

金属磁记忆技术用于再制造毛坯寿命评估初探*

董丽虹¹, 徐滨士¹, 董世运¹, 王 丹²

(1. 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072; 2. 海军装备研究院, 北京 100073)

摘 要: 剩余寿命预测是再制造工程的核心内容之一, 金属磁记忆技术在再制造毛坯寿命预测领域极具潜力。文中概述了金属磁记忆信号的特征、微观物理检测机制的研究结果, 探讨了利用金属磁记忆技术表征疲劳裂纹萌生及扩展寿命的途径和方法, 并介绍了该技术在再制造毛坯寿命评估领域的初步应用。

关键词: 再制造毛坯; 金属磁记忆技术; 磁畴结构; 疲劳裂纹; 寿命预测

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2010)02-0106-06

Progress in Life Prediction of Remanufacturing Blanks by Using Metal Magnetic Memory Testing

DONG Li-hong¹, XU Bin-shi¹, DONG Shi-yun¹, WANG Dan²

(1. National Key Laboratory for Remanufacturing, Beijing 100072; 2. Navy Academy of Armament, Beijing 100073)

Abstract: The residual life prediction is one of the cores of the remanufacturing engineering. Metal magnetic memory testing (MMMT) is a highly promising tool in this field. This paper gives a presentation of results of basis theory researches on the essence of MMMT signals, the micro-physical testing mechanism. The prediction approach of fatigue crack initiation life and fatigue crack propagation life is determined by means of MMMT. The application of MMMT in remanufacturing blank life prediction is also introduced at the end of the paper.

Key words: remanufacturing blank; metal magnetic memory, magnetic domain; fatigue crack; life prediction

0 引 言

再制造工程作为一项战略性新兴产业, 能够针对废旧产品进行产业化的高技术修复、改造, 具有显著的节约资源、保护环境效果^[1-5]。与传统制造不同, 再制造以废旧产品作为毛坯进行生产, 即再制造毛坯是经过一定服役周期的零部件。在服役过程中, 零部件的性能会逐渐劣化, 如发生疲劳、蠕变、磨损、腐蚀、热损伤等, 从而产生不同的失效模式, 其中疲劳破坏是最常见、最重要的失效模式^[6], 是引起工程结构部件失效的最主要原因。

针对服役过程中承受疲劳载荷的再制造毛坯, 进行再制造生产前, 首先需要对毛坯进行疲劳寿命评估, 判断其有无再制造价值, 能否再制造。因此, 再制造毛坯寿命评估是再制造工程的核心研究内容

之一, 属于再制造工程的前沿基础课题。

目前, 寿命评估方法主要有3类: ①基于力学理论和疲劳试验手段进行寿命预测。其试验过程复杂、费用比较昂贵^[7,8], 寿命预测精度和工况环境下部件的实际寿命有较大差距; ②利用有限元模拟计算预测寿命。能够在一定程度上解决试验周期长、耗费巨大的问题, 但预测精度依赖于对服役条件了解的准确程度; ③采用无损检测技术预测剩余寿命。可以针对工程实际构件进行, 实时监测零部件中缺陷的发生、发展情况^[9,10], 不损伤检测对象, 准确度高。由于废旧件剩余寿命预测是再制造生产的第一步, 要求采用的评估方法不能对废旧件造成新的损伤。因此, 探索无损检测技术预测再制造毛坯剩余寿命的方式方法成为这一领域重要发展方向。

金属磁记忆检测技术是一种新兴无损检测方法, 它是俄罗斯学者的研究成果, 1997年首次在第50届国际焊接学术会议上提出, 99年底引入中国, 由于该技术具有显著的优点而获得迅速推广和使

收稿日期: 2009-03-10; 修回日期: 2010-04-02

基金项目: *国家自然科学基金项目 (50735006, 50975283), 国家973计划项目 (2007CB607601)

作者简介: 董丽虹(1972—), 女(汉), 河北新乐人, 讲师, 博士。

用^[11,12]。金属磁记忆技术主要是基于磁机械效应,是利用铁磁构件在服役过程中自发产生的弱磁信号来发现应力集中区域。在地磁场环境下,铁磁材料受到外载荷作用,在铁磁材料的应力集中区域出现残余磁感应和自磁化的增长,形成磁畴的固定结点,以漏磁场的形式出现在铁磁材料表面,并在在工作载荷消除后仍然保留。这一增强的磁场能够“记忆”铁磁部件表面应力集中的位置^[13-15]。

然而,由于该技术发展时间较短,它的微观物理机制尚不明确^[16-18];金属磁记忆信号非常微弱,会受到多种干扰因素的影响,这就使得实现金属磁记忆信号的量化存在诸多困难。金属磁记忆技术如何应用于再制造毛坯寿命预测领域,一直是再制造寿命评估研究的重点和难点问题。

1 金属磁记忆信号特征

通过进行大量基础试验,并结合装甲装备部件的实际测试结果,明确了金属磁记忆信号的实质。研究表明,铁磁构件在制造和服役过程中,受到力、热、磁等多种因素的影响,表面会产生一个杂散磁场,它的幅值、分布特征反映了铁磁材料的化学成分、经受的温度变化、载荷作用等因素的综合影响^[19]。金属磁记忆信号实质就是这一杂散磁场信号,金属磁记忆信号包含两个分量, $H_p(y)$ 信号就是杂散磁场的法向分量, $H_p(x)$ 信号是杂散磁场的水平分量。在应力集中区域 $H_p(x)$ 信号具有最大值, $H_p(y)$ 信号具有过零点(见图 1 所示)。由于杂散磁场信号微弱,在以往的研究中被忽略不计。金属磁记忆技术就是通过采集、分析这一杂散磁场信号,推测其与损伤的关系。

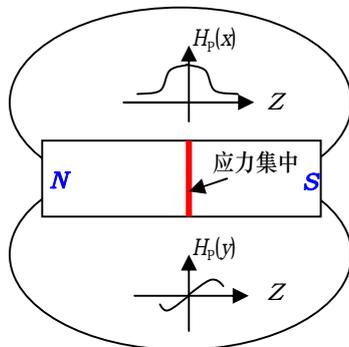


图 1 应力集中区域的磁信号

Fig.1 Magnetic signals on the stress concentration zone

2 力致磁畴结构的变化

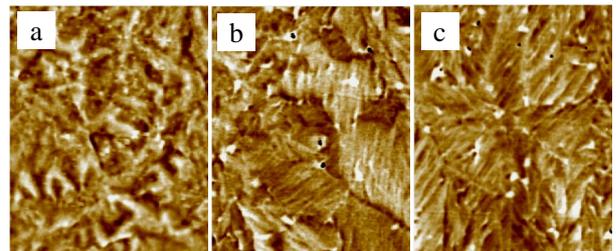
磁畴的大小、形状以及排列方式称为磁畴结构。磁畴结构的形式及变化反映了材料宏观磁性能的特征。揭示金属磁记忆现象的物理机制需要研究载荷激励下铁磁材料磁畴结构的变化。

采用专门制作的磁畴结构试样(如图2所示),对其分别施加二级递增的轴向拉应力259 MPa和390 MPa,利用MFM磁力显微镜分别观察试件初始磁状态、施加259 MPa应力、施加390 MPa应力后试件表面磁畴结构,图3给出left点的磁畴结构的观测结果。



图 2 磁畴试样及检测点布置

Fig.2 Measured points on the specimen for magnetic domain observation



(a) 初始状态 (b) 259 MPa (c) 390 MPa

图 3 试件初始磁状态及两次施加轴向应力后的磁畴结构(扫描范围 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$)

Fig.3 Magnetic domain structures on initial state and after two level axial loads applied to the specimen (scanning size $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$)

初始磁状态下观测到的磁畴结构粗大,白色畴和深色畴杂乱分布,反映出试件在制样过程中不同加工制造工序引入的不均匀应力对磁畴结构的影响。施加259 MPa应力后,由于轴向拉应力的影响占主导地位,各个晶粒中出现明显的条状畴,同一晶粒内部条状畴取向一致,不同晶粒之间呈现磁各向异性。受载390 MPa后观测点出现更多条状畴,且条状畴之间的磁斑反差变大。磁畴结构研究结果显示,单独的应力作用能够使得铁磁材料的磁畴结构发生变化,从而影响它的宏观磁性能。施加轴向拉应力,铁磁材料中会呈现条状畴结构,产生垂直试样表面的磁化现象,并且随着拉应力的增大,条

状畴增多, 泄漏到试样表面杂散磁场信号增强, 可以定性的说明应力增大, 产生的等效磁场增强。

3 力致变形的磁记忆信号变化

研究已经证实, 对铁磁试件施加轴向载荷, 试件的宏观磁性会发生改变, 载荷导致试件呈现磁有序状态。铁磁试件承受轴向拉伸载荷后, 磁记忆信

号的法向分量 $H_p(y)$ 零值点指示正负磁极的交界点。弹性变形阶段内, $H_p(y)$ 信号曲线随载荷增大呈现逆时针转动趋势; 试件发生塑性变形后, 载荷继续增大, $H_p(y)$ 磁曲线团聚在一起。提取 $H_p(y)$ 磁曲线斜率值 K_s , 发现 K_s 在弹性变形阶段内随载荷增大而增大, 塑性变形阶段内缓慢下降。磁参量 K_s 可以表征铁磁试件应力导致的变形程度 (见图4)。

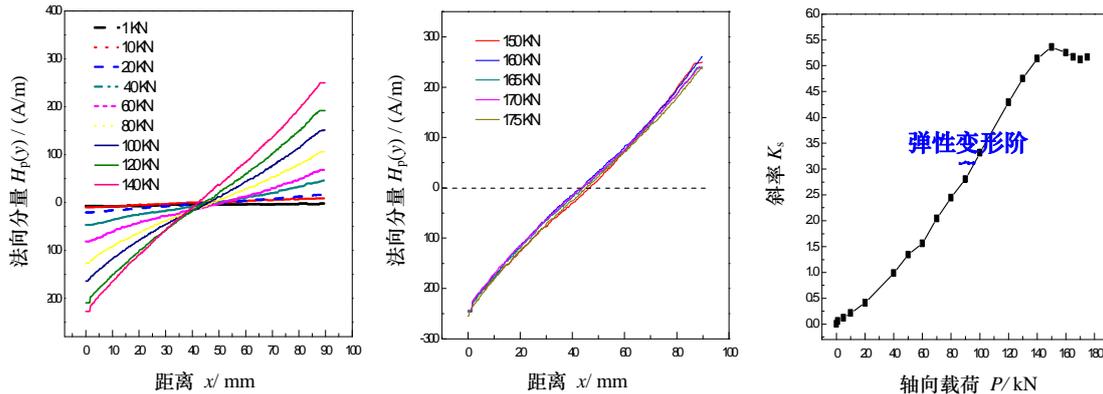


图4 力致变形产生的磁记忆信号变化

Fig.4 Variations of magnetic signals induced by applied load

4 金属磁记忆技术预测疲劳寿命研究

金属磁记忆技术发展时间较短, 还处于成长阶段, 目前它只能提供定性的寻找应力集中位置的评价准则, 检测的准确度需要借助其它的检测方法验证, 这极大的限制了金属磁记忆技术在再制造毛坯寿命评估领域的应用, 探索金属磁记忆技术预测疲劳寿命的途径和方法是首先需要解决的问题。

4.1 金属磁记忆技术预测疲劳裂纹萌生寿命

结构的疲劳寿命定义为形成疲劳裂纹所需的循环次数与疲劳裂纹从亚临界尺寸扩展到临界尺寸所需循环次数之和, 即 N (疲劳寿命) = N_i (疲劳裂纹萌生寿命) + N_p (疲劳裂纹扩展寿命)^[5]。

疲劳裂纹萌生前, 材料内部的损伤量的变化非常微小, 预测疲劳裂纹萌生寿命是当前无损检测界面临的一大难题。在本研究中, 采用经过热处理退磁的光滑疲劳试件, 进行不同应力等级的恒幅拉拉疲劳试验, 探索金属磁记忆技术表征疲劳裂纹萌生寿命的方式。

光滑试件经高温热处理后, 获得纯净的初始磁状态, 受载后 $H_p(y)$ 信号曲线显示良好线性, 提取磁曲线的斜率 K_s , 得到斜率 K_s 与疲劳循环次数 N 之间的关系曲线, 结果发现, 在寿命的初期阶段, K_s

随循环次数增大显著增加, 寿命的中期阶段, K_s 趋于稳定, 随循环次数增加缓慢增大, 在寿命的后期阶段, 由于微观裂纹的形成, K_s 下降 (见图5所示)。由此获得采用金属磁记忆技术表征的疲劳裂纹萌生寿命的公式: $K_s = aN^b$; 系数 a 、 b 是由载荷控制的参量^[19]。

以上结论是在试验件具有异常纯净的初始磁信号条件下获得, 即使在这样的条件下, 疲劳循环次数的增加引起磁信号曲线斜率变化仍然十分微弱。而工程实际构件的信号比较复杂, 与构件形状尺寸、材料成分、制造过程及特定的服役条件密切相关, 这一研究结果证实了金属磁记忆技术对铁磁装备部件早期寿命预测的可行性, 但将它直接应用于某一再制造毛坯还需要深入研究

4.2 金属磁记忆技术预测疲劳裂纹扩展寿命

研究中还发现, 相比较疲劳裂纹萌生阶段金属磁记忆信号的微弱变化, 在疲劳裂纹扩展阶段, 铁磁材料会发射强烈的异变磁信号, 即使构件不具有纯净的初始磁信号亦是如此。采用含有中心裂纹CCT试件进行拉拉疲劳试验, 在卸载状态下检测, 发现随着疲劳裂纹扩展, 形成的磁异变峰峰值不断增大^[20] (见图6)。疲劳裂纹长度和异变峰峰值具有线性相关性, 可以采用异变峰峰值表征疲劳裂纹

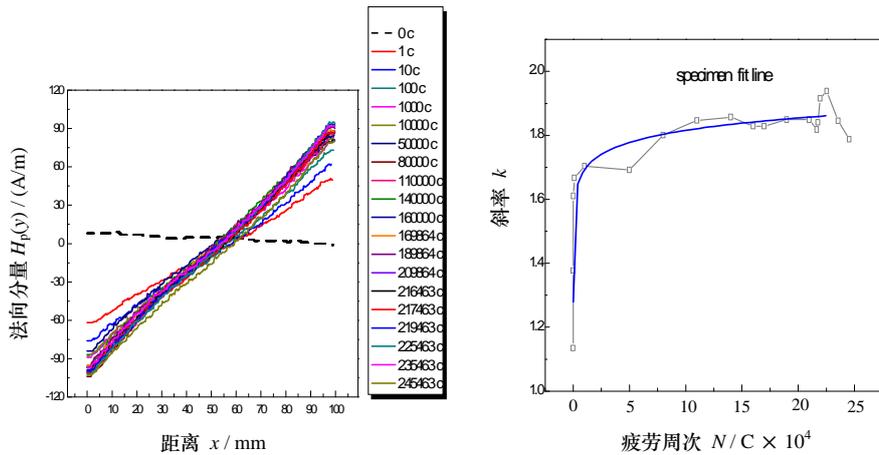


图 5 疲劳过程中 $H_p(y)$ 信号分布特征及其斜率随循环次数的变化
Fig.5 Distributions of magnetic signals and their slope coefficient

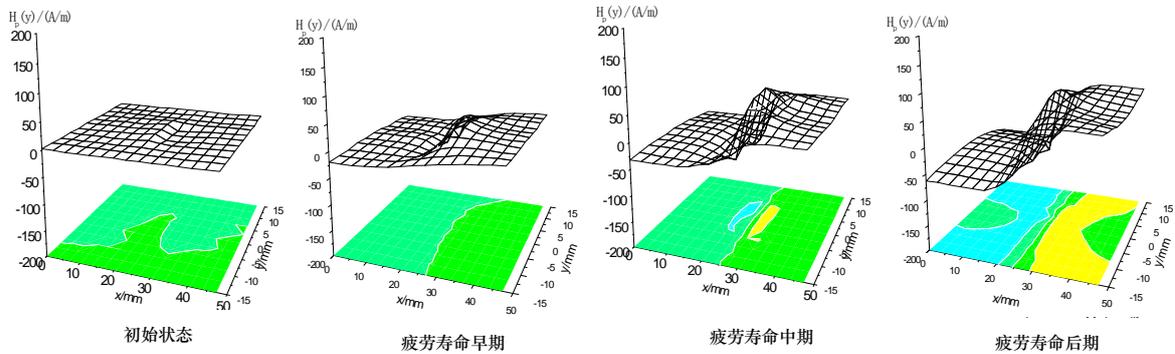


图 6 CCT 试件疲劳裂纹扩展过程中 $H_p(y)$ 信号变化
Fig.6 Variations of $H_p(y)$ signal of CCT specimen during fatigue crack propagation process

扩展,由此获得采用金属磁记忆技术预测疲劳裂纹扩展寿命的表达式:

$$N = \frac{\Delta H_{p1}(y)_c}{\Delta H_{p1}(y)_0} \int \frac{d\Delta H_{p1}(y)}{A(\Delta K)^B}$$

4.3 金属磁记忆技术寿命评估仪器研制

金属磁记忆技术自问世以来,由于在应力集中位置, $H_p(y)$ 信号存在正负号的跃变,有过零点,易于捕获及分析,所以开发的各种金属磁记忆仪器均只提供了杂散磁场法向分量的 $H_p(y)$ 信号,而忽略了水平分量 $H_p(x)$ 。实际上, $H_p(y)$ 和 $H_p(x)$ 信号是一对孪生变量,在疲劳过程中均会呈现相应的特征信号,为再制造毛坯的寿命预测发挥作用。为此,研制开发出可以检测 $H_p(x)$ 信号的 RM-1 型金属磁记忆寿命评估仪^[21] (见图 7)。

仪器的主体结构包括磁敏传感器、前置调理板、主调理板、电源、数据采集卡、计算机、应用

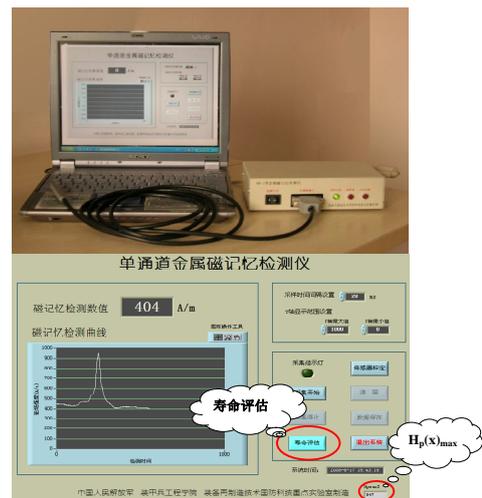


图 7 RM-1 型金属磁记忆检测仪外观及检测面板
Fig.7 The appearance of RM-1 MMT and its front panel

软件和接线。其中,磁敏传感器、前置调理板和信号线组成传感器探头;主调理板、数据采集卡和电

源组成检测仪主机；计算机和应用软件组成计算控制模块。RM-1 仪器的软件程序采用虚拟仪器编程工具 LabVIEW 编写完成。根据试验研究结果，RM-1 型仪器中增加了寿命评估模块，根据仪器检测的 $H_p(x)$ 幅值，判断铁磁构件处于疲劳裂纹萌生阶段还是疲劳裂纹扩展阶段，并预测已使用的寿命和剩余寿命。其仪器外观及检测界面如图 7 所示。

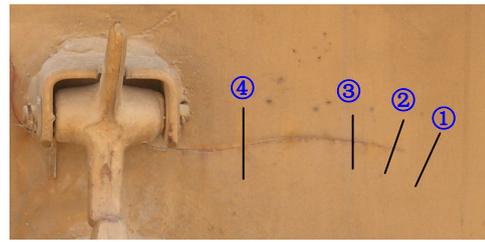
5 金属磁记忆技术寿命评估的应用实例

金属磁记忆方法创立之初，定位于该技术能够发现铁磁材料应力集中部位。由于应力集中和损伤程度（如应力应变状态、缺陷萌生、扩展等）密切相关，为促进金属磁记忆技术与寿命预测方法的融合，国内外研究者不断探索磁记忆信号与损伤程度的对应关系。波兰 Silesian University of Technology 的 Maciej Roskosz 学者应用金属磁记忆技术评价齿轮的蠕变损伤，认为齿轮磁记忆信号幅值和载荷水平、分布及加载次数有关，并提出一个判别是否存在损伤的诊断标准^[30]；英国 University of Huddersfield 的 John Wilson 等学者利用金属磁记忆技术进行应力测量，认为磁记忆信号可以表征残余应力、工作应力以及裂纹类缺陷。

作者采用金属磁记忆技术检测了大量再制造毛坯件，如民用汽车发动机的关键零部件、曲轴、连杆、缸体、缸盖、气门等，以及车辆车体、发动机的关键部件等，开展了前期工程应用探索。以车体疲劳裂纹的磁记忆检测结果为例进行介绍。

在车辆行驶过程中，路面的起伏颠簸会通过履带等传导至车体。受到不均匀的交变载荷作用，车体表面存在应力集中的薄弱部位将萌生疲劳裂纹，随着服役时间延长，裂纹扩展，对坦克的安全运行和发挥作战性能造成极大威胁。图 8 所示为车体表面应力集中部位萌生疲劳裂纹，沿疲劳裂纹扩展方向布置 4 条检测线及 $H_p(x)$ 信号的检测结果。

裂纹扩展到达的部位，检测线 $H_p(x)$ 信号中均显示尖峰，在疲劳裂纹萌生的根部， $H_p(x)$ 信号呈现尖锐峰值；越靠近裂纹前沿，峰值越低；在疲劳裂纹未到达的部位尖峰消失。 $H_p(x)$ 信号峰值作为特征参量，表征了疲劳裂纹扩展的程度。将采集的扫描区域的 $H_p(x)$ 检测信号输入 RM-1 型金属磁记忆寿命评估仪中，分析检测的尖峰值，寿命评估软件即可预测车体不同位置的损伤状态，给出车体的剩余寿命。



(a) 检测线布置

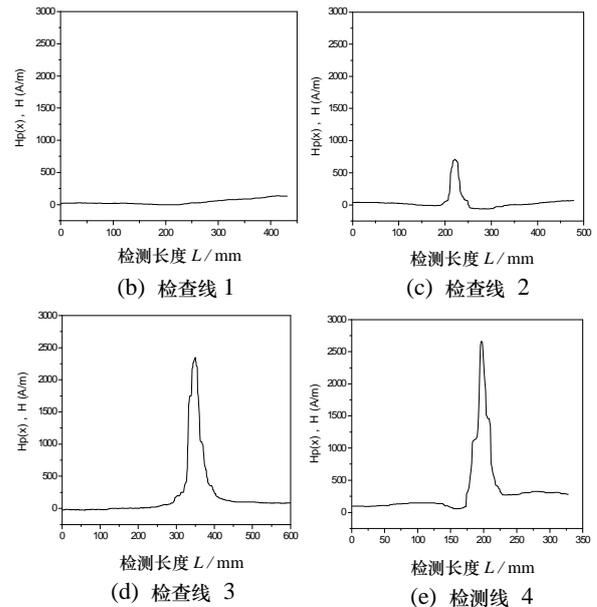


图 8 车体不同检测位置 $H_p(x)$ 信号分布特征

Fig.8 Distributions of $H_p(x)$ signals on the different positions of tank body

6 结论

作为一项新兴的无损检测技术，金属磁记忆检测技术受到国内外无损检测界的关注。金属磁记忆技术在再制造毛坯寿命评估领域的研究刚刚起步，建立完善的特定再制造毛坯部件的剩余寿命预测模型还需要较长的发展时间，这一目标的达成依赖于对金属磁记忆现象内在物理机制的新的认识，通过采集某一再制造毛坯样本数据，提取能够表征其损伤的特征参量，以此作为桥梁，使理论模型和实际构件能够有机的结合在一起。

参考文献:

- [1] 徐滨士, 刘世参, 李仁涵, 等. 废旧机电产品资源化的基本途径及发展前景研究 [J]. 中国表面工程. 2004, 17(2): 1-6
- [2] Xu Binshi, Zhang Wei, Liu Shican. Remanufacturing technology for the 21st century [C]. Proceedings of

- the 15th European Maintenance conference, March, 2000 in Gothenburg, Sweden: 335-339.
- [3] 徐滨士. 发展再制造工程, 促进循环经济建设 [J]. 中国设备工程, 2005, (40): 7-9.
- [4] 徐滨士, 等. 装备再制造工程的理论与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [5] 徐滨士等. 再制造与循环经济 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [6] Suresh S, 王中光, 等译. 材料的疲劳 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [7] Ibsø J B, Agerskov H. An analytical model for fatigue life prediction based on fracture mechanics and crack closure [J]. J. Construct. Steel Res. 1996, 37(3): 229-261.
- [8] Liu K C, Wang J A. An energy method for predicting fatigue life crack orientation and crack growth under multiaxial loading conditions [J]. International Journal of Fatigue. 2001, 23(s1): 129-134.
- [9] 李家伟, 陈积懋. 无损检测手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [10] Jack Spanner, Greg Selby. Sizing stress corrosion cracking in natural gas pipelines using phased array ultrasound [J]. NDE Engineering, 2002, 22: 68-71.
- [11] Doubov A A. A study of metal properties using the method of magnetic memory [J]. Metal Science and Heat Treatment, 1997, 39 (9-10): 401-402.
- [12] Doubov A A. Screening of weld quality using the magnetic metal memory effect [J]. Welding in the World, 1998, 41: 196-198.
- [13] 杜波夫. 按应力集中区漏磁场梯度确定金属极限状态的方法 [C]. 全国无损检测大会论文, 江苏苏州, 2003.
- [14] Doubov A A. A technique for monitoring the bends of boiler and steam-line tubes using the magnetic memory of metal [J]. Thermal Engineering, 2001, 48(4): 289-295.
- [15] Doubov A A. Express method of quality control of a spot resistance welding with usage of metal magnetic memory [J]. Welding in the World, 2002, 46: 317-320.
- [16] Huang Songling, Li Lumimng, Shi Keren, et al. Magnetic field properties caused by stress concentration [J]. J. Cent. South. Univ. Technol, 2004, 11(1): 23-26.
- [17] 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.
- [18] Li Lumimng, Huang Songling, Wang Xiaofeng, et al. Stress induced magnetic field abnormality [J]. Trans. Nonferrous. Met. Soc. China, 2003, 13(1): 6-9.
- [19] 董丽虹. 面向再制造铁磁材料寿命预测的金属磁记忆技术基础研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2008.
- [20] Dong L H, Xu B S, Dong S Y, et al. Monitoring fatigue crack propagation of ferromagnetic materials with spontaneous abnormal magnetic signals [J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30: 1599-1605.
- [21] 王丹. 再制造毛坯剩余寿命评估的新型金属磁记忆检测方法 with 仪器 [D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2008.
-
- 作者地址: 北京市丰台区区长辛店杜家坎 21 号 100072
Tel: (010) 66718540
E-mail: lihong.dong@126.com
- *****
- (上接第 105 页)
- [7] Papargyris D A. Comparison of the mechanical and physical properties of a carbon fibre epoxy composite manufactured by resin transfer moulding using conventional and microwave heating [J]. Composite Science and Technology. 2008(68): 1854-1861.
- [8] Thostenson E F, Chou T W. Microwave and conventional curing of thick-section thermoset composite laminates: Experiment and simulation [J]. Polymer Composites, 2001, 22(2): 197-212.
- [9] 秦岩, 黄舟太, 杨国瑞, 等. 不饱和聚酯树脂微波固化特性研究 [J]. 热固性树脂, 2006, 21(6): 14-17.
- [10] 刘学清, 王源生. 微波固化环氧树脂(E44/DDM)的热性能及膨胀系数 [J]. 高分子材料科学与工程, 2004, (20)4: 111-113.
- [11] 陈名华, 姚武文, 王新坤, 等. 微波固化碳纤维/环氧树脂胶的研究 [J]. 粘接, 2005, 26(6): 13-15.
- [12] 罗文琳, 许陆文, 徐鹿麟. 金属结构损伤复合材料微波修复的实验研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(6): 736-740.
-
- 作者地址: 北京丰台区杜家坎 21 号 100072
表面工程研究所
Tel: (010)66719224
E-mail: mashining@263.net