

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 材料对人类文明、社会进步的意义	1
1.2 材料科学及材料加工技术的发展概况与趋势	5
1.3 《近代材料加工原理》的任务与内容	11
第 2 章 液态金属	13
2.1 导论	13
2.2 热力学与统计力学的基本公式	14
2.3 刚球模型与 PY 理论	16
2.4 液体状态方程式	19
2.5 液体金属性质	21
2.6 液态金属的流动	31
2.7 合金的流变行为	44
第 3 章 液态金属——熔池的化学冶金	49
3.1 概述	49
3.2 金属加工过程中的杂质污染	50
3.3 金属加工过程中的冶金处理和保护	60
第 4 章 凝固过程的温度场	76
4.1 Fourier 热传导方程	76
4.2 厚度为 l 的无限大平板的温度场	78
4.3 在 $x \geq 0$ 的半空间的温度场	81
4.4 器壁中的温度分布	82
4.5 凝固时间的确定	83
4.6 晶前移动——凝固层厚度的确定	86
4.7 铸件凝固温度场	87
4.8 焊接过程温度场	99
第 5 章 液态金属的凝固	109
5.1 凝固过程	109
5.2 形核	112
5.3 晶体长大	117

5.4	单相合金的凝固	125
5.5	共晶合金的凝固	136
5.6	快速凝固	139
5.7	微重力(太空失重)下的凝固	145
第6章	塑性加工力学基础	150
6.1	应力状态与应变状态分析	150
6.2	基本实验资料与变形体的模型	160
6.3	屈服条件的概念	166
6.4	两种常用的屈服条件	170
6.5	Tresca 及 Mises 屈服条件的比较	172
6.6	形变理论	175
6.7	简单加载定理	181
6.8	卸载问题	183
6.9	圆轴扭转问题	184
6.10	Levy-Mises 理论	188
6.11	Prandtl-Reuss 理论	191
第7章	塑性理论的应用	196
7.1	塑性平面应变问题	196
7.2	滑移线的概念	203
7.3	Hencky 应力方程	204
7.4	滑移线的基本性质	207
7.5	应力的边界条件	209
7.6	厚壁圆筒塑性变形时所需内压力的确定	212
7.7	速度场问题	215
7.8	应力间断线和速度间断线	220
7.9	半无限刚塑性体上平冲头压入	221
7.10	基本能量方程式	229
7.11	下限定理	236
7.12	上限定理	237
7.13	平冲头压入半无限体的载荷上限	239
7.14	用对称楔形模进行板料挤压的上限计算	242
7.15	主应力法及其应用	244
7.16	塑性加工中的成形规律	248
第8章	加工引起的内应力和冶金质量问题	261
8.1	内应力形成原因及其影响	261

8.2	主要冶金缺陷	263
8.3	加工引起的金属脆化	291
第9章	金属的切削加工原理	295
9.1	切削过程的滑移线场	295
9.2	切屑的形态	301
9.3	已加工表面形成机理及表面质量	305
第10章	粉末冶金原理	312
10.1	粉末冶金概论	312
10.2	粉末的制取及特性	316
10.3	粉末的成形	322
10.4	烧结	328
10.5	粉末冶金新技术	333
第11章	现代表面技术原理	338
11.1	气相沉积原理及应用	338
11.2	电沉积原理及其应用	350
11.3	热喷涂原理及其应用	351
11.4	表面非平衡冶金强化原理及其应用	358
11.5	表面合金化原理及其应用	364
参考文献		370

第1章 绪 论

1.1 材料对人类文明、社会进步的意义

1.1.1 材料的发展是人类文明史的里程碑

材料是人类社会所能接受、经济地制造有用器件的物质。

人类的文明史是以材料划分的,它经历了石器时代,青铜器时代(包括红铜和青铜时代)和铁器时代,现在进入了人工合成材料的新时代。

石器时代经历了 200 万年至 300 万年。由红铜时代到青铜时代经历了大约 1600 年;由青铜器时代进入到铁器时代又经历了 1000 年。由铁器时代开始,至今已经历了约 5000 年。这也就是说,随着金属冶炼被人类应用的发展,人类由石器应用的几百万年缩短至金属材料(青铜器与铁器时代)应用的几千年。由此,可以预料,在近代材料的发展中,各种合成材料将以更高的速度发展,它们在人类文明社会中将起怎样的作用,这将由历史学家以及材料科学家进入 21 世纪以后评价。

应该说,人类进入文明社会是以使用金属材料(铜与铁)开始的。世界上最早的文明古国都曾先后进入了青铜器时代。早在公元前 4000 年,古埃及人便掌握了炼铜技术。我国用矿石炼铜始于公元前 2000 年(夏代早期)。晚商和西周是我国青铜时代的鼎盛时期,重达 875kg 的“司母戊”大方鼎,迄今仍珍藏在我国博物馆里。铜是人类最先使用的金属,在青铜器时代,铁比铜要宝贵,这是因为当时炼铜比炼铁更容易;并且,在地球表层中往往有呈自然金属状态存在的自然铜,以“露头”形式存在,因而容易被发现与开采。

人类最早使用的铁是陨石铁(又称自然铁,也叫陨铁)。古埃及在至今 5000 年以前的前王朝时期,曾用含镍 7.5% 的陨石铁做成铁珠。陨石铁的主要成分是铁和镍,一般含量在 98% 以上,其中含镍量为 4%—20%,余为铁,其它杂质元素中除含钴 0.3%—1.0% 以外,磷、硫和碳的含量是极低的(含 P 0.1%—0.3%;含 S 0.2%—0.6%;含 C 0.01%—0.2%)。

陨石铁来自宇宙空间,从被撞击的陨石坑数来看,地球至少经受过 139 次重大撞击,每年新发现的陨石坑有 5—6 个。1994 年 7 月 17 日苏梅克—列维 9 号彗星按照科学家一年前的精确计算(误差只有几分钟),准确地与木星相撞。这是人类历史上第一次观察到的宇宙奇观。这个彗星直径 10km,重达 5000 亿 t,它的碎块以 210000km/h 的速度撞击木星。彗星总加起来的撞击能量相当于 400000 亿 t TNT 爆炸。在 6500 万年以前,地球曾遭受到彗星的一次严重撞击,由此可能导致了恐龙的灭绝。科学家们预测,公元 2126 年 8 月 14 日,斯威夫特—塔特尔彗星将有万分之一的几率与地球相撞,届时又将有大的陨石从天而降。另外,1994 年 9 月 18 日发现的麦克霍兹 2 号彗星的碎块现正朝着地球方向前进。

从美索不达米亚出土的文物证明,在公元前 3000 年就有了铁器;在公元前 2000 年就知道了铸铁技艺。尽管古希腊人和罗马人在很有限的范围知道铸铁的技艺,但是他们在早期对铸铁的应用,远不能和中国古代所掌握的铸铁技术和发展应用相比拟。我国重达 270kg 的铸铁刑鼎是公元前 513 年铸造的。春秋晚期出土的有江苏六合程桥楚墓的铁丸、长沙楚墓的铁镞和铁鼎,以及战国时期韧性铸铁工艺和铁范等表明,中国生产铸铁要比其它国家早许多个世纪。中国在战国、秦、汉时期就将铁器的冶炼技术不断向外传播,战国时期传到朝鲜,汉代时期传到日本。应该说,中国在铁器时代对人类做出了贡献。

铸铁的历史经历了 5000 年的漫长岁月,只是到了瓦特发明蒸汽机以后,由于在铁轨、铸铁管制造中的大量应用,才走上了工业发展的道路,而在此以前,铸铁只用来制作祭器、艺术品、兵器和农具。

进入 15 世纪以后,欧洲的社会生产力有了长足的发展。15 世纪初,炼铁高炉首先在欧洲迅速发展。到 17 世纪,已有高达 9m、日产铁 1t 的高炉出现。炼钢技术则是在蒸汽机出现(1755 年)、能够提供强大的鼓风和动力以后才得以发展的。贝塞麦(H. Bessemer)于 1856 年发明了酸性转炉炼钢;1879 年托马斯(S. G. Thomas)发明了碱性转炉炼钢;1855 年西门子兄弟(K. W., F. Siemens)发明蓄热室以及 1864 年马丁(P. E. Martin)利用这种蓄热室发明了平炉炼钢;随后,在 1899 年赫鲁特(P. L. T. Heroult)发明了电弧炉炼钢。由此,奠定了近代钢铁工业的基础。

钢铁工业只是到了 19 世纪后半叶才得到了发展,这一方面是由于当时欧洲社会生产力和科学技术的进步,从而对钢的生产提出了要求;另一方面是由于各种炼钢方法的发明,扩大了钢的生产规模和提高了钢材质量。特别是进入 20 世纪 50 年代,由于氧气顶吹法(LD 法)炼钢技术的出现,钢的生产得到了迅速发展。从 50 年代初至 70 年代末这一段时间,全世界钢的年产量由 2.1 亿 t 增加到 7.5 亿 t。表 1-1 是以钢为主的全世界金属产量的变化。

除了钢铁以外,在此期间,有色金属也得到了发展。1866 年哈尔(C. M. Hall)发明了电解铝,至今它已成为用量仅次于钢铁的金属。1910 年用钠还原得到了纯钛,从而满足了航空工业的需求。核工业的需要促进了铀及其它核燃料的发展,而电子和半导体工业则促进了超纯材料(单晶硅等)的发展。

表 1-1 全世界金属产量变化

Mt

年代	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000
铜	7.5	11.3	13.5	16.3	23.8	32.4	61.4	82.5*	136*	206*
铝	0.181	0.937	1.88	3.9	12.7	31.1	70.9	133*	218*	356*
铅	10.7	11.2	14.2	14.6	14.9	24	33	48*	50*	61*
锌	7	8.8	11.1	13.3	17.1	27	42.3	58*	79*	102*
钢	520	700	900	1200	1700	2700	4800	6900*	10200*	13800*

* 指估算

此外,在非金属材料领域,特别是进入 20 世纪,也取得了重大进展。人工合成高分子材料从本世纪 20 年代至今,其产量之大,应用之广可以和传统的钢铁材料相比。1984 年全世界合成高分子聚合物产量已达 1 亿 t,其中包括塑料、合成橡胶和合成纤维。要指出的是,早在 1970 年世界合成高分子材料为 4000 万 t,其中除 3000 万 t 是塑料以外,橡胶产量为 500 余万 t,这已超过天然橡胶的产量;该年的合成纤维产量为 400 万 t,这和当年的天然纤维产量相当。这样快的发展速度是其它任何材料不可比拟的。

陶瓷是人类文明的象征。50 万年以前,人类学会用火以后,就开始烧制陶器,这是经过热处理改变材料性质的开始。在新石器时代,世界先后在不同地区制出了原始陶器。我国出现原始陶器可追溯距今 10000 年左右。至于玻璃的生产,早在公元前 1600 年的古埃及就已经开始。

在古希腊和罗马,已有石灰和火山灰混合成的胶结材料,而近代的硅酸盐水泥则是 1824 年由阿斯普丁发明的。混凝土用于建筑材料已有数百年历史,但在现代结构工程中所使用的混凝土则是 19 世纪的事,一次偶然的机会,一位花匠把水泥撒在花盆中,因而得到了混凝土。

最近二三十年来,随着材料科学技术的发展,陶瓷材料在冶金、建筑、机械、化工以及尖端技术领域,已成为耐高温、耐腐蚀和各种功能材料的主要来源:例如耐高温、耐腐蚀的氧化铝;将电信息转变为光信息的铌酸锂;用于切削刀具的氮化硅;具有高温超导性能的氧化钇等。

最近,欧洲航天局宣布:40 年内将向月球移民。那时的登月飞船,采用的主要材料之一将是陶瓷。因此,陶瓷材料是最古老的传统材料,又是近代发展的新材料。它和金属材料、人工合成高分子材料一起,构成了当今工程材料的三大支柱。

1.1.2 材料加工技术的发展

从地球上最早出现原始人起,材料的利用与加工就在人类的生活中占据着重要位置。在原始时代,人类部落附近的天然材料就逐渐地被利用起来,如岩石、骨骼、兽皮、木材、贝壳等。由此,就产生了这样一种观念,即大自然赋予的材料可以加工,为人类的生存服务。这也就是说,早在石器时代,人类通过材料具有的使用性,得知它们的性能、加工工艺以及它们在多种用途中的行为。从而,人类对自然界的适应性也从认识上在不断深化。

长期以来,人类用材料做工具,并发展了材料的使用性及其在美学上的吸引力,并由此积累了丰富的知识,这些知识包括材料性能、加工工艺和使用性。当然,这些知识是以实践和经验为基础的。直到产业革命以前,上述相互间的关系可以由图 1-1 中看出,在此漫长的时代中,人类是根据已有的经验知识,在得知材料性能、使用特性和工艺过程之间的关系以后,来满足社会需要的。

尽管图 1-1 中列举的材料知识是经验性的,但在陶瓷、工具、武器以及珠宝、艺术和建筑等方面均广泛地显示出这些经验的实用性。虽然当时在材料的加工工艺方面已取得了显著的成就,但在学术界却没有对材料知识的深化做出过任何贡献。由于材料太复杂,它们的性能很难预测,致使当时的学者难以应付。而此时,传统的工匠却已知道材料所起的作用,甚至通过加工工艺能得到各种使用性能,但是,对此却缺乏解释。因此,这个时代也

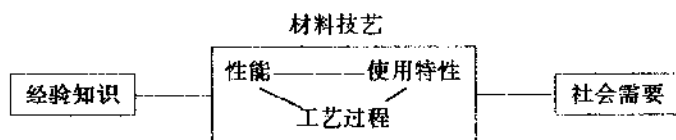


图 1-1 在未有材料科学以前的材料知识

可以称做“炼金术”时代。在此时期,有的封建皇帝曾追求“炼丹”以期长生不老,结果适得其反。从材料科学的发展来看,在产业革命以前,材料加工处于“技艺”的水平。

产业革命以后,材料的利用与加工走上了科学发展的道路,从而形成了“材料科学与工程”学科。根据美国材料科学与工程调查委员会的定义,“材料科学与工程是关于材料成分、结构、加工工艺和它们的性能与用途之间有关的知识的开发和应用的科学”。为此,可用图 1-2 中的示意图,描绘材料科学与工程的内容以及相关的联系。

图 1-2 中示出,材料科学与工程是知识的开发和知识的传输体系。这个体系包括从基础科学和基础研究直到人类社会的需要和社会的经验。它的中心内容包括在中央方框中,这就是材料的内部结构会关系到它的外部性能和使用性能。材料科学与工程不能取代、也不能限制任何学科,但它却是相关各分支学科的基础,它也促进了另外一些分支学科的相互沟通与发展。材料科学与工程通过与材料有关的基础知识,使其得到开发的机会,同时,它也把基础科学提供给实践经验和社会需要。因此,把科学知识和经验知识相互融汇贯通,这是材料科学与工程的重要特点。

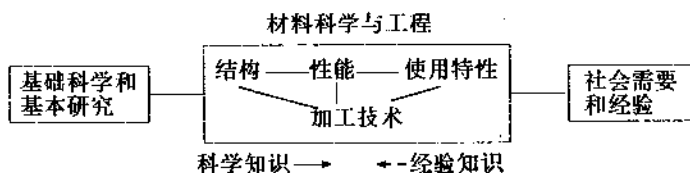


图 1-2 材料科学与工程的内容及其与科学知识和经验知识的对应关系

至今,材料加工技术作为“材料科学与工程”的重要组成部分,是建立在科学理论和近代材料检测技术的基础上,并得到了迅速发展。进入 20 世纪,理论工作者与实践工作者在材料领域汇合在一起,从而把材料外部性能和材料内部结构的研究联系了起来。他们发现了材料包含着多层结构的内在复杂体系后,才得以解释材料的复杂性。采用光学显微镜揭示了材料的组织与性能存在着联系;采用电子显微镜揭示了材料的亚结构;采用 X 射线衍射仪揭示了晶体与分子结构;俄歇谱仪提供了材料表层,特别是断口和晶界的化学成分,以及扫描隧道电子显微镜、原子力显微镜等各种先进仪器的不断涌现,因而在更深的层次揭示了材料中的奥秘。至今,用激发光谱可显示原子结构,用高能轰击可观察核结构。因此,用新揭示的材料内部结构形成了解释材料物质的科学基础。在此基础上,建立了现代的“材料科学与工程”。

这门学科的目标是:按照所需的性能,设计材料的原子或分子组成,制定相应的加工技术以达到理想的组织,并力求应用已知的科学规律,大幅度地提高现有材料的性能、效率和使用寿命。

在今后的岁月中,人类不可避免地会受到越来越大的、与材料有关的压力。我们地球上居住的空间将继续相对缩小,由于不断增长的在住房、食物、材料、能源 and 知识方面的激烈竞争,人们必然将其知识重新编组,分别列入新的学科与分支;但是,材料科学与工程作为一门独立的学科,可能会与人类共存,并继续得到发展。与此相适应,材料加工技术也必将日新月异,得到飞速的发展。

1.2 材料科学及材料加工技术的发展概况与趋势

1.2.1 核能技术与宇航技术标志着材料工程的最新成就

全世界的能源消耗在最近的 100 多年中以越来越快的速度增长。这种增长只有 3 次中断:第一次世界大战期间;1930 年前后的世界经济危机和第二次世界大战以后。此后,则以更快的速度增长。以保守的估算,能源消耗是以每年 3% 的速率在递增,其中已经考虑了现已采取的节能措施。因此,生存在地球上的人们都要节约能源。

由于地球上现在所提供的能源日益枯竭,所以由核电站提供的能源将在能源结构中占有越来越大的比例。据预测,到 2000 年,全世界核发电量将占总发电量的 28%;而在工业发达国家,核电装机将占总容量的 40% 以上,而法国的核电装机将占总容量的 78%。至今,已有 430 座核电站在全球运行。

核电站的关键部件和结构件的制作在很大程度上取决于材料加工技术所能达到的水平。以德国不来梅(Bremen)附近的核电站为例,该核电站的总功率为 1300MW,透平机由四级组成,转速 1500r/min。发电机为三相水冷,单机容量 $153 \times 10^4 \text{VA}$ 。输配电站由两个变压器组成,总功率 $148 \times 10^4 \text{VA}$,电压 $38 \times 10^4 \text{V}$ 。其主要部件均由热加工方法制造,如透平机轴长 65m,末级叶片长达 1.356m,这都是铸造和锻造加工的产品。反应堆的水流速度为 20m/s,进口温度 290℃,蒸汽量 7160t/h。反应堆压力容器为热加工工件,其上部有 4 个进水管、4 个出水管。它的总重为 483t,高 12.85m,直径 5.57m,壁厚 200~600mm。这是工艺参数要求极其严格的设备,也是加工工艺过程十分复杂的设备。

核电站的大量建成标志着人类和平利用原子能所取得的伟大成就,也为解决地球能源做出了巨大贡献,同时它也意味着材料加工技术所取得的最新成就。

1961 年 4 月 12 日,前苏联的加加林在人类历史上首次离开地球登上宇宙飞船在太空中遨游。1969 年 7 月 21 日美国人阿姆斯特朗和奥尔德林在月球上软着陆,从而实现了人类离开地球到另外星球去探险的宿愿。这是人类宇航的新纪元。

在宇航工业中,运载工具最重要的要求是应具有尽可能高的推力重力比。为此,必须采用各种轻型的材料和结构,因而与此相应的加工技术就是至关重要的。否则,有时甚至会导致灾难性的事故。

法国制造的 Ariane 火箭,可把一颗 750kg 或者更重的定点卫星送入轨道。火箭是由三级液体燃料发动机组成。火箭的一级长度为 18.387m,二级长度为 6.588m,三级长度为 5.768m,火箭的总长度则超过 47.4m。火箭的全部结构件,包括燃料箱、助燃剂箱、涡轮泵、压力瓶、壳体等均采用热加工或组合工艺技术制造。

核电站技术和宇航技术采用了许多新工艺和新技术,它们都是多学科的综合技术,是兼容各种现代科技理论的应用技术;也是材料加工技术中最复杂、最密集、最能代表材料加工技术水平的高技术领域。

1.2.2 材料的发展

材料可分成金属材料和非金属材料两大类。金属材料又可分成黑色金属与有色金属;非金属材料又可分成陶瓷材料、高分子材料和复合材料。但是,按照材料的结合键划分,可把材料分成3类:(1)金属材料;(2)陶瓷材料;(3)高分子材料。

这3种材料的主要结合键分别是金属键、离子键和共价键。这种具有实质性的划分,可以从本质上理解各种材料性能的差别。另外,还可把材料按性能划分:(1)结构材料——力学性能为主要的性能;(2)功能材料——物理性能为主要的性能。

材料是人类物质文明的基础和支柱。它支撑着其它新技术的发展。能源的开发、提炼、转化和贮运,信息的传播、贮存、利用和控制都离不开材料;航天技术、海洋工程、生物工程和系统工程都需要结构材料和功能材料。

材料一直在面临人类社会的选择,而这种选择是由社会需要所决定的。材料能否被社会所需要,这要由5个判据来决定:资源、能源、环境保护、经济和性能。当资源、能源和环境保护这3个限制条件能得到满足时,还要看材料的性能是否能满足要求,并且在经济上是合理的。

材料的发展始终处于激烈的竞争之中,首先是材料三大类(金属材料、陶瓷材料和高分子材料)之间的竞争;另外是材料大类中不同种类间的竞争,例如金属材料中黑色金属与有色金属的竞争。美国1980年汽车平均质量是1500kg,1990年则是1020kg。铸铁的比例由15%减至11%。每台车的铸铁用量由225kg降至112kg;此时铝合金由4%增至9%;高分子材料由6%增至9%。采用陶瓷材料制作汽车发动机,以取代金属材料的发动机,具有显著的技术-经济效益,陶瓷比金属能耐受更高的工作温度,因而使燃油在发动机内的燃烧效率提高,并且发动机的自重也会减轻。为此,陶瓷(复合)材料发动机的开发便在全球展开了激烈竞争。

另外,材料之间也存在着共生关系,也可以彼此相互促进,例如,高炉炼铁的炉渣,可用作水泥的原料;炼焦的副产品——炼焦油,则是重要的化工原料。

关于材料的进一步发展,可以从传统材料的改进和新材料的开发两方面讨论。

1. 传统材料的改进

已经投产和长期使用的材料,叫做传统材料。改进它们的目的在于满足消费者的要求,这就是提高性能和降低成本。

改进传统材料最有效的措施就是改进加工技术,由此可提高材料的性能,提高生产率和降低成本。氧气炼钢不仅加速了冶炼过程,而且还提高了钢液质量(含磷量降低,气体含量降低,钢材深冲性能提高);提高风温强化了高炉炼铁过程,从而降低了能源消耗,提高了铁液质量;连续铸锭和连续轧制的加工技术加速了生产,也降低了能源消耗。

新工艺的采用可导致新材料的兴起和旧材料的衰亡。例如,奥氏体不锈钢具有较高的耐蚀性,被广泛用于制作化工器件,但这些器件经焊接后,在热影响区可能有严重的晶间

腐蚀,这是与晶间碳化物的沉淀析出有关。为此,采用超低碳($C < 0.03\%$)不锈钢可以解决;但是在电弧炉中生产超低碳钢时,铬烧损多、炉龄低、成本高,因而不得不采用表面质量差的 Cr18Ni9Ti 不锈钢作为替代。但是,70 年代开始采用氩氧脱碳(AOD)技术生产超低碳不锈钢,使成本降低、质量提高,因而正在迅速取代 Cr18Ni9Ti 不锈钢。

2. 新材料的开发

(1) 能源材料

过去 30 年,燃气轮机叶片的工作温度平均每年提高 6.67°C 。工作温度提高 83°C ,就可使推力提高 20%。这样成就的取得是由于强化了镍基合金,采用了定向凝固技术所致。采用快速凝固(液态急冷)技术制取粉末和等静压成形技术,可使工作温度进一步提高。采用 Si_3N_4 或 SiC 可使叶片的长期工作温度提高到 1200°C 以上,为此,必须提高这类陶瓷材料的韧性和降低成本。另外,输电变压器的铁损,全世界每年为 4000 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,若采用非晶态金属,每年可节约 1000 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,美国由此每年可节约 10 亿美元。

当前,地球的能源急剧枯竭,而太阳能每年照射在地球表面的能量,是全世界年耗能的 1 万倍,因此光电转换材料(非晶硅、GaAs 等)倍受重视。

(2) 信息材料

信息的储存和传递装置要求体积小、轻巧和快速。硅芯片内的线宽,1960 年为 $30\mu\text{m}$,1986 年降至 $1\mu\text{m}$,因而每片可容纳 10^5 以上的晶体管,储存 $1.6 \times 10^6 \text{bit}$ 的信息,1990 年达 $0.1\mu\text{m}$,由此可见光刻技术已由可见光转为高能电子和 X 射线。硅中电子的有效质量是自由电子质量的 $1/5$,而 GaAs 中两者的比值为 $1/15$,因而信息传递速度更快。

用光传递信息比用电子或电波更有效。70 年代中期已开始用光导纤维通话;世界第一条长达 6684km 的跨大西洋海底光缆(TAT-8 工程)业已完工,最多可同时通 4 万条话路。目前,光学信号仍需借助于转化为电信号而放大;非线性光学材料已在研制,它类似于晶体管放大电信号,可以放大光信号。关于光信息的接收、传递和发放的材料,正在研制中。

(3) 生物材料

现正在研制各种新材料,特别是高分子、陶瓷、复合材料来替代人体的各种组织和器官,如血管、心瓣、心脏、血液、骨骼、眼睛、皮肤等,达到延年益寿的目的。过去认为,人体材料应该不与人体环境发生化学反应;今天则认为,不是所有的化学反应对人体都是有害的,可以利用这些反应来增强界面结合或吸收外来物质。生物医学材料在美国以每年 13% 的速率递增,年销售额已达 500 亿美元。

(4) 汽车材料

在工业发达国家,汽车工业与建筑业、农业机械并列为三大支柱产业。1994 年,全世界共生产 4900 万辆汽车。由此每年使用的钢铁、铝合金和塑料等共达 6500 万吨。以美国为例,共有 16400 万辆汽车,全年行程 $2 \times 10^{13} \text{km}$ 。以每加仑(USgal, 1 USgal = 3.785L)汽油行驶 20km 计,则每年消耗汽油 10^{11} 加仑。因此,汽车制造业是消耗巨大能源和大量材料的行业。为此,全世界在满足各国环境保护规定的前提下,都在开发轻质而又经济的汽车材料。并且,汽车制造的水平往往是一个国家工业化水平的重要标志。

此外,具有高临界超导温度 T_c 的超导材料将走向实用阶段,薄膜超导材料已基本成

熟;高 T_c 超导块状材料已取得很大进展。最高 T_c 值已达到135K,电流密度达 $10^5\text{A}/\text{cm}^2$ 。用银带包覆法已做出成卷的 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ 超导体,预计20世纪末可望工业化,年产值达600~900亿美元。

非晶态金属作为软磁材料可用于变压器铁芯,铁损只相当于冷轧硅钢片的1/3。非晶态铁基合金 $\text{Fe}_{72}\text{Cr}_3\text{P}_{13}\text{C}_7$ 的耐蚀性能优于不锈钢。非晶态金属的用途广泛,美国已有单台1t/h的连续自动卷曲装置生产非晶态金属。

当材料颗粒小到纳米级(10^{-9}m)时,出现很奇异的性能。如扩散系数提高100倍;溶质原子的溶解度提高2500倍;陶瓷由脆性变为塑性;导体变成非导体等。此外,C60的发现为合成新材料又开辟了一条新路:合成金刚石、提高临界超导温度以及用它制作催化剂、润滑剂和治癌药物的载体等。可以预料,这些材料将伴随我们进入21世纪,并将成为研究与应用的重要课题。

1.2.3 材料科学与材料加工的关系

如果说,材料科学是研究材料的结构与性能规律,那么,材料加工的任务就是把材料加工成形,得到可供使用的产品。因此,材料加工实质上就是材料工程。材料加工技术也取决于材料的结构与性能,例如,采用铸造和塑性加工技术,可以得到直接的性能;而这样得到的直接性能反过来也会影响材料随后的加工与性能。因此,我们必须把材料科学与材料加工紧密地结合起来。

材料在加工与使用过程中的环境也会影响材料的特性。例如,在大气中熔化与浇注铝合金时,发现在最终的铸件中出现气孔。在高温下,高强度合金会急剧地丧失它们的某些性能。对于高分子聚合物来说,经过辐照以后,其性能会令人惊异地改变。

我们需要的是,生产具有一定形状和性能的器件,并在所期望的时间内能满足使用要求。为此,必须了解材料的内部结构—材料加工—材料的最终性能这三者的相互关系(图1-3)。

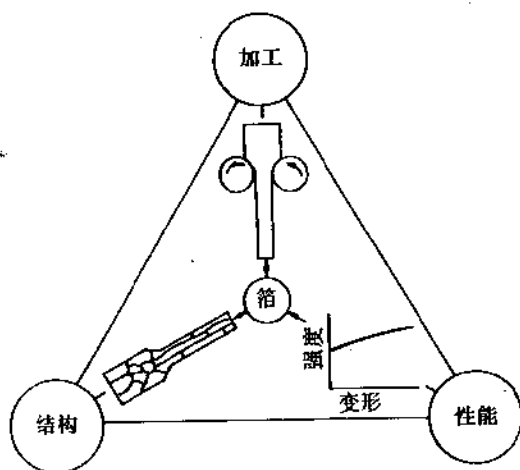


图 1-3 结构、性能与加工方法三者的关系

1. 性能

材料的性能可分成两类：力学性能和物理性能。力学本应是物理学的一部分，只是因为力学已经发展到了可以独立的水平，因而它与物理学并列(参见表 1-2)。

通常，材料的力学性能是指强度、塑性和刚性。但是也常有这样的情况，就是材料要经受突然的、强有力的撞击(冲击韧性)；连续地、周期性地经受交替的作用力(疲劳性能)；也有的要经受高温(蠕变性能)以及在磨损介质下工作(抗磨性能)。材料的力学性能不仅要满足它在工作时的要求，还要考虑它的加工成形，是否很容易就能得到所需的形状。采用锻造成形的金属零件，必须能承受在成形过程中高速施加给它的作用力，不出现裂纹，并有足够的塑性变形以最终得到所需的形状。通常，结构的微小变化会导致材料在性能上发生显著的变化。

材料的物理性能包括电学的、磁学的、热学的以及化学的行为。物理性能取决于材料的结构和加工技术。即使成分发生微小的变化也会使许多半导体金属和陶瓷的导电性发生显著变化。高的焙烧温度可大幅度降低陶瓷的绝热性能。少量的不纯物(夹杂物)会使玻璃或高分子聚合物的颜色改变。

表 1-2 材料力学和物理性能的典型实例

力学性能	物理性能
蠕变	化学腐蚀、精炼
蠕变速度	密度
应力—持久强度	电学
塑性	导电性
%延伸率	介电质(绝缘性)
%断面收缩率	铁电体性
	压电性
疲劳	磁学
疲劳极限	亚铁磁性
疲劳寿命	铁磁性
	顺磁性
硬度	光学
抗划痕能力	吸收
磨损速度	颜色
冲击	衍射
吸收能	激光作用
韧性	光导
转变温度	反射
强度	折射
弹性模量	透射
抗拉强度	热学
屈服强度	吸热能力
	导热性
	热膨胀

2. 结构

可以从几个不同的水平上分析材料的结构。但无论是在哪个水平上的结构,都会最终地影响产品的性能。最微细的水平就是组成材料的原子结构。电子围绕着原子核的排列情况对于材料的电学、磁学、热学、光学乃至耐蚀性能均有重大的影响。尤其是,电子的排列会影响原子的键合,因而才可以把材料区分为金属、陶瓷和高分子材料。

第二个水平就是原子在空间的排列。金属、许多陶瓷和某些高分子聚合物在空间均具有非常规则的原子排列,或者说是晶体结构。晶体结构会影响金属的力学性能,例如,强度、塑性和抗震性能。另外的一些陶瓷材料和大多数高分子聚合物则不具有规则的原子排列。具有非晶态、也就是呈玻璃态的材料,与晶体材料相比,具有很大的差别。例如,呈玻璃态的聚乙烯是透明的;而呈晶体态的聚乙烯则是半透明的。由于原子排列中存在着缺陷,导致在性能上发生显著的变化。

第三个水平则是材料的晶粒结构。在大多数的金属、某些陶瓷材料和个别的高分子聚合物中均有晶粒结构。在这些晶粒中,由于原子排列而改变了它们的取向,从而也就影响了材料的性能。在晶粒结构的水平上,晶粒的尺寸和形状起着关键性的作用。

第四个水平就是材料的多相结构。在大多数材料中,不是只有一个相存在,其中每一相均具有其独特的原子排列和性能。控制材料基体中这些相的形式、尺寸、分布和数量,提供了另一条改善材料性能的途径。

3. 材料加工

“材料加工”可以把原来是无定形的材料加工成形状满足要求的器件(见表 1-3)。金属材料可以采用铸造、焊接、锻压、粉末冶金和切削加工的方法。与此相类似,陶瓷材料的加工可以采用铸造、锻压、挤压、压制和高温热处理以去除水分并把单独的组元联结在一起。高分子聚合物材料的加工则是把软化的塑料喷射至压型中成形(与铸造很相似),也可采用拉拔和压力成型的方法。有时,材料要经受热处理,即把材料加热至熔点以下,以期在结构上发生变化。

表 1-3 典型的材料加工技术

金属	高分子聚合物
铸造	铸造
锻压	压力成形
焊接	复合材料
切削	铸造
粉末冶金	压力成形
陶瓷	焊接
铸造	加压与烧结
加压	
烧结	

4. 结构—性能—材料加工之间的关系

材料的加工方法会影响它的结构。如果将铸造与锻压成形方法相比,则铜棒的结构会有很大的差别(图 1-4)。在晶粒的形状、尺寸和取向方面均有明显的区别。铸造结构中有



可能包含孔洞,这是由于收缩和气体逸出所致;并且还可能有非金属夹杂物卷在结构中。锻压成形的材料中有可能包含拉长的非金属夹杂物和在原子排列方面的内部缺陷。因此,铸造产品的结构及其性能与锻压的产品相比,会有许多差别。

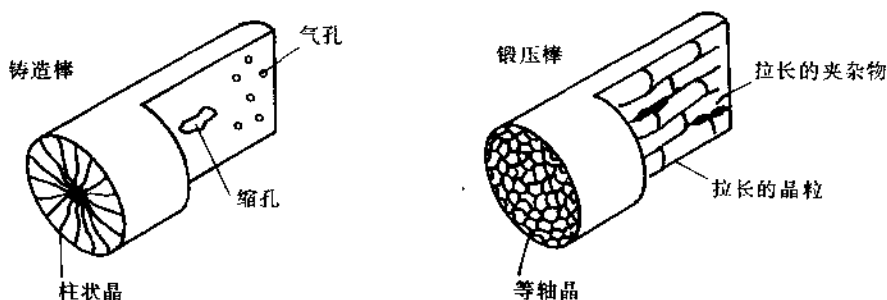


图 1-4 采用铸造方法和塑性成型方法制作的铜棒

另一方面,原始的结构与性能则确定了我们将采用何种加工方法,以得到所要求的形状。铸件中含有很大的缩孔时,会在随后的加工过程中出现裂纹。经过强化处理的合金在塑性变形过程中会变脆和失效。拉伸变形过程中拉长的晶粒可以导致在随后的塑性加工时,产生不均匀的形状。热硬性高分子聚合物是不能经受塑性成形的;而热塑性高分子聚合物则容易经受塑性成形。

1.3 《近代材料加工原理》的任务与内容

如前所述,材料科学研究的核心问题是材料的结构与性能;而材料加工则与之构成结构—性能—加工这三者的密切关系,如此才能使人类不断获得更新的产品。本书的任务旨在阐述近代材料加工技术的内在规律和物理本质,从而揭示材料在各种加工过程中所出现的共性现象。

本书的理论基础是数学、物理和化学。在此基础上,本书着重阐述现代材料加工过程中的物理冶金、化学冶金和力学冶金以及传热、传质和传输现象。

物理冶金是研究通过成形加工,制备有一定性能的金属或合金材料的学科。化学冶金是研究从矿石中提取金属或金属化合物,用各种加工方法制成具有一定性能的金属材料的学科。力学冶金则是研究材料的塑性变形理论,塑性加工对金属力学性能的影响以及在使用过程中的力学行为。由物理冶金、化学冶金和力学冶金三者构成了材料加工原理的三大组成部分。

此外,材料在加工过程中会出现热现象,因此就有热传导和相应的温度场问题需要处理,根据加工过程中不同的初始条件和边界条件,便可得知温度场内某瞬时的温度。本书要讨论 Fourier 热传导方程在材料加工过程中的应用。材料在加工过程中也有传质现象发生,由于元素浓度的富集,形成浓度梯度。本书要讨论 Fick 定律在材料加工过程中的应用。材料在加工过程中还会出现物质的流动,即传输现象,如流体在型腔内的流动。为了

描述流动的规律,本书将讨论 Newton 公式的具体应用。

本书讨论的近代材料加工原理是针对当今采用的主要工艺方法和加工过程中所出现的物理现象的,这就是液态成形(铸造)、塑性成形(锻压)、连接成形(焊接)、切削成形(机械加工)、粉末成形(粉末冶金)以及表面改性过程中的基本原理。但本书并不涉及具体的加工工艺和相关的参数。那些内容将在相应的专著、手册中阐述。由于材料加工方法繁多,具体的工艺及其参数也在发展,特别是崭新的加工技术在不断涌现。对此,在本书中难以收容。但是,现有的和即将发展的加工技术,必然要遵循其应有的内在规律,只要把这些规律认识清楚,就可以掌握这些加工方法的实质。从而为实现材料的加工过程奠定了理论基础。在加工过程中出现问题时,可提供分析问题的方向,指出解决具体问题的途径。此外,在掌握了材料加工的基本原理以后,就可以根据社会需要,发展新型加工技术,发展新工艺,特别是运用综合的加工方法,以解决日益增长的技术难题。

由于金属材料的发展,促进人类进入了文明社会,特别是产业革命以后,以钢为代表的金属材料构成了材料的主流。因此,本书着重讨论金属材料的加工技术,由于非金属材料的加工在许多方面与金属材料是相通的,因此,非金属材料器在兼顾讨论之中。

本书也讨论了进入 21 世纪以后,在可望的未来将得到发展的材料加工技术。采用液态急冷技术,不仅可以得到过饱和的新型材料,还可得到非晶态金属(金属玻璃)。由此获得性能优异的材料将具有广阔的应用前景。采用激光技术对材料表面进行改性处理,可在很大范围内改变材料的结构与性能,例如,把 C60 经受激光处理,可以得到金刚石;气相沉积金刚石技术已进入了实用化阶段,现在的目标是指望依靠这种技术制作计算机芯片,以大幅度提高计算机的运算速度。此外,关于微重力下的材料加工,已有好几个国家进行了大量实验。随着空间技术的进步,微重力材料加工技术必将更加发展。

本书避开各种加工专业的界限,特别是在铸造、锻压与焊接之间的专业界限,力求在更大的范围内拓宽知识。为此,本书把加工专业中的原理进行了归纳与综合,由此也可免除各专业中的重复内容。

本书所涉及的内容力求与金属学的内容、专业课的内容以及后续研究生课程内容的衔接,除了体系的要求以外,尽量避免重复。本书是以崭新的构架、全新的思路和更新的内容呈现给读者的。

人类即将进入 21 世纪,回顾从 19 世纪到 20 世纪这一百年间在材料领域所取得的伟大成就,以及由于材料的发展与进步对人类社会的文明作出的巨大贡献,可以预期,在未来的一个世纪里,我们将进入智能社会。借助于材料科学与工程以及其它支柱科学的发展,人类将遨游太空,到月球去移民……,一个光辉灿烂的文明世界在迎接着我们。

第2章 液态金属

2.1 导 论

具有良好导电性和导热性、呈正电性并在宏观上呈无规则排列的原子集团,叫做液态金属。

试验表明,液态金属在熔点附近时的比热容,与同一金属在固态时的比热容相比,虽然稍大一些,但却具有相同的数量级。

一般来说,液体只有在某种由热力学参数(压力、温度、体积等)所确定的热力学条件下才能存在,因此,热力学研究就奠定了理解液态金属的基础。表 2-1 示出一些液态金属的热力学性能。由表中可以看出,金属的蒸发潜热要比呈典型非金属状态氩(Ar)的大得多。我们还可看出,液态金属的熔点与沸点之差值,也比氩要大得多。这些现象都是因为金属具有很高的结合能所造成的。

Я. И. Френкель 早在 1926 年就指出,质点在液态和固态时一样,均不是呈自由运动,而是围绕着平衡状态进行振动的。它和固态时的区别就在于,液态质点在过渡到新位置时,在新的平衡位置上又进行新的振动;而在固态质点的振动周期要长几百万倍。在固体中,原子的振动频率为 10^{13} 次/s。

表 2-1 液体的熔点、液态范围、蒸发热和熔点时的原子体积

金属	熔点/K	液态范围 (沸点-熔点)/K	蒸发热/kJ/mol	熔点时的原子体积 /cm ³ /mol
Na	371	784	99.208	24.8
K	337	715	79.115	47.5
Rb	312	641	75.767	58.0
Cs	303	670	66.557	72.2
Cu	1356	1487	306.834	7.86
Ag	1234	1239	251.160	11.6
Zn	693	487	114.278	9.95
Cd	594	444	100.045	14.0
Hg	234	396	59.027	14.7
Al	932	1841	291.346	11.4
Ga	303	2220	257.020	11.4
In	430	1918	232.323	16.3
Tl	577	1156	166.184	17.5
Sn	505	2518	270.834	17.0
Pb	600	1413	177.905	19.4
Sb	904	1044	82.464	18.7
Bi	544	1409	179.161	20.8
(Ar)	84	3	6.698	28.2

经 X 射线衍射得到的结果表明,液态金属在熔点附近的 X 射线衍射现象和固态晶体的衍射现象相比,在很多方面极为近似,而与气态相比,则有很大不同。

大多数液体就其机械特性来说更像是气体;但其体积特性和热特性则更像是固体。液态金属具有短程有序排列,由此看来,它与固态晶体相似。由于这两种性质,因而对液态金属具有两种不同的观点:一种认为液态金属本质上是像密集的气体,由此符合 Van der Waals 物理模型;另一种认为液态金属是高度有缺陷的晶体。这种晶体模型也能适用玻璃态,这种玻璃态是某些液态金属在快速急冷下得到的;这种晶体也能符合 Van der Waals 物理模型,可使液态凝固成晶体。

液体与固体的区别是液体有流动性,特别是,液体的剪切模量 $G=0$,而固体则有定值。但是,能否发现剪切模量为零,这要取决于量测的时间,如果把很小的剪切力作用一天以后,其形状没有确定的变化,则该物体就是固体。为使物体具有抗剪切的能力,则该物体就必须具有足够的剪切粘度,它等于或大于 $10^{14}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

固体可以是非晶体(即玻璃金属);也可以是晶体;而液体则几乎总是非晶体。

从熔化潜热和汽化潜热的对比,可以看出两者的比值(L_v/L_m)是很大的(如表 2-2 所示)。以面心立方结构的金属铝为例,其汽化潜热比熔化潜热将近大 27 倍,这就意味着将液态原子完全变成气态所需要的能量要比同样的原子从固态转变成液态所需的能量大 27 倍。

表 2-2 一些金属的熔化潜热和汽化潜热

金属	晶体结构	熔点 /°C	熔化潜热 L_m /kJ/mol	沸点 /°C	汽化潜热 L_v /kJ/mol	L_v/L_m
Al	f. c. c	660	10.465	2480	291.346	27.8
Au	f. c. c	1063	12.809	2950	342.415	26.7
Cu	f. c. c	1083	13.018	2575	304.741	23.4
Fe	f. c. c/b. c. c	1536	15.195	3070	340.322	22.4
Zn	h. c. p.	420	7.242	907	115.115	16.0
Cd	h. c. p.	321	6.405	765	99.627	15.6
Mg	h. c. p.	650	8.707	1103	133.952	15.4

2.2 热力学与统计力学的基本公式

对于凝聚态物质,经试验证实,可选用的独立变量是温度 T 和压力 p ,其相应的热力学学位就是 Gibbs 自由能 G ,它被定义为:

$$\begin{aligned} G &= U - TS + pV \\ &= H - TS \end{aligned} \quad (2-1)$$

$$H = U + pV \quad (2-2)$$