

基于材料磁特性的结构疲劳损伤磁测方法研究*

辛 伟,丁克勤

(中国特种设备检测研究院 北京 100029)

摘要:结构疲劳损伤测量和评估方法的研究是一个难点。由于疲劳损伤伴随材料磁特性的变化,且磁测法测量简单方便,所以利用材料磁特性测量和评估结构的疲劳损伤具有实际意义。以 Q235 钢为试件,通过构建疲劳损伤磁测试验平台,研究了循环应力下,基于磁滞回线的结构疲劳损伤磁测法。结果表明,疲劳损伤不同,磁滞回线也不同。提取磁滞回线的矫顽力 H_c 和剩磁 B_r 作为特征量进行分析,结果显示,试件失效前的疲劳过程大致分为两个阶段:首先是 H_c 和 B_r 的快速增大阶段,该阶段的 H_c 和 B_r 对疲劳损伤的灵敏度较高;然后是 H_c 和 B_r 的变化缓慢阶段,该阶段的 H_c 和 B_r 对疲劳损伤的灵敏度较低。最后分析了 H_c 和 B_r 与疲劳累积损伤 D 的变化关系,能够为结构疲劳损伤的定量评估及在线监测技术的研究提供基础。

关键词: 疲劳损伤;磁滞回线;矫顽力;剩磁;特征量

中图分类号: TH87 TG115 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 430.25

Magnetic measurement method on structure fatigue damage based on the material magnetic characteristics

Xin Wei, Ding Keqin

(China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

Abstract: The method of measurement and accurate assessment of structural fatigue damage is a challenging issue. In the process of structural fatigue damage, material magnetic properties changes, and the magnetic measurement is simple and convenient. Hence, it is significant to detect structure fatigue damage using the change of material magnetic properties. Using Q235 steel as test sample, this work focuses the magnetic measurement method of structure fatigue damage based on hysteresis loop under cyclic tensile stress, in which the test platform is set up. The results show that the hysteresis loop changes when the fatigue damage is different. The coercive force H_c and remanence B_r of the hysteresis loop are extracted as feature parameters. The analysis results indicate that the whole fatigue process can be roughly divided into two stages before the specimen failure. H_c and B_r rise rapidly in the first stage, whose sensitivity of the fatigue damage are higher. Comparatively, H_c and B_r change slowly in the second stage, whose sensitivity of the fatigue damage are lower. Finally, the quantitative relationships of H_c , B_r and fatigue accumulation damage D are analyzed. The proposed method can provide quantitative evaluation of the structural fatigue damage and on-line monitoring technology.

Keywords: fatigue damage; hysteresis loop; coercive force; remanence; characteristics

1 引言

随着现代工业的发展,疲劳损伤问题已广泛存在于各种工程结构和机械设备中,如压力容器、压力管道、起重机械、游乐设施等。在载荷的反复作用下,疲劳损伤问题不断累积,会导致工程结构和机械设备的破坏。据统

计,在各类机械零部件的失效中,大约 80% 以上是由疲劳损伤破坏引起的。特别是近些年,随着机械向高速和大型化方向发展,机械的工作应力越来越高,工作条件越来越恶劣,使得疲劳损伤破坏更趋于频繁。为避免疲劳损伤的破坏,保证设备的安全运行,开展准确、快速、便捷的检测及在线监测是十分必要的。

疲劳损伤是指在疲劳载荷的作用下由于材料微观结

构(微孔洞、微裂纹的形成等)发生变化,导致材料损伤累积和结构性能衰退的过程^[1-2]。结构疲劳损伤形式是复杂多样的,与结构的应力状态和微观缺陷紧密相关。目前,用于结构疲劳损伤的检测方法有多种,如 Choudhary B. K. 等人^[3]采用 X 射线衍射技术研究了 9Cr-1Mo 铁素体钢低周疲劳损伤的评估方法; Kim J. Y. 等人^[4]采用超声法研究了镍基超合金材料在拉伸、高周疲劳和低周疲劳条件下的非线性特性,得到了超声非线性系数与循环数的变化关系。但 X 射线衍射法对构件表面要求很高,构件材料的晶相分布会影响测量精度,且射线对身体有害。超声法检测时,需进行耦合,且材料的组织缺陷引起的声双折射与应力引起的双折射效应属同一量级,需排除干扰。相比而言,磁性法是结构疲劳损伤检测方面非常有前途的一种方法,是利用铁磁材料磁特性对显微结构和应力变化非常敏感的特性,通过测量结构表面的特征磁场变化而实现疲劳损伤检测和评估的一类方法,如磁巴克豪森法^[5-7]、磁声发射法^[8-9]、磁记忆法^[10-11]等。磁性法的研究表明,结构表面的磁信号在疲劳损伤的不同阶段会表现出不同的特征,这些特征可用于分析和表征结构的疲劳损伤程度^[12-15]。同时,磁测装置成本低廉、测量简单方便,在结构疲劳损伤的检测、监测及状态的评估中具有很大的应用优势。

铁磁材料除具有高磁导率、自发磁化的磁特性外,还具有磁滞特性,是由铁磁材料在磁化过程中,磁通密度 B 的变化滞后于磁场强度 H 的变化而导致的^[16-18]。目前,利用铁磁材料的磁滞特性已开展有多方面研究,也取得了一些研究成果^[19-20],但用于结构疲劳损伤检测方面较少。本文以 Q235 钢作为试件,研究了基于铁磁材料磁滞回线的结构疲劳损伤磁检测方法。然后通过构建的结构疲劳损伤磁测试验平台,得到了周期性交流电流励磁下,试件疲劳损伤程度不同时的磁滞回线;磁滞回线反映了试件的磁特性变化,能够用于分析结构的疲劳损伤程度;最后,提取磁滞回线的矫顽力和剩磁作为特征量,并与试件加载循环拉伸应力前的结果进行对比,分析了试件的疲劳损伤与矫顽力相对值及剩磁相对值之间的关系。本文工作能够为金属结构疲劳损伤的定量评估提供方法基础。

2 磁滞回线与检测信号的关系模型

为研究铁磁材料的磁滞特性,在 U 型磁轭上绕制励磁线圈和检测线圈。其中,励磁线圈以正弦电流激励,磁轭、空气隙和被测试件构成闭合回路。然后由安培环路定律、法拉第电磁感应定律及带空气隙磁路计算,得到被测试件内的磁通密度 B 和磁场强度 H ^[16-18],进而得到被测试件的磁滞回线。测量原理如图 1 所示。如果被测试件的疲劳损伤程度发生改变,则整个磁路的磁阻和磁通

都会发生改变,检测线圈上的感应电压信号也会发生变化,该变化包含了被测试件的疲劳损伤信息。

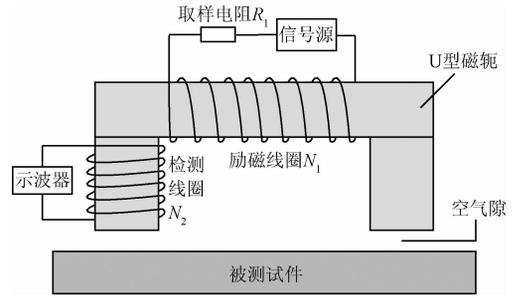


图 1 测量原理线路图

Fig. 1 Circuit diagram of measuring principle

图 1 中, N_1 为励磁线圈匝数, N_2 为检测线圈匝数, R_1 为励磁电流的取样电阻,用于测量励磁电流。假设磁轭的磁场强度、磁通密度、长度和横截面积分别为 H_e 、 B_e 、 L_e 、 S_e , 被测试件的 4 个参数分别为 H_m 、 B_m 、 L_m 、 S_m , 空气隙的四个参数分别为 H_g 、 B_g 、 L_g 、 S_g 。若不考虑漏磁,则在线圈 N_1 中通入励磁电流 I 时,根据基尔霍夫磁路第一定律和第二定律,有:

$$H_e L_e + H_m L_m + H_g L_g = N_1 I \quad (1)$$

$$B_e S_e = B_m S_m = B_g S_g \quad (2)$$

根据法拉第电磁感应定律,有

$$B_e = \frac{1}{N_2 S_e} \int E dt \quad (3)$$

式中: E 为检测线圈产生的感应电压。

将式(3)代入式(2),得到被测试件内的磁通密度为:

$$B_m = \frac{S_e}{S_m} B_e = \frac{1}{N_2 S_m} \int E dt \quad (4)$$

设磁轭的磁导率为常数 μ_e , 则:

$$H_e = \frac{B_e}{\mu_e} \quad H_g = \frac{B_g}{\mu_0} \quad (5)$$

将式(3)和(5)代入式(1),得到被测试件内的磁场强度为

$$H_m = \frac{N_1 I - \frac{1}{N_2} \left(\frac{L_e}{\mu_e S_e} - \frac{L_g}{S_g \mu_0} \right) \int E dt}{L_m} \quad (6)$$

式(4)和(6)中: N_1 、 N_2 、 S_e 、 S_g 、 L_e 、 L_g 、 L_m 、 μ_e 为已知常数, I 为加载的励磁电流,所以只要测得检测线圈上的感应电压 E , 就能得到被测试件中的磁场强度 H_m 和磁通密度 B_m 。

3 结构疲劳损伤磁测试验平台及试验过程

3.1 磁测试验平台的构造

结构疲劳损伤磁测试验平台主要由拉伸疲劳试验

机、被测试件和磁测系统构成。拉伸疲劳试验机选用 SDS-250 电液伺服动静试验机,用于开展一系列拉伸疲劳试验。被测试件的材质为 Q235 钢,属于碳素结构钢,广泛应用于建筑、工程等方面。被测试件采用如图 2 所示的带缺口矩形横截面试件,记为 B 系列试件(编号为 B01 ~ B03)。其中,图 2(a)为试件尺寸,图 2(b)为加工的试验用试件。为减少初始材料结构及试件表面对试验结果的影响,所有试件都取自同一块钢板,且表面做了抛光处理。试件中间预制了半圆形缺口,疲劳裂纹将在预制缺陷处萌生并扩展。

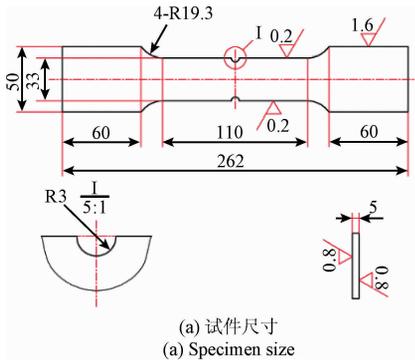


图2 带缺口矩形横截面试件

Fig. 2 Rectangular cross section specimens with band gap

结构疲劳损伤磁滞回线测量系统主要由信号发生器、功率放大器、磁传感器、大功率电阻和示波器组成,同时为减少外部因素(如磁传感器的不稳定等)对检测结果的影响,利用三角支架设计了磁传感器的固定装置。其中,信号发生器用于产生激励波形,功率放大器能够产生 10 倍的固定增益,用于放大激励电流,大功率电阻用于测量激励电流,示波器用于显示和存储大功率电阻电压和检测线圈感应电压数据。磁传感器由 U 型磁轭、励磁线圈和检测线圈组成,励磁线圈选用线径 0.51 mm 的铜

线,匝数为 476 匝,绕制的磁传感器如图 3 所示。构造的整个试验平台如图 4 所示。

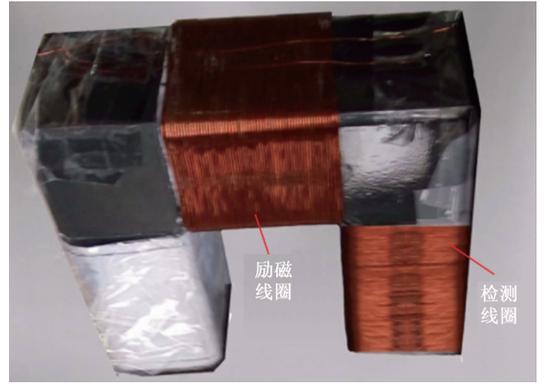


图3 磁传感器

Fig. 3 Magnetic sensor

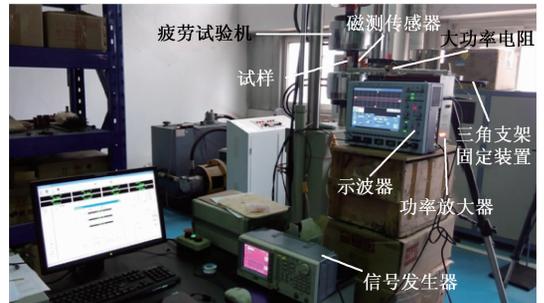


图4 构造的试验平台

Fig. 4 Constructed test platform

3.2 试验过程

1) 利用三角支架的移动,将 U 型磁轭端部贴近被测试件,两者间的空气隙约为 1 mm。

2) 在屈服强度内,给试件加载拉伸循环应力,最小应力幅为 0 MPa,最大应力幅为 280 MPa,载荷类型为正弦波,加载频率为 3.5 Hz。如试件 B01 的缺口长度约为 27.7 mm,厚度约为 5.1 mm,则加载的力最大值约为 19.8 kN。

3) 测量电路中,信号发生器产生 $1.2 V_{pp}$ 的正弦激励电压后,利用功率放大器对信号进行放大,并加载到磁传感器和大功率电阻两端,考虑到铁磁材料趋肤效应的影响,励磁电流的频率选取 5 Hz。其中,大功率电阻两端和检测线圈两端分别接入示波器,用于测量激励电流和瞬态感应电压。

4) 电路连接后,加载循环拉伸应力,每 1 000 个循环次数时,疲劳试验机暂停工作,试件保持不动,此时利用示波器在线采集数据一次,包括时间列、感应电压信号和大功率电阻两端的电压信号,并将采集到的信号进行存储、处理。

5)采用相同的试验步骤对试件 B01、B02 和 B03 开展 3 组试验,并对试验结果进行比较分析。

4 结构疲劳损伤磁测结果及分析

4.1 疲劳损伤不同时的磁滞回线

利用构建的试验平台进行了 B01、B02 和 B03 三个试件的疲劳试验,加载情况及各试件的裂纹出现情况如表 1 所示。

表 1 试件 B01、B02 和 B03 的加载

Table 1 Loading situations of specimen B01, B02 and B03

试件编号	循环次数	裂纹出现情况
B01	52 000	出现 1 mm 裂纹
	62 978	断裂
B02	49 000	出现 1 mm 裂纹
	60 119	断裂
B03	46 000	出现 1 mm 裂纹
	54 528	断裂

从表 1 可以看出,3 个试件所加载的循环应力相同时,出现约 1 mm 裂纹及断裂时的循环次数不同,说明相同循环次数下,试件的疲劳损伤情况是不同的。当试件出现约 1 mm 裂纹时,裂纹明显,判定试件失效。因此,在下面的分析中约定:加载循环应力前,认为试件是完好的;出现约 1 mm 裂纹时,认为试件是失效的。所以下面主要研究试件失效前的疲劳损伤情况,如试件 B01 主要分析 0~52 000 循环周内试件的疲劳损伤情况。

利用试件 B01 开展试验时,给试件 B01 加载循环应力前,给励磁线圈加载周期性正弦电流,则检测线圈上会得到试件加载应力前的感应电压。施加的励磁电流及得到的感应电压变化曲线如图 5 所示。然后通过式(4)和(6)计算得到磁场强度 H 和磁通密度 B 的变化曲线如图 6 所示。

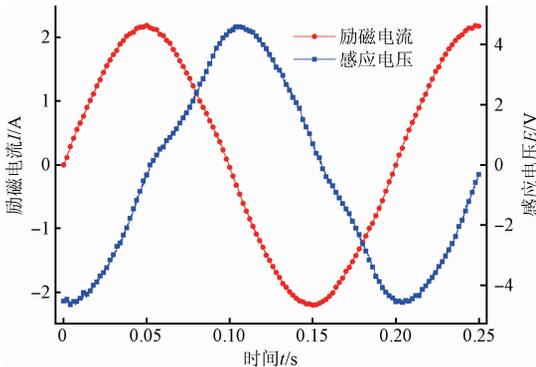


图 5 加载的励磁电流和感应电压变化曲线

Fig.5 Curve of exciting current loaded and induced voltage

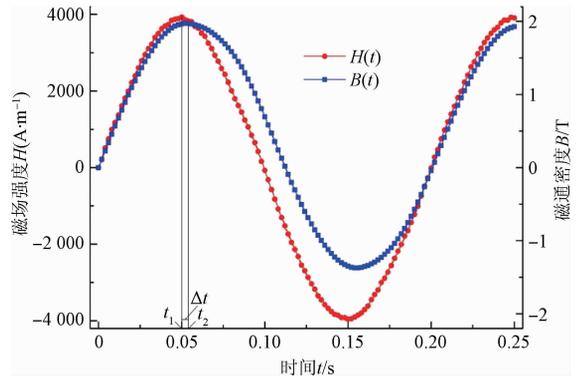


图 6 磁场强度 H 和磁通密度 B 变化曲线

Fig.6 Curve of Magnetic field intensity H and magnetic flux density B

从图 5 可以看出,加载的励磁电流为正弦变化,峰值约为 2.2 A,频率为 5 Hz。由于试件为 Q235 钢,属铁磁材料,具有滞后效应^[16,21-22],所以检测线圈上得到的感应电压为非正弦变化,其峰值约为 4.5 V。为说明铁磁材料滞后效应的影响,图 6 给出了磁场强度 H 和磁通密度 B 的变化曲线,曲线表明,Q235 钢的铁磁性能达到稳定时, H 在 t_1 达到最大值, B 在 t_2 达到最大值, B 和 H 达到最大值所用的时间存在时间差 Δt , B 的变化滞后于 H 的变化,导致励磁电流正弦变化时,磁通密度 B 的变化为非正弦变化,进而得到的感应电压也是非正弦变化。然后通过图 6 中的 B 和 H 变化曲线得到的试件加载循环应力前的磁滞回线如图 7 所示。

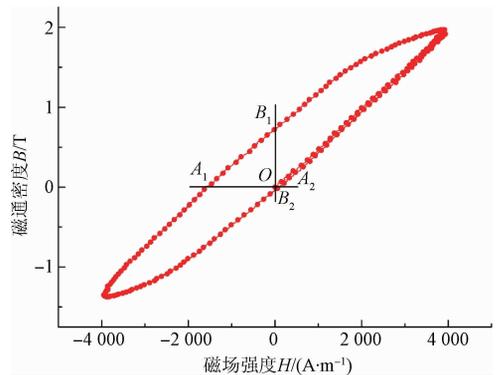


图 7 试件 B01 加载循环应力前测量得到的磁滞回线

Fig.7 Hysteresis loop of specimen B01 before loading cyclic stress

在图 7 中,随着电流的增加,工作点从起始点上升到 H 最大值处,然后随着电流的减少,工作点从 H 最大值处下降到 B_1 (磁场强度 $H=0$) 处。当反向电流增加时,工作点从 B_1 下降到 A_1 (磁通密度 $B=0$) 处,并继续达到 H 最小值处。继续加载正弦电流,工作点上升,到达 B_2 (磁场强度 $H=0$) 和 A_2 (磁通密度 $B=0$) 后,继续上升,到达 H 最大值处。加载更多正弦电流,工作点的变化轨迹局

限在磁滞回线上。图7中的磁滞回线不对称,与加载励磁电流前试件中的剩磁有关。励磁电流的频率和峰值保持不变,得到了不同循环数下疲劳损伤不同时 Q235 钢的磁滞回线,然后与图7 进行比较,结果如图8 所示。

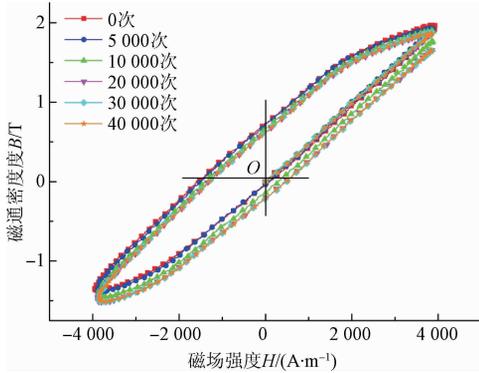


图8 不同循环数下试件 B01 的磁滞回线

Fig.8 Hysteresis loops of specimen B01 with different cycle number

由图8 可以看出,由于空气隙的存在,图5 所示的激励电流励磁下,磁滞回线没有达到饱和,说明空气隙对试件的磁化效果影响较大。同时,图8 中显示,当加载的循环拉伸应力和励磁电流保持不变时,随着循环数的增加,磁滞回线的形状基本一致,但磁滞回线有扩大的趋势,且试件从完好到失效的整个过程中,磁场强度在 $[-4\ 000\ \text{A/m}, 4\ 000\ \text{A/m}]$,磁通密度在 $[-1.5\ \text{T}, 2\ \text{T}]$ 之间变化。试件加载前的剩磁使得磁滞回线不对称,但由于励磁磁场较大,所以剩磁对由疲劳损伤引起的磁滞回线的变化影响很小。而且疲劳累积损伤加深时,磁滞回线的矫顽力和剩磁也不同,矫顽力和剩磁有增加的趋势。因此,得到的磁滞回线能够用于分析试件的疲劳损伤情况。且根据磁滞回线的变化,可提取磁滞回线的磁参数(矫顽力、剩磁等)研究试件的疲劳损伤程度。

4.2 磁滞回线磁参数与结构疲劳损伤的关系

磁滞回线的磁参数有多个,根据图8 的结果,提取图7 所示磁滞回线的矫顽力 H_c (点 A_1 和 A_2 值的均值)和剩磁 B_r (点 B_1 和 B_2 值的均值)作为特征量分析磁滞回线的变化。试件从完好到失效的整个过程中,相同励磁条件下,磁滞回线的 H_c 值和 B_r 值随循环数的变化曲线如图9 所示。

从图9 可以看出,随着循环数的变化,矫顽力 H_c 和剩磁 B_r 有大致相同的变化趋势。当循环数 ≤ 0.8 万时, H_c 和 B_r 值逐步增大;当 $0.8\ \text{万} < \text{循环数} \leq 1.2$ 万时, H_c 和 B_r 会急剧增大。然后随着循环数的继续增加, H_c 和 B_r 出现振荡,直至试件失效。为更清晰地分析试件从完好到失效的整个过程中,疲劳损伤程度与 H_c 和 B_r 的关系,将图9 中的循环数、 H_c 和 B_r 转换为相对值,得到的变化曲线如图10 所示。

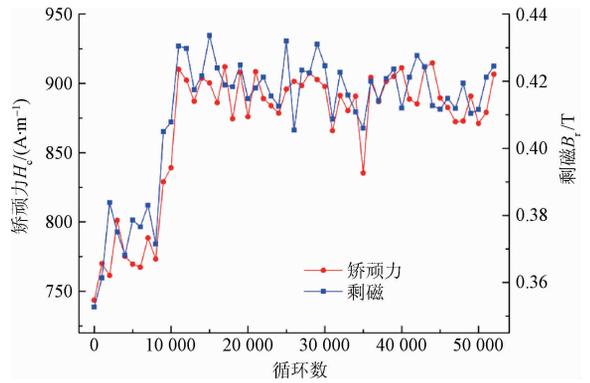


图9 不同循环数下矫顽力 H_c 和剩磁 B_r 的变化

Fig.9 Variation of coercivity H_c and remanence B_r with different cycle number

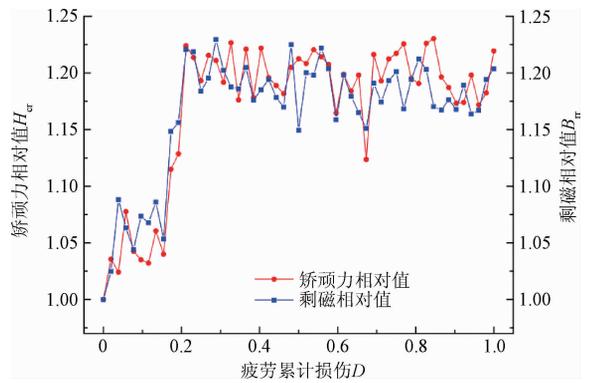


图10 试件疲劳累积损伤 D 与矫顽力相对值 H_{cr} 和剩磁相对值 B_{rn} 的关系曲线

Fig.10 Relation curves of specimen fatigue cumulative damage D , relative coercivity H_{cr} and relative remanence B_{rn}

在图10 中,试件的疲劳累积损伤 D 是指试件在恒幅交变应力作用下,经受 n 次循环时的损伤,即 $D = n/N$,其中 N 定义为试件失效时所经受的循环数。 $D = 0$ 表示试件完好, $D = 1$ 表示试件失效。矫顽力相对值 H_{cr} 和剩磁相对值 B_{rn} 分别是指循环数不同时的矫顽力 H_c 和剩磁 B_r 值与循环数为0 时的 H_c 和 B_r 值的比值,则试件完好时, H_{cr} 和 B_{rn} 为1。与图9 相比较,当开展多组试验时,由于加载应力前,试件内部的位错、夹杂等不同,试件失效时所需要的循环数是不同的,且每次放置传感器时,传感器的位置和提高都会发生变化,对矫顽力和剩磁影响较大,所以图10 的描述能够更清楚地反映试件的疲劳损伤程度。

4.3 多组试件的疲劳损伤磁测试验结果分析

采用与试件 B01 相同的试验步骤,再对试件 B02 和 B03 开展两组试验,并与 B01 的试验结果进行比较分析。

励磁电流相同、加载的循环拉伸应力不变时,不同试件疲劳累积损伤 D 与磁滞回线的矫顽力相对值 H_{cr} 和剩磁相对值 B_r 的关系曲线分别如图 11、12 所示。

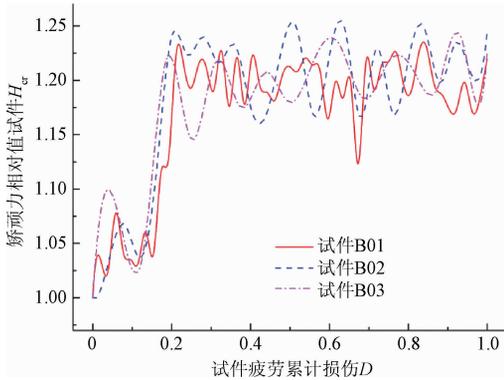


图 11 不同试件疲劳累积损伤 D 与矫顽力相对值 H_{cr} 的关系

Fig. 11 Relation curves of different specimen fatigue cumulative damage D and relative coercivity H_{cr}

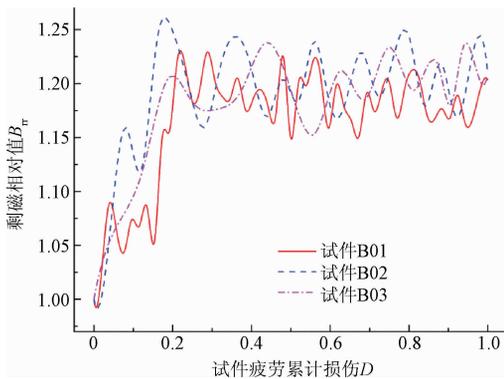


图 12 不同试件疲劳累积损伤 D 与剩磁相对值 B_r 的关系

Fig. 12 Relation curves of different specimen fatigue cumulative damage D and relative remanence B_r

图 11 和 12 中的变化曲线是对试验数据进行样条插值和平滑处理后的结果,这样能够更清晰地看出不同试件的疲劳损伤变化情况。图中可以看出,采用矫顽力相对值 H_{cr} 和剩磁相对值 B_r 刻画试件的疲劳损伤程度时,试件 B02 和 B03 有与试件 B01 近似相同的变化规律,即在试件从完好到失效的整个过程中,随着试件疲劳累积损伤的增加, H_{cr} 和 B_r 的变化可大致分为两个阶段:第 1 阶段是快速上升阶段, H_{cr} 和 B_r 先缓慢增大再快速增大,该阶段约占整个疲劳累积损伤的 15% ~ 20%;第 2 阶段是振荡平衡阶段, H_{cr} 和 B_r 变化缓慢,基本处于稳定,该阶段约占整个疲劳累积损伤的 80% ~ 85%,且阶段后期会萌生微裂纹,并进行扩展。第 1 阶段的 H_{cr} 和 B_r 变化快

速,说明该阶段的 H_{cr} 和 B_r 对试件的疲劳损伤灵敏度较高;第 2 阶段的 H_{cr} 和 B_r 变化缓慢,说明该阶段的 H_{cr} 和 B_r 对试件的疲劳损伤灵敏度较低,需选择合适的励磁电流和传感器尺寸来提高磁测信号对疲劳损伤变化的灵敏度。

同时,从图 11 和 12 还可以看出, H_{cr} 和 B_r 随疲劳累积损伤 D 变化时,在第 1 阶段, H_{cr} 和 B_r 变化快速,可以用指数函数描述;在第 2 阶段, H_{cr} 和 B_r 振荡变化,基本处于平衡状态,但也存在变化,可以用线性函数描述,矫顽力和剩磁的变化规律相一致。因此,磁参数矫顽力和剩磁可作为特征量用于分析磁滞回线的变化及金属结构的疲劳损伤情况,能够为结构疲劳损伤准确的定量评估提供支持。但指数函数和线性函数能否准确的表述矫顽力和剩磁的变化,需通过仿真和试验分析,进一步优化传感器,减少振荡变化,提高检测灵敏度。同时,励磁电流的频率、大小和空隙对检测结果影响较大,所以未来的工作中,需进一步分析不同励磁电流下磁滞回线的变化及空隙对检测结果的影响。

5 结 论

设计和构建了结构疲劳损伤磁滞回线检测试验平台,该平台可用于结构疲劳损伤的磁检测和监测方法研究。

给励磁线圈加载正弦电流,由于试件为铁磁材料,具有滞后效应,所以检测线圈上得到的感应电压为非正弦变化,被测试件的工作点位于磁滞回线上。循环数不同,得到的磁滞回线也不同,磁滞回线反映了结构的疲劳损伤情况。

提取磁滞回线的矫顽力 H_c 和剩磁 B_r 作为特征量用于分析结构的疲劳损伤程度。结果表明,在试件从完好到失效的整个过程中, H_c 和 B_r 的变化可分为两个阶段:1) 上升阶段,约占试件寿命周期的 15% ~ 20%,该阶段的 H_c 和 B_r 对试件的疲劳损伤灵敏度较高;2) 平衡阶段,约占试件寿命周期的 80% ~ 85%,该阶段的 H_c 和 B_r 对试件的疲劳损伤灵敏度较低。

参考文献

- [1] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
YU SH W, FENG X Q. Damage mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [2] 许金泉, 郭凤明. 疲劳损伤演化的机理及损伤演化律[J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 40-46.
XU J Q, GUO F M. Mechanism of fatigue damage evolution and the evolution law [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(2): 40-46.

- [3] CHOUDHARY B K, SANJAY R, JAYAKUMAR T, et al. An assessment of low cycle fatigue damage in 9Cr-1Mo ferritic steel at 300 K using X-ray diffraction technique [J]. *Transactions-Indian Institute of Metals*, 2000, 53(3): 353-359.
- [4] KIM J Y, JACOBS L J, QU J, et al. Experimental characterization of fatigue damage in a nickel-base superalloy using nonlinear ultrasonic wave[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, 120(3): 1266-1273.
- [5] YAMAURA S, FURUYA Y, WATANABE T. The effect of grain boundary microstructure on barkhausen noise in ferromagnetic materials [J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(15): 3019-3027.
- [6] DAS S K, JOARDER A, MITRA A. Magnetic barkhausen emissions and microstructural degradation study in 1. 25Cr-0. 50Mo steel during high temperature exposure[J]. *NDT&E International*, 2004, 37(3): 243-248.
- [7] 傅洁, 殷华宇, 陈娟, 等. 基于巴克豪森效应的钢轨应力检测系统设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2013, 27(5): 403-408.
FU J, YIN H Y, CHEN J, et al. Design of rail stress detection system based on Barkhausen effect[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2013, 27(5): 403-408.
- [8] O'SULLIVAN D, COTTERELL M, CASSIDY S, et al. Magnetoacoustic emission for the characterization of ferric stainless steel micro structural state [J]. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, 2004, 271(2): 381-389.
- [9] PIOTROWSKI L, AUGUSTYNIAK B, CHMIELEWSKI M, et al. The influence of plastic deformation on the magnetoelastic properties of the CSN12021 grade steel[J]. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, 2009, 321(15): 2331-2335.
- [10] DOUBOV A A. Problems in estimating the remaining life of aging equipment [J]. *Thermal Engineering*, 2003, 50(11): 935-938.
- [11] 钱正春, 黄海鸿, 姜石林, 等. 铁磁性材料拉/压疲劳磁记忆信号研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(4): 506-517.
QIAN ZH CH, HUANG H H, JIANG SH L, et al. Research on magnetic memory signal of ferromagnetic material under tensile and compressive fatigue loading[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(4): 506-517.
- [12] CHEN X, LI L M, HU B, et al. Magnetic evaluation of fatigue damage in train axles without artificial excitation[J]. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2006, 48(6): 342-345.
- [13] 刘昌奎, 陶春虎, 陈星, 等. 基于金属磁记忆技术的18CrNi4A钢缺口试件疲劳损伤模型[J]. *航空学报*, 2009, 30(9): 1641-1647.
LIU CH K, TAO CH H, CHEN X, et al. Fatigue damage model of notched 18CrNi4A steel specimens by metal magnetic memory method[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(9): 1641-1647.
- [14] 李新蕾, 任吉林, 任尚坤, 等. 铁磁构件残余寿命评估方法[J]. *航空学报*, 2010, 31(10): 2109-2114.
LI X L, REN J L, REN SH K, et al. Residual life assessment of ferromagnetic components [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(10): 2109-2114.
- [15] 任尚坤, 郭峰, 徐振瀚. 20#钢构件应力疲劳检测的新技术及试验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(5): 1155-1160.
REN SH K, GUO F, XU ZH H. Studies on new testing technique and experiment of stress fatigue damage for 20# steel component [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(5): 1155-1160.
- [16] 梅文余. 动态磁性测量[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
MEI W Y. *Dynamic magnetic measurement [M]*. Beijing: Chinese Machine Press, 1985.
- [17] 辛伟, 毛雪飞, 陈兴乐. 脉冲电流激励下铁磁材料的局部磁滞特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(12): 2004-2011.
XIN W, MAO X F, CHEN X L. Analysis of minor hysteresis characteristic for ferromagnetic material under pulsed current excitation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(12): 2004-2011.
- [18] 辛伟. 计及频率和脉宽脉冲电流激励下铁磁材料局部磁滞特性的分析与模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(5): 1258-1265.
XIN W. Analysis and simulation of minor hysteresis characteristic for ferromagnetic material under pulsed current excitation considering frequency and pulsed width[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(5): 1258-1265.
- [19] 吴德会, 李雪松, 黄一民, 等. 利用局部磁滞回线特性的无损检测新方法[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(10): 2207-2214.
WU D H, LI X S, HUANG Y M, et al. New nondestructive test method with empirical research using local hysteretic loop characteristics[J]. *Chinese Journal*

of Scientific Instrument, 2015, 36(10): 2207-2214.

- [20] 焦敬品, 常予, 李光海, 等. 铁磁构件内外表面裂纹低频漏磁检测技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1808-1817.
- JIAO J P, CHANG Y, LI G H, et al. Study on low frequency AC magnetic flux leakage detection for internal and external cracks of ferromagnetic structures [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1808-1817.
- [21] PANDA A K, DAS S K, MITRA A, et al. Evaluation of deformation behavior of HSLA-100 steel using magnetic hysteresis technique [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(10): 3264-3266.
- [22] GU S, JIN Y, CHEN P. Modeling of magnetic material displaying magnetic aftereffect with slow decay rates [J]. Physical B Condensed Matter, 2012, 407(9): 1372-1376.

作者简介



辛伟, 分别在2006年和2009年于中北大学获得学士学位和硕士学位, 2015年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为中国特种设备检测研究院博士后, 主要研究方向为电磁检测监测技术理论与仪器。
E-mail: fengxw_1982@163.com

Xin Wei received his B. Sc. and M. Sc. degrees from Zhongbei University in 2006 and 2009, respectively, and received his Ph. D. degree in 2015 from Beihang University. Now he is a post-doctor in China Special Equipment Inspection and Research Institute (CSEI). His main research interest is the theory and instrument on electro-magnetic detect and monitor technology.



丁克勤 (通讯作者), 1991年于郑州工业大学获得学士学位, 1994年于北京化工大学获得硕士学位, 1997年于中国科学院获得博士学位, 现为中国特种设备检测研究院结构健康监测诊断与管理事业部主任, 主要研究方向为特种设备健康监测、诊断及评估、先进传感等技术的方法和系统。

E-mail: kqding@sina.com

Ding Keqin (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1991 from Zhengzhou University of Technology, received his M. Sc. degree in 1994 from Beijing University of Chemical Technology, and received his Ph. D. degree in 1997 from Chinese Academy of Sciences. Now he is a department director in Structural health monitoring and diagnosis and management, CSEI. His main research interests include the technological method and system on special equipment health monitoring, diagnosis and assessment, advanced sensor, etc.