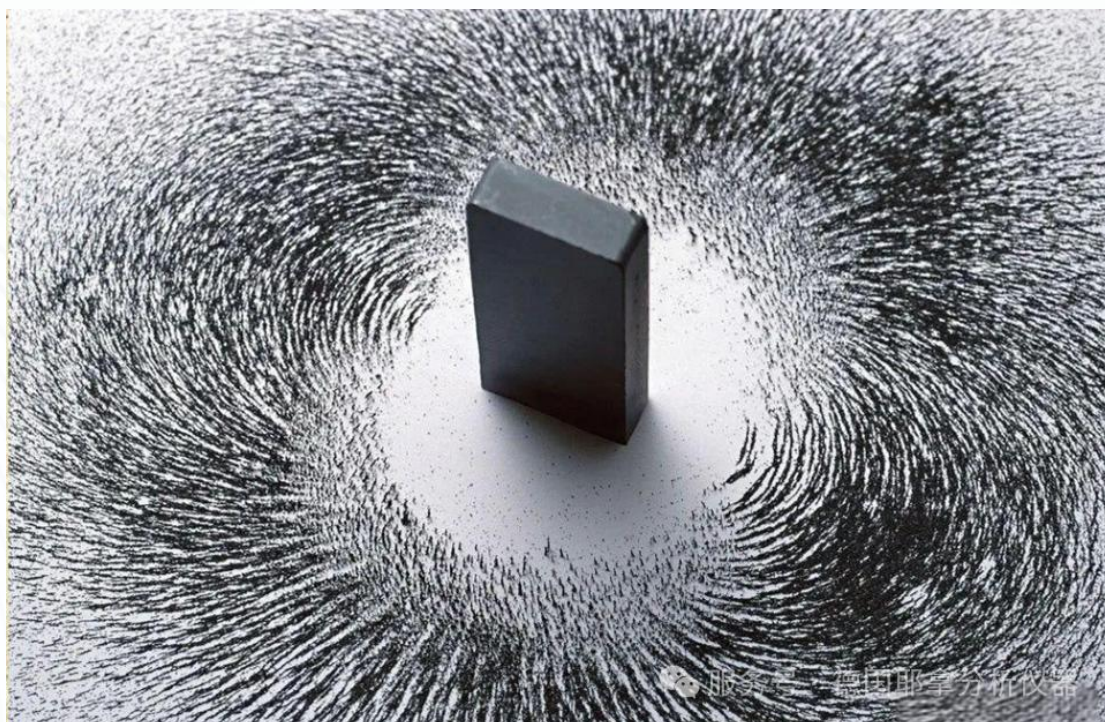


高分辨 ICP-OES 助力分析钕铁硼永磁材料

稀土永磁材料在国家战略中处于核心地位，精准分析成为保障资源安全的关键。德国耶拿高分辨 ICP-OES Plasma Quant 9100Elite 助力磁材行业质量提升，为出口管控提供技术支撑。



稀土永磁材料，尤其是高性能稀土永磁材料，在我国享有重要的战略地位，被视为关键的新材料和高新技术产品。根据原料的不同，永磁材料主要可分为稀土永磁材料、铁氧体永磁材料、金属永磁材料以及复合永磁材料四大类。

稀土永磁材料在性能上显著优于金属和铁氧体永磁材料。第3代稀土永磁钕铁硼（NdFeB）合金，在稀土铁系永磁材料中独领风骚。广泛应用于电子、电力机械、医疗器械、玩具、包装、五金机械、航天航空等领域。

通常，钕铁硼材料中稀土元素钕的含量 30%左右，铁为 65%，而硼的含量则相对较小，约为 1%。通过灵活调整材料成分进行性能优化，如添加铜、铝等元素，则有助于优化磁体的热稳定性和加工性能。而加入镨和镱这两种重稀土元素则可改善磁体性能，例如提升剩磁和矫顽力。添加钐、铽的永磁材料广泛应用于精确制导武器的电机和传感器中，能够大幅提高武器的精度和可靠性。例如，在导弹的制导系统中，高性能永磁电机能够快速、准确地调整导弹的飞行姿态，使其能够精确命中目标。



广州总部：广州市黄埔区科学大道112号绿地中央广场A1栋2201

电话：020-66618088

传真：020-83510388

广州 北京 上海 杭州 天津 青岛 济南 西安 成都 重庆 武汉 南京 厦门 深圳 珠海 中山 香港

网址：www.sinoinstrument.com

邮箱：dongnan@sinoinstrument.com



2024年中国钕铁硼下游需求分布

根据商务部 2025 年第 18 号公告，中国对钐、钆、铽、镱、镱、铕、铈等 7 类中重稀土相关物项实施出口管制，涉及磁铁产品的管控检测体系已全面升级。

《中华人民共和国出口管制法》：明确稀土及相关制品的出口需申请许可证，重点管控具有军民两用属性的物项。将含钐、铽、镱等元素的永磁材料（如钐钴磁铁、含铽 / 镱的钕铁硼磁铁）纳入管制范围。管控要求：实施“一批一证”制度，要求出口均需单独申请许可证，若钕铁硼磁体中上述元素总量 $\geq 0.1\%$ （按质量分数计），每批次出口需提交《两用物项出口许可证》及第三方检测报告，并提交最终用户信息。海关实施全流程监管。稀土元素总含量低于 0.1% 的非关键用途产品可豁免。

为了能精准实施出口管制，钕铁硼磁铁中的相关稀土元素测试变得尤为重要。目前钕铁硼中稀土及其他元素的检测标准有《XB/T 617.2-2014 钕铁硼合金化学分析方法 第 2 部分：十五个稀土元素量的测定》，《钕铁硼合金化学分析方法第 3 部分：硼、铝、铜、钴、镁、硅、钙、钒、铬、锰、镍、锌和镓量的测定》。第一法为电感耦合等离子体发生光谱法（ICP-OES）。

但由于稀土元素的原子具有未充满的 4f 电子层和 4f 电子被外层的 5s5p 电子屏蔽的特性，使得稀土原子具有有丰富的电子能级和长寿命激发态，能级跃迁通道多达 20 余万个，可以产生多种多样的辐射吸收和发射，有着极为丰富的光谱谱线。同时钕铁硼中另一个主要组分铁元素的谱线也是非常丰富的。ICP 测试时的谱线干扰十分严重。如 Sm 最灵敏线 359.260nm 同时受到 Nd359.259nm 及 Fe359.267nm 的干扰，完全无法用于分析。下图为氧化钕的部分发射谱线及钕铁硼样品的部分发射谱线图。可以看到样品基体的光谱谱线极为丰富，如连绵不绝的群山，给分析带来极大的干扰。



广州总部：广州市黄埔区科学大道112号绿地中央广场A1栋2201

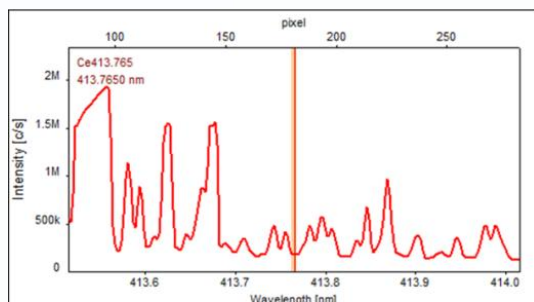
电话：020-66618088

传真：020-83510388

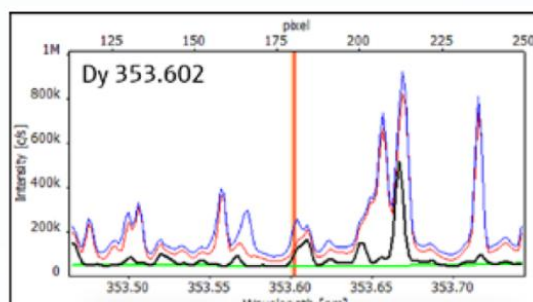
广州 北京 上海 杭州 天津 青岛 济南 西安 成都 重庆 武汉 南京 厦门 深圳 珠海 中山 香港

网址：www.sinoinstrument.com

邮箱：dongnan@sinoinstrument.com

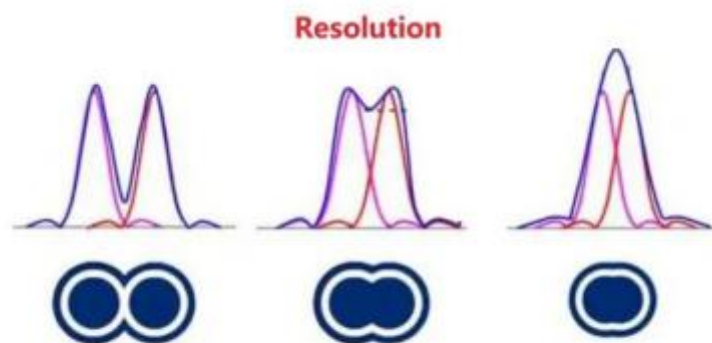


氧化铈部分发射谱线



钕铁硼样品的发射谱线图

要分辨如此庞大数量的元素谱线，仪器的光学分辨率是关键！否则，光谱谱线干扰或重叠会影响数据的准确性，甚至导致错误的的结果，而造成检测事故。但我们在评估 ICP-OES 时，通常只关注 200nm 处仪器的光学分辨率。而稀土分析时，测试谱线基本分布在 300-450nm，如 XB/T 617.2-2014 中推荐的分析谱线。因此，仪器在这段区间内光学分辨率更加重要



分辨率示意图 服务号·德国耶拿分析仪器

表 5

元素	分析线/nm	元素	分析线/nm
Y	371.029	Tb	332.440
La	333.749	Dy	①387.212, ②340.780
Ce	413.380	Ho	341.646
Pr	440.884	Er	369.265
Nd	445.157	Tm	384.802
Sm	442.435	Yb	369.420
Eu	412.970	Lu	261.542
Gd	342.247	—	—

XB/T 617.2-2014 中推荐的分析谱线 服务号·德国耶拿分析仪器



广州总部：广州市黄埔区科学大道112号绿地中央广场A1栋2201

电话：020-66618088

传真：020-83510388

广州 北京 上海 杭州 天津 青岛 济南 西安 成都 重庆 武汉 南京 厦门 深圳 珠海 中山 香港

网址：www.sinoinstrument.com

邮箱：dongnan@sinoinstrument.com

影响一台 ICP-OES 光学分辨率的因素主要有仪器使用的色散系统，光学系统像差，检测器的像素等。

中阶梯光栅是现在商品化 ICP-OES 上使用最广的色散系统。这是一种高分辨率衍射光栅，刻线密度较低（如 30-300 线/mm），但它利用大衍射角度（通常 >45°）使光能量集中在高阶次，通常几十至几百级，通过高级次衍射实现高色散率。从而使仪器即满足高光学分辨率的需求，又具有良好的灵敏度以及很宽的波长测试范围。

分辨率（R）公式：

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kN$$

- K: 衍射级次; ↓

- N: 光栅的有效刻线数

服务号 · 德国耶拿分析仪器

但是需要注意的是，中阶梯光栅中波长（λ）越长，可用衍射级次（K）越低，如短波长（如 200nm）可能使用 100 级衍射，而长波长（如 800nm）仅用 25 级衍射。中阶梯光栅的这种特性，可能会导致仪器在长波段处的光学分辨率下降。因此必须对长波段谱线的光学分辨率进一步优化，才能保证仪器良好的性能。

"名门世家，百年品质"—德国耶拿分析仪器优势

总部位于世界光学之都的德国耶拿分析仪器有限公司，旗下产品高分辨电感耦合等离子体发射光谱仪 **Plasma Quant 9100Elite**，采用卡尔·蔡司原装高性能棱镜+中阶梯光栅光学系统，衍射角度达 76°。仪器的全波长范围内均保证极其优异的光学分辨率(3pm@200nm, 6pm@400nm)，为业内该项目上最佳性能。即使是光谱干扰极为严重的稀土检测，也可轻松应对。下图为 Plasma Quant 9100Elite 上氧化钪基体中的 Sm、Y 元素，钹铁硼样品中 Sc 和 Gd 元素，均可清楚分辨进而准确定量，将"稀土世界"看得清清楚楚。



广州总部：广州市黄埔区科学大道112号绿地中央广场A1栋2201

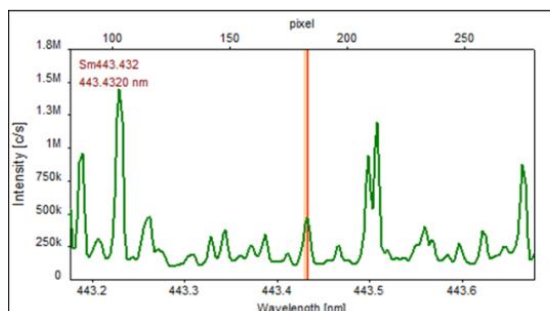
电话：020-66618088

传真：020-83510388

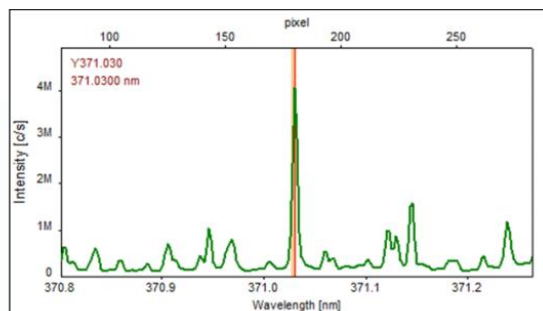
广州 北京 上海 杭州 天津 青岛 济南 西安 成都 重庆 武汉 南京 厦门 深圳 珠海 中山 香港

网址：www.sinoinstrument.com

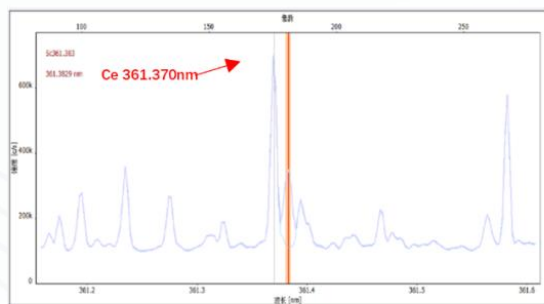
邮箱：dongnan@sinoinstrument.com



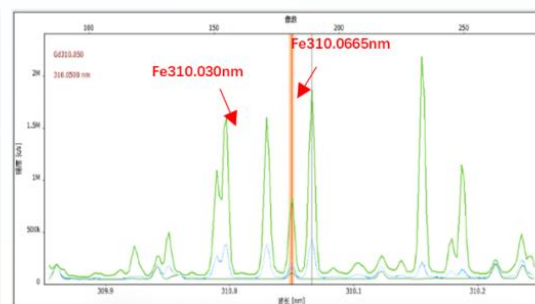
氧化钐基体中的Sm



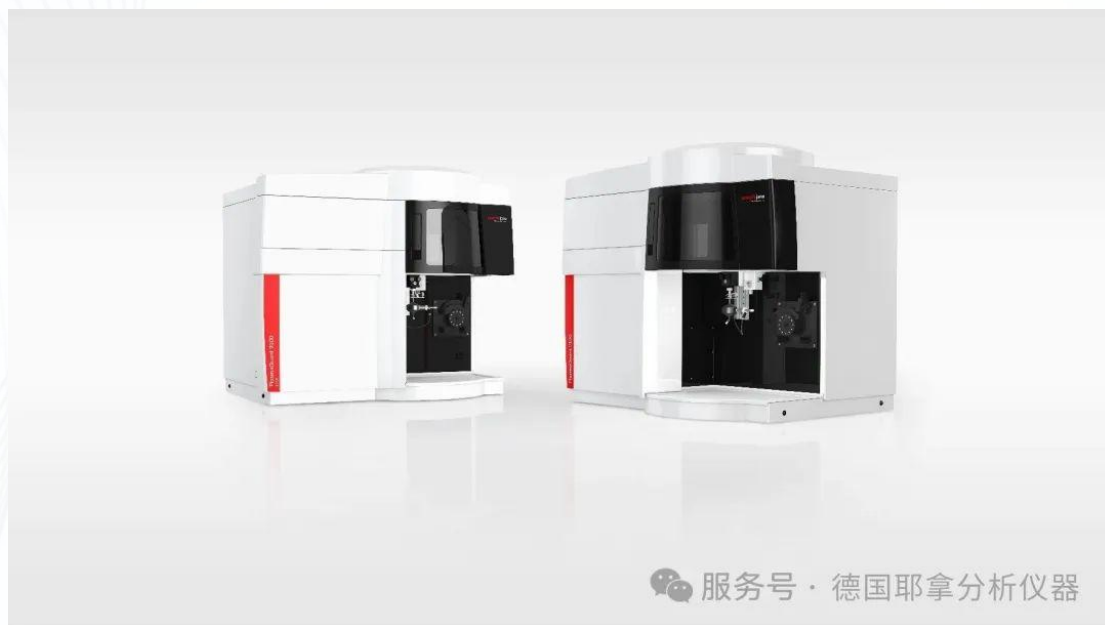
氧化钇基体中的Y



钕铁硼基体中的Sc



钕铁硼基体中的Gd



服务号 · 德国耶拿分析仪器



广州总部：广州市黄埔区科学大道112号绿地中央广场A1栋2201

电话：020-66618088

传真：020-83510388

广州 北京 上海 杭州 天津 青岛 济南 西安 成都 重庆 武汉 南京 厦门 深圳 珠海 中山 香港

网址：www.sinoinstrument.com

邮箱：dongnan@sinoinstrument.com