

# ICP-AES 分析钨铁硼 永磁材料及其相关金属

张光炎 编著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# ICP - AES 分析钕铁硼 永磁材料及其相关金属

张光炎 编著

北 京

冶金工业出版社

2011

## 内 容 提 要

本书简明地介绍了全谱直读电感耦合等离子体光谱仪 (ICP - AES) 的工作原理, 详细论述了 ICP - AES 法直接测定稀土金属及其合金、纯铁和硼铁、纯金属原料、难熔金属及其合金、钕铁硼永磁材料中的化学成分, 以及上述原料或材料中气体元素氧、氮、碳、硫、氢的分析方法和 ICP - AES 法测定新型稀土功能材料中的化学成分。同时还系统地介绍了 ICP - AES 分析试样的预处理技术和行之有效的应用实例。

本书适合于从事钕铁硼永磁材料及相关金属分析、质量和标准化管理方面的科技人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

ICP - AES 分析钕铁硼永磁材料及其相关金属/张光炎  
编著. —北京: 冶金工业出版社, 2011. 10

ISBN 978-7-5024-5733-4

I. ①I… II. ①张… III. ①钕铁硼—永磁材料  
IV. ①TM273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 190634 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 张熙莹 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5733-4

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2011 年 10 月第 1 版, 2011 年 10 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 9 印张; 239 千字; 277 页

29.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿信箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100010) 电话: (010)65289081 (兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

# 前 言

自 1983 年以来，钕铁硼 (NdFeB) 永磁材料因具有最高磁性能而得到了迅速发展，并在高科技领域，如电动机、驱动器、微波通信、音响、磁共振成像、家用电器等，获得了广泛应用。中国稀土资源丰富，预计 21 世纪中国将成为世界钕铁硼永磁材料生产开发中心。在国内外专家编写的有关稀土永磁材料的专著中，论述了烧结永磁材料和黏结永磁材料的磁性能与化学成分之间的关系，大量数据表明 NdFeB 合金中主量成分 Nd、Fe、B、Co 或添加的各种微量元素 Dy、Tb、Al、Pr、Nb、Zr、Ga、Cu、Ti 等对其磁性能都有极大影响，而且对添加量的微小变化十分敏感，只能通过实验来确定产品中各成分的配比。可见，严格检测 NdFeB 永磁材料及其相关金属中的化学成分显得十分必要和重要。

分析工作是工艺的眼睛。就在稀土永磁材料快速发展的过程中，不少单位采用的检测方法还是操作繁杂、费时的化学分析方法和经典光谱法，这显然不具有技术上的先进性、推广性和统一性，或者可认为有点不匹配。20 世纪 90 年代初，一种新型的、可称为第四代全谱直读电感耦合等离子体光谱仪问世了，即进入了以中阶梯光栅 + 光栅或棱镜构成二维色散系统为分光系统，以平面固体检测器为检测器的全谱直读 ICP 时代，如美国 PE 公司 Optima 和 TJA 公司 IRIS。全谱直读 ICP 具有灵敏度高、稳定性好、基体效应小、线性范围宽及多元素同时测定等优点，它为含有稀土等类型复杂光谱的试样，提供直接（不经预先化学分离基体）ICP 光谱分析指明方向和途径。于是立即在分析领域得到了广泛应用，这与国内

自20世纪80年代初各行业开始研发或应用的ICP光谱仪相比较,可以说具有历史性突破的意义,为广大分析工作者带来了福音。作者有幸在20世纪90年代中期就开始使用这类现代先进的光谱仪从事钕铁硼永磁材料化学成分分析方法的研究、开发和试验,现将近15年来完成的试验数据和成果加以整理总结,希望对从事钕铁硼永磁材料领域分析、质量管理的科技人员有所帮助。

本书以一种产品或一种原料为对象,按单篇操作规程或应用实例形式,论述了ICP-AES分析方法,力求原理正确、数据完整、实用性强;并首次提出按照元素相容性原理,配制多套标准化溶液,用于建立标准曲线;同时以较大篇幅叙述了ICP-AES分析试样预处理技术,包括多种物料的取样、制样方法,并提供应用实例。

北京中科三环高技术股份有限公司曾委托作者,进行了钕铁硼永磁材料ICP光谱分析方法调研与试验,并大力支持将多年积累的经验编书出版,在此表示特别感谢;在本书编写过程中,还得到了唐汝明、马占奎、朱纪总经理,谢庄应总工程师,刘虎生教授,姚继军博士,杨权臣、张克顺、赵玉珍、施洪钧、吕佩德等高级工程师以及邹骏城、林小平先生的鼓励与帮助;得到了工作单位领导和同事的理解和支持,特此致以衷心的感谢。作者向为本书收集整理相关资料的李洪茹高级工程师、张翔宇研究员、张若兰副教授和包威工程师深表谢意。

由于稀土永磁材料发展迅速,ICP-AES应用资料繁多,加之作者水平所限,书中不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2011.6.30 于北京

# 目 录

<b>1 全谱直读 ICP 光谱仪的工作原理</b> .....	1
1.1 进样系统 .....	2
1.2 分光系统 .....	3
1.3 检测系统 .....	4
1.4 光源激发系统（射频发生器） .....	4
1.5 软件操作系统 .....	5
参考文献 .....	6
<b>2 稀土金属及其合金分析</b> .....	7
2.1 ICP - AES 法直接测定金属钆、氧化钆中的稀土 和非稀土杂质元素 .....	7
2.2 ICP - AES 法直接测定金属镨中的稀土和非稀土 杂质元素 .....	11
2.3 ICP - AES 法直接测定镨钆合金中的主量 成分和微量杂质 .....	14
2.4 ICP - AES 法直接测定金属镧中的稀土和非稀土 杂质元素 .....	18
2.5 ICP - AES 法直接测定金属铈中的稀土和非稀土 杂质元素 .....	22
2.6 ICP - AES 法直接测定金属铈中的稀土和非稀土 杂质元素 .....	25
2.7 ICP - AES 法直接测定金属铽中稀土和非稀土 杂质元素 .....	29
2.8 ICP - AES 法直接测定金属钇中的稀土和非稀土 杂质元素 .....	32

2.9 稀土金属及其合金中 $\text{Cl}^-$ 的测定 .....	36
参考文献 .....	44
<b>3 纯铁及硼铁合金分析</b> .....	<b>46</b>
3.1 ICP - AES 法测定原料纯铁中的微量杂质 .....	46
3.2 ICP - AES 法同时测定硼铁中的主量元素和 微量杂质 .....	50
参考文献 .....	58
<b>4 纯金属原料分析</b> .....	<b>59</b>
4.1 ICP - AES 法测定金属钴中的微量杂质 .....	59
4.2 ICP - AES 法测定纯铝锭中的微量杂质 .....	62
4.3 ICP - AES 法测定标准阴极铜中的微量杂质 .....	66
4.4 ICP - AES 法测定高纯金属镓中的微量杂质 .....	72
参考文献 .....	77
<b>5 难熔金属及其合金分析</b> .....	<b>79</b>
5.1 ICP - AES 法同时测定铌铁合金、金属铌中的主量 成分和微量杂质 .....	79
5.2 ICP - AES 法同时测定锆铁合金、金属锆中的主量 成分和微量杂质 .....	84
参考文献 .....	89
<b>6 钕铁硼稀土永磁材料分析</b> .....	<b>90</b>
6.1 实验部分 .....	91
6.2 结果与讨论 .....	92
参考文献 .....	99
<b>7 气体元素分析</b> .....	<b>100</b>
7.1 红外吸收法测定稀土永磁材料中的碳和硫 .....	100

7.2	稀土永磁材料中氧和氮的测定 .....	110
7.3	国产钛合金标样在钕铁硼永磁材料氧、氮分析 上的应用 .....	124
7.4	金属钕、氧化钕和镨钕合金中碳、硫的测定 .....	132
7.5	高频红外吸收法测定金属镨、镨钕氧化物中的 碳和硫 .....	140
7.6	稀土永磁材料中残留氢的分析 .....	146
	参考文献 .....	148
<b>8</b>	<b>新型稀土功能材料分析 .....</b>	<b>150</b>
8.1	仪器及测量条件 .....	150
8.2	标准溶液的配制 .....	150
8.3	ICP - AES 法分析稀土陶瓷材料的化学成分 .....	151
8.4	ICP - AES 法分析稀土铝合金的化学成分 .....	152
8.5	ICP - AES 法分析稀土催化剂的化学成分 .....	154
8.6	ICP - AES 法分析储氢合金粉的化学成分 .....	157
	参考文献 .....	159
<b>9</b>	<b>ICP - AES 分析试样的预处理 .....</b>	<b>160</b>
9.1	基本知识 .....	160
9.2	稀土永磁材料分析试样的预处理 .....	175
9.3	核材料分析试样的预处理 .....	188
9.4	有色金属和稀有金属分析试样的预处理 .....	200
9.5	钢铁及铁合金分析试样的预处理 .....	215
9.6	岩石和矿物分析试样的预处理 .....	231
9.7	环境分析试样的预处理 .....	245
9.8	生物分析试样的预处理 .....	259
	参考文献 .....	273





## 全谱直读 ICP 光谱仪的工作原理

自 20 世纪 60 年代，电感耦合等离子体（ICP）问世以来，由于它具有灵敏度高、稳定性好、基体效应小、线性范围宽及多元素同时测定等优点，因此以 ICP 为光源的发射光谱仪在分析领域中得到了广泛的应用。

ICP 发射光谱仪技术的发展历程大致可分四个阶段：

(1) 第一代。以棱镜为分光元件，以感光板为接收器的摄谱仪。

(2) 第二代。以固定棱镜或光栅为分光元件，以多个光电倍增管（PMT）为检测器的多道直读 ICP 光谱仪时代。

(3) 第三代。以转动平面光栅为分光元件，以单个光电倍增管（PMT）为检测器的单道扫描 ICP 光谱仪时代。

(4) 第四代。以中阶梯光栅 + 光栅或棱镜构成二维色散系统为分光系统，以平面固体检测器为检测器的全谱直读 ICP 时代。

从 ICP 技术的发展过程看出，中阶梯光栅系统取代全息光栅，以平面固体检测器取代光电倍增管，全谱直读型取代早期的多道或单道型，使得全谱直读型 ICP 发射光谱仪的性能有了质的飞跃。于是在 20 世纪 90 年代初，陆续推出了一种新型可称为第四代的全谱直读 ICP 光谱仪，如美国 Perkin Elmer（简称 PE）公司的 Optima<sup>[1]</sup>，TJA 公司的 IRIS<sup>[2]</sup> 和 VARIAN 公司的 Vista<sup>[3]</sup> 等，立即在国内各行业特别是高科技新材料和环保等领域获得了广泛的应用。这类现代新型光谱仪的特点是具有更高的分析灵敏度，更低的检测限，更宽的测量范围，更快的检测响应速度和操作软件更强大，自动检测简单维护。

现以 Optima 7000 系列和 7300V 全谱直读 ICP 光谱仪为例，

简述其有关工作原理。

全谱直读 ICP 光谱仪主要由进样系统、射频 (RF) 发生器、分光系统、检测系统和操作软件等五个部分组成, 如图 1-1 所示。

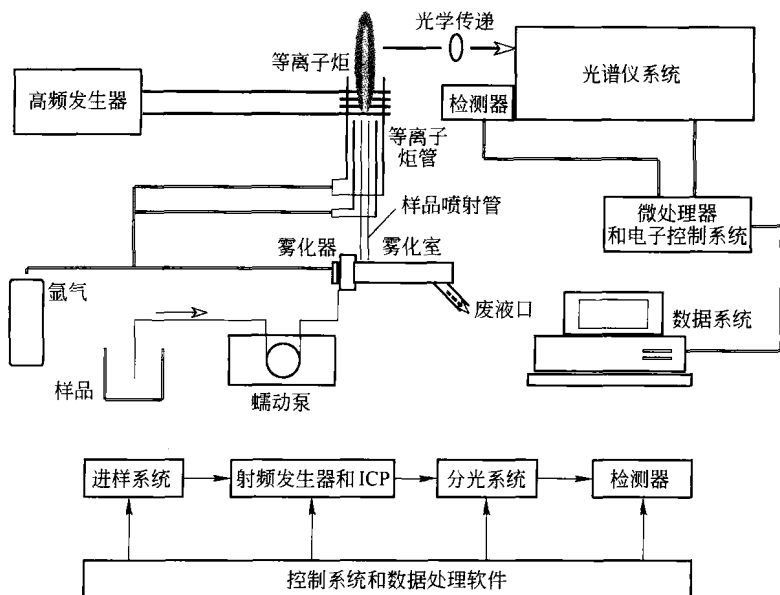


图 1-1 全谱直读 ICP 光谱仪组成示意图

## 1.1 进样系统

组合式设计快速可拆卸进样系统, 可以保持在一个恒温系统中, 以保证极稳定的雾化效率。雾化器采用比转子流量计更先进的高精度质量流量计进行控制, 不仅提高了精度, 而且可以自动调节任意流量, 最小步长为  $0.01\text{L}/\text{min}$ , 对于不同样品的工作条件均可得到优化。雾化系统为强耐腐蚀配置, 雾化器为刚玉宝石喷嘴正交雾化器, 雾室为 Ryton 材料, 可以直接进饱和和高盐分试样溶液, 耐高浓度的 HF、碱、王水、有机溶剂。这种雾室物理

强度大、不易破碎、灵敏度高、稳定性好、记忆效应小。等离子体炬管喷射管为 2.00mm 刚玉材料。蠕动泵有 SmartRinse 智能冲洗功能。

等离子体炬采用双向观测技术，即水平观测和垂直观测。所谓水平观测，就是炬管在样品室内沿光谱仪光学器件的中心轴向水平定位。采用这种配置，也称端视或轴向观测。沿等离子体轴向射出的光能射向光谱仪的光学器件，这样能增加仪器所观测到的光通道的长度和发射强度。所谓垂直观测的配置则是炬管在样品室内垂直定位，从等离子体侧面射出的光射向光谱仪的光学器件，所以这种配置也称为侧视或径向观测。据试验表明轴向观测的检出限好于径向观测约 10 倍。无论轴向观测还是径向观测，其观测位置全部由计算机自动优化，并有简洁实用的空气切割技术消除尾焰。因此，分析中灵敏度要求高的痕量元素可选择轴向观测，而对高含量元素采用径向观测，在一次分析试样时可达同时测定。目前，仪器光路中还加入了衰减器，可由计算机控制自动切换轴向或径向，全光或衰减等四种选择，不仅提高了灵敏度而且扩大了线性范围，大大提高了分析的灵活性。

## 1.2 分光系统

7000 系列采用中阶梯光栅双光路色散分光系统与最先进的 CCD 检测器，自动决定每一条谱线的曝光时间，一次分析获得所有谱线的强度和背景信息。光谱范围 165 ~ 850nm，分辨率在 200nm 处为 0.003nm。通过动态波长校正技术，使仪器做到即开即用。其原理是通过光导纤维将置于光学室内的氙灯光谱与待分析的光谱同时进入中阶梯光栅分光系统，上下平行进行色散，用氙十分丰富的特征谱线对分析波段中光谱进行波长校正，从而实现了真正的实时的波长校正。

7300V 是使用 Schmidt 消色差的成像系统，使谱线极为清晰，光学杂散光极低，无论是检测器的中间还是边缘都具有最佳的分辨率。由于所有光学元件极牢固地安置在基座上构成一个整

体,没有任何活动的光学色散元件,整个分光系统由热气流循环恒温,外有保温隔热层,使光学系统极好地恒定在 38℃,因而具有极好的波长稳定性,其波长变化率小于 0.00025mm/h。在分析谱峰受干扰的情况下还可以采用峰高法测量而避开干扰。

### 1.3 检测系统

7300V 采用分段式电荷耦合检测器 (SCD)。每一个检测单元四周都设有屏蔽地线,完全避免了信号溢出,确保高、中、低、痕量元素检测的准确性。每个单元还包括一套照相快门和信号处理放大系统,能自动按信号强弱选定积分时间 (1 ~ 65000ms),避免信号饱和并扩展检测元素的浓度范围。SCD 这种设计是针对分析选定了有用的谱线,避免了大量无用信息浪费分析时间和存储空间,实现了积分时间的优化,检测谱线库达 50000 条。SCD 检测器与二维色散的分光系统相匹配,同时测定谱线的强度和背景强度,实现了全谱直读检测技术的新飞跃。

### 1.4 光源激发系统 (射频发生器)

在 ICP 发展过程中,早期采用过低频率大功率的高频发生器,后来改用频率为 27.12MHz,功率在 800 ~ 2000W 之间。进入 20 世纪 90 年代,发现采用 40.68MHz 频率及较低功率有更多优点。根据研究表明,随着频率的增加,振荡器产生的能量能更有效地传递到等离子体,传输效率提高 60% 以上,使点火更容易,并可采用小功率以减少背景噪声和延长功率管的寿命;同时,等离子体对样品的适应性更好,不会在样品改变时灭火;此外,由于中心通道的变宽,可以使用大孔径进样管,使得高盐样品不堵塞。因而采用 40.68MHz 激发频率要远优于 27.12MHz,并从总体上提高信背比,改善检出限。

在光源激发方式上,自激式发生器传输效率高、匹配速度快、工作状态更稳定、结构简单。而曾采用过的晶控它激式发生器是通过电容耦合负载线圈和振荡回路的,由于响应速度不如自

激振荡快，当与等离子体不匹配时就会引起不稳定，极易导致灭火。Optima 全谱直读 ICP 光谱仪还运用了真实功率控制技术 (TPC)，采用功率实时监控和反馈技术，克服了外界电压变化引起的漂移和不稳定，实现了功率连续 1W 可调，满足不同分析的需要。

全新设计的 40.68MHz 自激式固体电路射频发生器，功率输出 750~1500W，真实功率波动小于 0.1%，能量传输效率大于 81%。整个发生器主件仅为一块高集成化的线路板，无功率管等发热部件，元器件寿命比功率管高 10 倍以上，可靠性强、稳定性好、能量耦合效率高，因而仪器体积也大大减小。

## 1.5 软件操作系统

全中文软件功能强大，简单易用，对原始数据和合法修改均有记录，出具检验报告时其数据具有合法性和可追溯性。软件具有模拟运行和离线运行功能。仪器的操作完全实现自动化，包括等离子体炬观测方向及高度选择、气体流量控制、RF 功率调节、故障诊断等，软件还具有定性和半定量分析功能，大大增强了对未知样品的剖析能力。

对于有复杂基体的样品，例如稀土元素、铁、钢铁等，光谱干扰是较为严重的，可利用仪器软件提供的多组分光谱拟合 (Multicomponent Spectral Fitting) 技术，解决谱线干扰问题。其原理是利用现代化学计量学和多元线性回归算法，在分析有复杂基体的样品时，通过数学模型将分析谱线从干扰光谱中剥离出来 (见图 1-2)，由于只需保持峰形稳定，因此该模型通常与样品被测元素浓度及特定的离子状况无关。在建立 MSF 模型时，依次将空白溶液 (记为 b)、待测元素溶液 (a) 和干扰元素溶液 (i) 送入 ICP 光谱仪进行激发，收集谱图，建立 MSF 文件，存入方法；然后利用所建立的 MSF 模型分析已知标准样品或合成样品，如果结果不很符合，还可进行多次修正，达到优化，保存该模型备用于常规样品分析。一般要求干扰元素溶液浓度应该为

分析试样中所遇到的最大浓度，待测元素溶液浓度在测定波长下应是检出限的 100 倍以上。

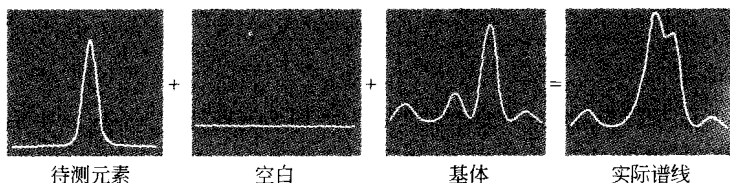


图 1-2 MSF 模型扣除光谱干扰示意图

众所周知，通过 MSF 校正的待测元素不仅扣除了背景和重叠光谱干扰，还能提高校正曲线的线性相关系数达到 0.999 ~ 0.9999 以上，并充分改善了分析结果的精密度和检出限。

有关 ICP 光谱分析法的基本原理，可参阅相关文献<sup>[4~6]</sup>，在此不再赘述。

### 参 考 文 献

- [1] 美国 Perkin Elmer 公司. Optima 7000 系列和 7300V 型全谱直读电感耦合等离子体光谱仪设计性能指标及技术进展应用报告, 2010.
- [2] 美国 TJA 公司. 美国 TJA 公司 IRIS 全谱直读电感耦合等离子体光谱仪技术性能指标, 2009.
- [3] 美国 Varian 公司. 美国瓦里安 (Varian) 公司 Vista 全谱直读电感耦合等离子体光谱仪技术性能指标, 2009.
- [4] 陈新坤. 电感耦合等离子体光谱法原理和应用. 天津: 南开大学出版社, 1987.
- [5] 辛仁轩. 等离子体发射光谱分析 (第 2 版). 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [6] 邱德仁. 原子光谱分析. 上海: 复旦大学出版社, 2002.

## 2 稀土金属及其合金分析

### 2.1 ICP - AES 法直接测定金属钕、氧化钕中的稀土和非稀土杂质元素

金属钕是生产 NdFeB 高性能永磁材料的主要原料，它在工业上已得到了大量应用，其品质对所制备的合金磁性能有直接影响。氧化钕是在氟化物熔盐中电解法制备金属钕锭的原料之一。从化学成分考虑，国产金属钕经日常大量检测表明多属于优质品，但要正确判定其品位，便于钕铁硼合金生产过程中正确及时地控制和调整，就须对金属钕（纯度为 99.5%）和纯度为 99.9% 的氧化钕中的稀土及非稀土杂质元素做准确的定量分析。曾有文献<sup>[1-4]</sup>报道，需要 4~5 个分析方法（包括化学分光光度法、火焰原子吸收法、EDTA 滴定法、比色光度法和原子发射光谱法）才能完成 20 多个杂质元素的分析。但根据被测元素相容性原理，配制了 3 套多元素组合标准溶液，在现代全谱直读光谱仪上，选择相同分析条件，建立了直接测定金属钕（或氧化钕）中的 La、Ce、Pr、Sm、Dy、Gd、Y、Fe、Ca、Mg、Al、Si、Mn、Zr、Ni、Cr、Ta、Nb、W、Mo、Ti、Li、Na、K 等 24 个杂质元素的 ICP 光谱分析方法<sup>[5,6]</sup>。经常规样品分析，表明该方法具有空白值低、制样简单、操作快速、结果准确和提高工效等优点。

#### 2.1.1 实验部分

##### 2.1.1.1 仪器及测量条件

Optima 全谱直读电感耦合等离子体光谱仪；自激式射频发生器：频率 40.68MHz，功率 1300W。等离子（Plasma）气：15L/min；雾化（Neb）气：0.8L/min；辅助（Aux）气：0.5L/

min。观测高度：15mm。

### 2.1.1.2 标准溶液和试样制备

采用纯度为 99.999% 的高纯氧化钕配制基体溶液（含钕为 10mg/mL）。单个元素标准储存溶液（1mg/mL），可从市场上标准溶液配制中心购置。按多元素相容性原理，将 24 个待测元素分成 3 组，见表 2-1，按产品质量标准规范和不同比例混合，每组配制一套基体空白（Matrix Blank）、标准 1（STD1）、标准 2（STD2）和标准 3（STD3）的标准化溶液。

表 2-1 标准溶液元素分组

分组	元 素
1	Nd (matrix)、La、Ce、Pr、Sm、Dy、Gd、Y、Al、Fe、Ni、Mn、Zr、Ca、Mg、Si、Cr
2	Nd (matrix)、Ti、Ta、Mo、W、Nb
3	Nd (matrix)、Li、Na、K

试样的制备：准确称取 0.1000g 金属钕（氧化钕经 850℃ 灼烧后，称取 0.1166g）于 50mL 烧杯中，加 5mL 盐酸（1+1），在石墨电炉上低温加热溶解后，取下冷却，将试样溶液转移至 100mL 容量瓶中，用 5%（体积分数）盐酸定容，混匀后送 ICP 光谱分析。

## 2.1.2 结果与讨论

### 2.1.2.1 背景和谱线干扰校正

钕的谱线较复杂，实验中除选择干扰少、灵敏度合适的分析线外，还采用基体匹配法（即模拟实际样品的组成）配制标准溶液，采用离峰背景扣除法（即在分析线两侧适当位置）对不受主量元素 Nd、Pr、Fe 谱线重叠干扰的待测元素可直接进行背景扣除，对 La、Ce、Pr、Dy、Al、Ca 等受主量元素谱线干扰的



元素可采用多组分光谱拟合技术 (MSF) 将分析线从重叠干扰光谱中剥离出来, 达到消除基体和干扰元素间产生的光谱干扰。实验中还观察到采用 MSF 技术后, Ta、Nb、W、Mo 等元素明显地改善了检出限和标准曲线的线性。

### 2.1.2.2 回收率、精密度和检出限

为了验证方法的精密度和准确度, 对配制的合成样品进行了测量, 数据见表 2-2。结果表明所测 24 个杂质元素的平均回收率为 96.8% ~ 104.0%; 相对标准偏差 (RSD) 为 0.92% (Ti) ~ 6.90% (Ca)。表中还列出了基体浓度为 1mg/mL 时各元素的检出限。

表 2-2 回收率、精密度和检出限

元素	波长/nm	加入量 /%	测得量 /%	回收率 /%	精密度 /%	检出限 / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
La	408.672	0.10	0.099	99.0	1.71	51.1
Ce	456.236	0.05	0.050	100.0	1.67	25.2
Pr	414.311	0.50	0.498	99.6	1.23	282.7
Sm	442.434	0.05	0.051	102.0	2.11	32.4
Y	371.105	0.05	0.050	100.0	1.15	17.3
Dy	394.468	0.05	0.049	98.0	2.39	35.4
Gd	336.223	0.05	0.051	102.0	1.49	22.7
Fe	273.955	0.20	0.201	100.5	1.83	110.0
Ca	315.887	0.02	0.021	105.0	6.90	42.9
Mg	285.213	0.02	0.020	100.0	3.71	22.4
Al	308.215	0.02	0.020	100.0	2.14	32.1
Si	251.211	0.05	0.050	100.0	1.58	24.0
Mn	257.210	0.05	0.050	100.0	2.24	33.3
Zr	339.198	0.05	0.051	102.0	1.94	29.4
Ni	232.003	0.01	0.010	100.0	2.83	8.67
Cr	267.716	0.01	0.010	100.0	2.36	7.14
Ta	248.870	0.01	0.0099	99.0	1.36	4.05
Nb	292.781	0.01	0.0098	98.0	1.58	2.33
W	248.923	0.025	0.0242	96.8	3.54	26.6
Mo	281.615	0.025	0.0256	102.0	1.78	8.49
Ti	336.121	0.01	0.0099	99.0	0.92	2.74
Li	670.781	0.01	0.0102	102.0	2.77	8.5
Na	598.592	0.005	0.0052	104.0	3.65	5.7
K	766.491	0.005	0.0051	102.0	3.14	4.8