



绪 论

《工程材料成形基础与先进成形技术》主要包括工程材料,材料的改性,材料的成形,材料成形的新技术、新工艺、新进展等方面的内容。工程材料是产品制造的源头,材料成分、性质、组织结构对产品制造质量、加工技术、生产成本、生产效率均具有重要影响。工程材料成形是借助于非切除性手段(减材制造)对材料进行加工,获得所需零件及材料特性和形状的方法,是机械制造的重要组成部分。工程材料成形包括等材制造(材料改性、液态成形、塑性成形、连接成形和非金属材料成形等)和增材制造(3D 打印)。

无论是工程材料,还是工程材料成形,近年来都有了革命性的更新和进展,涌现出大量的新材料、新技术、新工艺。这些新的材料和先进的成形方法,拓宽了材料和材料成形的制造领域及应用范围,推动了工业的进步和人类文明的发展。

1. 工程材料的分类及其发展趋势

1) 工程材料的分类

工程材料是指工业生产中所使用的原材料,分为金属材料、有机高分子材料、无机非金属材料 and 复合材料四大类。

(1) 金属材料。金属材料主要分为黑色金属和有色金属两大类。黑色金属是工业上对铁、铬和锰的统称,也包括这三种金属的合金。这三种金属都是冶炼钢铁的主要原料,而钢铁在国民经济中占有极其重要的地位,是衡量一个国家国力的重要标志。黑色金属的产量约占金属总产量的 95%。有色金属是指黑色金属以外的金属及其合金,如金、银、铜、铝、镁、钛等及其合金。

金属材料具有各种各样的性能,包括力学性能、物理性能、化学性能、工艺性能等。与力学、物理和化学性能不同,材料的工艺性能是指材料是否容易加工成零件或产品的性能。

(2) 有机高分子材料。有机高分子材料种类繁多,按工艺性质可分为塑料、橡胶、纤维、油漆、胶黏剂等。它具有熔点低、塑性大、可加工性好等特点。

(3) 无机非金属材料。无机非金属材料泛指一切经过高温处理而获得的无机的非金属材料,主要是陶瓷材料(包括传统陶瓷、先进陶瓷)和玻璃、水泥、耐火材料等。它具有摩擦系数小、耐磨、耐化学腐蚀等特点。陶瓷材料广泛应用于化工、冶金、机械、电子、能源和尖端科学技术领域。在精密机械中,陶瓷可应用于高温、中温、低温等领域,可以作为机械零件,也

可作为电子器件。

(4) 复合材料。复合材料是指由不同材料通过复合工艺组合而成的材料。复合材料中至少有一种物质是基体,一种物质是增强体。通过这种基体和增强体的结合,可以获得优于基体和增强体材料的力学性能,从而形成复合效应。现代复合材料主要以金属、陶瓷、树脂为基体,通过加入增强体,使得材料具有高的比强度、比刚度以及防腐、耐蚀等性能。

2) 工程材料的发展趋势

随着社会的发展和科学的进步,工程材料在不断地发展与更新。金属材料如高纯金属材料、超高强金属材料、超高易切削钢、硬质合金和金属陶瓷、高温合金和难熔合金、共晶合金凝固材料、金属非晶和微晶材料、金属间化合物材料、纳米金属材料、形状记忆合金、储氢合金等纷纷出现;非金属材料 and 复合材料的发展更是突飞猛进,各种新型的功能塑料(导电、发光、生物医用等等)层出不穷,高性能的新型陶瓷材料不断涌现,如相变增韧陶瓷、高精细陶瓷、可塑性变形陶瓷、金属陶瓷、纤维及晶须增韧陶瓷基复合材料、仿生陶瓷基复合材料、纳米陶瓷及其复合材料等等。与此同时,各种新型先进材料的发展也是日新月异。比如:碳纳米材料(包括石墨烯、碳纳米管)、高强韧性非晶材料、智能材料、绿色材料、生物材料等等。

2. 工程材料的成形及其发展趋势

1) 等材制造及其发展趋势

(1) 等材制造的分类。等材制造主要分为材料的改性、材料的液态成形、材料的塑性成形、材料的连接成形和非金属材料成形。

① 材料的改性。材料的改性是通过物理和化学手段改变材料物质形态或性质的方法,是零件生产的重要环节。工程材料的改性包括整体改性和表面改性。

材料的整体改性一般通过热处理的方法进行。金属材料的热处理是指将金属材料在固态下加热、保温和冷却,以改变其组织,从而获得所需性能的一种工艺。金属材料的热处理常用的方法有:退火、正火、淬火、回火、渗碳、渗氮、固溶、时效等;非金属材料的热处理,包括碳纤维预氧化、碳化、石墨化烧结、玻璃的退火、钢化等。

材料的表面改性也称为“表面工程技术”,通常分为表面涂镀技术、表面扩渗技术和表面处理技术三大类。表面涂镀技术包括有机涂装、热浸镀、热喷涂、电镀、化学镀和气相沉积;表面扩渗技术主要包括化学热处理、阳极氧化、表面合金化、离子注入及激光表面合金化技术等;表面处理技术包括感应加热淬火技术、激光表面淬火及退火技术和喷丸及滚压等表面加工硬化技术等。

② 材料的液态成形。材料的液态成形是指将液态(熔融态或浆状)材料注入一定形状和尺寸的铸型(或模具)腔中,凝固(或固化)后获得固态毛坯或零件的方法,如金属的铸造成形、陶瓷的注浆成形等。

金属的液态成形是人类利用金属材料最早的加工方法,已有数千年的历史。金属的液态成形也称为“铸造成形”,主要包括砂型铸造和特种铸造两大类。砂型铸造是最基本的传统铸造方法,也是应用最广泛的铸造方法;特种铸造包括金属型铸造、压力铸造、离心铸造、低压铸造、熔模铸造、消失模铸造等。

③ 材料的塑性成形。材料的塑性成形是利用工具或模具使材料发生塑性变形,从而得

到所需形状、尺寸、组织和性能的工件的成形方法。塑性成形也称“塑性加工”或“压力加工”。常见的塑性成形方法主要有自由锻、模锻、板料冲压等；特种塑性成形方法有轧制、挤压、拉拔、超塑性成形、旋压成形、摆动辗压成形、粉末锻造、液态模锻、爆炸成形、电液成形、电磁成形、充液拉深、聚氨酯成形等。

④ 材料的连接成形。材料的连接成形是使两个或两个以上分离的构件以一定的方式组合成一个整体的成形方法,连接可分为可拆连接和不可拆连接两大类。可拆连接有螺纹连接、键连接、销连接及型面连接等;不可拆连接在拆开连接时,至少会损坏连接中的一个零件,其包括焊接、铆接、胶接、锻接等。常用的连接方式有机械连接、焊接和胶接等。

⑤ 非金属材料成形。非金属材料成形主要包括粉体(陶瓷及粉末冶金)材料成形(如注浆成形、压制成形、可塑成形等)、高分子材料(塑料和橡胶)成形(如注射成形、压塑成形、挤出成形、压注成形、压延成形等)、复合材料成形(如手糊成形、喷射成形、模压成形、拉挤成形、缠绕成形)等。

(2) 等材制造的特点。等材制造与切削加工相比具有很大差异,它突出的特点如下。

① 节省材料。不同于切削加工过程有很多材料被切削掉,等材制造在成形过程中,体积和质量基本不变,因此能够节省大量的材料。

② 材料成形产品的几何尺寸和质量范围非常广泛。几何尺寸从几毫米到上百米,质量从几克到上百吨都可以制造。如从很小的螺丝、螺帽的塑性成形到数十吨、上百吨的大型铸件、大型锻件的铸造、锻造成形,以及铁路钢轨的轧制成形、大型舰船船体的焊接成形等。

③ 产品的力学性能好。通过一些特殊等材制造生产的产品一般都具有良好的力学性能。如液态成形中的球墨铸铁件、压力铸件,塑性成形中的锻件、冲压件、挤压零件,焊接成形中的压力焊件、激光焊件,非金属成形中的陶瓷零件、工程塑料零件和复合材料零件等,其强度等指标都非常高。

④ 生产率高。等材制造的成形方法大都具有较高的生产率,如液态成形的压力铸造、塑性成形的板料冲压、塑料零件的注射成形等都可以达到每小时几十件或上百件;板料冲压中的高速冲裁,甚至可以达到每分钟数千件。

⑤ 产品的精度相对较差。一般的等材制造产品(特殊成形方法的产品除外),在精度上不如切削加工的产品,因此,有些成形方法只适用于制造毛坯或原材料。

(3) 等材制造的应用。等材制造被广泛应用于国民经济生产的各个领域。液态成形的铸件在机床、内燃机、重型机械、风机、压缩机、拖拉机、农业机械,以及汽车行业中均占非常重要的比例;塑性成形和焊接成形在现代工业中占有非常重要的地位,其应用于各种原材料、精密机械、医疗设备及器械、运输车辆与交通工具、农机具、电气设备、通信设备的生产制造,已成为日用工业、国防工业、能源工业、船舶工业、航空宇航等工业生产的重要制造方法;非金属材料 and 复合材料成形的应用也越来越普遍,塑料制品、陶瓷制品、复合材料产品已遍及国民生活的各个领域,成为日常生活中不可缺少的用品。

(4) 等材制造的发展趋势。从热处理、铸造、锻压、焊接等典型等材制造工艺几千年的发展历程可知,等材制造主要经历了手工、机械化、自动化三个历史发展阶段。随着社会发展和科技进步,等材制造的发展趋势主要体现在以下几个方面。

① 等材制造设备的精密化、高速化。等材制造的各种关键成形设备都朝着精密以及高速、超高速方向发展。等材制造的各种自动化生产线(如自动连铸生产线、汽车覆盖件自动

冲压生产线、机器人自动焊接生产线等)都对生产设备的精密化、高速化程度有很高的要求;各种高精度的成形产品和成形方法也在不断涌现,如精密铸造、精密锻造的产品应用越来越广泛。

② 等材制造的绿色化。绿色成形能够做到在整个制造过程中对环境污染最小和对资源利用率最高。等材制造中热处理废液的排放,表面处理的粉尘、油污的处理,铸造、锻压、焊接、非金属材料成形等产生的烟尘、震动、噪声等对环境的影响,都是等材制造未来发展必须解决的问题。做好绿色发展、循环发展、低碳发展,构建高效、清洁、低碳循环的绿色制造体系,深入实施绿色制造工程,是等材制造技术的重要发展方向。

③ 材料成形过程的柔性化、数字化、智能化。等材制造经历了“手工—机械化—自动化”的发展过程,正在向柔性化、数字化、智能化方向迈进。柔性化、数字化、智能化是等材制造发展提升的重要手段,也是等材制造发展的新动能。

智能成形可以通过成形前的仿真分析与优化,对成形过程中的状态进行监测和智能优化控制,从而完成整个成形过程,使得零件成形更加可控和可靠。计算机辅助设计(CAD)与控制、数控冲压、数控多点成形、数控渐进成形、焊接机器人、柔性焊接生产线的出现,促进了等材制造的柔性化、数字化和智能化发展,大大扩展了等材制造在工业生产中的应用。

④ 成形成性一体化。材料的成形成性一体化是通过成形获得所需制件的形状和尺寸,同时改变材料内部组织结构和应力状态,从而获得所需材料性能的方法。传统的等材制造受制造技术水平的限制,只能先成形零件,再进行改性处理。既耗时、费力又增加了成本。因此,成形成性一体化是等材制造始终追求的目标。

现代物理冶金热变形技术、热机械处理技术和计算机技术的兴起与发展,使预测和控制合金热成形过程中的组织演变、获得良好的最终性能成为可能,等材制造正朝着成形成性一体化的方向发展。

2) 增材制造及其发展趋势

(1) 增材制造及其分类。增材制造是通过 CAD 设计数据并采用材料逐层累加的方法制造实体零件的技术,相对于传统的材料去除(切削加工)技术,是一种“自下而上”的材料累加制造方法,也被称为“材料累加制造”“快速原型制造”“分层制造”“实体自由制造”“3D 打印技术”等。

增材制造主要包括激光光固化成形(SLA)、粉末烧结成形(SLS)、三维喷涂黏结成形(3DP)、熔融挤压堆积成形(FDM)、箔材黏结成形等。

增材制造不需要传统的刀具、夹具及多道工序,而是利用三维设计数据在一台设备上快速而精确地制造出任意复杂形状的零件,从而实现“自由制造”,实现许多过去难以制造的复杂结构零件的成形,并大大减少了加工工序,缩短了加工周期,而且对于越是结构复杂的产品,其制造的速度优势越明显。近 20 年来,增材制造设备得到了快速的发展,增材制造原理与不同的材料和工艺结合发展出了许多增材制造设备,目前已达 20 多个种类。增材制造在各个领域都获得了广泛的应用,如电子产品、汽车、航空航天、医疗、军工、地理信息、艺术设计等。

增材制造(3D 打印)技术被认为是“一项将要改变世界的技术”。英国《经济学人》杂志认为增材制造将“与其他数字化生产模式一起推动实现第三次工业革命”。增材制造为我国制造业发展和升级提供了历史性机遇。增材制造可以快速、高效地实现新产品物理原型的

制造,为产品研发提供快捷技术途径。增材制造降低了制造业的资金和人员技术门槛,有助于催生小微制造服务业,有效提高就业水平,有助于激活社会智慧和资金资源,实现制造业结构调整,促进制造业由大变强。

增材制造代表着生产模式和先进制造技术发展的一种趋势,即产品生产将逐步从大规模制造向个性化制造发展,以满足社会多样化需求。增材制造的优势是制造周期短、适合单件个性化制造,可实现大型薄壁件、钛合金等难加工易热成形零件及结构复杂零件的制造。该技术与设备在航空航天、医疗等领域及产品开发、计算机外设和创新教育上具有广阔的发展空间。

(2) 增材制造的发展趋势。世界科技强国和新兴国家都将增材制造作为未来产业发展的新增长点加以培育和支持,以抢占未来科技产业的制高点。可以说,增材制造正在带动新一轮的世界科技和产业发展与竞争,未来前景难以估量。增材制造发展的核心技术方向包括:

① 智能化增材制造装备。增材制造装备是高端制造装备重点方向,在增材制造产业链中居于核心地位。智能化增材制造装备制造包括制造工艺、核心元器件、技术标准及智能化系统集成等。

② 增材制造材料工艺与质量控制。内容包括:面向增材制造的新材料体系;金属构件成形质量与智能化工艺控制;难加工材料的增材制造成形工艺;增材制造材料工艺的质量评价标准等。

③ 功能驱动的材料与结构一体化设计。内容包括:功能需求驱动的宏微结构一体化设计;多材料、多色彩的结构设计方法与智能化制造工艺集成;面向增材制造工艺的设计软件系统等。

④ 生物制造。增材制造与生物医学结合形成了新的学科方向——生物制造。内容包括:个性化人体组织替代物及其临床应用;人体器官组织打印及其与宿主组织融合;体外生命体组织仿生模型的设计与细胞打印等。

⑤ 云制造环境下的增材制造生产模式。内容包括:增材制造与传统制造工艺的技术集成;增材制造服务业对社会化生产组织模式变化的影响;效益驱动的分散增材制造资源与传统制造系统的动态配置;分散社会智力资源和增材制造资源的快速集成等。

3. 本课程的任务、学习目标和学习方法

“工程材料成形基础与先进成形技术”是一门综合性的技术基础课程,旨在使学生建立生产过程的概念,掌握常用的材料成形基础理论、基本工艺方法、成形零件的工艺规程、结构工艺性及先进成形技术的相关知识;培养学生机械工程的基本素质和成形零件的结构工艺性设计的能力。“工程材料成形基础与先进成形技术”课程具有提高学生创新意识,增强学生的工程实践能力和工程创新设计能力的作用。

通过本课程的学习,使学生达成以下目标:

(1) 建立工程材料、材料改性和工程材料成形与先进成形技术的完整概念,培养良好的工程意识和创新精神。

(2) 掌握材料改性、材料成形过程以及典型成形设备的工作原理,了解工艺参数与成形质量控制之间的关系。

(3) 掌握常用材料改性、材料成形方法及原理,如材料的整体改性和表面改性、金属的液态成形、金属的塑性成形、金属的连接成形、非金属材料成形等。

(4) 掌握先进成形技术和增材制造技术的一般方法,熟悉每种方法的使用原理以及应用范围。

(5) 掌握成形零件的结构工艺性以及典型零件的制造流程,并具有成形零件结构设计、成形工艺规程制定的初步能力。

(6) 了解等材制造技术和增材制造技术的最新进展和发展趋势,锻炼把握学科前沿知识的能力。

本课程在教学过程中,应以课堂教学为主,同时辅之以数字教材、多媒体教学、实物与模型、课堂讨论等多元化、立体化的教学手段和形式,以增强学生的感性认识,加深其对教学内容的理解。应注意理论联系实际,与工程训练教学密切配合,使学生在掌握理论知识的同时,提高通过现象发现问题、分析问题和解决问题的综合能力。学生应注意观察和了解平时接触到的材料成形零件或装置,结合习题库,按要求完成一定量的作业及复习题、思考题,运用所学知识尝试解决有关问题,从而较好地掌握本课程内容,扩大课程教学效果,切实提高工程实践能力、创新思维能力和解决复杂工程问题的能力。

第1章

材料与制造技术简论

【本章导读】 产品制造离不开材料,材料是产品制造的源头,材料成分、性质、组织结构对产品制造质量、加工技术、生产成本、生产效率均具有重要影响,因此,了解材料和制造技术的历史、现状及发展趋势不仅对认识材料、研究材料非常必要,而且对了解和研究制造技术也十分重要。

本章重点介绍材料、新材料的有关概念;制造技术的有关概念及产品制造过程等。通过本章的学习,在了解材料与制造技术的历史、现状与发展的基础上,能把握从材料到产品的制造过程及材料与制造技术之间的关系;能掌握本课程主要涉及的内容;能把握各部分内容与产品制造过程之间的关系。

1.1 材料及新材料的历史、现状与发展趋势

1.1.1 材料、新材料的概念及材料分类

1. 材料

材料是人类用于制作有用物件的物质,是人类社会进步的物质基础和先导。

2. 新材料

新材料主要是指最近发展起来或正在发展之中的具有特殊功能和效用的材料。

材料之所以有用,是因为材料具有各种各样的性能,这些性能包括:力学性能、物理性能、化学性能、工艺性能等。材料的工艺性能是指材料是否容易加工成零件或产品的性能。

3. 材料分类

依据材料性能、适用范围、维度、尺度大小等不同特点,材料被分为不同种类材料。

1) 按材料结构分类

(1) 金属材料(主要键合类型——金属键)。

- (2) 无机非金属材料(主要键合类型——共价键和离子键)。
- (3) 有机高分子材料(主要键合类型——共价键,以及氢键、范德瓦耳斯键等弱结合键)。
- (4) 复合材料(主要键合类型——复合类化学键)。

鉴于键合类型不同、键合强度差异,因此上述四类材料强度、硬度、塑性、耐磨性、耐高温性、可加工性差异显著,用途和适用范围也各不相同。

2) 按材料的性质分类

- (1) 结构材料(用于结构件,主要涉及材料的力学性能)。
- (2) 功能材料(涉及材料的声、光、电、磁、热等物理性能)。

3) 按材料维度分类

- (1) 零维材料(如纳米颗粒材料)。
- (2) 一维材料(如纤维材料)。
- (3) 二维材料(如薄膜材料)。
- (4) 三维材料(如块体材料)。

4) 按材料的用途分类

- (1) 生物医用材料。
- (2) 清洁能源材料。
- (3) 电子信息材料。
- (4) 纳米材料、磁性材料等。

1.1.2 材料的历史、现状与发展趋势

材料不仅是人类社会发展的先导,也是推动社会进步的力量源泉。按照人类发现和使用材料的进程,人类先后经历了早期的石器时代;公元前 5000 年前后的青铜器时代;公元前 1200 年前后的铁器时代;18—20 世纪的钢铁时代;进入 20 世纪后半叶,作为发明之母的新材料的研制更是日新月异,出现了称之为“高分子时代”“半导体时代”“先进陶瓷时代”和“复合材料时代”等提法。这说明以单一种类材料为主导的时代已一去不复返了,材料的发展已进入丰富多彩的时代。

工程材料的发展历程和发展趋势如图 1-1 所示。在该图中,材料按照其组成结构被分成了金属材料、陶瓷(无机非金属材料)、高分子材料、复合材料四大类。横坐标表示不同的历史时期和未来的整个时间跨度,纵坐标表示四类材料在不同时期的相对重要性(所占使用比例)。很显然在人类开始学会使用工具的初期,属于石器时代,大量石器工具的使用推进了人类社会的发展与进步,以后陆续进入陶器时代、瓷器时代、青铜器时代、铁器时代。到 20 世纪 60 年代,金属材料的发展开始主导社会的发展和进步,人类进入钢铁时代,各种产品主要由金属制成,金属材料在全部四类材料中所占的比例甚至超过 70%。但是这种情况仅仅维持了 30~40 年。随着科学技术的进步,以及信息化、自动化、计算机技术与传统制造技术、电气技术的叠加(集成),人类对各种物质需求发生了巨大的变化。让人惊讶的是对金属材料的相对需求开始逐年下降,金属所占全部材料总量甚至不足 40%,对陶瓷材料(无机

非金属材料)、高分子材料、复合材料的需求增长速度则远快于对金属材料的需求。甚至有人预测,在未来的 2030 年以后这四种材料份额将各占四分之一。正是这种变化,导致了前述的“高分子时代”“半导体时代”“先进陶瓷时代”和“复合材料时代”等提法,也出现了金属材料产业是不是夕阳产业的质疑。

工程材料发展历史随时间推移的相对重要性示意图
(时间是非线性的)

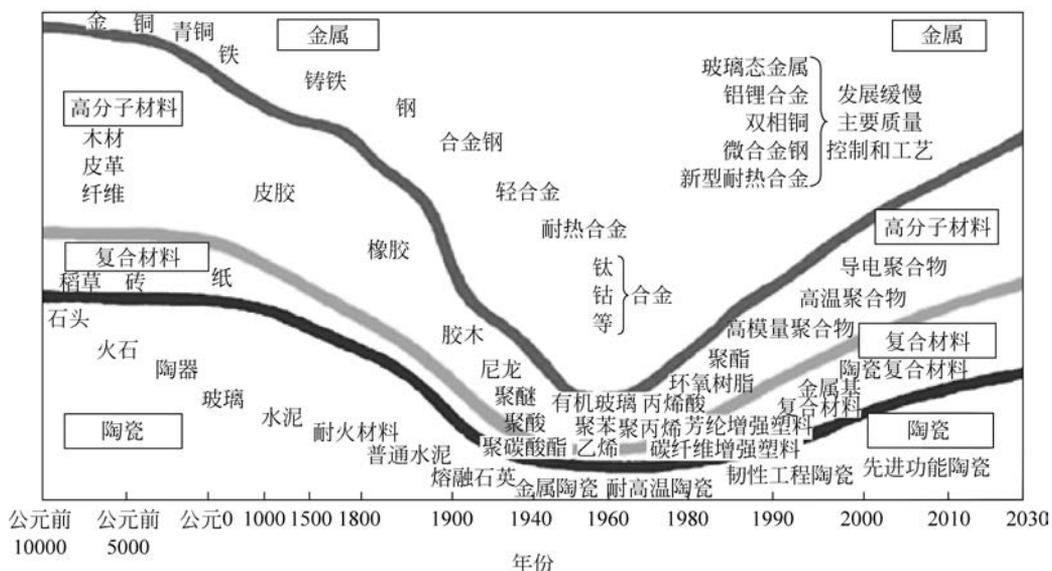
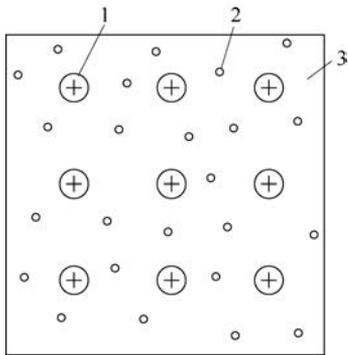


图 1-1 材料发展历史与展望简图

金属材料产业是不是夕阳产业? 对此不妨做一下分析,首先金属材料具有其他材料体系不可能完全取代的独特的性质和使用性能,这是由于金属材料主要通过金属键结合而成。因此,金属有比高分子材料高得多的模量,有比陶瓷高得多的韧性、可加工性、磁性和导电性,如图 1-2、图 1-3 所示。正是因为这些特点,所以在其他材料体系迅猛发展的今天,金属材料同样也在不断推陈出新,以满足工程中不断提出的使用要求。例如,2018 年上半年我国钢铁产量达到 5 亿 t,增长接近 6%,显然认为金属材料工业属于夕阳工业的说法是不正确的。这从金属材料的整个发展过程来看,可以进一步说明这个问题。从 20 世纪 50 年代开始,新金属材料不断涌现,比如:具有更高电磁性能的高纯金属材料;可以轻质化的超强及超高强金属材料;可以提高生产效率的超易切削钢和超高易切削钢;可用于工具耐磨、耐热材料的硬质合金和金属陶瓷;用于飞机涡轮发动机的高温合金和难熔合金;密度小、模量和强度大的纤维增强金属基复合材料;具有反常高温强度的共晶合金凝固材料;具有优异性能的快速冷凝金属非晶和微晶材料;兼具金属与陶瓷特性的金属间化合物(半陶瓷)材料;具有奇异性能的纳米金属材料;具有记忆功能的形状记忆合金;具有储氢功能的储氢合金等等。

无机非金属材料也即广义上的陶瓷材料。陶瓷是泛指一切经过高温处理而获得的无机非金属材料,包括传统陶瓷、先进陶瓷、玻璃、水泥、耐火材料等等。先进陶瓷的化学键与金属材料不同,是由共价键和离子键构成,如图 1-4、图 1-5 所示。

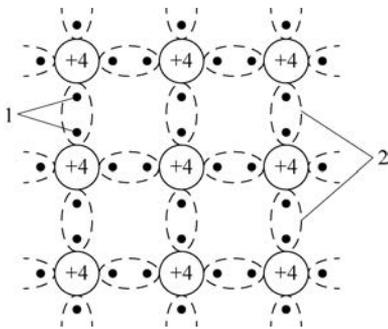


1—正离子；2—自由电子；3—电子气。

图 1-2 金属键示意图

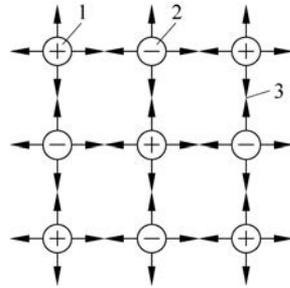


图 1-3 金属材料及应用



1—价电子；2—共价键。

图 1-4 共价键示意图



1—正离子；2—负离子；3—正负离子吸引力。

图 1-5 离子键示意图

与金属键相比,共价键和离子键结合强度更高。因此,宏观上陶瓷材料比金属材料更耐高温、耐磨、耐腐蚀。当然,由于陶瓷材料晶界存在杂质、气孔、玻璃相等缺陷(相当于微裂纹),使陶瓷材料具有脆性大、韧性差、难加工等缺点。陶瓷材料同样经历了漫长的发展历程,从石器时代开始到人类学会烧制陶器是一次重要的飞跃。由于陶器烧结温度低,其缺点是致密性差。鼓风机技术和瓷土的使用导致瓷器的产生,鼓风机进一步提高了烧结温度,使瓷土中低熔点液态玻璃相可以填充陶器空隙,从而有效提高了瓷器的致密度和强度。从陶器到瓷器也是一次重要的飞跃。

陶器和瓷器统称为陶瓷。传统陶瓷包括日用陶瓷、建筑陶瓷、卫生陶瓷等,在日常生活中使用广泛。到 20 世纪后半叶,陶瓷的粉体原料质量和制备技术中温度和压力等制备工艺参数不断获得提升,从而出现了先进陶瓷,从传统陶瓷到先进陶瓷又是一次重大飞跃。先进陶瓷材料的力学性能和声、光、电、磁、热等物理化学性能都获得突破,其不仅被广泛用于结构材料,也被用于电子、信息、能源、生物医学等功能材料,在现代工业中获得广泛应用。因此,当今时代也被誉为先进陶瓷时代、先进半导体时代。以结构陶瓷为例,为解决陶瓷材料脆性大、韧性差、难加工等问题,从 20 世纪后期开始,随着科学技术的进步,先后出现了一批高性能新型陶瓷材料,比如:

(1) 相变增韧陶瓷。它是利用 ZrO_2 相变时的体积膨胀抑制陶瓷材料内部裂纹的扩展,