



绪 论

1.1 什么是材料加工

材料是可以直接制造成产品的物质,是人类赖以生存和发展的物质基础。通过改变和控制材料的外部形状和内部组织结构,将材料制造成为人类社会所需要的各种零部件和产品的过程称为材料加工,也称为材料成形制造。

把材料加工制造成产品的方法可分为两大类。第一类方法,如液态浇铸成形加工(铸造)、塑性变形加工、连接加工、粉体加工、热处理改性、表面加工等,在加工制造过程中,不仅材料的外部形状和表面状态发生改变,而且材料的内部组织和性能也发生巨大变化。加工制造的目的不只是赋予材料一定的形状、尺寸和表面状态,而且决定材料变成产品后的内部组织和性能。这一类加工制造方法称为材料加工或材料成形。又因为这类加工制造一般都需要将材料加热到一定的温度下才能进行,因而通常又称这类加工制造方法为热加工。另一类加工制造方法,如传统的车、铣、镗、刨、磨等切削加工,以及直接利用电能、化学能、声能、光能等进行的特殊加工,如电火花加工、电解加工、超声波加工、激光加工等,在加工制造过程中通过去除一部分材料来使材料成形。加工制造的目的主要是赋予材料一定的形状、尺寸和表面状态,尤其是尺寸精度和表面光洁度,而一般不改变材料的内部组织与性能。这类加工方法称为切削加工或去除加工。由于这种加工一般在常温下甚至往往是强制冷却到常温下进行,所以习惯上称为冷加工。

在人类社会发展的历史长河中,逐步发展了各种各样的材料加工方法。材料加工工艺千变万化,不同的材料需要不同的适宜加工方法,同样的材料制造不同的工件也要采用不同的加工方法。就热加工而言,对金属材料,常用的加工方法有液态成形加工、固态变形加工、连接加工、粉体成形加工、表面加工等;对陶瓷材料,可以用液态成形加工、变形加工、烧结成形加工等方法;对高分子材料,则常用液态成形加工、挤塑成形加工等方法;对复合材料则需要采用专门开发的液态浸渗、

热扩散粘结等成形加工方法。在各种材料的加工方法中,金属的加工方法最多,发展也最完善。

金属的液态成形加工(铸造)是发展最早,也是最基本的金属加工方法。几乎一切金属制品均经历过熔化和铸造成形的过程,无论是作为铸件(最终产品或毛坯)还是铸锭(进一步成形加工的原材料)。铸造加工方法的适用范围极广,几乎可以用它制造任何大小尺寸和复杂程度的产品:从为牙科医生制造的重仅几克的金属假牙,到重达几百吨的大型水轮机叶轮、轧钢机机架,到其他任何方法都不能胜任的复杂零件(如汽车发动机汽缸体)制备,到几乎没有塑性、不宜用任何其他方法制造的灰铸铁材料的成形加工。液态成形加工方法现在已经从金属成形加工发展到适用于各种材料,金字旁的铸字已经不只限于铸造金属,还可以铸造陶瓷、有机高分子、复合材料等几乎所有工程材料。铸造成形加工方法的另一个特点是,它是一种材料制备和成形一体化技术。不仅可以通过合金成分的选择、熔体的改性处理和铸造方法以及工艺的优化来改进铸件的性能,还是新材料开发的重要手段。单晶材料、非晶材料等新材料的获得均离不开铸造方法。

塑性成形也是金属的重要加工方法。材料塑性成形是利用材料的塑性,在外力作用下使材料发生塑性变形,从而获得所需形状和性能的产品的一种加工方法。金属塑性成形也称压力加工,通常分为轧制和锻压两大类。前者主要用于生产型材、板材和管材,后者则主要用于生产零件或毛坯。塑性成形加工的适用范围也非常广,从绣花针到重达上百吨的大型发电机主轴,从汽车覆盖件到飞机、卫星的壳体。只要塑性良好的材料都可以进行塑性加工。材料在特定条件下所表现出来的超塑性(拉伸延伸率达百分之几百到百分之几千),更使许多正常条件下难以塑性变形的金属材料可以方便地成形。从金属成形加工发展起来的塑性成形方法,现在也是塑料成形的最主要方法。同时,塑性变形还是消除材料内部气孔、裂纹等缺陷,改善组织结构,提高材料性能的重要手段。要求高性能、高可靠性的零件往往要求采用塑性成形加工。

金属的连接可以采用机械的方法(栓接、铆接等)、化学粘结的方法和焊接方法。其中金属的焊接在现代工业中具有最为重要的意义。它是采用适当的手段使两个分离的固态物体产生原子(分子)间结合而连接在一起的加工方法。飞机、船舶、钢铁大桥、电站锅炉、石化储罐、输油管线等大型工业产品离不开焊接。塔形齿轮的制造、汽车的组装、微电子线路的连接也离不开焊接。现代焊接工艺方法的种类之多、发展之快使得需要用分“族系”的方法进行分类。焊接技术发展的需求还直接推动了工业机器人、激光加工等先进技术的发展。对焊接件性能的要求,对焊缝区组织性能的研究,也直接推动了材料疲劳、断裂等学科的发展。

从以上几个例子可以看到,材料加工的方法不仅种类繁多,特点各异,工艺更多,而且在不断发展。想用列举的方法来介绍什么是材料加工将是无穷尽的。但

是,如果分析各种加工方法的本质就会发现,所有加工方法均是成形与控性的结合。抓住了这个本质,就可以在统一的框架下讨论材料加工的原理。

1.2 材料加工的意义和作用

人类加工并使用材料是人类社会文明发展的标志。人们习惯于用石器时代、青铜时代和铁器时代来代表古代人类文明史的不同阶段,而我们现在正亲身经历着从加工使用钢铁向加工使用以硅芯片为代表的电子材料,以碳纳米管为代表的纳米材料,以单晶叶片为代表的高温材料,以 Si_3N_4 , SiC , TiO_2 等为代表的先进陶瓷,以纤维增强树脂、金属和陶瓷为代表的复合材料……这样一个加工和使用新材料的时代转变的重要时期。20 世纪 70 年代,人们把信息、材料和能源誉为当代文明的三大支柱。80 年代以高技术群为代表的新技术革命,又把新材料、信息技术和生物技术并列为新技术革命的主要标志。90 年代,包括材料加工、成形新技术等内容的先进制造技术被列入美国“国家关键技术计划”。任何新材料必得经合适的加工制造方能应用。最先进的信息技术、生物技术只有与加工制造过程结合而转化成商品才能服务于社会。一个世界性的先进加工制造技术复兴的时代正在来临。

材料加工在人类历史进程中起着重要的作用。材料加工技术的进步,是人类社会文明发展的标志,是强盛国力和现代国防的保证,是提高人民生活水平的技术基础。

1.2.1 材料加工技术与人类社会文明发展的关系

人类最早使用的工具也许是树枝和石头,采用的方法是折和捡,不存在加工。大约一万年以前,人类开始对石头进行加工,使之成为精致的器皿或工具。这可能是材料加工技术的发源和第一次进步。人类社会随之从旧石器时代进化到新石器时代。大约在八千至九千年以前,处于新石器时代的人类发明了用粘土成形、用火烧固化而成为陶器的技术。历史上虽无陶器时代的名称,但制陶技术和陶瓷的应用,对人类文明进步的贡献是不可估量的。在烧制陶器的过程中,偶然发现了金属铜和锡,随之就出现了青铜铸造技术,人类社会也进入了一个新的时代——青铜时代。公元前 3 世纪,青铜时代已进入鼎盛时期。从那时到 18 世纪工业革命的开始,人类社会的文明进步缓慢,尽管早已开始使用铁器,人类社会也可以说进入了铁器时代,但加工水平低,使用量也不大,对社会进步不足以产生革命性的推动。根本的原因是当时的材料加工技术一直停留在技艺的发展水平,缺乏科学的理论指导,也不能广泛传播,靠的是师傅传徒弟的技艺传递方式。不仅不能保证一代比一代不断进步,而且好的技艺非常容易失传。19 世纪转炉和平炉炼钢的发明,相

应的钢铁加工技术与应用飞速发展,导致人类社会进入了一个前所未有的高速发展新时代。也是在这个时代,材料加工才可能从技艺发展成为建立在科学基础上的现代技术。19世纪60年代金相技术的发明,使人类可以从内部组织的角度来认识材料,了解组织结构决定材料性能的科学知识,让材料加工不仅改变材料的外部形状,同时控制内部组织与性能。金相原理也是现代金属学乃至整个材料科学的发源地。材料科学研究材料的组织、结构与性能的关系。建立在材料科学基础上的材料加工技术就是现代材料加工。它已不仅仅是一种技艺,而是包括有科学的原理。它属于材料工程。材料科学与工程研究材料的组成、结构、加工过程、材料性能与使用效能以及它们之间的关系。因而把组织与成分(composition-structure)、制备与加工(synthesis-processing)、

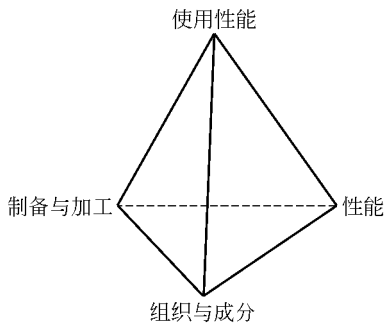


图 1-1 材料科学与工程四要素

性能(properties)及使用性能(performance)称为材料科学与工程的四个基本要素。把四要素连接在一起,便形成了一个四面体(见图 1-1)。因此,材料加工技术的发展不仅推动了人类社会文明的进步,也直接推动了科学技术,尤其是材料科学的产生和发展。

性能(properties)及使用性能(performance)称为材料科学与工程的四个基本要素。把四要素连接在一起,便形成了一个四面体(见图 1-1)。因此,材料加工技术的发展不仅推动了人类社会文明的进步,也直接推动了科学技术,尤其是材料科学的产生和发展。

1.2.2 材料加工技术与国防实力的关系

越王勾践,卧薪尝胆,三千越甲吞吴雪恨的故事流芳百世。除胆略、意志、计谋等方面的因素之外,高超的材料加工技术所制造的兵器也是帮助勾践复仇的重要保证。图 1-2 所示为 1968 年出土的越王勾践剑,其优美的剑身和优良的性能,令在现代技术背景下的人们也叹为观止。历史上著名的“大马士革剑”制造技术的发明(以高碳锋钢为剑锋,以低碳软钢为剑背复合锻造而成),是中东会出现一个叙利亚帝国的重要原因。从 1840 年鸦片战争开始的一百多年中,帝国主义列强的坚船利炮,让中国人民蒙受了巨大牺牲和屈辱。用定向凝固方法制造的单晶高温合金叶片(见图 1-3),使美国的战机可以用 3 马赫以上的速度巡航,成为美国军事实力傲视全球的重要资本。2003 年 10 月 15 日,中国“神舟”五号载人飞船成功发射和返回,圆了中华民族千年已久的飞天梦。观看返回舱降落的人,即使外行也能发现,没有先进的材料加工制造技术作保证,人类美好的飞天愿望永远只能是梦。和平与发展是人类社会当前面临的主题,没有先进加工制造技术打造的现代化装备武装的国防力量作保证,和平与发展只能是美好的愿望。



图 1-2 越王勾践剑

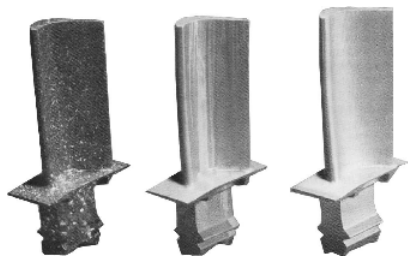


图 1-3 等轴晶、柱状晶和单晶叶片

1.2.3 材料加工技术与人民生活水平的关系

坐在家中观看大屏幕电视的人们,也许不会在意大屏平面直角显像管是怎样加工制造的。当你埋怨圆珠笔漏油的时候,不会知道珠与笔尖配合加工制造技术的难度。全世界每年消耗易拉罐饮料 100 亿听以上,很少有人知道是生产易拉罐的深拉伸技术给我们的生活带来了巨大的方便。现代喷气式飞机可以在 1~2 天内带我们到世界上的任何地方。越来越普及的小汽车让我们生活得更方便和舒适。我们希望飞机飞得更快,小汽车造得更轻、更省油、少污染。现代汽车制造和飞机制造集中体现了材料加工的技术水平,也直接决定着当代社会的发展水平和人们的生活质量。

一些仿真产品给人们带来的方便和生活水平的提高,其使用者确是可以实实在在感受得到的。如带陶瓷涂层的金属假牙(牙套),不仅可以与真牙同色,而且其使用效果也可以与真牙一样。用钛合金制造的人工骨(见图 1-4)与人体组织有很好的相容性,为成千上万的肢残者带来了福音。生物材料的加工技术正在发展成为现代材料加工技术的一个重要分支。

高温超导自 1986 年发现到现在已有近 20 年的历史,但仍不能普遍应用于电力输送,主要的原因就是因为没有找出廉价而稳定的加工制造线材的技术路线。 C_{60} 在发现之初被认为用途十分广泛,研发工作热极一时,但



图 1-4 钛合金人工骨

至今仍处于科研阶段。新材料也好,新技术、新发明也好,要真正能够服务于提高人民的生活水平,有赖于把它们用于生产产品的加工制造技术的发展。材料加工是新材料应用的技术基础。

1.3 材料加工原理的课程内容

1.3.1 课程定位

材料加工原理课程的定位决定于对材料加工学科的认识。从前面关于材料科学与工程四要素的介绍中,我们已经知道材料加工是材料科学与工程的重要组成部分。我国在学科分类中,把材料科学与工程学科(一级)分为材料物理与化学、材料学及材料加工工程等三个二级学科。因此,材料加工就属于材料工程研究的范畴。材料加工与材料学以及材料物理与化学的关系极为密切。材料的结构与性能对材料加工过程有十分重要的影响。如塑性变形加工对材料在固态时的变形能力有较高的要求,高强度材料尤其是脆性材料就不适于塑性变形加工;采用液态成形加工要求合金熔体有很好的流动性,因而共晶成分或接近共晶成分的合金,由于熔点低、流动性好,最适合于液态成形加工。同时,铸造、塑性加工、焊接等材料加工过程反过来对材料的结构与性能有直接的,有时甚至是决定性的影响。从材料科学的原理出发,材料加工原理主要阐述材料加工过程中材料的组成、结构与性能的变化规律,探讨在材料加工过程中改善材料组织与性能的途径和方法。另一方面,材料加工的目的是把材料制造成可供使用的产品,它是制造技术的一部分。有人把先进材料加工技术、机电一体化技术和网络信息技术看成是先进制造技术的三大支柱。因此,讨论材料加工原理,必须与制造技术或者说具体的加工方法相联系,不能脱离加工方法谈原理,否则就是无的放矢。材料加工是材料学科与机械制造学科的结合部,是一个典型的交叉学科。材料加工原理讨论在加工制造过程中的内在变化规律(原理)。与具体的材料加工工艺不同的是,材料加工原理注重材料加工过程中的组织与性能变化,而不是外形和尺寸的变化。本课程是材料加工工程学科的主干课程。

1.3.2 课程内容

材料加工的工艺方法千变万化,不同的材料要用不同的加工方法,同样的材料制造不同的产品也要用不同的加工方法。本课程不针对具体的加工工艺,而根据加工过程中材料所处或经历的状态,分为液态加工(材料处于液态)、凝固加工(加工过程中发生液态 \rightarrow 固态转变)、半固态加工(成形过程中材料处于半固半液状态)、固态变形加工、连接加工、表面加工等几类,讨论加工过程中材料的结构、性

能、形状随外加加工条件而变化的规律。由于金属材料仍是目前人类使用的主要材料,本书的内容以金属材料加工为主线展开,兼顾其他种类材料的加工,内容涉及物理冶金、化学冶金、力学冶金以及热量传输、动量传输、质量传输等基础理论和专门知识。在材料的加工过程中往往发生多种物理化学现象,涉及物质和能量的转移和变化。本书的内容就是要阐释这些现象的本质,揭示变化的规律,使学习者掌握材料加工的实质,为理解和解决材料加工过程中发现的新问题,发展新的加工技术奠定理论基础。

本书是为材料加工工程(或材料成形和控制工程)专业本科三年级学生编写的教材。学习本课程要求有物理化学、工程材料、传输原理、工程力学等先修课的知识基础。与本课程配合的还有《材料加工系列实验》课程和后续课程《材料加工工艺》,它们一起构成材料加工工程专业本科教学的主干课程系列。

习 题

1. 请分析材料加工的内容范围与学科定位。
2. 材料加工在现代社会中起什么作用?

参 考 文 献

- 1 冯端,师昌绪,刘国治. 材料科学导论. 北京: 化学工业出版社,2002
- 2 田长浒. 中国铸造技术史(古代卷). 北京: 航空工业出版社,1995
- 3 Schey J A. Introduction to Manufacturing Processes (3rd Edition). McGraw-Hill,2000
- 4 Smith W F. Principles of Materials Science and Engineering (3rd Edition). McGraw-Hill, International Edition,1996

2

液态金属及其加工

几乎所有金属制品在其生产制造过程中都要经历一次或多次熔化和凝固过程。金属处于液态时的性状对后续的加工过程和制成品的内部组织与性能会有重要的影响。通过对液态金属进行适当的加工处理,如晶粒细化处理、孕育、球化处理、变质处理、过热处理、微合金化处理等,会对金属液的状态产生重要的影响,显著改变金属液凝固时的热力学和动力学,从而实现大幅度改善和控制金属制品性能的目的。如不经液态加工处理的铸铁液,其凝固制品的强度只有约 100MPa,且没有任何塑性(延伸率为 0),而若在液态下进行适当的孕育和球化处理加工,其制品的强度就可以提高到 400~900MPa,同时还可以使铸铁的延伸率从近乎零增加到 20%以上。金属液态加工技术的发明和发展,是 20 世纪材料加工技术的重大成就。本章首先讨论液态金属的结构与性质,分析和比较金属从固态熔化为液态时的体积和结构变化,液态金属的粘度与表面张力及其影响因素;然后讨论金属从液态向固态转变的热力学和动力学条件,主要是凝固结晶过程中形核与长大的规律及固液界面的结构与形态;在此基础上,阐述两类金属液态加工处理,即影响金属结晶过程形核的加工处理和影响结晶过程晶体长大的加工处理的原理和方法,在产品成形制造之前就实现对最终组织和性能的预先控制。

2.1 液态金属的结构和性质

液态是物质处于固态和气态之间的中间状态。目前人类对液态物质的认识远没有对气态和固态的认识深入。气态是组成物质的原子或分子充满整个空间或容器的无序态。绝大多数固态物质是晶体,其组成物质的原子或分子在空间呈周期性规则排列,是一种高度有序的状态。那么液态呢?是有序的还是无序的?这是本节要讨论的主要内容。

材料加工过程中遇到的液态金属都是从固态熔化而不是从气态液化得到

的。另外,从温度上看,材料加工过程中遇到的液态金属的温度不会超过其熔点 T_m 200~300℃。表 2-1 列出了几种常用金属的熔点与沸点。从表 2-1 可以看出,除 Mg,Zn 等少数金属外,液态金属的温度总是接近熔点而远离沸点的。因此,有理由相信,液态金属应该接近固态而不是气态。

表 2-1 几种常用金属的熔点与沸点 ℃

金属	Sn	Zn	Mg	Al	Ag	Cu	Mn	Ni	Fe	Ti
熔点 T_m	231	419	649	660	960	1084	1224	1455	1536	1660
沸点 T_b	2750	911	1105	2500	2164	2570	2050	2890	2876	3260

2.1.1 金属从固态熔化为液态时的变化

首先让我们来看一看金属熔化时的体积变化。表 2-2 是常用金属熔化时的相对体积变化 $\frac{V_L - V_S}{V_S}$, 其中 V_L 和 V_S 分别为液态和固态时的比体积(比体积 = $\frac{1}{\text{密度}}$)。

表 2-2 几种常用金属熔化时的体积变化 %

金属	Sn	Zn	Mg	Al	Ag	Cu	Fe	Ti
$(V_L - V_S)/V_S$	2.6	6.9	4.2	6.6	4.99	4.2	4.4	3.2

从表 2-2 可以看到,金属熔化时的体积增量在 3%~7% 的范围内。而金属从绝对零度到熔点温度的固态体积膨胀量几乎都是约 7%。图 2-1 是金属的热膨胀系数与熔点温度的关系。若按体积膨胀 7% 计算,则有

$$\alpha_V T_m = 0.07 \quad (2-1)$$

$$\alpha_l T_m = 0.0228 \quad (2-2)$$

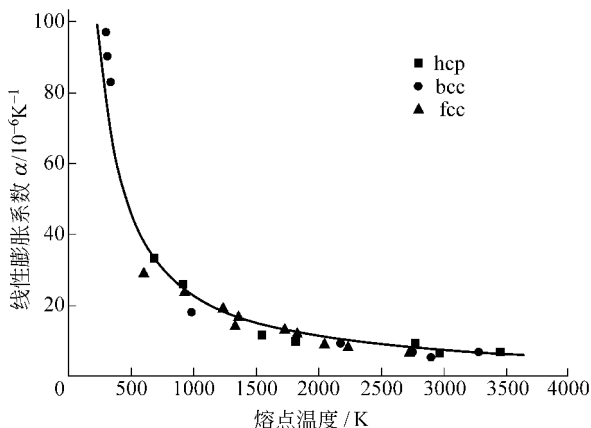


图 2-1 金属的热膨胀系数与熔点温度的关系

式中, α_v 和 α_l 分别为金属的平均体膨胀系数和平均线膨胀系数。

图中实线就是按 $\alpha_l T_m = 0.0228$ 作出的, 可见大多数金属的 α_l 均在该线附近。因此, 金属熔化时的体积膨胀一般不超过固态时的体积变化总量。固态金属的结构可以看作由理想的晶体结构加上缺陷(空穴、间隙原子、位错、晶界等)组成。随着温度的升高, 固态金属中缺陷的数量增加, 活动性增大。当超过熔点温度时, 缺陷的巨大数量和活动性终于使固体结构溃散。但由于体积变化不大, 液态金属的结构不可能变为完全无序。

从金属键的本质可知, 金属原子的结合主要靠带正电荷的离子和在正离子之间迅速运动着的公有电子之间的静电引力。同时, 由于存在正离子之间以及电子之间的静电斥力, 原子间存在着一定的作用力之间和能量之间的平衡关系。在一定的温度下, 这些作用力和能量的大小与原子之间的距离有关, 可用图 2-2 所示的双原子模型来表示。当 B 原子与 A 原子的距离为 R_0 时, 引力与斥力相等, B 原子所受合力为零, 势能 W 最小, B 原子处于最稳定的状态。

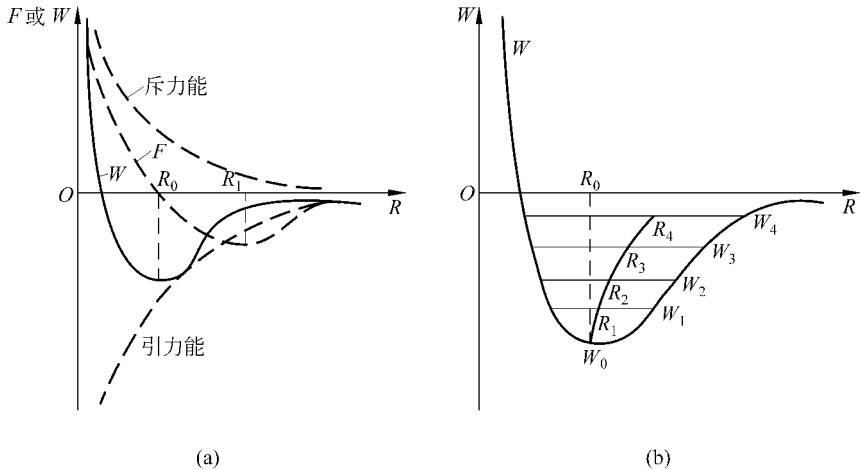


图 2-2 双原子作用模型

(a) 原子间的作用力; (b) 加热时原子间距和原子势垒的变化

由于随距离的缩短斥力比引力增长得快, 当 $R < R_0$ 时, B 原子受到的合力是 A 原子的斥力, 而且距离进一步缩短时, 斥力增加很快。受斥力场的作用, 势能随之增加。从力的作用看, 斥力趋向把 B 原子推回 R_0 处。而用能量的观点, 则是 B 原子趋向于降低势能。同样, 由于随距离的增加, 斥力比引力减小得快。当 $R > R_0$ 时, B 原子受的合力是引力, 势能也倾向使两原子趋向接近。因此, R_0 是两原子之间的平衡距离。如果假定 A 原子固定, 则 B 原子以 R_0 为平衡位置。任何偏离平衡位置都引起原子所受引力和斥力的不平衡, 势能升高, 最后仍趋向势能最低的平