DOI: 10.19666/j.rlfd.202505088

发电厂尿素水解制氨系统中尿素氯化物含量测定方法的研究

曹松彦[1]，马珍珍[1]，李 杰[2]，乔 越[1]，杨 俊[1]，陈文中[3]，
韩 霜[1]，马翼超[1]，王 彤[1]，宋 飞[1]
（1. 西安热工研究院有限公司，陕西 西安 710054；
2. 华能重庆珞璜发电有限责任公司，重庆 402000；
3. 湛江中粤能源有限公司，广东 湛江 524012）

［摘 要］研究建立了一种基于氯化银分光光度法测定尿素中氯化物质量浓度的新方法。该方法具有操作简单、快速等特点，一组尿素样品中的氯化物检测可在 20 min 内完成。检测范围在 0.07~2.00 mg/L，检出限为 0.02 mg/L，针对氯离子质量浓度约 0.05 mg/L 的 10%尿素溶液进行 18 次重复检测。结果显示，相对标准偏差为 8.30%，对 10%尿素溶液的氯离子检测回收率在 86%~110%。该方法准确度、灵敏度均满足火电厂对尿素水解制氨系统用尿素质量的要求，可作为尿素中氯化物含量的测定方法。

［关 键 词］尿素水解制氨；尿素质量；氯化物；分光光度法

［引用本文格式］曹松彦，马珍珍，李杰，等. 发电厂尿素水解制氨系统中尿素氯化物含量测定方法的研究[J]. 热力发电，2026, 55(3): 158-164. CAO Songyan, MA Zhenzhen, LI Jie, et al. Research on the determination method of chloride content in urea for hydrolysis-based ammonia production systems in power plants[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(3): 158-164.

Research on the determination method of chloride content in urea for hydrolysis-based ammonia production systems in power plants

CAO Songyan[1], MA Zhenzhen[1], LI Jie[2], QIAO Yue[1], YANG Jun[1], CHEN Wenzhong[3], HAN Shuang[1], MA Yichao[1], WANG Tong[1], SONG Fei[1]
(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
2. Huaneng Luohuang Generation Co., Ltd., Chongqing 402000, China;
3. Zhanjiang Zhongyue Energy Co., Ltd., Zhanjiang 524012, China)

Abstract: In-factory testing of chloride ions in urea for urea-to-ammonia hydrolysis systems in power plants is a crucial task, and how to quickly and accurately detect chloride ions content remains an urgent problem to be solved. This study has proposed a new method for determining the mass concentration of chlorides in urea using silver chloride spectrophotometry. This method is simple and fast, capable of detecting the chloride content in a set of urea samples in about 20 minutes, with a detection range of 0.07 mg/L to 2.00 mg/L and a detection limit of 0.02 mg/L. Eighteen repeated tests were conducted on a 10% urea solution with a chloride ion mass concentration of approximately 0.05 mg/L. The results indicated a relative standard deviation of 8.30%. The recovery rate of spiked tests in the 10% urea solution ranged from 86% to 110%. Both the accuracy and sensitivity of this method meet the quality requirements for urea used in the urea-to-ammonia hydrolysis systems in thermal power plants, making it a suitable method for determining chlorides in urea.

Key words: urea hydrolysis for ammonia production; quality of urea; chloride; spectrophotometry

火力发电厂烟气脱硝装置用于除去烟气中 NO_x。早期投运的选择性催化还原法（Selective catalytic reduction，SCR）烟气脱硝装置一般采用液氨作为还原剂[1]，但液氨属于重大危险品，在运输、

收 稿 日 期：2025-5-27 修 回 日 期：2025-06-11 接 受 日 期：2025-06-25
第一作者简介：曹松彦（1981），女，硕士研究生，高级工程师，主要研究方向为火力发电厂防腐防垢技术，caosongyan@tpri.com.cn。
通信作者简介：马珍珍（1995），女，硕士研究生，工程师，主要研究方向为火力发电厂防腐防垢技术，mazhenzhen@tpri.com.cn。

储存和使用过程中存在较大的安全隐患，一旦发生泄漏事故，将对环境和公众健康带来严重后果[1-4]。因此，国家能源局连续几年发布了尿素制氨替代液氨装置工程改造要求，并要求于 2024 年底完成。

根据分解原理不同，尿素制氨技术可分为水解制氨法和热解制氨法两大类。两者相比，水解制氨法尿素转化为氨的效率较高，系统能耗低，后期维护投入相对较少，目前已经有越来越多的电厂采用该工艺[5-7]。尿素水解制氨原理如下[8]：

$$CO(NH_2)_2+H_2O\leftrightarrow NH_2\text{-}COO\text{-}NH_4\leftrightarrow 2NH_3\uparrow+CO_2\uparrow \quad (1)$$

尿素水解制氨装置所产生的气体（产品气）为 NH_3、CO_2 和 H_2O（水蒸气），尿素水解制氨设备运行温度一般在 140~160 ℃，压力约为 0.6 MPa[9-10]。正常运行情况下，产品气对杂质离子的携带量非常少，在尿素水解器制氨系统运行过程中，尿素水解器就如同发电机组的汽包，水解器内部一直进行的是一个杂质离子（如氯离子、硫酸根离子等）不断浓缩的过程，这给设备长期稳定运行带来一定的风险[5-6,11]。经推算，在产品气对氯离子的携带质量分数为 0.01%，每周排污量为 2.50%时，保持尿素水解器溶液中氯离子质量分数小于 200 mg/L，维持运行 100 天左右，则需要控制尿素中氯离子质量浓度小于 0.000 1%（1 mg/kg 尿素，50%尿素溶液中氯离子质量浓度约 0.57 mg/L），对尿素中氯离子质量浓度的要求非常严格。

目前，由于火电厂液氨改尿素项目逐渐完成，燃煤机组尿素制氨系统对尿素的需求量非常大，每隔 1、2 天需购入一批尿素。为减少袋装尿素在搬运、储存和使用过程中需要消耗大量人力的情况，各电厂基本选择罐车装尿素气力输送的方式，导致专用尿素车运力缺口较大，各种罐车能运则运，罐车上一次装运工业盐且未排放干净，又继续装运尿素的情况时有发生，容易导致尿素质量不合格，在役尿素水解制氨设备已经发生了多起腐蚀、结垢、积盐事故[9,12]。如尿素质量不合格导致水解器换热管上出现氯化钠结晶物质（图 1），影响水解器的换热效率，影响脱硝系统的正常运行；更严重的是大量氯离子导致 316L 不锈钢水解器的晶间腐蚀、应力腐蚀破裂等[13-15]（图 2）。

根据分析，尿素水解制氨装置换热管发生腐蚀破裂及表面结晶原因主要与进厂尿素中含有过多的氯化物有关。2021 年 5 月，某两家电厂均发现脱硝尿素水解制氨系统水解器内换热管上出现了结晶物质，对结晶物质进行取样分析。其中一家电厂分析发现结晶物质中氯离子质量分数为 60.0%、钠离子质量分数为 35.5%；另一家电厂分析发现结晶物质中氯离子质量分数为 57.8%，500 ℃条件下灼烧减量 9.7%。判断两个厂结晶物质的主要成分均为氯化钠，这种水解器换热管上的氯化钠结晶物质不仅会影响水解器的换热效率，还影响脱硝系统的正常运行，严重时甚至导致脱硝系统停运。因此，对尿素中杂质氯离子的入厂验收检测尤为重要。



图 1 某电厂尿素水解器盘管沉积结晶物（NaCl）
Fig.1 The crystals (NaCl) deposited on urea hydrolyzer coil of a power plant



图 2 某电厂尿素水解器盘管应力腐蚀破裂（Cl^-导致）
Fig.2 The stress corrosion rupture of urea hydrolyzer coil in a power plant (caused by Cl^-)

1 存在问题

目前，常用的氯离子检测方法主要包括摩尔滴定法、电位滴定法、共沉淀富集分光光度法、硫氰酸汞分光光度法、离子色谱法和氯化银比浊法等[16-21]。摩尔滴定法和电位滴定法虽然操作简单，但是方法灵敏度较低，由于尿素水解制氨系统水样中铵根离子的影响，存在尿素水解器排污水中氯离子检测存在偏差大，检出限不满足要求，达不到滴定终点等问题。共沉淀富集分光光度法和硫氰酸汞分光光度法虽然灵敏度较高，但是实验方法较为复杂，而且需用到硫氰酸汞、磷酸铅等有毒试剂。氯化银比浊法操作简单，但是仅能测出氯离子的含量范围，不能给出具体检测数值。离子色谱仪通过梯度淋洗测定的方法可以快速、准确地检测出尿素中的氯离子含量，但是多数电厂未配备该仪器，或者

离子色谱仪不具备梯度淋洗功能，因此离子色谱法也不能作为通用的检测手段。

根据《化学试剂脲（尿素）》（GB/T 696—2008）规定的氯离子测定方法[22]，参考《镍钴铝三元素复合氢氧化物化学分析方法第 4 部分：氯离子含量的测定氯化银比浊法》（YS/T 1445.4—2021）[20]，分析得出，一定质量浓度的氯化银在一定 pH 值范围内可以形成相对稳定且均匀的悬浊液，悬浊液对光强度的吸收与氯化银的质量浓度成正比。该方法灵敏度基本可以满足对尿素中氯离子质量浓度控制要求。

2 实验条件

2.1 实验原理

氯离子在硝酸介质中与硝酸银反应，生成难溶的氯化银，当氯化银质量浓度较低时（1.0~8.0 μg/mL），在一定的波长范围内，氯化银的质量浓度与吸光度成一定比例关系，符合朗伯－比尔定律 $A=kcL$（A 为吸光度，k 为比例系数，c 为物质-氯化银的浓度，L 为光程长-比色皿的长度）。

2.2 主要仪器和试剂

分光光度计为 50 mL 具塞比色管，30、100 mm 比色皿。实验用试剂包括：氯离子标准溶液（氯离子贮备液（1 mL 含 1 mg Cl^-）、氯离子标准溶液 1（1 mL 含 0.025 mg Cl^-）；氯离子标准溶液 2（1 mL 含 0.010 mg Cl^-））；硝酸溶液（质量分数为 25%）；硝酸银标准溶液（质量浓度为 17 g/L）；高纯水。

2.3 实验步骤

准确量取一定体积的氯离子标准溶液或待测样品溶液加入至 50 mL 比色管中，加水稀释至 40 mL 左右，加入 2 mL 硝酸溶液，再加入 2 mL 硝酸银标准溶液，加水至标线后摇匀，静置一段时间，于分光光度计上测量。

2.4 确定波长

配制氯离子质量浓度为 1 mg/L 的 AgCl 悬浊液，按步骤加入硝酸和硝酸银，摇匀放置一段时间后，倒入 100 mm 比色皿中，在普析 TU1901 型双光束紫外可见分光光度计中进行波长扫描，具体光谱扫描曲线如图 3 所示。由图 3 可以看出，溶液的吸光度随波长增加逐渐减小，没有出现峰值，500~820 nm 吸光度相对稳定，此时可以认为扫描起始波长 360 nm 的情况下，测试灵敏度最高，吸光度最大，360 nm 已经在近紫外区（可见光波长 400~750 nm）。但灵敏度高时，容易出现重现性和稳定性不足的问题，为此针对不同的波长 360、420、660、810 nm（近红外区）进行实验，实验结果如表 1 所示。由表 1 可以看出，波长增大时，低质量浓度的氯离子灵敏度偏低，360 nm 波长时灵敏度最高，考虑其属于近紫外区，因此本次实验确定波长为 420 nm，质量浓度为 0~2 mg/L。

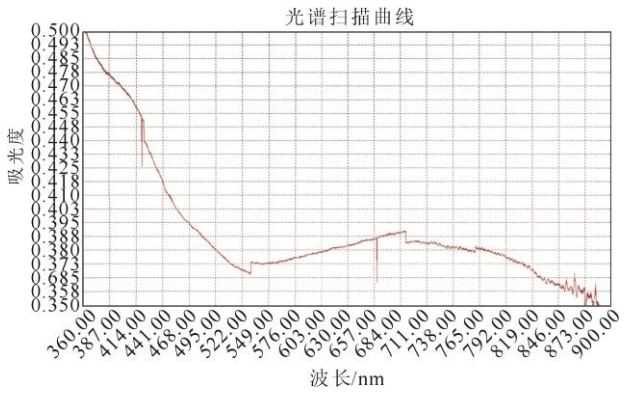


图 3 光谱扫描曲线（1 mg/L Cl^-的 AgCl 悬浊液）
Fig.3 Spectral scan curve (1 mg/L Cl^--AgCl suspension)

表 1 实验不同波长下吸光度（L=100 mm）
Tab.1 The absorbance at different wavelengths (L=100 mm)

项目	波长/ nm			
	360	420	660	810
氯离子质量浓度为 0 时吸光度	0.037	0.024	0.014	0.010
	0.036	0.024	0.014	0.010
	0.038	0.025	0.015	0.011
氯离子质量浓度为 0.2 mg/L 时吸光度	0.161	0.120	0.054	0.035
	0.161	0.121	0.055	0.035
	0.162	0.121	0.055	0.036
氯离子质量浓度为 0.4 mg/L 时吸光度	0.292	0.225	0.105	0.068
	0.293	0.226	0.106	0.068
	0.293	0.226	0.106	0.068
氯离子质量浓度为 0.6 mg/L 时吸光度	0.364	0.282	0.239	0.189
	0.363	0.282	0.239	0.190
	0.364	0.282	0.240	0.190
氯离子质量浓度为 1.0 mg/L 时吸光度	0.565	0.459	0.386	0.343
	0.564	0.458	0.386	0.344
	0.564	0.459	0.386	0.344
氯离子质量浓度为 2.0 mg/L 时吸光度	0.974	0.865	0.606	0.502
	0.970	0.864	0.607	0.503
	0.969	0.864	0.608	0.505

2.5 确定反应时间

将悬浊液加入至 100 mm 比色皿中，放入分光光度计进行检测，检测时间为 1 800 s，吸光度随时间变化曲线如图 4 所示。在避光静置下，氯化银悬浮液的吸光度光谱随时间的推移而不断变化，但是

其变化速率呈下降趋势。经过一段时间后，吸光度变化曲线趋于相对稳定状态。根据 DLVO 理论，氯化银悬浮液中氯化银胶粒随着时间的变化聚集变大，当范德华引力和双电层产生的静电斥力之间平衡时，氯化银悬浮液趋于稳定。上述吸光度随时间的变化曲线与胶体颗粒聚集的变化趋势一致。从图 4 可以看出，在约 900 s（15 min）时，样品的吸光度稳定在一定范围，且稳定时间大于 30 min。因此，确定本文测定方法静置时间为 15 min。

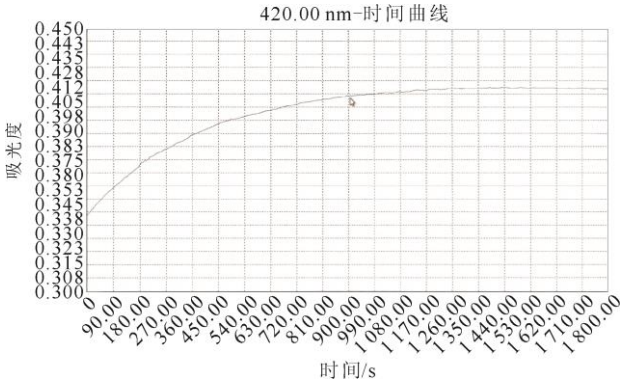


图 4 波长 420 nm 下吸光度随时间变化曲线
Fig.4 The absorbance curve over time at a wavelength of 420 nm (1 mg/L Cl^--AgCl suspension)

2.6 确定实验 pH 值

硝酸介质中溶液的 pH 值对氯化银的化学形态存在一定影响。陈文博[23]在硝酸介质中，以聚乙二醇 4000 作为分散剂，在一定体积氯化钠标准溶液中，分别加入不同体积的硝酸溶液，间隔相同时间采集氯化银悬浮液的消光光谱，对不同 pH 值下氯化银悬浮液的稳定性进行了研究。结果发现：在低 pH 值下，氯化银悬浮液的消光光谱随时间不断变化；随着 pH 值的升高，氯化银悬浮液的消光光谱变化速率逐渐减缓，当 pH 值达到 4 之后，氯化银悬浮液的消光光谱随时间的变化保持相对稳定。因此，以聚乙二醇 4000 作为分散剂时，溶液的 pH 值是影响氯化银悬浮液稳定性的主要因素。

本次实验通过向 10%尿素溶液体系中加入氯离子标准溶液，分别制备氯离子质量浓度 2、1 mg/L 的 10%尿素溶液，通过改变加入水样中硝酸溶液的体积调节 pH 值进行实验研究，发现溶液 pH 值对氯离子质量浓度的测定结果存在一定影响，具体结果如表 2 和表 3 所示。可以看出，在本次实验中，氯化银在强酸性溶液中稳定性更好，因此确定该测定方法的 pH 值为 0.5~1.5。

表 2 不同 pH 值下氯离子质量浓度日立 U2900 分光光度计测定结果
Tab.2 The mass concentrations of chloride ions detected by Hitachi U-2900 spectrophotometer at different pH values

pH 值	A_0	As	As-A_0	氯离子质量浓度/(mg L^{-1})
5.39	0	0.194	0.194	1.21
3.42	0.001	0.183	0.182	1.14
2.63	0.002	0.215	0.213	1.33
2.20	0.003	0.285	0.282	1.76
1.99	0.003	0.299	0.296	1.85
1.41	0.003	0.314	0.311	1.95
1.26	0.001	0.317	0.316	1.98
1.13	0	0.311	0.311	1.95
1.06	0	0.302	0.302	1.89
0.89	0.001	0.307	0.306	1.92

注：10%尿素溶液中 2 mg/L 氯离子测定，L=30 mm。

表 3 不同 pH 值下氯离子 723C 分光光度计测定结果
Tab.3 The mass concentrations of chloride ions detected by 723C spectrophotometer at different pH values

pH 值	As-A_0	氯离子质量浓度/(mg L^{-1})
1.35	0.174	1.09
1.09	0.169	1.06
0.86	0.174	1.09
0.64	0.157	0.98
0.50	0.157	0.98

注：10%尿素溶液中 1 mg/L 氯离子测定，L=30 mm。

3 方法检出限和准确度

3.1 标准曲线的绘制

分别取氯离子标准溶液 1（2.2 部分）0、0.50、1.00、2.00、3.00、4.00、5.00 mL 加入 50 mL 比色管中，用试剂水稀释至 40 mL 左右，加入 2 mL 硝酸溶液，再加入 2 mL 硝酸银标准溶液，用试剂水稀释至刻度，摇匀后在暗处静置 15 min。以试剂水为参比，于 420 nm 波长处，用 30 mm 比色皿测定吸光度，以氯离子质量浓度 C_x 为纵坐标，以吸光度ΔA 为横坐标，绘制标准曲线（图 5）。该曲线 C_x= 6.638 1ΔA+0.002 1（ΔA=A_s－A_0，A_s 为标准样品吸光度，A_0 为试剂空白吸光度），线性相关系数 R^2=0.999 8。用 100 mm 比色皿进行测定，标准曲线为 C_x=2.012 3ΔA–0.000 2，线性相关系数 R^2=0.999 8。当样品中氯离子质量浓度小于 0.1 mg/L 时，使用 50 mm 或 100 mm 的比色皿测定。

3.2 方法检出限

由《生活饮用水标准检验方法第 3 部分：水质分析质量控制》（GB/T 5750.3—2023）第 6.4.2.1 节[24]可知，“分光光度法通常以吸光度（扣除空白）为

0.010 相对应样品中的浓度值为方法检出限”。《环境水质监测质量保证手册》第八章[25]测定限中指出，建议以 3.3 倍检出限浓度作为测定下限（在测定误差能满足预定要求的前提下，用特定方法能够准确地定量测定待测物质最小浓度或量，成为该方法的测定下限），其测定值的相对标准偏差约为 10%。

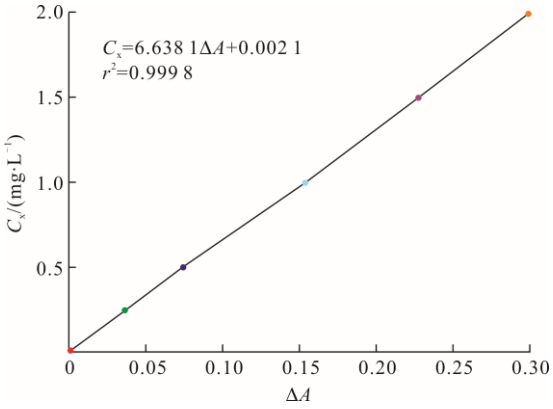


图 5 标准工作曲线（30 mm 比色皿）
Fig.5 Standard working curve (30 mm cuvette)

当吸光度（扣除空白）为 0.010 时，对应样品中的质量浓度为 0.020 mg/L，则此方法的检出限约为 0.020 mg/L，测定下限约为 0.066 mg/L，测定范围为 0.066~2.000 mg/L。移取氯离子标准溶液 1（2.2 部分）10 mL 加入到 1 000 mL 容量瓶中定容，得到 0.25 mg/L 的氯离子标液，取 10 mL 加入至 50 mL 比色管中，用 10%的尿素溶液稀释至 40 mL 左右，加入 2 mL 硝酸溶液，再加入 2 mL 硝酸银标准溶液，用 10%的尿素溶液稀释至刻度，共测定 18 个平行样，结果如表 4 所示。参照《生活饮用水标准检验方法第 3 部分：水质分析质量控制》（GB/T 5750.3—2023）6.4 节，根据式(2)计算方法检出限[24,26]。

$$\mathrm{MDL}=2\sqrt{2}\times t_f\times S_{\mathrm{wb}} \tag{2}$$

式中：MDL 为方法检出限；t_f 表示显著性水平为 0.05（单侧）、自由度为 f 的 t 值；S_{wb} 为空白或接近空白的标准溶液平行测定的标准偏差；f 为批内自由度，$f=p(n-1)$，p 为批数，n 为每批平行测定个数。

由表 4 可知，氯离子质量浓度的平均值为 0.048 00 mg/L，标准偏差为 0.004 67 mg/L，方法检出限为 0.024 20 mg/L，这与以吸光度（扣除空白）为 0.010 时对应样品的质量浓度值的方法检出限基本一致。

表 4 检出限检测数据
Tab.4 The detection data of detection limit

A_x	A_x-A_0	溶液直接测量氯离子质量浓度/(mg L^{-1})
0.035	0.030	0.058
0.028	0.023	0.044
0.028	0.023	0.044
0.031	0.026	0.050
0.028	0.023	0.044
0.030	0.025	0.048
0.031	0.026	0.050
0.031	0.026	0.050
0.029	0.024	0.046
0.030	0.025	0.048
0.028	0.023	0.044
0.033	0.028	0.054
0.030	0.025	0.048
0.030	0.025	0.048
0.028	0.023	0.044
0.028	0.023	0.044
0.031	0.026	0.050
0.028	0.023	0.044

注：空白 A_0=0.005；t_f=1.833，S_{wb}=0.004 67，检出限 MDL=0.024 2 mg/L，相对标准偏差 8.30%（氯离子质量浓度 0.05 mg/L）。

3.3 方法的准确度

准确度用绝对误差或相对误差表示。准确度的评价方法有可用测量标准物质或以标准物质做回收率测定的办法评价分析方法和测量系统的准确度。本次实验采用回收率测定方法来评价方法准确度。即在样品中加入一定量的标准物质测定并计算得到其回收率 p[24]：

$$p=\frac{B_1-B_2}{M}\times 100\% \tag{3}$$

式中：B_1、B_2 分别为加标试样测定值、试样测定值；M 为加标量。

为确定硝酸银分光光度法测尿素中氯离子方法的准确度，对尿素溶液进行加标实验检测回收率，具体结果如表 5 所示。由表 5 可知分光光度法的回收率在 86%~110%。

表 5 回收率实验结果
Tab.5 Test results of recovery rate

编号	试样中氯离子质量浓度/(mg L^{-1})	加标氯离子质量浓度/(mg L^{-1})	溶液直接测量质量浓度/(mg L^{-1})	回收率/%
1	0.010 1	0.250 0	0.227 1	86.80
2	0.010 1	0.250 0	0.245 9	94.33
3	0.010 1	0.250 0	0.245 9	94.33
4	0.010 1	0.250 0	0.264 8	101.86
5	0.010 1	0.250 0	0.239 7	91.82
6	0.010 1	0.250 0	0.275 5	106.15

续表

编号	试样中氯离子质量浓度/(mg L^{-1})	加标氯离子质量浓度/(mg L^{-1})	溶液直接测量质量浓度/(mg L^{-1})	回收率/%
7	0.010 1	0.250 0	0.283 5	109.37
8	0.010 1	0.250 0	0.281 5	108.57
9	0.010 1	0.250 0	0.285 5	110.18
10	0.010 1	0.250 0	0.275 5	106.15

注：试样为 10%的尿素溶液；1—5 组数据为 30 mm 比色皿测得，6—10 组数据为 100 mm 比色皿测得。

3.4 实际样品氯离子质量浓度测定

为验证分光光度法的准确性，分别采用分光光度法和离子色谱法对尿素水解器水样中氯离子质量浓度进行检测对比，测量范围 60~7 500 mg/L，结果如表 6 所示。离子色谱法检测水样中氯离子灵敏度、准确度均较高，假设将离子色谱法的检测结果作为真实值来分析分光光度法测氯离子的准确度，分光光度法的检测相对误差在 1%~8%，即当检测水样中氯离子质量浓度为 200 mg/L 时，其真实值为 184~216 mg/L。

表 6 尿素水解器样品中氯离子质量浓度测定结果

Tab.6 Determination results of mass concentrations of chloride ions in urea hydrolyzer samples

水样编号	稀释倍数	分光光度法中氯离子质量浓度/(mg L^{-1})	离子色谱法中氯离子质量浓度/(mg L^{-1})	相对误差/%
1	100	66.85	68.02	–1.72
2	100	78.12	72.31	8.03
3	382.5	725.31	746.33	–2.82
4	500	772.72	816.60	–8.06
5	1 000	2 729.35	2 912.70	–5.43
6	10 000	7 311.00	7 847.30	6.83

4 结　语

本实验研究建立了氯化银分光光度法测定火电厂尿素水解系统水样中氯离子质量浓度的新方法，研究过程中通过对测定波长、反应时间和水样 pH 值进行实验优化，最终确定了测定波长为 420 nm，反应时间为 15 min，水样 pH 值在 0.5~1.5 时，方法的重现性和再现性更好，测定结果最佳。

该方法相较于传统的硝酸银滴定法、离子色谱法等其他的氯离子检测方法，具有操作简便快速、普遍适用等优点，在绘制好标准工作曲线后，大约每 20 min 可检测出 1 组数据。该方法检测范围为 0.02~2.00 mg/L，检出限约 0.02 mg/L，可准确检测 0.066 mg/L 的氯离子质量浓度，相对标准偏差小于 10%，通过对尿素溶液进行加标实验检测回收率，回收率在 86%~110%，能够满足发电厂尿素水解器制氨系统对入厂尿素验收的质量要求，有利于后期各发电厂对尿素中氯离子质量浓度的快速检测，为尿素水解制氨设备的安全稳定运行提供保障。

［参 考 文 献］

［1］ 徐康. 火力发电厂脱硝还原剂液氨改尿素工程工艺方案比选研究[J]. 化工设计通讯, 2024, 50(8): 119-122.
XU Kang. Comparative study on the process scheme of denitrification reducing agent liquid ammonia to urea in thermal power plant[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2024, 50(8): 119-122.

［2］ 黄纯琳, 曾峻鹏, 梁文钰. 电厂 SCR 脱硝系统液氨改尿素性能分析[J]. 中国环保产业, 2023(1): 57-62.
HUANG Chunlin, ZENG Junpeng, LIANG Wenyu. Performance analysis of liquid ammonia to urea in SCR denitrification system of power plant[J]. China Environmental Protection Industry, 2023(1): 57-62.

［3］ ZHANG X Y, ZHANG B, LU X, et al. Experimental study on urea hydrolysis to ammonia for gas denitration in a continuous tank reactor[J]. Energy, 2017, 126: 677-688.

［4］ 张香平, 孙力, 姚平经, 等. 扩展 UNIQUAC 方程求 NH_3-CO_2-H_2O-urea 体系液相活度系数的新方法[J]. 高校化学工程学报, 2002(4): 355-360.
ZHANG Xiangping, SUN Li, YAO Pingjing, et al. A new method to extend the UNIQUAC equation to calculate the liquid phase activity coefficient of NH_3-CO_2-H_2O-urea system[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese University, 2002(4): 355-360.

［5］ 周军. 尿素水解制氨技术在燃煤电厂中的应用[J]. 山东化工, 2022, 51(15): 136-138.
ZHOU Jun. Application of urea hydrolysis technology to ammonia in coal-fired power plants[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(15): 136-138.

［6］ 黄俊. 尿素热解制氨脱硝技术在电厂运维技术优化[J]. 化工设计通讯, 2023, 49(11): 1-3.
HUANG Jun. Optimization of urea pyrolysis to ammonia denitrification technology in power plant operation and maintenance technology[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2023, 49(11): 1-3.

［7］ 冯前伟, 张彭, 李存文, 等. 典型燃煤机组 SCR 脱硝还原剂尿素制氨技术经济比较分析[J]. 锅炉技术, 2022, 53(1): 76-80.
FENG Qianwei, ZHANG Peng, LI Cunwen, et al. Economic comparative analysis of ammonia production technology from urea, denitrification reductant, SCR of typical coal-fired units[J]. Boiler Technology, 2022, 53(1): 76-80.

［8］ 何文. 火电厂尿素水解制氨系统改造安全风险防控[J]. 电力安全技术, 2020, 22(12): 45-48.
HE Wen. Safety risk prevention and control of urea hydrolysis ammonia production system in thermal power plants[J]. Electric Safety Technology, 2020, 22(12): 45-48.

［9］ 张迪, 李奎, 但琴, 等. 尿素水解器的腐蚀原因分析试验及防腐措施[J]. 电力科技与环保, 2022, 38(5): 400-406.
ZHANG Di, LI Kui, DAN Qin, et al. Corrosion cause analysis test and anti-corrosion measures of urea hydrolyzer[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2022, 38(5): 400-406.

[10] SAHU J N, HUSSAIN S, MEIKAP B C. Studies on the hydrolysis of urea for production of ammonia and modeling for flow characterization in presence of stirring in a batch reactor using computational fluid dynamics[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2011, 28(6): 1380-1385.
[11] 陈文通, 樊帅军, 陈柳潼, 等. 尿素水解制氨系统问题分析与对策[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(增刊 2): 103-108.
CHEN Wentong, FAN Shuaijun, CHEN Liutong, et al. Analysis and countermeasures of urea hydrolysis ammonia production system[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(Suppl.2): 103-108.
[12] 赵海南. 尿素水解器泄漏导致汽水系统污染事故分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(6): 270-272.
ZHAO Hainan. Analysis of the accident of contamination of the steam-water system due to the leakage of urea hydrolyzer[J]. Modern Industrial Economy and Informatization, 2024, 14(6): 270-272.
[13] LU J T, YANG Z, ZHANG B, et al. Corrosion behavior of candidate materials used for urea hydrolysis equipment in coal-fired selective catalytic reduction units[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(7): 3290-3296.
[14] ZHENG S Q, LI C Y, QI Y M, et al. Mechanism of (Mg, Al, Ca)-oxide inclusion-induced pitting corrosion in 316L stainless steel exposed to sulphur environments containing chloride ion[J]. Corrosion Science, 2013, 67: 20-31.
[15] MEGUID E A, GOUDA V K, MAHMOUD N A. Pitting corrosion behaviour of type SUS904L and SUS316L stainless steels in chloride solutions[J]. Materials Transactions, JIM, 1994, 35(10): 699-702.
[16] 工业循环冷却水和锅炉用水中氯离子的测定: GB/T 15453—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018: 3.
Determination of chloride ions in industrial circulating cooling water and boiler water: GB/T 15453—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018: 3.
[17] 火力发电厂水汽中氯离子的硫氰酸汞分光光度测定方法: DL/T 1203—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013: 3.
Spectrophotometric method for mercury thiocyanate of chloride ions in water vapor of thermal power plants: DL/T 1203—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013: 3.
[18] 工业循环冷却水及锅炉水中氟、氯、磷酸根、亚硝酸根、硝酸根和硫酸根的测定 离子色谱法: GB/T 14642—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013: 3.
Determination of fluorine, chlorine, phosphate, nitrite, nitrate and sulfate in industrial circulating cooling water and boiler water Ion chromatography: GB/T 14642—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013: 3.
[19] 化学试剂 氯化物测定通用方法: GB/T 9729—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 3.
Chemical reagents: general method for chloride determination: GB/T 9729—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007: 3.
[20] 镍钴铝三元素复合氢氧化物化学分析方法 第 4 部分: 氯离子含量的测定 氯化银比浊法: YS/T 1445. 4—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 3.
Methods for the chemical analysis of nickel-cobalt-aluminum three-element complex hydroxides: Part 4: Determination of chloride ion content Silver chloride turbidimetry: YS/T 1445. 4—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021: 3.
[21] 镍、钴、锰三元素氢氧化物化学分析方法 第 1 部分: 氯离子量的测定 氯化银比浊法: YS/T 928. 1—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013: 3.
Methods for the chemical analysis of nickel, cobalt, and manganese hydroxides: Part 1: Determination of the amount of chloride ions Silver chloride turbidimetry: YS/T 928. 1—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013: 3.
[22] 化学试剂 脲(尿素): GB/T 696—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 3.
Chemical reagent urea (urea): GB/T 696 — 2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 3.
[23] 陈文博. 基于氯化银悬浮液定量分析氯离子含量的消光光谱方法研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024: 5.
CHEN Wenbo. Study on extinction spectroscopy method for quantitative analysis of chloride ion content based on silver chloride suspension[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024: 5.
[24] 生活饮用水标准检验方法 第 3 部分: 水质分析质量控制: GB/T 5750.3—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023: 3.
Standard test methods for drinking water: Part 3: Quality control for water quality analysis: GB/T 5750.3 — 2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023: 3.
[25] 中国环境监测总站《环境水质监测质量保证手册》编写组. 环境水质监测质量保证手册[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 1994: 1.
Compilation Group of *Environmental Water Quality Monitoring Quality Assurance Manual* of National Environmental Monitoring Center. Environmental water quality monitoring quality assurance manual[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 1994: 1.
[26] 胡艳. 分光光度法测定生活饮用水中六价铬的方法验证[J]. 检测认证, 2024(2): 215-219.
HU Yan. Method validation for spectrophotometric determination of hexavalent chromium in drinking water[J]. Testing and Certification, 2024(2): 215-219.

（责任编辑 杨嘉蕾）