

感耦等离子体发射光谱/质谱分析新型陶瓷材料研究进展

汪正¹, 王士维¹, 邱德仁², 杨芑原^{2*}

1 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050

2 复旦大学化学系, 上海 200433

摘要 新型陶瓷材料在信息、航空航天、生命科学等现代科学技术各个领域发挥了极其重要的作用。微量、痕量杂质对材料的光、电等性能影响巨大。因此微量、痕量杂质含量的精确测定对材料制备和性能调控至关重要。文章综述了近10年来等离子体发射光谱/质谱(ICP-AES/MS)在新型陶瓷材料的微、痕量杂质分析方面的应用。结合作者的研究工作,着重介绍和评论了等离子体发射光谱/质谱各种进样方法的优缺点,并展望其发展趋势。

关键词 新型陶瓷材料; 等离子体发射光谱/质谱; 综述

中图分类号: O657.3 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)10-2838-05

引言

新材料技术是当今高技术之一,新材料的研究水平已经成为衡量社会发展的重要标志。材料科学的研究进入到纳米尺度后,使得纳米材料的研究成为材料领域的热门课题,并得到迅猛的发展。已涌现出许多新型材料,尤其是广泛应用于信息技术、航空航天技术、生物技术等领域的新型微、纳米材料。例如应用在光催化剂上的纳米二氧化钛,透明陶瓷及其粉体原料,微电子封装用氮化铝基材料以及半导体器件等。由于材料研究需要掺杂的稀土或贵金属等少量添加剂,甚至材料制备过程中无意引入的微量乃至痕量杂质均会直接影响到材料的微观结构,从而影响其性能。因此,分析并控制对材料器件的结构与性能有显著影响的组成与杂质含量已成为材料性能研究的关键之一。

原子光谱分析是分析化学的重要分支学科,是现今无机元素分析最广泛应用的方法。原子光谱主要包括原子吸收光谱(火焰原子化和电热原子化)和原子发射光谱(ICP-AES, DCP-AES, MIP-AES, GD-AES),质谱法也被归并在光谱法中。特别地,ICP-AES和ICP-MS具有灵敏、准确和快速分析的特点,在无机材料(陶瓷、玻璃和晶体等)元素分析中发挥着举足轻重的作用。然而,在原子光谱分析中,如原子吸收光谱、原子发射光谱和ICP-MS分析,首先要求将材料通

过各种手段(如酸溶、熔融等)转变成均匀稳定的溶液才能进行后继的分析工作。进样技术和方法历来被称为是原子光谱/质谱分析的瓶颈(Achilles' heel)^[1]。若能将固体样品直接引入原子光谱/质谱分析系统则可有效地克服试样分解过程所带来的缺陷,如污染、转移损失、分析时间长、空白高及试剂和人力的消耗^[2]。因此本文在介绍溶液进样的基础上,并结合作者的研究工作,综述固体进样技术的优缺点及其应用。

1 溶液进样

无机非金属材料的光谱/质谱分析制样方法一般有湿法消解和熔融两类。湿法消解法采用强酸破坏材料中的价键,将其转变成溶液。该法特别适合黏土、玻璃等硅酸盐材料。例如,通过氢氟酸和高氯酸等的作用,将硅酸盐材料中的硅转化成氟化硅,从而起到分解样品的目的。对氧化铝陶瓷而言,则可利用硫酸的强氧化性和强酸性分解氧化铝。由于这种酸粘度大,分析测试时需要相应的基体匹配或使用内标等方法进行校正。

然而,氧化钛、碳化硅及其复合物材料则难于用湿法消解,通常用熔融法。该方法具有熔样完全、快速等优点,且特别适合硅的含量测定,故成为实验室的一种常规分析方法。但由于熔样引入的熔剂(如碳酸钠)量为样品的3~10倍

收稿日期: 2008-08-10, 修订日期: 2008-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(20705036), 中国科学院上海硅酸盐所科技创新项目(SCX0626)和科技部“863”计划项目(2006AA03Z535)资助

作者简介: 汪正, 1975年生, 中国科学院上海硅酸盐研究所副研究员 e-mail: wangzhong@mail.sic.ac.cn

* 通讯联系人 e-mail: pyyang@fudan.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

左右,致使雾化效率降低,以及高浓度基体和空白降低了检出限;而且熔剂中大量易电离元素引入使等离子体温度发生变化而引起原子化和激发条件的变化,需要基体匹配或其他方法进行匹配或校正;熔融时高温还引起部分元素挥发,故该方法不适合高纯材料及易挥发元素的分析测定。

微波辅助或高温、高压湿法消解可以缩短样品分解时间、减少试剂用量,降低空白,避免易挥发元素在分解过程中挥发,也可以减少玷污,因此得到了广泛的应用,特别是难以常规方法溶解的新型陶瓷材料。对这些材料的分析研

究,大多集中在样品的分解方法和条件以及随后的分离技术的改进方面。表 1 列出文献中陶瓷材料溶液雾化进样引入等离子体的分析应用。

将样品制备成溶液雾化进样 ICP AES/MS 是理想的分析方法。由于消解样品引入大量的酸等溶剂,故在分析高纯材料时要求为高纯的试剂。但高纯试剂往往不易获得而且价格昂贵;另外,硫酸或磷酸等的引入严重影响样品的雾化效率和最后的分析测定。

Table 1 Analytical applications of advanced ceramic materials solution nebulization into plasma

基体或样品	元素	等离子体技术	样品处理	参考文献
陶瓷珐琅	27 个	ICP AES	使用氢氟酸和微波辅助酸消解	3
碳化钽, 氮化钽, 硼化钽, 硅化钽, 碳化钒, 硼化钒和硅化钒粉末	各种	ICP AES	氢氟酸和过氧化氢在 PTFE 容器中高压消解	4
碳化铌	13 个	ICP AES	0.25 g 碳化铌粉末置于特富龙压力罐, 2 mL 氢氟酸 (1+ 1) 和 10 mL 硝酸 (1+ 9), 在烘箱 160 ℃ 中加热 16 h	5
氮化硅	7 个	ICP AES	样品用 HF, H ₂ SO ₄ (1+ 1) 和 HNO ₃ 混合酸高压消解	6
氮化硅, 氮化硼	2 个	ICP AES	样品用 HF, H ₂ SO ₄ (1+ 1) 和 HNO ₃ 混合酸高压消解	7
氧化铌	4 个	ICP AES	采用微波消解样品	8
α 氧化铝	8 个	ICP AES	α 氧化铝样品用 HCl 或 HNO ₃ 微波消解	9
SARM 69	10 个	ICP AES	研究了用三种微波辅助消解, 一种传统加热湿法消解, 一种微波消解结合湿法加热消解和熔融消解试样的方法	10
氧化锆	15 个	ICP AES/MS	样品用 HF+ HNO ₃ 或 H ₂ SO ₄ + HNO ₃ 混合酸高压消解	11
五种参考物质 (SARM69, NCS DC 73332, SRM620, AW-1 及 PR-1)	6 个	ICP AES	用置于微波炉中的密封罐分解硅酸盐基体。0.1 g 粉末样品置于特富龙压力罐, 加入 5 mL HF 40% (m/m) 和 5 mL 69.5% HNO ₃ 进行消解	12
Co 取代的镍酸锂陶瓷粉末	17 个	ICP AES	样品采用 25% 硝酸微波辅助消解	13
碳化硼	7 个	ICP AES	样品采用 HNO ₃ + HF 或 HNO ₃ + HF+ H ₂ SO ₄ 在微波炉中消解	14
钛酸锶和氧化铈	2 个	ICP AES/MS	用 HNO ₃ : H ₂ O ₂ : HF (16: 2: 1) 消解 SrTiO ₃ , 用 HNO ₃ : H ₂ O ₂ (1: 4) 消解 CeO ₂	15
氧化锆	6 个	ICP AES	采用微波辅助消解系统试验了四种不同试剂的消解程序	16
氮化硅	12 个	ICP MS	样品采用最小量的 H ₂ SO ₄ (100 mg 样品 0.5 mL) 和 HF 及 HNO ₃ 混合酸在密闭容器中产生的蒸汽微波消解, 99.9% 的硅被挥发	17

2 固体进样

固体样品若能不经消解处理制样过程而直接送入等离子体激发源或离子源, 那么实用性和分析上的优势就能突现出来。例如: 来自试剂的污染可降到最低限度, 稀释误差得以消除, 避免了额外的样品处理步骤带来的样品转移损失, 分析时间大大缩短, 试剂和人力的消耗降低。此外, 改善绝对检出限的潜力有可能被开发。目前固体试样引人主要有以下几种。

2.1 激光剥蚀

激光剥蚀 (LA) 是特别受欢迎的一种固体分析技术, 它是利用激光的高强度能量使被照射样品表面上的分析物气化, 然后由载气引入检测系统。这种技术可用于导电和非导电样品, 及具有各种各样几何形状的固体及粉末状物质; 此外, 还可用于深度剖面分析 (Profile analysis)。

Russo 等^[18] 对激光剥蚀技术在分析化学领域中的应用作了评述, 并认为激光剥蚀技术越来越成为分析化学直接固体进样的主要技术。Hoffmann 等^[19] 对 LA-ICP MS 分析中影响分析精密度和准确度的一些因素, 诸如校准、质谱仪信号采集模式等作了简要评述。Becker^[20] 综述激光剥蚀 ICP MS 在材料分析方面的应用, 该技术无需对样品进行处理, 避免了样品制备过程带来的污染, 能快速测定材料中痕量元素, 对于大部分元素检出限可达 ng · g⁻¹, 其主要问题在于定量分析难于找到同样品基体组成的合适标准参考物质。该综述还讨论了 LA-ICP MS 在材料科学痕量元素定量分析和表面分析新的发展和可能的应用。

近年来, LA-ICP MS 分析技术已被广泛应用于分析地质、陶瓷和考古学研究等试样^[21-25]。尽管如此, 与其他进样技术相比, 激光仪器的价格昂贵限制了其广泛应用。另外 LA 技术存在一个明显的缺点, 即制定工作曲线比较困难, 较难实现定量分析。因此, 对于 LA-ICP MS 分析, 选择合适

的校准方法显得非常重要。如果定量分析困难这个问题能解决, 那将使 ICP- AES/ MS 对固体样品的分析跨出了一大步。

2 2 电热蒸发试样引入

电热蒸发(ETV)是将微量液体(或固体)试样以脉动方式引入等离子体的一种进样技术。具体来说, 系将微升或毫克级试样沉积在金属或石墨材料蒸发器中, 通过电阻加热产生的干气溶胶被载气引入等离子体中。ETV 进样技术具有以下一些突出的优点: 进样效率高、基体可有效分离、耗样量少和固体试样可直接分析等。将试样制成悬浮体形式引入 ET V- ICP- AES/ MS 技术在陶瓷分析中的应用十分活跃, 他可以有效地克服试样组分分布不均匀引起的误差。近些年来, 电热蒸发 ICP AES/MS 技术受到了人们更为广泛的关注, 已成功应用于各种试样, 尤其是固体试样的直接分析^[26-32]。国内江祖成和胡斌课题组成功用此技术测定了 Nb₂O₅^[33], Si₃N₄^[34], SiC^[35], Al₂O₃^[36], TiO₂^[37-39] 粉末等试样中多种痕量杂质。

但是, ETV 低进样量和瞬态信号特性使得分析信号的检测存在困难; 当然这种困难可以通过数据采集技术的发展和仪器的完善加以解决。此外, 由于装置复杂, 运行成本较高及分析结果的精密度相对较差, 这种技术要发展成为一种常规的进样技术仍需要很长的时间^[40]。

2 3 悬浮液进样

此技术将样品粉末均匀分散在水相或有机相中, 通过蠕动泵和进样管引入雾化器和雾化室后送入等离子体激发源或离子源进行分析的一种方法。由于常规使用的同心型雾化器的内径很细(< 30 μm, 通常 15~ 20 μm), 容易引起堵塞, 所以悬浮液进样尚不能用于常规电感耦合等离子体发射光谱/质谱分析。交叉型雾化器克服了此缺点。它具有其他固体进样技术的优点, 比如免去了复杂的消解程序等。此外, 此技术需要的设备便宜, 且不需要改动仪器。最大的优点是可有

能采用水溶液作校准曲线, 而其他固体进样技术往往存在一定的问题^[41]。

悬浮液颗粒大小分布制约分析准确度和精密度。悬浮液雾化进入等离子体需要悬浮液颗粒在样品传输系统的传输效率和颗粒在等离子体中原子化效率应当与相应水溶液标准一致。如果与这些标准一致, 则可使用简单的水溶液作校准曲线^[42-43]。Broekaert 等^[44]在分析陶瓷粉末时指出, 悬浮体颗粒应小于 5~ 10 μm。并进一步指出超过 8 μm 的颗粒都会导致等离子体中的不完全蒸发, 并建议引入 ICP 中的最大颗粒粒度不应超过 1~ 4 μm^[44]。汪正等研究氮化物陶瓷粉末时发现粒子大小对悬浮液的传输和原子化行为影响很大, 甚至粒子平均直径不到 2 μm 的颗粒。

为了制备适合电感耦合等离子体发射光谱分析的陶瓷材料悬浮液, 汪正(上海硅酸盐研究所汪正的博士论文, 2006)采用 zeta 电位、颗粒度大小及分布、颗粒形貌及光谱强度随时间的变化等进行表征, 获得了制备新型陶瓷材料悬浮液雾化进样的最佳条件。悬浮液的有效雾化、蒸发和原子化以及颗粒大小分布是关键。对于不铜新型无机材料, 其校准方法不同; 即使是粒度不同的同一种材料, 其校准方法也不同。也就是说: 悬浮液与水溶液在雾化器、雾化室的雾化传输和在等离子体的原子化不同, 导致需要使用不同的校准策略。窄的粒度大小分布, 平均粒度大小小于 2 μm 能确保悬浮液样品传输和回收与相应水溶液标准等效。在此情况, 可成功地使用简单的水溶液校准。这种技术已被大多数分析者应用于粒径大小合适和稳定的悬浮液样品分析。如汪正等用端视 ICP- AES 水溶液标准分析 TiO₂^[42-45], AlN^[46], TiN^[47] 和 SiC^[48] 材料。另外还有几种分析校准技术也被广泛地使用: 有内标法、经验校正系数法、标准加入法、本征内标法的使用、标准悬浮液法等^[41]。

Table 2 Analytical applications of slurry nebulization into plasma

样品	分析元素	等离子体技术	分散剂	参考文献
石膏和水泥	12 个	ICP- AES	0.01% 甘油, 0.01% 盐酸	
水泥	10 个	ICP- AES	盐酸 1%	49
水泥	12 个	ICP- AES	0.01% 甘油, 1% 盐酸	50
生物材料	9 个	MIP- AES	10% 硝酸和 0.01% Triton X100	51
氧化锆 氧化铝 陶瓷	9 个	ICP- AES	0.01% TMAH	52
粘土和耐熔材料	9 个	ICP- AES	10% 硝酸	53
水泥, 石膏, 矿渣	20 个	ICP- AES	水泥, 石膏用 1% 磷酸和 0.01% m/V 甘油; 渣样用 5% V/V 盐酸和 5% m/v 甘油	54
二氧化硅	6 个	ICP- AES	盐酸或氨水调节合适的 pH 值。用 0.01% 十二烷基磺酸钠作分散剂	55
二氧化钛	5 个	ICP- MS	0.01% (m/V) PVA 作为分散剂和稳定剂	38
二氧化钛	11 个	ICP- AES	对不同颗粒大小的样品使用 0.5% 或 1.5% NH ₄ PAA	43, 45
氮化钛	11 个	ICP- AES	对不同颗粒大小的样品使用 0.8% 或 2.0% PEI	46
氮化铝	8 个	ICP- AES	对不同颗粒大小的样品使用 0.8% 或 1.0% NH ₄ PAA	47
碳化硅	10 个	ICP- AES	-	48

最近还研究了悬浮液雾化进样感耦等离子体原子发射光谱基本参数: 等离子体激发温度和电子密度, 随着感耦等离子体原子发射光谱仪器功率提高, 悬浮液雾化进样等离子体

激发温度也相应增大, 但增大幅度较小。悬浮液雾化进样等离子体发射光谱分析, 若单纯使用改变仪器功率对于颗粒在等离子体中的原子化效率没有显著的变化, 因此对于分析结

果没有显著的改善作用。悬浮液雾化进样同水溶液雾化进样感耦等离子体原子发射光谱时等离子体电子密度没有发生显著的变化, 数值为 10^{15} 数量级。固含量高达 10% (m/V) TiO_2 悬浮液雾化进样等离子体原子发射光谱, 电子密度测定结果仅有微小的降低。高固含量悬浮液雾化进样等离子体原子发射光谱没有显著影响等离子体电子密度, 有助于使用高固含量悬浮液雾化进样等离子体原子发射光谱来进行痕量元素分析测定。

由于可以制备高固含量的悬浮液, 因此悬浮液进样对于分析高纯超细陶瓷材料是具有极大的优势。随着材料研究的拓宽和深入, 材料中的微量、痕量元素的定量测定将会变得尤为重要。因此, 将 ICP (MIP)-AES、ICP-MS 结合悬浮液分析新型无机材料中微量、痕量元素定性、半定量和定量分析显得尤其必要和具有重要现实意义。表 2 列出了近年来悬浮液雾化进样引入等离子体的分析应用。

3 展 望

等离子体光谱/质谱在元素分析方面已成为成熟的常规

分析技术。目前国内外实验室拥有众多一流的 ICP-AES/MS 仪器, 但样品制备和样品引入仍然是目前最为薄弱的环节, 需要给与足够的重视并投入更多的精力去解决它, 使之充分发挥作用。随着等离子体光谱/质谱运用于新型陶瓷材料分析的研究深入, 将在以下几个方面碰到新的瓶颈并将取得新的突破。

首先, 高纯酸, 如高沸点酸(硫酸、磷酸等)的提纯和制备需要在普通实验室获得, 至少能国产化。它不仅可以摆脱依赖进口所面临的一系列问题, 而且还可大大降低分析成本, 提高分析效率。

其次, 如何将块状固体或大颗粒样品制成细小粉末, 而又不引入干扰杂质是需要解决的问题。

第三, 固体进样方法的校准方法的改进及相应标准物质的研制也将有助于分析结果正确度的提高。

参 考 文 献

- [1] Richard F B, Andrew W B. Anal. Chem., 1984, 56: 786A.
- [2] Montaser A, Golightly D W, Edit. Inductively Coupled Plasmas in Analytical Atomic Spectrometry (感耦等离子体在原子光谱分析法中的应用). Translated by CHEN Long-mao, SHAO Your bin, et al (陈隆懋, 邵友彬, 等译). People's Medical Publishing House (人民卫生出版社), 1992. 334.
- [3] Dondi M, Fabbri B, Mingazzini C. Talanta, 1998, 45: 1201.
- [4] Yokota F. Bunseki Kagaku, 1999, 48: 805.
- [5] Yokota F, Shimizu A, Ishizuka T, et al. Bunseki Kagaku, 2000, 49: 765.
- [6] Kim K H, Kim H Y, Lim H B. Bulletin of the Korean Chemical Society, 2001, 22: 159.
- [7] Mann S, Geilenberg D, Broekaert J A C, et al. J. Anal. At. Spectrom., 1997, 12: 975.
- [8] Anil G, Kumar S N R, Kumar A, et al. Acta Chimica Slovenica, 2003, 50: 335.
- [9] WU Xian xin, CHEN Tianyu (吴显欣, 陈天裕). Journal of Inorganic Materials (无机材料学报), 2003, 18: 509.
- [10] Papadopoulou D N, Zachariadis G A, Anthemidis A N, et al. Anal. Chem. Acta, 2004, 505: 173.
- [11] Merten D, Broekaert J A C, Brandt R, et al. J. Anal. At. Spectrom., 1999, 14: 1093.
- [12] Papadopoulou D N, Zachariadis G A, Anthemidis A N, et al. Spectrochim. Acta, Part B, 2004, 59: 1877.
- [13] Mosqueda Y, Pomares M, Perez Cappe E L, et al. Anal. Bioanal. Chem., 2006, 386: 1855.
- [14] WANG Zheng, QIU Deren, ZOU Huijun, et al (汪正, 邱德仁, 邹慧君, 等). Chinese J. Anal. Chem. (分析化学), 2006, 34: 1818.
- [15] Packer A P, Larivière D, Li C S, et al. Anal. Chem. Acta, 2007, 588: 166.
- [16] Ma X G, Li Y B. Anal. Chimica Acta, 2006, 579: 47.
- [17] Sahayam A C, Jiang S J, Wan C C. Anal. Chimica Acta, 2007, 605: 130.
- [18] Russo R E, Mao X L, Liu H, et al. Talanta, 2002, 57: 425.
- [19] Hoffmann E, Ludke C, Skole J, et al. Spectrochim. Acta, Part B, 2002, 57: 1535.
- [20] Becker J S. Spectrochim. Acta, Part B, 2002, 57: 1805.
- [21] Perez Arantegui J, Resano M, Garcia Ruiz E, et al. Talanta, 2008, 74: 1271.
- [22] Cochrane E E, Neff H. J. Archaeological Sci., 2006, 33(3): 378.
- [23] Resano M, Marzo P, Perez Arantegui J, et al. J. Anal. At. Spectrom., 2008, 23: 1182.
- [24] Stěfánka Z, Katona R, Varga Z. J. Anal. At. Spectrom., 2008, 23(7): 1030.
- [25] Resano M, Perez Arantegui J, Garcia Ruiz E, et al. J. Anal. At. Spectrom., 2005, 20: 508.
- [26] Barth P, Hassler J, Kudrik I, et al. Spectrochim. Acta, Part B, 2007, 62: 924.
- [27] Esteban A M, Slowikowski B, Critic R. Anal. Chem., 2003, 33: 43.
- [28] Belarra M A, Resano M, Vanhaecke E, et al. Trends in Anal. Chem., 2002, 21: 828.

- [29] Wende M C, Broekaert J A C. *Spectrochim. Acta, Part B*, 2002, 57: 1897.
- [30] Peschel B U, Herdering W, Broekaert J A C. *Spectrochim. Acta, Part B*, 2007, 62: 109.
- [31] Peschel B U, Andrade F, Wetzel W C, et al. *Spectrochim. Acta, Part B*, 2006, 61: 42.
- [32] Matschat R, Hassler J, Traub H, et al. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2005, 383: 1060.
- [33] Li S Q, Hu B, Jiang Z C. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2004, 19: 387.
- [34] Peng T Y, Jiang Z C, Qin Y C. *J. Anal. At. Spectrom.*, 1999, 14: 1049.
- [35] Peng T Y, Chang G, Sheng X H, et al. *Anal. Chimica Acta*, 2001, 433: 255.
- [36] Peng T Y, Chang G, Wang L, et al. *Fresenius' J. Anal. Chem.*, 2001, 369: 461.
- [37] Peng T Y, Du P W, Hu B, et al. *Anal. Chim. Acta*, 2000, 421: 75.
- [38] PENG Tiar you, YAN Qin, HU Bin, et al(彭天右, 阎 琴, 胡 斌, 等). *Chem. J. Chinese Universities(高等学校化学学报)*, 2000, 21: 694.
- [39] Xiang G Q, Hu B, Jiang Z C, et al. *Journal of Mass Spectrometry*, 2006, 41(10): 1378.
- [40] JIANG Zir cheng, TIAN Li qing, CHEN Xir kun, et al(江祖成, 田立卿, 陈新坤, 等). *Modern Atomic Emission Spectrometry Analysis (现代原子发射光谱分析)*. Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1999. 343.
- [41] Ebdon L, Foulkes M, Sutton K. *J. Anal. At. Spectrom.*, 1997, 12: 213.
- [42] Goodall P, Foulkes M E, Ebdon L. *Spectrochim. Acta, Part B*, 1993, 48: 1563.
- [43] Wang Z, Ni Z M, Qiu D R, et al. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2004, 19: 273.
- [44] Broekaert J A C, Lathen C, Brandt R. *Fresenius' J. Anal. Chem.*, 1994, 349: 20.
- [45] Merten D, Heitland P, Broekaert J A C. *Spectrochim. Acta, Part B*, 1997, 52: 1905.
- [46] Wang Z, Ni Z M, Qiu D R, et al. *Spectrochim. Acta, Part B*, 2005, 60: 361.
- [47] Wang Z, Ni Z M, Qiu D R, et al. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2005, 20: 315.
- [48] Wang Z, Ni Z M, Qiu D R, et al. *Anal. Chim. Acta*, 2006, 577: 288.
- [49] Silva C S, Blanco T, Nóbrega J A. *Spectrochim. Acta, Part B*, 2002, 57: 29.
- [50] Marjanovic L, McCrindle R I, Botha B M, et al. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2000, 15: 983.
- [51] Matusiewicz H, Golik B. *Spectrochim. Acta, Part B*, 2004, 59: 749.
- [52] Isoyama H, Uchida T, Nagashima T, et al. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2004, 19: 1370.
- [53] Santos M C, Nobrega J A. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2007, 22: 93.
- [54] Marjanovic L, McCrindle R I, Botha B M, et al. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2004, 379: 104.
- [55] Lim H B, Kim T H, Eom S H, et al. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2002, 17: 109.

The Application of Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry/ Mass Spectrometry to the Analysis of Advanced Ceramic Materials

WANG Zheng¹, WANG Shi wei¹, QIU De ren², YANG Peng yuan^{2*}

1. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

2. Department of Chemistry, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract Advanced ceramics have been applied to various important fields such as information science, aeronautics and astronautics, and life sciences. However, the optics and electric properties of ceramics are significantly affected by the micro and trace impurities existing in the material even at very low concentration level. Thus, the accurate determination of impurities is important for materials preparation and performance. Methodology of the analysis of advanced ceramic materials using ICP-AES/MS was reviewed in the present paper for the past decade. Various techniques of sample introduction, especially advances in the authors' recent work, are described in detail. The developing trend is also presented. Sixty references are cited.

Keywords Advanced ceramic materials; ICP-AES/MS; Review

* Corresponding author

(Received Aug. 10, 2008; accepted Nov. 20, 2008)