

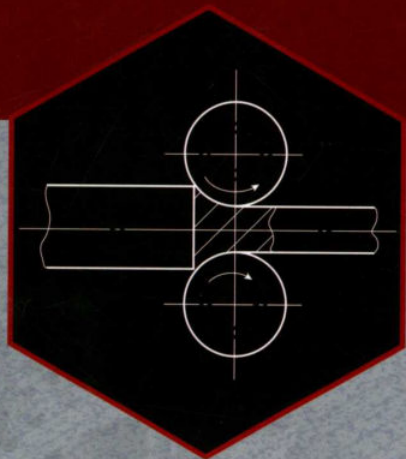


普通高等教育“十三五”规划教材

材料成形技术基础

▶ 周志明 涂 坚 盛旭敏 主编

CAILIAO CHENGXING
JISHU JICHU



化学工业出版社



普通高等教育“十三五”规划教材

材料成形技术基础

- ▶ 周志明 涂 坚 盛旭敏 主编
- ▶ 赵龙志 李又兵 黄 灿 副主编

CAILIAO CHENGXING
JISHU JICHU



化学工业出版社

· 北京 ·

本书理论与实践相结合,突出实践能力和创新意识的培养。全书共分6章,着重讲述金属材料铸造成形、固态金属材料塑性成形过程、金属材料连接成形、非金属材料成形、材料先进成形技术等。本书内容深入浅出,图文并茂,并有大量典型案例。为便于学习,本书配套了电子课件等资源。

本书可作为普通高等院校相关专业的教材,也可供与本专业有关的生产和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形技术基础/周志明,涂坚,盛旭敏主编.

—北京:化学工业出版社,2019.12

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-122-35428-0

I. ①材… II. ①周… ②涂… ③盛… III. ①工程
材料-成型-高等学校-教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第234853号

责任编辑:韩庆利

文字编辑:张绪瑞

责任校对:盛琦

装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:三河市航远印刷有限公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张15½ 字数396千字 2020年4月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888

售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:48.00元

版权所有 违者必究



前言

从石器时代、铁器时代到信息新纪元，人类前行的每一个脚印无不印证着材料科学技术的发展，人类文明史就是材料及材料成形的发展史。材料只有经过各种不同的成形方法加工，使其成为毛坯或制品后，才具有使用价值。合理的成形工艺、先进的成形技术才能使材料成为所得的毛坯或制品。随着人类社会的进步，生产力的发展，材料的成形技术也经历了从简单的手工操作到如今复杂的、大型化的、智能化和机械化生产的发展过程。材料成形制造是先进制造技术的重要组成部分，是衡量一个国家制造技术水平和能力的重要标志，在我国的许多关键制造业中发挥着不可替代的作用，是国民经济的支柱产业，它是汽车、航天航空、电力、石化、造船、机械等支柱产业的基础技术。

“材料成形技术基础”是高等院校机械类专业必修的一门综合性的技术基础课。本课程主要涉及工程材料的成形技术，其内容包括：金属材料的铸造、锻压、焊接，非金属高分子材料的成形，陶瓷的成形，复合材料的成形等。要求学生在金工实习的基础上，通过本课程的学习能够掌握毛坯或制品的成形方法、成形原理及其成形的工艺特点，具有根据毛坯或制品能正确选择成形方法和制订工艺及参数的初步能力；具有综合运用工艺知识分析零件结构工艺性的初步能力；了解有关新材料、新工艺、新技术及其发展趋势，为学习其他有关课程及以后从事机械设计与制造方面的工作，奠定必要的基础。

“材料成形技术基础”是一门内容广泛，技术性和实践性较强的课程，要尽可能利用多媒体教学、电视录像片和虚拟仿真案例等现代化教学手段以提高学生的感性认识。教学形式应多样化，可通过课堂讨论或实验，加深学生对课程内容的理解。本教材在每一章都将材料成形的最新进展和案例作为导读，并在铸造、锻造和其他材料成形添加了一些最新的模拟仿真案例，以提高学生的兴趣。本书可作为大中专院校学生的科技文化素质教育课程教材，也可作为其他人员的科普读物。

本书第一章由重庆理工大学的周志明编写，第二章由重庆理工大学的周志明和华东交通大学的赵龙志编写，第三章和第六章由重庆理工大学的涂坚编写，第四章由重庆理工大学的周志明和黄灿编写，第五章由重庆理工大学的盛旭敏和李又兵编写。重庆理工大学研究生王豆丰、彭曼绮、吴一若等参加了编写工作。全书由重庆理工大学周志明统稿、定稿。感谢重庆市教育教学改革项目、重庆市研究生教育教学改革项目、重庆理工大学重大教育教学改革培育项目和重庆理工大学教育教学改革项目的支持。

本书配套了电子课件等，用本书作为授课教材的院校和老师，可登录化学工业出版社教学资源网 www.cipedu.com.cn 下载。

因编者水平有限，书中缺点在所难免，欢迎广大师生和读者批评指正。

编者

目录

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 材料成形在人类文明进步中的作用	2
第三节 材料成形的基本特点	6
第四节 材料成形的发展趋势	7
复习思考题	10
第二章 金属材料铸造成形	11
第一节 概述	11
第二节 铸造成形技术过程理论基础	12
第三节 砂型铸造	29
第四节 合金的熔炼	37
第五节 铸件结构设计	41
第六节 铸造成形工艺设计	50
第七节 特种铸造	59
第八节 铸造方法的选择	71
第九节 计算机数值模拟在铸造成形中的应用	73
复习思考题	77
第三章 固态金属材料塑性成形过程	79
第一节 固态金属材料塑性成形的基本原理	79
第二节 锻造成形工艺及设计	87
第三节 板料成形方法	105
第四节 其他塑性成形简介	117
复习思考题	124
第四章 金属材料连接成形	127
第一节 焊接本质及方法分类	128
第二节 焊接成形理论基础	130
第三节 熔化焊	146
第四节 压焊	155
第五节 钎焊	159
第六节 常用金属材料的焊接	161

第七节 胶接	166
复习思考题	172
第五章 非金属材料成形	174
第一节 概述	175
第二节 塑料的成形	176
第三节 橡胶的成形	191
第四节 塑料制件的结构设计	194
第五节 塑料成形的数值模拟	202
复习思考题	206
第六章 材料先进成形技术	207
第一节 快速成形制造技术	207
第二节 粉末成形技术	227
复习思考题	239
参考文献	241



第一节 概述

人类从诞生的那天起，就开始了对材料的开发和应用。人类在发展进步的历史长河中，无一日不在利用材料、无一日不在探索创造新材料。人类文明的发展已经有 7000 多年历史，而材料作为每阶段文明发展的标志，对人类的进步起着决定性的作用，是当代文明的三大支柱之一。可以说材料的品种、数量、质量是一个国家现代化程度的衡量标准之一。材料无处不在、无处不有，工农业、国防、日常生活中，随处可见其身影。

材料是用来制造机器零件、构件和其他可供使用物质的总称。按化学组成分，材料可分为金属材料、无机非金属材料、有机非金属材料 and 复合材料。

人类历史发展的过程，本身就是一部材料及材料成形发展的历史。材料是人类生产和生活的物质基础。材料的发展推动人类社会的进步，人类从最早使用的石器材料发展到如今文明社会大量使用的各类合金钢、非金属材料及复合材料便能充分说明这一点。人类社会的进步促进材料的发展。人类物质生活水平的提高和生产技术的发展是人类社会进步的重要标志，同时，人类进一步认识自然世界和改造自然世界的欲望更加强烈，发展生产、改善生活成为人类最基本的实践活动。在认识世界和改造世界的漫长岁月里，人类凭借自己的聪明才智，相继研制和开发了各种新材料、新工艺，促进了材料的发展。为了满足现代尖端技术的苛刻要求，必须不断地开发新材料，例如在航空航天、能源和海洋开发等领域，需要超轻质、耐高温、耐腐蚀、超高强度、耐超高压、超电导以及超低温等极限材料。可以说，每一种重要的新材料的发现和运用，都把人类支配自然的能力提高到一个新的水平，给社会生产和人类生活面貌带来巨大改观，把物质文明程度推向前进，所以新材料的研制与开发应用和一个国家的工业活力及军事力量的增长密切相关。

材料只有经过各种不同的成形方法加工，使其成为毛坯或制品后，才具有使用价值。材料成形过程可概括地定义为将材料加工到符合一定要求的工件性能的变化，包括几何形状、硬度、状态、信息（形状数据）等的变化。材料成形加工技术不仅赋予零部件以形状，而且给予零部件以最终性能及使用特性。由于加工的主要目的不同，材料成形过程可能是加工工件材料加工过程、能量转化过程、信息变化过程的某种组合。合理的成形工艺，先进的成形技术才能使材料成为所得的毛坯或制品。随着人类社会的进步，生产力的发展，材料的成形技术也经历了从简单的手工操作到如今复杂的、大型化的、智能化和机械化生产的发展过程。我国古代劳动人民对材料及其成形技术的研究远远超过同时代的欧洲，直到 17 世纪，我国还一直处于世界领先地位，为世界文明和人类进步作出了巨大贡献。

金属材料的制造和使用，标志着人类文明的一个重大进步，从开始的青铜器时代，到铁

器时代，再到后来的钢时代。目前人们对金属材料的使用逐步由单金属向高性能的铝、镁、钛等金属合金转变。我国祖先最早用火烧制陶器和瓷器，五代时期我国的陶瓷技术已登峰造极，这时生产的陶器被誉为“青如天、明如镜、薄如纸、声如磬”。我国的铸造技术和锻造技术闻名于世，焊接技术也有着悠久的历史，在河南辉县战国墓中，殉葬铜器的耳和足是用钎焊方法与本体连接的，这比欧洲国家应用钎焊技术还早 2000 多年。我国还是最早使用胶黏剂的国家之一，在陕西临潼秦始皇陵二号出土的两乘大型彩绘铜车马，每乘各有一车四马，由一名御官俑驾驭，其材料以青铜为主，并配以金银饰品。造型逼真的铜马和装饰华丽的铜车，反映了秦朝时期我国祖先精湛的冶铸技术，而金银饰品之间连接是用无机胶黏剂胶接的，说明早在 2000 多年前，我们的祖先已掌握了无机胶接技术。我国明朝科学家宋应星编著的《天工开物》一书中记载了冶铁、炼钢、铸铁、锻铁、淬火等各种金属的加工方法，它是世界上有关金属加工工艺最早的科学著作之一。

材料成形制造是先进制造技术的重要组成部分，是衡量一个国家制造技术水平和能力的重要标志，在我国的许多关键制造业中发挥着不可替代的作用，是国民经济的支柱产业，它是汽车、航空航天、电力、石化、造船、机械等支柱产业的基础技术。以航空发动机为例，现代飞机要求超声速巡航、非常规机动性、低环境污染、低油耗、低全寿命成本等性能，很大程度上是依靠发动机性能的改进及提高来实现的，发动机性能提高的目标是提高推重比、功率质量比、增压比和涡轮前温度。要实现上述指标，就要不断发展先进涡轮盘材料，与此相应发展这些材料的精密成形与加工技术。材料的精密成形与加工技术就成为关系国防安全的一种关键技术。

从经济效益的角度考虑，在零部件的生产制造中，原材料的成本仅占很小的比例，附加值主要来自成形加工环节。若以 M 表示金属原材料价值与该金属制品的价值之比，对于汽车零部件， $M=2\% \sim 5\%$ ；飞机的一般铝合金结构件， $M=5\% \sim 20\%$ ，飞机发动机普通叶片， $M=50\%$ 左右。从可持续发展的角度考虑，金属材料的制备、成形与加工，历来是能源、原材料消耗巨大、环境污染严重的工业领域，且至今这一状况还没有彻底改善。有关专家指出，当前主要金属材料的性能仅实现了 $40\% \sim 70\%$ ，若使其余性能潜力得到充分发挥，则可减轻构件质量，节省材料 $25\% \sim 60\%$ 。同时在节能、降低成本、控制污染等方面带来巨大效益。因此，该领域的技术进步是可持续发展战略和净化环境的迫切需求。

人类社会进步与材料科学发展之间的关系历来是辩证的：材料的进步必将促进科学技术的进步和人民生活水平的提高，反过来，人们对新生活的向往、科学技术的继续发展，又必然会对新材料发出更强烈的呼唤。人们总是不断地要求利用性能更好的新材料，去淘汰那些已不能适应社会发展要求的传统旧材料。所以，制备新材料的成形技术又是社会发展提高的“催化剂”！目前，中国已成为全球第一制造业大国，但是，我国的材料成形加工技术与工业发达国家相比仍有很大差距，如重大工程的关键铸锻件仍从国外进口，航空工业发动机及其他重要的动力机械核心的材料成形制造技术尚有待突破。

第二节 材料成形在人类文明进步中的作用

人类的历史是一部材料不断进步发展的历史。正是在历史发展过程中及与此相联系的人类知识和经验的不断增长过程中，材料的使用才得以发展。材料成形技术的发展与社会的发展以

及人类文明之间贯穿着一条辩证式线索。人类在对自然界寻觅到的原始材料加工不断提高,材料成形在推动人类文明进步的同时也在不断完善。

中华民族具有 5000 多年的历史。历史学家根据当时的标志性材料而将人类社会划分为石器时代、青铜器时代、铁器时代、钢铁时代等。材料成形发展的历史从生产力的侧面反映了人类社会发展的文明史。

大约两三百万年前,石器的出现标志着人类脱离动物界,开始进入石器时代。起初人类并没有对石头这种质地粗糙的材料进行精加工,而是直接打制成砍砸器、尖状器、刮削器和石核等器物。虽然当时材料的加工方法比较简单,但能够补充手掌、手指、指甲和牙齿的功能,满足人们对于采集与狩猎的需要。这个时期人类还掌握了对组合材料的使用,如将木头和石头捆绑得到的手斧。修理石核技术也在这一时期得到应用,如精致的刮削器和尖状器。目前,世界上现存最完整、最早的石器时代遗址是非洲东部坦桑尼亚的奥杜韦文化(距今 175 万年)和肯尼亚的阿舍利文化(距今 176 万年)。

新石器时代的初期,人类活动由狩猎和采集转向了农牧业。在该时期,人类掌握了磨制石器的技术。磨制的石斧、石锛、石凿和石铲,琢制的磨盘和打制的石锤、石片开始大量出现。这些磨制石器的出现有着重要的意义,因为它们作为农用工具促进了农业的发展,从而形成了早期的农业。此间产生了人类历史上第一次产业革命——农业革命,进而导致了原始社会的解体。人的能力提高了,他们可以把材料加工得更加精细,而且富有艺术性。

约公元前 7000 年,最早的社会分工开始出现,游牧部落和农耕地开始出现。同时,材料成形技术有了进一步的发展。公元前 6000 年,人类掌握了钻木取火的技术。有了火,不仅可以熟食、取暖、照明和驱兽,而且可以烧制陶器。陶器的发明和应用,创造了新石器时代的仰韶文化,后来在制陶技术的基础上又发明了瓷器(英译名 china),实现了陶瓷材料发展的第一次飞跃。瓷器的出现成为中华民族文化的象征之一,对世界文化产生过深远的影响。黏土烧陶技术也为后来的冶铜技术的发明做了技术上的铺垫。6000 多年前的西安半坡遗址的鱼纹彩陶盆十分精美。

人们在大量烧制陶瓷的实践中,熟练地掌握了高温加工技术,并利用这种技术来烧炼矿石,人们炼出了红铜,但是其质地软,不适合制造工具。这是人类社会中最早出现的金属材料,它使人类社会从新石器时代转入青铜器时代。由于生产力的发展,我们的祖先们发现铜相比石器具有可塑性和延展性等优点,能够根据不同的需要冶炼和加热锻打成不同形状的工具如镰刀、锄头等,且具有更好的耐用性、更高的生产效率。

由于这种铜强度不高,因此不能满足大部分铜器对使用的要求。对于含其他金属量较高的青铜,虽然强度提高了,但韧性却下降了,锻造并不是最佳的途径。金属浇注这一重要工艺的出现,本质上改变了材料的成分对于青铜器制作的限制,它使得人类能够获得合金含量大于 10% 的青铜器。在青铜铸造技术刚开始出现时,青铜器还是铸锻并存的,一部分是锻造一部分是铸造。生产力的发展,促进了青铜铸造技术的提高。当青铜器加工技术发展成熟阶段时,铸造成为青铜器制作的主要手段。我国的青铜冶炼始于夏朝(约公元前 2070~前 1600 年)。进入奴隶社会以后,炼铜技术发展很快。当时人们所使用的劳动工具、武器、食具、货币、日用品和车马装饰,都是用青铜制造的。商晚期和西周早期,青铜冶铸业达到高峰。在 3000~3500 年前的商代遗址中,河南安阳出土的商代晚期后母戊鼎[见图 1-1(a)]重达 875kg,是我国目前发现最重的青铜器。据估计,铸造这样的大型青铜器,需 300 多人同时工作。春秋时期,吴越等地出现了复合剑制作技术[见图 1-1(b)],在其后相当普遍。剑的不同部位分别制造,然后用铸接技术连接,剑脊的铅含量较高使其韧性强,而剑

刃铅含量低但锡含量高使其硬度高。如出土的东周时期的复合剑，剑脊锡含量 8.13%，铅含量 13.14%，这样的剑身韧性很强，而剑刃锡含量 3.72%，铅含量 1.42%，因此剑刃强度相当高，这种青铜剑具有完美的刚柔结合的特性。这种技术是中国独有的，代表了青铜器制作技术的顶峰。复合剑制作技术说明古人在注重加工工艺的同时有意识地调节青铜剑中的合金如铅锡的含量。

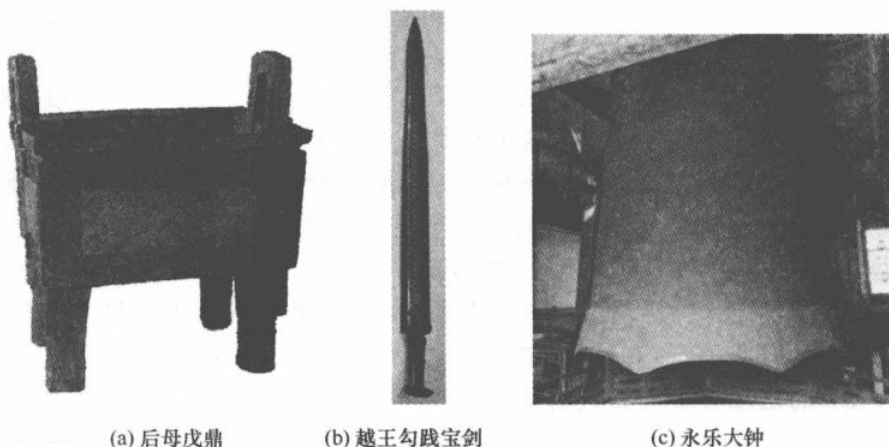


图 1-1 青铜器

青铜冶炼技术的发明和应用，使金属冶炼业得到大力发展，促进了社会大分工，使手工业最终从农业中分离出来。青铜冶炼技术在农业工具制造领域的应用，促进了农业生产技术的革新，提高了社会生产力。用青铜制作武器，青铜武器在战争中的使用，提高了军队的战斗力，也使战争更加残酷和激烈。另外，青铜器在人类生活中的使用，使人们的生活质量也有所提高，并推动了文化的繁荣。明朝的永乐大钟 [见图 1-1 (c)]，铜钟通高 6.75m，钟壁厚度不等，最厚处 185mm，最薄处 94mm，重约 46t。钟体内外遍铸经文，共 22.7 万字。铜钟合金成分为：铜 80.54%、锡 16.40%、铝 1.12%，为泥范铸造。

青铜的出现无疑使当时人类的生产和生活方式发生了巨大的变化，但其自身也有局限性。由于生产青铜使用的锡十分稀有，所以青铜在当时是十分昂贵的，这点从当时的货币由青铜制作而成可以看出。那时青铜基本上为奴隶主贵族所垄断，成为代表他们身份和权力的象征，而农民们得不到金属工具，不得不依靠石斧等石器和木器从事农业生产。因此，青铜器不是当时人们的主要工具。青铜自身的这种局限性促进了从青铜生产工具向铁制生产工具的过渡。

铁器时代是人类发展史中一个极为重要的时代。由于铁相比于铜具有矿藏分布普遍、价格低廉等优点，且铁器具有坚硬、韧性高、锋利等优势，因此，铁器能够被更广泛地普及到社会各个方面，如日常生活、农业、军事等。铁器的广泛使用，使人类的工具制造进入一个全新的领域，生产力得到极大提高。另外，铁器的使用，导致了世界上一些民族从原始社会进入奴隶社会，也推动了一些民族脱离了奴隶制的枷锁而进入封建社会。最早发现和使用的铁，是从太空中掉下来的陨铁。因为地球上的天然铁很少见，所以铁的冶炼和铁器的制造经历了相当长一段时间，当人们逐步掌握冶炼铁的技术后，铁器时代真正开始到来。世界上最早铁器诞生于公元前 1400 年的小亚细亚赫梯国。但在当时炼铁炉过小，鼓风力弱，人们只能炼出海绵状的块炼铁，而不能进行大量生产。由于产量较小，以及赫梯国对于技术的保密，铁器是赫梯国作为外交赠礼的极为宝贵的物品，而最先拥有铁制武器的赫梯国军队则是战无不胜。直到公元前 12 世纪，随着赫梯国的覆灭，炼铁技术才开始传播开来。

我国人民在春秋时代就已经掌握了冶铁技术且掌握了竖式炼铁炉冶炼技术。当时铸铁的生产和应用显著扩大,已经使用铁模铸造农具(见图1-2)。利用这些农具,人们开凿了大量的水利工程如都江堰,极大地促进了农业生产力的发展。白口铸铁、展性铸铁、麻口铁等产品相继出现,进而由铸铁发展到炼钢,并且发展了三种不同的炼钢方法。铸铁柔化术是中国古代钢铁业的一项重大发明,铸铁炼制出来之后,因为性脆、缺乏韧性而不适合锻造优良的铁器。而利用柔化技术可以获得适合锻造铁器的白心可锻铸铁和黑心可锻铸铁。河南洛阳出土的铁铲,湖北大冶铜绿山古矿井出土的六角锄,都是用白心可锻铸铁制造的。炒铁是中国古代钢铁冶炼的另一重大发明,通过炒铁技术可以获得含碳量低的低碳钢甚至熟铁。东汉的《太平经》中就明确记载了炒铁技术,在河南巩义市的古冶铁遗址中也发现了以炒铁技术制作的铁币和炒铁炉。



图 1-2 春秋战国铁锄

铁器的大量使用,一方面促进农业和手工业(特别是采矿业和冶炼业)的发展,另一方面也带动了商业的繁荣发展。由于生产力的进一步发展,各地经济文化交流日益扩大,文化方面也出现了空前的盛况,如春秋战国时的“百家齐鸣”、古希腊的“伯利克里时代”。铁的冶炼技术在公元1世纪来临时达到了第一个高潮,装备了铁制武器的军队的战斗力得到了极大提升。

在我国,公元前3世纪铁器已在农业上推广使用,秦汉时期农业经济相当发达。到了唐宋时代,经济繁荣,科学文化发达,社会安定,国泰民安,处于盛世,形成了我国封建社会的科学文化高峰。正如英国科学家李约瑟博士所说的:“在3到13世纪,中国保持一个让西方人望尘莫及的科学知识水平。”材料科技进入一个新的时代是在公元1000年之后。当时原料的开采和加工已经采用水力驱动能代替传统的人和动物的能量。水力驱动能使精炼铁法成为可能,进而能够大批量地生产高质量的铁。该方法直到18世纪才逐渐退出历史舞台。

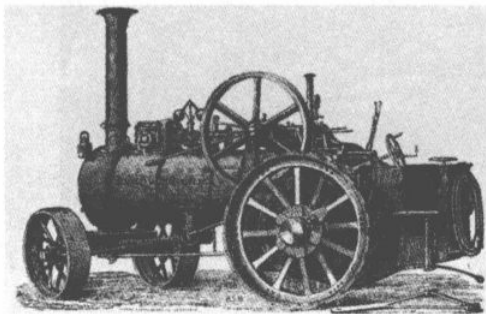


图 1-3 瓦特改良型蒸汽机

18世纪炼钢业得到了飞速的发展。钢铁工业作为第一次工业革命的重要产业内容的同时也为产业革命提供了必要的物质基础。1785年,瓦特通过对纽科门的蒸汽机的改进而制成的改良型蒸汽机投入使用(见图1-3),提供了更加便利的动力,得到迅速推广,大大推动了机器的普及和发展。在蒸汽机、焦炭、铁和钢的推动下,工业革命技术如轮船、铁路等加速发展,而铁路、轮船又促进了钢铁业的发展,人类社会由此进入“蒸汽时代”。

第一次工业革命极大地促进了生产力的发展,人类社会开始由农业文明向工业文明转变。社会结构、阶级结构和人们的思想开始发生根本的转变。在这一时期,西方国家在工业革命技术的支持下,发动了两次鸦片战争,从而“唤醒”了中国这一沉睡的“东方雄狮”。

进入19世纪后,钢铁、铜、铅、锌被大量应用于工业生产中,而铝、镁、钴等金属相继问世并得到应用。到19世纪中叶,现代平炉和转炉炼钢技术的出现,使人类真正进入“钢铁时代”。但这个时代始终没能达到其顶峰,因为塑料这种新材料在20年后问世了。

法拉第电磁理论在工业上的应用标志着“电气时代”的到来。起初,由于电灯等电器还

未被发明，因此电仅仅用于电话等通信业，而未真正成为能源。当 1879 年爱迪生发明白炽灯后，电开始真正作为能源进入每家每户，电力革命的曙光开始照耀人间。灯泡的发明推动了工业的发展，发电厂像雨后春笋般建立起来。电力工业发展又促进了发电机、电动机、变

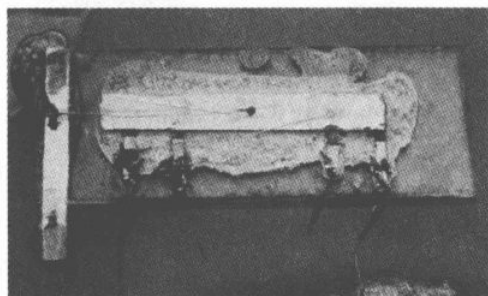


图 1-4 基尔比发明的第一个集成电路

压器、电线和电缆工业的诞生和发展。同时，还推动了材料与加工工艺技术的发展。例如各种导体、绝缘体、半导体材料等以及电镀、电解、电焊、电火花加工等新工艺的应用。1958 年 8 月 28 日，基尔比先用硅做出了分立的电阻、电容、二极管和三极管，然后再把它们连成了一个触发电路，发明了集成电路（见图 1-4）。

单晶硅的研制成功，使电子技术领域由电子管发展到晶体管、集成电路、大规模和超大规模集成电路，从而促进了计算机的微型化及普及。半导体材料的应用和发展，使人类社会进入信息时代。

目前，人类社会在几十年取得的科技成就已经超过了之前几千年的科技发展总和，材料的数量和发展速度已经呈现几何数字增长，材料在各个领域的突破都会对社会生产力起到至关重要的推动作用。新材料为人类的生活提供了最基本的服务，新材料在种类上的扩展和功能上的发掘，为工业经济的持续发展提供了必不可少的支持，从而极大地推动了人类社会的发展和进步。我国已成功地生产出了世界上最大的轧钢机机架铸钢件（重 410t）和长江三峡电站巨型水轮机的特大型铸件，长江三峡水轮机叶轮的不锈钢叶片重 62t，已由德阳中国二重集团铸造厂于 2001 年首先一次试制成功，其铸造工艺方案采用了先进的计算机模拟仿真技术，经反复模拟得到了最优化的铸造工艺方案（见图 1-5）。巨型转轮直径 10.07m、高 5.4m，净重 416t，其尺寸、质量、技术含量、制造难度均为当今同类产品世界之最。

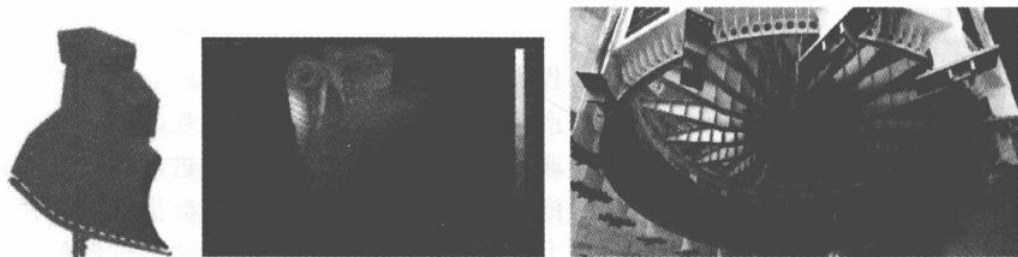


图 1-5 长江三峡水轮机叶轮不锈钢叶片

第三节 材料成形的基本特点

人类科技文明史可以说是人类对物质材料认识、加工、利用、创造的发展过程，每一类新材料及相应成形技术的发现和应用都会引起生产技术的革命，大大加速了社会文明发展的进程。人类社会所谓石器时代、青铜器时代、铁器时代就是按生产活动中起主要作用的工具材料来划分的。人类把自然材料或人工材料采用适当的方式加工成所需要的具有一定形状、尺寸和使用功能的零件或产品的过程，就是材料加工的过程。

1. 产品性能好

材料成形的绝大多数零件具有良好的力学性能。如带有内部缺陷的金属材料在半固态成形过程中,经过金属熔化、在液固双相状态下成形,可以较好地避免在成形件内部产生缺陷;经塑性成形的零件,具有完整的金属流线,且由于在塑性变形过程中有加工硬化现象,使其力学性能比原材料有一定程度的提高。

2. 可以生产复杂形状零件

铸造成形、锻造成形、冲压成形、塑料成形、橡胶成形、粉末成形等许多材料成形方法可以生产形状非常复杂的零件。如铸造成形的发动机缸体零件,锻造成形的汽车前梁、发动机连杆,冲压成形的汽车门板、围板等覆盖件,塑料成形的壳体类零件等。

3. 材料利用率高

机械加工时被切削分离下来的部分材料均成为废料,而材料成形时,只有边缘部分或浇口部分是废料。所以,材料成形过程中产生的废料较少、材料利用率高。如铸造成形、锻造成形、塑料成形的材料利用率一般可达80%以上,许多零件成形的材料利用率可达90%以上;即使产生废料较多的汽车覆盖件冲压成形的平均材料利用率也可达70%。

4. 生产效率高

材料成形的生产效率普遍较高,特别是利用模具生产时的生产效率更高。如在压力机上模锻连杆生产时,手工操作的单班产量可达500件以上,大型汽车覆盖件冲压生产时,手工操作的单班产量可达1000件以上,自动化操作的单班产量可达2000件以上;在高速冲床上冲压成形小型零件时,自动化操作的单班产量更是可高达20000件以上。

5. 应用范围广

材料成形方法很多,各种成形方法都有自己的特点,甚至有别的成形方法不可替代的特点。由于材料成形的材料利用率高、生产效率高、产品质量高且生产成本低,所以,材料成形在机械、电子、化工、航空航天、日常家用物品等国民经济的各个行业都有极其广泛的应用。

第四节 材料成形的发展趋势

材料成形加工技术既是制造业的重要组成部分,又是材料科学与工程的四要素之一,对国民经济的发展有着重要作用。材料成形技术的发展与科学技术发展紧密相关,产品往往以科学原理为指导。随着科学技术的发展和材料成形技术的进步,从原理到成品的时间越来越短,如表1-1所示。

表 1-1 科学原理的发现时间与其产业化时间的对照

产品	原理	成品	发展时间
电机	1821年	1886年	65年
真空管	1882年	1915年	33年
无线电	1887年	1922年	35年
X光	1895年	1913年	18年
雷达	1935年	1940年	5年
原子堆	1939年	1942年	3年
半导体	1948年	1951年	3年
激光	1958年	1960年	2年

随着计算机技术的发展和 3D 打印技术的发展, 基于知识的材料成形工艺模拟仿真已经成为材料科学与工程的前沿领域及研究热点, 而高效率、高性能和高保真是模拟仿真的目标。根据美国科学研究院工程技术委员会的测算, 通过模拟仿真可以提高产品质量 5~15 倍, 增加材料出品率 25%, 降低工程成本 13%~30%, 降低人工成本 5%~20%, 增加投入设备的利用率 30%~60%, 缩短产品设计和试制周期 30%~60%, 增加分析问题广度和深度的能力 3~3.5 倍。虚拟制造是 CAD/CAM 和 CAPP 等软件的集成技术, 以并行的方式进行产品设计、加工和装配, 对各单元采用分布管理, 而且不受时间和空间限制。虚拟现实技术利用计算机和外观设备, 生成与真实环境一致的三维虚拟环境, 使用户通过辅助设备从不同的“角度”和“视点”与环境中的现实交互。与智能制造/虚拟工厂/网络化集成, 材料成形加工过程建模与虚拟仿真将成为制造业新产品设计过程的非常有效的工具。

进入 21 世纪后, 材料成形加工技术的发展面临环保、资源、消费观念变革、市场竞争、制造全球化和信息技术等挑战, 同时也面临制造业持续增长, 这就促使新世纪材料成形加工技术在发展中形成了自己新的特征。高速发展的工业技术要求加工制造的产品精密化、轻量化、集成化; 国际竞争更加激烈的市场要求产品性能高、成本低、周期短; 日益恶化的环境要求材料加工原料与能源消耗低、污染少。因此, 材料正由单一的传统型向复合型、多功能型发展; 材料成形加工制造技术逐渐综合化、多样化、柔性化、多学科化。面对市场经济、参与全球竞争, 必须十分重视先进制造技术及成形加工技术的技术进步。

美国在“新一代制造计划 (next generation manufacturing)”中指出, 未来的制造模式特点将是批量小、质量高、成本低、交货期短、生产柔性、环境友好。未来的制造企业要掌握十大关键技术, 其中包括快速产品与工艺开发系统、新一代制造工艺及装备、模拟与仿真 3 项关键技术。其中下一代制造工艺包括精确成形加工制造, 或称净成形加工工艺 (net shape process)。净成形加工工艺要求材料成形加工制造向更轻、更薄、更精、更强、更韧、成本低、周期短、质量高的方向发展。轻量化、精确化、高效化将是未来材料成形加工技术的重要发展方向。

1. 精密化

目前, 精密和超精密制造技术已经跨越了微米级技术, 进入了亚微米和纳米技术领域。

精密化已成为材料成形加工技术发展的重要特征, 其表现为零件成形的尺寸精度正在从近净成形 (near net shape forming) 向净成形 (net shape forming) 发展, 即近无余量成形方向发展。“毛坯”与“零件”的接近程度越来越大。当前精密成形技术已在较大程度上实现了近净成形。

发展趋势是实现净成形加工, 其工艺要求材料成形向更轻、更薄、更强、更韧及成本低、周期短、质量高的方向发展。精密材料成形技术有多种形式的精铸、精锻、精冲、冷温挤压、精密焊接与切割等。

2. 优质化

净成形技术主要反映了成形加工保证尺寸及形状的精密程度, 而反映成形加工优质程度的则是近无缺陷、零缺陷成形加工技术。“缺陷”是指不致造成早期失效的临界缺陷的概念。目前及今后采取的主要方法有: 为了获得健全的铸件、锻件奠定基础, 可以采用先进工艺、净化熔融的金属、增大合金组织的致密度等。采用模拟技术、优化工艺技术, 实现一次成形及试模成功, 保证工件质量。加强工艺过程监控及无损检测, 及时发现超标零件。通过零件安全可靠性能研究及评估, 确定临界缺陷量值等。

3. 快速化

随着全球化市场的激烈竞争, 加快产品开发速度已成为竞争的重要手段之一。制造业要满足日益变化的用户需求, 必须有较强的灵活性, 以最快的速度提供高质量产品。亦即“客户化、小批量、快速交货”的要求不断增加, 为此需要材料成形加工技术的快速化。成形加工技术的快速化表现在各种新型高效成形的工艺不断涌现, 新型铸造、锻压、焊接方法都从不同角度提高生产效率。

快速原型制造技术 (rapid prototyping, RP) 以离散/堆积原理为基础和特征, 源零件的电子模型 (CAD 模型) 按一定的方式离散成为可加工的离散面、离散线和离散点, 而后采用多种手段, 将这些离散的面、线段和点堆积成零件的整体形状。由于工艺过程简单, 故制造速度比传统方法快得多。快速原型和快速模具相结合 (RP+RT), 又提供了一条从 CAD 模型直接制造模具的新方法, RP 正在向着各种制造工艺集成、形成快速制造系统的方向发展。

计算机模拟仿真技术是信息技术综合应用、发展的结果。数值模拟应用于铸造、锻压、焊接等工艺设计中, 并与物理模拟和专家系统相结合, 来确定工艺参数、优化工艺方案, 预测加工过程中可以产生的缺陷及防止措施, 控制和保证加工工件的质量。

模拟仿真技术, 它可以使理论和实验做得更深刻、更全面、更细致, 可以进行一些理论和实验暂时还做不到的研究, 大大缩短了制造周期, 加快了制造进程。如铸造凝固过程的三维数值模拟; 铸压过程微观组织的演化及本构关系模拟; 焊接凝固裂纹的模拟仿真、开裂机制的研究以及焊接氢致裂纹的模拟; 金属材料热处理加热冷却过程的模拟仿真及组织-变形、性能预测等。

目前, 模拟仿真技术已能用于压力铸造、熔模铸造等特种精确成形工艺。很多研究人员开展了材料成形加工新工艺, 如喷射成形的模拟研究等。

多尺度模拟特别是微观组织模拟 (从毫米、微米到纳米尺度) 是近年来研究的新热点课题。多尺度模拟已经在汽车及航天工业中应用。

4. 复合化

激光、电子束、离子束、等离子体等多种新能源的列入, 形成多种新型加工与改性技术, 其中以各种形式的激光加工技术发展最为迅速。激光加工技术多种多样, 包括电子元件的精密微焊接、航天航空和汽车制造中的焊接、切割与成形等。有不同种类的激光表面改性处理方法, 如热处理、表面修整、表面熔覆及合金化等。使用的激光器主要为大功率 CO₂ 激光器、YAG 激光器。

近年来, 激光加工自由成形技术成为重要的研究动向。随着金属间化合物材料、金属基复合材料、多种新型功能材料、超导材料等高新技术材料的应用, 传统的加工方式或多或少地遇到了困难。与新的材料制备和合成技术相适应, 新的加工方法成为材料加工研发的一个重要领域。一批新型复合工艺应运而生, 如超塑成形/扩散连接技术、材料电磁加工等。

此外, “复合化”还表现在冷热加工之间、加工过程、检测过程、物流过程、装配过程之间的界限趋向淡化、消失, 而复合、集成于统一的制造系统之中。

5. 绿色化

“绿色化”是指成形加工生产向清洁生产、无废弃物加工方向发展。清洁生产技术是协调工业发展与环境保护的矛盾、需求日益增加与有限资源的矛盾的一种新的生产方式, 是 21 世纪制造业发展的重要特征。在成形加工生产过程中可采取如下措施。

- ① 采用清洁能源。

② 采用绿色材料。绿色材料是指资源和性能消耗小、生态环境影响小、再生循环利用率或可降解使用的具有优异实用性能的新型材料。

③ 采用和开发新的工艺方法。

④ 采用新结构,减少设备的噪声和振动。美国在展望未来的制造业时,进一步把“材料净成形工艺”发展为“无废弃物成形加工技术(waste-free process)”。所谓“无废弃物加工”的新一代制造技术是指加工过程中不产生废弃物,或产生的废弃物能被整个制造过程中作为原料而利用,并在下一个流程中不再产生废弃物。无废弃物成形加工技术将成为今后推广的重要绿色制造技术。日本铸造工厂提出了3R的环境保护新概念,即减少废弃物(reduce)、重用(reuse)及回用(recycle)。

6. 信息化

信息化是21世纪社会发展的趋势。信息技术也正在向材料成形加工技术注入和融合,促进着材料加工技术的不断发展。信息技术对材料加工技术发展的作用目前已占第一位。

以纳米机器人为例,纳米机器人又叫可编程分子机器人,它的研制属于分子仿生学范畴,其根据分子水平的生物学原理设计制造,能够在纳米空间内进行控制与操作。作为机器人工程学的一项新科技,纳米机器人概念的提出始于1959年,虽然提出时间不晚,但直到20世纪90年代纳米技术的兴起,才带动了其研发与应用的起步。进入21世纪以来,纳米机器人的研发成果已有所显现,人们对于其应用表现充满期待。

在军事领域,人们希望借助纳米机器人完成情报侦查、战场救治、武器升级等任务,将现有的战争往技术化、小型化方向引领;在工业领域,人们希望利用纳米机器人制作微型芯片,从而推动未来电子产品的微型化发展;在环保领域,人们希望借助纳米机器人监测和防止污染问题;在医疗领域,人们希望利用纳米机器人解决现有的医疗难题,改变医疗发展局面等。

可以说,纳米机器人在未来不仅能给社会带来重大变化,也给人们带来了无限想象空间。也难怪我国学者早在1990年就发出预言:“到二十一世纪中叶,纳米机器人将彻底改变人类的劳动和生活方式。”

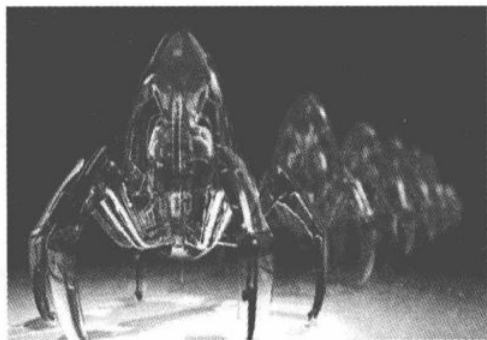


图 1-6 纳米蜘蛛机器人

2010年以来,美国哥伦比亚大学的王中林教授成功研制出一种DNA分子构成的纳米蜘蛛机器人(见图1-6);佛罗里达大学研制出一款能够100%杀灭丙肝病毒的纳米机器人;伊利诺伊大学将真菌所产生的孢子和石墨烯量子点结合在一起,制造出了一种微型生物机器人;俄亥俄州立大学研发了运用于DNA的3D运动纳米机器人。2017年7月哈尔滨工业大学就研发出了能在血管中游泳的医疗纳米机器人,并且已经在动物实验中取得了成功。

复习思考题

- 1-1 什么是材料?
- 1-2 什么是材料成形?
- 1-3 材料成形的基本特点有哪些?
- 1-4 材料成形的发展趋势有哪些?

第二章

金属材料铸造成形

导入案例

生铁放到炼钢炉内按一定工艺熔炼，即得到钢，这是传统的炼钢术。而今，中科院金属研究所（以下简称“金属所”）的科研团队采用计算机模拟仿真，建立热加工过程的数学模型，运用到金属产品生产的工艺方案中。长期以来，我国热加工铸锻件和复杂结构件的生产一直存在成本高、能耗高、附加值低、原材料消耗严重、机加工量大、环境污染严重等问题。很多重大装备的大型铸锻件严重依赖进口，部分特大型铸锻件对我国技术封锁甚至禁运，严重制约了我国能源、冶金机械、船舶动力等重要产业的发展。为了从根本上改善热加工行业制造技术落后这一瓶颈问题，金属所多年来紧紧围绕能源电力、船舶制造、冶金机械、高速铁路等重点产业的发展需求，开发了可视化铸锻技术。可视化铸锻技术作为计算机模拟技术的延伸，是理论、模拟与实测相结合的一项关键技术。该技术直接可视金属充型、凝固和固态成形过程，结合模拟计算，可设计出合理的浇注系统、浇注参数，建立缺陷演化模型，确定合理的铸锻工艺，从而实现铸锻件制备的纯净化、均质化、致密化和终形化共性技术。金属所研发的可视化热加工技术，对金属热加工过程中的组织、应力、缺陷的状态和变化进行模拟计算。换言之，我们的技术可以清晰地看见钢铁是怎样炼成的。金属所研发的可视化热加工技术及部分关键件制造技术获得2012年国家科技进步奖二等奖。

资料来源：孙明月等，让钢铁炼制过程看得见，中国科学报，2017.7.10

第一节 概述

铸造（casting）是指熔炼金属，制造铸型，并将熔融金属在重力或者外力作用下浇注到铸型内，待其冷却凝固后，获得具有一定形状、尺寸和性能的金属零件或毛坯的成形方法。

铸造成形的主要优点：①适合复杂形状，特别是复杂内腔铸件成形。例如复杂箱体、机床床身、阀体、缸体、叶轮、螺旋桨等。②材料适应性广。铸件材料可以是铸铁、铸钢、高温合金、铜合金、铝合金、镁合金、锌合金和各种特殊合金材料。③工艺灵活，尺寸、质量几乎不受限。铸件的质量可以小到几克，大到数百吨；壁厚可以从0.5mm到1m；长度可以从几毫米到几十米。④原料广，成本低。铸造用原料大多来源广泛、价格较低、铸件与最终零件的形状相似、尺寸接近、节省金属材料 and 加工工时。

铸造成形的主要缺点：①铸件内部组织疏松、晶粒粗大，易产生缩孔、缩松、气孔等缺