

第一篇

材料概论

1.1 材料的定义、分类及应用

1.1.1 材料的定义

材料一般是指人类用于直接制造生产和生活所需的物品、器件、构件、机器和其他成品的物质。材料是物质,但不是所有的物质都可以称为材料。化学原料、工业化学品、燃料、药物和食物通常不归入材料。只有那些可为人类社会接受且能经济地制造有用成品的物质,才称为材料。有人把炸药、固体火箭推进剂也划入材料的范畴,称之为含能材料。材料总是与一定的用途相联系,可由一种或若干种物质制成。组成相同的材料,由于制备方法的不同,可成为用途迥异的不同类型和性质的材料。

1.1.2 材料的分类

材料的种类繁多,用途广泛,可以从不同的角度进行分类。依据材料的来源,可将材料分为天然材料和人造材料两类。目前,用量较大的天然材料是石料、木材、橡胶等,但其用量在逐渐减少,许多原来使用天然材料的领域正在日益被人造材料所取代。例如,钢筋水泥轨枕代替枕木,人造橡胶代替天然橡胶,化学纤维代替植物纤维等。

按材料的物理化学属性,将材料分为金属材料、无机非金属材料、高分子材料和复合材料四大类,每一类又可分为若干大类,如图 1.1.1 所示。金属材料、无机非金属材料和高分子材料因原子间的相互作用不同,在各种性能上表现出极大的差异。它们相互配合,取长补短,构成现代工业的三大材料体系。复合材料则是由上述三类材料复合而成,它结合了不同材料的优良性能,在强度、刚度、耐腐蚀性等使用性能方面比单一材料优越,具有广阔的发展前景。

从材料的使用性能考虑,将材料分为结构材料和功能材料两类。结构材料以力学性能为基础,用于制造以受力为主的构件。当然,结构材料对物理性能和化学性能也有要求,如光泽、热导率、抗辐照、抗腐蚀、抗氧化能力等。对性能的要求因材料用途而异。功能材料则是在光、电、磁、力、热、化学、生物化学等作用下具有特定功能的一类材料,这种材料涉及面很广,大致有电磁功能、光功能、分离功能、生物功能、形状记忆功能材料等,它们的应用对航天、导弹等先进技术的发展起着重要作用。一种材料往往既是结构材料又是功能材料,如铁、铜、铝等。

按材料的历史分类,材料分为传统材料和新型材料(又称新材料、先进材料)。前者是指已经成熟,且在工业中已批量生产并得到广泛应用的材料,如钢铁、水泥、塑料等,这类材料

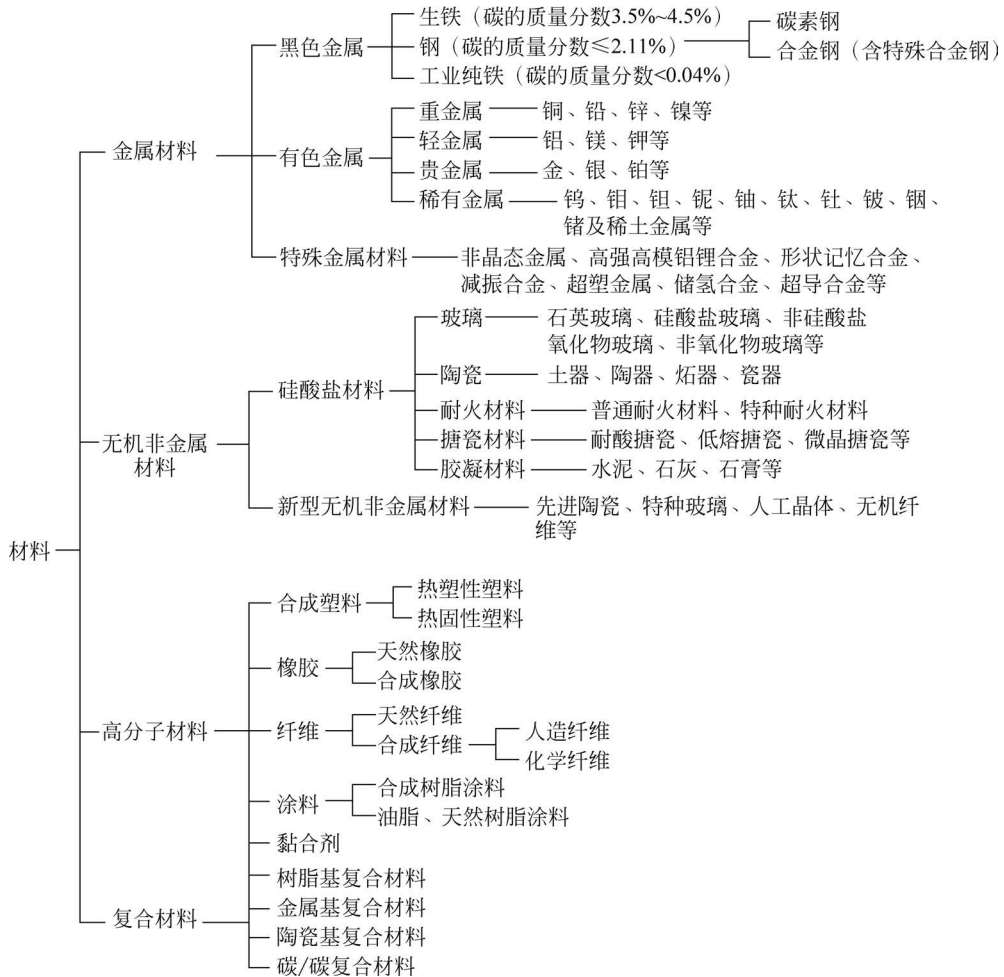


图 1.1.1 材料的分类

由于用量大、产值高、涉及面广泛,是很多支柱产业的基础,所以又称为基础材料;后者则是新近发展起来的具有优异性能和功能以及良好的应用前景的一类材料。新型材料与传统材料之间并没有清晰的界限,传统材料可以发展成为新型材料,新型材料在经过长期生产与应用之后也就成为了传统材料。传统材料是发展新型材料的基础,而新型材料又往往能推动传统材料的进一步发展。

按材料的用途分类,材料可分为建筑材料、机械工程材料、航空航天材料、能源材料、电子材料、信息材料、生物材料、环境材料、核材料等。其中,电子材料是在电子技术和微电子技术中使用的材料,包括介电材料、半导体材料、压电与铁电材料、导电金属及其合金材料、磁性材料、光电子材料等。能源材料是在能源的开发、转换、运输、储存中使用的材料。信息材料是信息的接收、处理、显示、储存和传播中使用的材料,如硅、砷化镓等半导体材料,光导纤维,电磁敏感材料,光敏材料,压电材料等。

1.1.3 材料的应用

由于材料与人类生产、生活息息相关,因此,材料的应用领域也十分广泛,除了日常生活

领域,更多的是应用于建筑、机械、能源、化学化工、仪器仪表、航空航天、交通运输、电子信息、环境、生物、地质、冶金等领域。

1.2 材料的发展概况及其地位和作用

1.2.1 材料的发展概况

材料具有悠久的历史,可以说人类的历史就是材料的历史,是材料创新、创造的历史。材料是社会进步的物质基础与先导,是人类进步的里程碑。从人类的发展史看,每一种重要材料的发明和广泛应用,都会把人类支配和改造自然的能力提高到一个新的高度,给社会生产力和人类生活带来巨大的变化,把人类的物质和精神文明推进一大步。

远古时代人类最早使用的是石、木、骨之类的天然材料,其不经加工或简单加工即可制成工具和用具。这是材料发展的初始阶段,这一阶段的特点是人类单纯选用天然材料。

距今 300 万年以前至距今 1 万年以前,人类就开始以石头做工具,这称为旧石器时代。1 万年以前,人类对石头进行加工,使之成为较简单的器物 and 工具,从而进入新石器时代。在新石器时代,人类还发明了用黏土作原料,成型后火烧固化而制成陶器,用作器皿盛水、煮食物等,使人类的饮食生活习性由烧烤发展为蒸煮,生存状况彻底改观,这是对人类文明的一大促进。新石器时代,人类开始用毛皮遮身;8000 年前,中国人开始用蚕丝做衣服;4500 年前,古印度人开始种植棉花。这些材料在被人类使用的同时,也为人类的文明奠定了重要的物质基础。

铜、铁和其后的其他合金的发现及应用,是材料发展的第二阶段。在这个阶段中,金属(主要是钢和铁)确立了工业材料的绝对优势。在人类社会,这一阶段持续了很长时间,并发挥了极其重要的作用。这个阶段的特点是人类从自然资源中提取有用的材料。在新石器时代,人类已经知道使用天然的金和铜,但因其尺寸较小,数量也少,不能成为大量使用的材料。后来人类在找寻石料的过程中认识了矿石,在烧制陶器的过程中又还原出金属铜和锡,创造了炼铜技术,生产出各种铜器物,从而进入红铜时代,并过渡到青铜时代。这是人类大量利用金属的开始,也是人类文明的重要里程碑。中国在商周(公元前 17 世纪初至公元前 256 年)就进入了青铜器的鼎盛时期,在技术上达到了当时世界的顶峰。5000 年前,人类开始用铁。由于铁比铜易得且便于利用,在公元前 10 世纪,铁工具已经比青铜工具更为普通,人类从此由青铜时代进入铁器时代。

随着科学技术和工业的发展,人类对材料提出了质量轻、功能多、价格低等要求。与此同时,人类已掌握了丰富的知识和生产技能,已能人为地制造出一些自然界不存在的材料,来满足社会各种各样的要求,并在材料的研制方面取得很大的自由度和主动性。这是材料发展的第三个阶段,即进入人工合成时代。塑料等各种高分子材料、精细陶瓷、新型复合材料、超晶格异质结等材料是这一阶段的代表。到了近代,18 世纪蒸汽机的发明和 19 世纪电动机的发明,使材料在新品种开发和规模生产等方面发生了飞跃。

目前人类已进入信息社会,材料、能源、信息成为现代文明的三大支柱。材料正向着更高级的先进材料和智能材料方向快速发展。

1.2.2 材料的地位及作用

从人类的历史看,材料与人类的出现和进化有着密切的联系,一切经济活动与生活行为

都离不开材料,材料是人类赖以生存和发展的物质基础与先导。在历史上,每一次大的社会进步,无一不是以新材料的出现与应用为前提的。因而历史学家用材料来划分历史,人类经历了石器时代、青铜时代、铁器时代,今天,正跨进先进材料的新时代。在当今社会,人们把材料、能源、信息誉为现代文明的三大支柱,又把新材料与信息技术和生物技术并列为新技术革命的重要标志。材料发展与应用水平的高低,已成为衡量一个国家国力强弱、科学技术进步程度、人民生活水平的重要标志。因此,无论过去、现在还是将来,材料在国民经济与社会进步中的基础与先导的地位是永远不会改变的。

1.3 材料的要素及其相互关系

1.3.1 材料的四要素

20世纪60年代开始,材料科学、材料工程、材料科学与工程的概念被相继提出。随着科学技术的发展,尤其是建立在原有的材料研究成果基础之上的材料研究的发展,以及对材料关键问题认识的日益深化,材料科学、材料工程、材料科学与工程等学科亦随之形成并逐渐走向成熟。

材料科学是研究材料的组成、结构和性能以及它们之间的关系,探索材料的自然规律,这些属于材料的基础性研究。材料研究与开发的最终目的是使用材料,满足科学技术、经济和社会发展的需要。而材料只有采用合理的工艺流程和技术,通过批量生产才能制备出具有实用价值的材料产品。材料工程则是研究材料在制备过程中的工艺和工程技术问题。对于材料科学与工程,是研究材料的组成、结构、制备、性质和使用效能,以及它们之间的相互关系。因而把组成与结构、合成与加工、性质以及使用效能称为材料科学与工程四个基本要素。把四要素结合在一起,便形成一个四面体的模型,如图1.3.1(a)所示为四要素之间的关系。

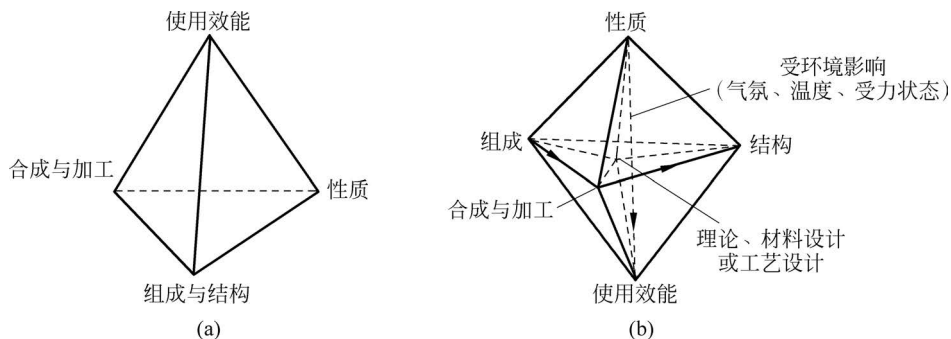


图 1.3.1 材料科学与工程要素模型

(a) 材料科学与工程四要素; (b) 材料科学与工程五要素

无论哪种材料,都包括了四个要素。性质赋予了材料的价值和应用性;使用效能是材料在使用条件下应用性能的度量;组成与结构包括了决定材料性质和使用性能的原子类型和排列方式;合成与加工实现了特定的原子排列。

材料的四个要素反映了材料科学与工程研究中的共性问题,其中合成与加工,受加工影响的使用效能,是两个普遍的关键要素。在这四个要素的基础上,各种材料相互借鉴,相互

补充,相互渗透。掌握了这四个要素,就把握住了材料科学与工程研究的本质。而各种材料是其内在特征的体现,反映了该种材料与众不同的个性,如果这样去认识,则许多长期困扰材料科技工作者的问题都将迎刃而解。可以依据这四个基本要素,评估材料研究中的机遇,以新的或更有效的方式和方法研制和生产材料。

考虑到材料四要素中的组成和结构并非同义词,即相同的组成,通过不同的合成或加工方法可以得到不同结构的材料,从而使材料具有不同的性质或使用效能。因此,我国有学者提出了一个五个基本要素的模型,即组成、合成与加工、结构、性质以及使用效能。如果把它们结合在一起,则形成一个六面体的模型,如图 1.3.1(b)所示。

材料科学与工程五要素模型有两个主要的特点。一是性质与使用效能有一个特殊的联系。材料的使用效能是材料性质在使用条件下的表现。环境对材料性能的影响很大,如受力状态、气氛、介质和温度等。有些材料在一般环境下的性能很好,而在腐蚀介质下性能却显著下降。有的材料为光滑样品时表现很好,而在有缺口的情况下,性能则大幅下降。特别是有些高强度材料表现尤为突出,一旦有一个划痕,就会造成灾害性破坏。因此,环境因素的引入对工程材料来说十分重要。二是材料理论以及材料设计或工艺设计有了一个适当的位置,处在六面体的中心。因为这五个要素中的每一个要素或几个相关要素都有其理论,根据理论建立模型,通过模型可以进行材料设计或工艺设计,以达到提高性能及使用效能、节约资源、减少污染或降低成本的最佳状态,这是材料科学与工程最终努力的目标。应该说明,目前国际流行的仍是四要素模型。

1.3.2 材料四要素之间的相互关系

材料科学与工程四要素和五要素的提出就是试图在材料的组成、制备、结构、性能、使用效能之间建立一个整体和全貌的关系。

在各种尺度上了解材料的组成与结构,以及它们同合成与加工之间、性能与使用效能之间的内在联系,长期以来一直是材料科学与工程的基本研究内容。

材料的制备包括材料的合成过程及材料的加工过程。材料的制备与材料的结构及性能之间具有密切的关系,影响材料的组织、结构,因而对材料的性能有显著的影响。例如,用高压法合成的聚乙烯和用低压法合成的聚乙烯,在结构上有很大的差别,因而性能也显著不同。又如,铸造法制造的铜棒与轧制法制造的铜棒,其组织结构不相同,晶粒的形状、尺寸和取向也都不相同,所以性能也不同。

材料的原始组织结构及性能又常常决定着采用何种方法将材料加工成所需要的形状,即材料的原始组织结构及性能又影响着材料的制备。例如,热固性树脂与热塑性树脂因其组织结构及性能不同,选用的成型加工方法有很大差别。又如,含有大缩孔的铸件不宜采用合金钢的成型加工方法等。

材料的组成与结构是材料的基本表征。它们一方面是特定的合成与加工条件的产物,另一方面又是决定材料性能与使用效能的内在因素,因而在材料科学与工程的四面体模型中占有独特的承前启后的地位,并起着指导性的作用。

材料的结构决定其性能,材料的组成则通过其结构决定其性能,不同化学组成的材料有不同的结构,从而使其具有不同的性能。例如,铁碳合金的性能与含碳量密切相关。如果不含碳,就是纯铁,性软、延展性极好,但不能作为机械材料使用;当碳的质量分数不超过

2.11%时,称为钢,随着钢中含碳量的增加,钢的强度和硬度直线上升,但塑性、韧性急剧下降,工艺性能也变差;碳的质量分数超过2.11%后,工业上称为铸铁。铸铁虽然强度较低,但有良好的切削、减磨、消振性能,加上生产简便和成本低廉,因此得到了广泛应用。

而相同化学组成的材料由于其制备工艺条件的不同,也会具有不同的结构和性能。例如,由水热法合成的水晶和由熔融法制备的石英玻璃,它们的组成都是二氧化硅,然而,由于其制备工艺条件的不同,两者的结构却完全不同,一个是晶态结构,另一个是非晶态结构,从而造成了两者性能上的较大差异。同样,金刚石和石墨都是由碳元素构成的,然而两者的结构却完全不同,即它们的碳原子的排列方式不同,从而造成了彼此性能上的很大差异。金刚石是最硬的一种物质,绝缘透明,折射光的能力极强,可以加工成装饰品——钻石;也可以加工成钻探机钻头,穿透坚硬的岩层;还可以做成刀具加工最硬的金属或切割玻璃。而石墨正好相反,是最软的矿物之一,用指甲就能在它上面刻划,常用来制作铅笔芯;也可以利用其良好的导电性,作为电极、电刷材料;还可以利用其良好的润滑作用,在机械中作为固体润滑剂使用。

材料的组成和结构是材料合成和加工的结果。材料制备过程不同,则其组成和结构不同,从而使其性能亦不同。在材料的制备过程中,出于不同的目的,人们常将材料以不同的速率冷却、凝固。随着冷却速率的提高,材料内部结构会发生改变,从平衡态过渡到亚平衡态,甚至成为非平衡态材料,材料性能因此也发生显著的改变。快冷技术(冷却速率达 $10^4 \sim 10^8$ K/s)的采用,为金属材料的发展开辟了一条新途径。首先是金属玻璃的研制成功,提高了金属强度、耐磨、耐腐蚀性能和磁学性能;其次是通过快冷可得到超细晶粒,成为改进金属性能的有效方法;最后是通过快冷发现了准晶,由此改变了晶体学的传统观念。又如,普通玻璃加热到一定温度后快速冷却,就可使其抗冲击、抗弯强度提高3~5倍,成为热稳定性良好的钢化玻璃。

材料的性质是人们关心的中心问题。它取决于材料的成分和各种层次上的结构。材料的性质对材料的使用效能有重要的影响。同时,材料效能的发挥与服役环境条件也是密不可分的。例如,碳石墨材料在真空或惰性气体环境中是难得的加热材料和隔热材料,可以用在 2000°C 的真空炉中;而一旦处于氧化环境中,碳石墨材料将被烧蚀,故无法在普通加热炉中应用。由于碳石墨材料良好的隔热性质,而且在高温真空或惰性气体环境中不会被烧蚀、熔化,也不会解体,因此,它被用在航天器前端,防止高速运动时高热对航天器的损害。

由上所述可知,材料制备、材料组成与结构、材料性能以及使用效能,它们之间具有相互依赖、相互制约的密切关系。了解并能动地利用这种关系,是材料科学的关键问题之一。

1.4 材料的组成和结构

1.4.1 材料的组成

材料的组成是指构成材料的组元(原子、分子、物相或矿物)及其含量。材料的组成有化学组成和物相或矿物组成之分,通常是指化学组成(成分)。

材料的组元是指在一定的尺度范围内构成材料的最基本、独立的组成单元,在微观范围内是指原子、分子,在亚微观范围内是指某一物相,在宏观范围内是指单一或多种物相的聚集体。

物相是指材料中化学成分和结构均相同的均匀部分,一个相必须在物理性质和化学性

质上都是完全均匀的,相与相之间有明显的界面,可以用机械方法将它们分离开。物相有晶相、非晶相和准晶相之分。

1. 化学组成

材料的化学组成是指构成材料的原子、分子及其含量。通常用质量分数表示,有时也用摩尔分数表示。材料的化学组成不仅影响材料的化学性质,也是影响材料物理力学性质的重要因素。例如,高分子材料与无机材料的耐燃、耐热性能不同,钢材与陶瓷、玻璃的抗蚀性差别较大等,都是由于它们具有不同的化学组成。除主要组成以外,杂质对材料结构与性能有重要影响,微量添加物亦不能忽略。

1) 金属材料的化学组成

金属材料是由金属元素或以金属元素为主构成的具有金属特性的材料,包括纯金属、合金两类。

(1) 单质金属。

在八十多种金属元素中,大多数是以过渡金属为中心的纯金属状态,一般是从含金属元素的天然矿物中冶炼出来,然后再用电冶、电解等方法提纯,得到含杂质很少的纯金属。工业上习惯分为黑色金属和有色金属两大类。铁、铬、锰三种金属属于黑色金属,其余的所有金属都属于有色金属。有色金属又分为重金属、轻金属、贵金属和稀有金属等四类。

(2) 合金。

所谓金属合金是指由两种或两种以上的金属元素或金属元素与非金属元素构成的具有金属性质的物质。例如,黄铜是铜和锌的合金,硬铝是铝、铜、镁等组成的合金。为了形成合金所加入的元素,称为合金元素。由两种元素构成的合金称为二元合金,由三种元素构成的合金称为三元合金。表 1.4.1 列出了主要金属合金的化学组成。它们一般是多晶体。合金有时可以形成固溶体、共熔晶、金属间化合物以及它们的聚集体。非晶态合金具有许多优异性能,如强韧性、抗侵蚀、高磁导率、超导性等。

表 1.4.1 主要金属合金的化学组成

| 种 类 | 母相金属 | 材料名称(加入的主要元素的质量分数/%) |
|----------|------|--|
| 钢 | Fe | 结构钢(C 0.1~0.6); 高速钢(W 13~20, Cr 3~6, C 0.6~0.7); 高强度钢(C<0.2, Mn<1.25, S<0.5) |
| 铝合金 | Al | Al-Cu 合金(Cu 4~8); Al-Si 合金(Si 4.5~13); 硬铝(Cu 4, Mn 0.5, Mg 0.5, Si 0.3); 超硬铝: Al-Zn-Mg-Cu 系合金; 耐热铝: Al-Cu-Li 系合金; 防锈铝: Al-Mg 系合金; 铸铝(Zn 0.5, Cu 3) |
| 铜合金 | Cu | 黄铜(顿巴黄铜(Zn 8~20), 7-3 黄铜(Zn 25~35), 6-4 黄铜(Zn 35~45), 黄铜(Zn 45~55)); 白铜(Ni 25); 青铜(Sn 4~12, Zn+Pb 0~10) |
| 不锈钢、耐腐蚀钢 | Fe | 不锈钢(铬系(Cr≥12); 铬镍系(Cr 17~19, Ni 8~16, Mo<2.0, Cu<2.0), 18-8 不锈钢(Cr 18, Ni 8)); 耐腐蚀钢(Cr<12, C<0.30) |
| 耐热钢 | Fe | Fe-Cr 系合金(Cr 4~10); Fe-Cr-Ni 系合金(Cr 18~20, Ni 8~70, Mn 0.5~2, S 0.5~3, C<0.2); Fe-Cr-Al 系合金(Cr 5~30, Al 0.6~5, Mn 0.5, Si 0.5~1.0, C 0.1~0.12, Co 1.5~3.0) |
| 低熔点合金 | | 铅-锡合金(Sn 39~40); 黄铜焊料(Zn 40); 铜合金(Sn 60~70, Pb 30~40); 银-铜-磷合金(Ag 15, Cu 80, P 5), 磷-铜合金(P 4~8) |

续表

| 种 类 | 母相金属 | 材料名称(加入的主要元素的质量分数/%) |
|-------|------|---|
| 钛合金 | Ti | 高强度 β 钛合金(Ti8Mo8V2Fe3Al); 高塑性钛合金(Ti6Al4V) |
| 非晶态合金 | | Fe78Si10B12; Pd40Ni40P20; Fe80P13C7; Ti50Be40Zr10; Co70Fe5Si15B10 |

2) 无机非金属材料化学组成

无机非金属材料包括陶瓷(陶器、瓷器)、玻璃、水泥、耐火材料、搪瓷和黏土制品等。无机非金属材料都是以某些元素的氧化物(SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 BaO 、 B_2O_3 、 P_2O_5 、 Na_2O 、 K_2O 、 TiO_2 等)、碳化物(SiC 、 B_4C 、 TiC 等)、氮化物(Si_3N_4 、 BN 、 AlN 等)、卤素化合物、硼化物,以及硅酸盐、硼酸盐、磷酸盐、铝酸盐等物质组成的材料。其化学组分几乎涉及元素周期表上的所有元素。表 1.4.2 列出了一些具有代表性的无机非金属材料的组成及用途。

表 1.4.2 无机非金属材料的组成及用途

| 种 类 | 材 料 组 成 | 用 途 |
|------|---|-----------------------------------|
| 绝缘材料 | Al_2O_3 , MgO , AlN , $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 玻璃 | 集成电路基片, 封装陶瓷, 高频绝缘瓷 |
| 介电材料 | TiO_2 , $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$, $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ | 陶瓷电容器, 微波陶瓷 |
| 铁电材料 | BaTiO_3 , SrTiO_3 | 陶瓷电容器 |
| 压电材料 | $(\text{PbBa})\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$, $\text{PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3$, PbTiO_3 | 超声换能器, 滤波器, 压电点火, 谐振器 |
| 半导体瓷 | LaCrO_3 , $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$, SiC | 温度传感器, 温度补偿器等 |
| | $\text{PTC}(\text{Ba-Sr-Pb})\text{TiO}_3$ | 温度补偿器和自控加热元件 |
| | $\text{CTR}(\text{V}_2\text{O}_5)$ | 热传感元件, 防火灾传感器等 |
| | ZnO 压敏电阻 | 避雷器, 浪涌电流吸收器, 噪声消除 |
| | SiC 发热体 | 电炉, 小型电热器等 |
| 铁氧体 | 快离子导体 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$, ZrO_2 , AgI-AgO-MoO_3 玻璃 | 钠硫电池固体电解质, 氧传感器陶瓷 |
| | CoFe_2O_4 , $\text{BaO}_x \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, Ni-Zn , Mn-Zn , Cu-Zn-Mg , Li , Mn , Ni , Mg , Zn 与铁形成的尖晶石型铁氧体 | 铁氧体磁石, 记录磁头, 计算机磁芯, 电波吸收体 |
| 透光材料 | $\text{Na}_2\text{O-CaO-SiO}_2$ 玻璃 | 窗玻璃 |
| | $\text{Na}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 玻璃 | 透紫外光元件 |
| | 透明 MgO , As-Ge-Te 玻璃 | 透红外光元件 |
| | SiO_2 , $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3$ 玻璃纤维 | 光学纤维 |
| | 透明 BeO , Y_2O_3 , $\text{K}_2\text{O-BaO-Sb}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Nd}_2\text{O}_3$ 玻璃 | 激光元件 |
| | 透明 $\text{PLZT}(\text{Pb-La-Zr-Ti-O})$ | 光存储元件, 视频显示, 光开关等 |
| 湿敏陶瓷 | $\text{CdO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 玻璃 | 光致色器件 |
| | $\text{MgCr}_2\text{O}_4\text{-TiO}_2$, $\text{TiO}_2\text{-V}_2\text{O}_5$, $\text{ZnO-Cr}_2\text{O}_3$, Fe_2O_3 , NiFe_2O_4 | 工业湿度检测, 烹饪控制元件等 |
| 气敏陶瓷 | SnO_2 , $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, ZrO_2 , TiO_2 , CoO-MgO , ZnO , WO_3 等 | 铁氧体透光材料湿敏陶瓷汽车传感器, 气体泄漏报警, 气体探测 |
| 载体 | $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$, $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, Al_2O_3 , $\text{Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 多孔玻璃 | 汽车尾气催化载体, 化学工业用催化载体, 酵素固定载体, 水处理等 |