

安捷伦稀土行业解决方案





稀土行业概述

稀土元素是 17 种金属元素的统称（包括 15 种镧系元素以及钪和钇），根据原子序数和密度，可分为轻稀土元素和重稀土元素。轻稀土元素是指原子序数较小、密度较低的稀土元素，包括镧 (La)、铈 (Ce)、镨 (Pr)、钕 (Nd)、钷 (Pm)、钐 (Sm) 和铕 (Eu) 等 7 种；重稀土是指原子序数较大、密度较高的稀土元素，包括钆 (Gd)、铽 (Tb)、镝 (Dy)、钬 (Ho)、铒 (Er)、铥 (Tm)、镱 (Yb)、镱 (Lu)、钪 (Sc) 和钇 (Y) 等 10 种。稀土元素原子的 4f 电子层未被填满，因此这些元素表现出独特的物理和化学性质（包括强磁性、高效发光性、高温稳定性和催化活性等），被誉为“工业维生素”或“高科技产业黄金”。

稀土产业链介绍

稀土产业链的上游包括开采、选矿、冶炼与分离，中游主要包括金属制备与材料加工，下游包括终端应用与废物回收。各工艺环节简述如下：

- **开采与选矿**：开采出的稀土原位矿石品位通常很低，稀土氧化物 (REO) 含量也较低，因此，需要通过选矿工艺富集。主要采用浮选法，并常与重选和磁选等工艺结合使用。经过多道选矿流程后，稀土精矿中的稀土氧化物品位可提升至 60% 以上
- **冶炼**：冶炼环节是将精矿转化为高纯度材料的关键步骤，主要分为精矿分解和元素分离。精矿分解常用方法包括酸法（焙烧法）、碱法和氯化分解。例如，氟碳铈矿或混合型精矿通常采用硫酸化焙烧法。该方法通过将精矿与硫酸混合焙烧，使稀土转化为可溶性稀土硫酸盐，同时去除氟、磷等杂质
- **分离**：稀土元素化学性质极为相近，分离和提纯难度较大。主要分离方法包括溶剂萃取法、离子交换法和沉淀分离法。溶剂萃取法因分离效果好且适合连续生产，成为工业分离高纯单一稀土元素的主流工艺；离子交换法则主要用于生产超高纯度的重稀土产品
- **金属制备**：稀土金属制备分为湿法冶金和火法冶金。湿法冶金工艺流程复杂，适用于高纯单一稀土元素的生产；火法冶金包括熔盐电解法（适用于轻稀土金属）和金属热还原法（适用于重稀土金属及高纯单一稀土）
- **下游应用（以钕铁硼磁体制备为例）**：先将镨钕稀土、铁、硼等原材料按配比熔融合金化，经氢化脱氢制粉获得超细磁粉，随后通过模压，注射成型实现磁粉定向排列，在真空烧结炉中高温致密化，再经回火处理优化磁性能；后续通过精密切割、磨削加工至目标尺寸，表面采用电镀、磷化等工艺防腐蚀，最终根据终端场景（如新能源汽车电机、风力发电机等）进行充磁、装配，形成兼具高剩磁、高矫顽力的高性能磁体产品
- **稀土回收**：稀土回收工艺的核心在于从含稀土的二次资源中高效提取、分离并提纯稀土元素。常见二次资源包括旧稀土永磁体、荧光粉、催化剂、储氢合金、稀土尾矿及生产废渣等。回收流程包括预处理（如拆解、破碎研磨和焙烧）、浸出（酸法、碱法或焙烧）、净化除杂（调节 pH、氧化还原、萃取除杂等）、分离提纯及再生产制备

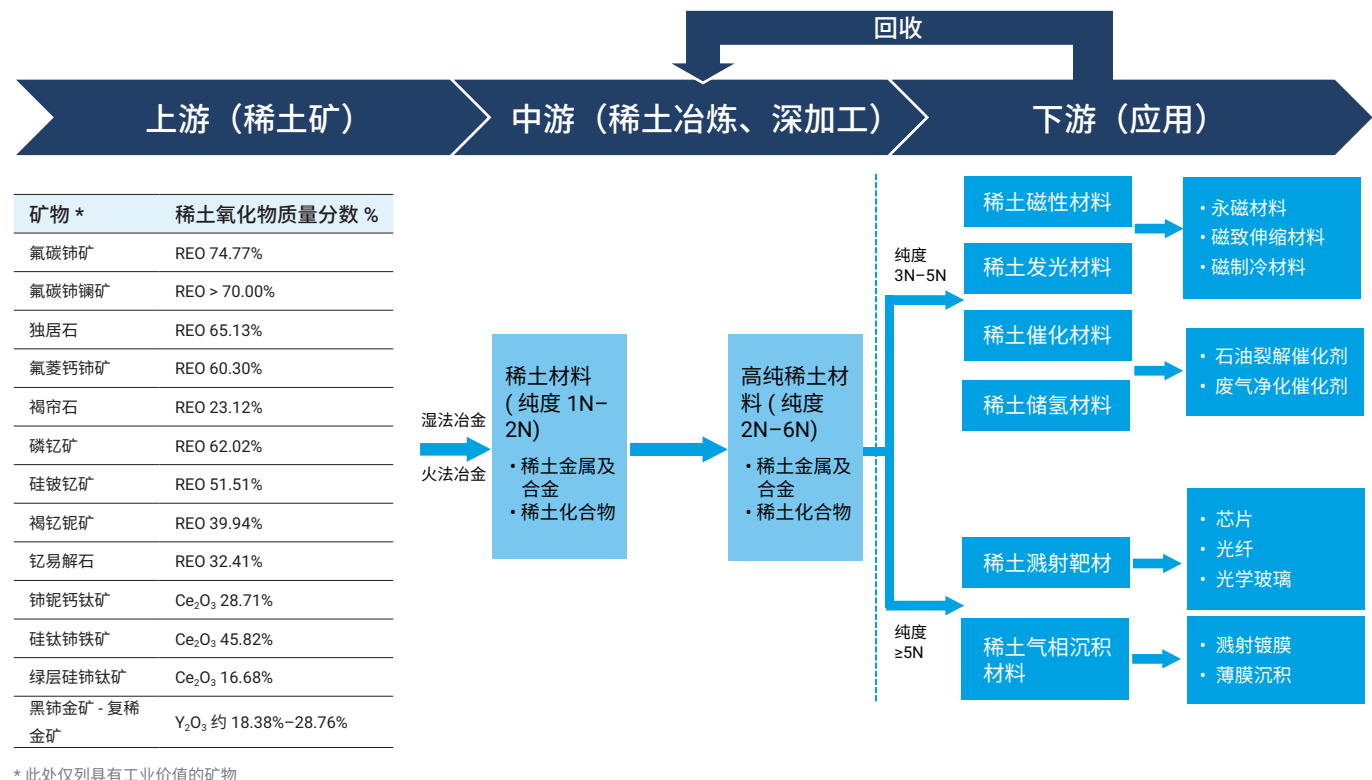


图 1. 稀土产业链

稀土材料行业应用

稀土材料广泛应用于许多行业领域，例如：永磁材料（风力发电机、新能源汽车电机、硬盘驱动器和精密电机等）；催化剂材料（石油裂化催化剂、汽车尾气净化催化剂和工业废气处理催化剂等）；发光和显示技术（LED 照明、液晶显示器背光源和 X-光增感屏等）；储氢材料（镍氢电池和氢能源转储存罐等）；光学玻璃与精密陶瓷（光学玻璃与激光玻璃、耐高温陶瓷等）；国防军事和其他前沿领域（超导材料、医疗和农业等）。

稀土的战略价值在于其不可替代性。例如，当前尚无其他材料能够完全复制稀土材料的磁性和发光性能。随着新能源、人工智能、量子计算等行业的发展，稀土需求将持续增长。

各种稀土元素的集中应用领域如下图所示。

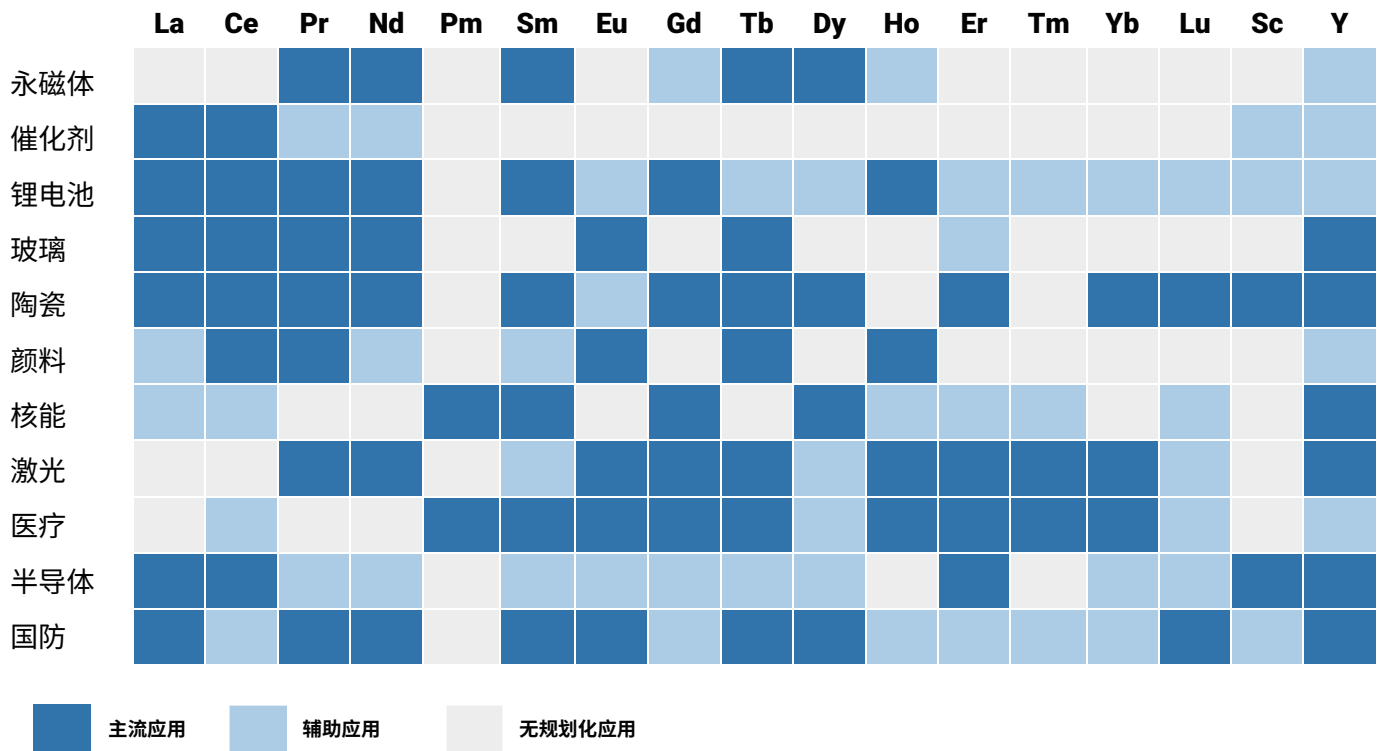


图 2. 稀土元素功能应用

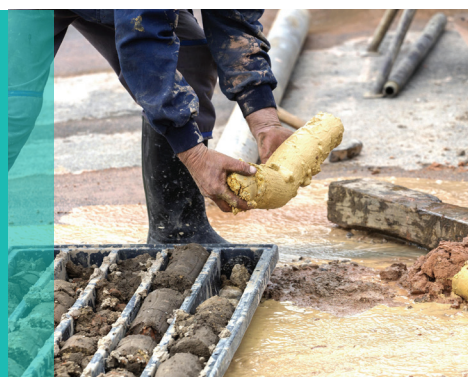
中国稀土管制规定

2025年4月4日，海关总署发布了2025年第18号公告，公布了对部分中重稀土相关物项进行管制的规定；2025年10月9日，商务部、海关总署发布了第56号和57号公告，公布了对部分稀土设备和原辅料以及部分中重稀土相关物项实施出口管制的规定；同日，商务部发布了2025年第61号和62号公告，公布了对境外相关稀土物项和稀土相关技术实施出口管制的规定。这些管制规定简要汇总于下表中。

表 1. 海关总署与商务部公告的稀土管制规定汇总

管制元素	受管制的金属、合金和相关制品	受管制的氧化物及化合物
钐 (Sm)	金属钐、钐钴合金、钐铁合金、钐镍合金、钐铝合金、钐镁合金、含钐的靶材（如钐靶、钐钴合金靶和钐铁合金靶等）、钐钴永磁材料	氧化钐及其混合物、含钐的化合物及其混合物
铕 (Eu)	金属铕、铕镁合金、含铕的靶材、含铕的发光材料（如荧光粉）、晶体材料、吸氢材料	氧化铕及其混合物、含铕的化合物及其混合物
钆 (Gd)	金属钆、钆镁合金、钆铝合金、含钆的靶材（如钆靶、钆铁合金靶和钆钴合金靶等）	氧化钆及其混合物、含钆的化合物及其混合物
铽 (Tb)	金属铽、铽钴合金、铽铁合金、含铽的靶材（如铽靶和铽钴合金靶）、含铽的钕铁硼永磁材料	氧化铽及其混合物、含铽的化合物及其混合物
镝 (Dy)	金属镝、镝铁合金、铽镝铁合金、含镝的靶材（如镝靶和铽镝铁合金靶）、含镝的钕铁硼永磁材料	氧化镝及其混合物、含镝的化合物及其混合物
钬 (Ho)	金属钬、钬铜合金、镁钬合金、钬铁合金、含钬的靶材（如钬靶和钬铜合金靶）、含钬的永磁材料、晶体材料、磁制冷材料、磁致伸缩材料	氧化钬及其混合物、含钬的化合物及其混合物
铒 (Er)	金属铒、铒铝合金、含铒的靶材（如铒靶）、含铒的晶体材料、光纤材料、储氢材料、陶瓷材料	氧化铒及其混合物、含铒的化合物及其混合物
铥 (Tm)	金属铥、含铥的靶材（如铥靶）、含铥的晶体材料、发光材料	氧化铥及其混合物、含铥的化合物及其混合物
镱 (Yb)	金属镱、含镱的靶材（如镱靶）、含镱的晶体材料、光纤材料、热屏蔽涂层材料	氧化镱及其混合物、含镱的化合物及其混合物
镱 (Lu)	金属镱、镱镱合金、镱靶	氧化镱及其混合物、含镱的化合物及其混合物
铪 (Hf)	金属铪、铪铝合金、铪镁合金、铪铜合金、铪靶	氧化铪及其混合物、含铪的化合物及其混合物
钇 (Y)	金属钇、钇铝合金、钇镁合金、钇镍合金、钇铜合金、钇铁合金、含钇的靶材（如钇靶、钇铝合金靶、钇镱合金靶）	氧化钇及其混合物、含钇的化合物及其混合物

稀土材料分析测试项目



稀土供应链与材料常规测试

稀土产业链从上游到下游生产工艺涉及大量生产工艺和材料，相关测试项目取决于材料类型（例如稀土原矿、精矿、稀土金属、氧化物、合金、复合材料等）和应用场景。核心测试项目包括成分和杂质元素分析、纯度分析、物理性能测试、功能性测试（例如磁性能、光学性能和电学性能等）、安全性和环保测试等。下表列出了稀土产业链生产工艺中涉及的材料类型、测试项目、测试仪器以及安捷伦解决方案。

表 2. 稀土产业链材料、测试项目和安捷伦解决方案

稀土产业链	工艺环节	材料类型	主要测试项目	主要检测技术	安捷伦解决方案
上游	开采与选矿	原矿	主含量	AAS、ICP-OES 等	AAS、ICP-OES
	冶炼	精矿	主含量（总量 / 稀土配分）、杂质	AAS、ICP-OES、氧氮分析仪、HPLC 等	AAS、ICP-OES、HPLC
	分离	金属氧化物、萃取溶剂	主含量（总量 / 稀土配分）、杂质、微光形貌与粒度	UV/Vis、AAS、ICP-OES、ICP-MS、氧氮分析仪、HPLC、XRD、TEM、SEM、AFM 等	UV/Vis、AAS、ICP-OES、HPLC
中游	金属制备	金属或氧化物、高纯稀土金属、稀土合金	主含量（总量 / 稀土配分）、杂质、微光形貌、粒度和内部缺陷	UV/Vis、AAS、ICP-OES、ICP-MS、ICP-MS/MS、氧氮分析仪、HPLC、XRD、TEM、SEM、AFM、金相显微镜、工业 CT 等	UV/Vis、AAS、ICP-OES、HPLC、ICP-MS、ICP-MS/MS
下游	终端应用	钕铁硼磁体、靶材、光学玻璃等	性能测试（包括磁性能、光学性能、力学性能、催化性能、储氢性能等）、安全与环境适应性测试、有害物质检测、特殊功能测试（例如溅射靶材致密度、晶粒尺寸和溅射速度等）	性能测试：永磁材料综合测试仪、荧光分光光度计（发光材料）、积分球、荧光寿命测试仪器等 力学性能测试：硬度计，冲击试验机等 有害物质检测：RoHS、REACH（主要分析仪器包括 GC-MS、LC-MS/MS、ICP-OES、ICP-MS、FTIR 等）	GC-MS、LC-MS/MS、ICP-OES、ICP-MS、UV/Vis、FTIR
	废料回收	旧永磁体、荧光粉、催化剂、稀土尾矿、生产废渣等	元素定性与定量分析、粒度等	UV/Vis、AAS、ICP-OES、ICP-MS、XRF、HPLC、LPS 等	UV/Vis、AAS、ICP-OES、ICP-MS、HPLC

注：各检测仪器缩写分别为 AA - 原子吸收光谱仪；ICP-OES - 电感耦合等离子体发射光谱仪；ICP-MS - 电感耦合等离子体质谱仪；ICP-MS/MS - 电感耦合等离子体串联质谱仪；HPLC - 高效液相色谱仪；GC-MS - 气相色谱质谱仪；LC-MS/MS - 三重四极杆液相色谱质谱仪；UV/Vis - 紫外-可见分光光度仪；FTIR - 傅里叶变换红外光谱仪；XRF - X 射线荧光光谱仪；XRD - X 射线衍射仪；TEM - 透射电子显微镜；AFM - 原子力显微镜；SEM - 扫描电子显微镜；LPS - 激光粒度仪

安捷伦稀土功能材料研发测试解决方案

超纯稀土杂质、同位素示踪分析等 (ICP-MS/MS)

测定高纯稀土氧化物中的杂质时，由于基体对稀土杂质待测元素存在较强的干扰，因此采用超高灵敏度和强去干扰能力的 ICP-MS/MS 准确测定杂质元素。

通过稀土同位素（例如 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ）追踪材料合成反应中稀土元素的迁移和转化规律研究，进而研究反应机理。



稀土有机配合物合成副反应分析、稀土催化剂反应产物鉴定等 (GC-MS 和 GC/Q-TOF)

合成稀土有机配合物（例如 OLED 材料）时，可检测反应中生成的挥发性副产物（例如小分子醇、脂），优化反应条件以减少杂质。

开展稀土材料表面残留有机物鉴定，例如鉴定合成过程中使用的有机溶剂、脱模剂等，评估其对材料分散性或后续加工的影响。

实施稀土催化剂反应产物鉴定，在稀土催化的有机反应（例如烯烃聚合）时，通过 GC-Q-TOF 分离并确定反应产物的结构，解析催化机理。



稀土高分子配合物结构解析、稀土功能浆料和稀土医用材料有机物鉴定与分析等 (LC-MS 和 LC/Q-TOF)

在稀土-高分子螯合物中，可鉴定高分子配体的分子量分布、功能基团修饰情况以及与稀土离子的结合位点。

分析稀土浆料中分散剂（例如聚乙二醇衍生物）、粘结剂（聚丙烯酸酯）的结构与分子量，优化配比以提升浆料稳定性。

在稀土标记的生物探针（例如稀土纳米颗粒-抗体偶联物中），分析偶联剂的结构与残留，保证生物相容性。



稀土材料无机元素分析应用需求



产业链检测需求分析

稀土产业链涵盖从资源开采到终端应用的完整体系，其核心环节包括开采、选矿、冶炼分离、深加工与回收利用。

现行的稀土元素检测国家标准与行业标准包括使用 AAS、ICP-OES 和 ICP-MS 分析方法的标准；从产业链上下游来看，可分为稀土矿石、稀土金属与氧化物、稀土富集物、稀土合金、稀土废水和废料检测标准。稀土产业链中涉及的无机元素分析检测标准以及对应的分析仪器分类汇总下表中。

表 3. 稀土产业链中无机元素分析检测标准和分析仪器

稀土产业链	材料类型	标准号	无机元素分析仪器			
			AAS	ICP-OES	ICP-MS (单四极杆)	ICP-MS/MS (串联四极杆)
上游	稀土精矿	GB/T 18114	✓	✓	✓	
	稀土矿石	DZ/T 0452		✓	✓	
	离子型稀土矿石	GB/T 18882		✓		
	离子型稀土矿石	XB/T 619		✓	✓	
	氯化物和碳酸轻稀土	GB/T 16484	✓	✓	✓	
	稀土金属与氧化物	GB/T 12690	✓	✓	✓	
	稀土金属与氧化物	GB/T 18115		✓	✓	✓
中游	稀土复合钇锆陶瓷	XB/T 625, XB/T 631		✓	✓	
	稀土金属与氧化物	T/CSRE 21004 钆		✓	✓	✓
		T/CSRE 21005 镨			✓	✓
		T/CSRE 21006 钕			✓	✓
		T/CSRE 21007 铽			✓	✓
稀土富集物	GB/T 23594 钐钕钆富集物 XB/T 626 铈镨镱富集物 XB/T 632 富钇富集物		✓			
下游	稀土合金	GB/T 16477 (镁) 硅铁; GB/T 26416 铁		✓		
		GB/T 40795 镧铈; GB/T 26417 镨钕		✓		
		XB/T 601 六硼化镧; XB/T 613 铈铽		✓		
		XB/T 614 钆镁; XB/T 616 钆铁		✓		
		XB/T 617 钆铁硼; XB/T 618 钆镁		✓		
		XB/T 621 钆铁; XB/T 622 稀土贮氢		✓		
		XB/T 623 铈铁; XB/T 624 钆铁		✓		
		XB/T 627 镨钕钆; XB/T 629 稀土铝		✓		
		XB/T 629 稀土铝		✓		
		稀土废渣、废水	GB/T 34500		✓	
下游	钆铁硼废料	XB/T 612		✓		
	废弃荧光粉	XB/T 620		✓		
	稀土冶金回收废料	XB/T 630		✓	✓	

安捷伦 ICP-OES 稀土元素分析解决方案



难点分析

- **主含量分析**：主含量元素分析对精密度和相对偏差要求苛刻，仪器分析相对于经典化学分析方法受影响的因素更多，要求仪器需要严格的控制仪器条件来抑制设备漂移或波动，以满足严格的分析要求
- **杂质元素分析**：稀土元素之间性质接近，因此测定稀土基体样品中的杂质元素时，存在较强的谱线干扰，要求仪器具有较强的分辨率或干扰谱线消除能力，以避免产生较大的测定误差

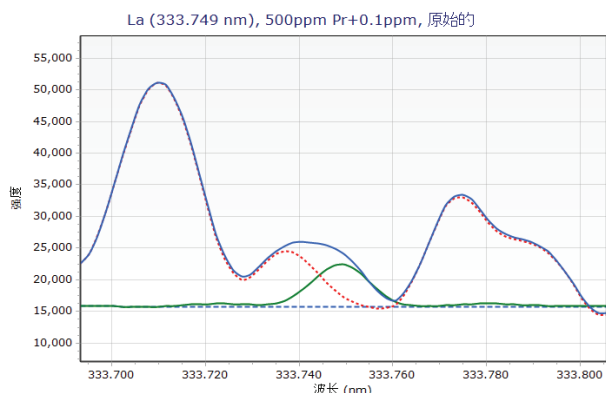


图 3. FACT 校正去除 Pr 基体对 La 元素的干扰

安捷伦 ICP-OES 分析解决方案

- Agilent 5800/5900 垂直双向观测 ICP-OES 系统结合 CCI 冷锥接口专有技术，具有出众的复杂基体耐受性和抗干扰性，适用于准确分析稀土材料样品中的元素
- 采用专有技术的 VistaChip III CCD 检测器能够为每个像素提供溢出保护，使 5800/5900 ICP-OES 具有优异的线性范围，适用于同时分析稀土材料中的多种常量元素以及稀土或非稀土等微量杂质元素
- ICP Expert 软件特有的拟合背景校正技术 (FBC) 采用先进的数学拟合算法，无论样品复杂程度如何，均可准确、全自动地完成背景校正
- ICP Expert 软件采用快速自动曲线拟合校正技术 (FACT)，对于稀土元素分析非常有效。该技术通过高级光谱建模技术提供实时光谱校正，以数学方式从原始光谱中解析分离出分析物信号；并通过测定空白、分析物、干扰溶液来拟合高斯曲线，而无需知道各溶液中分析物和干扰物的浓度，是一种强有力的稀土元素分析手段



图 4. Agilent 5800 ICP-OES 仪器系统

针对稀土基体推荐的背景校正模式

测定稀土基体中的稀土元素杂质时，往往会受到强烈的基体谱线重叠干扰。为消除背景谱线的影响，除了采用常规的离峰或自动拟合扣背景外，推荐采用 FACT 背景校正技术。下表列出了针对各种稀土基体条件推荐的背景校正模式，在复杂的基体条件下，采用 FACT 背景校正模式能够有效扣除谱线背景干扰，满足稀土元素的分析需求。

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Sc
La 基体	自动拟合	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正
Ce 基体	FACT 校正	自动拟合	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正
Pr 基体	FACT 校正	FACT 校正	自动拟合	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正
Nd 基体	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	自动拟合	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正
Sm 基体	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	自动拟合	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正
Eu 基体	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	自动拟合	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正
Gd 基体	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	自动拟合	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正
Tb 基体	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	自动拟合	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正
Dy 基体	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	自动拟合	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正
Ho 基体	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	自动拟合	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正
Er 基体	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	自动拟合	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正
Tm 基体	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	自动拟合	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正
Yb 基体	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	自动拟合	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正
Lu 基体	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	自动拟合	FACT 校正	FACT 校正
Y 基体	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	自动拟合	FACT 校正
Sc 基体	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	FACT 校正	自动拟合

图 5. ICP-OES 测定稀土基体中的稀土杂质时推荐的背景校正模式

ICP-OES 典型应用实例

对稀土矿石样品（含 Zr 和 Nb 基体）进行了稀土成分化学分析，实测值、推荐值和回收率列于下表中。从表中可以看出，各目标元素的测定结果准确、可靠。

Element Used	Flags	Wavelength	Rating	Concentration	Intensity	Background
Er		349.910	★ ?	912.7	211.1	211.1
		337.275	★ ?	8.09E	766.3	766.3
		369.265	★★★★★	1.14E	1611.1	1611.1
		390.631	★★★★★	1.06E	1622.4	1622.4
		323.058	★★★★★	1.23E	128.1	128.1
		389.623	★★★★★	949.85	93392.5	28374.5

Agilent ICP-Expert 软件具有智能半定量功能，可显示热力图并自动推荐谱线。如上图所示，在对稀土矿石样品中的 Er 元素进行半定量后，ICP-Expert 软件基于基体干扰自动推荐 Er 369.265 nm 为第一推荐谱线，使用该功能为干扰谱线的筛选提供了强大的助力。

表 4. 稀土矿石标准品中 16 种稀土元素含量分析

Element, Wavelength (nm)	Background	Measured Conc (µg/g)	REE-1 Certified Conc (µg/g)	Recovery (%)
Ce 418.659	FACT	3939	3961	99
Dy 353.171	Off-peak	889	848	105
Er 369.265	FBC	738	701	105
Eu 397.197	FACT	24.30	23.5	103
Gd 376.840	FBC	469	433	108
Ho 345.600	FBC	214	208	103
La 399.575	FBC	1670	1661	101
Lu 290.030	FBC	88.9	92.4	96
Nd 401.224	FACT	1509	1457	104
Pr 410.072	FACT	454	435	104
Sm 360.949	Off-peak	407	381	107
Tb 332.440	FACT	107	107.2	100
Tm 379.576	Off-peak	109	106	103
Y 321.668	FBC	5582	5480	102
Yb 328.937	FBC	649	678	96
*Sc 255.235	FBC	2.23	8.0.	-

* Informative (semiquantitative) concentration (4)

稀土基体中的稀土杂质干扰谱线去除 (FACT)

稀土基体中稀土杂质元素的分析是稀土分析中的痛点，有效去除背景干扰谱线对于分析取得成功至关重要。安捷伦 ICP-OES 软件自带的快速自动曲线拟合技术 (FACT) 可通过进行基体背景谱线的解析，有效分离出待测谱线，从而准确测定样品中的元素含量。下图显示了对 Ce 基体中的 Pr 杂质元素的测定。当采用常规的拟合方式进行背景校正时，由于 Ce 基体背景干扰较大，谱图积分误差较大，校准曲线的相关系数为 0.99729；而采用 FACT 进行背景校正后，能有效消除基体背景干扰的影响，校准曲线的相关系数升高至 0.9998，结果明显改善，也更有利于准确测定稀土杂质含量。

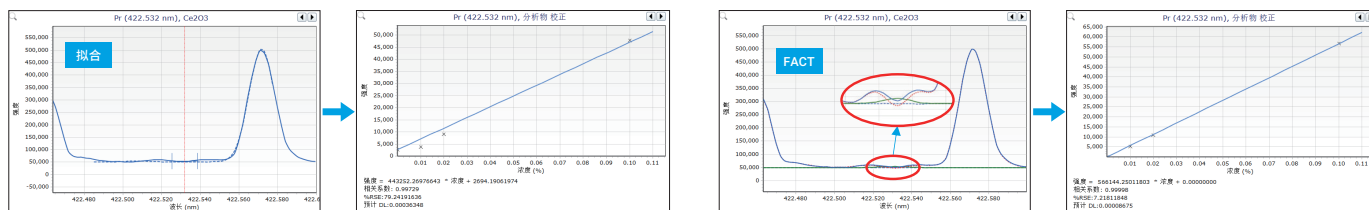
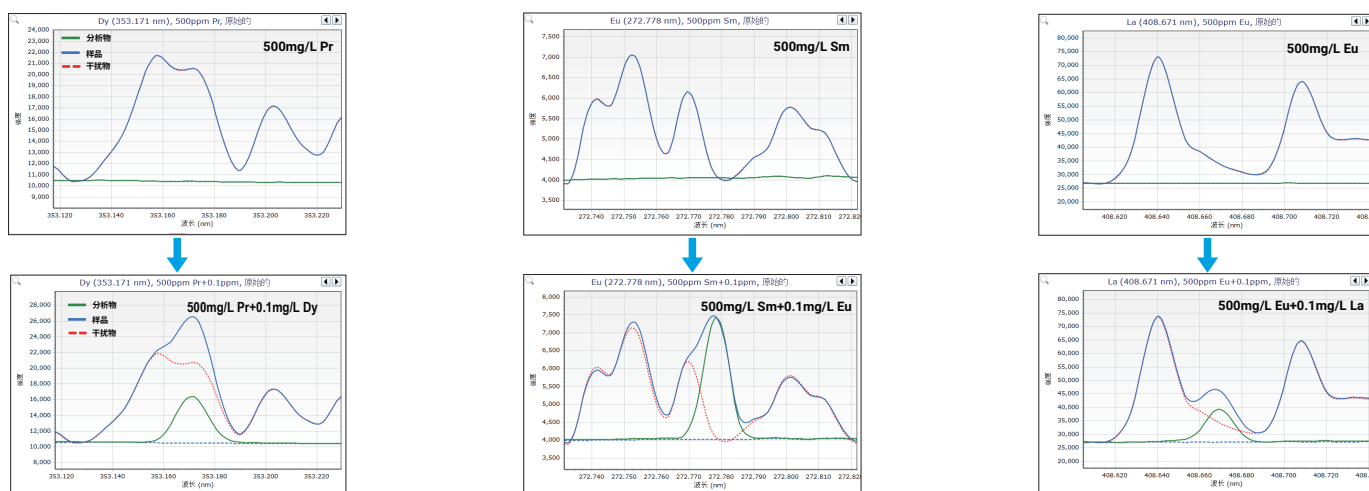


图 6. 采用 FACT 背景校正技术去除 Ce 基体中 Pr 元素背景干扰的实例



上图为基体干扰消除实例，分别为测定 500 mg/L Pr 基体中的 Dy 元素、500 mg/L Sm 基体中的 Eu 元素、500 mg/L Eu 基体中的 La 元素。待测谱线均受到较强的谱线干扰，采用 FACT 进行背景校正后，基线平稳，基体背景干扰峰消除彻底；再加标 0.1 mg/L 后，所得到的加标物的谱峰良好，不受基体干扰峰的影响。

图 7. FACT 消除干扰的更多应用实例

稀土配分含量自动计算

在稀土行业内分析稀土元素时，通常需要计算稀土配分含量。而常规软件只能测定样品总基体（稀土 + 非稀土）中稀土元素的含量，必须离线计算稀土配分含量，因此无法实时确定样品测定结果是否可靠，并导致分析效率下降。安捷伦 ICP-OES 软件可自定义公式并实时计算稀土配分含量，帮助分析人员快速判断结果准确度，提高分析效率。

溶液标签	时间戳	样品含量 (稀土总量, 稀土 + 非稀土)				稀土配分含量			
		Ce 446.021 nm %	La 398.852 nm %	Nd 430.357 nm %	Pr 410.072 nm %	Ce446.021nm %	La398.852nm %	Nd430.358nm %	Pr410.075nm %
稀土矿	12/16/2024 4:14:29 PM	47.21	34.90	10.26	3.63	48.63	35.95	10.57	3.74
稀土矿	12/16/2024 4:16:02 PM	47.24	34.93	10.26	3.63	48.63	35.96	10.56	3.74
稀土矿	12/16/2024 4:17:36 PM	47.10	34.74	10.22	3.61	48.68	35.90	10.56	3.73

图 8. ICP-OES 软件自动计算稀土总量与配分含量

安捷伦 ICP-MS 稀土元素 分析解决方案



难点分析

稀土产业链中涉及的样品类型众多，从上游的稀土矿石，到加工提炼得到的金属或合金，以及经提纯后的高纯稀土金属或产品，并进一步延伸至下游汽车产业或半导体等行业的相关样品。ICP-MS 分析方法面临的^{最大挑战}是高盐基体和高质量数干扰，例如高盐分样品直接进样分析、稀土氧化物中的微量稀土杂质分析等，需要 ICP-MS 具有较高的基体耐受性和较强的抗干扰能力。

安捷伦 ICP-MS 分析解决方案

安捷伦 ICP-MS 采用高效提取透镜系统和屏蔽炬平衡初始动能，再结合八极杆碰撞反应池，能够对进入反应池中的离子束进行有效聚焦和干扰消除，从而最大程度提高待测离子的灵敏度。仪器具有最佳的 He 模式，以及由此扩展的安捷伦特有的高 He 模式，能够在保证灵敏度的情况下更大程度消除干扰并且提高待测元素的信噪比。

安捷伦 ICP-MS 采用专有高基体进样系统 (UHMI)，可使用氦气对整批混合样品进行在线稀释，大幅增强直接分析复杂基体样品的能力，省去繁琐的样品分类和手动稀释操作，从而显著提高分析效率；同时明显减少由水引入的氧化物干扰，从而大幅改善检出限。与耐受 < 0.2% 总溶解固体 (TDS) 的传统仪器相比，安捷伦 ICP-MS 在配备 UHMI 时可耐受高达 25% 的 TDS。另外，可以在仪器工作站中直接设定高基体样品气溶胶的稀释倍数，操作方便、快捷。

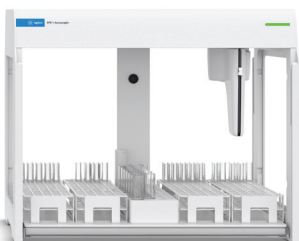
当进行批量样品和未知样品测定时，安捷伦可提供包括 ADS 2 稀释模块在内的智能化 workflow 方案，包括进行智能半定量分析、智能干扰模拟、校准标样自动配制、自动进样、自动稀释超标样品和异常样品识别等，从而大幅提高分析效率，同时减少分析人员手动操作带来的元素污染风险。



7850 ICP-MS



ADS 2



SPS 4 自动进样器



7900 ICP-MS

ICP-MS 典型应用实例

稀土矿石 / 材料分析

采用 ICP-MS 可有效满足有关稀土矿石、稀土金属与氧化物、稀土废物的分析标准的要求。例如，在分析 Ce_2O_3 中的稀土杂质元素时，参考 GB/T 18115.2-2020，采用 He 模式 + 窄峰（高分辨率）模式可轻松应对日常检测需求。

表 5. 采用 He + 窄峰模式分析 Ce_2O_3 样品中的稀土杂质元素

样品	La 139	Pr 141	Nd 146	Sm 147	Eu 151	Gd 160	Tb 159	Dy 163	Ho 165	Er 166	Tm 169	Yb 171	Lu 175	Y 89
Ce-1# (mg/kg)	11.53	30.05	30.25	1.05	0.18	0.75	1.05	0.20	0.01	0.05	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.40
Ce-2# (mg/kg)	10.35	28.50	25.79	1.25	0.20	0.88	0.54	0.19	0.02	0.03	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.45

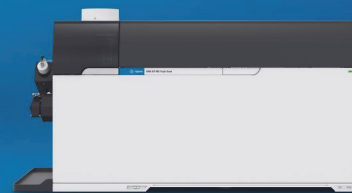
半质量数模式 (M^{++}) 稀土元素分析应用

分析稀土样品中的稀土杂质元素时，基体对待测元素具有较强的干扰作用，可能使测定结果产生较大的误差。安捷伦 ICP-MS 系统默认采用自带的标准分辨率和窄峰（高分辨率）模式，可设置窄峰模式 + 半质量数进行半质量数分析，以避免稀土基体的干扰。以钕铁硼磁体样品（含 Nd、Pr 基体）中的稀土杂质元素分析为例，当采用 M^+ 质量数分析待测元素时，无法避免 Nd 和 Pr 基体离子的干扰；而采用半质量数模式 (M^{++}) 测定受干扰的待测元素的双电荷半质量含量时，能够有效避开干扰。例如， $^{141}Pr^{16}O^+$ 离子在正常分析模式下会干扰 $^{157}Gd^+$ ，而采用半质量数分析模式时， $^{70.5}Pr^{++}$ 和 $^{70.5}Pr^{16}O^+$ 则不会对 $^{78.5}Gd^{++}$ 造成干扰。下表列出了钕铁硼磁体材料中 Nd 和 Pr 基体对待测稀土元素的离子干扰情况，以及采用半质量数分析未知样品时得到的结果，并与标准质量数分析模式下的结果进行了对比。从结果中可以看出，窄峰半质量数 + He 模式能够显著降低基体干扰的影响，改善因子在 4.4–137.9 倍之间。

表 6. 采用半质量数模式分析钕铁硼磁体材料样品

类型	参数	Sm	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
标准质量数 分析模式	质量数 (amu)	$^{147}Sm^+$	$^{157}Gd^+$	$^{159}Tb^+$	$^{163}Dy^+$	$^{165}Ho^+$	$^{167}Er^+$
	丰度 (%)	14.99	15.65	100	24.90	100	22.87
	干扰物	$^{146}Nd^1H^+$	$^{141}Pr^{16}O^+$	$^{143}Nd^{16}O^+$	$^{146}Nd^{16}O^1H^+$	$^{148}Nd^{16}O^1H^+$	$^{150}Nd^{16}O^1H^+$
	He 模式结果 ($\mu g/L$)	98.32	60774.7	1820.96	501.21	43.19	178.3
半质量数 分析模式	质量数 (amu)	$^{73.5}Sm^{++}$	$^{78.5}Gd^{++}$	$^{79.5}Tb^{++}$	$^{81.5}Dy^{++}$	$^{82.5}Ho^{++}$	$^{83.5}Er^{++}$
	He 模式结果 ($\mu g/L$)	22.41	440.61	96.60	57.77	6.87	17.13
改善因子		4.4	137.9	96.6	8.7	6.3	10.4

安捷伦 ICP-MS/MS 稀土元素分析解决方案



ICP-MS 的分析难点

对于纯度稍低的稀土金属或材料，即材料纯度 $< 5N$ （纯度 $< 99.999\%$ ）时，通常使用 ICP-OES 或单四极杆 ICP-MS 进行杂质元素分析即可满足要求；而当材料纯度 $\geq 5N$ 时，某些待测元素由于受到稀土基体的严重质谱干扰，因此单四极杆 ICP-MS 面临严重挑战；而采用去干扰能力更强、灵敏度更高的 ICP-MS/MS 便成了最佳选择。

安捷伦 ICP-MS/MS 解决方案

安捷伦 ICP-MS/MS 在碰撞池前后分别采用分辨率 < 1.0 amu 的相同四极杆设计，基体进入碰撞反应池之前首先经过精确的质量筛选，然后允许特定的母离子进入碰撞反应池；同时，池中可通入多路气体（氦气、氢气、氧气和氨气等）进行碰撞或反应消除离子干扰，从而达到彻底消除干扰的目的。ICP-MS/MS 仪器结构和消除干扰的原理如下图所示。

具体来说，ICP-MS/MS 具有以下分析功能：

- 前体离子扫描，用于判断干扰离子来源
- 产物离子扫描，用于扫描特定的离子反应产物，进而确立模式选择和优化干扰消除效果
- 多透镜组合、多基体适应（有机/低盐/高盐样品）、多碰撞反应模式定量分析（碰撞/原位反应/质量转移反应模式），多炬焰模式（冷焰/温焰/热焰）共同组合，有效消除离子质谱干扰
- 通过离子的质荷比以及同位素比指纹进行定性分析
- 无需绘制校准曲线，通过全谱扫描对所有元素进行较准确的半定量分析，确定基体种类并进行智能化干扰模拟
- 同位素比测定能力以及同位素稀释法精确定量能力

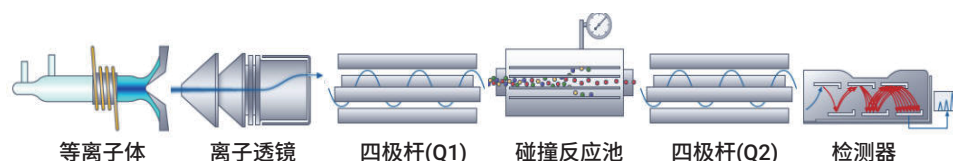


图 9. ICP-MS/MS 仪器结构示意图

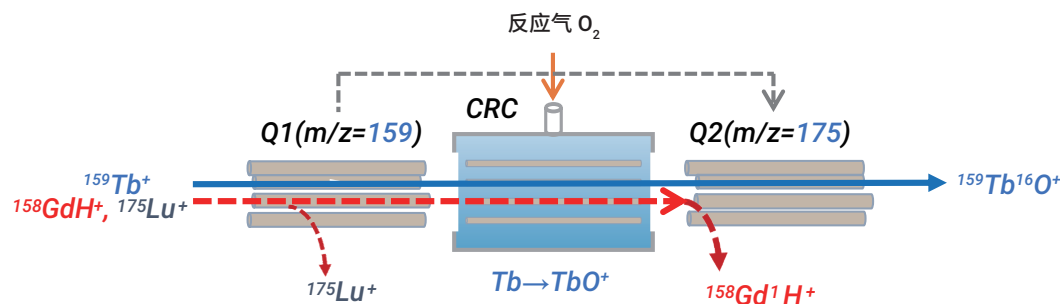


图 10. ICP-MS/MS 反应池消除干扰示意图（分析 Gd 基体中的 Tb）

采用 ICP-MS/MS 分析稀土样品时，结合 UHMI 高基体自动稀释系统和多种碰撞反应模式（例如，无气体、He、H₂、O₂、NH₃ 模式等），可有效去除干扰物。下表显示了 500 mg/L Ce₂O₃、Pr₆O₁₁、Nd₂O₃、Gd₂O₃、Eu₂O₃ 和 Tb₄O₇ 基体中受干扰的稀土杂质元素的测定结果。与“无气体”和“He”模式相比，采用氧气和氨气模式进行分析时，待测元素的 BEC 得到极大改善，其改善因子在 100-30000 倍之间，效果显著。

表 7. ICP-MS/MS 分析 500 mg/L 不同稀土氧化物溶液中稀土杂质元素 BEC (µg/L)

样品	Ce ₂ O ₃			Pr ₆ O ₁₁		Nd ₂ O ₃		Gd ₂ O ₃		Eu ₂ O ₃	Tb ₄ O ₇	
分析物	Pr	Gd	Tb	Tb	Tb	Dy	Ho	Yb	Lu	Tm	Lu	
同位素	141	160	159	159	159	163	165	172	175	169	175	
干扰	¹⁴⁰ CeH ⁺	¹⁴² Ce ¹⁶ O ⁺	¹⁴² Ce ¹⁶ OH ⁺	¹⁴¹ Pr ¹⁶ O ⁺	¹⁴² Nd ¹⁶ OH ⁺ , ¹⁴³ Nd ¹⁶ O ⁺	¹⁴⁶ Nd ¹⁶ O ⁺	¹⁴⁸ Nd ¹⁶ OH ⁺	¹⁵⁶ Gd ¹⁶ O ⁺	¹⁵⁹ Gd ¹⁶ OH ⁺	¹⁵³ Eu ¹⁶ O ⁺	¹⁵⁹ Tb ¹⁶ O ⁺	
BEC	无气体	6.17	3.36	29.20	10.30	721	163	13.40	3420	75.00	64.80	3270
	He	3.79	11.90	0.725	2.50	234	36.6	3.06	1200	66.40	38.20	1670
	O ₂	0.064	0.030	9.76	0.001	1.95	0.804	0.070	284	0.444	2.73	26.10
	NH ₃			0.284	0.055	0.039	0.255	0.021	0.030	7.16	0.002	0.244
分析质量对 (Q1/Q2)			Tb ¹⁵⁹ →174	Tb ¹⁵⁹ →244	Tb ¹⁵⁹ →174	Dy ¹⁶³ →163	Ho ¹⁶⁵ →165	Yb ¹⁷² →172	Lu ¹⁷⁵ →260	Tm ¹⁶⁹ →169	Lu ¹⁷⁵ →260	
改善因子 (倍数)	x 100	x 100	x 100	x 10000	x 20000	x 1000	x 1000	x 10000	x 200	x 30000	x 30000	

当分析 Nd₂O₃ 基体时，在 UHMI 高基体稀释模式下，考察包含 13 种加标浓度为 0.5 µg/L 的稀土元素的样品在 2 小时分析中的稳定性，所得 RSD 小于 5%。结果表明，在该分析条件下，仪器表现出良好的稳定性。

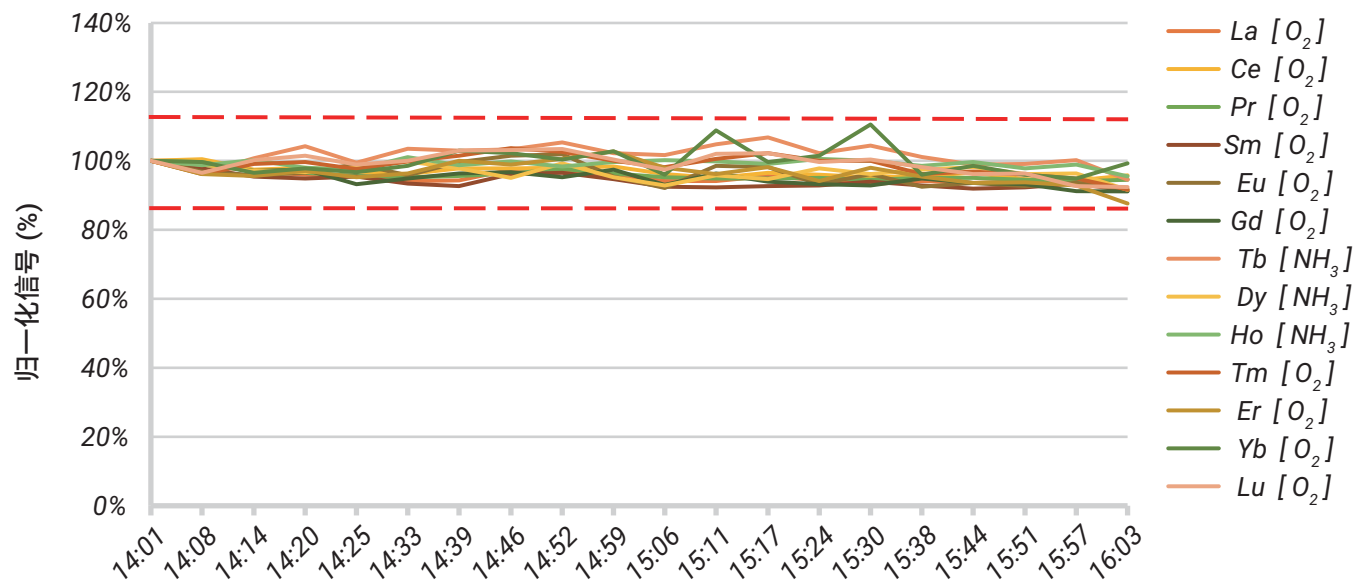


图 11. 加标浓度为 0.5 µg/L 的 500 mg/L Nd₂O₃ 基体溶液 2 h 分析稳定性

针对高纯稀土杂质推荐的分析模式

安捷伦针对稀土高纯基体中的稀土杂质元素提供了成熟的 ICP-MS/MS 分析解决方案。下表中列出了各种基体条件下推荐的分析模式。从表中可以看到，使用 He 模式可以消除大部分干扰；而对于 M^+ 基体中 $(M-1)^+$ 和 $(M+1)^+$ 的待测离子，则通常采用氧模式进行质量转移模式消除干扰；对于轻稀土氧化物对重稀土元素的干扰，则推荐采用氧气和氨气反应模式消除干扰。

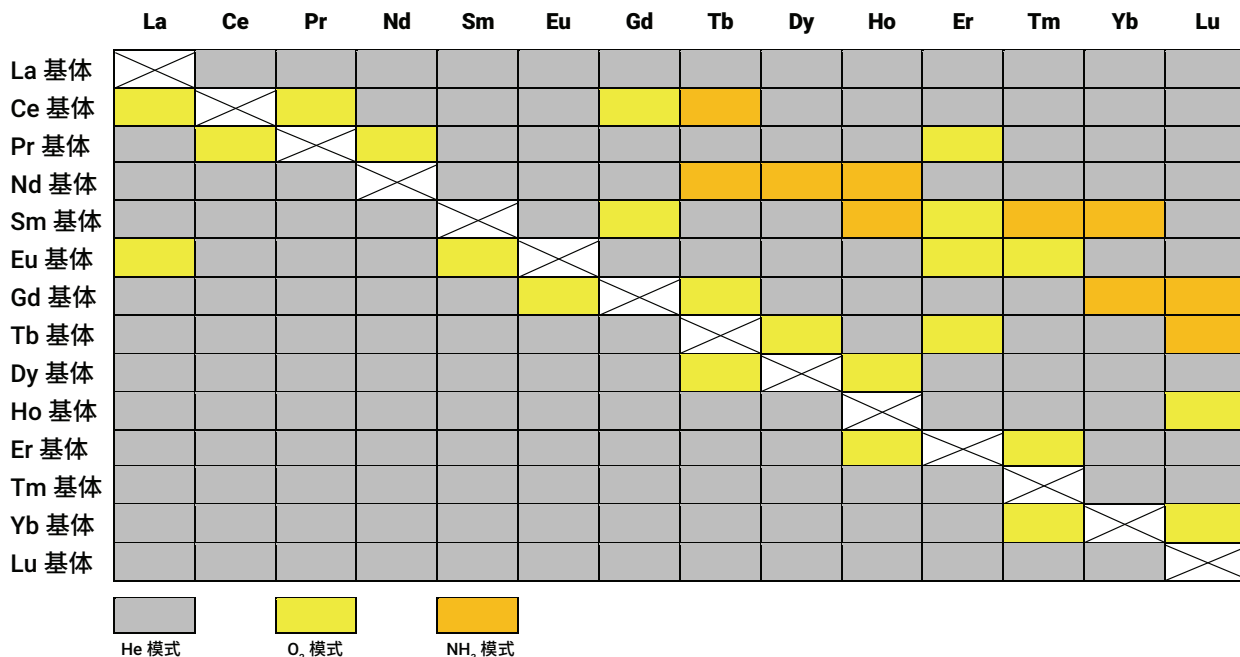


图 12. ICP-MS/MS 测定高纯稀土中的稀土杂质元素含量时推荐的分析模式

ICP-MS/MS 干扰机理研究 — 前体离子扫描

测定高基体中的杂质元素时，首先要确定干扰离子来源，而进行前体离子扫描是一种很好的判断手段。以测定 Nd 基体中的 Gd 元素为例，当采用氧气模式消除干扰时， $^{163}\text{Dy}^+$ 反应生成 $^{163}\text{Dy}^{16}\text{O}^+$ 。与此同时，Nd 在氧气模式下也会反应生成 $^{143}\text{Nd}^{18}\text{O}^{18}\text{O}^+$ 、 $^{144}\text{Nd}^{17}\text{O}^{17}\text{OH}^+$ 、 $^{145}\text{Nd}^{17}\text{O}^{17}\text{O}^+$ 和 $^{146}\text{Nd}^{16}\text{O}^{16}\text{OH}^+$ 等多种干扰离子。如果需要确定具体的多原子离子干扰，则可以分别设置不同的 Q1/Q2 离子对进行测试，分析结果见下表。从表中可以看到，多原子离子 $^{145}\text{Nd}^{17}\text{O}^{17}\text{O}^+$ 和 $^{146}\text{Nd}^{16}\text{O}^{16}\text{OH}^+$ 为主要的干扰来源，而 $^{146}\text{Nd}^{16}\text{O}^{16}\text{OH}^+$ 离子（对应的 Q1 → Q2 离子对 163 → 179）的比例为 0.2%，干扰较小，因此可采用氧气模式来分析 $^{163}\text{Dy}^{16}\text{O}^+$ ，而不会引入大量的 Nd 基体干扰。

表 8. Nd 基体中 Dy 元素杂质干扰来源分析（氧模式下待测离子 $^{163}\text{Dy}^{16}\text{O}^+$ ）

Q1 → Q2 离子对	Q1 离子	Q2 离子	信号强度 (CPS)	比例
143 → 179	$^{143}\text{Nd}^+$	$^{143}\text{Nd}^{18}\text{O}^{18}\text{O}^+$	10671	0.2%
144 → 179	$^{144}\text{Nd}^+$	$^{144}\text{Nd}^{17}\text{O}^{17}\text{OH}^+$	16961	0.3%
145 → 179	$^{145}\text{Nd}^+$	$^{145}\text{Nd}^{17}\text{O}^{17}\text{O}^+$	1954209	29.1%
146 → 179	$^{146}\text{Nd}^+$	$^{146}\text{Nd}^{16}\text{O}^{16}\text{OH}^+$	4626673	69.0%
147 → 179	$^{146}\text{NdH}^+$	$^{146}\text{Nd}^{16}\text{O}^{16}\text{OH}^+$	43797	0.7%
161 → 179	$^{145}\text{Nd}^{16}\text{O}^+$	$^{145}\text{Nd}^{17}\text{O}^{17}\text{O}^+$	13747	0.2%
162 → 179	$^{146}\text{Nd}^{16}\text{O}^+$	$^{146}\text{Nd}^{16}\text{O}^{16}\text{OH}^+$	37171	0.6%
163 → 179	$^{146}\text{Nd}^{16}\text{OH}^+$	$^{146}\text{Nd}^{16}\text{O}^{16}\text{OH}^+$	10671	0.2%

ICP-MS/MS 干扰机理研究 — 产物离子扫描

当选择测定模式时，则需要结合基体离子和待测元素离子反应产物进行综合判断。以测定 Nd 基体中的 Tb 元素为例，当考察基体干扰和选择池气体模式时，需要进行前体离子扫描以判断干扰来源，或者进行产物离子扫描以确定干扰消除效果。结果如下图所示。从图中可以看出，在 NH_3 模式下， $^{159}\text{Tb}^+$ 可与多个 NH_3 分子反应生成簇合离子； $^{159}\text{Tb}^+$ 与氨离子 ($\text{NH}_2^+/\text{NH}_3^+$) 反应生成产物离子的灵敏度顺序为：五聚体 > 六聚体 > 原位离子 > 四聚体 > 一聚体 > 二聚体 > 三聚体，可作为 Q1/Q2 离子对选择的依据之一。

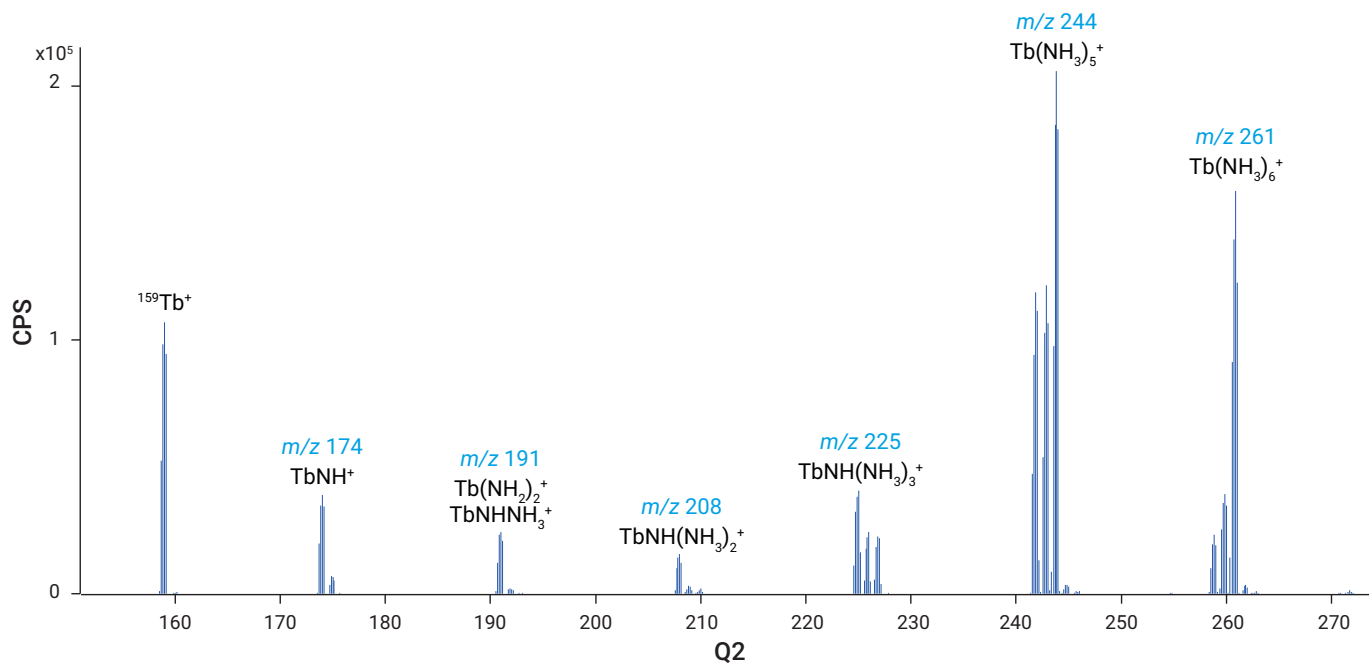


图 13. NH_3 模式下 $^{159}\text{Tb}^+$ 反应产物离子扫描结果

参考文献 (安捷伦)

1. Naoki Sugiyama, Glenn Woods. 使用 Agilent 8800 电感耦合等离子体串联质谱仪以 MS/MS 模式直接测定高纯稀土元素 (REE) 氧化物中的痕量稀土元素 (5991-0892ZHCN)
2. Juane Song, Xiang-Cheng Zeng, Dong Yan, Wei-ming Wu. 使用 Agilent 8800 ICP-MS/MS 对高纯度 Nd_2O_3 中的痕量稀土元素进行常规测定 (5991-5400ZHCN)
3. Naoki Sugiyama. 利用 Agilent 8800 电感耦合等离子体串联质谱仪消除氢化物离子 (MH^+) 对稀土元素的干扰 (5991-1481ZHCN)
4. Greg Gilleland, Neli Drvodelic. Analysis of Rare Earth Elements in Base Metal Ores by ICP-OES (使用 ICP-OES 分析碱金属矿石中的稀土元素) (5994-4492EN)
5. Rare Earth Element Determination in Geological Samples Using the Agilent SVDV ICP OES (使用安捷伦 SVDV ICP-OES 测定地质样品中的稀土元素) (5991-7786EN)
6. 赵志飞, 张萍, 宋娟娥. 使用 ICP-MS 半质量数模式分析钨铁硼中的稀土杂质元素 (5994-8782ZHCN)

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



微信搜一搜

安捷伦视界

www.agilent.com

DE-011920

安捷伦对本资料可能存在的错误或由于提供、展示或使用本资料所造成的间接损失不承担任何责任。

本文中的信息、说明和技术指标如有变更，恕不另行通知。

© 安捷伦科技（中国）有限公司，2026
2026年1月，中国出版
5994-8884ZH-CN

