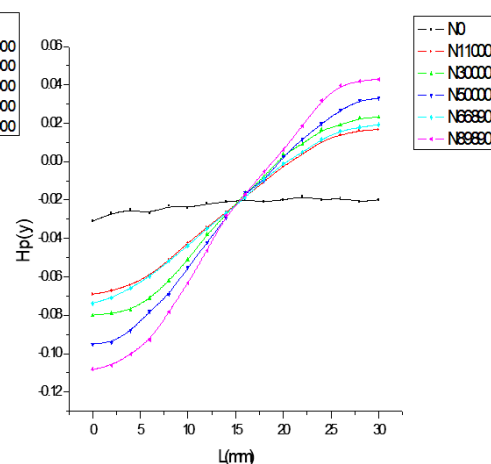
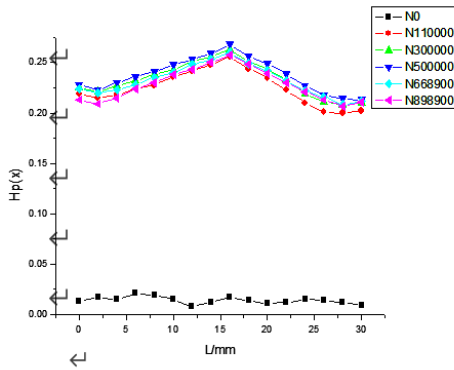


图3 2号检测线上的法向磁信号

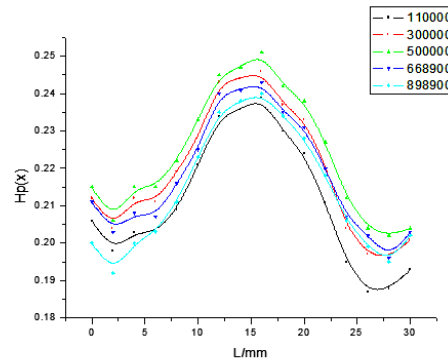
对1、2检测线上的法向向量进行讨论, 疲劳加载前1、2检测线上的磁信号很小, 基本近似为一条直线, 加载后磁信号最大值和最小值显著增加, 出现很好的过零现象, 随后随着循环次数增加, 磁信号依次增大, 2上的磁信号相对于1上的较为平缓, 没有明显的突变现象, 主要原因是应力集中程度不同。但同时发现, 也是在加载到500000次循环左右, 磁

信号开始减小, 随着循环次数增加逐渐减小, 当加载循环到断裂前那一阶段磁信号急剧增加, 本次试验是在加载到90.69万次时断裂<sup>[4]</sup>。

从图4图5可看到, 在循环次数达到89.889万次时, 测得试块1、2检测线上的磁信号都出现了急剧增加, 这也是金属试块断裂前测得最后一次磁信号。



1 号线切向磁信号



1 号线初始信号的切向磁信号

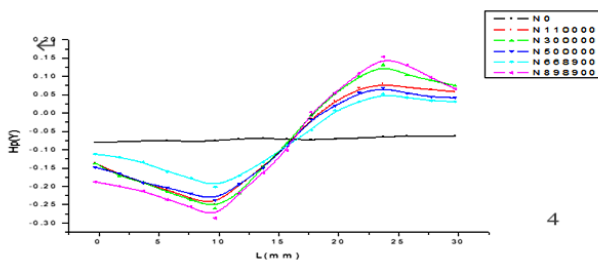


图 4 1 号检测线上的法向磁信号

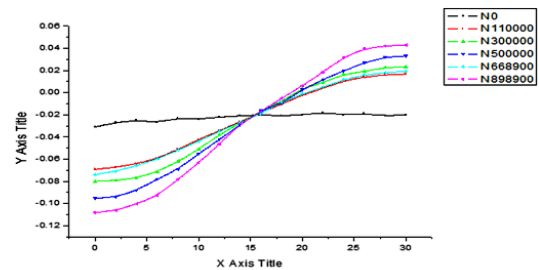


图 5 2 号检测线上的法向磁信号

从本实验发现, 试块在载荷和循环次数依次增加时测量试块表面法向磁信号, 随着载荷和循环次数的依次增加, 试块表面的法向磁信号会显著增加, 试验参数的增加, 所采集的磁信号逐渐增加, 当载荷和循环参数达到某一参数时, 所采集的磁信号将随着循环次数增加试块表面的磁信号将减小, 最后金属试块快断裂时磁信号急剧增加。

## 6 试验结论

6.1 通过试验可得出, 试块应力集中部位采集的磁记忆信号, 在切向分量会出磁信号峰值, 这种峰值变化会随着不同的载荷和循环次数的变化而变化, 变化规律为载荷和循环次数的增加峰值将不断变大。法向方向的磁信号会出现信号过零现象, 并且在零点前后还会分别出现信号极大值和极小值现象。

6.2 40Cr试件在测表面u型槽边缘法向磁信号时发现, 未加载时磁性号没有变化, 但是一旦加载, 磁信号显著增加, 并且随着加载循环次的数增加, 磁信号逐渐增大, 从中

间某个时候开始随着循环次数的增加磁信号减小, 最后快断裂时磁信号急剧增加。

6.3 在构件疲劳损伤处, 磁记忆法向分量Hp(y)过零点和切向分量Hp(x)峰值出现位置不能准确定位构件应力集中位置, 但随着构件所受应力的增大两者逐渐向应力集中位置靠拢, 且出现零点现象。通过这种突变特征, 可以判断疲劳损伤大致位置, 也验证了磁记忆检测金属疲劳缺陷可行。

## 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.
- [2]任吉林等. 铁磁材料构件的应力分析和磁记忆检测[J], 无损检测, 2005.7
- [3]任吉林等. 金属的磁记忆检测技术[J], 国外金属热处理, 2000, 21(4): 9~11
- [4]任吉林, 唐继红, 邬冠华, 等. 金属的磁记忆效应[J]. 无损检测, 2001, 23(4): 154~156.