

双池耦合碰撞反应系统 (DCS) 和高性能氦气碰撞模式 (AHM)

与传统 He-KED 相比，技术发展提高了灵敏度并改善了干扰消除能力



安捷伦碰撞反应池 (CRC) 技术的发展历程

- **2001**: 推出首款配备 CRC 的 ICP-MS — 配备八极杆反应系统 (ORS) 的 Agilent 7500c
- **2011**: 推出利用碰撞诱导解离 (CID) 的高能氦气模式 (HEHe)
- **2012**: 推出首台串联四极杆 ICP-MS — Agilent 8800 ICP-MS/MS
- **2016**: 推出带轴向加速的第二代串联四极杆 ICP-MS — Agilent 8900 ICP-MS/MS
- **2026**: 为 Agilent 9500 ICP-MS/MS 推出创新的双池耦合碰撞反应系统 (DCS) 和高性能氦气碰撞模式 (AHM)

前言

碰撞/反应池 (CRC) 技术现已成为现代 ICP-MS 系统的标准功能，为消除影响数据质量的质谱干扰提供了可靠手段。集成 CRCs 的 ICP-MS 系统涵盖从用于环境和食品分析的单四极杆 (SQ) ICP-MS，到用于高端研究应用的串联四极杆 ICP-MS (ICP-MS/MS)。在常规应用中，氦气动能歧视 (He KED) 模式通常称为氦气碰撞模式 (He 模式)，是应用最广泛的 CRC 操作模式。He 模式得以普遍使用，是因为它能够全面减少各种多原子干扰，且无需针对特定元素进行优化。

与依赖反应池气体且需要复杂调节的 CRCs (通常称为反应池) 不同，He 模式可以有效减轻许多常见的多原子离子干扰，无需进行繁琐的调整。相比之下，反应池通常需要根据目标分析物的特定干扰离子，仔细选择气体种类 (如氦气或氧气) 和调谐参数。

在 He 模式简单易用的基础上，安捷伦为 Agilent 9500 串联四极杆 ICP-MS (ICP-MS/MS) 开发了高性能氦气碰撞模式 (AHM)。AHM 是干扰消除技术的一项重要进展，其实现得益于新设计的安捷伦双池耦合碰撞反应系统 (DCS) 以及高速池电压控制。这些创新技术在全质量数范围内实现了高灵敏度，并为常规应用提供了卓越的干扰消除性能。与传统 He 模式相比，AHM 具有以下改进：

- 低质量数元素 (如铍 (Be) 和硼 (B)) 的灵敏度提升约 20 倍
- 中高质量数元素的灵敏度提升约 2 倍
- 在保持检出限 (DLs) 的前提下，数据采集时间最多缩短 33%，从而加快分析测量速度

AHM 不仅取代了传统 He KED，还将无气体、He 和 HEHe 等多种调谐模式整合为一种简化模式。AHM 作为新一代标准 He 模式，已集成到 9500 ICP-MS/MS 中，与此前模式相比，它更快速、更简便，且性能更为优异。

本技术简报将阐述 DCS 与 AHM 性能提升的机制，并包含与传统 He KED 模式的部分对比结果，以展示 AHM 的分析性能改进。

DCS 设计特点与干扰消除能力

DCS 是一种独特的 CRC，集成在 9500 ICP-MS/MS 的两个四极杆 (Q1 和 Q2) 之间。DCS 的结构如图 1 所示。与使用单个多极杆离子导杆的传统 CRCs 不同，DCS 配有两组离子导杆，一组位于前部，靠近 Q1，另一组位于池的后部，靠近 Q2。这两组离子导杆分别通过偏置电压独立控制，称为前池偏置电压和后池偏置电压。正是这些电压驱动离子在 DCS 中移动。

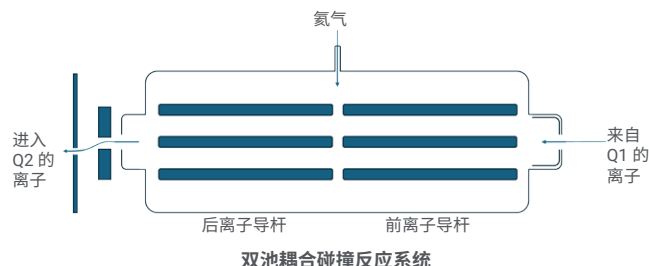


图 1. 安捷伦双池耦合碰撞反应系统 (DCS) 使用氦气作为池气体加压的示意图。通过在前、后离子导杆偏转电压之间设置压差，可精确控制池的 KED 电压。DCS 的创新设计通过动能歧视 (KED) 与碰撞诱导解离 (CID) 两种机制的结合，实现了高性能氦气碰撞模式 (AHM) 中优化的干扰消除性能

在标准操作条件下，氦气流速设置为 14 mL/min，前池偏转电压为 -98 V，后池偏转电压为 -88 V。两池之间的电压差 (10 V) 即作为 KED 电压。这种配置使 DCS 能够通过结合 KED 与碰撞诱导解离 (CID) 两种机制，有效抑制干扰离子。双池耦合碰撞反应系统中的“双”既指双离子导杆，也指双重干扰消除机制。

丰度灵敏度 (AS) 是衡量强峰对相邻质量数影响的指标。在使用多极离子导杆的 HEHe 模式下，当存在高能离子时，AS 性能往往会下降，这限制了其在某些元素中的应用。而 DCS 通过在后离子导杆中利用碰撞使高能离子热化，可获得与无气体模式相当的 AS 性能。此外，将前池偏转电压设置为极低值 (如 -90 V) 可增强 CID 效果，同时 KED 可在氦气流量 14 mL/min 条件下持续运行。与传统 He KED 模式相比，DCS 的这些特性带来了更高的灵敏度和更好的干扰消除能力。

He KED 性能提升原理与 DCS 设计

He KED 是常规 ICP-MS 分析中应用最广泛的模式之一。它利用 He 原子、分析物离子和干扰离子之间的碰撞截面差异，来减少多原子离子干扰。由于多原子离子的横截面积大于分析物离子，它们会在池中与 He 发生更多碰撞，从而损失更多动能 (KE)。然后在池与 Q2 之间施加一个电压势垒，称为 KE 电压或 KED。该势垒会抑制低能干扰离子，同时让能量较高的分析物离子通过并到达 Q2 和检测器。

在 He KED 模式下，可通过增加离子与 He 气体原子的碰撞次数来提升性能，而这可以通过提高氦气流速来实现。此处的“性能”既指分析物离子与干扰离子之间的信噪比 (S/N)，也指目标分析物的信号强度 (灵敏度)。

图 2 显示了安装于 8900 ICP-MS/MS 中的 He 碰撞池的模拟结果，显示了钒 (V^+) 分析物离子和一氧化氯 (ClO^+) 干扰离子在池出口处的 KE 分布。 V^+ 离子因与 He 碰撞而损失 KE，其能量分布随之展宽。随着氦气流速增加，碰撞次数增多，KE 分布会收窄。 ClO^+ 离子的碰撞截面大于 V^+ ，因此会经历更多碰撞，导致更大的 KE 损失，并与 V^+ 产生更明显的分离。

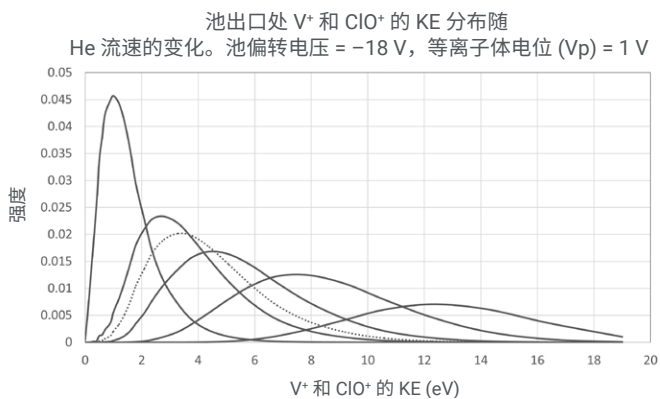


图 2. 计算得到的 V^+ 和 ClO^+ 在池出口处的动能 (KE) 分布。实线代表在 He 流速分别为 2、4、6、8 和 12 mL/min 时，池出口处 V^+ 离子的 KE 分布。虚线表示 ClO^+ 离子在 He 流速为 4 mL/min 时的 KE 分布。在相同的 He 流速 (4 mL/min) 下比较两种离子时， ClO^+ 离子因其碰撞截面更大，呈现出比 V^+ 离子更低的 KE 分布

在池出口施加适当的 KED 电压，可以提高 V^+/ClO^+ 比值。然而，在此过程中也会有部分 V^+ 离子损失，导致灵敏度降低。图 3 显示了基于 ClO^+/V^+ 比值，在不同氦气流速与 KED 电压 (与图 2 模拟条件相同) 下计算得到的灵敏度及背景等效浓度 (BECs)。随着所用 KED 电压的升高，背景下降速度快于灵敏度下降速度，从而改善了 BEC。

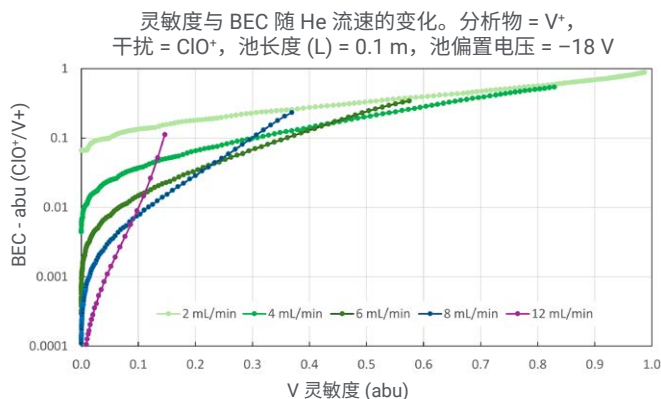


图 3. 在不同 He 流速下，计算得到的 ClO^+ 基质中钒 (V) 的灵敏度与 BEC 的关系。在各 He 流量下，以 KED 为中间变量，计算 V 的灵敏度 (X 轴) 和 V 在 ClO^+ 基质中的 BEC (Y 轴)。两个值均以相对值表示，并以 He 流速 = 0 mL/min、KED = 0 V 的基线条件进行归一化处理

模拟后得到的见解：KED 电压与灵敏度之间的权衡

从模拟结果可以明显看出，提高 KED 电压可以改善 BEC，但会降低灵敏度。同时，虽然更高的 He 流量能提升灵敏度并改善 BEC，但改善效果在 6 mL/min 左右趋于平缓。这一限制的出现，是因为离子在高流速下过度热化，会降低 KED 的有效性。

为了在更高 He 流速下保持有效的 KED 性能，需要提高离子的入池能量，可通过降低离子导杆偏转电压来实现。

为确保高灵敏度和有效的干扰消除，DCS 正是基于这些原理设计的。当使用 He 以外的池气体 (例如 O_2 或 NH_3) 时，前、后离子导杆施加相同的偏转电压，使系统能够像传统的单离子导杆一样运行。

AHM 概述及优势

由于传统 He KED 模式下的灵敏度较低，多元素 ICP-MS 方法在测定 Be 和 B 等低质量数元素时通常采用无气体模式。因此，许多常规 ICP-MS 应用一直需要组合使用无气体、He 和 HEHe 等多种调谐设置。每次模式切换都需要重新稳定池压力，进而导致分析延迟。

实际上，低质量数元素 ($m/z < 23$) 一般不受多原子离子干扰的影响，因此通常不需要 KED。因此，在 AHM 中，对于低质量数元素，DCS 施加不同的电压（相当于禁用 KED），而对于 $m/z \geq 23$ 的元素则保持标准设置。

DCS 电压通过高速电压控制电路与 Q2 同步动态切换，与常规 He 模式相比，低质量数元素的灵敏度提高了 20 倍以上。AHM 无需再在无气体模式下运行，大大简化了方法。作为默认方式，仅使用 AHM 即可满足大多数应用需求^[1]。

AHM 与传统 He 模式的性能对比

为评估配备 DCS 并以 AHM 运行的 9500 ICP-MS/MS 的性能，制备了一系列样品类型来模拟常规或具有挑战性的应用。然后将结果与使用传统 He KED 模式获得的结果进行比较。

低质量数元素

如图 4 所示，与 He 模式相比，AHM 模式将低质量数分析物 ($m/z < 23$) 的灵敏度提升了约 20 倍。对于 Be，AHM 的灵敏度约为无气体模式的三分之一。

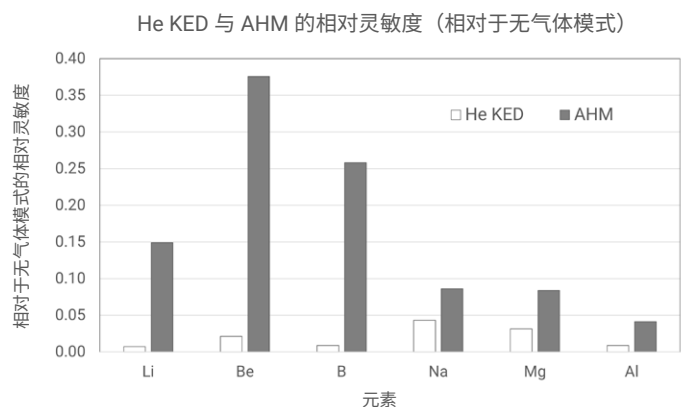


图 4. Agilent 9500 ICP-MS/MS 在 AHM 和 He 模式下相对于无气体模式的相对灵敏度

富碳基质

如图 5 所示，在 15% 异丙醇 (IPA) 中，分别采用无气体、He 和 AHM 模式测定了 Mg、Al 和 Cr 的含量。干扰包括 C_2^+ 对 $^{24}Mg^+$ 、 $C_2H_3^+$ 对 $^{27}Al^+$ 以及 ArC^+ 对 $^{57}Cr^+$ 。AHM 的灵敏度 (cps/ppb) 比 He 模式高约 2 倍，BECs (ppb) 更低。

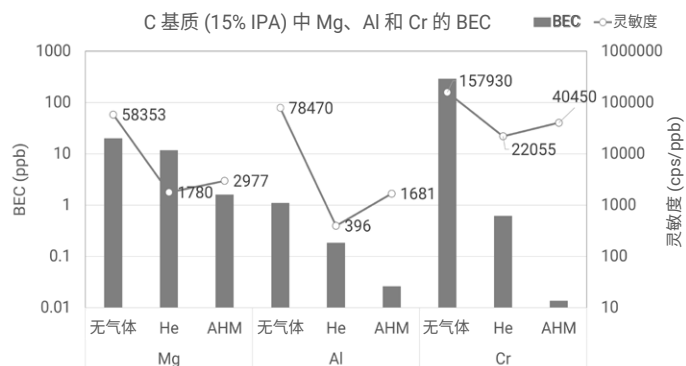


图 5. 15% IPA 中 Mg、Al 和 Cr 的灵敏度与 BEC 对比

氯化物和钙基质

为模拟具有挑战性的应用，在空白、2% HCl 以及加标 100 ppm Ca 的 2% HCl 中测定了 V、As 和 Se。干扰包括 ClO^+ 对 $^{51}V^+$ 、 $ArCl^+$ 对 $^{75}As^+$ 以及 $ArClH^+/CaClH^+$ 对 $^{78}Se^+$ 。如图 6 所示，AHM 的灵敏度 (cps/ppb) 比 He 模式更高，BECs (ppb) 更低。值得注意的是，在 AHM 模式下，空白中 Se 的 BEC 处于个位数 ppt 水平。

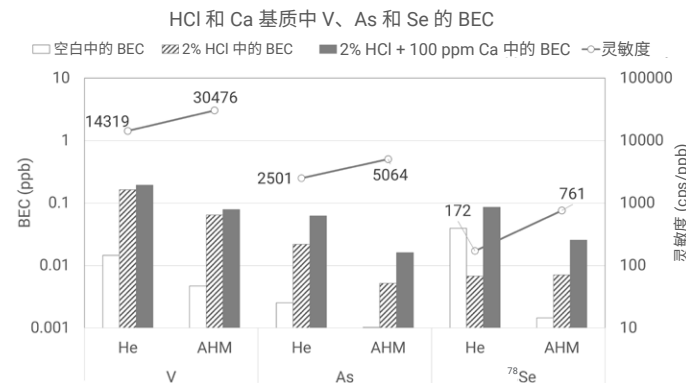


图 6. 比较 He 模式和 AHM 消除 Cl 和 Ca 干扰的效果

钡基质中的铕 (Eu)

在 20 ppm 钡 (Ba) 基质中，两种 Eu 同位素 (^{151}Eu 和 ^{153}Eu) 均受到 BaO^+ 干扰的影响。如图 7 所示，AHM 测定 Eu 的灵敏度是 He 模式的两倍，且 BECs 更低，这证实了 9500 ICP-MS/MS 方法的有效性。

参考文献

1. Siva, S. 采用配备不连续进样和自动稀释功能的 ICP-MS/MS 对食品进行自动化分析, 安捷伦出版物 [5994-9095ZHCN](#)

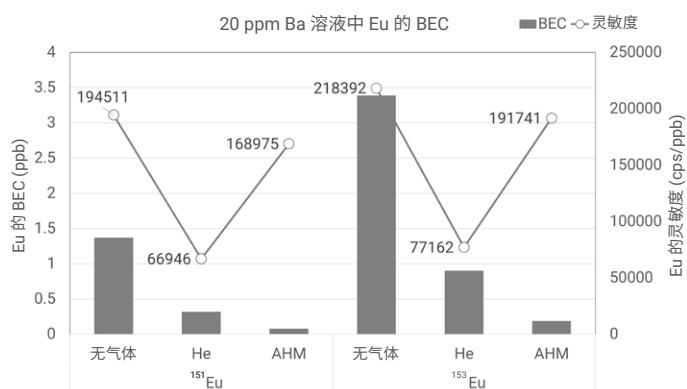


图 7. 20 ppm Ba 中 Eu 的灵敏度与 BEC 对比。¹⁵¹Eu 和 ¹⁵³Eu 均使用无气体、He 和 AHM 模式进行测定

结论：干扰消除与灵敏度的新标准

Agilent 9500 ICP-MS/MS 集成了多项创新技术, 包括双池耦合碰撞反应系统 (DCS) 和高性能氦气碰撞模式 (AHM), 这两项发展标志着 ICP-MS 性能的重大进步。

基于对离子行为和碰撞动力学的深入理解而开发的 DCS, 可在宽质量范围内提供出色的干扰消除能力与高灵敏度。双离子导杆设计和双机制方法 (KED + CID) 超越了传统高能 HeHe 和 He KED 模式的局限, 实现了更广泛的应用和更好的丰度灵敏度。

AHM 通过实时智能优化低质量数和质量数元素的池条件, 改变了基于 He 的干扰消除方式。AHM 对低质量数元素的灵敏度提升可达 20 倍, 且无需切换多种调谐模式, 从而简化了工作流程、缩短了分析时间并提高了数据质量。

DCS 与 AHM 相结合, 为 ICP-MS 的性能、效率和易用性树立了新标杆。这些创新使用户能够获得更快、更准确、更可靠的结果, 使 9500 ICP-MS/MS 成为寻求新一代分析能力的实验室的理想解决方案。

查找当地的安捷伦客户中心：

www.agilent.com/chem/contactus-cn

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

www.agilent.com/chem/9500icpqqq

DE-012982

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，2026
2026年6月1日，中国出版
5994-8985ZHCN

