

材料与工艺

金属磁记忆法在柴油机机体探伤中的应用研究

刘 利, 许 斌, 张静秋, 迟立杰, 于 斌, 曹日起, 王永旭, 董 瑞

(中国人民解放军海军 91315 部队, 辽宁大连 116041)

摘 要: 介绍了金属磁记忆法的概念和原理; 分析了该方法较之传统无损探伤的优势, 并给出了该方法的应用范围。介绍了该方法的实现途径及检测结果的判断依据。实例检测表明了金属磁记忆法在柴油机机体无损探伤中的有效性。

关键词: 金属磁记忆; 应力集中区; 无损探伤; 机体

中图分类号: TG115.284; TK428 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2011)06-0039-04

Study on Application of Metal Magnetic Memory Method for Nondestructive Testing of Diesel Engine Block

Liu Li, Xu Bin, Zhang Jingqiu, Chi Lijie, Yu Bin, Cao Riqi, Wang Yongxu, Dong Rui

(Naval 91315 Unit of the Chinese People's Liberation Army, Liaoning Dalian 116041)

Abstract: The concept and principles of Metal Magnetic Memory (MMM) method is introduced. Its advanced characteristics compared to traditional methods are studied and its application scope is given. Moreover, tools to realize this method and testing results criterions are elaborated. The effectiveness of the Metal Magnetic Memory method in the nondestructive testing of diesel engine block are proved by practical application.

Keywords: MMM; strain centralization zone; nondestructive testing; diesel engine block

0 引 言

设备的主要损伤源是应力集中区, 这里腐蚀、疲劳和蠕变过程进展最快。现有的传统无损检测方法不能在设备上测定由工作负荷作用引发的应力集中区。鉴于此, 本文针对金属磁记忆法在装备无损探伤中的应用进行了研究。

机械设备和制件的自由漏磁场能够反应磁化强度沿工作载荷造成的主应力方向的不可逆变化, 以及零件和焊接接头在地球磁场中制造和冷却后组织上和工艺上的继承性。金属磁记忆方法正是以记录和分析制件和设备应力集中区中产生的自由漏磁场分布状况为原理的无损检测方法。

金属磁记忆检测方法较之传统无损检测方法, 不要求对检测对象进行准备(如清理等), 不需要

专门磁化, 因为可以利用制件制造和使用中形成的自然磁性, 即可在被检测对象处于工作中或处于修理中应用。是一种可以对设备快速检测并以 1mm 以下精度确定应力集中区, 可对金属“前缺陷”状态和疲劳损伤早期进行诊断的方法。

金属磁记忆法主要应用于: 确定设备和结构应力—变形状态的不均匀性, 并找出作为发展破损主要根源的应力集中区; 确定应力集中区金属取样的部位以评价其组织—机械状态; 疲劳损伤的早期诊断、设备和结构的寿命评定; 结合传统无损检测方法减轻检测工作量和物资损耗; 检测各种类型及结构组合的焊接接头质量(包括接触焊和点焊); 按组织结构不均匀性快速分选新的和使用过的机械制件。

收稿日期: 2011-06-07

作者简介: 刘利(1968-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为设备检测诊断, E-mail: xu_bin1961@sina.com。

1 金属磁记忆法的原理

铁磁制件自然残磁 M_0 是在其制造过程中(熔炼、锻造、热处理)形成的。制件实际磁组织产生机制是:在结晶后低于居里点冷却时,并且一般是在地球磁场中冷却时出现;同时,实际制件的冷却过程一般是不均匀的,金属表层比内层冷却更快,制件体积上形成热应力,形成晶格和磁组织。在晶格缺陷和组织不均匀性最集中的部位(如位错滑移部位),产生磁畴边界固结点并以漏磁场法相分量符号变更线($H_p = 0$ 线)的形式出现在制件表面。

文献[1]中确定, $H_p = 0$ 线相当于制件有最大磁阻力的断面,并代表残余应力最大集中区。大量试验研究证实: $H_p = 0$ 线同应力集中线是吻合的。在试样拉力试验中,也多次取得 $H_p = 0$ 线同试样颈变和后续断裂部位相吻合的结果。

试验证明,如果试样金属组织是均匀的并且没有明显缺陷,则残磁分布状况的磁场 H_p 的分布也具有均匀性,并取决于制件的形状及其相对于外部地球磁场的位置。并且,同一型式尺寸,由同一牌号钢和同一工艺制造并且金属无集中缺陷的新管子,其残磁 M_0 和磁场 H_p 的分布实际上是相同的。

在弱的地球磁场中,在外部载荷作用下,制件金属磁性所发生的变化是由于磁畴边界向主应力作用方向偏移所致。在这样的条件下,磁性 M 的变化以及相应的立体磁场 H 的变化,主要决定于变形能量。按照定义,磁性是单位体积的磁矩,亦即无限小体积磁力矩向量总合 $\sum \nu P_m$ 对于其 V 值之比:

$$M = \frac{\sum \nu P_m}{V} \quad (1)$$

$$H = NM \quad (2)$$

式中, $N = \frac{B}{H} = \mu_\alpha = \mu_r \mu_0$

由式(1)、式(2)可以推出变形前小体积 V_0 中的磁场强度 H_0 同变形至 V 后的这一体积中磁场强度 H 之间的关系,条件是变形不改变磁力矩总合。

$$\begin{aligned} \Delta H &= (M - M_0)N = \left(\frac{\sum \nu P_m}{V} - \frac{\sum \nu P_m}{V_0} \right) N \\ &= \left(\frac{1}{V} - \frac{1}{V_0} \right) \sum \nu P_m N = \left(\frac{V_0}{V} - 1 \right) H_0 \end{aligned} \quad (3)$$

已知制件金属的体积变形可通过体积相对变化量值表示:

$$\varepsilon_v = \frac{V - V_0}{V_0} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (4)$$

式中: ε_1 、 ε_2 、 ε_3 为在主作用应力方向上零件最小单元尺寸的相对延长量(线性 $\varepsilon = \frac{\Delta \lambda}{\lambda}$); V_0 为变形前零件体积; V 为变形后零件体积。

由式(3)和式(4)可以导出变形前后磁场强度之间有如下关系

$$H = H_0 \frac{V_0}{V} = \frac{H_0}{(1 + \varepsilon_v)} \quad (5)$$

由此可见,对于平面应力状态而言,最大应力方向上变形的任何变化都会引起测量方向上磁场 H_p 强度的相应变化。

在实践中,部件或零件一般是在复杂应力条件下工作,法向(δ)和切向(τ)应力有一定的比例关系。这时,产生线性和剪切变形 ε 和 γ 。

根据文献[2]:

$$\delta = M_p \cdot \tau, \text{ 相应地 } \varepsilon = \frac{\gamma}{M_p} \quad (6)$$

式中: $M_p = \frac{1}{\sin \alpha \cdot \cos \beta}$, 为剪切变形时决定滑移方向的定向因素; α 为滑移面和拉伸轴线之间的角度; β 为滑移方向和拉伸轴线之间的角度; γ 为剪切变形。

将式(6)代入式(5),便可得出复杂应力条件下被测磁场 H_p 和这一磁场测量方向上变形之间的比例关系:

$$H_p = \frac{H_p^0}{\left(1 + \frac{\gamma}{M_p} \right)} \quad (7)$$

在确定了磁场强度同变形量之间的关系后,所要作的工作是根据磁诊断参数 H_p 和 K_m (轨迹方向的 H_p 梯度),确定残余应力和变形的量值和方向。

根据图1,在拉伸应力下磁畴尺寸和位错聚集密度较在压缩应力下高出两个数量级。可知,应力量值相同而其符号不同时,按照图1所示关系曲线,磁场强度 ΔM 在宏观水平上有不同变化,相应地被测磁场 H_p 及其梯度 K_m 也有不同的量值。

由此可见,按照上述诊断参数利用金属磁记忆检测方法,便可确定残余应力和变形量值、符号和方向。对于单一轴线应力状态如此,对于形成滑移场时的复杂应力状态,需要确定磁场 H 的能量,根据前面的分析,此时可以按照磁场 H 分量的量值和方向确定对应于主拉伸应力(δ_1)和压缩应力(δ_2)量值和方向的最大和最小变形的量值和方向。

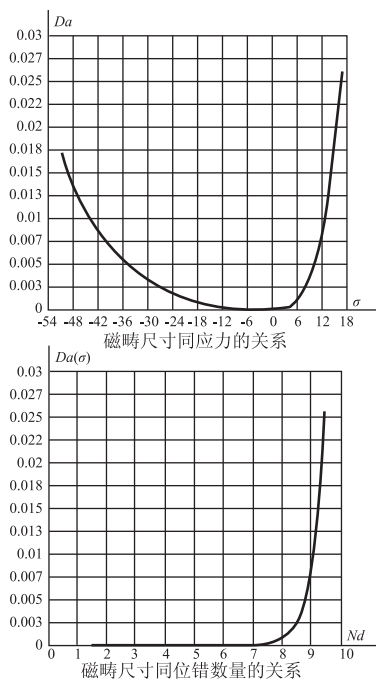
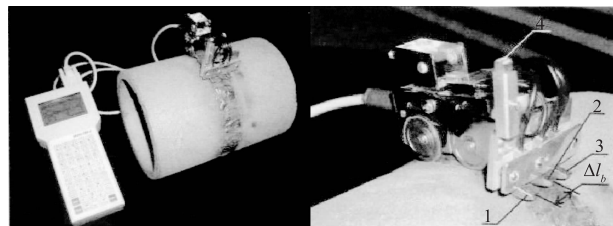


图 1 纯铁磁场强度自在机械作用下磁畴、位错与应力的关系

2 金属磁记忆检测法的实现

金属磁记忆检测仪由俄罗斯动力诊断公司生产, 主要仪表型号为 TSC-1M 应力集中测试仪, 其中 TSC-1M-4 (见图 2) 为四通道铁磁探测式磁测仪。仪表在环境空气温度为 $-15^{\circ}\text{C} \sim +55^{\circ}\text{C}$, 相对湿度小于 85% 条件下可靠工作; 传感器在空气温度为 $-400^{\circ}\text{C} \sim +100^{\circ}\text{C}$, 相对湿度小于 95% 无降水条件下可靠工作。能以 0.5 m/s 的速度记录检测对象的磁场强度和长度值, 每个通道磁场测量的基本相对误差 $\leq 5\%$, 长度测量的相对误差 $\leq 5\%$, 最小扫描步长为 1 mm , 最大步长为 128 mm , 有 9 种专用传感器与 TSC-1M 仪表配套使用, 根据测试对象和检测工作条件选择。



1、2、3-扫描装置的铁磁探测式传感器,
4-用于补偿外部磁场的铁磁探测式传感器, ΔI_b -传感器基准间距

图 2 TSC-1M-4 型应力集中测试仪

应力集中区有如下基本特征:

- (1) 所有通道同时出现符号变化的分布(如图 3)。
- (2) 所有通道同时出现漏磁场符号的多次变化(如图 4)。

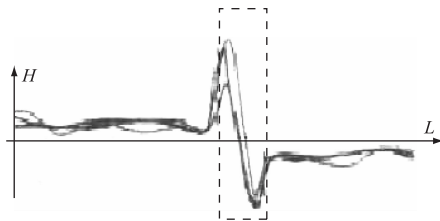


图 3 通道磁场出现符号变化

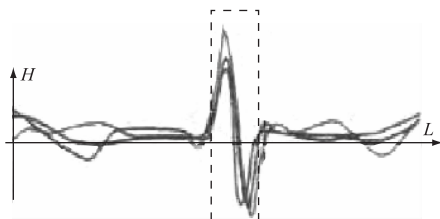


图 4 所有通道漏磁场出现符号多次变化

(3) 通道上出现漏磁场急剧的不同极性分布(代表残余应力水平)或者是通道之一的剧烈跳变(如图 5)。对于焊缝这可能表明在焊缝体中有局部缺陷。

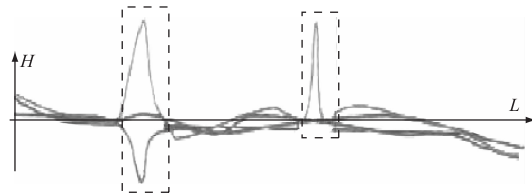


图 5 通道磁场剧烈跳变

(4) 存在一个通道或所有通道的剧烈浪涌, 表明可能存在干扰, 例如: 由打击产生的冷作硬化, 焊接产生的烧痕, 操作员用传感器扫描时所做的剧烈运动等。

找出应力集中区后, 必须在该处进行观察, 以便弄清部件的结构特点(是否有因约束产生的应力集中); 各种故障(腐蚀、侵蚀、冷作硬化等); 监测对象存在的干扰(边缘效应, 焊接产生的烧痕, 声发射、振动诊断传感器磁固定夹头的局部磁化, 管道上的铁箍等)情况。然后确定最大应力集中区, 以备随后使用超声、化学分析或机械性能试验、金相贴片等方法进行补充检测。

采用金属磁记忆方法对监测结果的这种初步分析能找出设备主要或即将遭到损伤的组分, 详细的分析在实验室条件下采用金属磁记忆检测数据处理软件 MM-System 进行。

3 金属磁记忆诊断应用

3.1 检验组织不均匀性对制件漏磁场分布的影响
在地球磁场中, 通过测量热处理前后同一试样

的磁场 H_p ，便可明显地发现制件组织不均匀性对于残余磁性以及被测磁场分布的影响。

图 6 所示为同一型号钢试样磁场法向分量测量结果。从图中可以看到，试样金属中残余磁性在热处理前明显高于退火之后，热处理后磁场分布更

加均匀，符号变更线($H_p=0$)实际上位于试样中央部位，而热处理前 $H_p=0$ 线由试样中央向下部偏移；热处理后，组织不均匀性以及内应力对试样磁场 H_p 分布的影响消失了。

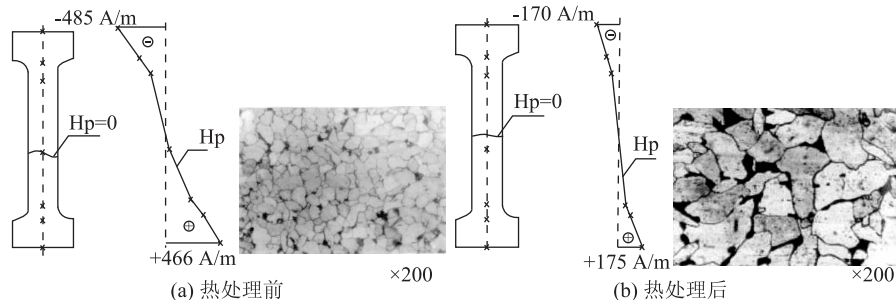


图 6 试样上磁场 H_p 法向分量测量结果以及金相组织的对比

3.2 检测机械产品热处理质量

金属磁记忆方法可以作为机械产品热处理质量检测的有效方法。图 7 所示为压缩机轴热处理前后的检测结果。通过对比图 7a 和图 7b 的磁场分布可

以看出，轴经过热处理之后，其磁场 H_p 的分布更加均匀，而磁场 H_p 绝对值的减小证明由组织不均匀性造成的内应力也减小了。

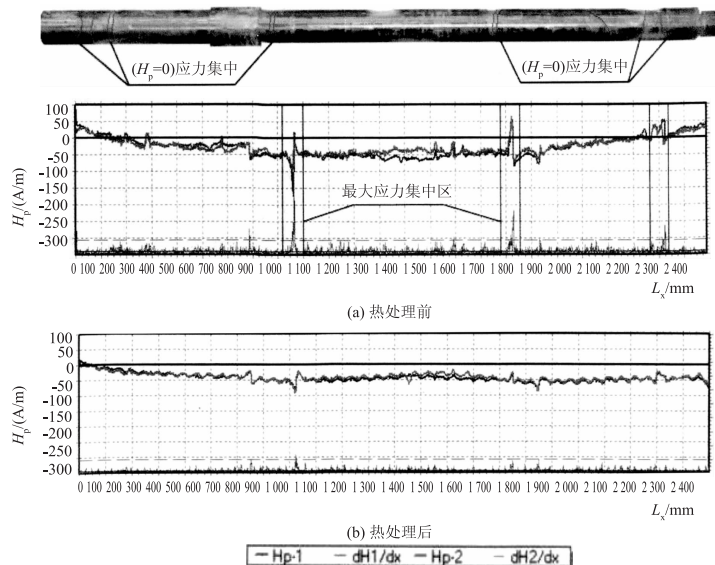


图 7 锻造和机加工后的压缩机轴

3.3 检测柴油机机体

对船用柴油机进行振动普测，发现某船柴油机机体振动异常，遂用 TSC-1M4 型金属应力检测仪对机体进行检测(见图 8)，发现机体某处多通道同时出现漏磁场符号的多次变化，并且漏磁场梯度严重超限。对机体进行清理后，对漏磁场异常范围(见图 9a)进行荧光粉探伤，结果发现故障裂纹(见图 9b)。

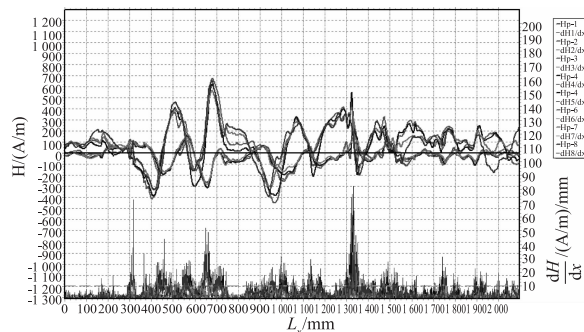


图 8 机体漏磁场强度和磁场强度梯度检测结果

(下转第 45 页)

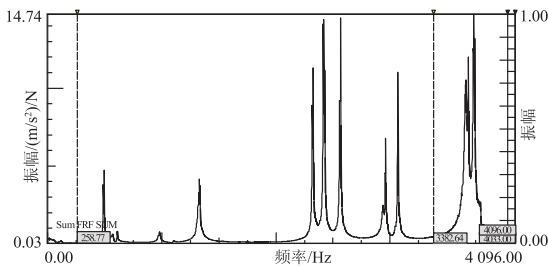


图7 改进飞轮的频响函数

3 试验结果

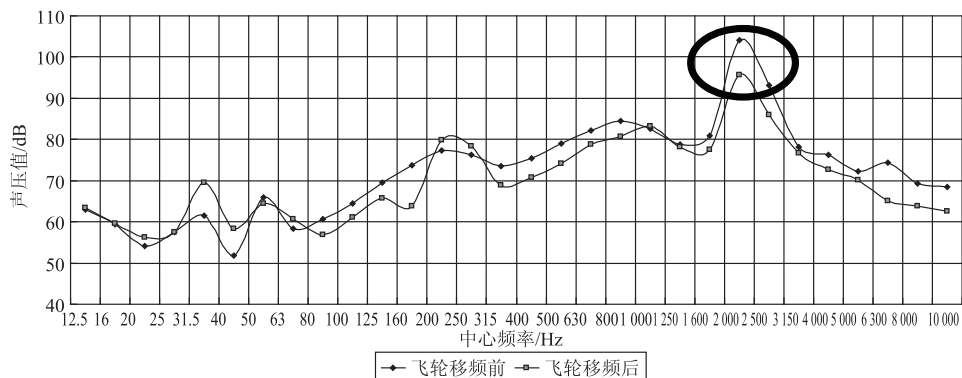


图8 飞轮改进前后的 1/3 倍频程平均噪声声压值

5 结论

(1) 该发动机啸叫噪声的生成机理为发动机 2 130 Hz 扰动力激发旋转飞轮四瓣花振型共振辐射。

(2) 飞轮移频设计可避开旋转飞轮共振, 从而大大降低发动机运行过程中的啸叫噪声。

(3) 飞轮的模态计算可用于飞轮共振问题的分析与设计。

参考文献

- [1] 陈长征. 设备振动分析与故障诊断技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

(上接第 42 页)



图9 机体漏磁场强度异常部位(a)和荧光粉探测裂纹(b)

4 结论

多数情况下, 特别对于老旧设备, 更为危险的是金属的“前缺陷”状态, 即在内部组织发生不可逆性改变, 由疲劳引起的损伤可能突发, 而且通常是在未能预见的区域。传统无损检测方法的灵敏度不能查出金属的“前缺陷”状态。

通过对金属磁记忆法的实际应用, 证实了该方法能够探测铁磁制件中组织的不均匀性, 确定应力

集中区, 发现制件中的宏观缺陷。并且工作时不需要对检测对象进行清理, 不需要专门磁化, 可以对大面积的制件进行快速检测。在探明的应力集中区以其他无损和有损检测方法进行复测能够快速确定故障部位。

因此金属磁记忆法是一种值得推广的用于检测金属和评估已长期服役设备残余寿命的方法。

参考文献

- [1] дубов А. А. исследование свойств металла с использованием метода магнитной памяти // металлловедение и термическая обработка металлов, 1997, no. 9. С. 35 – 39.
- [2] Берштейн М. Л., Займоский В. А. Структура и механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1970. С. 472.