

利用 ICP-OES 分析从锂离子电池中回收的铜用于铜箔制造

使用 Agilent 5800 ICP-OES 实现电池再制造材料的自动化表征



作者

Ana Garcia-Gonzalez
安捷伦科技有限公司

前言

锂离子电池 (LIB) 回收的主要目标是回收关键元素，以便重新用于生产新电池^[1]。这种循环利用过程不仅能减少废弃物产生、降低环境影响，还有助于削减制造成本，同时满足市场对电池材料日益增长的需求。

锂离子电池回收过程中回收的关键元素包括用于制造正极的锂 (Li)、锰 (Mn)、钴 (Co) 和镍 (Ni)，以及制造铜箔所需的关键元素铜 (Cu)。

通常情况下，锂离子电池中铜的重量占比平均约为 10%–15%，非常具有回收价值。在再制造环节，回收得到的铜会溶于硫酸 (H_2SO_4)，制得硫酸铜水溶液 ($CuSO_4$)，该溶液也常被称作铜电解液。当该溶液达到所需浓度后，通过电镀工艺即可制备出高纯度的铜箔^[2]。分离出铜后，剩余电解液中仍含有 Co、Ni、Li 等有价金属，这类金属同样可被回收提纯并再次利用。整个工艺流程如图 1 所示。

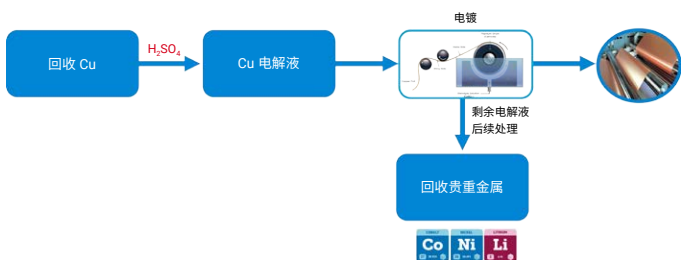


图 1. 利用从废旧锂离子电池中回收的铜进行铜箔再制造的流程图

这些有价值回收物均需开展常量与微量元素分析，以确保准确的质量控制 (QC)。安装有 Agilent ICP Expert 软件的 Agilent 5800 和 5900 ICP-OES 仪器，在此过程中发挥着关键作用。经实际应用验证，该系列仪器能在 LIB 制造、回收及再制造的每一个环节，实现对关键元素的准确、可靠检测^[3,4]。

对于 CuSO_4 溶液这类总溶解态固体 (TDS) 含量较高的样品，因自身密度大、粘度高，加之待测元素浓度差异较大且存在残留风险，采用 ICP-OES 分析时难度较高。溶液中的 H_2SO_4 具有腐蚀性且密度大，另外对高通量样品分析的需求，进一步增加了分析难度。安捷伦 ICP-OES 仪器凭借强大可靠的硬件组件设计，如垂直炬管、冷锥接口 (CCI) 和自由曲面光学元件，克服了上述挑战^[5]。此外，拟合背景校正和快速自动曲线拟合 (FACT) 背景校正技术、IntelliQuant Screening、早期维护反馈 (EMF) 及 NebAlert 等软件功能，能够有力协助分析人员处理分析与仪器相关的各类问题^[6]。若要实现高通量分析，可搭配使用安捷伦 ICP-OES 自动化系统^[7,8]。

本研究采用全面集成 Agilent 5800 VDV ICP-OES、高级阀系统 (AVS 7)、高级稀释系统 (ADS 2)、SPS 4 自动进样器和软件的系统，对三份实际回收的铜电解液样品中的 23 种元素进行了定量分析。这些元素包括：铝 (Al)、铈 (Sb)、砷 (As)、铋 (Bi)、镉 (Cd)、钙 (Ca)、铬 (Cr)、钴 (Co)、铜 (Cu)、铁 (Fe)、铅 (Pb)、锂 (Li)、镁 (Mg)、锰 (Mn)、钠 (Na)、镍 (Ni)、磷 (P)、硒 (Se)、硅 (Si)、银 (Ag)、锡 (Sn)、钾 (K)、锌 (Zn)。

铜电解液样品均按原样进行分析。通过对实际样品开展加标回收率测试，并进行长达 5 小时的稳定性测试（共进行了 187 次测量），评估了该方法的准确性、稳健性和稳定性。

实验部分

仪器

所有测量均采用配备 AVS 7 切换阀、ADS 2 自动稀释器和 SPS 4 自动进样器的 Agilent 5800 VDV ICP-OES 进行 (图 2)。这些硬件再结合 Agilent ICP Expert Pro 软件，构成了安捷伦 ICP-OES 自动化系统。进样系统包含 SeaSpray 雾化器、双通道旋流雾化室、氩气加湿器附件和安捷伦半可拆卸式 VDV 炬管 (带 1.8 mm 内径 (id) 中心管)。

采用安捷伦单元素标准溶液，配制含 5 mg/L 钪 (Sc) 和 100 mg/L 铷 (Rb) 的内标 (IS) 溶液，基质为 3% H_2SO_4 。内标溶液用于校正样品基质中可能产生的各类基质效应。七通阀 AVS 系统可以将 IS 溶液直接接入阀中，实现内标与样品的同步进样。



图 2. 安捷伦 ICP-OES 自动化系统：配备集成式 AVS 7 切换阀 (左)、安捷伦高级稀释系统 ADS 2 (中) 和 Agilent SPS 4 自动进样器 (右) 的 Agilent 5800 VDV ICP-OES

在轴向和径向观测模式下对方法进行了优化。轴向观测模式下，优化工作的重点在于通过提高射频功率、降低雾化器流量 (相对于默认设置)，来增加样品在等离子体中的停留时间。径向观测模式下，射频功率保持不变，对观察高度和雾化器流量进行了优化，以降低 400 nm 以上发射谱线的背景干扰，包括 Li、K 和 Na 的发射谱线。

该集成式 ICP-OES 自动化系统的操作条件分别列于表 1 和表 2。

表 1. Agilent 5800 VDV ICP-OES 仪器和方法参数

参数	设置	
	轴向	径向
观测模式	轴向	径向
观测高度 (mm)	-	11
RF 功率 (kW)	1.4	
雾化器流量 (L/min)	0.65	0.9
等离子体气流量 (L/min)	12	
辅助气流量 (L/min)	1	
重复测定次数	3	
冲洗时间 (s)	20	
读数时间 (s)	10	5
稳定时间 (s)	10	5
样品泵管	SolvaFlex 白色/白色	
内标泵管	SolvaFlex 橙色/绿色	
废液泵管	SolvaFlex 蓝色/蓝色	

表 2. Agilent AVS 7 和 ADS 2 操作参数

参数	设置
样品定量环规格 (mL)*	1.5
泵速 — 提升 (mL/min)	31.9
泵速 — 进样 (mL/min)	3.6
阀提升延迟时间 (s)	12.4
气泡注入时间 (s)	1.8
预先冲洗时间 (s)	1.2
二次稀释冲洗 (s)	10

* AVS 7 和 ADS 2 样品定量环的规格完全一致

样品前处理

三种铜电解液样品由美国一家铜箔再制造公司提供。样品中含有 3.5%–5% 的 CuSO_4 ，基质为 3% H_2SO_4 ，且样品中还含有不同含量的微量元素。上述样品分别标记为 Cu 电解液 1、Cu 电解液 2 和 Cu 电解液 3 (图 3)。所有样品均按原样进行检测 — 分析前未进行任何人工处理或前处理操作。



图 3. 三种铜电解液样品，基质为 3% 硫酸。使用配备 ADS 2 自动稀释器的 Agilent 5800 VDV ICP-OES 按原样对这些样品进行分析

使用 ADS 2 自动配制校准标样

通过稀释 93%–98% 超纯 H_2SO_4 (ARISTAR ULTRA, VWR Chemicals, BDH, Avantor, USA)，配制 3% H_2SO_4 稀释液。利用集成的 ADS 2 的自动配标功能，自动生成校准曲线。标样使用 3% H_2SO_4 稀释液，由以下安捷伦储备液配制而成：

- Bi、Li、P、Si、Sn 单元素储备液 (1000 ppm)
- Cu 单元素储备液 (1%)
- 多元素环境加标混合标准品

考虑到 Pb 在 3% H_2SO_4 基质中的稳定性，Pb 标样未通过 ADS 2 配制，而是按 1 ppm 浓度配制单点标样。Pb 校准标样由安捷伦单元素标准品经 3% H_2SO_4 稀释液稀释制得。

质量控制溶液

为进行质量控制，使用 3% H_2SO_4 空白溶液作为连续校准空白 (CCB)。采用安捷伦标准品 (包括环境加标混合标准品以及 1000 ppm 和 10000 ppm 的单元素储备液) 配制三份连续校准验证溶液 (CCV-1、CCV-2、CCV-3)。

- CCV-1 中含 0.5 ppm 的 Ag、Al、As、Bi、Cd、Co、Cr、Li、Mn、Ni、P、Pb、Sb、Se、Si、Sn 和 Zn，以及 5 ppm 的 Ca、Fe、K、Mg、Na
- CCV-2 中含 0.5 ppm 的 Pb
- CCV-3 中含 100 ppm 的 Cu

方法开发

IntelliQuant Screening

作为 ICP Expert Pro 软件的一部分，IntelliQuant Screening 程序可用于采集样品的全谱数据，整个分析过程仅需数秒，几乎无需分析人员干预^[9]。然后，IntelliQuant 算法根据预先测量的校准处理全谱数据，为样品中存在的每种元素生成半定量读数。

本研究在方法开发阶段采用 IntelliQuant Screening，测定了三份铜电解液样品中元素的大概浓度。所得数据为后续选定适合的校准范围、选择内标及确定最佳发射谱线提供了依据，确保实现准确的定量分析。

该软件可通过多种方式展示数据，包括元素周期表热图、饼图等形式。图 4A 为铜电解液 3 号样品的元素组成饼图。正如预期，Cu 和 S 是其中的主要元素。为了更好地了解样品的痕量成分，从图中剔除了 Cu 和 S 的数据，获得了 Na、Ca、Fe、Li、Si 和 Ni 等其他元素的组成情况（图 4B）。

在样品中检测到了广泛使用的内标元素钇 (Y)（图 4C）。这为选择 Sc 和 Rb 作为内标元素提供了依据。

IntelliQuant 星级评定系统通过推荐最佳发射谱线和识别潜在的光谱干扰，为方法开发提供了进一步支持。例如，在本样品中，Zn 213 nm 和 Zn 202 nm 谱线分别受到 Fe、Cu 和 Cu 的干扰（图 4D）。基于这一重要信息，本定量方法最终选定 Zn 206 nm 发射谱线作为最佳分析谱线。

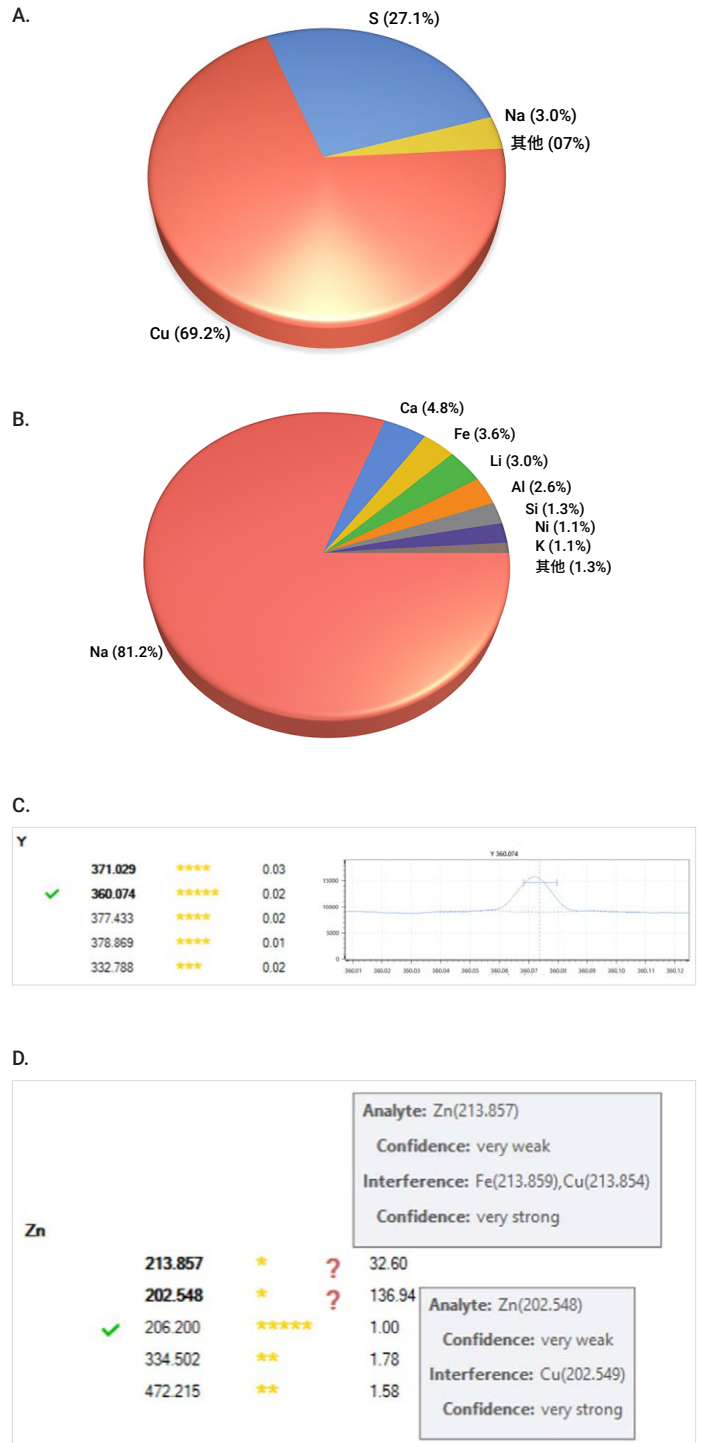


图 4. IntelliQuant 结果，包括 A: Cu 电解液样品 1 的元素组成；B: 从饼图中剔除 Cu 和 S 后的痕量元素分布图；C: Y 的检测结果；D: 星级评定系统指导选择 Zn 的最佳分析谱线

自动校准和线性

各元素校准标样的详细信息见表 3。各校准点均采用 ADS 2 自动稀释器，按不同稀释倍数用 3% H₂SO₄ 对标准储备液进行稀释得到。

所有校准曲线在测定范围内均呈线性，相关系数介于 0.99999 至 1.00000 之间（表 3）。Ag、Fe 和 Li 的代表性校准曲线如图 5 所示。

表 3. 各元素的校准标样浓度 (mg/L)、背景校正方式、校准相关系数以及使用的内标

元素与波长 (nm)	背景校正	校准范围 (ppm)	相关系数	内标
Ag 328.068	FACT	0.025-1	1.00000	Sc 357.634
Al R 396.152	FACT	0.025-1	1.00000	Sc 357.634
As 188.980	FACT	0.025-1	1.00000	Sc 357.634
Bi 190.171	FACT	0.1-1	1.00000	Sc 357.634
Ca R 315.887	拟合	1-100	1.00000	Sc 357.634
Cd 214.439	拟合	0.025-1	1.00000	Sc 357.634
Co 228.615	拟合	0.025-1	1.00000	Sc 357.634
Cr 267.716	拟合	0.025-1	1.00000	Sc 357.634
Cu R 327.395	拟合	100-200	0.99999	Sc 357.634
Fe R 234.350	拟合	1-100	1.00000	Sc 357.634
K R 766.491	FACT	1-100	1.00000	Rb 780.026
Li R 670.783	FACT	0.1-1	1.00000	Rb 780.026
Mg R 285.213	拟合	0.25-10	1.00000	Sc 357.634
Mn 257.610	拟合	0.25-1	1.00000	Sc 357.634
Na R 589.592	FACT	1-100	1.00000	Sc 424.682
Ni 231.604	拟合	0.025-10	1.00000	Sc 357.634
P 178.222	FACT	0.1-1	1.00000	Sc 357.634
Pb 220.353	FACT	1	1.00000	Sc 357.634
Sb 206.834	FACT	0.025-1	0.99999	Sc 357.634
Se 196.026	拟合	0.025-1	1.00000	Sc 357.634
Si R 251.611	拟合	0.1-1	1.00000	Sc 357.634
Sn 189.925	拟合	0.1-1	1.00000	Sc 357.634
Zn 206.200	拟合	0.1-1	1.00000	Sc 357.634

R: 采用径向观测进行分析。

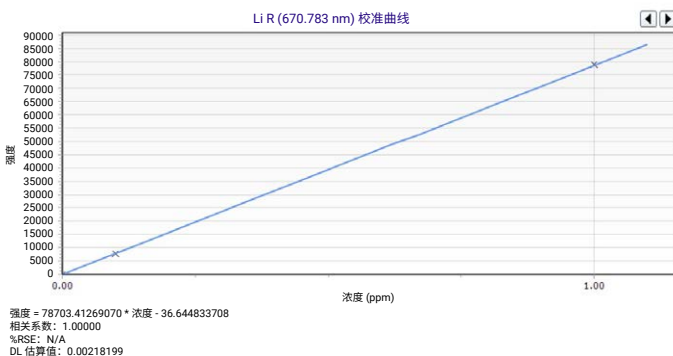
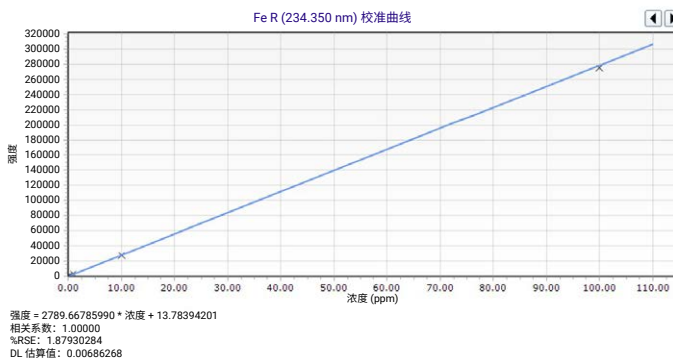
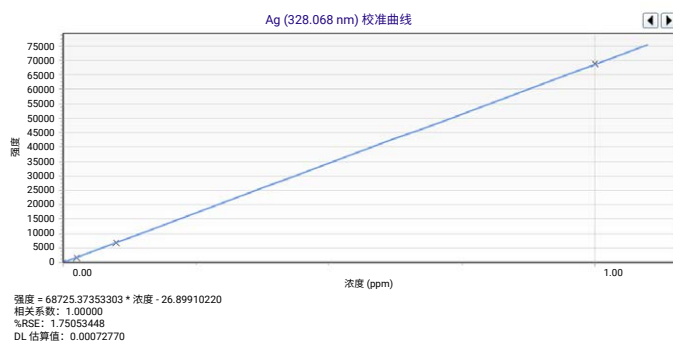


图 5. Ag、Fe 和 Li 的线性校准曲线，相关系数为 1.0000，相对标准误差 (%RSE) < 1.9%

ADS 2 稀释功能

ADS 2 支持预设稀释和二次稀释。预设稀释按照用户设定的稀释倍数（最高 400 倍），在样品分析前自动完成稀释，无需人工操作。二次稀释（最高 400 倍）将在以下情况下自动触发：待测元素浓度超出校准（或检测器）范围或内标回收率超出限值。上述情况下，系统会实时计算并执行所需的稀释倍数。

为在同一运行中分析不同类型样品时实现更高的灵活性，用户可以利用 Dilution Lists（稀释列表）软件功能选择特定的元素，仅当这些元素的浓度超出校准范围时，才触发自动稀释（图 6）。

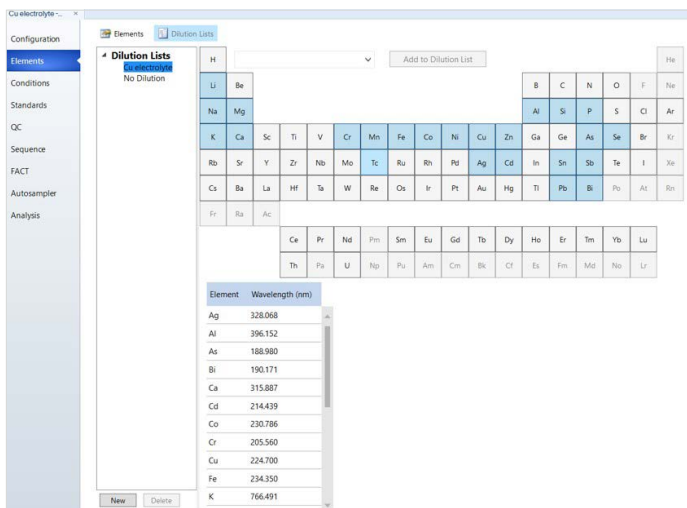


图 6. “Cu electrolyte” (Cu 电解液) 稀释列表中选择元素。在选中铜电解液稀释列表时，只有选定的元素才会触发 Agilent ADS 2 自动稀释器进行自动二次稀释 (详见图 7)

该功能也可用于将特定类型样品排除在二次稀释的触发条件之外，避免不必要的稀释操作。例如，用于验证实际样品中待测元素回收率的基质加标样可以从二次稀释中排除，如图 7 中 Cu 电解液 1 加标样 (由 Cu 电解液 1 20x 配制) 所示。此时，对于 Cu 电解液 1 加标样或 Cu 电解液 1 20x，选择了一个剔除 Cu 的稀释列表，名为 “No Dilution” (不稀释)，以确保这两个样品均按配制原样进行分析，避免不必要的稀释循环，保障验证的准确性。

在对未经稀释 (原样) 的铜电解液样品进行分析时，选择了 “Cu electrolyte” (Cu 电解液) 稀释列表。该列表指定了可触发二次稀释的元素，如图 6 所示。采用此设置后，仪器将在需要时自动启动二次稀释流程。

Rack:Tube	Solution Label	Solution Type	Dilution List
1:1	Cu electrolyte 1 20x	Sample	No Dilution
1:2	Cu electrolyte 1 20x spike	Sample	No Dilution
2:2	Rinse 3% H2SO4	Sample	No Dilution
1:3	Cu electrolyte 1 Neat	Sample	Cu electrolyte
2:2	Rinse 3% H2SO4	Sample	No Dilution
1:4	Cu electrolyte 2 Neat	Sample	Cu electrolyte

图 7. Agilent ICP Expert Pro 软件的屏幕截图，显示了 Dilution List (稀释列表) 功能，分析人员可以利用该功能为每个样品选择用于触发 Agilent ADS 2 对样品进行二次稀释的元素。在橙色高亮显示的稀释列表 “Cu electrolyte” (Cu 电解液) 中，包含 Cu 与其他元素，这意味着含有这些元素的样品将进行二次稀释。在蓝色高亮显示的 “No dilution” (不稀释) 列表中，不包含 Cu，因此相关样品将不会进行稀释

结果与讨论

方法检出限

方法检出限 (MDLs) 根据 3% H₂SO₄ 空白溶液 10 次重复测量结果的三倍标准偏差确定。为模拟样品基质，另使用 1% Cu 溶液 (安捷伦标准溶液) 测定了方法检出限。

对于表 4 中的部分元素，所选波长并非最灵敏的波长。但 IntelliQuant 判定这些谱线不受光谱干扰，因此更适合用于高 Cu 基质样品的准确定量分析。即便在高 Cu 基质中，各元素的 MDLs 仍处于亚 ppb 至低 ppb 水平 (表 4)，证明了 5800 ICP-OES 方法具有卓越的灵敏度。

表 4. 3% H₂SO₄ 与 1% Cu 溶液中各元素的方法检出限

元素与波长 (nm)	MDL (mg/L)	
	3% H ₂ SO ₄	1% Cu
Ag 328.068	0.00047	0.00044
Al R 396.152	0.00430	0.00567
As 188.980	0.00160	0.00348
Bi 190.171	0.00525	0.01261
Ca R 315.887	0.00382	0.00996
Cd 214.439	0.00012	0.00022
Co 228.615	0.00051	0.00088
Cr 267.716	0.00041	0.00053
Cu R 327.395	0.00286	NA
Fe R 234.350	0.00319	0.00513
K R 766.491	0.03718	0.17615
Li R 670.783	0.00239	0.00074
Mg R 285.213	0.00164	0.00169
Mn 257.610	0.00007	0.00005
Na R 589.592	0.00270	0.10244
Ni 231.604	0.00112	0.00118
P 178.222	0.00433	0.00486
Pb 220.353	0.00232	0.00463
Sb 206.834	0.00212	0.00577
Se 196.026	0.00608	0.00586
Si R 251.611	0.00790	0.01305
Sn 189.925	0.00290	0.00936
Zn 206.200	0.00031	0.00049

R: 采用径向观测进行分析。

定量分析

采用配备 ADS 2 的 5800 ICP-OES，对来自锂回收及铜箔再制造过程的三份 Cu 电解液样品进行了分析。

如图 8 所示，首先在未经稀释的情况下对 Cu 电解液 1 样品进行分析，只有 Cd 在校准范围内，浓度为 0.086 ppm。然后，ADS 系统自动对样品进行 5 倍二次稀释，Al、Co 和 Fe 均落入校准范围。由于 Na 仍超出校准上限，进一步执行了 25 倍稀释。上述两次稀释步骤均自动进行，无需分析人员进行任何操作。

结果“汇总”报告从所有迭代检测数据中为每种元素筛选出最佳测定结果，且不会覆盖任何已有数据：Cd 采用未稀释样品测定，Al、Co、Fe 采用 5 倍稀释，Na 采用 25 倍稀释。尽管样品的总溶解态固体含量较高，且使用了 3% H₂SO₄ 作为稀释液，仍获得了出色的精密度。Cd（未稀释）的 RSDs < 0.5%，Co（5 倍稀释）< 0.4%，Na（25 倍稀释）< 0.7%。

尽管采用了不同的稀释倍数，各待测元素的测定结果经稀释倍数校正后均保持一致，证明了 ADS 2 系统的可靠性。对于铜电解液这类待测元素浓度差异显著的复杂基质样品，ADS 2 可以简化稀释流程，确保准确、高效和高产出的分析，从而为 LIB 回收和再制造提供支持。

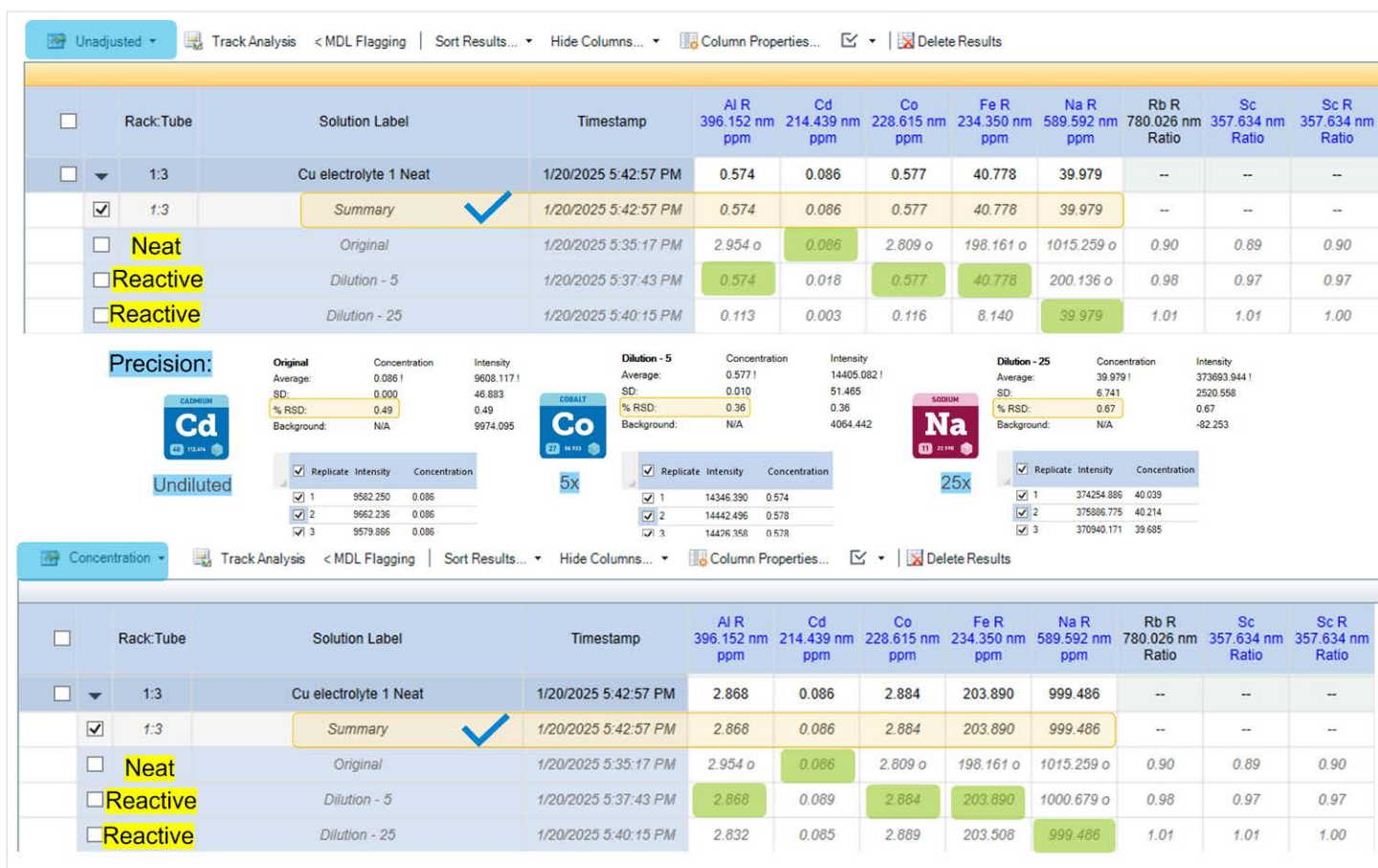


图 8. Agilent ADS 2 对 Cu 电解液样品 1 进行 5 倍和 25 倍二次稀释的示例。上图：未经校正的 Al、Cd、Co、Fe、Na 浓度数据。中图：未稀释（原样）和稀释样品分析中，Cd、Co、Na 的精密度。下图：经稀释倍数校正后的数据，汇总于“Summary”（汇总）行中

三个铜电解液样品的定量数据详见表 5。

表 5. 使用配备 ADS 2 的 Agilent 5800 VDV ICP-OES 分析三个 Cu 电解液样品获得的各元素的定量结果。结果已根据稀释倍数进行了校正

元素与波长 (nm)	Cu 电解液样品浓度 (mg/L)		
	1	2	3
Ag 328.068	0.198	0.065	0.016
Al R 396.152	2.87	2.89	37.0
As 188.980	0.014	0.006	0.005
Bi 190.171	< MDL	< MDL	< MDL
Ca R 315.887	151	153	60.7
Cd 214.439	0.086	0.086	< MDL
Co 228.615	2.88	2.92	1.21
Cr 267.716	0.837	0.839	3.32
Cu R 327.395	14089	14194	19508
Fe R 234.350	204	206	57.1
K R 766.491	6.124	5.40	24.6
Li R 670.783	0.766	0.756	36.9
Mg R 285.213	6.15	6.18	11.3
Mn 257.610	0.893	0.896	1.95
Na R 589.592	999	87.7	1583
Ni 231.604	262	264	20.4
P 178.222	0.197	0.138	2.88
Pb 220.353	3.02	3.07	0.108
Sb 206.834	0.165	< MDL	0.026
Se 196.026	< MDL	< MDL	< MDL
Si R 251.611	14.3	14.1	27.5
Sn 189.925	2.15	< MDL	< MDL
Zn 206.200	21.1	21.4	0.911

R: 采用径向观测进行分析。

加标回收率测试

为了进一步评估 5800 VDV ICP-OES 方法, 对 Cu 电解液样品 1 进行了加标回收率测试。将样品稀释 20 倍后按以下浓度加标: Ni 5.5 ppm; Ca、Fe、K、Mg、Na 5 ppm; 其余元素 0.5 ppm。

如表 6 所示, 所有元素的回收率均在 100% ± 5% 范围内, 证实了本方法在不同浓度范围内的准确性。给出的所有加标信息均未考虑稀释倍数。

表 6. 经 ADS 2 稀释 20 倍的 Cu 电解液样品 1 的加标回收率数据

元素与波长 (nm)	溶液中的浓度 (ppm)	Cu 样品 + 加标 (ppm)	回收率 (%)
Ag 328.068	0.011	0.531	104
Al R 396.152	0.141	0.638	101
As 188.980	< MDL	0.506	100.8
Bi 190.171	< MDL	0.485	96.6
Ca R 315.887	7.6	12.7	98.3
Cd 214.439	0.004	0.494	98
Co 228.615	0.147	0.638	98.2
Cr 267.716	0.042	0.536	98.8
Fe R 234.350	10.3	15.3	99.2
K R 766.491	0.187	5.13	100.3
Li R 670.783	0.039	0.548	101.2
Mg R 285.213	0.307	5.19	97.7
Mn 257.610	0.045	0.528	96.6
Na R 589.592	50.4	55.6	104.1
Ni 231.604	13.5	18.9	99.2
P 178.222	0.010	0.518	101
Pb 220.353	0.154	0.677	104.6
Sb 206.834	0.008	0.517	102
Se 196.026	< MDL	0.501	100
Si R 251.611	0.744	1.26	103.2
Sn 189.925	0.108	0.594	97.2
Zn 206.200	1.08	1.57	97.6

R: 采用径向观测进行分析。

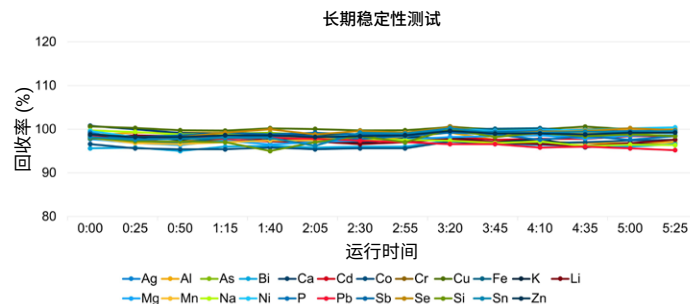


图 9. 使用安捷伦 ICP-OES 自动化系统进行连续 5 小时分析获得的 QC 溶液的归一化回收率

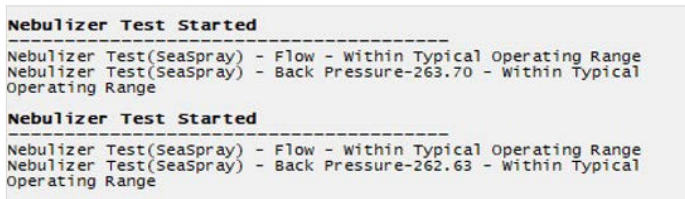


图 10. 稳定性测试前后的雾化器测试结果，背压分别为 263.70 kPa 和 262.63 kPa

稳定性测试

为了证明 ICP-OES 自动化系统的稳健性，在连续 5 小时内进行了 187 次溶液测量，整个过程未进行重新校准。测试序列包括 1% CuSO₄ 溶液（基质为 3% H₂SO₄），每完成 10 次检测后插入 QC 模块。每个 QC 模块包含一份 CCB 溶液和三份 CCV 溶液。

ADS 2 对 CCV-1 和 CCV-3 进行了预设的 2 倍稀释，最终 Ag、Al、As、Bi、Cd、Co、Cr、Li、Mn、Ni、P、Pb、Sb、Se、Si、Sn 和 Zn 的浓度为 0.5 ppm；Ca、Fe、K、Mg 和 Na 的浓度为 5 ppm；Cu 的浓度为 100 ppm。CCV-2 为 0.5 ppm 的 Pb 溶液。

如图 9 所示，在整个分析过程中，所有元素的回收率均保持在 100% ± 5% 范围内。该分析序列在每次测定 CCV-1 和 CCV-3 前均执行了自动稀释操作。精密度非常出色，%RSD 低于 1.3%，证实了配备 ADS 2 的 5800 VDV ICP-OES 在高铜溶液的常规、高通量分析中具有卓越稳定性和重现性。

图 10 为 ICP Expert 软件的屏幕截图，可以看到，经过 5 小时连续测试后，雾化器压力几乎与初始一致，进一步证明了仪器在复杂样品长时间连续分析过程中的稳定性。

结论

安捷伦 ICP-OES 自动化系统整合了 Agilent 5800 VDV ICP-OES、AVS 7 切换阀、ADS 2 自动稀释器、SPS 4 自动进样器和 ICP Expert Pro 软件，为锂电池回收和铜箔再制造领域的元素分析提供了强大的解决方案。该系统能够在宽浓度范围内提供准确、精密、可重复的结果，即使面对具有挑战性的高基质铜电解液样品也是如此。自动化的预设稀释和二次稀释功能，大幅减少了人工样品处理需求，降低了误差，并确保所有待测元素落在校准曲线范围内，实现可靠检测。

加标回收率和长期稳定性测试进一步证明了方法的稳健性，在连续 5 小时的测试中，所有元素的回收率均在 100% ± 5% 范围内，精密度优于 1.3% (RSD)。这些结果表明，ICP-OES 自动化系统不仅简化了样品前处理与分析流程，还显著提高了实验室生产力、数据质量和结果的可靠性。

该系统可在保证准确度与分析通量的前提下，简化复杂基质样品的分析操作，助力能源化工领域的实验室高效开展锂离子电池关键元素的回收与再利用相关检测，为电池制造的可持续发展提供技术支撑。

参考文献

1. Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E. et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature* 575, 75–86, **2019**. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>
2. Lu, LL.; Liu, HT.; Wang, ZD. et al. Advances in electrolytic copper foils: fabrication, microstructure, and mechanical properties. *Rare Met.* 44, 757–792, **2025**. <https://doi.org/10.1007/s12598-024-02965-6>
3. 使用 ICP-OES 对锂离子电池材料进行元素分析的实用指南，安捷伦出版物，[5994-5489ZHCN](#)
4. ICP-OES Quality Control of Elements in Brines Produced by Direct Lithium Extraction (DLE)（利用 ICP-OES 对直接提锂 (DLE) 产出的卤水进行元素质量控制），安捷伦出版物，[5994-8041EN](#)
5. Innovative Freeform Optical Design Improves ICP-OES Speed and Analytical Performance（创新的自由曲面光学设计提升 ICP-OES 分析速度与性能），安捷伦出版物，[5994-5891EN](#)
6. Agilent ICP Expert 软件：用于 ICP-OES 的强大软件和智能工具，安捷伦出版物，[5994-1517ZHCN](#)
7. ICP-OES 自动化系统，<https://www.agilent.com.cn/zh-cn/product/atomic-spectroscopy/atomic-spectroscopy-automation/automation-systems/icp-oes-automation-systems>（2025 年 11 月访问）
8. 高级稀释系统 ADS 2 的性能和操作，安捷伦出版物，[5994-7211ZHCN](#)
9. Agilent IntelliQuant Screening：更智能、更快速的半定量 ICP-OES 分析，安捷伦出版物，[5994-1518ZHCN](#)

更多信息

观看自选网络研讨会：[锂离子电池回收的环保提取方法及回收金属硫酸盐中杂质的元素分析 | Separation Science](#)

本应用中使用的产品

安捷伦产品

描述	部件号
用于 5000 系列 VDV/SVDV ICP-OES 的易安装 1.8 mm 半可拆卸式炬管	G8020-68005
玻璃双通道旋流雾化室, 带有球形接头和 UniFit 排废口, 适用于 Agilent 5000 系列 ICP-OES	G8010-60256
用于 5000 系列 ICP-OES 的 SeaSpray 同心玻璃雾化器	G8010-60255
蠕动泵管, 白色/白色, 12/包	3710034400
蠕动泵管, 橙色/白色, 12/包	3710046900
蠕动泵管, 蓝色/蓝色, 12/包	3710034600
用于 ADS 2 和自动进样器的稀释液/载液瓶套件 (6 L HDPE)	5005-0435
废液容器套件, 10 L, 带 Stay Safe 溶剂瓶安全盖和过滤器	5005-0437
安捷伦多元素质量控制标准品 27	5190-9418
安捷伦 Al 单元素储备液, 1000 ppm, 500 mL	5190-8243
安捷伦 Ca 单元素储备液, 1000 ppm, 500 mL	5190-8330
安捷伦 Cd 单元素储备液, 1000 ppm, 500 mL	5190-8328
安捷伦 Co 单元素储备液, 1000 ppm, 500 mL	5190-8347
安捷伦 Cr 单元素储备液, 1000 ppm, 500 mL	5190-8345
安捷伦 Cu 单元素储备液, 1000 ppm, 500 mL	5190-8349
安捷伦 Fe 单元素储备液, 1000 ppm, 500 mL	5190-8472
安捷伦 K 单元素储备液, 1000 ppm, 500 mL	5190-8504
安捷伦 Li 单元素储备液, 10000 ppm, 500 mL	5190-8409
安捷伦 Mg 单元素储备液, 1000 ppm, 500 mL	5190-8482
安捷伦 Mn 单元素储备液, 1000 ppm, 500 mL	5190-8484
安捷伦 Na 单元素储备液, 1000 ppm, 500 mL	5190-8526
安捷伦 Ni 单元素储备液, 1000 ppm, 500 mL	5190-8492
安捷伦 P 单元素储备液, 10000 ppm, 500 mL	5190-8429
安捷伦 Pb 单元素储备液, 1000 ppm, 500 mL	5190-8476
安捷伦 Rb 单元素储备液, 1000 ppm, 100 mL	5190-8511
安捷伦 Sb 单元素储备液, 1000 ppm, 500 mL	5190-8245
安捷伦 Si 单元素储备液, 1000 ppm, 500 mL	5190-8522
安捷伦 Y 单元素储备液, 1000 ppm, 500 mL	5190-8556
安捷伦 Zn 单元素储备液, 1000 ppm, 500 mL	5190-8558

查找当地的安捷伦客户中心:

www.agilent.com/chem/contactus-cn

www.agilent.com/chem/5800icpoes

免费专线:

800-820-3278, 400-820-3278 (手机用户)

DE-011084

本文中的信息、说明和指标如有变更, 恕不另行通知。

联系我们:

LSCA-China_800@agilent.com

© 安捷伦科技 (中国) 有限公司, 2025
2025 年 12 月 4 日, 中国出版
5994-8850ZHCN

在线询价:

www.agilent.com/chem/erfq-cn

