

TAOCI YU
JINSHU DE LIANJIE

陶瓷与金属的连接

顾钰熹 邹耀弟 白闻多 编著



化学工业出版社

TAOCI YU

JINSHU DE LIANJIE

陶瓷与金属的连接

顾钰熹 邹耀弟 白闻多 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

陶瓷与金属的连接/顾钰熹, 邹耀弟, 白闻多编著.
北京: 化学工业出版社, 2009.8
ISBN 978-7-122-05603-0

I. 陶… II. ①顾…②邹…③白… III. 陶瓷-金属-
连接技术 IV. TQ174 TG

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 074290 号

责任编辑: 顾南君
责任校对: 李 林

文字编辑: 晁景岩
装帧设计: 周 遥

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 化学工业出版社印刷厂
850mm×1168mm 1/32 印张 13 $\frac{1}{4}$ 字数 399 千字
2010 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本书是编者为适应现代高新技术发展的需要，结合目前国内外已发表的陶瓷、石墨、玻璃等与金属的连接科技成果以及生产中的技术资料编写的。

这种专业性较强的科技书籍内容虽然不够全面，但对需要者来说却是很宝贵的，值得一读。

本书主要对陶瓷、石墨、玻璃等非金属材料作了简单介绍，并对与金属连接时所涉及的母材接合性给了必要的说明；重点介绍了陶瓷、石墨、玻璃与金属连接时的性能以及所采取的各项技术措施；与此同时，还介绍了陶瓷、石墨、玻璃与金属件的连接工艺实例。

编者在编写过程中尽管付出很大努力，但由于水平和时间所限，仍觉得书中尚缺专业的理论基础、连接接头性能的检测等有关内容，距离读者的需求还相差甚远，粗浅疏漏之处在所难免，诚望读者不吝指正。

编著者

2009年6月于沈阳工业大学

目 录

绪论	1
第一章 陶瓷	7
一、陶瓷的种类	7
二、氧化物陶瓷	12
三、非氧化物陶瓷	24
四、几种特殊性能陶瓷	29
第二章 玻璃	33
一、玻璃的分类	33
二、玻璃的结构	44
三、玻璃的性能	46
四、几种特殊玻璃	53
五、与玻璃连接的金属及合金	65
第三章 石墨	93
一、石墨的结构及应用	93
二、石墨的性能	93
第四章 陶瓷与金属的连接方法	98
一、陶瓷与金属的连接方法分类	98
二、金属粉末烧结法	99
三、其他金属粉末烧结法	130
四、金属粉末金属化层常见的缺陷	157
五、影响金属化层质量的基本因素	163
六、活性金属法	178
七、氧化物钎料钎焊法	206
八、气相沉积法	213
九、固相连接法	232
十、熔化焊连接法	244
第五章 陶瓷与金属的连接	253
一、 Al_2O_3 陶瓷与金属的连接	253

二、 ZrO_2 陶瓷与金属的连接	287
三、 SiC 陶瓷与金属的连接	297
四、 Si_3N_4 陶瓷与金属的连接	307
五、特殊性能陶瓷与金属的连接	338
第六章 玻璃与金属的连接	352
一、玻璃与金属的连接方法	352
二、玻璃与金属连接的接头形式	354
三、玻璃与金属连接的几种技术	357
四、玻璃与金属的连接工艺	364
第七章 石墨与金属的连接	392
一、石墨与石墨的钎焊	392
二、石墨与金属的钎焊	396
三、石墨与金属的扩散焊	400
附录	408
参考文献	412

绪 论

随着近代科学技术不断飞跃发展，在电子工业、核能工业、航空航天和现代通信等高新领域中，对新型工程材料的要求也越来越高。目前虽然也有新研制出来的成果，以适应新工程材料的需要，但还远远满足不了各方面新的要求。

所谓新型工程材料，是适应现代科技产品结构所需的特殊性能工程材料。它既是当代高新科技的一部分，也是高新科学研究的基础。

在新型工程材料中，金属材料虽然仍占据着主导地位，它的应用范围之大、应用数量之多是不言而喻的。但有一点应当指出的是，在一些特种工程条件下，所需的某种特异功能材料，只靠金属合金化的新型合金材料还是远远满足不了这种结构特殊性能的需求。现仅从航空航天技术和核能电子工业所需的耐高温合金来说，已从 20 世纪 40 年代的使用温度 800°C 左右提高到 70 年代末期和 80 年代的 1100°C 以上。虽然今后还会研制出耐更高温的新材料，但是我们不能不看到，金属及其合金的熔点和耐高温的极限再大幅度提高是有一定难度的。因此，人们一方面在原有的基础上加快步伐，采用高新技术继续研制新型工程合金材料；另一方面，也必须加大力度开发出具有更高性能的非金属材料，以适应当前高新科技发展的需要。

众所周知，现代所研制出来的工程陶瓷材料（也称结构陶瓷）是适应当代高新科技发展和应用的新型工程材料。目前它已成为继金属、塑料之后第三位的工程材料。这种材料具有其他材料所不具有的优异电气绝缘性，它的耐高温性能要比某些合金材料的使用温度高很多。这可以从图 0-1 所示的耐高温材料发展趋势看出。

工程陶瓷不仅具有高熔点、耐高温、耐腐蚀、耐磨损等特殊性能，而且还具有抗辐射、耐高频高压绝缘等电气性能。

功能陶瓷材料还具备声、光、热、电、磁和生物、医疗、环

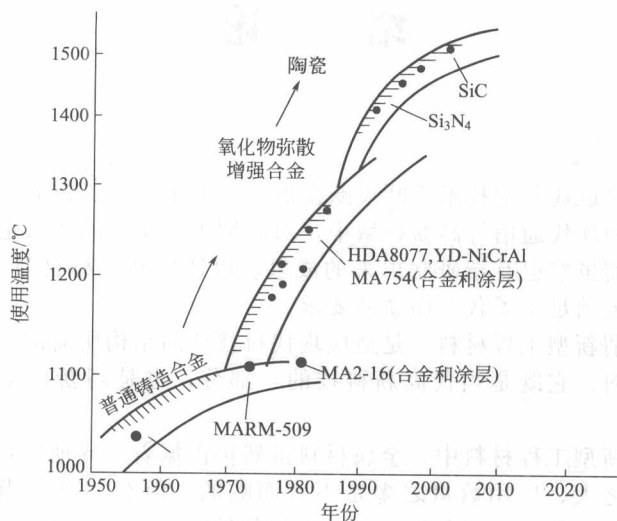


图 0-1 涡轮机叶片材料发展趋势

保等方面的特殊性能。这就使得这些功能陶瓷在电子、微电子、光电子信息和现代通信、自动控制等领域中获得了广泛的应用，并起到关键性的作用，也是当今科研、生产前沿的工程材料之一。

近些年来，由于高新科技的推进，尤其是纳米新技术的问世，陶瓷材料在种类和功能上都得到了进一步完善，在工业生产中的应用范围更加广泛。

目前，我国在工业生产中已有相当规模的陶瓷制造业。除一般民用和工业用常规产品外，更主要的是生产出许多种工程结构陶瓷，如电子陶瓷、光电子陶瓷、微波陶瓷、电介质陶瓷、磁性陶瓷、半导体陶瓷、导电陶瓷、超导陶瓷、生物陶瓷、医疗与环保陶瓷及冶金、机械、工具等方面的陶瓷材料。目前，在电子、核能、信息等现代工业中已获得广泛应用的有高频绝缘器件、支柱、基板、各种管、外壳、电阻、电容、铁电及压电陶瓷等；半导体陶瓷件主要是各种敏感件和传感器等，应用较多的是 BaTiO_2 、 SrTiO_2 、 MgTiO_2 、 SiC 、 MgCr_2O_4 等陶瓷材料。据不完全统计，在我国生产的各种电子产品是逐

年增加的，今后还会有更大的发展前景。另外，不难看出，不管是哪一种电子产品，其中绝大部分都是由陶瓷与金属连接而组成的结构件。

显然，在各类电子产品中，陶瓷与陶瓷、陶瓷与金属的连接技术将占据着极其重要的地位。我们知道，陶瓷与金属的有效连接，才能使电子器件更有效地、充分地发挥出各自的特殊性能，从而发挥出电子产品的综合性能，提高电子产品的质量，进一步推动电子工业的发展。

陶瓷与金属的连接技术是复杂的，是一种多学科综合性的技术，它的有效连接涉及现代物理、化学、力学、材料学、真空技术、表面工程技术、焊接冶金、机械结构以及各种测试仪器等实验技术。目前，发达国家都将陶瓷与金属连接技术列为科研的前沿课题。我国已将新型陶瓷与金属的连接项目列入“863”高新技术及国家“八五”、“九五”等科技攻关课题并已取得新的成果。近年来，纳米技术的问世，更使得新型陶瓷材料的发展进入了一个新的领域，促使陶瓷与金属连接技术的应用取得了更大的进展。陶瓷与金属连接的技术研究和实验技术水平已进入了当今高新技术时代并已成为科研和高等院校试验研究的热门课题。

生产实践表明，只要陶瓷与金属形成有效的连接并制造成这种复合结构的电子产品，就会充分显示出它的优越性。美国早期曾用

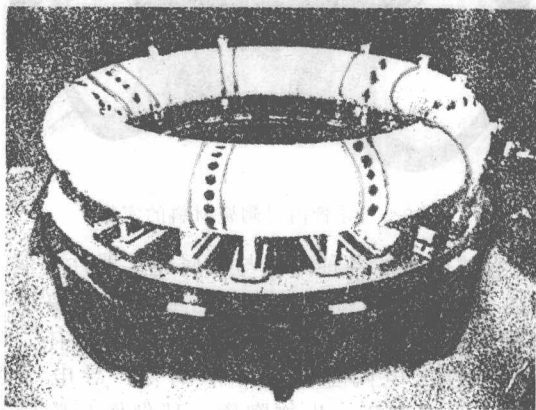


图 0-2 核工业熔炉陶瓷复合材料 (ZT-40t)

高含量的氧化铝陶瓷与金属形成了有效的连接，建造了无人控制的深海潜水器，在 6069m 深海中取得了良好效果，比用 Ti-6Al-4V 合金提高有效载荷约 166%；英国“挑战者”坦克采用乔巴姆 (Chobham) 陶瓷材料制成了装甲，其效果也比用合金钢好很多；美国在 MIAI 型坦克制造中采用 Al_2O_3 复合陶瓷材料制作装甲，不仅减轻了重量，而且提高了强度，增大了吸能率和耐磨性，比用其他合金材料综合性能提高了 2.5~3.5 倍，明显地提高了同厚度其他材料的军事防卫能力。

参考文献 [12] 中列出了各种陶瓷与金属连接的实际产品，如图 0-2 是核工业中熔炉的实物照片。它的外形结构是环形曲面，其主要部件系采用 Al_2O_3 及 MgO 陶瓷材料与耐热耐蚀合金钢的连接技术形成复合结构。其中有 52 个窗孔、22 个真空测窗，炉体是由 Al_2O_3 陶瓷材料与耐热钢连接件制成的，还有 122 个部位是真空紧固件及管路，全长约 66m。图 0-3 为导管内衬陶瓷材料，采用陶瓷与金属的连接结构件；图 0-4 为涡轮机叶片，采用 Si_3N_4 陶瓷与耐热钢的连接；图 0-5 为输送矿物的内衬陶瓷管道实例。

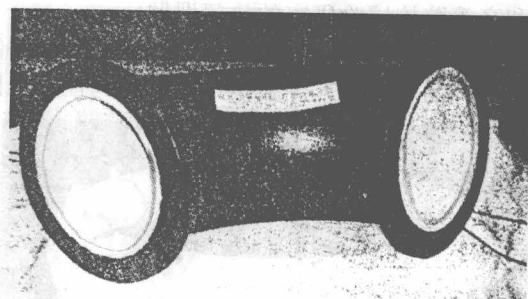


图 0-3 导管内衬陶瓷材料的实物

表 0-1 为有关国家的各种陶瓷与金属连接器件实例。

综上所述，工业陶瓷材料在我国已形成有规模独立系统的生产体系并高质量地生产出高频绝缘陶瓷、电阻基体、电真空、电容器等陶瓷；还有压电陶瓷、半导体陶瓷、导电（含超导）陶瓷、磁性陶瓷、光电陶瓷、生物陶瓷、环保医疗陶瓷和各种复合材料等。

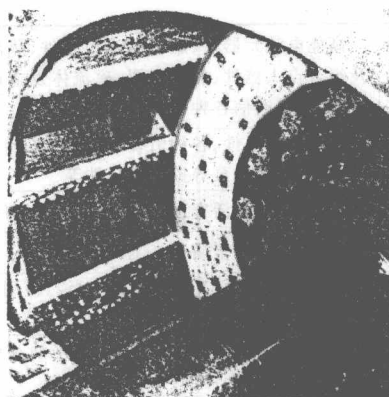


图 0-4 采用陶瓷材料的涡轮机叶片实例

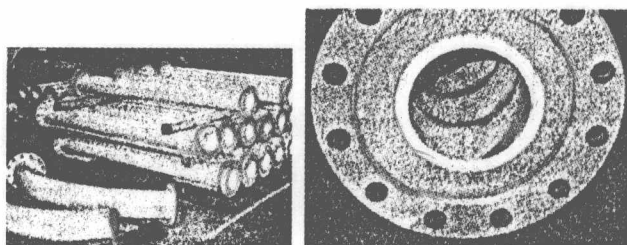


图 0-5 输送矿物管道内衬陶瓷材料的实例

表 0-1 各种陶瓷与金属连接应用的实例

各种电子器件与组合件	微波半导体元件、管壳件、收集极部件、输能窗、绝缘导热器件、芯柱器件、阴极组件、支撑件、集成电路(IC)、混合电路基件、整流器外壳、真空(IC)、多层布线、地面基体的连接件等 闸流管及电晕放电稳压管件,二、三极管壳封装,铯、铷等原子钟外壳,真空电容器外壳,各种引线等
光学及电光源方面各种器件	碱金属蒸气灯、闪光灯、弧光灯、激光谐振腔、激光窗、放电管壳及电极、观察孔、水平指示仪、紫外线传感器管壳、陶瓷-金属电子束管及光电倍增管、高压钠灯、激光输出腔及观察窗等
高能物理及核工业各种器件	观察探测窗、反应堆元件、绝缘引线及插头组合件、压力和电流转换接口组合件、核电站用特殊电缆绝缘器组合件、防辐射元器件、加速器组合件、燃料电池组合件、核电池组合器件等

续表

宇航交通及通信	高能电池元器件、燃料电池组合件、热离子交换器组件、引线及组合点火器件、热能器罩、磁流体发电设备部件、电子控制组合件、现代通信各种组合件等
真空设备	绝缘密封组件、各种引线、观察窗、回转质谱仪组合件、四极质谱仪管件、放电泵等控制组合件等
发动机设备	火花塞、陶瓷活塞顶、涡轮机增压器组件、涡轮机叶片组件等
加工工具	玻璃刀、各种金属加工工具等
医疗器械	心脏刺激元件、X射线管壳、引线、检测窗孔组件、X射线增强器组合件
冶金及化学工业	反应控制组件、冶炼控制组件、采油及炼油控制器组合件、化学反应控制组合件等



第一章 陶 瓷

一、陶瓷的种类

陶瓷是我国最古老的发明，陶瓷产品早已名扬于海外。就陶瓷与金属连接工艺技术，最早可追溯到 15 世纪中叶，我国明代已成功地制成了景泰蓝产品。直到 19 世纪 80 年代，西方国家才出现陶瓷金属化技术，到 20 世纪 30 年代才见到陶瓷与金属的连接报道。但这些陶瓷都是由天然矿物（如黏土、长石、石英等）为原料，经整形和高温烧结而成的，主要是硅酸盐陶瓷，多用于日用、建筑和一般电瓷等。

自 20 世纪以来，由于电子技术、化工技术、冶金工业、机械工业、航天工业、原子能和核工业等迅速发展，尤其是在电子技术及核工业高速发展的情况下，采用天然不纯矿物原料制出的粗糙硅酸盐陶瓷已远远满足不了现代工业生产的需要，而是极其迫切需要具有多种功能的工程陶瓷材料。因此，不难看出，具有相应的多种性能的工程陶瓷必须采用高纯度成分和能控制成分纯度的人工化学材料为原料。所以现代的工程陶瓷多是以无机固体粉末材料均匀混合并加入一些黏结剂塑造成型，再经高温烧结，具有一定机械强度和耐热、耐蚀以及电气性能的制品。

对于工程陶瓷来说，其种类较多，应用也很广泛。迄今为止，在电子工业中所采用的工程陶瓷的分类尚没有统一标准。其分类各不相同，也不够系统，现仅就目前的应用资料作如下的分类。

1. 按陶瓷的组成物分类

就工程陶瓷来说，按其组成物来分主要有氧化物陶瓷和非氧化物陶瓷两大类。氧化物陶瓷是以 Al_2O_3 和 BeO 为代表性的单相组分陶瓷，还包括以天然矿物为原料的多相组分陶瓷（如块滑石、镁橄榄石

等陶瓷)。这种氧化物陶瓷种类较多,应用范围也较广。它的性能优良,是当前电真空器件生产中不可缺少的重要陶瓷材料。

非氧化物陶瓷主要是氮化物、硅化物和碳化物等陶瓷。如 AlN 、 BeN 、 BN 、 TiN 、 Si_3N_4 、 SiC 、 ZrC 、 TiC 等。这种陶瓷的主要特点是熔点高、高温强度大,而且还具有硬度高、耐磨性好、化学性稳定等特点。

2. 按陶瓷的结晶组织分类

如按陶瓷结晶构造来分类,有单晶相、多晶相和非晶相等陶瓷。但在生产中单晶相陶瓷较少,而多晶相陶瓷最为普遍。单晶相陶瓷有蓝宝石、钇铝石榴石、水晶石等。多晶相陶瓷主要有 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 Si_3N_4 、 BN 、 SiC 、结晶化玻璃等。非结晶相陶瓷主要有各种成分的玻璃材料。

3. 按陶瓷的形状分类

从目前工业应用情况来看,主要有粉状、纤维状和块状(即成型体)以及现代化产品所需的薄膜等。粉状(或颗粒)和晶须状陶瓷主要有 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 BeO 、 MgO 、 Si_3N_4 和 SiC 等。

目前人们将陶瓷制成粉状(或颗粒),加入适当含量某金属或合金形成复合材料,以达到增加强度、增加韧性的目的。最常见的是用 30% Al_2O_3 陶瓷颗粒,当加入 6061 Al 而成为铝基复合材料时,显著地增加了强度;有的加入一定量的 TiC 颗粒于镍合金中,成为镍基复合陶瓷材料,其强度得到了提高。

其次是将陶瓷制成纤维状和玻璃丝状,采用与上述同样的方法获得合格的复合材料。可以采用 20% SiC 晶须加入 6061 Al 成为增强的铝基复合材料。再就是可将不同的原料按其工艺制成各种产品所需要的体型陶瓷,如板块、薄片、柱形体(实心 and 空心)等。

4. 按陶瓷的用途分类

如前所述,目前关于陶瓷的种类繁多,应用范围日益扩大。由于科学技术的快速发展,陶瓷不仅在生活用品、工艺品等方面有所

进展，而且在工业上的应用也是与时俱进地扩大，已从原来矿物质为原料制成的生活用品，进展到以化工产品，成分很纯的各种氧化物、氮化物、碳化物、硼化物和硅化物为原料制成精细的工业用陶瓷。它广泛地应用在化工、冶金、电子、机械、航天航空、原子能等现代技术领域。所以，从陶瓷的应用来分类时，对陶瓷的使用和选择是非常有利的。根据有关资料归纳，有如下各种不同用途的陶瓷。

(1) 高频绝缘陶瓷 这种陶瓷作高频绝缘支柱、绝缘板、绝缘管件以及各种绝缘紧固件。应用最多的是各种 Al_2O_3 陶瓷、低碱莫来石陶瓷、滑石陶瓷以及刚玉-莫来石陶瓷等。

(2) 电阻基体陶瓷 用这类陶瓷作电阻器的基体件。应用最多的仍是刚玉-莫来石陶瓷、低碱莫来石陶瓷和各种 Al_2O_3 陶瓷等。

(3) 电真空陶瓷 根据电真空器件的需要，应用最多的是镁橄榄石陶瓷、刚玉陶瓷、氧化铍陶瓷和 AlN 陶瓷等。这些陶瓷主要用于真空电子器件中的绝缘件、抗高温件、支承件、密封件、集成电路管壳和基片等。

(4) 电容器陶瓷 由于电容器种类繁多，其性能和容量也呈多样化，所应用的陶瓷种类及性能也各有其选择性。例如高频电路中的电容器，应用最多的陶瓷有四钛钡、镁橄榄石、镁钽钛、钙钛硅等陶瓷材料。对于高频电路又有温度补偿作用的电容器陶瓷，可采用金红石、钛酸钙、钛酸铋、锡酸盐和锆盐等陶瓷。对于高频高功率电路、高压高脉冲电路中的电容器，陶瓷材料可有许多种。这也是目前电容器中产量最大、品种最多的一类陶瓷。

(5) 铁电陶瓷 这是一种含铁极少并具有“电畴”特性的功能性陶瓷。它还具有较高的介电常数，随温度、电场变化的非碱性特性，对光的各向异性、双折射性，电致应变以及相变所引起的各种特性改变和偶合等特性。利用这种陶瓷材料可制成各种敏感器件和光学器件。应用较多的有钛酸钡、钛酸铅、二元系的钛锆酸铅和三元系的钛锆锡酸铅 (PSZT) 等陶瓷材料。

(6) 半导体陶瓷 顾名思义就是导电性介于金属导体与绝缘材料之间的一种功能性陶瓷。应用最多的是用 BaTiO_3 、 MgTiO_3 、 SiC 、 MgCr_2O_3 、 SrTiO_3 等不同组分制成所需的半导体陶瓷及其复合材料。由于这种陶瓷材料的电导率一般都由外界条件所控制，而

且很灵敏，所以多用于敏感器件和在不同敏感条件下的传感器等，如热、电、光、声、气和湿等敏感件。

(7) 导电陶瓷 在常温条件下有许多陶瓷材料是不导电的。但也有一些陶瓷材料是导电的，如 SiC 、石墨、 BaPbO_3 、 NbC 、 MoC 、 LaSrCrO_3 等陶瓷，因而可用作高温发热体、微波吸收材料和大功率电阻器等。

(8) 生物及医用陶瓷 这类陶瓷材料与人体和生物组织具有良好的相容性，所以，随着科技的发展，在人造骨骼和牙齿等方面的应用也逐渐扩大，人造骨与金属及骨骼的连接实例也日益增多。从材料的应用和发展来看，也很有发展前景。

(9) 超导陶瓷 所谓超导陶瓷，就是这种陶瓷材料具有超导电现象或超导态特性。这种超导陶瓷材料的组成成分较多，种类范围也较宽，到目前为止，还没有系统完整的标准，很难做到详细地分类。但这种超导陶瓷发展很快，世界各发达国家都用大量的人力、物力研制和应用，已成为现代新科技的前沿课题。参考文献 [95] 已列出超导陶瓷（如按氧化物、氮化物、碳化物、硫化物等）的种类，如表 1-1 所示。

表 1-1 超导陶瓷的种类

种 类		超 导 陶 瓷
氮化物		$\text{NbN}(T_c=17.3\text{K})$
碳化物		$\text{NbC}(11.5\text{K})$, $\text{MoC}(14.3\text{K})$, $\text{K}_3\text{C}_{60}(18\sim19.3\text{K})$, $\text{Rb}_3\text{C}_{60}(28\sim30\text{K})$, $\text{Cs}_3\text{C}_{60}(30\text{K})$, $\text{KRB}_2\text{C}_{60}(24.4\sim26.4\text{K})$, $\text{I}_x\text{C}_{60}(57\text{K})$
硼化物		$\text{ReRh}_4\text{B}_4(11.8\text{K})$ (TiB_2 , $\text{TiB}_{1.1}$)
硫化物	NaCl 尖晶石六方体心	$\text{PbMo}_4\text{S}_8(15\text{K})$, $\text{Cu}_{1.8}\text{Mo}_6\text{S}_8(10.8\text{K})$, $\text{PbGd}_{0.2}\text{Mo}_6\text{S}_8(14.8\text{K})$, $\text{LaS}(0.8\text{K})$, $\text{CuRh}_2\text{S}_4(4.8\text{K})$, $\text{LiTi}_{1.1}\text{S}_2(13\text{K})$, $\text{La}_3\text{S}_4(8.25\text{K})$
氧化物	钛矿	$\text{SrTiO}_3(0.55\text{K})$, $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3(13\text{K})$
	尖晶石	$\text{Li}_{1-x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_4(13.7\text{K})$
	青铜	$\text{M}_x\text{WO}_3(6.7\text{K})$, $\text{Li}_{0.9}\text{Mo}_6\text{O}_{17}(1.9\text{K})$
	NaCl	$\text{TiO}(2.3\text{K})$, $\text{NbO}(1.3\text{K})$

注：() 内为临界温度。

科学试验表明,目前所研制和应用最多的是 Y-Ba-Cu-O(即 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$)、Ba-Ca-Cu-O 和 Bi-Sr-Ca-Cu-O(即 $\text{BiSrCaCu}_2\text{O}_y$) 等系统超导陶瓷材料。如用 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 陶瓷制成磁屏蔽和射频量力干涉仪;采用 Bi-Si-Ca-Cu-O 系统产品制成超高频天线;采用 Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O/Ag 线材制成磁通变换器。与此同时,近代的电子、通信、高温超导微波光源等器件以及计算机元件等都广泛地应用了超导陶瓷材料。

如前所述,为了便于选择,虽然从各不同角度对陶瓷材料进行了分类,但实际上的种类繁多,应用范围不断扩大,很难做到系统的分类。加上各种陶瓷本身都具有多方面的功能特性,一种陶瓷可有多种用途,所以如按陶瓷本身的功能分类,可叫做功能陶瓷。

陶瓷的功能特性可有热功能、力学功能、化学功能、电功能、磁性功能、光学功能等。表 1-2 列出各功能陶瓷的种类及其应用。

表 1-2 陶瓷材料的功能及应用

功能	主要特性	陶 瓷	用 途
热	耐热性	Al_2O_3 , BeO, MgO, ThO_2 , ZrO_2 , ZrC, TiN	耐热材料
	隔热性	SiO_2 - Al_2O_3 系, SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{K}_2\text{O} \cdot 6\text{TiO}_2$	隔热材料
	导热性	BeO, WC, TiC	电子器件产品
	高温强度	MgO, ZrO_2 , Al_2O_3 , Si_3N_4 , SiC	涡轮机叶片, 火箭喷嘴, 高速轴承
	热冲击性	BeO, SiO_2 玻璃, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$, $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$, AlN	诱导炉管, 热交换机
力学	强度	Al_2O_3 , Al_2O_3 纤维, SiC, Si_3N_4	机械零件
	硬度	B_4C , SiC, TiC, WC	耐磨材料
化学	耐磨性	B_4C , SiC, Al_2O_3 , Si_3N_4	轴承、高速轴承等
	耐蚀性	Al_2O_3 , MgO, ThO_2 , SiC, Si_3N_4	反应管, 熔化金属坩埚
电、磁	吸附性	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_m(\text{AlO}_2)_n(\text{SiO}_2)_n \cdot x\text{H}_2\text{O}$	吸附材料, 催化剂材料等
	绝缘性	Al_2O_3 , $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	IC 基板, IC 标准件, 电子器件, 氢制造件
	导电性	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$, ZrO_2 , $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ - CeO_2 (Cr_2O_3)	
电、磁	半导性	TiO_2 , BaTiO_3 , In_2O_3 , ZnO, SiC	电阻器, 气敏件