

紧固件裂纹无损检测技术

■ 河南航天精工制造有限公司 (河南信阳 464000) 张玲玲 李常业 李祥军 简东平 刘霖

摘要：基于现有的紧固件裂纹检测方法，从小波分析和电磁脉冲无损检测两个方面进行研究，总结了现有裂纹检测技术的现状、优点和不足，以及研究热点和发展方向。

关键词：紧固件；裂纹；小波分析；电磁检测；磁记忆；无损检测

紧固件目前广泛应用于机械、建筑、桥梁和采油等工程领域。作为大型结构件的基本单元，许多紧固件在工作中会出现裂纹、腐蚀、凹坑以及人为损伤等缺陷，而裂纹缺陷所占的比重和危害性都非常大，严重威胁着现有结构和机构的安全性和可靠性。

裂纹检测是对机械结构进行检测与评估，以确定其是否有裂纹存在，进而判断裂纹的位置和程度。随着近现代机械制造、电子技术和计算机技术的迅猛发展，无损检测技术得到了很大的发展，裂纹检测技术也随之得到迅速发展。本文首先介绍传统裂纹检测方法，在此基础上，总结了现代的基于小波分析和电磁（涡流）脉冲的无损检测方法，并指出紧固件裂纹检测方法发展的热点和方向。

1. 传统的裂纹检测方法

传统的裂纹检测方法有很多，可分为常规检测和非常规检测两大类。常规检测方法有涡流

检测、渗透检测、磁粉检测、射线检测和超声波检测；非常规检测方法有声发射、红外检测和激光全息检测。

(1) 常规检测方法 目前，机械、建筑和采油等工程领域一般简单的裂纹检测都采用常规检测方法。针对不同的机构采用的检测方法不同，例如，超声检测主要应用于对金属板材、管材和棒材，铸件、锻件和焊缝以及桥梁、房屋建筑等混凝土构建的检测；射线检测主要用于机械、兵器、造船、电子、航空航天、石油化工等领域中的铸件、焊缝等的检测；磁粉检测主要应用于金属铸件、锻件和焊缝的检测；磁粉检测主要应用于金属铸件、锻件和焊缝的检测；渗透检测主要应用于有色金属和黑色金属材料的铸件、锻件、焊接件、粉末冶金件以及陶瓷、塑料和玻璃制品的检测；涡流检测主要应用于导电管材、棒材、线材的探伤和材料分选。针对紧固件的裂纹检测，可以采用超声检测和涡流检

测。例如，在紧固件小裂纹最佳涡流检测参数试验研究中，得到了小裂纹涡流检测参数与相位信号呈线性关系的最佳检测参数区段，这对提高棒料小裂纹检测精度和外置式紧固件涡流检测参数的选择具有重要的指导作用。但涡流检测干扰因素较多，需要特殊的信号处理技术。另外还有兰姆波（Lamb wave）传播能量谱结构裂纹检测方法，具有穿透能力强、灵敏度高、快捷方便的特点，但是有时会产生盲区，发生阻塞现象，不能发现近距离裂纹，对所发现的缺陷作定性、定量表征比较困难。针对紧固件大部分都采用磁粉检测和荧光探伤方法检测，相对检测效率较高，但是消耗人力、物力大，损害人的身体健康，同时由于受人为因素影响，经常会出现漏检现象。

(2) 非常规检测方法 当对紧固件进行裂纹检测时，若常规检测方法达不到所要求的目的，可以考虑用非常规检测方法。下面列举三种常用的非常规裂纹检

测方法。

1) 声发射技术。该技术在承压设备裂纹检测方面最为成熟,在压力容器、承压管道的安全评定中已取得较为理想的效果,在航天航空、复合材料等裂纹检测方面也得到大力发展。对于旋转机械裂纹诊断,主要在旋转轴、齿轮疲劳裂纹及轴承裂纹检测等方面有一定程度的发展。声发射的优点在于它是一种动态检测方法,声发射探测到的能量来自被测试物体本身,而不是像超声或射线探伤那样由无损检测仪器提供。声发射检测对缺陷很敏感,能够整体探测和评价结构中的活性缺陷状态。缺点是检测受材料影响很大;检测室受电噪声和机械噪声的影响;定位精度不高,对裂纹的识别只能给出有限的信息。

2) 红外检测。主要应用于电力设备、石化设备、机械加工过程检测、火灾检测、农作物优种以及材料与构件中的缺陷无损检测。红外无损检测技术的优点在于它是非接触式的检测技术,远距离空间分辨率高,安全可靠对人体无害,灵敏度高,检测范围广、速度快,对被测物体没有任何影响。红外检测的缺点是由于检测灵敏度与热辐射率相关,因此受试件表面及背景辐射的干扰,受缺陷大小、埋藏深度的影响,对原试件分辨率差,不能精确测定缺陷的形状、大小和位置,检测结果的解释比较复杂,需要有参考标准,检测操作人员需要经过培训等。

3) 激光全息检测。主要用于蜂窝结构、复合材料检测,固

体火箭发动机的外壳、绝热层、包覆层及推进剂药柱各界面之间缺陷检测,印制电路板焊点质量检测以及压力容器疲劳裂纹检测等。它的优点是检测方便,灵敏度很高,对被测对象没有特殊要求,并能对缺陷进行定量分析。缺点是对于埋藏较深的脱粘缺陷,只有在脱粘面积相当大时才能够被检测出来。另外,激光全息检测多在暗室进行,并需要采取严格的隔振措施,因此不利于现场检测,具有一定的局限性。

2. 现代裂纹检测新技术

随着科学技术的迅速发展,机械、建筑和采油等工程领域对裂纹检测的要求也越来越高,因此出现了很多裂纹检测新技术。基于信号处理的裂纹检测方法和电磁(涡流)脉冲无损检测是现代常用的新技术。

(1) 基于小波分析的裂纹检测方法 随着信号处理技术的发展,出现了基于信号处理的裂纹检测方法,包括时间域、频率域及时频域方法,主要有傅里叶变换、短时傅里叶变换、Wigner-Ville分布、希尔伯特-黄变换(HHT)、盲源分离等。其中小波分析的方法最具有代表性。直接利用小波分析的裂纹识别方法可以分为以下两种:

1) 基于时域响应的分析方法。包括利用时域分解图的奇异点的方法、利用小波系数变化的方法和利用小波分解后能量变化的方法。基于时域响应的分析方法旨在发现裂纹损伤发生的时刻。

2) 基于空间响应的分析方

法。就是用空间位置的空间坐标轴代替时域响应信号的时间轴,以空间域响应作为输入进行小波分析。基于空间域响应分析方法可以确定发生裂纹的位置。小波方法本身只能进行损伤发生时刻或损伤发生位置的判断,且前者的应用更多一些。若想识别小裂纹,则需要将小波与其他方法结合对裂纹进行检测。

(2) 电磁(涡流)脉冲无损检测 电磁技术结合超声检测、涡流成像、阵列涡流和脉冲涡流检测等诸多功能,形成了现代电磁检测新技术。其中常见的裂纹检测技术有脉冲涡流检测、脉冲涡流热成像技术、脉冲涡流和电磁声换能器(EMAT)双探头无损检测以及金属磁记忆检测技术。

脉冲涡流用一个脉冲电流来激励线圈,对检测探头感应的时域瞬态响应信号进行分析,选用信号的峰值、过零时间和峰值时间来对裂纹进行定量检测。国防科技大学杨宾峰等用实验证明脉冲涡流只需一次扫描就可对被测试件上不同深度的裂纹实现定量检测;有研究人员利用谐波线圈的替代技术进行脉冲涡流检测,以自身电场对导体内部总电场的贡献的电偶极子形式的改变高于磁场传感器所测导体上的改变,找到裂纹区电偶极子的分布密度来检测裂纹。

脉冲涡流的缺点是脉冲涡流信号的峰值极易受到其他因素的影响(如提离效应),还有脉冲涡流探头的检测能力都会影响裂纹的检测。

脉冲涡流成像仪器都采用线圈作为检查传感器。有人用霍尔传感器作为检查传感器。近年来超量子干涉仪器开始应用到无损检测领域。利用脉冲涡流热成像技术消除了其他检测中的提离效应,避免成像结果产生失真。

有研究人员用类似高斯光束形状的YNG激光射入金属板材表面,利用脉冲涡流和电磁声换能器检测技术,通过超声波波形的突然变化或激光照射裂纹时波形中频率成分的突然增加来识别裂纹。

3. 裂纹研究的热点

目前对紧固件裂纹检测的研究还仅停留在传统检测方法上,为了使检测技术得到发展并解决实际应用问题,现在裂纹损伤识别的热点主要集中在以下两个方面:一是考虑不确定性影响的统计识别方法,二是紧固件微裂纹的识别。

裂纹损伤检测会有很多不确定性,因此提出采用统计推断方法处理系统识别问题。随着损伤识别研究的飞速发展,基于概率统计理论的损伤识别方法的研究不断深入。当前该方法的主要研究应用领域为系统辨识和模式识别。

现在已经有了检测紧固件微裂纹的方法,例如基于ICT技术的微裂纹检测、基于激光辅助加热的激光超声投捕法识别微裂纹,但是都有其局限性。例如,基于ICT技术的微裂纹检测的局限性在于采集图像中的灰度值与背景灰度值差别要求大,若灰度值与背景灰度值差别不大,则

细节较难区分,因此影响图像质量,造成图像采集难度大,同时对图像后处理也提出了更高的要求。而且再用VG Studio MAX软件对微裂纹进行提取时,要提取包含全部微裂纹空间范围,这具有不确定性。基于激光辅助加热的激光超声投捕法,识别微裂纹的局限性在于操作比较复杂,不能在恶劣的环境下检测,所以还有待发展。

随着社会经济的不断发展,对紧固件裂纹的检测手段要求也越来越高,它必须符合实时在线检测、灵敏度高、操作简单以及不易受外界干扰等要求,能够在恶劣的外部环境中工作;迅速地检测到裂纹的位置、大小、宽度、深度和发展趋势等;检测结果可以图像方式显示,可以进行分析;集检测速度快、效率高、结果直观于一体。

4. 结语

对紧固件裂纹损伤识别虽然已经开展了很多研究工作,但是目前的损伤识别方法或指标仅局限于传统检测方法,考虑到检测设备的成本、使用环境以及人为因素等,对于紧固件的多裂纹和微裂纹检测是当今研究的热点,要做到快速定位、精确定量,提高检测精度和可靠性,实现对裂纹又好又快的检测,这些都是紧固件裂纹检测的发展方向。

参考文献:

[1] 孙红春,夏永发,崔雨. 钢杆小裂纹最佳涡流检测参数的实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33 (1): 108-110, 115.

[2] 刘立敬. 浅谈红外检测技术在钢铁行业中的应用[J]. 科技创新与应用, 2012 (14): 32.

[3] Melhem H, Kim H Y. Damage Detection in Concrete by Fourier and Wavelet Analyses [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2003 (5): 571-577.

[4] C.C.Chang, Z.Sun. Structural Damage Assessment Based on Wavelet Packet Transform [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128 (10): 1354-1361.

[5] Hou ZK, Mohammad N. Noori, R. St. Amand. Wavelet-Based Approach for Structural Damage Detection[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000 (7): 677-683.

[6] Wang Q, Wang D J, Su X Y. Crack Detection of Structure for Plane Problem with Spatial Wavelets[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1999 (1): 39-51.

[7] 杨宾峰, 罗飞路, 曹雄恒, 徐小杰. 脉冲涡流无损检测技术在裂纹定量中的应用[J]. 无损检测, 2005 (6): 291-293.

[8] 左宪章, 常东, 钱苏敏, 费骏, 张韬. 脉冲涡流热成像裂纹检测机理仿真分析[J]. 激光与红外, 2012 (9): 998-1003.

[9] 李加, 倪辰荫, 张宏超, 董利明, 沈中华. 基于激光辅助加热的激光超声投捕法识别微裂纹[J]. 中国激光, 2013 (4): 206-212.

MW (收稿日期: 20200212)