

## ICP-Mass Spectrometry

作者

Stan Smith

Ewa Pruszkowski, Ph.D.

PerkinElmer, Inc.  
Shelton, CT USA

## NexION 300 ICP-MS 技术分析电厂烟气 脱硫废水的优势

### 前言

去除火力发电厂排放的烟道气中的污染物，比如二氧化硫，最常用的一项技术是石灰石强制氧化洗涤系统。更常见的是烟道气脱硫（FGD），该过程使用气体洗涤器向烟道气上喷洒石灰石浆液，将二氧化硫气体转化为硫酸

钙。<sup>1</sup>令人遗憾的是，煤、石灰石和补充水中带入的污染物都将富集在洗涤系统所用的循环水中。因此，为了保持电站合适的操作条件，需要一直不断地将这些含有污染物的水从洗涤器中排放掉，同时向里面补充新的石灰石浆液。排放出的水酸性极强，并且石膏、重金属、碱土金属、氯化物和溶解的有机物浓度很高达到饱和。图1为一个典型的脱硫工艺示意图。

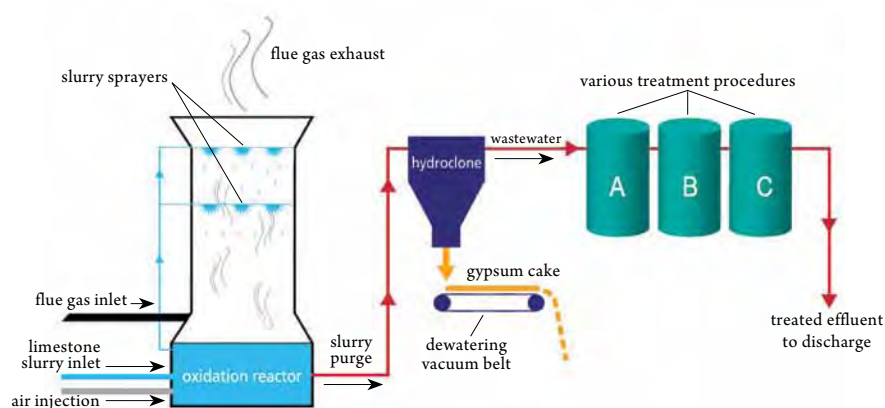


图1. 烟气脱硫 (FGD) 的过程。

州和联邦法律都对排入水道的烟气脱硫废水中的污染物浓度进行了规定。在某些情况下, 废水在经过诸如过滤去除悬浮固体和/或调节pH等小处理后可能就可以排放。但是, 在许多情况下, 需要对废水进行处理降低主要污染物的浓度。由于发电厂自有处理系统可能没有足够的能力, 或是不适合处理高氯离子含量的水, 洗涤器排放水的处理最常见的是在专门的污水处理厂。在某些情况下, 它可能只是不适合美国环境保护署 (EPA) 针对脱硫废水有可能会执行的非常严格的废水排放限制。

不同发电厂产生的烟道气脱硫废水 (FGDW) 的成分有很大差异, 具体成分主要取决于锅炉的容量、洗涤器中氯化物浓度、飞灰去除率、石膏脱水系统的效率、使用的脱硫工艺类型, 以及煤、石灰石和补充水的成分。美国EPA早在1982年就针对火力发电厂废水排放问题制定了废水排放限值。<sup>2</sup>由于在过去的几十年里, 火力发电行业发生了巨大变化, 尽管目前对空气污染的控制比以前更加有效, 但是这一规定, 即联邦法规40章第423款 (40 CFR Part 423) 已经不能满足实际的污染控制要求了。因而美国EPA最近开展了标准的修订工作, 预计将在2012年11月完成, 而新标准预计将在2014年4月生效。

## 美国EPA ICP-MS标准作业程序新草案

为了支持上述标准的修订, 美国EPA正在开发一种专门针对烟气脱硫废水检测的ICP-MS方法。<sup>3</sup>但令人遗憾的是, 这项技术检测烟气脱硫废水样品面临着很大的困难, 因为烟气脱硫废水中含有非常高浓度的溶解性固体物质, 这将对检测造成很大的困难, 而且每次获得的烟气脱硫废水样品中污染物成分和含量都不相同。这就意味着样品的基质成分, 如氯化物、硫酸盐和有机物, 是不断变化的, 这使得在实际分析烟气脱硫废水样品时非常具有挑战性。<sup>4</sup>

题为“标准作业程序: 电感耦合等离子体质谱法对烟气脱硫废水中痕量元素的测定”的新方法草案, 由美国环保署水工程和分析部办公室提出。该草案介绍了一种使用碰撞池/反应池技术的ICP-MS测定烟气脱硫废水中元素的方法及步骤。该方法主要参照方法200.8-“ICP-MS对地下水、地表水、饮用水和废水的测定”<sup>5</sup>和方法

1638-“ICP-MS对环境水样中痕量金属元素的测定”。<sup>6</sup>这两种检测方法都是为支持“清洁水法案”下水质方案而专门研究出来的。“清洁水法案”要求美国EPA制定出能够反映污染物对生态环境和人体健康影响的最新科学知识的水质标准。

该方法可用于测定酸消解后的烟气脱硫废水中的13种元素 (Al, As, Cd, Cr, Cu, Pb, Mn, Ni, Se, Ag, Tl, V 和 Zn), 并通过使用碰撞池/反应池模式消除离子干扰, 使用内标元素补偿由于样品基质所造成的抑制和增强效应。

## 最优化的分析方法

本研究的目的是验证按照新的美国EPA方法草案, 使用NexION® 300 ICP-MS技术 (美国康涅狄格州谢尔顿铂金埃尔默仪器有限公司) 测定烟气脱硫废水中元素的能力。虽然在公开文献中对NexION系列ICP-MS技术已有相关介绍,<sup>7</sup>但是还是很有必要对这项技术用于开展此类非常困难的分析工作所具有的优势进行概述。

NexION® 300 ICP-MS不仅配置了使用动能歧视 (KED) 的传统的、简单、便捷的碰撞池模式, 同时还配置了被公认具有卓越检出限的真正的反应池模式。通过使用专利的通用池技术 (Universal Cell Technology™ (UCT)), 分析人员现在在分析烟气脱硫废水样品时可以不使用气体类型的限制, 而根据每一个待测元素的特点选择最适合的碰撞池模式或反应池模式。NexION 300提供了以下3种去干扰模式:

- **标准模式:** 通用池内抽成真空。这保证了仪器是在真正的标准模式下运行, 并通过优化通用池的各项设置, 确保离子传输的最大化。对于分析烟气脱硫废水样品, 标准模式非常适合测定Pb和Tl这类几乎没有多原子离子光谱干扰的重金属元素。
- **碰撞模式:** 在这种模式下, 仪器提供了传统的动能歧视 (KED) 碰撞池。通过使用非反应性的气体, 如氦气 (He), 动能歧视 (KED) 碰撞模式可以去除许多由溶剂和氦气造成的简单的多原子离子光谱干扰。这使得它非常适合用于测定易产生较大横截面多原子离子干扰的元素, 例如Co, Ni, Cu和Zn。

- **反应模式:** 作为公认的检测能力最强的技术, 仪器真正的反应池模式, 也被称为DRC (动态反应池 Dynamic Reaction Cell™) 技术, 能够在基本或根本不损失待测元素灵敏度的情况下去除大部分的干扰。DRC技术配置了具有带通的扫描四级杆, 可以消除通用池中产生的副产物。因此可以使用任何反应气。并且, 通过优化通用池中四级杆的条件设置, 可以只允许我们感兴趣的元素通过进入主四级杆。众所周知, 分子离子的化学反应对于消除多原子干扰而言是最好的选择。<sup>8</sup>这种模式非常适合分析检出限可能最低的元素, 如Cr, V 和Mn, 这些元素也被认为是烟气脱硫废水样品复杂基质中最难测定的元素。

NexION还采用了独特的三锥接口 (TCI), 其中包括一个额外的超载取锥, 以更好的限定和聚集进入四极杆离子偏转器 (QID) 的离子束。不同于样品锥和截取锥, 即使是分析烟气脱硫废水样品, 基本也不需要进行维护。3个锥装卸、清洗或更换都非常快速和简单, 这一特点特别适合分析烟气脱硫废水这样高浓度基质组分的样品。

高度聚焦的离子束然后从三锥接口 (TCI) 进入到四极杆离子偏转器 (QID), QID被设计在一个专有化, 小型化的四极杆周围。这一突破性的过滤技术将离子束弯曲90度, 使得那些特定的质量聚集进入到通用池中, 同时将所有的中性物质都通过涡轮泵去除。通过四极杆离子偏转器 (QID) 的路径与从TCI出来的严格定义的光束对其, 这就确保了离子和中性物质永远不会对通用池内表面组成成分造成影响或降解, 因而也几乎消除了清洗的必要。通过去除大部分的颗粒, 中性物质和光子, 这种实用的设计最大限度地减少了漂移, 使得即使是在分析最难分析的烟气脱硫废水样品时仪器信号的稳定性也非常出色。

## 样品前处理方法

按照以下步骤进行样品前处理: 根据美国EPA方法1638-液体样品前处理-可回收金属总量-章节12.2.1-12.2.7, 首先将烟气脱硫废水样品稀释10倍, 然后进行电热板加热敞开式消解。样品、标准系列溶液和空白溶液最后都使用2% HNO<sub>3</sub> + 0.5% HCl定容。

## 仪器条件

本研究使用的仪器为装配有SC-DX FAST自动进样器 (美国内布拉斯加州奥马哈ESI) 的NexION 300D ICP-MS。虽然公开文献已有关于SC-DX FAST自动进样器的介绍,<sup>9,10</sup> 但是它基本上还是一个整合到自动进样器的快速流动注射技术, 可以显著减少测定前向ICP-MS输送新样品和测定后从ICP-MS去除前一个样品的时间。通过优化这些时间, 可以显著提高样品通量。因此, 使用本研究所用仪器对22种同位素重复测定3次仅需1.5分钟, 并且单个样品总的分析时间, 包括进样和洗针时间在内, 共需2.5分钟。ICP-MS仪器主要操作条件详见表1。

表1. 仪器操作条件

仪器部件/参数	类型/值/模式
雾化器	PFA ST
雾室	低温石英旋流雾室
三锥接口材料	镍
等离子体气流量	16.0 L/min
辅助气流量	1.2 L/min
雾化器流量	0.98 L/min
样品提升速率	270 µL/min
RF功率	1600 W
测定元素	Al, As, Cd, Cr, Cu, Pb, Mn, Ni, Se, Ag, Tl, V 和 Zn
内标	Sc, In, Ge (在线添加)
测定的同位素	22 (测定的元素和内标)
操作的模式	1. 标准模式 2. 碰撞模式/动能歧视 (氦气) 3. 反应模式 (氦气)
样品测定重复次数	3
测定时间 (重复3次)	1 min 30 sec
分析时间 (从一个样品到下一个样品)	2 min 30 sec

# 美国EPA关于烟气脱硫废水分析的方法草案

在对一批样品分析前, 应该按照一组类似于美国EPA其他ICP-MS分析方法中设计的协议 (如方法200.8) 一样进行仪器操作, 以确保仪器的性能达到最佳。11表2列举了这些协议的总结。每天都应按照表2中概述的分析顺序运行仪器, 以满足所有的质量控制要求。注意: 表中第一部分 (1-19步) 所列的样品一次运行流程中必须被分析一次, 而表中提到的10个样品和最终持续校准验证 (CCV) 和持续校准空白 (CCB) 必须重复分析。

表2. 烟气脱硫废水分析运行标准作业程序 (SOP) 顺序总结。

- 每个序列分析一次
- 必须重复
1. 打开仪器

2. 仪器预热

3. 仪器调谐

4. 质量校准

5. 分辨率检查

6. 验证调谐标准

7. 校准空白

8. 校准标准1

9. 校准标准的2

10. 校准标准的3

11. 根据需要分析更多的标准

12. 初始校准验证 (ICV)

13. 初始校准空白 (ICB)

14. 报告的检出限 (RL) 验证标准

15. 模拟烟气脱硫废水基质

16. 模拟烟气脱硫基质加标

17. 持续校准空白 (CCB) (持续检查)

18. 持续校准验证 (CCV)

19. 持续校准空白 (CCB)

20. 10个样品, 其中必须包含一个实验室控制样品 (LCS)、一个基质加标样品 (MS) 和基质加标重复样品 (MSD)

21. CCV

22. CCB

该方法步骤中设计的一些术语在这里也需要进行解释, 而实验得到的典型数据稍后将会呈现。

- **初始校准验证 (ICV)** : 使用已知浓度的多元素标准溶液验证仪器的校准曲线。该溶液浓度必须在曲线的中点附近, 且不与校准系列溶液浓度相同, 此外, 还必须为另外单独配制。
- **连续校准验证 (CCV)** : 使用已知浓度的多元素标准溶液对仪器每日连续工作性能进行监测和验证。具体监测为在每进样10次后和一次分析序列的最后都进样一次上述标准溶液。
- **报告的检出限 (RL) 验证标准**: 可以报告的具有一定可信水平的最低浓度。报告的检出限可以比较校准曲线系列标准溶液的最低浓度低。
- **实验室质量控制样品 (LCS)** : 将已知浓度的多元素标准溶液也进行与待测样品一样的样品前处理和分析过程。该标准溶液被用于验证方法在理想样品基质中的性能表现。
- **模拟烟气脱硫废水基质**: 根据已知的烟气脱硫废水中主要成分的典型浓度配制一份混合溶液。
- **基质加标 (MS)** : 向某一实验室强化样品 (LFS) 中加入一定浓度的想要测定的目标元素。该强化样品和其他样品一样经历全部的前处理分析过程。得到的结果以待测元素回收率的形式确定样品消解的效果和样品基质的影响。



该方法步骤在每日实验时都应该执行。仪器检出限 (IDLs) 必须每季度测定一次, 而方法检出限 (MDLs) 则是每年测定一次。需要重点强调的是, 每台仪器最初的IDL和MDL的测定必须在正式测定样品前就完成。仪器检出限 (IDLs) 和方法检出限 (MDLs) 按照下列方法计算:

- **仪器检出限 (IDL)**: 分别准备10份标准空白溶液。对于每种待测元素, 在不连续的三天时间里, 分析这10个标准空白溶液, 每个样品重复分析3次。仪器检出限 (IDLs) 等于10个标准空白溶液测定结果标准偏差的3倍, 结果单位使用 $\mu\text{g/L}$ 表示。
- **方法检出限 (MDL)**: 参照美国EPA联邦法规40章第136款附录B的规定, 分别配制7份浓度为3-5倍方法检出限浓度估计值的溶液。注意: 方法检出限测定用样品应该使用模拟的烟气脱硫废水基质进行配制。重复测定3次MDL标准溶液, 计算每个待测元素浓度值 (单位为 $\mu\text{g/L}$ ) 的标准偏差。方法检出限由自由度的t值 (即自由度为6时, t值为3.143) 乘以标准偏差计算得到。

## 分析结果

为了证明NexION 300D ICP-MS测定烟气脱硫废水样品的适用性, 本研究从上述方法步骤中选择了部分进行实验测试。

### 仪器检出限和方法检出限

使用NexION 300D ICP-MS对多种元素的仪器检出限和方法检出限进行了测定, 测定结果列于表3, 表3同时还列出了待测元素的质量数, 分析使用的内标和通用池模式。仪器检出限通过测定2%  $\text{HNO}_3$ /0.5%  $\text{HCl}$ 得到, 而方法检出限通过测定模拟烟气脱硫废水基质 (稀释校正) 得到。然而, 由于模拟的烟气脱硫废水中许多元素浓度都相对较高, 基质没有再加标进行方法检出限的测定。因此, 方法检出限与模拟烟气脱硫废水基质的污染物水平直接相关。

**表3. NexION300D ICP-MS测定烟气脱硫废水样品得到的仪器检出限 (IDLs) 和稀释校正的方法检出限 (MDLs), 以及待测元素的质量数, 使用的通用池模式和内标物质。**

测定元素/ 质量数 (amu)	模式	内标	IDL ( $\mu\text{g/L}$ )	MDL ( $\mu\text{g/L}$ )
Al - 27	标准	Sc	0.040	0.54
V - 51	反应	In	0.001	0.02
Cr - 52	反应	In	0.005	0.09
Mn - 55	反应	In	0.007	0.27
Ni - 60	碰撞	Ge	0.005	0.28
Cu - 63	碰撞	Ge	0.011	0.30
Zn - 66	碰撞	Ge	0.065	1.20
As - 75	碰撞	Ge	0.019	0.30
Se - 78	碰撞	Ge	0.190	2.20
Ag - 107	标准	In	0.001	0.03
Cd - 111	碰撞	Ge	0.007	0.10
Tl - 205	标准	In	0.001	0.01
Pb - 208	标准	In	0.002	0.20

### 模拟烟气脱硫废水样品

表4中列出了一种由美国EPA规定的典型的合成烟气脱硫废水基质。

**表4. 模拟烟气脱硫废水样品基质组分的典型浓度。**

基质	浓度(mg/L)
氯化物	5000
钙	2000
镁	1000
硫酸盐	2000
纳	1000
正丁醇	2000

表5列出了3种不同来源的模拟烟气脱硫废水基质，以强调各溶液（稀释校正）中元素污染程度的明显不同。

表5. 三种不同来源的模拟烟气脱硫废水基质，表示元素污染水平的不同。

测定元素 / 质量数 (amu)	模拟烟气脱硫废水#1 (µg/L)	模拟烟气脱硫废水#2 (µg/L)	模拟烟气脱硫废水#3 (µg/L)
Al - 27	36.4	5.33	7.16
V - 51	5.11	4.31	0.19
Cr - 52	2.97	0.76	1.38
Mn - 55	37.3	25.4	7.02
Ni - 60	4.36	7.44	1.42
Cu - 63	2.35	1.78	3.03
Zn - 66	5.84	27.6	9.26
As - 75	1.11	2.88	1.09
Se - 78	3.10	4.21	3.04
Ag - 107	0.22	2.33	0.31
Cd - 111	3.25	3.92	0.11
Tl - 205	0.19	0.94	0.05
Pb - 208	1.36	9.23	5.37

表6列出了待测元素加标浓度为40 µg/L的第三种来源的模拟烟气脱硫废水 (FGDW #3) 样品。注：首先将样品进行10倍稀释后再加标，然后在消解。这也是所谓的实验室强化样品 (LFS) 加标回收率实验，美国EPA对回收率的要求限值为±30%。由表6可以看出，LFS的回收率都很好的满足美国EPA的规定。

表6. 待测元素加标浓度为40 µg/L的模拟FGDW#3样品。

测定元素/质量数 (amu)	模拟烟气脱硫废水#3 (µg/L)	加标浓度 (µg/L)	加标回收率 (%)
Al - 27	7.16	40	111.1
V - 51	0.19	40	114.0
Cr - 52	1.38	40	106.8
Mn - 55	7.02	40	111.6
Ni - 60	1.42	40	100.1
Cu - 63	3.03	40	93.0
Zn - 66	9.26	40	94.0
As - 75	1.09	40	110.5
Se - 78	3.04	40	108.3
Ag - 107	0.31	40	90.0
Cd - 111	0.11	40	107.3
Tl - 205	0.05	40	102.6
Pb - 208	5.37	40	94.2

持续校准验证 (CCV) 标准

标准方法规定必须在每进样10次后和一次分析序列的最后都进样分析持续校准标准溶液，并且每个元素的回收率都必须在85-115%范围内。此外，在整个分析时间内，内标的回收率也必须达到60-125%。出于这个原因，仪器漂移指标很好的满足规定的要求，对已保证测定结果的准确性和精确性非常重要。考虑到这一点，本研究在4.5个小时内对110个烟气脱硫废水样品进行了分析，并在每分析10个样品后，测定一次CCV质量控制标准溶液（浓度为50 µg/L）。由图2可见，所有测定元素在这段时间的稳定性都不超过标准值的±15%。

在4.5个小时的实验过程中，选择<sup>115</sup>In, <sup>45</sup>Sc, <sup>72</sup>Ge作为内标进行监测。由图3可见，各内标元素的漂移性回收率都满足美国EPA60-125%的规定要求。

样品分析结果，基质加标 (MS) 和基质加标重复样 (MSD)

向所选样品的二次稀释液中加入浓度为40 µg/L的待测元素制得基质加标 (MSs) 溶液。而基质加标重复样 (MSDs) 则由所选样品的三次稀释液按照同样的方法加标得到。MSs和MSDs和其他样品一样进行前处理和分析。每分析10个样品后，测定一次MSs和MSDs，并且回收率不超出70-130%的范围，相对差异百分比 (RPD) 不超过20%。

表7、8、9分别列出了3个实际烟气脱硫废水样品、MS/MSD，以及RPD的测定结果。表中的结果由样品经过10倍稀释后测得的，并且加标浓度均为40 µg/L。由表7、8、9可见，三个样品的加标回收率都很好的满足了美国EPA规定的70-130%要求（除了元素Se，回收率为132.5%），而且RPD值都小于6%，远低于美国EPA规定的20%。由表9可见，样品#3没有Mn的回收率数据，主要是因为与样品中原有的Mn浓度相比，加标40 µg/L浓度太低。

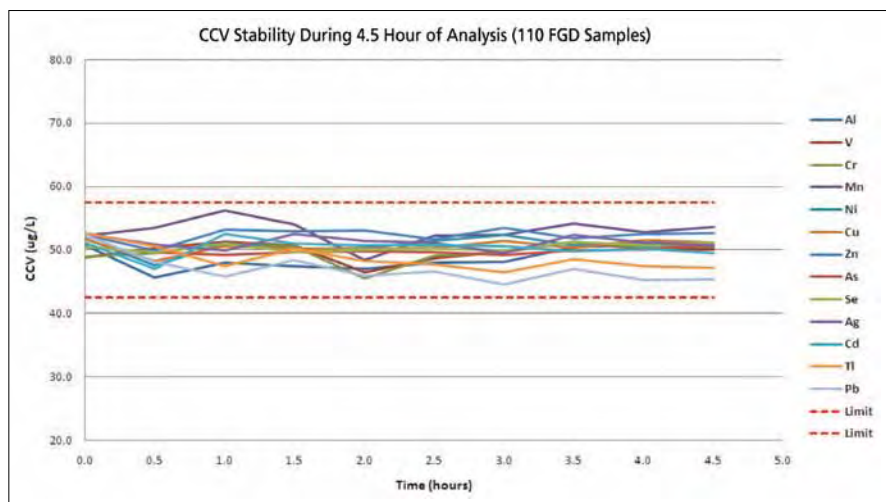


图2. 在4.5小时稳定性试验中, 每分析10个实际烟气脱硫废水样品后测定一次CCV标准溶液(所有元素的浓度均为50 µg/L)。在这段时间内共对110个样品进行了分析。

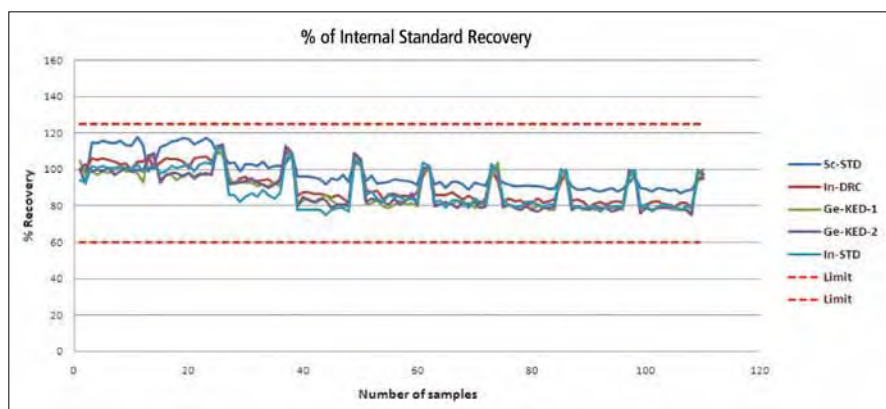


图3. 4.5小时长期稳定性试验中内标回收率。

表7. 实际烟气脱硫废水样品#1的MS/ MSD和RPD测定结果。

测定元素/质 量数 (amu)	样品#1 (µg/L)	样品 # 1 加标 (µg/L)	样品 # 1 加标 重复样 (µg/L)	RPD (%)	加标回收率 (%)
Al - 27	18.5	58.5	59.1	1.0	99.9
V - 51	1.46	47.1	48.6	3.1	114.2
Cr - 52	1.59	45.1	45.7	1.3	108.7
Mn - 55	10.1	53.7	54.6	1.6	109.0
Ni - 60	0.33	39.8	39.2	1.5	98.6
Cu - 63	0.11	38.4	38.2	0.5	95.6
Zn - 66	1.14	41.4	42.3	2.1	100.7
As - 75	0.50	40.9	40.9	0.1	101.0
Se - 78	47.8	100.8	99.4	1.4	132.5
Ag - 107	<0.003	34.9	33.7	3.3	87.1
Cd - 111	<0.01	40.6	40.8	0.5	101.4
Tl - 205	1.10	38.6	37.5	2.7	93.7
Pb - 208	0.007	34.8	33.7	3.1	86.9

## 结论

烟气脱硫废水样品对于ICP-MS而言是最难分析的样品之一。样品中极高浓度的硫酸盐、氯化物、碱/碱土/重金属和有机物会对分析造成许多问题。其中一个问题为基质成分浓度太高会对进样产生严重影响，除非采取必要的进样的步骤。另外，溶解固体总量较高的基质成分可能会沉积在锥的接口处从而造成严重的信号漂移。样品中极高浓度的碳也会对等离子体中的离子化温度产生影响，导致待测元素的信号受到抑制或增强。除了以上可能会造成的影响，最后，高浓度的氯化物、硫酸盐和碳在等离子体中会产生离子，并与氩气，溶剂和酸等引入的离子结合，将会对许多待测元素产生严重的多原子离子干扰。

鉴于以上原因，分析人员利用所有必要的工具将这些潜在的干扰降到最低对于分析而言至关重要。本研究表明NexION 300D ICP-MS具有多种先进的消除干扰的方式，可以按照美国EPA方法对烟气脱硫废水样品进行准确分析。从不连续快速进样，通过三锥接口将漂移降到最低，到通用池减少或消除许多严重的质谱干扰，NexION300D ICP-MS在长时间运行中能够产生高质量、稳定的信号。并且四极杆离子偏转（QID）可以实现离子通量的最大，同时还保持极低的背景水平。本研究证明了配置了SC-DX FAST 系统的NexION300D ICP-MS是满足难分析样品准确测定需求的理想选择。

表8.实际烟气脱硫废水样品#2的MS/ MSD和RPD测定结果。

测定元素/质量数 (amu)	样品#2 (μg/L)	样品 # 2 加标 (μg/L)	样品#2加标重复样 (μg/L)	RPD (%)	加标回收率 (%)
Al - 27	16.6	55.9	56.6	1.3	98.3
V - 51	0.19	46.0	44.8	2.8	114.6
Cr - 52	0.19	43.6	43.2	0.8	108.5
Mn - 55	1.81	44.7	45.0	0.7	107.2
Ni - 60	4.96	45.6	45.0	1.2	101.5
Cu - 63	2.24	39.5	38.4	2.7	93.1
Zn - 66	1.74	40.4	38.8	3.9	96.6
As - 75	0.40	44.8	44.6	0.5	111.0
Se - 78	36.5	84.2	81.1	3.7	119.3
Ag - 107	<0.003	35.6	37.2	4.5	89.0
Cd - 111	<0.01	42.0	40.4	3.9	105.1
Tl - 205	0.03	42.1	43.6	3.6	105.2
Pb - 208	0.09	39.3	41.2	4.6	98.1

表9.实际烟气脱硫废水样品#3的MS/ MSD和RPD测定结果。

测定元素/质量数 (amu)	样品#3 (μg/L)	样品 # 3 加标 (μg/L)	样品#3加标重复样 (μg/L)	RPD (%)	加标回收率 (%)
Al - 27	4.82	40.2	40.9	1.7	88.5
V - 51	0.04	44.3	44.1	0.4	110.7
Cr - 52	0.09	42.3	42.7	1.0	105.5
Mn - 55	2191	2194	2227	1.5	N/A
Ni - 60	0.74	40.3	39.3	2.3	98.8
Cu - 63	0.04	35.6	35.3	0.7	88.9
Zn - 66	0.42	36.3	37.1	2.1	89.7
As - 75	0.60	43.8	43.5	0.7	108.0
Se - 78	17.8	64.0	60.5	5.5	115.5
Ag - 107	<0.003	34.1	34.6	1.6	85.2
Cd - 111	<0.01	40.7	40.5	0.5	101.7
Tl - 205	1.10	44.1	44.3	0.5	107.5
Pb - 208	<0.02	38.7	39.3	1.5	96.7

N / A =不适用，因为与样品浓度相比，加标浓度太低。



## 参考文献

1. U.S. EPA Air Pollution Control Technology Fact Sheet related to the FGDW process –<http://www.epa.gov/ttnatc1/dir1/ffdg.pdf>
2. U.S. EPA Steam Electric Power Generating Point Source Category: Final Detailed Study Report (EPA 821-R-09-008) – <http://water.epa.gov/scitech/wastetech/guide/upload/finalreport.pdf>
3. Inductively Coupled Plasma/Mass Spectrometry for Trace Element Analysis in Flue Gas Desulfurization Wastewater: EPA Office of Water Engineering & Analysis Division, May 2011.
4. Trace Metals Determination in Flue Gas Desulfurization Waters: Optimization of Dynamic Reaction Cell ICP-MS. EPRI, Palo Alto, CA: 2009. 1017978 – [http://my.epri.com/portal/server.pt?Abstract\\_id=000000000001017978](http://my.epri.com/portal/server.pt?Abstract_id=000000000001017978)
5. U.S. EPA Method 200.8: "Determination of Trace Elements in Waters and Wastewaters by Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry," 1994 – <http://www.epa.gov/sam/pdfs/EPA-200.8.pdf>
6. U.S. EPA Method 1638. "Determination of Trace Elements in Ambient Waters by Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry," 1996 – [http://water.epa.gov/scitech/methods/cwa/bioindicators/upload/2007\\_07\\_10\\_methods\\_method\\_1638.pdf](http://water.epa.gov/scitech/methods/cwa/bioindicators/upload/2007_07_10_methods_method_1638.pdf)
7. The 30-Minute Guide to ICP-MS – PerkinElmer, Inc.
8. S.D. Tanner, V.I. Baranov, Atomic Spectroscopy, 20, 2, 45-52, (1999).
9. Improving Throughput of Environmental Samples by ICP-MS Following EPA Method 200.8, ESI Application Note – <http://www.icpms.com/products/sc-fast-enviro.php>
10. Improved Performance in the Analysis of Drinking Waters and Wastewaters by U.S. EPA Method 200.8 with an SC-FAST System – PerkinElmer, Inc.
11. The Analysis of Drinking Waters by U.S. EPA Method 200.8: Using the NexION 300D ICP-MS in Standard, Collision and Reaction Modes – PerkinElmer, Inc.

### PerkinElmer, Inc.

珀金埃尔默仪器（上海）有限公司

地址：上海 张江高科技园区 张衡路1670号

邮编：201203

电话：021-60645888

传真：021-60645999

[www.perkinelmer.com.cn](http://www.perkinelmer.com.cn)



要获取全球办事处的完整列表，请访问[http:// www.perkinelmer.com.cn/AboutUs/ContactUs/ContactUs](http://www.perkinelmer.com.cn/AboutUs/ContactUs/ContactUs)

版权所有 ©2012, PerkinElmer, Inc. 保留所有权利。PerkinElmer® 是PerkinElmer, Inc. 的注册商标。其它所有商标均为其各自持有者或所有者的财产。