

现代陶瓷和新技术革命

潘振甦

(中国科学院上海硅酸盐研究所)

众所周知,材料、能源和信息被誉为现代科学技术的三大支柱,现代陶瓷是材料科学的一个重要分支。它具有多种独特的物理、化学和生物性能,成为现代工业和科学技术许多重要领域(如电子计算机、信息、能源、生物工程、激光等)不可缺少的材料。随着世界新技术革命的到来,一场新陶瓷热正在国内外掀起,材料科学正步入陶瓷时代^[1,2]。在美国,有人认为现代陶瓷对美国经济和国防关系重大,甚至认为:“美国工业竞争的成败,取决于经济要素和陶瓷技术的继续领先”。在过去三年里,美国已有五十多家企业和大学拟定了联合研究陶瓷的计划,现代陶瓷已成为七个重点研究项目之一,是最热门的项目。事实上,从七十年代起,美、日、西德等经济发达国家均已将现代陶瓷列为国家科技规划中优先发展的重点项目^[3-6]。

本文就现代陶瓷两大方面——结构陶瓷和功能陶瓷的研究现状、应用和开发中的问题作扼要阐述,进一步阐明现代陶瓷和新技术革命之间的密切关系。

一、现代陶瓷的国内外研究现状

1. 高温结构陶瓷

高温结构陶瓷具有在高温下强度和硬度高、蠕变小、抗氧化、耐腐蚀、耐磨损、耐烧蚀等特性,是现代陶瓷的重要生长点之一。

高温结构陶瓷大致可分为两大类,一类是在大热流和 1500℃ 高温下作短时间(几秒到几十分钟)使用,另一类是在中等热流和 1200℃ 以上的高温下长时间(几百到数千小时)使用。前者用于如洲际导弹的端头,回收人造卫星前

缘火箭尾喷管喉衬和航天飞机外蒙皮等;后者主要用于能源工程,作为各种新型热机(燃气轮机、绝热柴油机和斯特林发动机)中的耐热部件,如燃烧室、涡轮叶、热交换器、活塞盖和汽缸套等。高温结构陶瓷的使用,可以提高燃气温度和减少冷却系统,大幅度提高热效率,降低燃料消耗,减少发动机体积和重量。如图 1 所示,高温燃气轮机的热效率和比功率随运行温度的升高而提高。曲线 4 是理想的无冷却的高温燃气轮机热效率曲线,它的比功率和热效率均高于其它条件下的比功率和热效率^[7]。

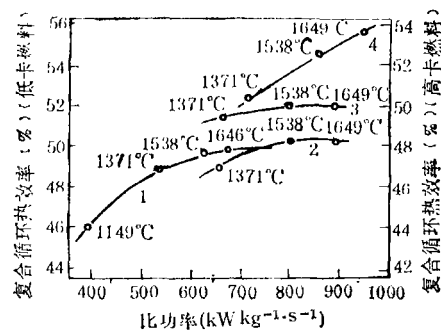


图 1 高温燃气轮机的热效率

1. 空冷; 2. 水冷; 3. 陶瓷定子和水冷转子; 4. 无冷却

此外,高温结构陶瓷主要是由硅、碳、氧、氮和铝等地壳中含量最多的几个元素组成,用它作为发动机耐热部件可以不用镍、钴、铬等战略金属,因而被认为是发动机的一场革命,其意义类似于用半导体替代电子管。为此,世界各经济发达国家都把高温结构陶瓷视为发展下一代工业和新技术革命的重要物质基础,美国能源部、国防部、航天和航空管理局,日本通产省、科学技术厅、西德科学技术部和有关大企业正投入大量人力物力进行研制^[3,8]。

目前,在材料性能和新型热机试验上已取得重大进展。美国通用汽车公司的陶瓷发动机已通过 2000 小时台架试验;日本京都陶瓷公司三年前已制造出世界上第一台陶瓷柴油发动机,它能够节能 30%。机器中的活塞、汽缸套和盖、推杆和摇臂等均用陶瓷替代;日产汽车公司出售的赛车,其涡轮增压器用氮化硅陶瓷制造,这使动态性能提高,重量减轻三分之一,驱动力只有原来的 56%,加速性能从 1.4s 提高到 1.1s;美国寇明斯公司打算将无冷却陶瓷柴油发动机安装在 4.5t 军用卡车上,原计划于 1986 年完成试验,1990 年商品化生产;1986 年三月,我国第一个陶瓷发动机部件——195 柴油机涡流室镶块已通过 1000h 全负荷台架试验,寿命是四倍于金属镶块。

在材料选择方面,国际上重点发展的高温结构陶瓷有氮化硅陶瓷、碳化硅陶瓷、增韧氧化

物陶瓷以及纤维补强陶瓷复合材料四类。表 1 列出了部分结构陶瓷的性能^[7-10]。

(1) 氮化硅陶瓷 (Si_3N_4): 是以 $[\text{SiN}_4]$ 四面体为结构单元的化合物,有 α 型和 β 型二种晶型。这种陶瓷在低于 1900°C 的高温下是稳定的,常压下没有熔点, 1900°C 开始分解、升华,在高温强度、硬度和耐腐蚀方面显示出优良的特性。它大致有反应烧结、热压、无压烧结、重烧结以及 SiAlON 等几种,其中热压 Si_3N_4 性能最佳,但只能制备形状简单的部件。目前重点发展的是重烧结、无压烧结和各种 SiAlON 等新工艺、新品种。主要解决的问题是高温强度 (1300°C 以上) 的退化和提高抗蠕变性能。

(2) 碳化硅陶瓷 (SiC): 几乎无天然矿物,大多数采用人工合成。它的基本物性与氮化硅陶瓷相仿,但在耐热性、耐腐蚀性和耐磨性方面有它的特点。由于碳化硅是典型的共价键

表 1 几种有希望用作热机部件的材料性能

材 料		氮化硅 (Si_3N_4)			SiAlON	碳化硅 (SiC)				氧化锆 (PSZ)	堇青石	
本征性质	晶 型	六 方 α $a = 7.753 \text{ \AA}$ $c = 5.618 \text{ \AA}$			六 方 β $a = 7.6 \text{ \AA}$ $c = 2.9 \text{ \AA}$	六方 α $a = 3.07 \text{ \AA}$ $c = 10.05 \text{ \AA}$	立方 β $a = 4.36 \text{ \AA}$	立方、 正方 斜方	$a = 9.72 \text{ \AA}$ $b = 17.06 \text{ \AA}$ $c = 9.34 \text{ \AA}$			
	密度 (g/cm^3) 熔点 ($^\circ\text{C}$)	3.168 $\alpha \rightarrow \beta$	3.192 >1900 $^\circ\text{C}$ 分解		3.2 1900 $^\circ\text{C}$	3.22 2800 $^\circ\text{C}$	3.21		5.4 2500 $^\circ\text{C}$		2.5 1465 $^\circ\text{C}$	
烧结方法		RBSN*	SSN**	HPSN**	S SiAlON	SSC**	HPSC**	RBSC**	SSC	PSZ**	MAS**	
性能												
气孔率 (%)		18—30	2	0	2	4	0	0	4	3	30—40	
密度 (g/cm^3)		2.2—2.6	3.15—3.2	3.26	3.14	3.1	3.2	3.10	3.1	5.2	1.5—1.7	
比热 ($\text{cal}/\text{g} \cdot ^\circ\text{C}$)		0.17	0.20			0.16		0.17	0.19		0.18	
热传导率 ($\text{cal}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$)		0.03	0.04	0.05		0.21 (RT)** 0.12 (1200 $^\circ\text{C}$)	0.15 (RT) 0.10 (1200 $^\circ\text{C}$)	0.25 (RT) 0.10 (1200 $^\circ\text{C}$)	0.22 (RT)			
热膨胀率 ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)		2.8	3.0	3.3	2.8	4.8	4.8	4.3	4.8		1.0	
维氏硬度 (kg/mm^2)		1000—2000	1600—1800	1800—2000	1400—1600	2200	2600	1900		1500		
弹性模量 ($10^4 \text{ kg}/\text{mm}^2$)		1.8	2.8	3.2	2.7	4.2	4.5	4				
泊松比			0.25	0.25		0.25			0.25			
抗弯强度 (kg/mm^2)		20—40 (RT) 20—30 (1200 $^\circ\text{C}$)	75(RT) 55 (1200 $^\circ\text{C}$)	133(RT) 100 (1200 $^\circ\text{C}$)		46(RT) 54 (1200 $^\circ\text{C}$)	70(RT) 60 (1200 $^\circ\text{C}$)	40—50 (RT) 50 (1200 $^\circ\text{C}$)	40—50 (RT)	30— 160 (RT)		
添加剂			MgAl_2O_3 , Y_2O_3	Y_2O_3 , Al_2O_3		B_2C , Al	B_2C , Al	Si	B_2C , Al			

* RBSN——反应烧结 Si_3N_4 , **SSN——无压烧结 Si_3N_4 , ***HPSN——热压烧结 Si_3N_4 , ****SSC——无压烧结 SiC ,
**HPSC——热压烧结 SiC , **RBSC——反应烧结 SiC , **PSZ——部分稳定氧化锆, **MAS——堇青石, **RT——室温。

结合的稳定化合物，很难采用常规烧结途径来制备，因此必须采用一些特殊工艺手段或依靠第二相加入，获得高性能致密烧结体。

渗入反应烧结碳化硅 (infiltrated reaction bonded SiC) 是一种最近发展的新工艺，与一般反应烧结工艺最主要区别是，直接用聚合物碳化获得气孔分布均匀的碳骨架，再在硅的熔融温度下进行渗硅烧结，获得超细均匀结构。主要特点是可加工成任意形状、反应温度低且无收缩而有竞争性。

(3) 增韧氧化物陶瓷：包括氧化锆增韧氧化铝、增韧氧化锆陶瓷等。后者通过相变增韧或微裂纹增韧的机制可使其断裂韧性 K_{Ic} 高达 15 左右，接近于铸铁(比氮化硅陶瓷 K_{Ic} 高 2—3 倍)，而热导系数只有氮化硅的 $\frac{1}{20}$ ，热膨胀系数又接近于铸铁，所以是很有前途的绝热柴油机材料之一(见图 2 和图 3)。

(4) 纤维补强陶瓷复合材料：包括碳-碳复合材料，硅-碳化硅复合材料等。这类材料特点是韧性高、抗热冲击能力强，是很有前途的热机材料。但是，由于能长期在空气中使用的纤维不多且价格昂贵，所以尚有许多研究工作待进行。

总之，高温结构陶瓷除了用作热机耐热部件外，还可广泛用作汽车、机械、石油化工等工业领域的机械密封、耐磨易损部件、轴套，特别是作为机械密封材料是很有前途的。碳化硅密封材料已经被国际上确认为继金属、氧化铝、硬

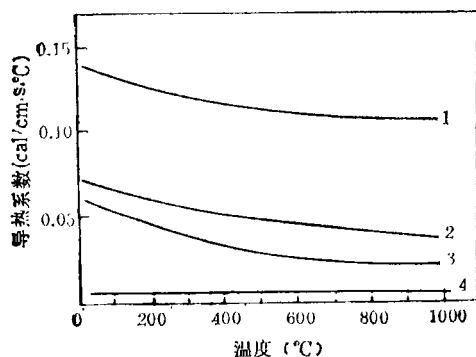


图2 几种陶瓷材料的导热系数

1. 碳化硅；2. 氮化硅；3. 氧化铝；4. 部分稳定氧化锆

物理

质合金密封材料以来的第四种基本材料。

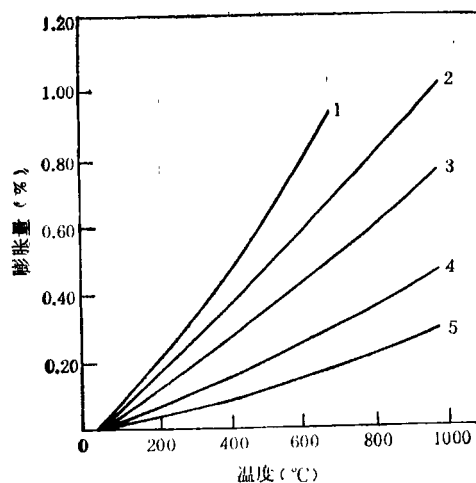


图3 几种陶瓷材料和铸铁的热膨胀

1. 铸铁；2. 部分稳定氧化锆 3. 氧化铝；
4. 碳化硅；5. 氮化硅

2. 功能陶瓷

功能陶瓷是微电子、信息、自动化等工业的基础材料，在现代陶瓷的产量和产值中占主要地位。功能陶瓷包括的范围甚广，有半导电陶瓷、铁电压电陶瓷、磁性陶瓷、快离子导体陶瓷、绝缘陶瓷、光学陶瓷等，它们具有将电、磁、声、光、热等物理量通过材料的物理、化学和生物效应进行相互耦合变换的特性，用途十分广泛。下面介绍三种材料。

(1) 基板用陶瓷材料^[11,12]

芯片材料是大规模和超大规模集成电路的关键材料之一。随着半导体器件的高密度化和大功率化，单位面积的发热量也愈来愈大，以高密度组装的大规模集成电路为例，在一块 1mm^2 的基板上，容纳 100 个晶体管，而每一个晶体管耗电 1mW ，则 10cm^2 的基板就耗电 1000W ，所以散热是一个大问题。近几年来研制成功的氮化铝 (AlN) 和新碳化硅 (SC-101) 基板材料，将成为集成电路基板的主体材料，有可能逐步取代 Al_2O_3 基板。

作为基板材料，要求它的基本特性是：机械强度高；高绝缘性；易于金属导体复合；化学稳定性好；热导高。表 2 是新研制的 AlN, SiC (SC-101) 与 Al_2O_3 , BeO 及金属铝等性能对

表2 新研制的基片材料与其它材料性能比较

特性	材料	SiC (SC-101)	AlN	Al ₂ O ₃ (99%)	BeO (99.5%)	单晶硅	金属铝
热传导率 (W/m·K)		270	100—160	25	260	125	239
热膨胀系数 (10 ⁻⁶ /°C) (20—400°C)		3.7	4.3—4.5	7.0	7.5	3.5—4.0	26.5
电阻率(Q·cm) (室温)		>10 ¹³	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	10 ⁻³ —10 ³	2.7×10 ⁻⁴
介电常数 (1MHz) (10GHz)		42 15 (1GHz)	8.8 8.0	9.7 9.1	6.7 6.6	12 —	— —
介电损耗 (1MHz) (10GHz)		0.05 —	0.0005 0.002	0.0002 0.0002	0.0001 0.0003	— —	— —
抗弯强度 (kg/mm ²)		45	~50	31	25	—	—
维氏硬度 (kg/mm ²)		2000—3000	~1200	2300—2700	1200	—	—

比。从中可以看出，SC-101 SiC 基板的热导率高达 270 W/m°C，优于金属铝，膨胀系数可与单晶硅匹配，并且强度高于 Al₂O₃，是一种较为理想的新材料；AlN 的热膨胀系数与单晶砖十分接近，热导虽不及 SC-101 SiC，但高于 Al₂O₃，在 10 GHz 条件下的介电常数为 8，仅为 SiC 的一半，这对集成电路结构是十分有利的。

(2) 敏感材料^[13-15]

传感器被誉为信息社会的耳目，敏感材料则是传感器发展的物质基础。从感知外界信息的原理，大体可将传感器分为物理的、化学的和生物学的三大类。陶瓷传感材料，在耐热性和化学稳定性等方面优于金属和高分子材料。用半导体陶瓷制成陶瓷传感器，按其使用特性大致可分为三类。

(i) 利用多晶体本身特性的有：

a. 负温度系数热敏电阻 (NTC)，是过渡金属氧化物，主要用于温度检测和补偿等。

b. 高温热敏电阻。它用于温度控制、检测等方面。

c. 氧传感器 (氧离子导体)，即 ZrO₂。它用于钢水定氧，烟气分析、汽车尾气控制等。

(ii) 利用晶界特性的有：

a. 正温度系数热敏电阻 (PTC)。掺入 La 等稀土元素的 BaTiO₃，用于温度检测、过热保

护、彩电消磁、马达启动以及自控发热等。

b. 半导体晶界层电容器 (IBLC)。用作大容量小体积电容器。

c. ZnO 变阻器，以 ZnO 为主要成分，掺入少量 Bi₂O₃、CoO、MoO₃、Sb₂O₃ 等，主要用作避雷器和浪涌吸收器等。

(iii) 利用表面特性的有：

a. 半导体电容器，如 BaTiO₃ 系变档层电容器。用作大容量小体积电容器。

b. 各种气体传感器即 n 型半导体如 Fe₂O 和 SnO₂ 等。用于控制各种气体。

c. 湿度传感器，如 MgCr₂O₄-TiO₂ 系，ZrO₂-MgO 系，ZnO-Li₂O-V₂O₅-Cr₂O₃ 系等，用于湿度控制场合。

d. 半导体陶瓷，ZrO₂-Y₂O₃，ZrO₂-CaO，CoO-Al₂O₃-CaSiO₃ 等。作催化剂用。

(3) 压电陶瓷材料

常见的钙钛矿型压电陶瓷有二元系统 (PbTiO₃-PbZrO₃) 和三元系统 [PbTiO₃-PbZrO₃-Pb(Co_{1/3}W_{1/3})O₃] 等几种。压电陶瓷主要应用于超声波陶瓷滤波器以及高压发生装置等。最近研究的动向是介电系数小 (150—200)，居里温度高 (约 500°C)；K_t ≫ K_p 的高频领域中应用的材料。

3. 应用前景和有待解决的问题

目前, 结构陶瓷的应用主要仍然在切削工具、机械密封、滚动轴承等耐磨方面, 但今后将在各种热机的耐热部件和热交换器等方面得到广泛应用。提高热效率和降低能耗, 将为结构陶瓷提供十分诱人的应用前景。预期氮化硅和增韧氧化锆将主要应用于温度不太高的绝热柴油机, 碳化硅则主要用于耐温度超过 1100℃ 而且高温下强度要求高的高温燃汽轮机。作为热机用的耐热、耐磨部件将随着应用的逐步扩大而逐步取代, 估计到 1995 年结构陶瓷将形成产值为 200 亿美元的新兴产业, 比 1980 年的产值 40 亿美元增加近四倍。

其次, 随着信息、人工智能化、自动化控制和生物工程的飞速发展, 对各种功能陶瓷的要求将愈来愈高、数量愈来愈多。尤其是传感器将有很大的发展, 预计到 1990 年, 美国传感器市场将达 15 亿美元。多功能复合传感器将显示强大的生命力, 化学功能和生物功能的陶瓷将有很大的发展。据日本市场预测, 到 1990 年生物陶瓷将成为年产值为 40 亿美元的新兴产业。

二、现代陶瓷与新技术革命

当前, 世界新技术革命正进入一个新发展阶段, 美国、西欧和东欧相继提出“星球大战计划”、“尤里卡计划”和“东方尤里卡计划”, 尽管这三个计划提出的目的虽然不一样, 但是都把高技术作为核心, 均包括新型材料。高技术发展水平已成为衡量一个国家实力的标志。作为高技术之一的现代陶瓷与新技术革命的关系是密切的。

1. 现代陶瓷已成为支撑信息和通讯高密度化的基础材料之一。功能应用的现代陶瓷具有将电、磁、声、光、热等物理量进行变换的特性, 由陶瓷敏感材料制成的多种功能的传感器, 将成为信息、通信、情报、自动化控制中不可缺少的元件。

2. 现代陶瓷已成为解决能源问题的重要基础材料。能源和粮食将是下一世纪人类要解决的二个最根本的问题。解决能源问题的三个方向是开发新能源, 节省能源和能量储存。可用

表 3 能源开发与陶瓷材料

能源形态	用途	材料例	能源形态	用途	材料例
原子能	核燃料	ThO ₂ , UO ₂	热电子	热电子发射	LaB ₆
	减速材料	C, BeO	煤	液化、气化	催化剂、耐热耐磨材料如 SiC
	控制材料	B ₄ C, Gd ₂ O ₃ , DY ₂ O ₃ , EuB ₆ , Sm ₂ O ₃	热	高温燃气涡轮绝热柴油机	SiC, Si ₃ N ₄ , Si ₃ N ₄ , ZrO ₂ , SnO ₂ , TiO ₂
核聚变	屏蔽材料	重质混凝土	氢	储存	MgH ₂ , TiH ₂
	第一壁材料	SiC, Al ₂ O ₃	电	超导	Nb ₃ Sn, Nb ₃ Ge, Nb ₃ Si
磁流体发电 (MHD)	氘增殖材料	Li ₂ O, LiAlO ₂	化学	固体电解质	ZrO ₂ , β-Al ₂ O ₃ 或 β''-Al ₂ O ₃ , RbAg ₄ I ₃ , 以及其它离子半导体
	氦断路材料	SiC, Si ₃ N ₄ , Y ₃ Al ₅ O ₁₂			电极
地热	电极材料	ZrO ₂ , SiC, LaCrO ₃			
太阳能	绝缘材料	MgO, Al ₂ O ₃ , BeO 等			
	地热井用水泥	2CaO·SiO ₂			
	太阳电池	非晶态硅, CdS-Cd ₂ S			
	光化学电池	TiO ₂ 多孔半导体			
	红外线穿透	CaF ₂			
	红外线反射	SnO ₂ , TiO ₂			

于这方面的陶瓷材料列于表 3。开发新能源, 关键在于材料大型化、持久性的提高、复杂形状

的成型以及部件可靠性的提高; 节省能源, 关键在于提高各类热机效率和绝热性, 研制各种耐

热陶瓷纤维；储存能量则是寄希望于氢吸附的研究和高效二次电池用的陶瓷的研制。

3. 从现代陶瓷本身发展去理解它与新技术革命的关系。现代陶瓷的原料是经过精选，其化学组成经过精确调整，并且成形和烧结过程是精心处理的。追溯其发展历史还只有二十多年，六十年代开始，世界范围工业技术突飞猛进，各种新技术、新工艺层出不穷。陶瓷领域中，也出现了一大批具有特殊功能的新材料，发展成为现代陶瓷，成为最有吸引力和挑战性的新技术之一，是知识密集和技术密集的学科。

参 考 文 献

- [1] J. Bell, *New Scientist*, 101-1394 (1984), 10.
- [2] 铃木, 明訳, *工業材料*, 32-13(1984), 101.
- [3] John B. Wachtman, *Ceramic Industry*, 121-6 (1983),

- 11.
- [4] H. R. Freiburg, *Power Metallurgy International*, 18-2 (1986), 84.
- [5] R. B. Schulz, *Ceramics for High-Performance Application III Reliability*, Plenum Press, New York, (1983), 21.
- [6] Wolfgang Burk et al., *ibid*, 29.
- [7] 江东亮, 潘振铨等, *硅酸盐学报*, 9-2(1981), 133.
- [8] D. R. Johnson, A. C. Schaffhauser, *Amer. Ceram. Soc. Bulletin*, 64-2 (1985), 276.
- [9] 浜野健也, *フラインセラミックスハンドブック*, 東京朝倉書店, (1984), 550-555; 606-607.
- [10] 宗宮重行, *アドバンストセラミックス*, 東京講談社, (1984), 167-169.
- [11] 安斎和雄, *エレクトロ・セラミクス*, 16-3(1985), 22.
- [12] 中村浩介, *エレクトロ・セラミクス*, 16-3(1985), 46.
- [13] 川端 昭, *工業材料*, 32-11(1984), 23.
- [14] 一, 瀨昇 *工業材料*, 33-9 (1985), 8.
- [15] N. Amiji et al., *Advanced Ceramic Materials*, 1-3 (1986), 232.

(上接第274页)

用于鉴别珍贵古陶器和稀世名画。博物馆和收藏家测量珍贵文物的穆斯堡尔谱，作为文物自身的“指印”，用于文物分类、秘密标记和识别赝品等，具有准确、可靠和保密性强的特点。

由于穆斯堡尔效应能量分辨本领高，方法简便，设备又不太复杂，并且能直接观察文物样品内部原子核周围状态变化等优点，在考古学研究中已发挥了作用。但是，总的看来，研究工作还是处于实验探索阶段。影响一件文物穆斯堡尔谱的因素是十分复杂的，如古陶器的穆斯堡尔参量不仅依赖于原料成分和烧制条件，还与精确的烧制时间以及烧成后埋藏的条件有关。本文所介绍的有关提取考古学信息的方法，也不一定是最佳方案。无论从现有实验成果分析整理，还是机理探讨和新实验方案寻求方面，都尚需作出进一步研究工作。

本项目得到国家自然科学基金资助。

参 考 文 献

- [1] D. R. Cousins and K. G. Dharmawardena, *Nature*, 223 (1969), 733.
- [2] Gonser, U. (ED.), *Mössbauer Spectroscopy (II): The Exotic Side of the Method*, Springer-Verlag, Berlin,

- (1981).
- [3] 金国樵、潘贤家、孙仲田, *核技术*, No. 1(1984), 71.
- [4] J. M. D. Coey, *At. Energy Rev.*, 18(1980), 73.
- [5] N. H. Gangas, et al., *Clays and Clay Minerals*, 21 (1973), 393.
- [6] R. Chevalier, et al., *J. Physique Colloq.*, 37(1976), C6-861.
- [7] C. Janot and P. Delcroix, *J. Physique Colloq.*, 35 (1974), C6-557.
- [8] T. Bakas, et al., *Archaeometry*, 22(1980), 69.
- [9] J. G. Stevens, Wenjun Zhu, *Hyperfine Interactions*, 29 (1986), 1145.
- [10] Y. Maniatis, et al., *J. Am. Soc.* 64 (1981), 263.
- [11] 夏元复、叶地瀛、张健编著, *穆斯堡尔效应及其应用*, 原子能出版社, (1984), 333.
- [12] J. R. Gancedo, et al., *Archaeometry*, 27 (1985), 75.
- [13] 潘贤家、孙仲田、金国樵, *核技术*, No. 5(1983), 49.
- [14] N. A. Eissa, et al., in: *Proc. of Intern. Conf. on Mössbauer Spectroscopy, Part 3, Cracow, Poland*, (1975), 752.
- [15] N. A. Eissa, et al., *J. Physique Colloq.*, 37 (1976), C6-873.
- [16] T. Tominaga, M. Takeda, H. Mabuchi, Y. Emoto, *Radiochem. Radional. Lett.*, 28-3 (1977), 221-230; 29-4 (1977), 191.
- [17] 章佩群、计桂泉、李虎候, *核技术*, No. 2(1986), 7.
- [18] J. Danon, et al., *J. Physique Colloq.*, 37 (1976), C6-866.
- [19] N. H. J. Gangas, et al., *J. Physique Colloq.*, 37 (1976), C6-867.
- [20] N. A. Eissa, et al., *J. Physique Colloq.*, 40 (1979), C2-462.