

清华大学材料加工系列教材

材料加工原理

Principle of Materials
Processing

主 编 李言祥

副主编 吴爱萍



清华大学出版社

清华大学材料加工系列教材

材料加工原理

Principle of Materials Processing

主 编 李言祥

副主编 吴爱萍

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书讨论加工过程中材料的结构、性能、形状随外加工条件而变化的规律。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,本书就是要阐述这些现象的本质,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所发现的问题,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)专业本科高年级学生编写的教材。除作教材外,还可供从事冶金、铸造、锻压、焊接等专业的工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

材料加工原理/李言祥主编. —北京:清华大学出版社,2005.10

(清华大学材料加工系列教材)

ISBN 7-302-11596-6

I. 材… II. 李… III. 工程材料—加工—理论—高等学校—教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 095809 号

出 版 者: 清华大学出版社 地 址: 北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 客户服务: 010-62776969

组稿编辑: 宋成斌

文稿编辑: 赵从棉

印 装 者: 北京嘉实印刷有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 175×245 印张: 18 字数: 363 千字

版 次: 2005 年 10 月第 1 版 2005 年 10 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-11596-6/TB·92

印 数: 1~3000

定 价: 30.00 元

序言

材料加工技术是制造业的关键共性技术之一,也是生产高质量产品的基础。材料加工技术在制造业及国民经济中具有十分重要的作用和地位,从普通机械到重大装备,从交通运输到航空航天,从日常生活到军事国防,几乎任何产品的制造都离不开材料加工技术。

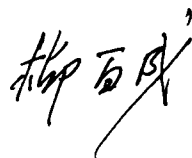
将材料制造成产品的加工方法种类繁多,如铸造、压力加工、焊接、粉末冶金、热处理等。但它们有一个共同的特点,即在制造过程中,不仅材料的外部形状和表面状态发生改变,而且材料的内部组织和性能也发生巨大变化。材料加工的目的不仅是赋予材料一定的形状、尺寸和表面状态,而且决定材料变成产品后的内部组织和性能。

我国在学科分类中,把材料科学与工程学科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。清华大学是全国高校中最早按“材料加工工程”二级学科对原有的铸造、焊接、锻压等几个专业的课程设置、教学内容进行合并与重组的学校之一。经多位教师几年的努力,通过对几届学生的教学实践,形成了目前的《材料加工原理》、《材料加工工艺》和《材料加工系列实验》系列课程与教材。

《材料加工原理》是多位在教学一线工作的教师多年辛勤努力的成果。编者从科学原理出发,阐述材料加工过程中材料的组成、结构与性能的变化规律,探讨材料加工过程中减少和消除缺陷、改善材料组织与性能的途径和方法。既形成了铸造、压力加工、焊接等传统材料加工方法的共性基础,也提供了发展材料加工新方

II 材料加工原理

法、新工艺的技术基础,较好地体现了融合拓宽专业、加强共性基础、注重学科交叉、培养通用人才的教学改革思想。希望本教材在今后的教学实践中,不断得到改进和完善,成为精品教材。



中国工程院院士

清华大学教授

2005 年 2 月

前言

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叫材料加工。

现代材料加工的方法种类繁多,如铸造、压力加工、焊接、粉末冶金、喷射成形、表面处理、相变热处理,等等。有些方法已经有几千年的历史,如铸造、锻压、热处理等。但在 20 世纪以前,这些材料加工技术一直停留在技艺的水平。随着物理学、化学、冶金学、材料学、弹塑性力学以及传热、扩散、流体力学等传输科学的发展和在材料加工技术中的应用,人们才逐渐认识了材料加工过程中材料的成分、组织、形状、性能、使用效能等变化的规律。现代材料加工不仅要赋予材料一定的形状、尺寸和表面状态,而且决定和控制材料变成产品后的内部组织和性能。材料本身的结构与性能对材料加工过程也有十分重要的影响,如塑性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成形。采用液态成形方法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,最适合于铸造成形。同时,铸造、塑性成形、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。本书从物理、化学、力学、冶金和材料学的基本原理出发,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。材料加工过程中的组织转变、温度场和应力场的变化以及缺陷的形成与控制是本书要讨论的主要内容。

IV 材料加工原理

在我国的高等学校中,从 20 世纪 50 年代开始,仿照前苏联的模式,将材料加工分为铸造、锻压、焊接等单一的专业,相应分别开设铸造原理、塑性成形原理、焊接冶金原理等专业课程。随着社会的发展和技术的进步,过窄的专业设置已经不能适应当今注重学科交叉、培养通用人才的教学改革思想。为了更好地融合拓宽专业,加强共性基础,1989 年,清华大学机械工程系将原来的铸造、锻压、焊接、金属材料与热处理四个专业合并为“机械工程及自动化”专业,同时开设材料加工原理课程,并编写出版了《近代材料加工原理》一书(清华大学出版社,1997 年 3 月)。1999 年教育部对专业设置目录进行了调整,把原来的铸造、锻压、焊接、金属材料与热处理四个专业合并为“材料成形与控制”专业。从 1999 年秋开始,清华大学机械工程系在本科开设了“材料加工原理”和“材料加工工艺”两门主干必修课。2001 年根据加强教学实践环节的需要又加设了“材料加工系列实验”课,形成目前的材料加工系列课程。

本书是在多年教学实践的基础上,根据材料加工系列课程的总体要求和课程分工重新编写的。其中第 1,2 章及第 3 章的 3.1,3.2 节由李言祥教授编写,第 4 章由朱跃峰副教授编写,第 5 章及第 3 章的 3.3,3.4 节由李文珍副教授编写,第 6 章由邹贵生副教授编写,第 7 章由吴爱萍教授编写。本书初稿完成后,2004 年曾在清华大学机械工程系进行了试用,然后在初稿基础上由李言祥教授(第 1~4 章)和吴爱萍教授(第 5~7 章)统一修改定稿。本书在编写过程中得到了材料加工系列课程负责人黄天佑教授的指导和帮助,助教博士生张华伟同学在文稿编排过程中做了许多工作,一并致谢。

本书的编辑出版得到了清华大学“985”教材建设项目和清华大学百门精品课程建设项目的资助。

李言祥

2005 年 2 月于清华园

目录

1 绪论	1
1.1 什么是材料加工	1
1.2 材料加工的意义和作用	3
1.2.1 材料加工技术与人类社会文明发展的关系	3
1.2.2 材料加工技术与国防实力的关系	4
1.2.3 材料加工技术与人民生活水平的关系	5
1.3 材料加工原理的课程内容	6
1.3.1 课程定位	6
1.3.2 课程内容	6
习题	7
参考文献	7
2 液态金属及其加工	8
2.1 液态金属的结构和性质	8
2.1.1 金属从固态熔化为液态时的变化	9
2.1.2 液态金属的结构	12
2.1.3 液态金属的性质	16
2.2 液态金属结晶凝固的热力学和动力学	24
2.2.1 金属液—固转变的热力学条件	24
2.2.2 均质形核	27
2.2.3 异质形核	29
2.2.4 晶体长大	32
2.3 液态金属的冶金处理	36

VI 材料加工原理

2.3.1 影响形核的冶金处理	37
2.3.2 影响晶粒长大的冶金处理	43
习题	47
参考文献	47

3 材料加工中的流动与传热

49

3.1 液态金属的流动性和充型能力	49
3.1.1 液态金属的流动性与充型能力的基本概念	50
3.1.2 液态金属的停止流动机理	50
3.1.3 液态金属充型能力的计算	51
3.2 液态金属凝固过程中的流动	53
3.2.1 凝固过程中液体流动的分类	53
3.2.2 凝固过程中液相区的液体流动	55
3.2.3 液态金属在枝晶间的流动	57
3.3 材料的流变行为	58
3.3.1 材料的简单流变性能	58
3.3.2 材料的复杂流变性能	60
3.3.3 合金的流变性能	64
3.3.4 材料的半固态加工	65
3.4 材料加工中的热量传输	67
3.4.1 凝固传热	67
3.4.2 焊接过程的传热特点	75
习题	79
参考文献	79

4 金属的凝固加工

80

4.1 概述	80
4.1.1 凝固理论及应用简介	80
4.1.2 凝固过程的类型	81
4.2 凝固过程中的传质	82
4.2.1 溶质分配方程	82
4.2.2 凝固传质过程的有关物理量	83
4.2.3 稳定传质过程的一般性质	85
4.3 单相合金的凝固	86
4.3.1 平衡凝固	87

4.3.2 近平衡凝固	89
4.4 界面稳定性与晶体形态	97
4.4.1 合金凝固过程中的成分过冷	97
4.4.2 成分过冷对单相合金结晶形态的影响	101
4.5 多相合金的凝固	106
4.5.1 共晶合金的凝固	106
4.5.2 偏晶合金的凝固	114
4.5.3 包晶合金的凝固	115
4.6 凝固组织与控制	118
4.6.1 普通铸件的凝固组织与控制	118
4.6.2 定向凝固条件下的组织与控制	125
4.6.3 焊缝的凝固组织与控制	130
习题	136
参考文献	137

5 材料加工力学基础 138

5.1 应力状态分析	138
5.1.1 基本概念	138
5.1.2 直角坐标系中坐标面上的应力	139
5.1.3 任意斜面上的应力	141
5.1.4 主应力及应力张量不变量	142
5.1.5 主剪应力和最大剪应力	145
5.1.6 应力球张量和应力偏张量	147
5.1.7 八面体应力和等效应力	149
5.1.8 应力莫尔(Mohr)圆	151
5.1.9 应力平衡微分方程	152
5.2 应变状态分析	154
5.2.1 应变的概念	154
5.2.2 应变与位移的关系(小变形几何方程)	157
5.2.3 应变张量分析	158
5.2.4 应变协调方程	161
5.3 屈服准则	162
5.3.1 Tresca 屈服准则	163
5.3.2 Mises 屈服条件	163
5.3.3 屈服准则的几何表示	165

5.4 塑性变形时的应力应变关系(本构方程)	167
5.4.1 物体变形时应力应变关系的特点	167
5.4.2 弹性应力应变关系	168
5.4.3 塑性变形的增量理论	169
5.5 主应力法及其应用	171
5.5.1 主应力法的概念	171
5.5.2 长矩形板锻造时的变形力和单位流动压力	171
习题	173
参考文献	175

6 材料加工过程中的化学冶金

6.1 概述	176
6.1.1 材料加工过程中的化学冶金问题	176
6.1.2 材料加工过程中的化学冶金特点	177
6.2 气体与液态金属的反应	180
6.2.1 气体的来源	180
6.2.2 氮对金属的作用	183
6.2.3 氢对金属的作用	186
6.2.4 氧对金属的作用	193
6.3 熔渣与液态金属的化学冶金反应	198
6.3.1 熔渣	198
6.3.2 活性熔渣对金属的氧化	206
6.3.3 脱氧处理	208
6.3.4 渗合金反应	214
6.3.5 金属中硫和磷的作用及其控制	216
6.4 金属固态热加工中的冶金反应	221
6.4.1 金属表面氧化	222
6.4.2 表面脱碳与增碳	224
6.5 热加工过程中的保护措施	227
6.5.1 控制气氛	227
6.5.2 真空	229
习题	231
参考文献	232

7 加工引起的内应力和冶金质量问题	233
7.1 内应力形成的原因及其影响	233
7.1.1 内应力形成的原因	233
7.1.2 内应力的影响	235
7.1.3 内应力的防止和消除	235
7.2 主要冶金缺陷	236
7.2.1 偏析	236
7.2.2 非金属夹杂物	240
7.2.3 缩孔与缩松	242
7.2.4 气孔	244
7.2.5 氢白点	248
7.2.6 热裂纹	251
7.2.7 冷裂纹	259
7.2.8 应力腐蚀裂纹	267
7.3 加工引起的金属脆化	272
7.3.1 过热脆化	272
7.3.2 组织脆化	272
7.3.3 杂质引起的脆化	274
习题	275
参考文献	276

1

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、

2 材料加工原理

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,现在也是塑料成型的主要方法。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

4 材料加工原理

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)、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。

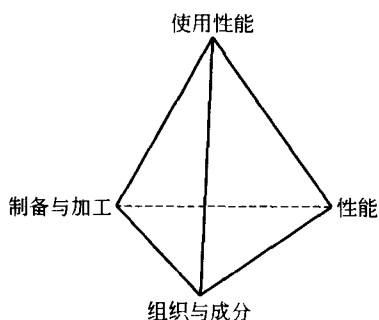


图 1-1 材料科学与工程四要素

使用性能
性能
组织与成分
制备与加工

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

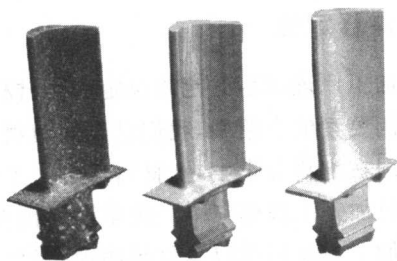


图 1-3 等轴晶、柱状晶和单晶叶片

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延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