金属设备腐蚀无损检测技术研究进展

Research progress of corrosion nondestructive testing technology for metal equipment

李辉1\*，甘肃省特种设备检验检测研究院，兰州，730050.

臧昊良2，国合通用（青岛）测试评价有限公司，山东青岛，266000.

摘要：基于发生在金属内部或金属表面的物理现象，按照不同的分类论述了国内外腐蚀监检测技术，针对不同检测技术和特点做了相应的描述，为生产现场工况，适用性的原则选择合适的监检测技术提供一定的指导。

关键词：腐蚀；无损检测；声学；光学；电磁学

石化工业在世界各国经济发展中都有着举足轻重的作用，石化设备的工作环境通常是易爆、高温、高压、有毒、有害的，因此，腐蚀是石化设备最常见的缺陷。腐蚀的形式多种多样，可以分为均匀腐蚀和局部腐蚀。2010年4月2日，美国特索罗石油公司阿那科特斯炼厂发生重大安全事故，炼厂催化重整装置石脑油预加氢单元中的一台换热器由于高温氢损伤发生灾难性破裂，温度高于260oC的氢与石脑油从破裂的换热器壳体喷出，引发燃烧爆炸，大火持续了整整三个小时，造成7名事发是在现场附近工作的员工死亡；2013年黄岛11.22事故最直接的原因就是输油管道与排水暗渠交汇处管道腐蚀减薄、管道破裂，原油泄漏流入排水暗渠最终发生油气爆炸，直接经济损失人民币75172万元。由此可见，局部腐蚀虽然金属损失总量不大，但是严重的局部腐蚀往往会导致设备的突发性破坏，一旦腐蚀外泄就会造成重大事故，带来巨大的灾难。

无损检测技术主要用于未知工艺缺陷的检验，它是对破坏性检验的补充和完善，用于在不造成损伤的情况下评估材料的性能，所以广泛应用于价格高昂的化工设备腐蚀检测。无损检测包括视觉检测、超声检测、涡流、声发射、射线检测、红外热像仪、渗透检测和磁通[1]，所有这些方法都是基于发生在金属内部或金属表面的物理现象。

1、基于声学的无损检测技术

1.1超声检测

人耳最高只能感觉到大约20000Hz的声波，[频率](http://www.so.com/s?q=%E9%A2%91%E7%8E%87&ie=utf-8&src=internal_wenda_recommend_textn" \t "_blank)更高的声波就是[超声波](http://www.so.com/s?q=%E8%B6%85%E5%A3%B0%E6%B3%A2&ie=utf-8&src=internal_wenda_recommend_textn)，超声波广泛地应用在多种技术中。超声波检测技术已经使用了约50年，利用2-50MZ高频声波进行检测，通过金属传输传播声音从其它表面反射，测量设备的壁厚来监测腐蚀。检测设备通常是便携式的或固定的，测量厚度为1-300mm[2]。

超声波检测固体耦合探头的最高工作温度为250oC，但在某些情况下，最高工作温度可达350 oC，目前正在开发新的探头来测量最高工作温度500 oC[3]。能源公司通用电气(GE)开发了两种用于在线壁厚监测的超声波检测传感器类型：低温“Rightrax Flex 120oC”(−40 oC至120 oC)和高温“Rightrax HT 350 oC”(−20 oC至350/500°C)。这些传感器可以测3-19mm的金属厚度，所开发的系统具有以下功能的数据采集和数据分析软件：温度校正、最小/最大/平均厚度值、厚度报警、短期、长期和最大腐蚀速率，超声波传感器可自我校准的，传感器获得的数据与温度、压力、流速、pH值和防腐蚀化学注入等过程变量集成在一起，可以在线接收腐蚀数据，操作安全，使用简单。

超声检测厚度测量仪器通常对于厚度大于33mm管道、均匀腐蚀的情况下测量最准确。对于直径为33毫米或更小的管道，首选射线成像剖面技术；当腐蚀是不均匀的，射线照相、超声波扫描和涡流装置选用较多，每一种无损检测技术在准确性方面都有实际的限制。

1.2声发射检测

通过接收和分析材料的声发射信号来评定材料性能或结构完整性的无损检测方法。声发射是材料中因裂缝扩展、塑性变形或相变等引起应变能快速释放而产生的瞬态弹性波现象[4]。换句话说，声发射是由内部结构变化引起的材料突然内部应力重新分配产生的应力波。结构受到外部刺激（压力、负载或温度变化）时，局部源会以应力波的形式触发能量释放，压力波会传播到表面并由传感器记录。声发射在两个方面不同于大多数其他无损检测技术，第一个区别与信号的原点有关，声发射技术不是向被检查的对象提供能量，而是只听被检物体释放的能量；第二个区别是声发射技术处理材料中的动态过程或变化，突出显示材料活动特征，例如裂纹或点蚀扩展[4]。

不同材料的声发射源是独特的。在金属中，主要的宏观来源是裂纹、塑性变形有关的过程、破裂和夹杂物剥离。在微观层面上，当塑性变形发生时，原子平面通过位错的运动相互滑动，原子尺度变形以弹性波的形式释放能量，可以认为是自然产生的超声波在物体中传播[5]。当金属中存在裂纹时，裂纹尖端前面的应力水平可能比周围区域高几倍，不同性质来源产生的声发射波的定量和定性取决于物质特性和环境因素。

自20世纪90年代以来，声发射作为一种无损检测手段，用于检测不同设备和结构的局部腐蚀。声发射测试可在现场使用便携式仪器或在固定实验室环境中进行。通常，系统包含传感器、前置放大器、滤波器和放大器以及测量、显示和存储设备（例如示波器、伏安表、电脑）。声发射用于检测和监测一般腐蚀、点蚀、裂缝腐蚀、应力腐蚀开裂、氯化物腐蚀开裂和氢损伤，用于检测压力容器和管道中的腐蚀或除垢器；检测液化石油气压力容器焊接接头的缺陷和变化；诊断核电和石化发电厂以及化学和精炼反应堆的高能耗设备和管道运行状况；声发射和热重力技术的耦合用于高温降解，并接收炼油和石化工业中合金鳞片和机械应力增长的信息；声发射用于检测涂层在测试过程中失效和温度对涂层保护性能的影响[6]。

1.3声脉冲反射技术

声脉冲反射法是一种将宽频声脉冲射入管中，由传声器记录管横截面变化所产生的反射的技术。这种方法可以检测管道系统中的任何故障：坑、孔、壁减薄和沉积物[7]。

1.4声学振动调制技术

声学振动调制技术是基于超声与缺陷存在时的振动的非线性相互作用而发展起来的，用于检测腐蚀开裂、腐蚀导致的结构元素分层、各种材料(金属、聚合物和复合材料)中的疲劳裂纹、脱粘和缝隙腐蚀[8]。因为特定的非线性相互作用只发生在接触类型的界面上，这种技术的一个独特的特点是它能够区分裂纹、分层和从缺口、空隙和其他非均匀相中的剥离。

2、基于光学的无损检测技术

2.1射线照相检查

射线检查，使用X射线(由原子核外的电子发射)或伽玛射线(由原子核发射)，可以检测一般和局部腐蚀。闪光射线照相，使用短脉冲X射线，可以检测绝缘下的腐蚀。X射线照相法用于绝缘管道的在线壁厚测量、流动加速腐蚀的检测[9]。

2.2非线性弹性波光谱学技术

非线性弹性波光谱学正在被开发用于检测飞机结构的应力腐蚀损伤[10]。在应力腐蚀损伤的存在下，材料开始在损伤位置周围非线性运动。这种特性在双谐波激励信号频谱中表现为激励频率的边带和谐波，影响的程度和数量与损害的大小有关。

3、基于电、磁学的无损检测技术

3.1红外热成像法

所有物体都发射出红外辐射，辐射量随温度的升高而增加，红外辐射是电磁波谱的一部分波长9-14μm,肉眼不可见,但当用热红外像机观察时，物体在温度较低的背景下很显眼。因此，热成像技术使得在没有可见照明的情况下观察物体成为可能[11]。热成像是一种红外成像技术，红外摄像机探测红外电磁波谱中的辐射，并根据地表温度或温差信息生成地表图像，检测温度偏差，即设备或管道上的热点或冷点，以及不锈钢管道壁厚减薄的检测[12]。红外热像仪用于炼油装置的腐蚀检测，用于监测有机涂层下的水疱和丝状腐蚀[13]。

红外技术的局限性如下：

1. 表面条件(反射、污垢、锈蚀和其他在表面形成的化合物)会影响结果。
2. 天气条件(如大风)会完全掩盖热数据。

3.2涡流检测技术

交流电磁场在导电材料中能够产生涡流。感应涡流反过来产生一个与原电磁场相反的交变电磁场，导致线圈阻抗的变化，并由涡流仪测量。线圈阻抗的变化取决于金属损耗量或缺陷(裂纹和凹坑)的程度[14]。通过对涡流仪的标定，实现了对缺陷的高精度测量。

脉冲涡流是一种非侵入性、非接触的无损检测方法。因此，可应用于炼油厂高达540oC的高温壁厚监测和环烷酸腐蚀监测。脉冲涡流检测技术利用一个重复的宽带脉冲激励线圈，通过线圈中产生的瞬时电流在被检试样上感应出瞬时涡流，在激励电流作用下，线圈中会产生一个快速衰减的脉冲磁场，瞬时涡流与快速衰减的磁脉冲一并在材料中传播，形成一个衰减的感应场，检测线圈则输出一系列电压-时间信号。由于产生的脉冲由一列宽带频谱构成，所以响应的信号包含了重要的深度信息。

3.3电磁法

电磁方法(传感器)用于检测飞机铝合金涂料涂层下的腐蚀(包括材料损耗)和涂层内的水分和管道腐蚀。远程场电磁技术被用于管道和储罐检测的计算机化无损检测。基于洛伦兹力和磁致伸缩等物理效应的电磁声传感器被开发成为检测腐蚀开裂和涂层脱粘的在线检测工具.

3.4磁粉探伤检测

磁粉探伤可以检测铁磁材料中的缺陷。磁力线在磁化的物质中从南到北极。这些线被中断，金属留在缺陷的位置。在这些位置，可以被磁化的化合物如铁粒子(通常用荧光剂)被吸引，铁粒子集中在力的离开线的位置，表明缺陷[15]。

3.5磁感应强度

磁感应是基于铁磁材料的磁感应原理，用于测量铁磁材料上的非磁性层厚度,例如不锈钢、碳钢上的铜或锌镀层厚度。

4、其它物理无损检测

4.1渗透测试

渗透测试是基于一些液体的特性，这些液体含有一种对比色(通常为红色)或荧光化合物，以穿透固体材料中的小缺陷。去除多余的渗透液后，使用显影剂，显影剂是一种带有适当吸收带的白色粉末，缺陷中剩余的渗透剂被吸进显影液中，表明金属、陶瓷和聚合物的失效，裂纹。

4.2现场金相分析

通常的金相检查方法是将大型金属件从建筑上切割下来，以便进行实验室准备和检验，但这种方法通常会使建筑构件不能使用或需要昂贵的维修费用。因此，可以采用现场金相分析。现场金相测试可以查出哪些金属部件实际上已经损坏，必须更换，哪些部件可以安全投入使用。许多发电厂、炼油厂、石化厂和化工厂通常采用现场金相分析。

4.3挂片失重法

挂片失重方法的基础是在工艺流程中插入已知质量和面积的金属试样，浸泡一段时间，从腐蚀产品和其他沉积物中除去、清洗，并称重。根据已知面积和浸渍时间的质量差，计算出这种金属/合金在特定介质中的腐蚀速率。

5结论

容器、管道的腐蚀问题严重影响化工设备的正常使用，新材料的发展可以从根本上提升设备的使用寿命，但还是应当注意设备在使用过程中的腐蚀。所以，化工企业应加强对容器的管理，建立科学完善的评价过程，使用先进检测技术科学探伤，从而避免严重事故的发生。

参考文献：

[1] Stern M, Geary A L. Electrochemical polarization I. A theoretical analysis of the shape of polarization curves[J]. Electrochem Soc. 1957, 104: 56-63.

[2] DEMMA A, CAWLEY P, LOWE M, et al. Roosenbrandthe Reflection of GuidedWaves from Notches in Pipes: a Guide for Interp reting Corrosion Measurements[J]. NDT& E International, 2004, 37 (3):167-180.

[3] Budevski E, Obretenov W, Bostanov W, etal. Noise analysis in metal deposition-expectations and limits[J]. Electrochimica Acta,1989, 34 (8): 1023-1029.

[4]徐江，武新军.国外油管在线无损检测技术的研究与应用现状[J]. 石油机械, 2006, 34 (5): 81-84.

[5]多晶硅生产中典型换热器防腐技术研究[D].西宁：青海大学，2016.

[6]王志坤，张昕.重整装置预加氢反应产物换热器腐蚀原因分析[J]. 石油和化工设备, 2004，26 (6): 225-227.

[7] Amir, N., Barzelay, O., Yefet, A., and Pechter, T. (2008). Condenser tube examination using acoustic pulse reflectometry. In: Proceedings of POWER2008, ASME Power 2008, Orlando, FL (22–24 July 2008), 5.

[8] Sheppard, K., Zagrai, A., and Donskoy, D. (2007). A non‐linear acoustic, vibro‐modulation, technique for the detection and monitoring of contact‐type defects, including those associated with corrosion. *Corrosion Reviews,* 25 (1–2): 81–96.

[9] DL/T 709-1999.压力钢管安全检测技术规程[M].北京:中国电力出版社,2000:6.

[10] Meo, M., Zumpano, G., and Polimeno, U. (2007). Corrosion identification on an aluminium plate‐like structure by monitoring the wave propagation phenomena. Corrosion Reviews 25 (1–2): 213–232.

[11]沈功田，李涛，姚泽华.高温压力管道红外热成像检测技术[J].无损检测, 2002，24 (11)：15-19．

[12]沈功田，张万岭.压力容器无损检测-红外热成像检测技术[J].无损检测, 2004, 20 (10)：35--40．

[13]马永明. 红外热成像早期检测带压设备保温层下腐蚀泄漏隐患[J].山东化工, 2019, 48 (02): 93- 94．

[14]石坤，林树青，沈功田，范智勇.设备腐蚀状况的脉冲涡流检测技术.无损检测.2007, 29 (8)：434-436.

[15]徐学军，仝佳平，李长江.金属设备腐蚀监检测技术现状与发展. 全面腐蚀控制，2014, 28 (12): 33-36.