

单四极杆 ICP-MS 与 串联四极杆 ICP-MS

两者有何区别？哪一种适合您的应用？



目录

什么是 ICP-MS?	4
单四极杆 ICP-MS 与 ICP-MS/MS 之间的区别是什么?	5
ICP-MS 的工作原理	6
1. 样品引入	8
2. ICP (等离子体) 离子源	8
3. 真空接口	10
4. 离子聚焦和分离	11
5. 碰撞/反应池	11
6. 质谱仪 (MS)	13
7. 电子倍增检测器	13
8. 数据处理	14
ICP-MS 的用途是什么?	15
液体样品分析	15
形态分析	15
纳米颗粒和单细胞分析	16
气体分析	17
哪种类型的 ICP-MS 适合您的应用?	18
ICP-MS 还是 ICP-MS/MS?	18
为何选择 ICP-MS/MS?	18
可以检测哪些元素?	19
ICP-MS 和 ICP-MS/MS 适合哪些应用?	20
ICP-MS 用于金属元素分析的优势	20
单四极杆 ICP-MS 应用	20
串联四极杆 ICP-MS 应用	20
并列比较: ICP-MS 与 ICP-MS/MS	21
应用示例	22
饮用水样品的多元素分析	22
食品样品的多元素分析	23
矿产勘探样品的多元素分析	24
高纯度化学品中痕量和超痕量污染物的分析	25

在 20 世纪 80 年代，我们推出了第一款单四极杆电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS)。

2012 年，我们推出了第一款串联四极杆电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS/MS)，随后又于 2016 年推出了第二代仪器。

如今，安捷伦 ICP-MS 仪器的应用几乎遍布所有行业，包括：

- 水、土壤、沉积物、废弃物、生物群和空气污染物的常规环境监测
- 纳米颗粒和微塑料等新型污染物的检测
- 消费品检测
- 食品和药品安全应用
- 生命科学和临床研究
- 采矿、材料和金属分析
- 地球化学、核能和可再生能源
- 石油化工和生物燃料
- 半导体制程化学品分析



安捷伦单四极杆 ICP-MS (左) 和串联四极杆 ICP-MS (右, 搭配安捷伦 HPLC)

什么是 ICP-MS?

电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 是一种用于无机元素分析快速多元素原子光谱技术。ICP-MS 几乎可以检测所有元素，并具有低检测限、高样品通量和宽浓度范围。

ICP-MS 技术的商业化开发始于 20 世纪 80 年代，当时将已有的 ICP 技术（来自 ICP-OES）与已用于残余气体分析仪和 GC/MS 的四极杆质谱仪技术进行了结合。

ICP-MS 使用 ICP 作为高温等离子体离子源，将样品转化为单个离子，然后将其提取到质谱仪 (MS) 中进行分离和检测。大多数商用 ICP-MS 仪器采用四极杆质谱技术，因为该技术可同时实现快速扫描、单位质量分辨率和相对较低的成本。

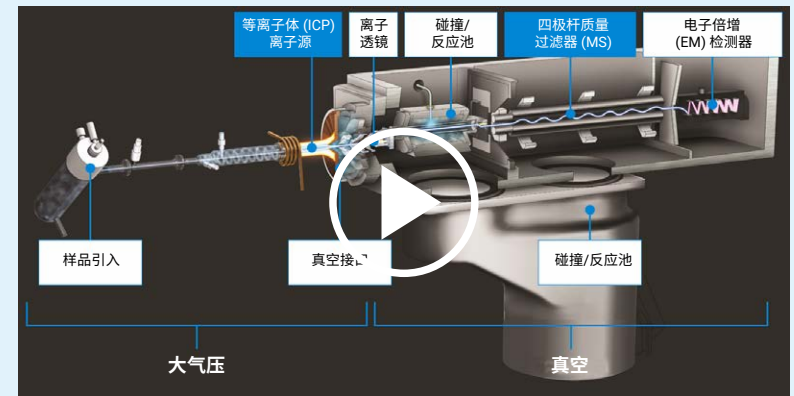
ICP 在大气压下运行，而质量过滤器和检测器需要高真空条件，因此 ICP-MS 还需要一个接口将离子从 ICP 传输到质谱仪，同时保持真空系统中的低压条件。离子透镜（施加电压的金属板）用于引导和聚焦离子通过接口，进入封闭的碰撞/反应池。碰撞/反应池可以通过惰性（碰撞模式）或反应性（反应模式）池气体进行加压，能够解决常见的谱图干扰。然后离子通过四极杆质量过滤器，按不同的质量数进行分离，并传输至检测器对单个离子进行计数。通过将每个质量数处的实测计数率与已知标样中的信号进行比较来计算元素的浓度。

安捷伦提供两种四极杆 ICP-MS 配置：

1. 传统或“单四极杆” ICP-MS，以及
2. “串联四极杆” ICP-MS，也称为 ICP-MS/MS、ICP 三重四极杆或“TQ”

十分钟指南

这段来自 LabTube 的短视频对 ICP-MS 技术进行了大致介绍。视频中介绍了该技术的原理及关键性能。



单四极杆 ICP-MS 与 ICP-MS/MS 之间的区别是什么？

ICP-MS 最常见的配置是“单四极杆”仪器，它拥有一个分析器质量过滤器，位于碰撞/反应池和检测器之间。串联四极杆 ICP-MS 拥有两个四极杆质量过滤器，分别置于碰撞/反应池的前面和后面。串联四极杆配置可以执行两个质量过滤步骤，因此该技术也称为串联 ICP-MS 或 ICP-MS/MS。

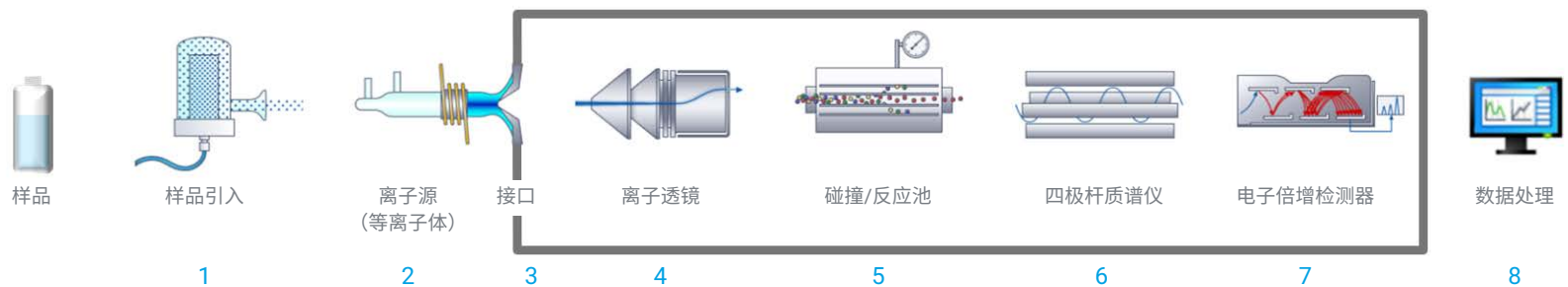


ICP-MS 的工作原理

ICP-MS 仪器使用等离子体 (ICP) 电离样品中的元素，然后使用质谱仪 (MS) 检测离子。

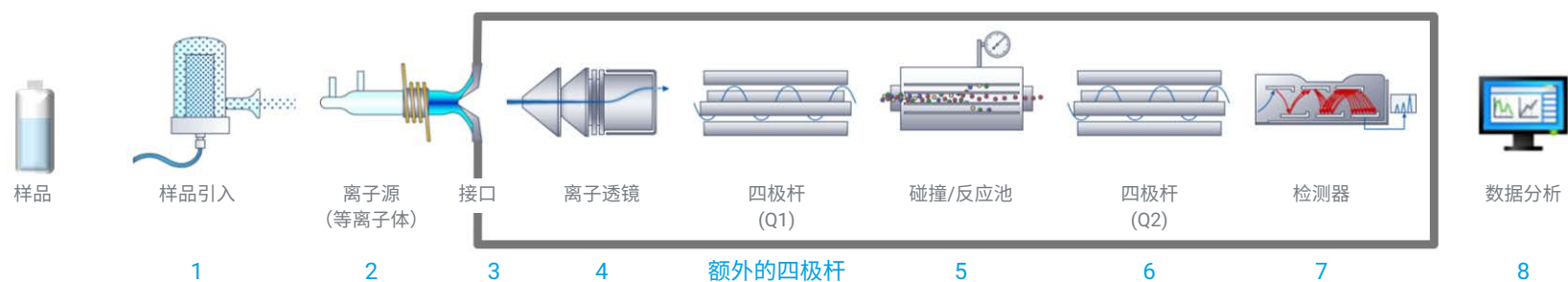
单四极杆 ICP-MS 仪器的主要组件包括：

1. 进样系统 — 使液体样品形成极小颗粒气溶胶雾
2. 等离子体 (ICP) — 将样品气溶胶中的元素转化为离子
3. 接口 — 将离子提取到真空系统中
4. 离子透镜 — 聚焦离子并将其从背景信号中分离出来
5. 碰撞/反应池 (CRC) — 分离分析物离子和干扰离子
6. 质谱仪 (MS) — 按质量数过滤分析物离子
7. 电子倍增 (EM) 检测器 — 对每个质量数处的离子进行计数
8. 数据处理软件 — 将测得的信号转换为浓度



单四极杆 ICP-MS 仪器的主要组件。

[串联四极杆 ICP-MS](#) 包括单四极杆仪器的所有组件，并在离子透镜 (4) 和 CRC (5) 之间增加了另一个四极杆质谱仪。ICP-MS/MS 中增加的质谱仪 (Q1) 在离子到达 CRC 之前过滤离子束，因此在任何给定的时间都只有单一质量数的离子进入池中。这种双重质量过滤器或“串联” (MS/MS) 配置意味着使用反应性池气体方法能够可靠地解决干扰，从而为某些复杂分析物提供更出色的检测限和更高准确度。



串联四极杆 ICP-MS (ICP-MS/MS) 仪器的主要组件。

首先，让我们更深入地了解 ICP-MS 仪器的主要组件。

1. 样品引入

尽管通过使用相应的附件，ICP-MS 可以检测固体和气体样品，但通常将其用于检测液体样品。样品溶液被泵送至雾化器，然后氩气喷射流将其转化为极小颗粒喷雾或气溶胶。气溶胶雾通过雾化室，大液滴在此被分离除去。极小颗粒液滴由氩气流带入 ICP 等离子体炬管。



雾化器将液体样品雾化为气溶胶。



气溶胶通过雾化室，大液滴在此被分离除去。

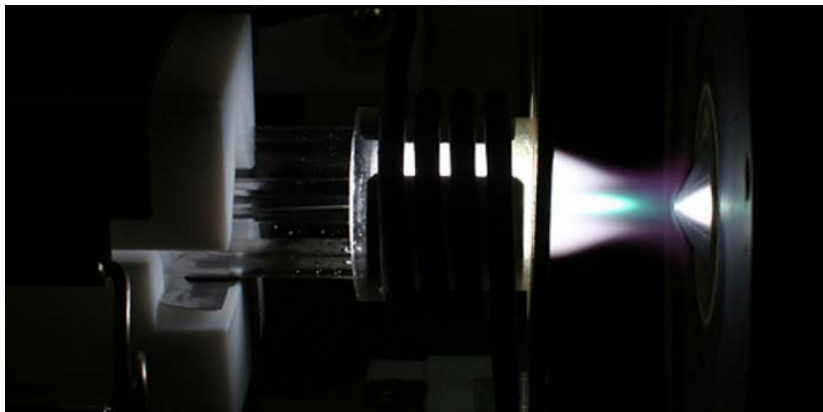
样品引入组件经过选择和优化，可与 ICP 结合使用。这意味着雾化器和雾化室旨在生成可被等离子体有效处理的气溶胶。溶液总载量、气溶胶密度（液滴数量）和液滴尺寸是影响等离子体干燥和分解液滴中所携带样品材料的能力的关键因素。如果气溶胶包含均匀的小液滴，并分散在等离子体的中心通道上，则等离子体可以高效产生离子。

2. ICP（等离子体）离子源

术语“等离子体”指的是显著发生电离的气体，广泛存在于节能灯泡和太阳等多种物质中。ICP-MS 中使用的等离子体，其电离气体为氩气，流经石英管。能量由射频 (RF) 发生器提供，其运行功率约 1.5 KW，大约是普通家用电热水壶功率的一半。RF 能量通过缠绕在石英管外的负载线圈产生的电感耦合转移到氩气流中。射频场引起氩气流中的自由电子振荡，它们与氩原子发生碰撞，并且能量足以除去一个电子，使氩原子电离。新的氩离子和电子也在射频场中振荡，导致进一步的碰撞和电离，在此过程中通过气流分配能量，形成等离子体。电离氩气中的能量密度非常高，因此 ICP 的温度高达 10000 °C，比太阳表面还要热！



等离子体由石英管中流动的氩气形成。

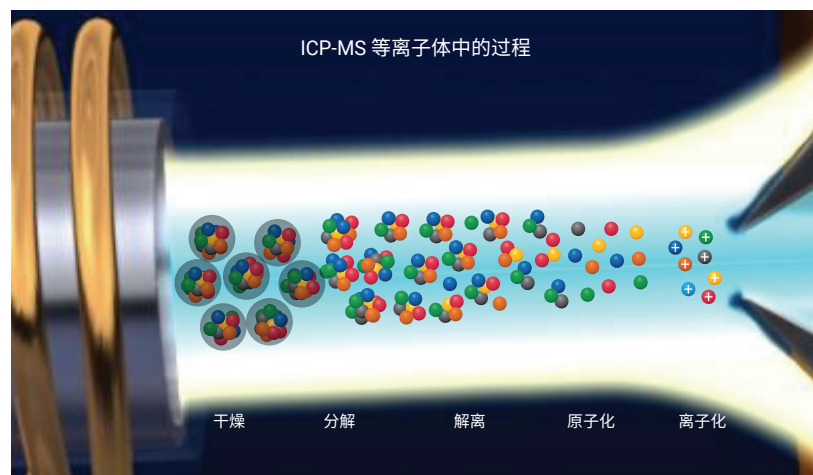


射频发生器使氩气发生电离。样品气溶胶通过等离子体的中心。

通过外部石英管的氩气流速约为 15 L/min。这种“等离子体气体”形成等离子体并冷却石英管，防止其熔化。另外两个较小的石英管同心排布在外管内部，共同构成等离子体“炬管”。中间的石英管输送辅助气流，将等离子体的底部推离内部石英管，防止石英管熔化。最小的管称为“中心管”，以约 1 L/min 的流速将气溶胶液滴从雾化室输送到等离子体。中心管的内径 (ID) 通常约为 2 mm 及以上，因此载气高速流动，穿透等离子体形成细长的“圆环”或甜甜圈形状。气溶胶液滴通过等离子体的中心，液滴在此处干燥，样品材料分解并解离为单个原子，然后电离。

几乎所有 ICP-MS 仪器都使用运行频率为 27.12 MHz（每秒 2712 万次循环）的射频发生器，低于传统上 ICP-OES 仪器所使用的标准 40.68 MHz 频率。低频等离子体是 ICP-MS 的首选，因为它的“趋肤深度”更大，意味着等离子体能量更靠近处理气溶胶液滴的中心通道。这对于 ICP-MS 中 ICP 的性能非常重要，因为更高的中心通道温度能够提供更出色的电离和更高的灵敏度。

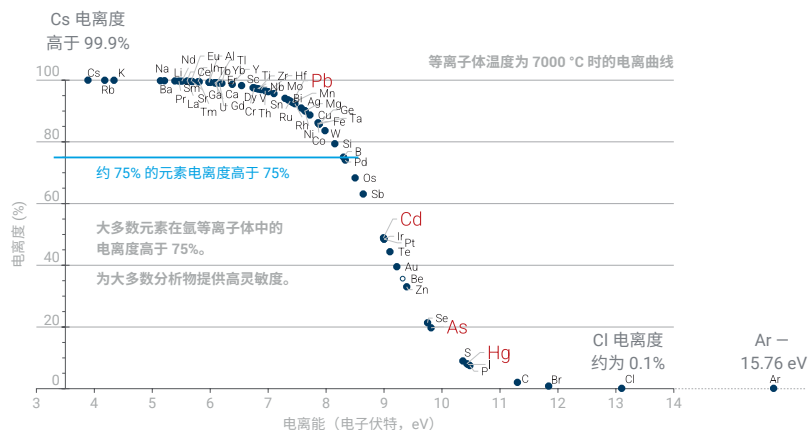
ICP-MS 的等离子体在分解样品基质、解离潜在干扰物和电离分析物原子方面发挥着至关重要的作用。事实上，ICP-MS 的整体性能很大程度上取决于等离子体炬管设计和运行条件。对于给定的载气流速（例如 1 L/min），通过炬管中心管的气体线速度与中心管内径的平方成反比。因此，将中心管内径为 1.5 mm 的炬管更换为 2.5 mm 的炬管会导致载气流速从 9.43 m/s 降至 3.4 m/s，几乎降至原来的三分之一。等离子体只有几毫秒的时间来处理气溶胶液滴，使其形成离子，因此降低载气流速可以显著改善该过程。更大内径的炬管中心管会使载气流速降低，意味着气溶胶液滴在等离子体中温度最高部分暴露的时间更长。这样能实现更好的基质分解、降低谱图干扰水平并提高分析物离子的电离效率，而这些都是大多数 ICP-MS 应用中的关键参数。



在等离子体中将气溶胶液滴转化为离子的过程。

一些 ICP-MS 应用采用不同的炬管设计。包括带铂或蓝宝石中心管的可拆卸炬管，用于通过强腐蚀性酸（如 HF）进行前处理的样品。此外还包括带窄径中心管的炬管，通常用于挥发性溶剂的分析及其他特殊应用。

等离子体中每种元素的电离程度取决于元素的电离能（或电离势，IP）和等离子体温度。IP 是指一个中性原子失去一个电子形成离子所需的能量。氩气是 ICP-MS 的理想辅助气体，因为它的第一电离势高于其他大多数元素的第一电离势，但低于它们的第二电离势（失去两个电子所需的能量）。氩气的这一特性意味着可以将通过 ICP-MS 等离子体的大多数元素有效地转化为单电荷阳离子 (M^+)，而仅形成少量双电荷离子 (M^{2+})。在典型的等离子体条件下，大多数天然存在的元素至少有 75% 被电离，这是 ICP-MS 灵敏度非常高的主要原因之一。然而，一些重要元素无法充分电离，特别是 Zn、Be、As、Se、Cd、Hg 和一些贵金属。优化各项条件，获得稳定的高温等离子体对于实现这些元素的高灵敏度和低检测限非常重要。

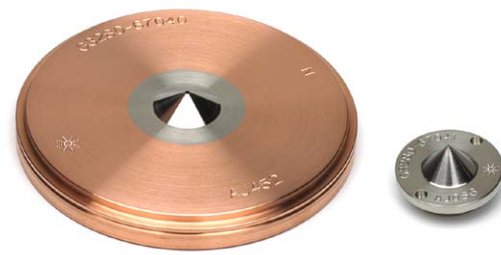


各元素的电离度（原子转化为离子的百分比）与第一电离势的关系图。

3. 真空接口

等离子体离子源和四极杆质谱仪由真空接口隔开，真空接口将离子从等离子体（大气压）传输到质谱仪（真空室中）。该接口由一系列冷却的金属板或“锥体”组成，上面有允许离子通过的小孔。典型的配置是使用采样锥从等离子体中提取离子，然后使用截取锥对离子束的中心部分进行采样，以进入高真空区域。

首选小锥孔（约 0.5–1.0 mm），因为它们可以为四极杆质量过滤器和检测器的操作提供理想的真空条件。更低的真空压力（残留气体更少）有助于提高离子传输效率，因散射导致的峰展宽更少，背景更低。但是小孔径锥更难精确制造，并且会导致从等离子体中提取并通过接口的离子更少。如果样品基质在等离子体中没有完全解离，小锥孔还更易堵塞。只有结合等离子体和离子透镜等其他 ICP-MS 组件的优化设计，才能充分发挥理想接口锥几何结构的优势。



ICP-MS 接口包括采样锥（左）和截取锥（右）。

4. 离子聚焦和分离

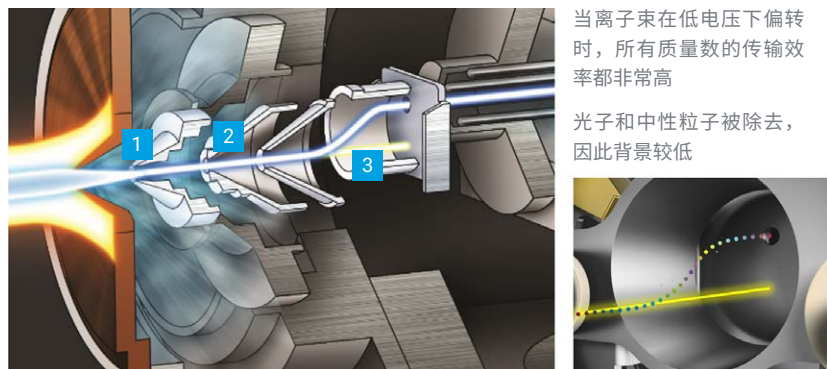
离子通过接口锥后，离子“透镜”将它们聚焦成较窄的离子束。透镜由几块金属板组成，金属板上施加了可调电压。施加正压的金属板排斥带正电荷的离子，而施加负压的板则吸引这些离子。使用施加不同电压的透镜板组合来引导和聚焦离子。

除了聚焦离子从而尽可能提高传输效率和灵敏度外，离子透镜还可以将离子与提取自等离子体的中性粒子和光子分离。这些不带电粒子会导致背景信号升高，因此必须防止它们通过真空系统到达检测器。为了实现这一目的，通常使离子偏转离轴，而不带电的光子和中性粒子则继续沿直线移动，从而将它们从离子束中除去。ICP-MS 中使用的离子透镜设计有好几种，但它们都具有相同的目标，即为所有质量数的离子提供高传输效率，同时尽量降低光子和中性粒子导致的背景信号。

值得注意的是，较低的电压、较温和的偏转是首选，因为这样不同质量离子的偏转角度之间的差异更小。不同质量离子的偏转差异会引入质量歧视（不同质量的传输效率差异），这是多元素分析仪中不希望看到的。质量歧视效应非常低的离子透镜可以提供一致的离子传输，从而在整个质量范围内为所有分析物提供一致的高灵敏度和低检测限。

离子透镜

1. 提取并引导离子通过接口
2. 有效聚焦所有质量数，在整个质量数范围内提供良好的灵敏度
3. 将离子与光子和中性粒子分离

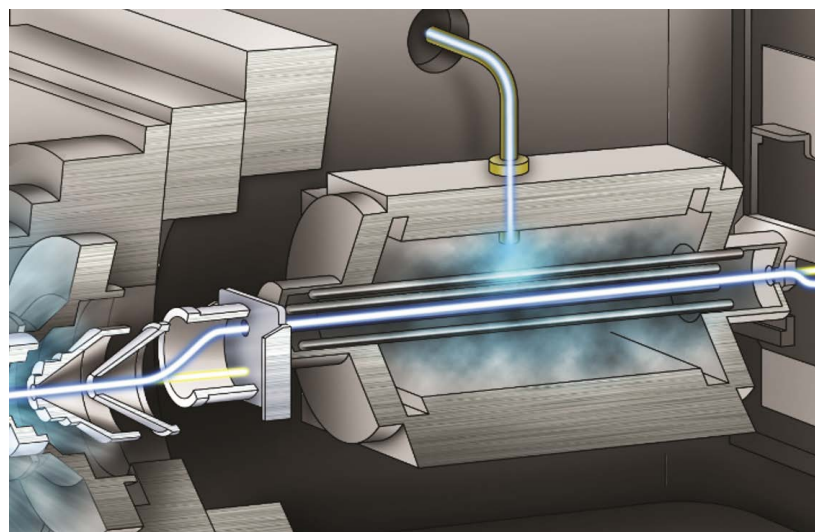


离子透镜的位置和操作的剖面图。

5. 碰撞/反应池

自 21 世纪初以来，几乎所有新的 ICP-MS 系统都包含碰撞/反应池 (CRC)，用于解决与待测分析物离子质量数相同的干扰离子导致的谱图重叠。到目前为止，ICP-MS 中最严重的谱图重叠是由分子（或“多原子”）离子引起的。当多个原子形成与目标分析物质量数相同的离子时，会发生多原子离子重叠。例如， ^{40}Ar 可以与 ^{16}O 结合生成质量数为 56 的 ArO^+ 多原子离子，与铁的主要同位素 (^{56}Fe) 重叠。类似地， ^{40}Ar 还可以与 ^{35}Cl 结合生成质量数为 75 的 ArCl^+ 多原子离子，与砷的唯一同位素 (^{75}As) 重叠。在 ICP-MS 中，多原子离子重叠是一个长期存在的问题，因此开发 CRC 来解决这些重叠干扰是提升数据准确度并提高 ICP-MS 在许多常规测量行业中的使用率的一个主要方面。

CRC 由离子导杆（通常为八极杆或四极杆）组成，位于可以通过气体加压的封闭腔室（或“池”）中。较小的入口和出口孔可维持碰撞/反应池压力，同时允许离子进出碰撞/反应池。用于消除干扰的过程取决于添加到池中的气体（可以使用一种或多种气体），可大致分为碰撞模式和反应模式。



单四极杆 ICP-MS 中位于离子透镜和质量过滤器之间的碰撞/反应池的剖面图。可通过碰撞或反应气体对池加压，以消除干扰离子。

碰撞模式

在碰撞模式下，通过非反应性气体（通常为氦气 (He)）对 CRC 加压。通过 CRC 的离子与 He 原子发生碰撞，每次碰撞都会损失少量动能。多原子离子通常比同质量的分析物离子大，因此多原子离子发生碰撞的频率比分析物离子高。不同的碰撞率意味着在池出口处多原子离子的剩余能量比分析物离子低。利用动能歧视 (KED) 过程，通过正偏压“步骤”将低能量离子从离子束中剔除。

碰撞模式要求所有离子以窄离子能量扩散进入池中。此外，离子导杆必须尽量减少散射损失，从而在有效 KED 所需的高池气压和高碰撞率下提供高离子传输效率。

He KED 可视作一种通用的 CRC 模式，因为可以使用相同的池条件来解决不同样品类型中多个分析物质量数处的多种多原子离子重叠问题。

反应模式

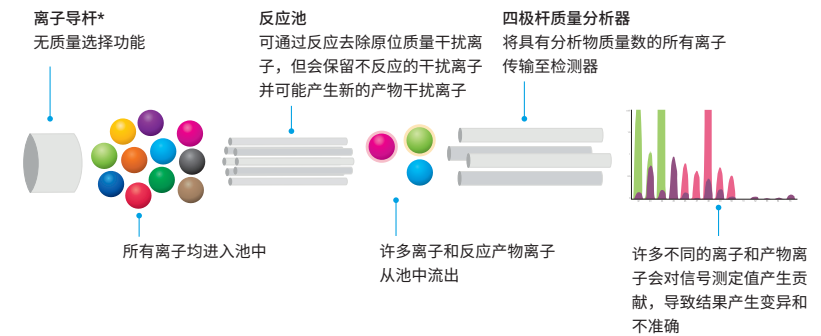
反应模式使用与碰撞模式相同的 CRC 硬件，但通过 H₂、O₂、NH₃、CH₄、N₂O 或 CH₃F 等反应气体对池加压，而不是 He。反应模式可以非常高效，因为离子和池气体分子之间的反应通常发生在最初的几次碰撞中，而 He KED 需要多次碰撞，因此需要更高的池气体压力。反应气体方法也比 He KED 更具特异性，因为必须根据气体与干扰离子和分析物同位素的不同反应化学过程来选择气体。因此，在选择反应气体之前，分析人员必须知道他们想要消除哪些干扰离子。

反应池气体与 He KED 的不同之处在于，它们可用于消除多原子离子以外的干扰。与多原子干扰相比，同质异位素重叠、双电荷离子重叠和相邻质量数峰尾重叠等其他谱图重叠虽不算太常见，但仍然需要重视。

与 He KED 的另一个主要区别在于，反应池气体可能形成与分析物重叠的新的反应产物离子。潜在的新产物离子干扰意味着，单四极杆 ICP-MS 用户倾向于仅在样品基质一致且干扰可预测的情况下使用反应气体方法。而 MS/MS 模式下的串联四极杆 ICP-MS (ICP-MS/MS) 则不存在这样的限制。ICP-MS/MS 仪器 CRC 前额外的四极杆质量过滤器意味着即使样品基质发生变化，进入 CRC 的离子束的组成也是一致的。因此，MS/MS 可以控制反应化学过程并消除池中形成发生重叠的产物离子的可能性。

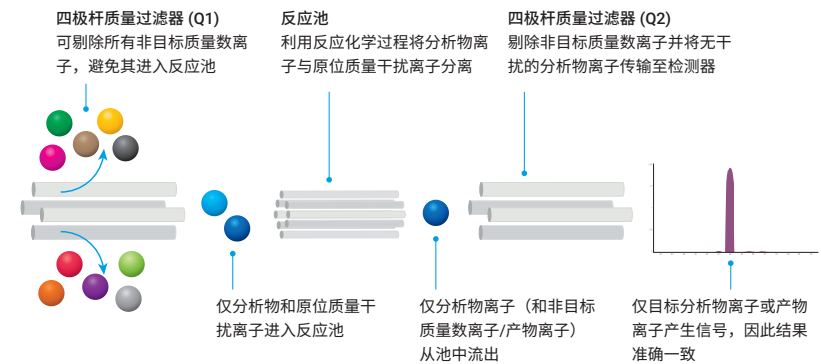
串联四极杆 ICP-MS 的额外质量过滤器 (Q1) 控制 CRC 中反应化学过程的方式如下图所示。

单四极杆 ICP-MS



*四极离子导杆可作为低质量截止器或带通滤波器使用，可剔除一部分而非全部非目标离子

具有 MS/MS 功能的安捷伦串联四极杆 ICP-MS

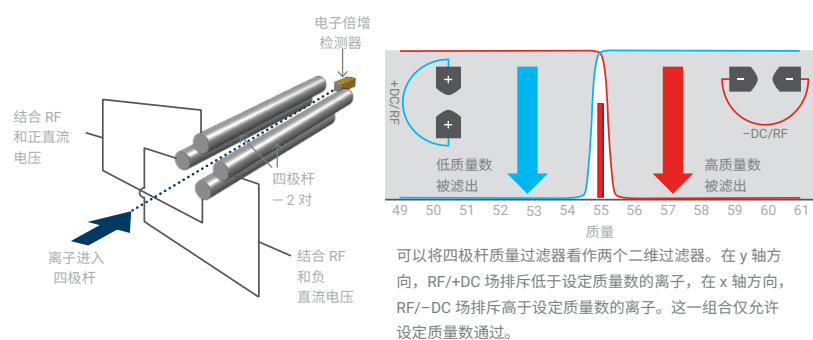


单四极杆 ICP-MS (上) 和串联四极杆 ICP-MS (下) 反应模式的对比示意图

6. 质谱仪 (MS)

大多数 ICP-MS 仪器使用四极杆质谱仪按质量数过滤离子，或者更准确地说，按质荷比 (m/z) 过滤离子。由于 ICP 产生的离子大多数带单电荷， $m/z =$ 质量数，因此通常可以认为 ICP-MS 产生的是“质谱”。

四极杆质量过滤器由两对极杆组成；相对的极杆为一对，不同杆对连接到不同的电源。对两对极杆施加一个异相 RF 电压和一个正或负直流电压 (y 轴杆上施加 RF/+DC, x 轴杆上施加 RF/-DC)。在极杆之间的空间中形成的电场决定了离子的“设定质量数”，该质量数的离子可以沿着四极杆轴稳定移动并通过质量过滤器。交变电场使高于或低于设定质量数的所有离子的运行轨迹不稳定，因此，除设定质量数外，任何其他质量数的离子都会被剔除出离子束。



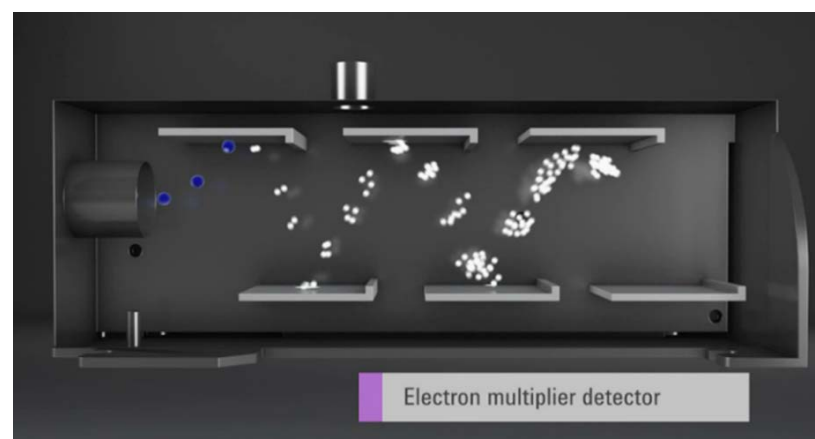
大多数 ICP-MS 仪器中使用的四极杆质量过滤器。射频和直流电压按质荷比 (m/z) 过滤离子，一次仅允许 1 种 m/z 通过以到达检测器。

四极杆的设定质量数由施加的极杆电压控制，该电压可以快速变化。这意味着四极杆可以在整个质量数范围内进行非常快速的扫描，例如从 Li (质量数为 7) 到 U (质量数为 238) 每秒超过 10 次。在每一次四极杆扫描中，每个质量数处的离子都会被传输到检测器并计数。

在常规的定量“质谱”和同位素分析中，通过对选定质量数进行多次扫描得到质谱。其他测量模式包括时间分辨分析 (TRA)，其中每次四极杆扫描收集的离子计数都基于时间进行保存。此外还具备单质量数监测功能，通常用于单纳米颗粒分析等测量。

7. 电子倍增检测器

大多数 ICP-MS 系统中使用的检测器是分立打拿极电子倍增器 (DDEM)。EM 使用一个高压电极 (或打拿极)，从四极杆出来的离子会撞击打拿极。撞击第一个打拿极的每个离子都会从打拿极表面释放一个或多个电子。然后这些电子撞击第二个打拿极，释放更多的电子撞击第三个打拿极，依此类推，直至到达检测器。到最后一个打拿极时，电子级联已经达到足够高的水平，可以被 EM 电子设备记录为脉冲或“计数”。在离子计数率非常高 (每秒超过 100 万次计数 (cps)) 时，检测器会自动切换到低增益 (或“模拟”) 模式。这样可以在不使检测器过载的情况下测量来自高浓度元素的强信号。

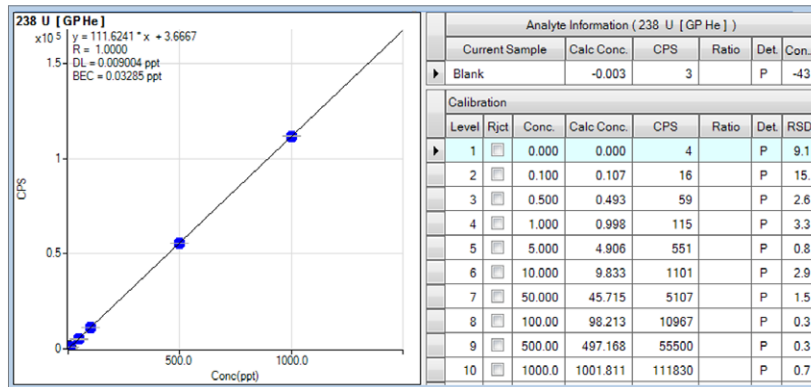


电子倍增 (EM) 检测器，沿着检测器打拿极形成电子级联，从而产生离子脉冲或计数。

EM 检测器可以检测单个离子，因此可以检测超低浓度。此外，EM 还拥有非常宽的动态范围，大约 10 或 11 个数量级。在实际分析中，这意味着 ICP-MS 可以检测浓度低于 0.1 ppt (0.0000001 ppm) 的痕量元素 (例如铀)，同时还可以检测浓度为 1.18% (11800 ppm) 的常量元素，例如海水中的钠。在一次采集中测量的总浓度范围超过 11 个数量级。

8. 数据处理

对于测量的每一个质量数，检测器记录的计数由控制仪器的计算机上的数据分析软件处理。对于常规的定量分析，软件通过将样品的实测计数与已知浓度参比溶液的计数进行比较，从而计算未知样品中每种元素的浓度。通常要测量几种参比溶液或“标样”，用每种元素的计数与已知浓度创建校准曲线。



ICP-MS 定量铀时的典型校准曲线，使用浓度在 0.1–1000 ng/L (ppt) 范围内的 10 个标样创建。

ICP-MS 的其他检测类型包括使用峰积分等色谱数据分析工具的形态分析，以及使用专门的数据处理工具的单颗粒和单细胞应用。

了解关于 Agilent [7850 ICP-MS](#)、[7900 ICP-MS](#) 和 [8900 ICP-MS/MS](#) 型号的更多信息，以及它们如何为您的实验室带来变革。



ICP-MS 的用途是什么？

使用 ICP-MS 进行元素分析的实验室所处的行业通常需要分析大量样品以及测量每个样品中的大量元素。这些行业包括环境监测（河水、饮用水、河口水和海水、废弃物、土壤和沉积物消解物、生物群等）、食品安全的常规测量、药物材料分析以及消费品检测（玩具、纺织品等）。其他 ICP-MS 应用较为广泛的行业包括半导体和纯化学品制造、生命科学、临床研究、地球化学、采矿、核科学、石化和可再生能源、材料研究、计量学以及学术界。

液体样品分析

液体样品进样是目前为止 ICP-MS 仪器最常用的进样途径，部分原因是液体校准标样种类丰富，并且可以轻松配制相应浓度的各种目标分析物的校准标样。由于液体样品分析非常方便，因此通常使用酸消解溶解样品基质，将固体样品转化为液体，或使用酸萃取将分析物萃取到溶液中进行分析。大多数常规 ICP-MS 应用使用传统的气动雾化器来引入液体样品。根据分析已知浓度的标样生成的校准曲线测量目标元素的总浓度。

当需要检测大量样品时，实验室通常会使用“不连续进样”设备。这些设备的工作原理是将样品加载到定量环中，然后将定量环中的溶液注入到流向 ICP 的载流中。不连续进样在测量前一个样品的同时将下一个样品加载到定量环中，从而加速 ICP-MS 分析。这可以加快 ICP-MS 的整体分析速度，将分析时间从通常每个样品约 3 分钟缩短到每个样品不到 1 分钟（每个样品进行三次多元素分析）。

ICP-MS 的应用还包括一些较为不常见的检测应用，比如需要关注元素不同同位素的相对丰度，例如同位素比或同位素稀释分析。ICP-MS 还可以

在整个质量数范围内运行快速扫描，为所有元素提供近似或“半定量”结果，而无需特定的校准标样。这类筛查分析对于环境或食品样品的污染物调查、确定重金属中毒的原因以及发现产品缺陷非常有用。

在某些应用中，普通的“总”元素浓度测量无法提供充足的信息。在这些情况下，可能需要对元素的不同化学形式或“形态”进行单独分析。



形态分析

ICP-MS 形态分析涉及将 ICP-MS 与某种形式的色谱设备联用，以分离元素的不同化学形式。ICP-MS 正常检测元素信号，但此时不同的化学形式将依次引入 ICP-MS 进行单独的检测和定量。高效液相色谱（HPLC，通常简称为“LC”）是其中应用最为广泛的分离技术，此外，其他的离子色谱（IC）、气相色谱（GC）、毛细管电泳（CE）、场流分离（FFF）和流体动力色谱（HDC）也实现了与 ICP-MS 的联用。需要进行形态分析的应用包括分离不

同形式的铬 (Cr)，其中三价铬 (Cr(III)) 无害，但六价铬 (Cr(VI)) 则有^[1]。类似地，无机砷 (As) 比某些海产品中含量较高的常见有机形式（例如砷甜菜碱）危害更大^[2]。食品安全检查可能需要具体测定鱼类和贝类中甲基汞和有机锡化合物的含量，而不仅仅是总汞和总锡。

然而，使用 ICP-MS 进行的形态分析远远超出了环境和食品样品中元素的有毒和无毒形式的分离。许多工业过程需要评估元素的化学形式，以确保产品性能符合预期，或识别可能影响工艺或导致有害排放的污染物。这类工业形态测量包括测定金属药物中的污染化合物，以及监测石化炼厂原料中的汞化合物，从而避免催化剂中毒和裂化工艺设备腐蚀。在半导体制造中，GC-ICP-MS 被用来测量非硅半导体器件加工中作为前体的砷化氢中的痕量氢化物气体污染物。

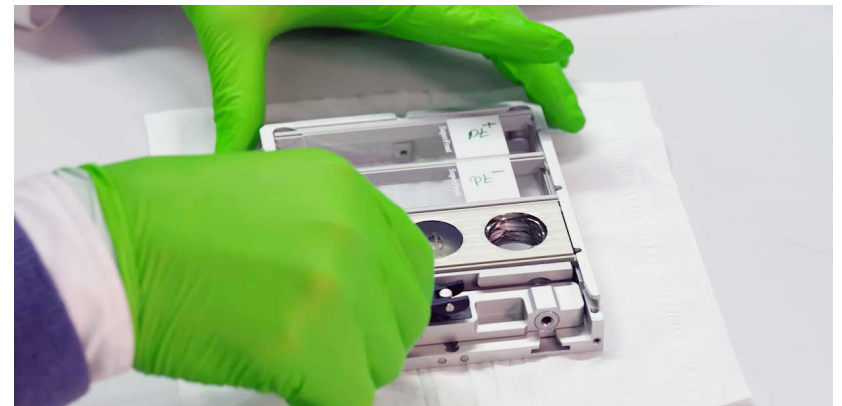
纳米颗粒和单细胞

ICP-MS 不仅可以测量样品溶液中溶解元素的含量，还可以测量悬浮在液体中的微小颗粒的组成。ICP-MS 的雾化器和雾化室会去除大（微米级）颗粒，因此无法测量这些物质。但极小（纳米级）颗粒仍然悬浮在气溶胶液滴中，并被带到等离子体中。当这些“纳米颗粒” (NPs) 在等离子体中裂解并原子化时，它们会产生离子“羽流”，在溶解元素的恒定背景信号之上可以检测到其的信号脉冲。随着研究人员不断深入了解 NPs 对环境和生物系统的影响，使用单颗粒 ICP-MS (spICP-MS) 进行纳米颗粒分析引起了越来越多的关注。NPs 在工业过程、消费品、油漆和涂料以及给药和农用化学品等领域的应用也越来越广泛。还有一种类似的分析使用专门的低流量进样系统将完整的单细胞输送到等离子体 — 单细胞 ICP-MS (scICP-MS)。这种方法可以测量单个细胞的金属含量，帮助了解生物和生物制药过程。

固体样品分析

虽然 ICP-MS 主要以液体进样为主，但使用适当的附件时也可以对固体进行 ICP-MS 分析。可以将激光剥蚀 (LA) 设备连接到 ICP-MS，通过 LA-ICP-MS 进行直接固体分析。[LA-ICP-MS](#) 的分析步骤包括将样品放入专用支架上的样品室中，然后将来自脉冲激光的高能量激光束聚焦到样品表面。从样品表面剥蚀和气化的固体颗粒被气流（通常为氦气）吹扫并带入 ICP 炬管，然后以与普通气溶胶液滴相同的方式分解、解离、原子化和离子化。

LA-ICP-MS 有时会用于金属、合金、玻璃和陶瓷的质量控制等应用，对这些难以消解的材料进行整体（全样品）分析。但 LA-ICP-MS 的真正优势在于，激光可以聚焦到仅几微米大小，因此可以分析非常小的样品或大样品中非常小的一部分。这使得可以对宝石、考古文物、陶器、硬币、油漆碎片等珍贵样品进行近乎无损的分析。类似的方法可用于空气微粒的 LA-ICP-MS 分析，将颗粒收集到采样过滤器上，为环境和工作场所粉尘分析提供单个颗粒的组成信息。LA-ICP-MS 还应用于刑侦学，以分析犯罪现场的各种碎片，例如道路交通事故中的玻璃碎片、勒索信中的笔墨迹、衣服上的纤维、鞋底的泥土、枪击残留物及许多其他此类材料。



将固体样品装入样品支架进行激光剥蚀，在此情况下，生物样品位于显微镜玻片上。

1. L. M. Calder, in: J. O. Nriagu and E. Nieboer, Eds., *Chromium in the Natural and Human Environments*, Wiley and Sons, New York, 1988, 215–229
2. European Food Safety Authority, *Scientific opinion on arsenic in food*, *EFSA Journal*, 2009, 7, 1351

当与精密的自动化样品位置控制装置相结合时，LA-ICP-MS 可用于样品中元素分布的 2D 或 3D 图谱分析，通常称为“成像”。在样品表面缓慢移动激光剥蚀“点”的同时连续扫描 ICP-MS，可以生成样品组分的化学图谱。LA-ICP-MS 成像也用于地质研究（地质成像），同时该技术也可应用于生物材料，例如牙齿、骨骼和组织切片（生物成像）。

气体分析

为了直接分析气体中的元素，使用一种特殊的气体处理装置将气体引入 ICP。ICP-MS 气体分析应用包括检测天然气中的挥发性有机金属化合物，使用顶空进样对配料和食品进行香精香料测试，以及检测化学和石化制造原材料中的痕量污染物。许多此类应用都可以使用 GC-ICP-MS 进行，其中使用加热传输线将气相色谱仪 (GC) 与 ICP-MS 仪器连接。GC 使用标准气体进样附件处理样品，而 ICP-MS 则检测和定量从气相色谱柱中出来的化合物。GC-ICP-MS 应用通常与有机 GC 质谱 (GC/MS) 有相似之处，但对于含有可使用 ICP-MS 检测的杂元素的化合物，ICP-MS 检测器可实现更低的检测限和更高的特异性，并可能实现化合物无关性校准。

气体样品的直接分析在半导体制造（制造过程中可能使用有机金属气体）的过程控制和工作场所监测等应用中也变得越来越重要。已经开发了使用配备气体交换装置 (GED) 的 ICP-MS 仪器的检测方法，其中工艺气体中的化合物通过气体交换转移到氦气流中，然后进入 ICP。



哪种类型的 ICP-MS 适合您的应用？ ICP-MS 还是 ICP-MS/MS？

与 ICP-MS/MS 相比，单四极杆 ICP-MS 价格更低，运行成本也略低。总的来说，ICP-MS/MS 的设置和运行对操作人员有更高的技术要求，尽管这主要取决于运行的方法。许多针对单四极杆 ICP-MS 开发的方法无需修改即可在 ICP-MS/MS 上运行。在 ICP-MS/MS 上运行时，使用反应池气体的方法更加稳定可靠。

为何选择 ICP-MS/MS？

与单四极杆 ICP-MS 相比，ICP-MS/MS 大大提高了灵敏度并降低了背景。这意味着 ICP-MS/MS 对大多数元素的检测限通常仅为 ICP-MS 的十分之一左右。

ICP-MS/MS 的双重质量选择功能还可为相邻质量数重叠提供出色的分离，能够从主峰中分离出痕量峰（例如 Fe 基质中的痕量 Mn，C 基质中的 B，以及 U 基质中的 Np）。

但 ICP-MS/MS 的主要优势在于该配置支持 MS/MS 操作模式，其中四极杆 1 和四极杆 2 均作为单位质量过滤器运行。MS/MS 功能使 ICP-MS/MS 能够使用反应性池气体来解决单四极杆 ICP-MS 无法解决的谱图干扰。Q1 选择进入反应池的分析物离子质量数，剔除所有其他质量数。这样确保了反应池中的离子一致且在很大程度上与样品组成无关，因此能够可靠地应用反应性池气体方法，为各种样品提供一致的结果。

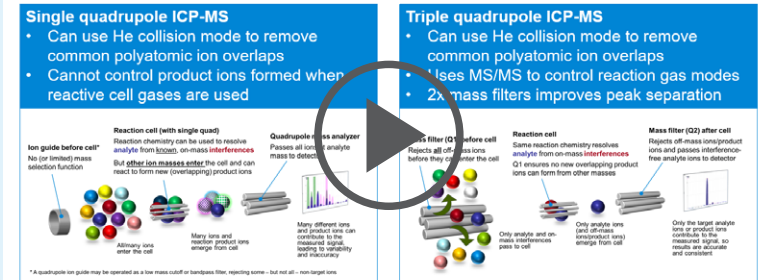
对反应化学过程的控制使 ICP-MS/MS 能够解决采用传统单四极杆 ICP-MS 无法解决的棘手干扰问题。它能够分离直接重叠的同质异位素（例如 ^{204}Hg 与 ^{204}Pb 的重叠，以及 $^{176}\text{Yb/Lu}$ 与 ^{176}Hf 的重叠），分离双电荷离子重叠（例如 REE^{2+} 与 As 和 Se 的重叠）。反应性池气体还可用于去除高强度背景干扰。例如，利用单四极杆 ICP-MS 检测 Si、P 和 S 元素时存在严重的质谱干扰（ N_2 对 ^{28}Si 的干扰、 NOH 对 ^{31}P 的干扰以及 O_2 对 ^{32}S 的干扰），因此检测限相对较高。使用反应性池气体的 ICP-MS/MS 方法能够解决这些干扰，从而能够在痕量水平下检测这些难以分析的元素。

十分钟指南

这段来自 LabTube 的短视频对串联四极杆 ICP-MS (ICP-MS/MS) 进行了大致介绍。它将 ICP-MS/MS 与单四极杆 ICP-MS 进行了比较，并展示了 ICP-MS/MS 的实际应用优势。

Key Feature of ICP-QQQ

ICP-QQQ is a tandem MS (MS/MS). Can apply 2 mass filtering steps



不确定哪种元素分析技术能够满足您的需求？

使用我们的产品选择工具进行查找：

<https://explore.agilent.com/atomic-portfolio-selector>

Agilent | Trusted Answers

Elemental Analysis Product Selector Tool

You know you need to measure elements in your samples, but which analytical technique should you choose? If you are new to atomic spectroscopy the range of different techniques can seem bewildering. The value of knowing which technique will meet your needs both now and in the future is immense. Use this tool to find what's right for you.

1. Do you need to measure any of these elements?

Ar H He Kr N Ne O Xe

Yes

No

ICP-MS 和 ICP-MS/MS 适合哪些应用？

与其他原子光谱技术（AAS 和 ICP-OES）相比，ICP-MS 和 ICP-MS/MS 兼具快速多元素分析（如 ICP-OES）和低检测限（如 GFAAS）。如果您的实验室需要检测至少十种浓度低于 100 ppb 的元素，并且每天要检测超过 50 份样品，那么相比其他原子光谱技术，ICP-MS 是更好的选择。ICP-MS 可以在高浓度和痕量水平下进行检测，但是，如果只需要检测高浓度元素且元素数量和样品数量较少，则火焰 AAS 或 MP-AES 等单元素技术可能更为经济有效。

ICP-MS 用于金属元素分析的优势

ICP-MS 能够：

- 在 3 分钟的样品读数时间内快速检测几乎所有元素（如果使用不连续进样切换阀，每个样品仅需 1 分钟）
- 为大多数元素提供高灵敏度和低检测限（低至 ng/L (ppt) 或亚 ppt 级）。还可以测量元素同位素比
- 在同一次分析中同时检测痕量和主要元素（浓度低于 0.1 ppt 至浓度高于 1000 ppm）
- 避免或解决几乎所有谱图干扰
- 检测各种类型的样品，包括有机溶剂和溶解态固体含量高达 25% 的溶液
- 与其他技术联用，例如联用液相色谱或气相色谱进行色谱分离，或者联用激光剥蚀 (LA) 直接进行固体进样
- 利用自动进样器进行无人值守运行

单四极杆 ICP-MS 应用

ICP-MS 是以下实验室的理想选择：

- 运行典型、常规或法规 ICP-MS 方法，通常分析常见的样品类型（如环境、食品或制药）
- 运行高级应用（形态分析、纳米颗粒、激光剥蚀等）且在检测限和潜在干扰方面的要求并不非常苛刻
- 检测典型的痕量元素，不包括 Si、P、S、Cl 或 F 等“困难”元素的低浓度分析
- 无需检测极低浓度的超痕量（低于 ppt 级）水平的元素
- 无需解决质谱干扰问题，如同质异位素重叠、峰尾重叠，以及使用氦碰撞模式无法解决的干扰

串联四极杆 ICP-MS 应用

ICP-MS/MS 是以下实验室的理想选择：

- 运行要求苛刻的应用，例如复杂的高基质材料，需要解决严重或难以克服的干扰
- 检测高纯度材料或半导体制程化学品中的超痕量级（ppt 或亚 ppt 级）元素
- 需要在痕量水平分析难以检测的元素，例如 Si、P、S、Cl 或 F
- 如某些地球化学或核应用所要求的，需要解决直接的同质异位素（元素）重叠，例如 $^{204}\text{Pb}/^{204}\text{Hg}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{87}\text{Rb}$ 或 $^{176}\text{Hf}/^{176}\text{Lu}$ ，或放射性同位素重叠
- 需要检测的元素浓度低，其质量数又紧邻主要元素，例如碳基质中的硼、钢铁中的锰、铀中的镅
- 执行的研究或计量应用在现在或将来需要分析更多样品类型和元素

并列比较：ICP-MS 与 ICP-MS/MS

下表对安捷伦 ICP-MS 和 ICP-MS/MS 仪器进行了比较。

	ICP-MS	ICP-MS/MS
价格	\$\$\$	\$\$\$\$
单个样品的成本	\$\$\$	\$\$\$
灵敏度	🔍🔍🔍	🔍🔍🔍🔍
评论	SelectScience	SelectScience
单日最大样品数量	400 (1200) ¹ (50 种元素)	400 (1200) ¹ (50 种元素)
检测的动态范围	< 1 ppt 至 1000 ppm	< 1 ppt 至 1000 ppm
样品用量	💧💧	💧💧
样品中固体的耐受能力	🧴🧴🧴	🧴🧴🧴
元素检测	同步	同步
可检测多少种元素?	86	87 (包括 F)
日常维护要求	🔧🔧🔧🔧	🔧🔧🔧🔧
操作人员技能要求	🎓🎓🎓 ²	🎓🎓🎓🎓 ²
是否支持无人值守运行	是	是
Part 11/附录 11 GMP 合规性	是 (配备可选的软件)	是 (配备可选的软件)

	ICP-MS	ICP-MS/MS
运行能耗	⚡⚡	⚡⚡
尺寸 (mm – 宽 × 深 × 高)	730 × 600 × 595	1060 × 600 × 595
重量	100 kg	139 kg
气体要求	99.99% 氦气	99.99% 氦气 ⁴
保修期 ³	12 个月	12 个月
附件		
自动进样器	可选	可选
水冷系统	需要, 但未包含	需要, 但未包含

1. 较大的样品数量值为装有切换阀时的仪器通量
2. 操作界面 (ICP Go) 简单, 提供针对日常分析的预设方法, 大幅降低对操作人员的技能水平要求
3. 安捷伦提供多种等同保修期服务与支持选项
4. 对于必须控制超痕量污染的应用, 例如测量半导体化学品中的杂质, 可能要求氦气纯度至少为 99.999%

应用示例

饮用水样品的多元素分析

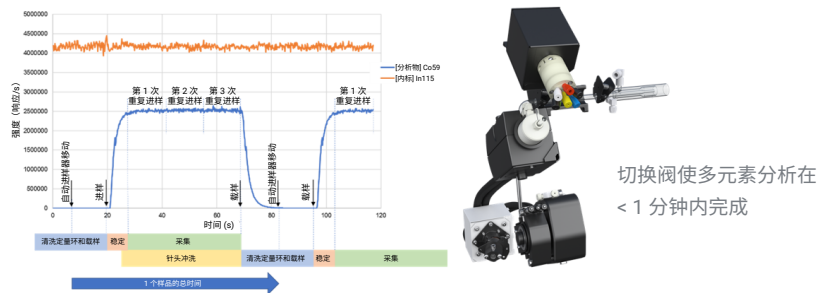
常规饮用水分析可以使用多种不同的原子光谱/质谱技术进行，其中 ICP-MS 是唯一能够同时分析所有主要元素和微量元素（包括 As、Cd、Hg 和 Pb）的技术，并具有较高的样品通量。

该应用场景通常涉及：

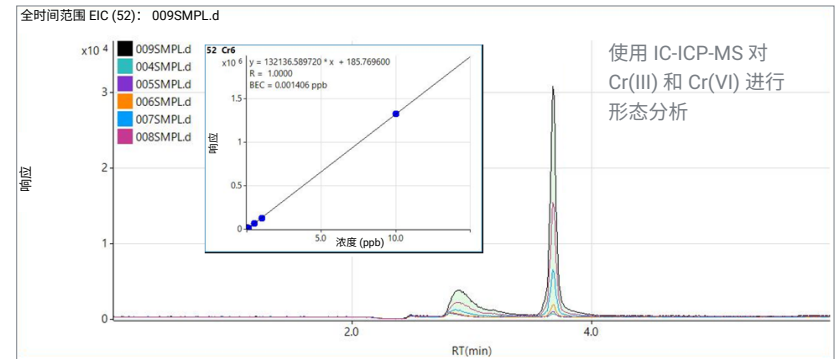
- 每天对大约 100 个样品进行常规监测，而繁忙的水质分析实验室可能需要分析更多样品
- 分析每个样品中多达 35 种的元素
- 浓度水平从矿物元素（ppm 级）到痕量级元素（0.1 ppb）不等
- 水质分析实验室通常有非常高的分析效率要求

为何使用 ICP-MS?

ICP-MS 可以对大量饮用水样品进行常规分析，如果使用切换阀，每天可处理多达 1200 个样品。

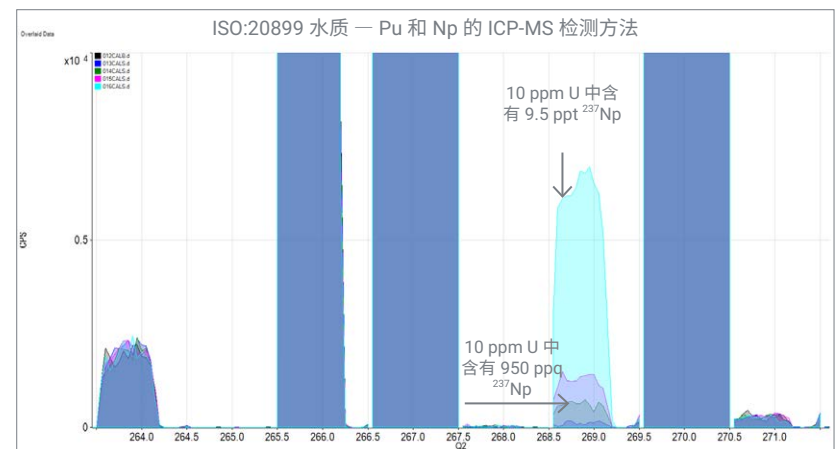


ICP-MS 可以检测所有受监管的常量元素和微量元素，否则要完成分析需要使用多种技术（使用 ICP-OES 分析常量元素，使用 GFAAS、氢化物发生法和原子荧光分析微量元素）。ICP-MS 还能够适应未来需求，因为它可以检测未来法规中可能会增加的低浓度新型污染物。ICP-MS 可以进行形态分析（例如定量无机砷、六价铬和甲基汞），并检测纳米颗粒，这些都是监管机构日益关注的方面。



ICP-MS/MS 的优势

- 大多数常规水质监测实验室会认为 ICP-MS/MS 的成本太高。但是，对于必须检测复杂水样（例如沿海和开放海域海水或高盐地下水）的实验室而言，ICP-MS/MS 更低的检测限和更出色的干扰控制能够提供诸多优势
- ICP-MS/MS 能够检测新型污染物，例如根据 ISO 20899:2018 检测 Pu 和 Np。这些痕量污染物的浓度太低，使用单四极杆 ICP-MS 无法准确检测
- ICP-MS/MS 可提供更高的灵敏度和更低的背景，而这些是成功检测极小纳米颗粒的关键因素



食品样品的多元素分析

食品分析有多种形式，从营养成分的常规认证到通过定量有毒痕量元素和农药残留来确保食品安全。食品生产商和监管机构还使用痕量元素指纹图谱来确定食品原产地。

常规食品分析的应用场景通常涉及：

- 实验室每天分析 10-100 个样品
- 分析四种营养元素，以及一组因食品类型而异的痕量元素
- 检测限和定量限从几 ppb 到几千 ppm

为何使用 ICP-MS?

ICP-MS 具有独特的能力，可以在非常宽的浓度范围内检测所有需要检测的元素，因此它可以在一次快速分析中检测主要元素、痕量营养元素以及有毒重金属。

元素	速溶脱脂奶粉	酪乳粉	全脂羊奶粉	甜奶油酪乳粉	脱脂奶粉	全脂牛奶	脱脂牛奶
11 B	3053	2931	2337	2490	2182	443.5	406.4
23 Na	3919	3870	2804	4335	3871	371	378
24 Mg	1152	1017	1094	931	1091	106	107
31 P	10215	90965	8221	8161	9845	965	985
39 K	15827	30554	15912	14590	17195	1519	1560
44 Ca	11762	9963	8488	7950	11077	1104	1123
47 Ti	442.5	221.2	201.3	256.3	253.2	<DL	<DL
51 V	24.40	25.55	27.95	28.97	15.29	9.51	9.70
52 Cr	<DL	<DL	<DL	712.26	<DL	<DL	<DL
55 Mn	170.1	220.3	292.9	193.7	219.2	20.20	19.96
56 Fe	1836	6468	2401	9760	1935	285.0	306.7
59 Co	5.90	5.75	<DL	8.45	<DL	<DL	<DL
63 Cu	308.1	609.5	899.6	485.8	391.7	35.94	66.12
66 Zn	41	30	27	28	41	4.0	4.0
75 As	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
78 Se	365.8	349.8	188.0	418.3	526.4	31.15	28.91
95 Mo	319.67	1946	104.73	2440	299.1	39.92	34.33
111 Cd	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
118 Sn	3.98	18.23	12.96	5.59	12.36	<DL	2.89
121 Sb	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
137 Ba	862.0	970.9	523.7	498.7	694.9	77.87	85.69
202 Hg	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
205 Tl	3.49	2.34	4.87	2.46	2.57	0.58	0.49
208 Pb	2.39	3.39	3.85	3.03	1.96	0.61	1.27

除 Na、Mg、P、K、Ca 和 Zn 的浓度单位为 ppm 以外，其余元素的浓度单位均为 ppb

ICP-MS 可以检测 4 种主要营养元素：**Na、Mg、K 和 Ca**

ICP-MS 还可以检测其他（痕量）元素：**P、Fe、Cu、Zn、Se 等**

ICP-MS 可以监测有毒污染物：**Cr、As、Cd、Hg 和 Pb**

此外，ICP-MS 方法可以扩展用于几乎所有其他元素。

ICP-MS/MS 的优势

- 就常规水质分析而言，ICP-MS/MS 的优势主要在于检测限较低，并且能够为复杂多变的样品提供更可靠的痕量元素分析
- 食品样品同样受到法规监管，这些法规也在不断变化，以更好地了解某些污染物带来的有害影响。ICP-MS/MS 可为新型污染物（例如镉，其 FDA 干预浓度为 15.8 ppq）提供较低的检测限。ICP-MS/MS 还支持对潜在有害的有机金属物质进行低浓度分析，例如海产品中的甲基汞
- ICP-MS/MS 使分析人员能够检测和定量基于钛（E 171 TiO₂ 食品添加剂）等元素的低浓度小粒径纳米颗粒

矿产勘探样品的多元素分析

为矿产勘探提供支持的实验室需要快速表征从调查和测试岩心中收集的大量样品。广泛的元素覆盖范围和更高的分析效率必不可少。

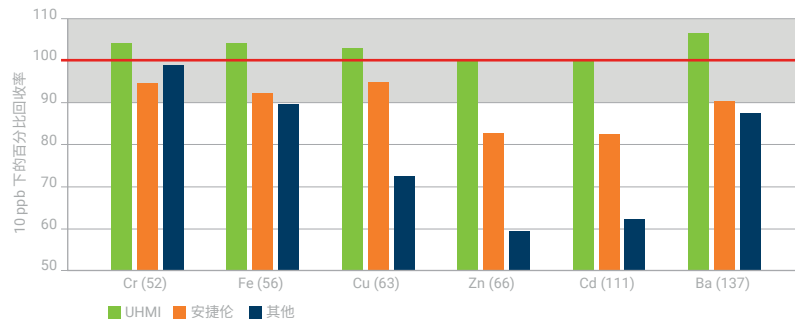
该应用场景通常涉及：

- 勘探实验室每天可能要检测数千个样品
- 通常需要检测每个样品中的“所有”（50 多种）元素
- 浓度未知且差异较大，但浓度范围从 ppb 级到常量元素级（百分级）

为何使用 ICP-MS?

ICP-MS 可以对使用 30% 王水 (3:1 HCl:HNO₃) 制备的大量高基质矿石和矿物样品进行常规分析。可以使用现有的标准 ICP-OES 样品前处理方法。在 ICP-MS 上运行样品无需开发新的消解方法或使用高倍稀释

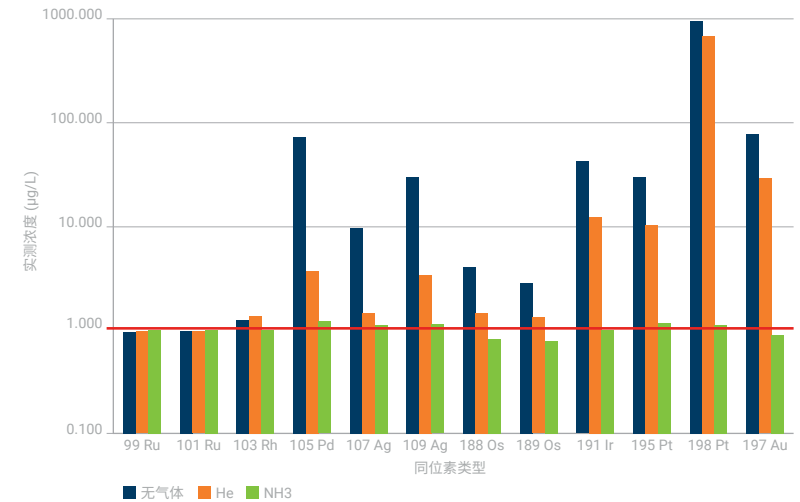
- 实验室可以使用超高基质进样 (UHMI) 气溶胶稀释系统直接分析高基质样品，而无需进行离线或在线液体稀释
- ICP-MS 通过低浓度定量和报告更广泛的分析物可以创造额外价值
- 非常稳定的 UHMI 条件还可确保在各种高基质样品中获得一致且准确的回收率，从而简化校准和 QC
- ICP-MS 具有宽动态范围，能够在一次运行中检测常量元素 (Na、Mg、Al、K、Ca、Fe、Ti 等) 和微量元素 (REEs、PGEs、TCEs 等)
- 在碰撞/反应池中使用氦气可解决常见的基质干扰，为典型分析物提供准确的结果



使用单四极杆 ICP-MS 时高基质的加标回收率（阴影区域为 ±10% 范围）。UHMI 气溶胶稀释可在高基质水平下提供一致的结果。

ICP-MS/MS 的优势

- 使用 ICP-MS/MS 可降低检测限并减少错误
- 基质重叠会使单四极杆 ICP-MS 结果出错，从而导致贵金属等低浓度元素的报告不准确
- 在 ICP-MS/MS 上使用反应性池气体方法可以解决关键分析物的质谱重叠干扰，从而提高数据质量



在 ICP-MS/MS 的反应池中使用 NH₃ (绿色) 准确回收加标浓度为 1 µg/L 的铂族元素。ICP-MS/MS 方法消除了在不使用气体 (蓝色) 或使用氦碰撞气体 (橙色) 的单四极杆 ICP-MS 方法中造成错误的基质干扰。样品基质包括 Sc、Ni、Cu、Zn、Rb、Sr、Y、Mo、Zr、Nb、Ta、Hf、W 和稀土元素 (浓度分别为 10 ppm) 和 1 ppm Hg^[3]。

3. Demar D., Jean-Soro L., Desprez, A., Analysis of Platinum Group Elements (PGEs), Silver, and Gold in Roadside Dust using Triple Quadrupole ICP-MS (使用串联四极杆 ICP-MS 分析路边粉尘中的铂族元素 (PGE)、银和金), 安捷伦出版物, 2022, [5991-6768EN](#)

高纯度化学品中痕量和超痕量污染物的分析

高纯度化学品（例如用于半导体晶圆制造或其他电子制造工艺的化学品）的金属杂质含量必须非常低。

该应用场景通常涉及：

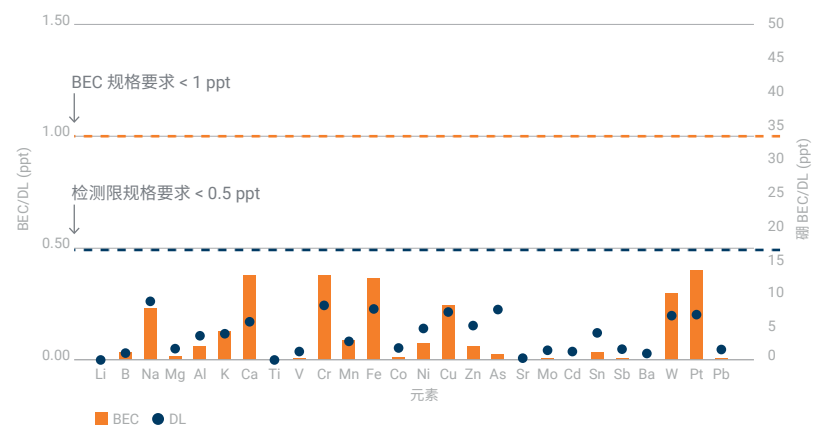
- 每天的样品数量不定，可多达 50 个
- 通常检测约 20 种元素，涉及一系列高纯度样品类型
- 浓度通常为几 ppb，或低至几 ppt 或亚 ppt 级

ICP-MS 提供的低检测限对于该行业至关重要，但单四极杆 ICP-MS 可能无法满足某些应用的亚 ppt 级要求。

为何使用 ICP-MS/MS?

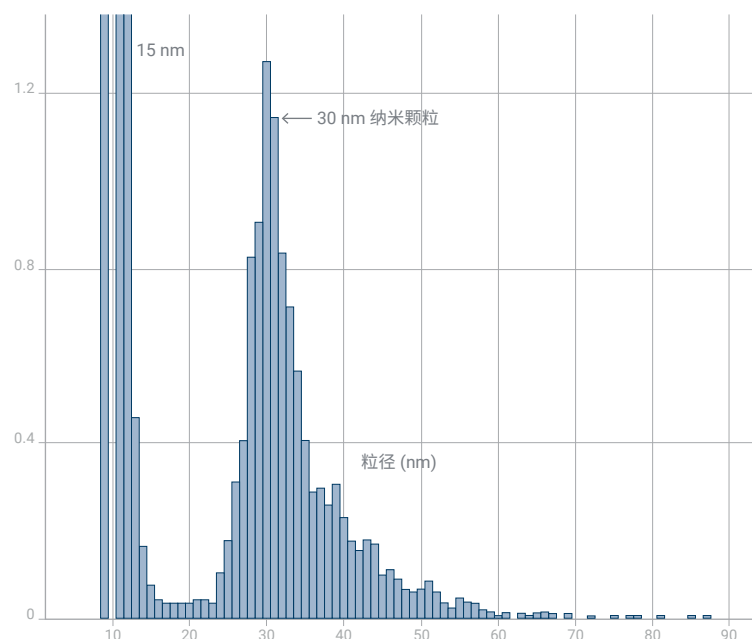
ICP-MS/MS 使用 MS/MS 模式和反应性池气体方法，能够解决质谱重叠问题，并提供比单四极杆 ICP-MS 更低的检测限和更高的准确度。

例如，用于电子制造的超纯水的污染物通常要求 < 1 ppt（硼 < 50 ppt），并且要求检测限 < 0.5 ppt（硼 < 15 ppt）。ICP-MS/MS 可以轻松满足这些要求。

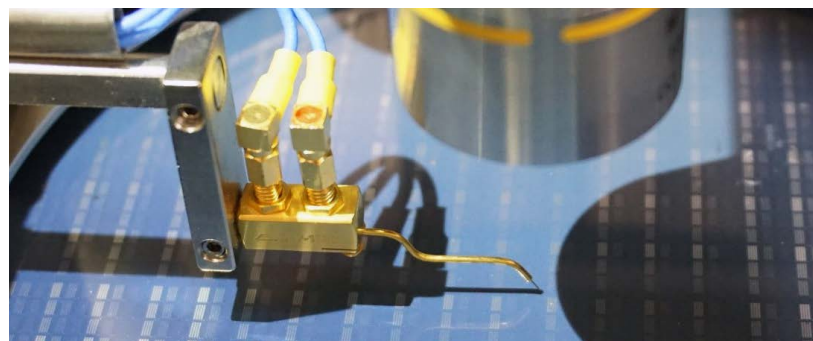


使用 ICP-MS/MS 测得的背景等效浓度 (BEC) 远低于电子制造用超纯水的规格要求 (< 1 ppt)。ICP-MS/MS 的检测限也远低于规定的 < 0.5 ppt。

- ICP-MS/MS 提高了 H_2SO_4 中的 Ti 和 Zn、HCl 中的 V 以及有机溶剂中的 Cr 等受干扰元素的数据质量
- ICP-MS/MS 可以检测单四极杆 ICP-MS 难以检测的纳米颗粒，包括 SiO_2 和 Fe_3O_4
- 与单四极杆 ICP-MS 相比，ICP-MS/MS 具有更高的灵敏度和更低的背景，改善了颗粒污染物的分析



不同大小的铁纳米颗粒在高纯度乙酸丁酯中的分布，使用 ICP-MS/MS 进行检测。



与单四极杆 ICP-MS 相比，使用 ICP-MS/MS 的 MS/MS 模式可以检测半导体制造化学品、溶剂、CMP 浆液等物质中更小的纳米颗粒

了解更多信息：

www.agilent.com/chem/atomic

如需获取技术问题的答案和安捷伦社区的资源，请访问：

community.agilent.com

安捷伦客户服务中心：

免费专线：800-820-3278

400-820-3278（手机用户）

联系我们：

LSCA-China_800@agilent.com

在线询价：

www.agilent.com/chem/erfq-cn

DE60328579

本文中的信息、说明和指标如有变更，恕不另行通知。

© 安捷伦科技（中国）有限公司，2022
2022年5月4日，中国出版
5994-4830ZHCN

