



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20190299

基于施压过程计时的非金属基体涂层 质量无损检测

马岩, 陈建平, 梁湘鹏, 闫传滨
(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 研发一种新型的非金属基体表面涂层质量无损检测方法——压力测定计时法,用于解决基体为玻璃、陶瓷等高硬度非金属基体,涂层为橡胶、防污闪复合涂料(PRTV)等低硬度非金属材料表面涂层质量检测问题。当设备基体与涂层硬度有明显的差异时,用相同的接近速度对涂层表面垂直施压,并设定确定的压力区间。涂层厚度不同,致使压力从起始值到终止值所用的时间不同,以此来判断涂层厚度及涂层涂布均匀程度等质量指标。实验结果表明,通过调低进给速度来提高测量精度,可测出涂层0.1 mm的厚度差别。

关键词: 压力测定计时法; 无损检测; 涂层质量; 非金属基体

中图分类号: TU453 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2021)02-0036-04

Non-destructive Quality Test of Nonmetal Substrate Coating Based on Pressure Process Timing

MA Yan, CHEN Jianping, LIANG Xiangpeng, YAN Chuanbin

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: A new non-destructive method to test the quality of non-metal substrate surface coating was developed, called "Pressure Measurement Timing Method". It can be used to test the quality of low-hardness non-metal surface coating like rubber and PRTV, with high-hardness non-metal materials as the substrate, such as glass and ceramics. The same approaching speed was adopted to press the coating surface vertically and set a certain pressure range when there was obvious difference between the equipment substrate and the coating in hardness. Different coating thickness needs different time of pressure from initial value to termination value, so as to decide some quality indexes such as coating thickness and coating uniformity. Experimental results indicate that after improving the measurement accuracy by adjusting the feed speed, it is possible to measure coating thickness of only 0.1 mm difference.

Key words: pressure measurement timing method; non-destructive test; coating quality; non-metal substrate

防污闪复合涂料(PRTV)是一种新型电气功能材料,专为电网及各输、发、用电用户彻底消除污闪隐患而设计,用于提高输电线路绝缘子、变电设备及其他电气设备的绝缘性能及使用性能^[1-2]。PRTV材料的喷涂厚度要达到0.3~0.8 mm^[3],且涂层应完整、无缺损、无滴流挂丝现象,以确保PRTV材料的绝缘防污、预防闪络性能。因此,在PRTV材料喷涂完成后,要先对绝缘子等电气设备的涂层质量进行检测,再投

入使用。在工作一段时间后,也需对涂层进行检测,发现有破损情况时需及时补涂修复。

目前,国内外涂层质量检测方法主要有无损检测和有损检测两类方法。有损检测主要有探针法、点滴法、液流法、轮廓法等方法,这些检测方法精度低,检测周期长,安全性差,且对涂层有较大的破坏性,破坏涂层性能及完整性^[4]。无损检测方法主要有射线检测法、涡流检测法、磁粉检测法、超声检测法、热像法

收稿日期: 2019-12-07; 修回日期: 2020-04-02

作者简介: 马岩(1992—),男,山东人,硕士研究生; 通信作者: 陈建平,教授, chjp@tust.edu.cn

等^[5-9],这些方法检测涂层质量时受检测环境影响较大,对厚度较小的涂层及有些涂层材料和基体难以检测.磁粉检测法只能用于铁磁性材料的涂层检测,涡流检测法只适用于电导性材料的涂层检测^[10].

以上所述无损检测方法,主要是针对金属基体涂层的质量检测.对于绝缘子这样基体为非金属基体材料的表面涂层的质量检测,主要运用探针检测法对涂层质量进行检测,这样会破坏涂层完整性,影响绝缘子使用性能和安全性能.对于绝缘子涂层检测的无损检测技术,目前国内主要有图像处理法^[11]和敲击测声法^[4]两种检测方法,此两种方法容易受外部环境的影响,对检测环境的要求严格.

本文提出一种非金属基体表面涂层质量无损检测方法——压力测定计时法,通过检测压力区间内压力从起始值到达终止值所用的时间,判定涂层厚度大小,从而判定涂层质量是否合格.在检测涂层有无缺陷的同时,还能够对涂层厚度作定量分析.

1 压力测定计时法检测原理

彼此接触的两个物体,相互挤压时会产生抵抗彼此变形的反力,即压应力.当二者以一定相对速度持续挤压时,两者间的压应力随时间逐渐增大.当高硬度测头向具有黏弹性特征的低硬度聚合材料涂层持续垂直进给施压时,材料的力学响应与时间有着密切的关系,二者间的压力不断加大.当涂层材质与基体材质(陶瓷或玻璃)存在较大的硬度差时,该时间-压力变化关系可认为是低硬度的聚合材料涂层的受压形变响应规律.用恒定的进给速度对涂层表面进行施压,对于不同的涂层厚度,从设定的压力起始值到终止值所用的时间也不相同.表面涂层越厚,该施压时间越长;表面涂层越薄,该施压时间越短.可根据该时间的差别测定涂层厚度差别.

基于以上原理,提出一种高硬度非金属基体表面涂层质量的检测方法——压力测定计时法.可根据不同硬度的涂层材料设定相应压力区间,设计制造适应被测表面形貌的施压装置,采用恒定的进给速度,对被测涂层表面某一待检位置垂直施压,压力传感器检测压力值的变化.编制专用检测软件记录施压过程中压力从起始值到达终止值所用的时间,根据所用时长来判定涂层厚度大小.对于同一被测表面,可选取多个位置进行多次检测,以此检验整个被测表面涂层均匀度质量指标是否合格.涂层厚度与时间的关系可表达为

$$H = TW \quad (1)$$

式中: H 为涂层厚度,mm; T 为施压过程中从起始压力到终止压力所用的时间,ms; W 为转换系数,mm/ms.

2 绝缘子 PRTV 复合涂层质量检测装置

被测件输电线路绝缘子实际结构如图 1 所示.由图 1 可以看出,被检测绝缘子外表面较光滑,内表面为圆环状,内外表面形状差异较大,且绝缘子内表面不平整,检测难度较大.若要检测整个绝缘子表面涂层质量,需设计不同检测装置对内外表面分别进行检测.因此,设计以下两种检测装置对绝缘子内外表面涂层质量进行检测.



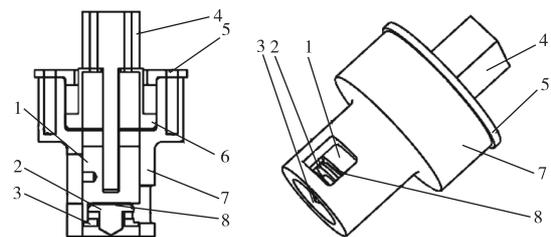
(a) 外表面 (b) 内表面

图 1 被测试样实物图

Fig. 1 Physical figure of tested sample

2.1 绝缘子外表面涂层检测装置

绝缘子外表面涂层质量检测装置如图 2 所示.



(a) 内部结构图 (b) 外部整体结构图

1. 底座; 2. 陶瓷测量端子; 3. 圆环; 4. 丝杠螺母电机; 5. 端盖; 6. 电机安装座; 7. 电胶木质外壳; 8. 薄膜压力力敏传感器

图 2 绝缘子外表面涂层质量检测装置

Fig. 2 Insulator outer surface coating quality detecting device

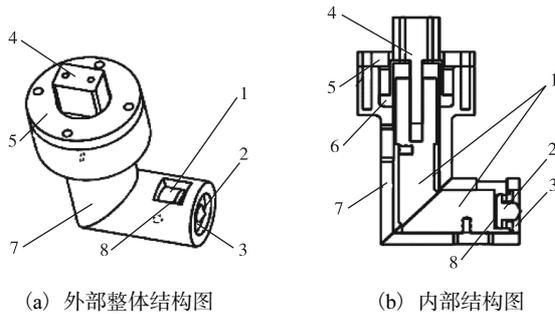
该装置中,丝杠螺母电机驱动由底座和陶瓷测量端子组成的下压装置实现对被测表面施加压力的功能.圆环安装在陶瓷测量端子的下端,且与电机轴和陶瓷测量端子同轴,防止陶瓷测量端子晃动,减小检

测时误差对测量精度的影响. 整套装置材料选用绝缘材料, 以增强工程现场带电检测过程中的安全性, 防止漏电、触电事故的发生.

测量时, 装置下端贴近被测表面, 丝杠电机驱动底座向下移动, 下压被测表面, 实现对绝缘子外表面的检测.

2.2 绝缘子内表面涂层检测装置

实际输电线路中绝缘子排列紧密, 两绝缘子之间空间有限, 且绝缘子内表面为沟槽结构, 因此设计专用检测装置对绝缘子内表面的涂层质量进行检测. 绝缘子内表面涂层质量检测装置如图 3 所示. 与外表面涂层质量检测装置相比, 内表面涂层质量检测装置的直线运动输出端与输入端成 90°, 即丝杠螺母电机丝杆的输出方向与陶瓷测量端子的运动方向垂直, 从而保证陶瓷测量端子能够接触到绝缘子内表面的凹槽部分, 完成对绝缘子内表面涂层质量的检测.



1. 底座; 2. 陶瓷测量端子; 3. 圆环; 4. 丝杠螺母电机; 5. 端盖; 6. 电机安装座; 7. 电胶木质外壳; 8. 薄膜压力力敏传感器

图 3 绝缘子内表面涂层质量检测装置

Fig. 3 Insulator inner surface coating quality detecting device

3 测试数据采集与分析

3.1 压力测定计时法检测流程

绝缘子涂层质量检测流程如图 4 所示. 检测前, 设定压力起始值和终止值及进给速度. 检测时, 采用专用五自由度机械臂等移动设备将检测装置的外壳的下环端面与被测表面接触. 要求未接触部分缝隙不大于 0.2 mm, 以避免装置对被测表面的垂直度误差过大而影响测量精度. 可靠接触后检测装置的丝杠螺母电机正转, 驱动底座及陶瓷测量端子匀速下压被测表面. 检测数据经数据采集卡将数据收集并传输到 PC 端的数据处理软件中. 开始检测后, 压力到达设定压力区间的起始值时, 数据处理软件开始计时并收集数据, 当压力值到达设定压力区间终止值时, 数据处理软件停止计时, 并停止数据的收集. 该次测

量由起始压力值至终止压力值的时间可反映涂层厚度. 经专用数据处理软件的分析处理, 找出压力区间内, 涂层表面施压时间与涂层厚度的对应关系. 厚度越大, 该时间越长, 二者基本呈线性关系. 针对厚度较小和硬度较高的涂层, 可设置和调整较低的进给速度, 延长记值时间, 提高测量精度. 实验表明, 该装置可测出涂层 0.1 mm 的厚度差别. 对同一表面的同一个点进行多次测量, 取平均值, 可消除测量时随机误差带来的影响. 可对同一表面选取多点检测, 即检测该涂层表面的涂层均匀度质量情况. 根据涂层质量要求, 对涂层质量进行量化分析, 制定相应的涂层质量检测规范, 判定涂层厚度和均匀度. 图 5 为检测装置施压过程示意图.

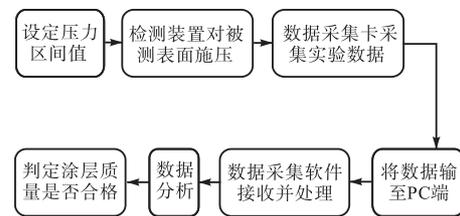


图 4 压力测定计时法检测流程

Fig. 4 Detection process of pressure chronometry method

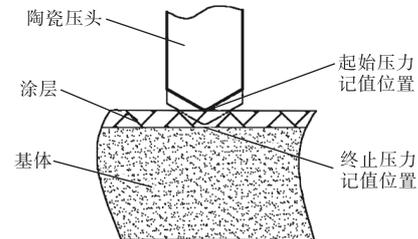


图 5 检测装置施压过程示意图

Fig. 5 Schema of the pressing process of the detecting device

3.2 测试数据分析与处理

在软件界面上显示的实验数据处理结果如图 6 所示, 压力区间值经数据采集卡转换, 将压力值信号转换为电压信号, 取值范围为 0~5 V. 图中各数据参数表示如下: X 代表开始显示波形时的压力值, 即计时起始压力; Y 代表压力值到达 Y 值时波形锁定, 电机开始反转, 即计时终止压力; T 代表延时 T 毫秒后电机停止; U 、 M 代表采集的时间值超过 U 或者低于 M 显示为不合格; Q 代表压力区间值; W 代表时间值乘以转换系数 W 可以得到厚度值; Z 代表压力值低于 Z 值电机停止.

对被测表面涂层几乎无涂层处、薄涂层处、厚涂层处分别进行多次检测, 并对检测数据进一步处理分析, 所得到的几乎无涂层处、薄涂层处、厚涂层处压

力从起始值到达终止值所用的时间分别为 200 ~ 367 ms、822 ~ 1 155 ms、1 358 ~ 1 528 ms. 表 1 所示为几乎无涂层处、薄涂层处、厚涂层处检测结果.

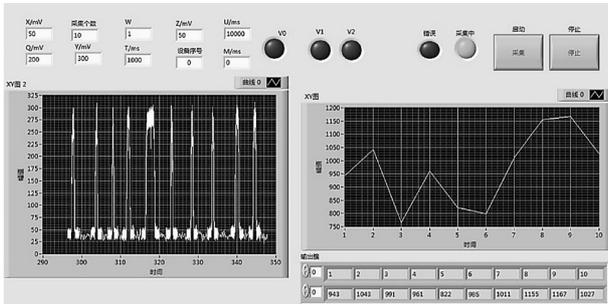


图 6 数据处理软件界面

Fig. 6 Software interface of data processing

表 1 涂层厚度检测数据统计

Tab. 1 Statistics of coating thickness detection

检测次数	时间/ms		
	几乎无涂层	薄涂层	厚涂层
1	223	694	1 613
2	367	638	1 584
3	244	652	1 532
4	268	597	1 567
5	253	642	1 602
6	247	628	1 660
7	275	631	1 574
8	226	585	1 624
9	200	632	1 637
10	229	618	1 591

运用压力测定计时法对被测表面几乎无涂层处、薄涂层处及厚涂层处进行检测实验. 采用有损针刺法测得涂层厚度作为实际厚度, 选择涂层实际厚度为 0.1 mm 的位置作为几乎无涂层处的测量点, 选择实际厚度为 0.3 mm 和 0.8 mm 的位置分别为薄涂层处和厚涂层处的测量点. 由表 1 数据可以看出, 不同厚度的涂层之间所对应的压力起始值和终止值之间的施压时间有明显差别, 可根据时间差异有效分辨出涂层厚度差异情况.

根据表 1 的实验数据, 运用压力测定计时法测得的涂层厚度的实验值见表 2.

表 2 涂层厚度值对比分析

Tab. 2 Comparative analysis of coating thickness values

涂层情况	涂层厚度/mm	
	实际值	实验值
几乎无涂层	0.1	0.123
薄涂层	0.3	0.315
厚涂层	0.8	0.799

从表 2 可以看出, 通过实验测得的涂层厚度值与

通过有损针刺法测得的涂层实际厚度值相近. 因此, 该方法可以用于绝缘子涂层质量的无损检测, 并且可以对涂层厚度相差 0.1 mm 的涂层进行定量分析.

通过实验测出不同厚度涂层的对应施压时间见表 3, 将该对应关系作为测定涂层厚度的依据. 根据国家电网部门的相关要求, 绝缘子表面 PRTV 涂层的合格厚度为 0.3 ~ 0.8 mm, 因此, 该方法适用于无损检测 PRTV 涂层质量的电力行业要求.

表 3 涂层质量判定标准

Tab. 3 Standards for determining coating quality

时间/ms	厚度/mm	质量判定
>0 ~ 600	涂层较薄或几乎无涂层	不合格
>600 ~ 750	0.30	合格
>750 ~ 900	0.40	合格
>900 ~ 1 100	0.50	合格
>1 100 ~ 1 350	0.60	合格
>1 350 ~ 1 550	0.70	合格
>1 550 ~ 1 650	0.80	合格
>1 650	涂层过厚或者有流渍	不合格

4 结 语

在绝缘子涂层质量检测中, 针对不同厚度的涂层材料在同一压力区间内从压力起始值到达终止值所用时间与涂层厚度的分析, 确定了一种用于绝缘子表面涂层质量的无损检测方法——压力测定计时法, 实现对绝缘子等高硬度非金属基体涂布较低硬度涂层的涂层厚度的无损检测. 同时, 研发针对不同表面形态被测表面的检测装置, 实现被检测设备内外表面的涂层质量检测. 根据同一压力区间内涂层受压时间差异确定涂层厚度, 可测出涂层 0.1 mm 的厚度差别. 压力测定计时法可以应用于所有基体材料为高硬度非金属材料, 涂层材料为低硬度非金属材料的涂层质量检测.

参考文献:

- [1] 甄晓亚. PRTV 在降低瓷质外绝缘污闪方面的应用和研究[J]. 电气时代, 2018(8): 72-73.
- [2] 全明睿. 防污闪复合涂料(PRTV)在 ± 800 kV 特高压直流输电线路中的应用[J]. 电气技术, 2016(7): 129-131.
- [3] 武文华, 张锐, 袁金灿, 等. 工厂复合化绝缘子电场分布特性及防污闪涂层参数优化计算[J]. 中国电力, 2019, 52(1): 88-95.
- [4] 陈建平, 梁湘鹏, 赵海军, 等. 非金属基体表面涂层质

(下转第 50 页)

- [4] 刘庆梅,李玉明. 预测老年人跌倒风险的功能性测试方法[J]. 中国老年保健医学,2018,16(2):12-14.
- [5] Russell M, Clapperton A, Vu T, et al. Trends in fall-related hospitalisations in older people living in aged care facilities[J]. Osteoporosis International, 2015, 26(3): 1219-1224.
- [6] Zakaria N A, Kuwae Y, Tamura T, et al. Quantitative analysis of fall risk using TUG test[J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2015, 18(4): 426-437.
- [7] 贾桂锋. 人体平衡能力定量评估方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [8] Greene B R, Mcgrath D, Walsh L, et al. Quantitative falls risk estimation through multi-sensor assessment of standing balance[J]. Physiological Measurement, 2012, 33(12): 2049-2063.
- [9] Kimura T, Kobayashi H, Nakayama E, et al. Seasonality in physical activity and walking of healthy older adults[J]. Journal of Physiological Anthropology, 2015, 34(1): 33.
- [10] Kang H G, Dingwell J B. Separating the effects of age and walking speed on gait variability[J]. Gait & Posture, 2008, 27(4): 572-577.
- [11] Sturnieks D L, St George R, Lord S R. Balance disorders in the elderly[J]. Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology, 2009, 38(6): 467-478.
- [12] Sibley K M, Beauchamp M K, Ooteghem K V, et al. Using the systems framework for postural control to analyze the components of balance evaluated in standardized balance measures: A scoping review[J]. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 2015, 96(1): 122-132.
- [13] Grobe S, Kakar R S, Smith M L, et al. Impact of cognitive fatigue on gait and sway among older adults: A literature review[J]. Preventive Medicine Reports, 2017, 6: 88-93.
- [14] Motalebi S A, Cheong L S, Iranagh J A, et al. Effect of low-cost resistance training on lower-limb strength and balance in institutionalized seniors[J]. Experimental Aging Research, 2018, 44(1): 48-61.
- [15] Muir-Hunter S W, Clark J, Mclean S, et al. Identifying balance and fall risk in community-dwelling older women: The effect of executive function on postural control[J]. Physiotherapy Canada, 2014, 66(2): 179-186.

责任编辑:周建军

(上接第39页)

- 量检测方法研究[J]. 应用声学, 2017, 36(2): 105-110.
- [5] 苑美实, 骆令海. 无损检测技术在电力系统中的应用[J]. 科学技术创新, 2018(21): 159-160.
- [6] 孙明慧, 王丽, 梁文武. 无损检测技术在特种设备检验中的运用研究[J]. 科技风, 2019(31): 2.
- [7] 陈嘉辉. 涡流检测技术在承压特种设备检测中的应用研究[J]. 特种设备安全技术, 2017(6): 51-53.
- [8] 张颖志, 徐志祥. 带涂层金属零件表面缺陷的无损检测综述[J]. 仪器仪表与分析监测, 2015(2): 1-5.
- [9] 王兴国. 缸套耐磨涂层及界面特性的无损检测研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [10] 刘国辉, 雷良育, 朱长城, 等. 基于涡流探伤的轮毂轴承裂纹检测系统研究[J]. 测试技术学报, 2019, 33(6): 470-475.
- [11] 申振腾, 陈建平, 杜厚栋, 等. 基于机器视觉的绝缘子RTV涂层质量检测方法研究及应用[J]. 电瓷避雷器, 2018(5): 233-240.

责任编辑:周建军