电解测厚仪的技术演进及其在多层镍镀层检测中的应用研究进展

陶　明[1]，朱　麒[1]，刘晓辉[1]，丁运虎[1]，赵　雨[2]
（1. 中国机械总院集团武汉材料保护研究所有限公司，湖北 武汉　430030；
2. 恒勃控股股份有限公司，广东 江门　529000）

[摘　要]电解测厚仪作为电镀工业中镀层厚度测量的核心设备，其技术发展对表面工程领域具有重要意义。详细探讨了电解测厚仪从传统化学溶解法到智能化电化学分析的技术演进历程，并重点探讨其在多层镍电位差检测中的应用现状，结合微电子技术与人工智能的发展趋势，提出电镀覆盖层测厚仪在工业4.0背景下的创新方向。研究表明，电解测厚仪在提高多层镍体系耐腐蚀性评价精度方面具有不可替代的作用，未来将通过多参数集成与智能化算法实现更高精度测量。

[关键词]电解测厚仪；多层镍镀层；电位差分析；电化学检测；表面工程
[中图分类号] O657.1；TQ153　　[文献标识码] A　　doi：10.26935/j.issn.2097-5317.2025.0037
[文章编号] 2097-5317(2025)06-0032-07

The Technical Evolution of Electrolytic Thickness Gauge and Its Application in Multilayer Nickel Coating Detection

TAO Ming[1], ZHU Qi[1], LIU Xiaohui[1], DING Yunhu[1], ZHAO Yu[2]
(1. China Academy of Machinery Wuhan Research Institute of Materials Protection Co.,Ltd., Wuhan 430030, China;
2. Hengbo Holding Co., Ltd., Jiangmen 529000, China)

Abstract: As a core instrument for measuring coating thickness in the electroplating industry, the technological advancement of the electrolytic thickness gauge holds significant importance for the field of surface engineering. The evolution of the electrolytic thickness gauge, from traditional chemical dissolution methods to intelligent electrochemical analysis, would be thoroughly examined. Emphasis would be placed on its current applications in detecting potential differences in multi-layer nickel coatings. By integrating the development trends of microelectronics and artificial intelligence, innovative directions for the gauge within the context of Industry 4.0 would be proposed. Research indicated that the electrolytic thickness gauge played an irreplaceable role in enhancing the accuracy of corrosion resistance evaluation in multi-layer nickel systems. In the future, it was expected to achieve higher precision measurements through the integration of multiple parameters and intelligent algorithms.

收稿日期：2025-05-28
Received：2025-05-28
通信作者：陶　明(1989-)，高级工程师，主要从事仪器设备、铝氧化膜方向的研究，电话：15802724556，邮箱：595973198@qq.com
Corresponding Author：TAO Ming (1989-), Senior Engineer, Research Focus: Instrument and Equipment, Aluminum Oxide Film, Tel.: 15802724556, E-mail: 595973198@qq.com

Key words: electrolytic thickness gauge; multilayer nickel coating; potential difference analysis; electrochemical detection; surface engineering

0 前 言

电镀层厚度是衡量金属表面性能的关键指标。传统的磁性法、涡流法、金相法、X 射线法存在使用局限性,例如误差大,制备时间长,操作复杂或成本昂贵等[1,2],而电解测厚仪通过电化学溶解原理实现镀层厚度的微损检测,以电位差作为电化学参数,目前有且仅有电解测厚仪能够满足多层镍电位差的测试要求[3]。为此,本文结合电解测厚仪的技术发展,探讨了其在多层镍电位差检测中的科学价值与工业应用潜力。

1 电解测厚仪的技术演进历程

1.1 发展历程

根据测试原理和方法的改进,电解测厚仪的发展历程可以大致分为 3 个阶段:化学溶解法、恒电流法和电解(库仑)法。

化学溶解法是通过溶解镀层或基体金属后,结合前后的质量差来进行厚度计算,再通过溶解金属的密度和面积计算出厚度[4],公式为 $h=\frac{m}{\rho \cdot S}$ 其中,h 为厚度,m 为溶解的镀层质量,ρ 为镀层材料密度,S 为镀层面积。对于双面镀层,需将质量差除以 2 后再计算单侧厚度。由于制样、称重、面积测量以及溶解所使用的溶液浓度、温度等影响都会带来误差,特别是溶解终点判断偏差(过早或过迟)、烘干过程中铁基体氧化、镀层不均匀等都对精度有非常大的影响。此外化学溶解法主要用于单金属镀层(如锌、锡)或与基体金属化学性质差异明显的镀层(如镀锌铁皮),对于合金镀层(如锌镍合金)和复合镀层(如铁件镀铜镀镍再镀铬)实际操作起来难度非常大。因此,由于这种方法操作复杂,干扰因素多,重复性差,使用有一定局限性,因而目前使用的频率并不高,仅用于教学或简单质量控制场景。

恒电流法是基于法拉第第一定律,即溶解的镀层质量 m 与通过的电量 Q($Q=I \cdot t$,I 为电流,t 为时间)成正比:$m=\frac{Q \cdot M}{n \cdot F}$,其中,$M$ 为镀层金属的摩尔质量,n 为金属离子的价态,F 为法拉第常数(96 485 C/mol),通过控制恒定电流密度(一般设定在 10~50 mA/cm^2 范围内)测量溶解时间,开始反应时记录初始时间 t_0,通过电压表实时监测阳极电位变化,当电位突跃(镀层完全溶解,基体金属暴露)时停止计时,并记录结束时间 t_1。结合镀层密度 ρ 和面积 S,厚度 h 可表示为 $h=\frac{m}{\rho \cdot S}=\frac{I \cdot t \cdot M}{n \cdot F \cdot \rho \cdot S}$ 代入 I、$t=t_1-t_0$、S 及材料参数(M,n,ρ)计算 h。另外还可辅助观察溶液颜色变化(如镀铜层溶解后溶液变蓝)或气泡生成量骤减来获取反应结束的时间。这种方法对于镀层存在孔隙或者厚度不均匀存在较大的测量误差,相对于化学溶解法来说,恒电流法是一种高精度、成本适中的镀层测厚方法,尤其适合单金属镀层的工业质检[5]。

电解(库仑)法与恒电流法原理一样,将镀层作为阳极,在电解液中通电溶解[6]。当镀层完全溶解、基体金属暴露时,电解池电压会突然变化(如电位突跃),仪器根据此信号停止计时并计算厚度,由于微分电位法(dE/dt 突变点)的应用,可以通过电磁继电器代替人工判断,从而实现仪器预设参数,无需复杂人工干预仪,从启动到测试结束可自动判断并且直接得到镀层厚度值,无需另外计算,已初步实现自动化。这类早期仪器由于使用老式电子元器件而精度有限,但为后续电解测厚仪的发展奠定了基础,随着工业水平不断提高,电解测厚仪也迎来了快速发展期。

就国内发展情况而言,国产的第一台电解测厚仪由武汉材料保护研究所(现:中国机械总院集团武汉材料保护研究所有限公司)电器仪表室于 1975 年研发成功,命名为 DJH 型电解式测厚仪(或库仑法测厚仪),并在 1975 年第 6 期《材料保护》杂志上公开发表。DJH 型电解测厚仪的成功研发标志着国内电解测厚技术从依赖进口转向自主创新,推动了电镀行业的质量控制标准化进程,具有里程碑意义。1984 年 6 月 DJH-B 型多层镍镀层厚度-电位测定仪问世[7],该设备在原理创新、智能化设计及行业应用方面均取得突破,为后续国产设备的发展提供了重要参考。

1.2 电位差法的引入

多层镀层检测需求驱动:随着汽车工业以及卫浴行业对多层镍(半光亮镍/高硫镍/光亮镍/镍封)耐腐蚀性要求的提升,传统方法无法区分各层厚度。多层镍电镀是一种复杂的表面处理工艺,各镍层之间通过控制硫含量等参数形成特定的电位差,这是提高镀层耐腐蚀性的关键[8]。

电位阶跃技术(电位差)通过监测电解过程中的电位突变识别不同镀层界面,推动电解测厚仪向高分

辨率发展。图 1 为通过电解测厚仪测得的多层镍厚度与电位差曲线图[9]

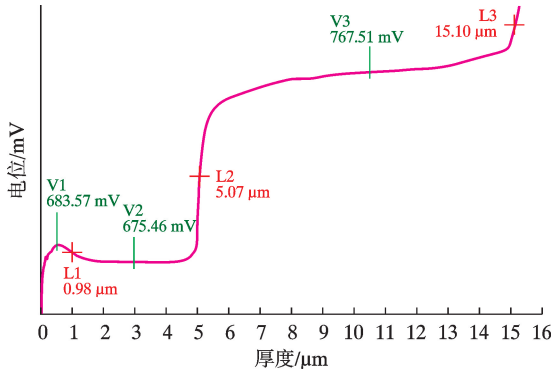


图 1 电解测厚仪测得的多层镍厚度与电位差曲线图

Fig. 1 Multilayer nickel thickness and potential difference curve (electrolytic thickness gauge test)

电位差的控制对多层镍镀层的性能至关重要。适当的电位差可以显著提高镀层的耐腐蚀性,而过小或过大的电位差则可能导致镀层性能下降。无电位差镀层,如单层镍,腐蚀会直接向里层渗透,防护效果较差,盐雾测试时间较短,只能达到几十到几百小时;有电位差镀层通常由镍封、光亮镍、高硫镍和半光亮镍中的两种或者多种组成,各层之间存在电位差,这种电位差能引导腐蚀横向扩展,延缓向里层的渗透,从而延长盐雾测试时间,通常可达到数百小时,甚至超过 1 000 h[10]。部分实施案例见表 1。

表 1 单层镍、多层镍电位差盐雾试验数据对比

Table 1 Comparison of salt spray test data for potential difference between single-layer and multi-layer nickel

镀层体系	总厚度(镍层)	电位差	中性盐雾试验结果
单层镍(15.0 μm)+铬(0.3 μm)	15.0 μm	无电位差	72 h 出现红锈
半光亮镍(10.0 μm)+光亮镍(5.0 μm)+铬(0.3 μm)	15.0 μm	≥120 mV	480 h 无红锈

因此,精确测量和控制各镍层之间的电位差成为保证多层镍电镀质量的关键环节。电解测厚仪的发展为这一需求提供了可靠的技术支持,使得电位差的精确测量和调控成为可能。

1.3 多层镍电位差的形成机制

多层镍电位差的形成主要依赖于各镍层中硫(S)含量的差异,通过不同镍层的电化学活性差异实现腐蚀防护的协同效应。硫的引入会显著改变镍层的电化学行为,硫在镍层中以硫化镍(Ni_3S_2)的形式存在,降低了镍的电位,这种硫含量的差异是电位差形成的主要原因。硫含量的差异与电化学活性见表 2[11]。

表 2 硫含量的差异与电化学活性

Table 2 The variation in sulfur content and electrochemical activity

多层镍镍层种类	含硫量(质量分数)/%	电位特性	作用
半光亮镍	0.003~0.005	约-0.25 V	在腐蚀环境中表现为阴极
光亮镍	0.040~0.080	约-0.35 V	成为阳极优先腐蚀
高硫镍	0.100~0.300	约-0.45 V	在三层镍中作为第一腐蚀牺牲层
镍封	-	-	通过引入非导电微粒(如 SiO_2)形成微孔铬层,进一步分散腐蚀电流

在实际镀层中,硫元素扩散对电位差具有一定的影响,不同镍层之间硫元素的相互扩散可能会导致电位差逐渐减小,例如,半光镍镍中的硫向光亮镍扩散会降低两者的电位差。多层镍镀层厚度方面,半光亮镍厚度通常为光亮镍厚度的 1.5~2.0 倍,镍封一般不超过 2 μm,高硫镍厚度控制在 1 μm 左右为宜,过厚或过薄都会影响醋酸加速盐雾试验(CASS)结果。将各镍镀层与光亮镍镀层电位相比较,半光亮镍层通常具有较正的电位(120~160 mV 为最佳,实际生产中电位差通常为 100~200 mV),高硫镍层则具有较负的电位,镍封层通常具有较正的电位(20~40 mV 为最佳),也有少数是具有较负的电位,这种电位差的存在可以引导腐蚀横向扩展,从而显著提升镀层防护性能保护基体金属。图 2 为多层镍测试过程示意图[12]。

2 电解测厚仪的发展现状分析

2.1 技术原理与核心组件

电解测厚技术的核心在于利用电解过程来测量金属镀层的厚度。其基本原理是将待测样品作为阳极,电解测厚仪主机在电解液中通电,通过控制电流密度和电解时间,使镀层金属逐渐溶解。根据法拉第定律,金属的溶解量与通过的电量成正比,因此可以通过测量电解过程中消耗的电量来计算镀层厚度。电解测厚技术的关键参数包括电解液成分、电流密度、电解时间和温度控制等。这些参数的精确控制直接影响测量结果的准确性和重复性。现代电解测厚仪通过先进的传感器和控制系统,能够实时监测和调整这些参数,确保测量过程的稳定性和可靠性。图 3 为电解测厚仪工作原理图[13]。

通过信号采集系统实时监测电流-时间曲线,结合公式 $d=\dfrac{M\cdot Q}{n\cdot F\cdot \rho\cdot A}$ 计算厚度(M 为摩尔质量,Q 为电量,ρ 为密度,A 为面积)。

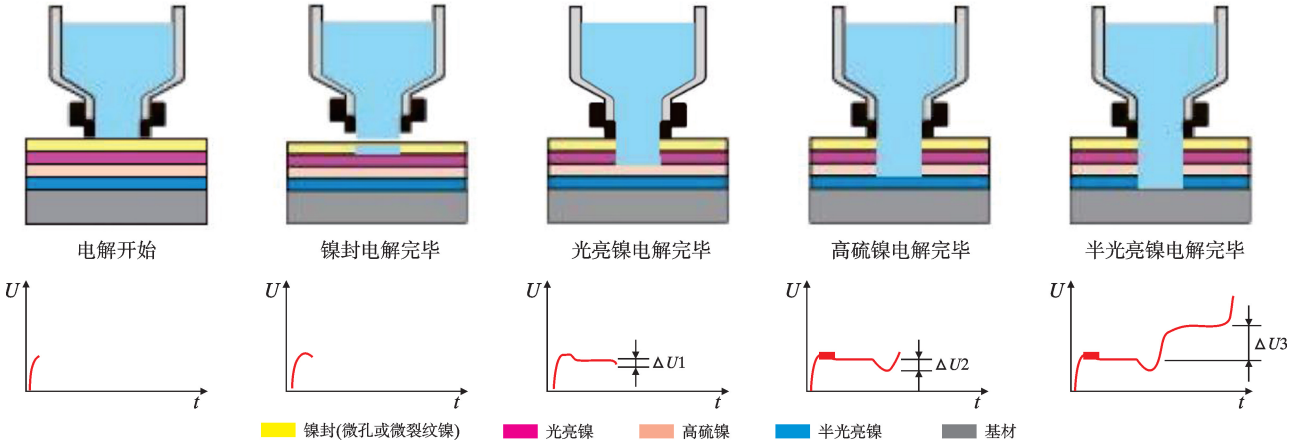


图 2　多层镍测试过程示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the multi-layer nickel testing process

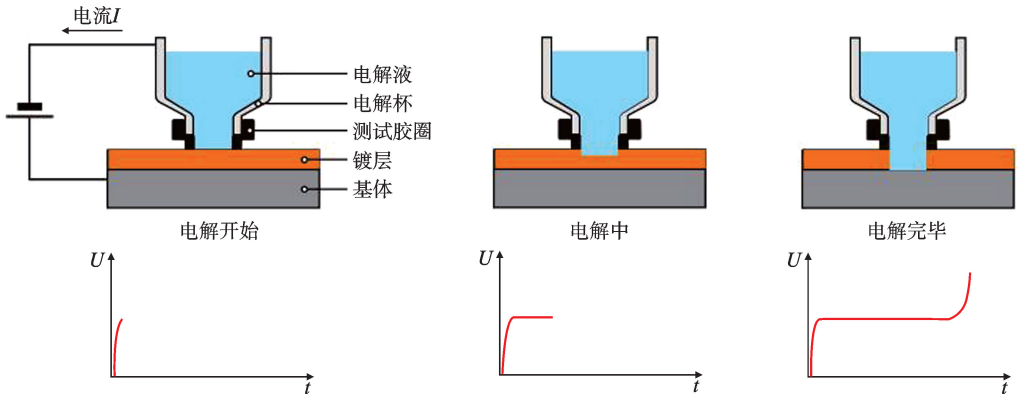


图 3　电解测厚仪工作原理图

Fig. 3　Working principle diagram of electrolytic thickness gauge

测厚仪主要由主机、测试架和外接电脑组成，如图 4 所示，其中主机作为恒流源输出每种镀层对应的标准、稳定的电流值，并且它还作为信号采集、处理器，将采集到的电位信号传输到电脑软件，实时显示电位曲线；测试架作为整个测试的电化学反应装置，含有主要的电解池、测试胶圈、测试信号线、搅拌器、载物台等，其中测试胶圈作用比较特殊，一方面是密封待测样品，防止电解液漏出，另外一方面是控制测试面积，测试胶圈的使用会有磨损，这也是带来误差的最主要因素，因此测试胶圈是电解测厚仪为数不多的易损件之一。根据待测样品的外观尺寸不同，不同厂家也都对应研发出便于操作的测试架或者载物台以应对一些异形件。

2.2　现今概况及标准化进程

数字信号处理技术：现代电解测厚仪集成了微处理器控制模块，由老式接插元器件向进口芯片、集成模块转变；依靠先进的 PID 控制算法，实现电位动态跟踪，电位监测更稳定，测试判定更科学[14]。仪器主机更迭：随着技术升级，电解测厚仪也有着非常大的



图 4　电解测厚仪的主要组成

Fig. 4　Main components of the electrolytic thickness gauge

改变，早期的主机按键多为物理按键设计，这也被进口轻触按键、触摸屏等取代；打印机也由外接的针式打印机更迭为内嵌的热敏打印机；显示屏由多位数码管升级为液晶屏；此外在多层镍电位差测试方面由模拟信号向数字信号转变，早期是通过外接的 XY 函数记录仪，将电位差曲线画在刻度纸上再来量出电位变化幅度，并且这种台式记录仪十分笨重，需要放在大理石平台上，防止外界震动带来干扰，现在是通过数字信号处理技术实时采集显示在计算机上面，如图 1 所示。

ASTM B764、ISO 16866：2020 等国际标准规范了

多层镍检测流程[15-18]。目前国内现行的是行业标准 JB/T 10534-2005“多层镍镀层各层厚度和电化学电位同步测定法”,另外国家标准 GB/T 46782-2025“金属及其他无机覆盖层 多层镍电镀层中各镍镀层厚度和层间电位差同步测试方法(STEP 测试)”于 2025 年 12 月发布,并将于 2026 年 7 月正式实施。

2.3 应用领域与挑战

电解测厚仪的应用领域涉及工业生产的各个领域,包括汽车、摩托车、自行车行业、航天航海行业、电子电器行业、日用五金行业、洁具卫浴行业、塑胶电镀行业标准件行业、技术监督部门及科研机构[19-21]。镀层厚度测量可分为破坏性测试和非破坏性测试 2 种,破坏性测试主要有金相法、库仑法、轮廓仪、扫描电镜和称重法;非破坏性测试主要有磁性法、涡流法、光谱法、光切法和反向散射法。众多测试方法中金相法是最准确的,但是制样难度相对较大;库仑法操作相对简单且使用成本低,轮廓仪和扫描电镜都需要镀层和基材有层断面,并且工件尺寸要求小,多用于实验室技术研究;称重法也有局限性,需要产品尺寸规则,便于计算面积,得到的镀层厚度为整体的平均值;磁性、涡流法都是电磁原理,对镀层和基材的导磁性有要求,并且镀层需要有一定厚度数据才稳定可靠,这 2 种方法的局限性是最大的;光谱法适用于测量细小、薄镀层的产品,但是设备成本高,使用维护成本也高;光切法和反向散射法这 2 种几乎不用于实际生产,应用领域比较窄。电解(库仑)测厚仪基于操作简单,使用时不需要制样,对工件基材几乎无限制,也没有导磁性的影响,并且设备成本和后期使用维护成本低因而被广泛使用[22]。

电解测厚仪主要作为镀层厚度检测仪器,是通过电化学的方式测试物理意义上的厚度,但是多层镍电位差是电化学特性差异的体现,目前最为简单有效的测试设备就是电解测厚仪。传统的五金电镀、电子电器元器件电镀可以通过光谱仪等设备高效、无损的测试,但是塑胶电镀行业多半都有多层镍电镀工艺,在自行车、摩托车行业亦如此,要测试多层镍电位差就离不开电解测厚仪[23]。

电解测厚仪有其应用局限性和技术瓶颈。电解测厚需通过电解溶解镀层,属于破坏性测试,导致被测件无法直接使用,需返工处理或者直接当废品处理。尽管部分情况下可通过小面积测试减少影响,或者可通过电刷镀进行局部修复,但仍限制了其在成品终检中的应用。此外,对镀层纯度也有要求,仪器设计基于纯金属镀层的测量,若镀层为合金(目前除已经确认可以测试的镍磷合金、铅锡合金、铜锡合金等几个少数合金之外,其他大部分合金镀层都无法测试,如锡钴合金、白锡铜、K 金…),测量结果会出现较大偏差[24,25],在能够找到合适的电解液(在通电情况下只对镀层有腐蚀,对基材无腐蚀作用,在不通电情况下对镀层无腐蚀作用)进行测试情况下需通过自制样板修正系数才能获得准确数据。在多层镀层(如铬-镍-铜)测试时,需从最外层逐层往里层测试,并且每层所使用的电解液各不相同,需要吸出上一层测试电解液,经过清洗电解杯再添加下一层对应电解液再进行测试,操作流程繁琐且易因操作不当导致误差。测试胶圈长期使用后磨损会导致测试面积扩大,测量值偏大,需定期更换胶圈以保证精度,胶圈磨损情况受测试工件材质、形状、镀层种类(电解液的酸碱性)以及与工件之间的压力影响,同时也与测试频率、维护情况相关,无法定量确定更换胶圈的时机,需要实验员具有判断的经验或者依据标准片来校标。再者,对工件尺寸也有要求,产品尺寸太小(规则的细小线材或方材可通过专用测试架完成测试)也是无法测试的;表面过于粗糙无法密封时也不便于测试,比如达克罗大部分都不能正常测试。软件方面暂时也无法实现自动识别多层镍的每一层并自动进行数据分析,高效检测依赖操作者经验[26]。

3 发展前景

3.1 智能微型化发展

检测设备的低能耗和小型化、现场检测的需求不断增大,使得便携性测厚成为一个新趋势。电解测厚仪可以与物联网、人工智能技术(AI)结合,利用机器学习,优化电解参数选择,实现自动校准、数据分析和故障诊断,减少人为误差,提高测量效率,并实现远程监控和数据共享,提升设备的管理效率。通过 AR/VR 技术(增强现实与虚拟现实),电解测厚仪的操作和数据分析将更加直观和便捷。结合最新技术,不久的将来电解测厚仪将实现安装、调试、教学通过 AR/VR 技术便捷高效完成;测试过程依靠人工智能技术自动备样、上机、电解液自动补充以及循环、测试数据自动判定;校标、故障诊断及处理通过物联网远程完成,让专业的事交给专业人来完成,使用者只需少量配合以及监管即可。

3.2 可持续发展

(1)绿色制造 电解测厚仪可以帮助优化电解液配方和工艺参数,减少金属原材料和电镀液浪费,减少有害废水的产生,间接降低污染物排放,符合绿色

制造的发展趋势。

(2)能源效率提升　通过精确测量控制镀层厚度,可降低电力成本以及污水处理成本,有助于提高能源利用效率,降低企业生产成本,可实现在确保镀层满足产品质量需求的前提下节能减排、提高良品率。

(3)行业标准完善　随着电解测厚仪应用的普及,相关行业标准将逐步完善,推动设备的规范化和标准化发展。其核心技术基于库仑法(DIN EN ISO 2177)和电位差测定(ASTM B764),国际标准已覆盖单层及多层镀层测量要求,国内相关标准(如 GB/T 4955-2005、JB/T10534-2005、GB/T 46782-2025)逐步完善[27],近年来,通过政策支持(如《中国制造 2025》)和技术引进,国内企业已实现部分产品性能接近国际水平。

(4)国际市场拓展　电解测厚仪制造商将更加注重国际化布局,通过技术创新和优质服务抢占全球市场,依托“一带一路”政策,国内设备在东南亚、中东等新兴市场逐步渗透。目前国际市场由德国菲希尔(FISCHER)、美国 Kocour、日本 Densoku、UTO 等企业主导[28],其优势在于技术积累和品牌效应,国内企业通过价格优势抢占中低端市场,高端领域的技术差距正在缩小。后期应逐步加强与国际检测机构合作,参与国际标准制定,提升国内设备的国际认可度。

4　结　论

电解测厚技术经过一个多世纪的发展,已经从最初的简单实验装置演变为高精度、多功能、智能化的现代仪器。这一技术的发展历程充分体现了科技进步对工业生产的深远影响。随着微电子技术的发展,仪器体积不断缩小,便携性大大提高,为现场检测提供了便利。这些创新使得电解测厚仪的应用范围不断扩大,从实验室走向生产线,成为工业生产中不可或缺的质量控制工具。

展望未来,电解测厚技术仍面临着诸多挑战和发展机遇。随着新材料、新工艺的不断涌现,对厚度测量技术提出了更高要求。未来,电解测厚技术需要进一步突破精度极限,提高测量速度,拓展应用范围,并与其他分析技术深度融合。同时,随着工业 4.0 和智能制造的推进,电解测厚仪将更加智能化、网络化,成为智能制造系统的重要组成部分。

总的来说,电解测厚技术的发展不仅推动了工业生产的进步,也为材料科学、表面工程等领域的研究提供了重要工具。随着技术的不断创新和完善,电解测厚技术必将在更广阔的领域发挥重要作用,为工业发展和科技进步做出更大贡献。

[参 考 文 献]

[1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.金属和其他无机覆盖层厚度测量方法评述:GB/T 6463-2005[S].北京:中国标准出版社,2005.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Review of Measurement Methods for Thickness of Metallic and Other Inorganic Coatings: GB/T 6463-2005[S]. Beijing: China Standards Press, 2005.

[2] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Measurement of Coating Thickness by X-Ray Spectrometry:ASTM B568-98(2021)[S]. [S.l.]: Standards Press of U.S,2021:1-8.

[3] 刘永杰,赵　哲. 影响测厚仪测量精度的因素及解决方法[J].设备管理与维修, 2022(24):4.
LIU Y J, ZHAO Z. Factors Affecting Measurement Accuracy of Coating Thickness Gauges and Solutions[J]. Equipment Management and Maintenance, 2022(24):4.

[4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 金属覆盖层覆盖层厚度测量阳极溶解库仑法: GB/T 4955-2005[S].北京:中国标准出版社,2005:1-5.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Anodic Dissolution Coulometric Method for Measurement of Coating Thickness on Metallic Coatings: .GB/T 4955-2005[S]. Beijing: China Standards Press, 2005:1-5.

[5] International Organization for Standardization. Metallic coatings — Measurement of coating thickness — Coulometric method by anodic dissolution: ISO 2177:2020[S].

[6] 叶　青. 浅析智能电解测厚仪的原理和测试方法[J]. 工业计量, 2014, 24(4): 55-57.
YE Q. Analysis of Principles and Testing Methods of Intelligent Electrolytic Coating Thickness Gauge[J]. Industrial Measurement, 2014, 24(4):55-57.

[7] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 多层镍镀层各层厚度和电化学电位同步测定法:JB/T 10534-2005[S]. 北京:中国机械行业出版社标准出版社,2005: 1-7.
National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Simultaneous Determination Method for Thickness and Electrochemical Potential of Each Layer in Multilayer Nickel Plating: JB/T 10534-2005[S]. Beijing: China Mechanical Industry Standards Press, 2005:1-7.

[8] 王建军. 多层镍电位差对耐蚀性的影响机制研究[J].

电镀与涂饰,2018,37(12):45-50.
WANG J J. Research on the Influence Mechanism of Multilayer Nickel Potential Difference on Corrosion Resistance [J]. Electroplating & Finishing, 2018, 37(12):45-50.
[9] 万春锋, 代新雷. 电镀多层镍的发展和应用[J]. 科技创新与应用, 2016 (22): 131-131.
WAN C F, DAI X L. Development and Application of Electroplated Multilayer Nickel[J]. Technology Innovation and Application, 2016 (22):131-131.
[10] 代朋民,郭崇武.适用于航空航天铝合金件的镀多层镍工艺[J].电镀与涂饰, 2024, 43(4):74-78.
DAI P M, GUO C W. Multilayer Nickel Plating Process Suitable for Aerospace Aluminum Alloy Parts[J]. Electroplating & Finishing, 2024, 43(4):74-78.
[11] ZENG Z, ZHAO W, YUAN S, et al. Advances on nickel-based electrode materials for secondary battery systems: a review[J]. ACS Applied Energy Materials, 2022, 5(7): 9 189-9 213.
[12] German Institute for Standardization .Metallic and other inorganic coatings - Simultaneous thickness and electrode potential determination of individual layers in multilayer nickel deposits (STEP Test): DIN 50022 - 2007[S]. [S.l.]: Standards Press of German,2007:1-15.
[13] HARBULAK E P. Simultaneous Thickness and Electrochemical Potential Determination of Individual Layers in Multilayer Nickel Deposits[J]. NASF Surface Technology White Papers, 2016(2): 1-12.
[14] 秦 清,李 强. 数控电解式化学镀测厚仪的设计与实现[J]. 微计算机信息,2005(6S): 110-112.
QIN Q, LI Q. Design and Implementation of Numerical Control Electrolytic Chemical Plating Thickness Gauge [J]. Microcomputer Information, 2005 (6S):110-112.
[15] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Simultaneous Thickness and Electrochemical Potential Determination of Individual Layers in Multilayer Nickel Deposit:ASTM B764-04-2021[S].
[16] German Institute for Standardization. Testing of metallic coatings; determination of coating thickness by coulometric method: DIN 50955: 2020[S]. [S.l.]: Standards Press of German,2020:1-20.
[17] German Institute for Standardization. Metallic coatings - Electroplated coatings of nickel plus chromium and of copper plus nickel plus chromium on plastics materials: DIN 53100-2020[S]. [S.l.]: Standards Press of German. 2020:1-22
[18] German Institute for Standardization. Non-magnetic metallic coatings on metallic and non-metallic basis materials - Measurement of coating thickness - Phase-sensitive eddy-current method (ISO 21968:2019); German version EN ISO 21968:2019:DIN EN ISO 21968-2020[S]. [S.l.]: Standards Press of German,2020:1-25.
[19] 刘红霞. 电解测厚法在汽车零部件镀层检测中的应用[D]. 上海:上海交通大学, 2019.
LIU H X. Application of Electrolytic Thickness Measurement Method in Coating Inspection of Automotive Parts [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
[20] 王建国,刘 敏,张 磊. 库仑法测厚仪的校准方法与误差来源分析[J]. 计量技术,2020, 48 (8): 35-38.
WANG J G, LIU M, ZHANG L. Calibration Methods and Error Source Analysis of Coulometric Thickness Gauge [J]. Measurement Technology, 2020, 48(8):35-38.
[21] KIM J H, PARK S Y, OH K S. Development of an On-Line Coulometric Thickness Measurement System for Continuous Coating Lines [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 285: 116789.
[22] 张 伟, 李 明. 电解测厚技术在电镀层厚度检测中的应用研究[J].电镀与涂饰, 2018, 37(12):45-49.
ZHANG W, LI M. Research on Application of Electrolytic Thickness Measurement Technology in Coating Thickness Detection [J]. Electroplating & Finishing, 2018, 37(12):45-49.
[23] 凌国伟,李 光. 库仑测厚仪使用中的一些问题和误区[J]. 电镀与涂饰, 2014, 33(5): 212-213.
LING G W, LI G . Some Issues and Misconceptions in the Use of Coulometric Thickness Gauge[J]. Electroplating & Finishing, 2014, 33(5):212-213.
[24] WINAND R. Electrochemical Methods for the Determination of Coating ThicknessIn:Handbook of Surface Analysis [M]. Berlin: Springer,2021: 287-310.
[25] GIURLANI W, BERRETTI E, INNOCENTI M, et al. Measuring the Thickness of Metal Coatings: A Review of the Methods [J]. Coatings, 2020, 10(12): 1 211.
[26] 中华人民共和国国家计量技术规范.电解式(库仑)测厚仪校准规范:JJF 1707-2018[S].北京:中国标准出版社,2018:1-3.
National Metrological Technical Specification of the People's Republic of China. Calibration Specification for Electrolytic (Coulometric) Coating Thickness Gauge: JJF 1707-2018[S]. Beijing: China Standards Press, 2018: 1-3.
[27] 袁诗璞. 几种多层电镀工艺的讨论[J]. 电镀与涂饰, 2013, 32(6): 13-15.
YUAN S P. Discussion on Several Multilayer Electroplating Processes [J]. Electroplating & Finishing, 2013, 32(6):13-15.
[28] FRANCIS H T. An Electrolytic Thickness Tester for Plated Metal Coatings[J].Journal of the Electrochemical Society, 2019,166(5): H315-H323.

[编校:魏兆军]