

电位滴定法在传统化石能源和新型生物质能源领域检测中的应用

李凯伦^{1,2}, 贾丽³, 戴咏川², 观文娜^{1*}, 毛鑫涛¹, 刘婷婷¹

¹中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 山东 青岛

²辽宁石油化工大学石油化工学院, 辽宁 抚顺

³北京市理化分析测试中心, 北京

Email: *406898340@qq.com

收稿日期: 2021年6月28日; 录用日期: 2021年7月12日; 发布日期: 2021年7月28日

摘要

随着科技和社会的不断进步, 能源的需求量越来越大。传统化石能源正在逐渐枯竭, 为了解决能源问题, 生物质能源等新型能源也得到了快速发展。在利用传统化石能源和生物质能源时, 如何进一步提高能效并减少环境污染是发展趋势, 因此对能源的品质提出了更高的要求。酸值、硫、碱性氮等是评价能源品质的重要指标, 电位滴定法是检测上述指标的理想方法, 具有高精度、低成本、易操作、易自动化、适用范围广的特点。本文就电位滴定法在传统化石能源和新型生物质能源领域的应用和发展情况进行了总结与论述。

关键词

电位滴定法, 化石能源, 生物质能源, 检测, 应用

Application of Potentiometric Titration in Detection of Traditional Fossil Energy and New Biomass Energy

Kailun Li^{1,2}, Li Jia³, Yongchuan Dai², Wenna Guan^{1*}, Xintao Mao¹, Tingting Liu¹

¹Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao Shandong

²School of Petrochemical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

³Beijing Center for Physical & Chemical Analysis, Beijing

Email: *406898340@qq.com

Received: Jun. 28th, 2021; accepted: Jul. 12th, 2021; published: Jul. 28th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 李凯伦, 贾丽, 戴咏川, 观文娜, 毛鑫涛, 刘婷婷. 电位滴定法在传统化石能源和新型生物质能源领域检测中的应用[J]. 分析化学进展, 2021, 11(3): 91-98. DOI: 10.12677/aac.2021.113010

Abstract

With the continuous progress of technology and society, the demand for energy is increasing. Traditional fossil energy is gradually depleted. In order to solve the energy problem, new energy sources such as biomass energy have also been developed rapidly. When using traditional fossil energy and biomass energy, how to further improve energy efficiency and reduce environmental pollution is a development trend, so higher requirements for energy quality are put forward. Acid value, sulfur, basic nitrogen, etc. are important indicators for evaluating energy. Potentiometric titration is an ideal method to detect the above indicators, which has the characteristics of high precision, low cost, easy operation, easy automation and wide application range. This paper summarizes and discusses the application and development of potentiometric titration in the field of traditional fossil energy and new biomass energy.

Keywords

Potentiometric Titration, Fossil Energy, Biomass Energy, Detection, Application

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概况

目前, 根据开发利用情况, 能源主要分为两类: 一类是常规能源, 指已经大规模生产和广泛利用的能源, 例如不可再生的化石能源和可再生的水电等; 另一类则是面对传统不可再生能源的逐渐枯竭, 而不断开发的新能源, 指传统能源之外的各种能源形式, 或刚开始开发利用, 或正在积极研究、有待推广的能源, 如太阳能、地热能、风能、海洋能、生物质能和核聚变能等。其中, 化石能源和生物质能源在实际生产和使用的过程中, 本身含有的部分元素会对其性能或环境造成影响, 需要检测和控制其在样品中的含量, 例如碱性氮、硫、酸值等。

电位滴定法是在滴定过程中通过测量电位变化以确定滴定终点的方法, 与直接电位法相比, 电位滴定法不需要准确的测量电极电位值, 精准程度比直接电位法高。电位滴定法通过能斯特方程, 将待测物质的含量转化为电信号, 用指示电极的电位变化代替指示剂的颜色变化来标志滴定终点的到达。在滴定终点附近, 待测离子的浓度往往会连续变化 N 个数量级, 引起电位突跃, 对于部分电位变化不明显或者电压较低的滴定过程, 也有相应的计算方法来获得等价滴定终点[1]。电位滴定法具有仪器简单, 测定时间较短, 终点判断方式更加准确和易于自动化的特点。

电位滴定法在传统能源和新型生物质能源领域的应用十分广泛, 是一种重要检测手段。对于传统能源, 从能源生产过程的把控到各类燃料的直接检测都有电位滴定法的相关应用; 对于新能源也有相关的应用范例。表 1 详细列出了电位滴定法在能源领域的应用情况。

Table 1. Application of potentiometric titration in energy field

表 1. 电位滴定法在能源领域的应用情况

序号	样品	检测值	溶液	滴定液	电极	引用文献
1	燃料油	碱性氮	二甲苯 + 冰乙酸	高氯酸 + 冰乙酸	pH 电极	[2]
2	渣油、蜡油	碱性氮	二甲苯 + 冰乙酸	高氯酸 + 冰乙酸	玻璃-甘汞电极	[3]

Continued

3	喷气燃料	酸值	甲苯 + 异丙醇	氢氧化钾 + 异丙醇	非水玻璃电极	[4]
4	煤焦油	有机弱酸	甲苯 + 异丙醇	氢氧化钾 + 异丙醇	玻璃电极	[5]
5	微藻藻油	酸值	乙醇 + 乙醚	氢氧化钾	玻璃电极	[6]
6	生物油	酸值	乙醇	氢氧化钠	pH 电极	[7]
7	原油	硫醇硫	甲苯 + 异丙醇	硝酸银醇	玻璃电极、银-硫化银电极	[8]
8	轻质油	总活性硫	甲醇 + 冰醋酸	硝酸银 + 异丙醇	复合银电极	[9]
9	汽油	硫醚硫	苯 + 冰乙酸	四乙酸铅	双液接饱和甘汞电极	[10]
10	煤	氯	艾氏剂熔样水溶液	硝酸银	氯离子电极、甘汞电极	[11]
11	石油	氯	甲苯 + 乙醇 + 环丙烷 + 硝酸	硝酸银	复合电极	[12]
12	石脑油	溴	冰醋酸 + 三氯甲烷 + 甲醇 + 硫酸	溴化钾 + 溴酸钾	玻璃电极 + 铂电极	[13]

2. 应用

2.1. 碱性氮的测定

传统化石能源产品例如汽油、柴油等轻质油的重要获取方式是催化裂化技术[14]，由于我国原油的氮含量较高在 0.3%以上，掺炼的渣油、蜡油等成分中氮含量则更高，因此控制石油产品中的碱性氮十分必要[15][16][17]。

我国于 1992 年发布了 SH/T 0162 石油产品中碱性氮测定法[18]，该方法使用苯-冰乙酸溶剂体系，通过显色反应来测定样品中的碱性氮，但该方法无法测定如渣油、焦化蜡油等深色样品，而且反应体系中使用苯为溶剂，易造成操作人员中毒等伤害。陆克平[19]提出使用电位滴定法测定油品中的碱性氮含量，由于不依赖显色反应而是通过电位突跃来确定滴定终点，可以应用于深色或较为浑浊的油品分析，还使用低毒性二甲苯代替苯为溶剂。徐元德[20]等人使用这一方法考察了柴油、渣油、蜡油等不同样品的精密性及重复性，结果令人满意。国家能源局也于 2019 年发布了相关的检测标准 NB/SH/T 0980，使用二甲苯-冰乙酸溶剂体系，高氯酸-冰乙酸为滴定剂，进一步证明电位滴定法为碱性氮高精度检测的重要方法。

2.2. 酸值的测定

酸值是对化合物(例如脂肪酸)或混合物中游离羧基团数量的一个计量标准，也是控制油品腐蚀性能和使用性能的重要指标之一。原油或轻质油中的酸值在一定程度上表示了其中含有的酸性物质的量，会影响原油及轻质油在加工、贮存和实际使用过程中对仪器及设备的腐蚀性，直接影响油品贸易，加工以及资源的调配运输等各个方面。

目前对于酸值测定的国标方法主要有 GB/T 264、GB/T 258 (酸度)、GB/T 7304、GB/T 4945、GB/T 12574、GB/T 18609 等，根据滴定终点大致分为两类，即显色滴定和电位滴定。国外相关标准有 ASTM D974、ASTM D3242、ASTM D664 等，各标准间的对比见表 2。各类方法都有实际适用的范围，其中电位滴定法不需要使用染色剂，依靠电极电位突越来判定终点，可以应用于各类有色，粘稠的原油及石油产品，能够测定绝大多数样品的酸值[21][22]。在实际的滴定检测过程中，杂质酸的存在会影响滴定结果，在检测前应做好相应的除杂前处理工作[23]。为解决当样品量较大时滴定终点电位突跃不明显的问题，陆克平[24]提出使用预设 pH11 滴定终点和电位突跃两者共同判定滴定终点，可以使原本检测时突越不明显的样品准确的判定滴定终点。王家兴、张雁玲等[25]对 GB/T 7304 的不确定度进行了测试，并列出了影响原油

酸值不确定度的因素。

近些年来随着新能源的兴起,微藻生物柴油越来越受人们的关注,可以在“不与人争粮、不与粮争地”的前提下通过稳定产出大量的微藻藻油来获得生物柴油[26][27]。然而,微藻中存在的脂肪酶会水解微藻中的脂类生成游离脂肪酸,导致微藻藻油酸值升高,影响微藻藻油的品质,进而影响微藻藻油的下游炼制工艺,所以可以通过检测并监控其酸值来判断微藻生产生物柴油的能力与品质。

Table 2. Comparison of acid value detection standards

表 2. 酸值检测标准对比

标准名称	GB/T 264 石油产品酸值测定法[28]	GB/T 258 汽油、煤油、柴油酸度测定法[29]	GB/T 7304 石油产品酸值的测定电位滴定法[30]	GB/T 4945 石油产品和润滑剂酸值和碱值测定法(颜色指示剂法)[31]	GB/T 12574 喷气燃料总酸值测定法[32]	GB/T 18609 原油酸值的测定电位滴定法[33]
适用范围	测定石油产品的酸值	测定未加乙基液的汽油、煤油、柴油的酸度	石油产品、润滑油、生物柴油以及生物柴油调和燃料	能够溶解于甲苯和异丙醇混合溶剂中水解常数大于 10^{-9} 的酸性或碱性组分	酸值范围在 $0\sim 0.1$ mgKOH/g 的喷气燃料	能够溶解于甲苯和异丙醇混合溶剂中水解常数大于 10^{-9} 的酸性组分及水的质量分数小于5%的原油
溶剂	95%乙醇	95%乙醇	甲苯 + 异丙醇 + 水	甲苯 + 异丙醇 + 水	甲苯 + 异丙醇 + 水	甲苯 + 异丙醇 + 水
滴定终点	碱性蓝 6B (或甲酚红)由蓝色变成浅红色(或由黄色变成紫红色)	碱性蓝 6B (或甲酚红)由蓝色变成浅红色(或由黄色变成紫红色)	电极电位发生突跃	对萘酚苯由橙色变成绿色	对萘酚苯由橙色变成绿色	电极电位发生突跃
对应 ASTM 方法	无	无	ASTM D664 [34]	ASTM D974 [35]	ASTM D3242 [36]	ASTM D664

2.3. 硫的测定

硫含量是各类原油及轻质油等石油产品较为重要的参数之一。例如汽油燃烧产生硫的氧化物,会对空气产生严重的污染,同时在生产、贮存和运输中也体现了较强的腐蚀性。通常说的总硫一般包括两种,即活性硫和非活性硫。非活性硫在一般条件下比较稳定,不会与金属发生反应,所以早期的总硫测定方法有时会导致总硫含量高而油品腐蚀性反而较低的情况。活性硫是指原油或燃料油中能直接与金属发生化学反应产生腐蚀的硫化物中的硫,例如元素硫、硫化氢、硫醇等,而二硫化物在较低的温度下就能分解为元素硫和硫化氢,所以也将其归类为活性硫[9]。硫对油品的影响除腐蚀性外,还主要体现在抗氧化性、稳定性、润滑性等,在某些情况下,硫的存在又是对油品性质有利的,因此也会将一些非活性硫化物作为添加剂加入到油品中来改善油品的某些性质,例如润滑油中添加的含硫抗磨剂、含硫极压剂。所以如何精确测量油品中的活性硫含量是十分重要的。

关于硫的测定目前国内主要的方法有电位滴定法、燃灯法、紫外荧光法、管式炉法以及博士实验法等[37],电位滴定法由于精确度高且操作相对便捷,被广泛应用于油品中活性硫的检测,国家也先后颁布了两项相关标准,即 GB/T 1792-2015 [38]和 NB/SH/T 0915-2015 [39]。兰淑慧[40]针对电位滴定法测定油品中硫醇硫含量进行了不确定度评估,提出该方法的不确定性主要来源于滴定溶液的配制、标定、称量等,可以通过提高试验次数来降低测量的不确定度。

2.4. 氯离子的测定

对于原油及各类轻质油来说,氯离子会对生产、贮存和运输过程中的仪器设备造成腐蚀,也会使生

产过程中的催化剂中毒失活,严重影响产品的质量。对于煤炭来说,氯更是常见的有害元素之一,主要以 KCl、NaCl、 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 等无机物形式存在[41]。煤作为能源,主要的供能方式是直接燃烧,我国每年有超过 80%的煤炭通过直接燃烧的方式为各行各业提供能量来源。在煤燃烧或热解的过程中,很大一部分的氯会以 HCl 气体的形式排放,造成严重的大气污染。在新能源领域,木质素通过先快速热解再进行生物油提取的方法转化为燃料[42]。全世界每年由植物生长可产生 1500 亿吨木质素,具有很大的发展潜力。然而,木质素一般都含有氯离子,如果氯离子浓度过高则会对土壤环境造成严重且很难缓解的影响,且会危害人体健康,所以严格把控木质素中氯的含量也非常必要[43]。

目前能源领域中氯的主要分析方法有艾士卡混合剂熔样-硫氰酸钾滴定法;高温水解-电位滴定法;氧弹燃烧-电位滴定法;氧弹燃烧-离子色谱法等。通常是先通过热解或燃烧,使氯变成易被吸收的气体化合物,然后通过配制好的溶液从燃烧产生的气体中提取出相应的氯化物进行分析检测。上述的测定方法中,前两种是国标 GB/T 3558 [44]中的方法,但这两种方法都有一定的弊端[45]:高温水解方法虽然检测周期较短,但需要一套专用的设备;艾士卡混合剂熔样方法检测结果准确度和精密度高,但检验时间长,每个样品需要 1~2 天时间,不适合大批量样品的检测。为了提高检测效率,李权斌[46]提出了氧弹燃烧-电位滴定法,由于具有较高的灵敏度,更适合氯含量较低的样品检测,检出限可达到 0.007 mg。对于检测时终点附近电位突越不明显的样品,可以通过加入适量的甲醇来使滴定终点的电位突越更加明显[47]。在使用甘汞电极滴定氯离子时,电极中的氯化钾可能有轻微的逸散情况,导致结果出现微量正偏差[48]。林盼盼等[49]提出用直接电位法来辅助检测,在使用电位滴定法检测前,先通过直接电位法快速判断出样品中氯含量的大致范围,优化电位滴定法操作步骤,再通过溶解-稀释法制备检测溶液,减少了调整滴定液浓度的繁琐程度。

2.5. 溴值的测定

在石油产品中,溴值通常作为不饱和烃含量(主要是烯烃的含量)的量度方法,溴值越高则烯烃含量越多,反之则烯烃含量越少。不饱和烃的存在会影响石油产品的稳定性,对生产、运输、贮存及使用带来不利影响[50]。

目前针对溴值的测定方法主要有电量法和电位滴定法,其中电位滴定法根据终点判断方式的不同分成显色指示剂法、电位法和死停终点法。樊丽英[13]使用冰醋酸、三氯甲烷、甲醇和硫酸的溶剂体系,考察了电位滴定法测石油产品溴值的相关影响因素,沈桃英,马琳等人[51]则针对死停终点法在实际操作中重复性差、准确性低的问题进行了相关探讨,并给出了相关的包括溴值范围、试样量、滴定速度等滴定参数的推荐值。王华[52]依据 SH/T 0236 标准[53],对石脑油中溴值测定结果的影响参数进行了针对性的平行试验,并得出控制石脑油测定结果的条件。同时,在测量样品中的总溴含量时,如果样品中存在溴酸根和次溴酸根等高价态的溴会影响检测结果,可以考虑用 $Na_2S_2O_8$ -NaOH 体系对样品进行消解后再进行测试[54]。

2.6. 其他检测值应用

1) 甲醇:在低温条件下长距离管输天然气时,管内天然气易发生相变阻塞管路,添加甲醇可以有效地解决这个问题。检测气井采出污水中的甲醇浓度可以迅速确定甲醇的循环回收效率并且防止甲醇污染环境。薄玉华、张保利等人[55]针对这一测量对比了色谱法和电位滴定法的检测结果,结果显示电位滴定法在检测成本、准确度和检测时间等方面均优于色谱法。

2) 碘值:表示有机化合物中不饱和程度的一种指标,指 100 g 物质中所能吸收的碘的克数,是轻柴油的一个重要质量指标。早先国内测量碘值主要应用 SH/T 0234-92 [56]中的碘-乙醇方法,但此方法在

实际滴定过程, 溶液中易出现碘沉淀, 导致反应缓慢, 测定时间较长, 而电位滴定法则可以极大的避免由于碘沉淀带来的影响。经试验证实, 电位滴定法测量碘值具有准确、迅速、操作方便的优点[57]。

3) 碱值: 碱值也是油品的一项重要指标, 指在规定的滴定条件下, 中和 1 g 试样中全部碱性组分所需高氯酸的量, 以当量氢氧化钾毫克数表示。电位滴定法可以快速、准确的测定油品中的碱值, 并可通过氮气吹脱的方式消除二氧化碳对滴定结果的影响, 获得更准确的检测结果[58]。

3. 总结

综上所述, 电位滴定法已经广泛应用于传统化石能源和新型生物质能源领域的相关检测, 包括石油及其相关产品、煤炭以及新能源领域的木质素和生物柴油等, 可精确分析碱性氮、酸值、活性硫、氯离子、溴值、甲醇、碘值和碱值等关键指标, 是能源领域中的重要分析检测方法之一。电位滴定法应用于传统化石能源和新型生物质能源领域的相关检测分析, 具有以下特点: 1) 不需要使用指示剂, 可广泛应用于各类有颜色、有荧光的样品, 但检测个别非常粘稠的样品时, 需要选择合适的溶剂体系来溶解样品; 2) 重复性、准确性都可以满足检测要求, 并且实验仪器操作简单、价格低廉, 易推广使用。未来, 在以生物能源为代表的新能源领域, 通过开发合适的滴定条件, 电位滴定法在该领域将有非常广阔应用前景。

基金项目

国家重点研发计划“重大科学仪器设备开发”重点专项(2018YFF01013900)。

参考文献

- [1] Gran, G. (1952) Determination of the Equivalence Point in Potentiometric Titrations. *Analyst*, **920**, 661-671. <https://doi.org/10.1039/an9527700661>
- [2] 高雪琳, 李慧, 刘晓莉, 等. 油品中碱性氮含量电位滴定测定法[J]. 广东化工, 2015, 15(42): 187+224-225.
- [3] 中国石油天然气股份有限公司. 石油馏分中碱性氮含量的测定电位滴定法 NB/SH/T 0980-2019 [S]. 北京: 中国石化出版社, 2019: 1-5.
- [4] 王菊香, 刘洁, 邢志娜, 等. 电位滴定法测定喷气燃料总酸值[J]. 石油炼制与化工: 分析与评定, 2010, 41(5): 77-80.
- [5] 史军歌, 吴梅, 田松柏, 等. 电位滴定法测定煤焦油中的有机弱酸含量[J]. 石油炼制与化工: 分析与评定, 2015, 46(8): 96-100
- [6] 姜君鹏, 姚长洪, 刘娇, 等. 微藻油脂酸值的测定[J]. 现代化工: 分析测试, 2017, 37(7): 196-199.
- [7] 崔洪友, 王景华, 魏书芹, 等. 酸碱电位滴定法测定生物油中总酸含量[J]. 可再生能源, 2010, 28(6): 36-44.
- [8] 朴健淑. 电位滴定法测定原油中硫醇硫含量[J]. 油气田环境保护, 2014, 24(3): 52-54.
- [9] 魏宇彤, 王小伟. 电位滴定法测定轻质石油馏分中的总活性硫[J]. 石油商技, 2016(3): 64-68.
- [10] 罗立文, 夏道宏, 林蕾. 四乙酸铅电位滴定法测定汽油中的硫醚硫[J]. 石油与天然气化工, 2003, 32(6): 393-395.
- [11] 王瑞海, 张庆华, 王伟, 等. 煤中氯含量测定方法的应用[J]. 水泥, 2020(增刊): 1-4.
- [12] 赵霞, 田松柏. 石油中总氯量的电位滴定测定[J]. 石油化工腐蚀与防护: 监测监测, 2007, 24(2): 54-56.
- [13] 樊丽英. 应用电位滴定法测定石油产品的溴值[J]. 河北化工, 2003(3): 52-53.
- [14] 关旭, 马守涛, 吴显军, 等. 电位滴定法测定石油产品中碱性氮[J]. 应用科技, 2014, 41(6): 75-77.
- [15] 陈小博, 孙金鹏, 沈本贤, 等. 碱性氮化物对 USY 和 ZSM-5 型催化裂化催化剂催化性能的影响[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36(5): 164-168, 174.
- [16] 张宝军. 焦化蜡油脱氮技术研究进展[J]. 广州化工, 2012, 40(16): 39-40.
- [17] 邹展, 赵许群, 史海. 电位滴定法检测硝酸铵[J]. 中国测试, 2019, 45(1): 64-67.
- [18] 石油化工科学研究院. 石油产品中碱性氮测定法 SH/T 0162-1992 [S]. 1992: 402-404.
- [19] 陆克平. 石油产品中碱性氮测定方法改进[J]. 石油化工, 2002, 31(5): 383-386.

- [20] 徐元德, 戴颖娟, 钱梅. 采用电位滴定法测定石油馏分中的碱性氮[J]. 石化技术与应用: 分析与测试, 2018, 36(2): 145-148.
- [21] 张雁玲, 雒亚东, 孟凡飞, 等. 石油产品及原油酸值测定方法的探讨[J]. 当代化工: 分析测试, 2015, 44(6): 1419-1422.
- [22] 钟宏星, 张晶陆, 陆剑华, 等. 3种油脂酸价测定方法的比较[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(10): 3197-3201.
- [23] Feng, S.Y., Xiang, S., Bian, X.C., *et al.* (2020) Quantitative Analysis of Total Acidity in Aqueous Lactic Acid Solutions by Direct Potentiometric Titration. *Microchemical Journal*, **157**, Article ID: 105049. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105049>
- [24] 陆克平, 汪声美. GB/T 7304 标准酸值测定方法改进[J]. 中国石油和化工标准与质量: 检验检测, 2009(5): 18-21.
- [25] 王家兴, 张雁玲. 电位滴定法测定原油酸值的不确定度评定[J]. 化学试剂, 2020, 42(7): 828-831.
- [26] 郝宗娣, 杨勋, 时杰, 等. 微藻生物柴油的研究进展[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(2): 282-288.
- [27] 李贵丽, 韩志萍, 魏晓奕, 等. 能源微藻油脂积累及油脂含量检测技术研究进展[J]. 广东农业科学, 2018, 45(10): 134-142.
- [28] 石油化工科学研究院. 石油产品酸值测定法 GB/T 264-1983 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1983: 31-32.
- [29] 石油化工科学研究院. 轻质石油产品酸度测定法 GB/T 258-2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1-4.
- [30] 中国石油天然气股份有限公司兰州润滑油研究开发中心. 石油产品酸值的测定电位滴定法 GB/T 7304-2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 1-15.
- [31] 中国石油天然气股份有限公司润滑油分公司兰州润滑油研究开发中心. 石油产品和润滑剂酸值和碱值测定法(颜色指示剂法) GB/T 4945-2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 1-6.
- [32] 石油化工科学研究院. 喷气燃料总酸值测定法 GB/T 12574-1990 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1990: 77-79.
- [33] 中国石油大学(华东). 原油酸值的测定电位滴定法 GB/T 18609-2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 1-9.
- [34] American Society of Testing Materials (2018) Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration ASTM D 664.
- [35] American Society of Testing Materials (2014) Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration ASTM D 974.
- [36] American Society of Testing Materials (2017) Standard Test Method for Acidity in Aviation Turbine Fuel ASTM D 3242-11.
- [37] 赵月明. 石油产品中硫含量的检测分析[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学化工学院, 2013.
- [38] 中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院. 汽油、煤油、喷气燃料和馏分燃料中硫醇硫的测定电位滴定法 GB/T 1792-2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-7.
- [39] 魏宇彤, 田松柏, 王小伟. 轻质石油馏分中总活性硫值的测定电位滴定法 NB/SH/T 0915-2015 [S]. 北京: 国家能源局, 2016: 1-5.
- [40] 兰淑惠, 梁德荣, 杨波, 等. 电位滴定法测定石油产品中硫醇硫含量的测量不确定度评估[J]. 广东化工, 2017, 44(18): 31-32.
- [41] 赵静, 高亚楠, 陈刚, 等. 煤中氯离子含量测定方法比较研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(6): 300-302.
- [42] 张泽, 赵洪君, 孟洁, 等. 生物质的热解及生物油提质的研究进展[EB/OL]. 中国知网: 中国学术期刊(网络版). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.X.20201015.1649.002.html>, 2020-10-16.
- [43] 来冬梅. 木质素中氯离子的测定方法探讨[J]. 应用化工, 2012, 41(12): 2176-2179.
- [44] 煤炭科学研究总院检测研究分院. 煤中氯的测定方法 GB/T 3558-2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 1-8.
- [45] 马旭艳. 煤炭中氯的测定[J]. 大众标准化, 2017(11): 39-41.
- [46] 李权斌. 氧弹燃烧-电位滴定法测定煤中氯[J]. 岩矿测试, 2006, 25(1): 79-81.
- [47] 闫玉, 赵志荣, 袁宁, 等. 电位法测定氯离子含量实验条件的探讨[J]. 盐科学与化工, 2017, 46(5): 28-30.
- [48] Conrad, F.J. (1971) Potentiometric Titration of Cyanide and Chloride, Using the Silver Specific-Ion Electrode as an Indicator. *Talanta*, **18**, 952-955. [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(71\)80153-4](https://doi.org/10.1016/0039-9140(71)80153-4)
- [49] 林盼盼, 杨柳, 费延梅. 关于电位滴定法测定氯离子的探讨[J]. 水泥工程, 2019(2): 64-65.
- [50] 关宇. 重质液体石蜡溴值测定方法的研究[J]. 石化技术, 2020(3): 186+40.

- [51] 沈桃英, 马琳, 彭永加, 等. 影响电位滴定法测定石油产品溴值准确度的原因及提高方法[J]. 分析仪器, 2012(3): 59-61.
- [52] 王华. 石脑油溴值测定条件的控制[J]. 石化技术, 2017, 24(7): 290.
- [53] 锦州石油化工公司炼油厂. 石油产品溴值测定法 SH/T0236-1992 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1992: 727-729.
- [54] 胡建军. 总溴含量的测定方法[J]. 聚酯工业, 2020, 33(3): 46-47.
- [55] 薄玉华, 张保利, 宋桂琴, 等. 检测高浓度甲醇在电位滴定法中的应用[J]. 化工管理, 2015(5): 123-124.
- [56] 石油化工科学院. 轻质石油产品碘值和饱和烃含量测定法(碘-乙醇法) SH/T 0234-92 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1992: 724-726.
- [57] 周留富. 采用自动电位滴定法测定轻柴油碘值的研究[J]. 化学工业与工程技术: 检测与分析, 2006, 27(4): 53-56.
- [58] 卜魁勇, 贺承祖, 赵波, 等. 原油总碱值测定方法初探[J]. 中国石油和化工标准与质量: 油气冶炼, 2013(18): 254.