



中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

金属工艺学

(工程技术类)

主编 司乃钧 许德珠



高等教育出版社

内容简介

本书是根据 2000 年教育部颁布的工程技术类相关专业通用《中等职业学校金属工艺学教学大纲(试行)》编写的。

全书内容包括:金属的力学性能、金属的结构与结晶、铁碳合金相图、热处理、常用机械工程材料、零件材料的选用、铸造成形、锻压成形、焊接成形、胶接与塑料制品成形、零件毛坯的选择等十五章。各章后面附有思考题与作业题。

与本书配套使用的是马中全、宫成立主编的《金属工艺学实习、实验及综合练习》教材。

本书可作为全国中等职业学校工程技术类相关专业的教材,也可作为有关技术人员和技术工人的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

金属工艺学/司乃钧主编. —北京:高等教育出版社,
2001.7

中等职业教育国家规划教材. 工程技术类专业

ISBN 7-04-009878-4

I. 金... II. 司... III. 金属加工-工艺-专业学校-教材 IV. TG

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 039474 号

责任编辑 王瑞丽 封面设计 王 隼 责任绘图 李维平
版式设计 马静如 责任校对 俞声佳 责任印制 陈伟光

金属工艺学(工程技术类)

司乃钧 许德珠 主编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 北京外文印刷厂

开 本 787×1092 1/16

版 次 2001 年 7 月第 1 版

印 张 17.25

印 次 2001 年 7 月第 1 次印刷

字 数 420 000

定 价 17.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

中等职业教育国家规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划，根据《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》(教职成[2001]1 号)的精神，教育部组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写，从 2001 年秋季开学起，国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲编写而成的，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定通过。新教材全面贯彻素质教育思想，从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发，注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本，努力为教材选用提供比较和选择，满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材，并在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

2001 年 5 月

前 言

为适应中等职业教育教学改革和发展的需要,在认真总结国内外同类教材建设经验的基础上,根据教育部 2000 年颁布的工程技术类相关专业通用的《中等职业学校金属工艺学教学大纲(试行)》的要求,编写了本教材。与本教材配套使用的是马中全、官成立主编的《金属工艺学实习、实验及综合练习》教材。

本教材内容由基础模块和选修模块组成。基础模块是按各专业学生都必须学习的基础内容,即必须达到的最低要求编写的;选修模块可供各类学校、专业和学生作弹性选择。为便于区别和选用,在教材中基础模块内容不标符号,选修模块内容标有“*”号。使用本教材时,各校可根据专业特点、教学时数等具体情况,对其内容进行适当选择。

本教材的编写过程中注意了以下几点:

(1) 为中等职业教育培养目标服务,并为学习其他课程及形成综合职业能力打下基础。贯彻了以提高学生全面素质为目的,以培养学生创新能力和实践能力为重点的教学指导思想。

(2) 教材内容体现了以应用为目的,以掌握概念、强化能力、扩大知识面为重点的教学原则,并力求做到注重基础、突出重点、少而精、由浅入深、循序渐进、通俗易懂和学以致用,使教材清晰、形象,易于自学。

(3) 为培养分析和解决问题的能力,每章内容后面附有思考题与作业题。这些题目可供学生课堂讨论或布置课后作业选用。

(4) 考虑了与《金属工艺学实习、实验及综合练习》教材的分工和衔接。

(5) 全书名词、术语、牌号、型号均采用了最新国家标准和法定计量单位。

(6) 为节约学时和防止不必要重复,本教材未编写切削加工内容,而将该部分内容放在实习教材中结合实习进行讲授,以利于学生理解和掌握。

本教材由哈尔滨理工大学高等职业技术学院司乃钧(绪论,第九、十、十一章)、许德珠(第四、十三章)、线恒录(第十二、十五章)、吕焯(第二、三、六章)、屈丽(第十四章)、高琪(第一、五章)、逯允龙(第七、八章)共同编写。司乃钧教授和许德珠教授任主编,线恒录副教授任副主编。

高等教育出版社聘请哈尔滨工业大学陈鸿勋教授和九江职业技术学院郁兆昌副教授任本教材的主审。在编写过程中,得到了田柏龄、金禧德、张继世、朱起凡等教授,以及有关学校、工厂的帮助与指导,并为本教材编写提供了有关资料,张麒参加了部分工作,在此一并表示衷心感谢。

本书由全国中等职业教育教材审定委员会审定通过。赵国景教授任责任主审,张连凯、张勤副教授审稿。他们对提高书稿质量起了重要作用,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,编写时间短促,书中不妥之处,恳请批评指正。

编者

2001 年 1 月

目 录

绪论	1	§ 5-3 合金钢分类与编号	66
第一章 金属的力学性能	4	§ 5-4 合金结构钢	67
§ 1-1 强度与塑性	4	§ 5-5 合金工具钢与高速工具钢	75
§ 1-2 硬度	6	§ 5-6 不锈、耐蚀钢与耐热钢	81
§ 1-3 韧性及疲劳强度	8	思考题与作业题	82
思考题与作业题	10	第六章 铸铁	86
* 第二章 金属的结构与结晶	11	§ 6-1 铸铁的石墨化及影响因素	86
§ 2-1 纯金属的结构	11	§ 6-2 灰铸铁	88
§ 2-2 纯金属的实际结构	13	§ 6-3 球墨铸铁	90
§ 2-3 合金的结构	15	§ 6-4 其他铸铁简介	93
§ 2-4 纯金属的结晶	16	思考题与作业题	97
§ 2-5 合金的结晶与二元合金相图	18	第七章 非铁合金与粉末冶金材料	98
思考题与作业题	19	§ 7-1 铝及铝合金	98
第三章 铁碳合金相图与非合金钢	20	§ 7-2 铜及铜合金	104
§ 3-1 铁碳合金的基本相	20	§ 7-3 轴承合金	108
§ 3-2 铁碳合金相图	21	* § 7-4 粉末冶金材料	110
§ 3-3 非合金钢(碳钢)	28	思考题与作业题	113
思考题与作业题	33	* 第八章 金属材料的表面处理	114
第四章 钢的热处理	35	§ 8-1 金属表面强化处理	114
* § 4-1 钢在加热时的转变	35	§ 8-2 金属表面防腐处理	115
* § 4-2 钢在冷却时的转变	37	§ 8-3 金属表面装饰处理	117
§ 4-3 钢的退火与正火	42	思考题与作业题	118
§ 4-4 钢的淬火	43	第九章 非金属材料与复合材料	119
§ 4-5 钢的回火	46	§ 9-1 高分子材料	119
§ 4-6 钢的表面热处理	48	§ 9-2 陶瓷	122
§ 4-7 钢的化学热处理	50	§ 9-3 复合材料	123
§ 4-8 其他热处理方法简介	52	思考题与作业题	125
* § 4-9 热处理零件质量分析	53	* 第十章 机械工程材料的选用	126
* § 4-10 热处理技术条件及工序位置	56	§ 10-1 零件的失效	126
思考题与作业题	58	§ 10-2 选材的原则、方法和步骤	127
第五章 低合金钢与合金钢	60	§ 10-3 典型零件与工具材料的选用	130
§ 5-1 合金元素在低合金钢与合金钢中的 作用	60	思考题与作业题	134
§ 5-2 低合金钢	63	第十一章 铸造成形	136
		§ 11-1 砂型铸造	136

* § 11-2 常用金属铸件生产	144	§ 13-3 压焊与钎焊	236
§ 11-3 铸件质量与技术检验	149	* § 13-4 金属的热切割	239
* § 11-4 铸造工艺设计简介	153	* § 13-5 常用金属材料的焊接	240
* § 11-5 铸件结构设计	161	§ 13-6 焊接方法的选择	243
§ 11-6 特种铸造	168	* § 13-7 焊接结构设计	245
§ 11-7 铸造方法的选择	173	思考题与作业题	249
思考题与作业题	174		
第十二章 锻压成形	178	* 第十四章 胶接技术与塑料制品	
* § 12-1 金属的塑性变形	178	成形	252
* § 12-2 坯料的加热和锻件的冷却	183	§ 14-1 胶接技术	252
§ 12-3 自由锻	184	§ 14-2 塑料制品成形	257
§ 12-4 模锻	193	思考题与作业题	258
§ 12-5 板料冲压	200	* 第十五章 机械零件毛坯的选择	259
* § 12-6 轧制、挤压与拉拔	208	* § 15-1 选择毛坯的原则和依据	259
§ 12-7 锻压方法的选择	212	§ 15-2 常用机械零件毛坯的种类和 选择	260
思考题与作业题	213	§ 15-3 机械零件毛坯选择示例	262
第十三章 焊接成形	215	思考题与作业题	263
§ 13-1 焊条电弧焊	215	主要参考文献	265
§ 13-2 其他熔焊方法	230		

绪 论

材料是人类生产和生活的物质基础，人类社会发展的历史表明，生产技术的进步和生活水平的提高与新材料的应用息息相关。每一种新材料的出现和应用，都会使社会生产和生活发生重大的变化，并有力地推动着人类文明的进步。因此，历史学家常以石器时代、铜器时代、铁器时代来划分人类历史发展的各个阶段，而现在人类已跨进人工合成材料的新时代。

目前，许多工业化国家都把材料科学作为重点发展的学科之一，可见材料科学在现代技术中的地位和作用。

材料的种类很多，其中用于机械制造的各种材料，称为机械工程材料。生产中用来制作机械工程结构、零件和工具的机械工程固体材料，分为金属材料、非金属材料 and 复合材料三大类。

金属材料是最重要的机械工程材料，它包括：铁和以铁为基的合金(俗称黑色金属)，如钢、铸铁和铁合金等；非铁合金(俗称有色金属)，如铜及铜合金、铝及铝合金等。钢铁材料应用最广，占全部结构材料、零件材料和工具材料的90%左右。

非金属材料是泛指除金属材料和复合材料以外的材料，机械制造中常用的有高分子材料、陶瓷材料等。非金属材料不但能代替部分金属材料，而且已经发展成为一种重要的、独立的新型工程材料。近年来，非金属材料发展很快，其中以人工合成高分子材料的发展最为迅速。目前，金属材料、非金属材料 and 复合材料相互补充，相互结合，已经形成了一个完整的材料体系。

随着国民经济的高速发展，机械工程材料的使用量越来越大。在机械产品设计和制造过程中，所遇到的有关机械工程材料和热处理方面的问题日益增多。实践证明，生产中往往由于选材不当或热处理不妥，使机械零件的使用性能达不到规定的技术要求，从而导致零件在使用中因发生过量变形、磨损或断裂而过早失效。所以，在生产中合理选用工程材料和热处理方法，正确制定工艺路线，对充分发挥工程材料本身的性能潜力，保证材料具有良好的加工性能，获得要求的使用性能，提高产品质量，节约材料，降低成本等起着重大作用。

机械产品的制造过程，一般是先将材料通过热成形方法制成零件的毛坯或半成品，再经切削加工制成所需的零件，最后将零件装配成机械。在制造过程中，为改善毛坯和工件的性能，常要对其进行热处理。

在上述过程中，合理选择毛坯种类和成形方法具有重大技术和经济意义。因为，零件切削加工的工序数量、材料消耗、加工工时，所用设备和工、夹、量具，零件的质量，生产率与成本等在很大程度上都取决于毛坯种类、结构及其成形方法。例如，某曲轴净重^①为17 kg，采

^① 根据 GB 3102.3—1993《力学的量和单位》，“重量”一词按照习惯仍可用于表示“质量”，但是，不赞成这种习惯。为避免与表达物品品质的优劣程度的“质量”混淆，本书在定量计算中用“质量”(kg)，在定性说明中仍用“重量”一词。

用圆钢作毛坯经切削加工制成，切屑为轴重量的 189%；若采用锻件作毛坯经切削加工制成，切屑仅为轴重量的 30%，并可减少 1/6 的切削工时。

若采用高质量的毛坯，有些零件不用车削、铣削就可直接经磨削加工制成。目前，现代精密铸造和精密锻造技术，已能够使一些制件在热成形后不再经过切削加工就可直接达到使用要求。

为提高毛坯生产率、质量，降低成本，改善劳动条件，毛坯生产应广泛采用机械化、自动化的生产方式和先进工艺，使毛坯在形状、尺寸和表面质量上尽量与零件要求相接近，以达到少、无切屑加工。

机械工程材料与热成形技术是在生产实践中发展起来的，我国的金属材料与热成形技术发展史可远溯至史前。

我国是世界上应用铜、铁最早的国家，远在 4 000 年前就已经开始使用铜合金。1939 年在河南安阳武官村出土的商殷祭器司母戊大方鼎，其体积庞大，鼎重 875 kg，鼎身花纹精巧，造型精美。这说明，远在商代(公元前 1562 年 ~ 前 1066 年)我国就有了相当发达的冶铸青铜技术。

公元前 6 ~ 7 世纪的春秋时期，我国已发明了冶铁技术，开始用铸铁作农具，这比欧洲国家早 1 800 多年。

在北京大钟寺内保存的高 6.75 m、直径 3.3 m、重量 46.5 t 的铜钟，是明朝永乐年间(约 1420 年)铸造的，在世界大钟之林中铸造年代最久远。钟身内外铸满了佛经，经文清晰，排列巧妙，总字数达 230 184 个，是世界上铸字最多的大钟。撞击一下，钟声悠扬悦耳，最远可传 40 ~ 50 km。永乐大钟铸造工艺先进，合金配比恰当，显示了我国古代铸造技术的卓越成就，是世界铸造史上的奇迹。

在 3 300 多年前的殷墟文化早期，锻造已用于兵器生产。1972 年在河北藁城出土的商代铁刃铜钺，是目前发现的我国最早的锻件。到了战国时代，已经有了比较高明的制剑技术，锻制出许多宝刀名剑及日常用具，说明当时我国已掌握了炼钢、锻造、热处理等技术。

在河南辉县发掘出的玻璃阁战国墓中，殉葬铜器的耳和足是用钎焊方法与本体连接的，这说明战国时期我国已采用了焊接技术。

明朝宋应星所著《天工开物》一书，内有冶铁、炼钢、铸钟、锻铁、淬火等各种金属加工方法，它是世界上有关金属加工工艺最早的科学著作之一。这充分反映了我国人民在金属热成形方面的卓越成就。

上述事实说明，我国古代在材料及其加工工艺方面的科学技术曾远远超过同时代的欧洲，在世界上占有过遥遥领先的地位，对世界文明和人类进步作出过巨大贡献。但是，由于封建制度的长期统治，使我国工农业生产和科学技术在 20 世纪 50 年代以前处于停滞落后状态。

新中国成立后，我国工农业生产和材料工业得到迅速发展，建立了机械制造、矿山冶金、交通运输、石油化工、电子仪表、航空航天等许多现代化工业，为国民经济进一步高速发展奠定了牢固的基础。目前，我国钢铁产品品种繁多，年产量已超过一亿吨(1996 年)，非金属材料的产量也有了很大增长。

我国已进行了耗钢水达 490 t 的轧钢机架和 500 t 大钢锭的铸造，完成了 12 kt 水压机的生产，196 t 汽轮机转子体的锻造，以及 15 MPa 氢反应器和 50 kt 远洋油轮的焊接等。

1989 年我国在香港建成的天坛大佛, 佛像包括莲花瓣在内总高 26.4 m, 总重量约 250 t, 能承受海洋性气候的盐腐蚀和百年不遇的特大台风袭击。大佛脸部用锡青铜整块铸成, 其展开面积为 42 m²; 佛体由 202 块铸造锡青铜壁板拼焊而成。大佛工程是融艺术与铸造、焊接等现代科学技术于一体的复杂而特殊的系统工程。天坛大佛雄健、庄重, 是艺术上的瑰宝, 得到了国内外的高度赞赏。

应当指出, 当今世界各国的工业技术都在迅速发展, 与工业化国家相比, 我国在工程材料的品种、质量、机械产品质量、生产能力、技术水平、经济效益和管理水平等方面仍有一定差距。因此, 我们必须加倍努力学习, 刻苦钻研, 掌握必要的知识, 重视合理使用材料和制造工艺技术的研究, 为赶超世界先进水平作出贡献。

本课程是工程技术类相关专业学生必修的一门以工艺为主的综合性技术基础课。通过本课程学习, 学生应达到下列基本要求:

(1) 掌握常用机械工程材料的牌号、性能及应用, 初步具有合理选用材料的能力; 掌握常用热成形技术和冷冲压的实质、工艺特点和应用, 初步具有合理选用毛坯的能力; 掌握常用热处理方法的实质、目的和应用, 初步具有确定热处理工序位置的能力。

(2) 熟悉毛坯或零件的结构工艺性; 熟悉影响产品质量的主要因素; 熟悉常用热成形技术所用主要设备和工具的使用范围。

(3) 了解常用机械工程材料的成分、组织、结构、性能之间的关系和变化规律; 了解与本课程有关的新材料、新技术和新工艺。

学习时, 根据教学内容要完成老师布置的思考题与作业题, 要自己动手做好实验, 写出实验报告, 以巩固所学知识, 培养独立分析和解决问题的初步能力, 并获得一定的实验技能。

本课程的实践性和应用性都很强, 为保证教学质量, 本教材内容应在金工实习基础上进行学习, 注意理论与实践结合, 才能达到本课程的预期目的和要求。教材中热处理方法的选择和确定热处理工序位置、工程材料的选用、毛坯或零件成形方法的选用等内容, 尚需在有关后续课、课程设计和毕业设计中反复练习、巩固与提高后, 才能达到基本掌握与应用的要求。

本课程以课堂教学为主, 并采用必要的电化教学和现场教学。

第一章 金属的力学性能

为正确、合理地使用金属材料，必须了解其性能。金属材料的性能包括使用性能和工艺性能。使用性能是指金属材料在使用过程中所表现出的性能，如力学、物理、化学等性能。工艺性能是指金属材料在各种加工过程中所表现出的性能(如铸造、锻压、焊接、热处理及切削加工等性能)。一般选用金属材料时，是以力学性能(或称机械性能)作为主要依据的。

力学性能是指金属在外力作用下所表现出来的特性(亦指金属在力作用下所显示与弹性和非弹性反应相关或涉及应力-应变关系的性能)，主要有强度、塑性、硬度、韧性和疲劳强度等。表征和判定金属力学性能所用的指标和依据，称为金属力学性能判据。判据的高低表征了金属抵抗各种损伤作用能力的大小，也是金属制件设计时选材和进行强度计算的主要依据。

§ 1-1 强度与塑性

一、强度

强度是指金属抵抗永久变形(塑性变形)和断裂的能力。工程上常用屈服点、抗拉强度作为强度判据。测定金属强度判据的常用方法是拉伸试验。

拉伸试验常用的试样截面为圆形，称为圆形拉伸试样，如图 1-1。图中 d_0 为试样的原始直径(mm)， l_0 为试样的原始标距长度(mm)。根据国家标准(GB 6397—1986)规定，拉伸试样分为长试样($l_0 = 10d_0$)和短试样($l_0 = 5d_0$)两种。

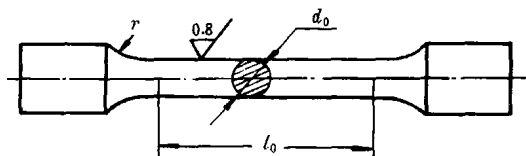


图 1-1 圆形拉伸试样简图

试验时，随拉伸力不断增加，试样伸长量也不断增加，直至试样被拉断。在整个拉伸过程中，试验机的自动记录装置可将拉伸力与变形(伸长)量描绘在坐标图上，即得到拉伸力和伸长量的关系曲线，称为力-伸长曲线(或拉伸曲线)，如图 1-2。

由图 1-2 可见， OE 段为一斜直线，表示伸长量与拉伸力成正比，试样随拉伸力的增加而均匀伸长，此时若去掉拉伸力，试样可完全恢复到原来的形状和尺寸，即材料处于弹性变形阶段。当拉伸力超过 F_e 后，试样除产生弹性变形外，还开始产生微量塑性变形，此时若去掉拉

伸力，试样不能恢复到原来形状，将保留一部分塑性变形。拉伸力增加到 F_s 时，图上出现水平(或锯齿形)线段，表示拉伸力不增加，变形量却继续增大，这种现象称为屈服现象。拉伸力超过 F_s 后，试样的伸长量又随拉伸力的增加而增大，此时，试样已产生大量的塑性变形。当拉伸力增加到 F_b 时，试样某处横截面发生了局部收缩，即出现了“缩颈”。此后，试样的变形局限在缩颈处，由于截面缩小，所能承受的拉伸力迅速减小，当达到 K 点时，试样在缩颈处被拉断。

金属材料拉伸时的强度判据用应力来度量。受外力作用后，导致物体内部之间的相互作用力，称为内力，单位面积上的内力称为应力，用符号 σ 表示。强度的主要判据有弹性极限、屈服点(或屈服强度)和抗拉强度。

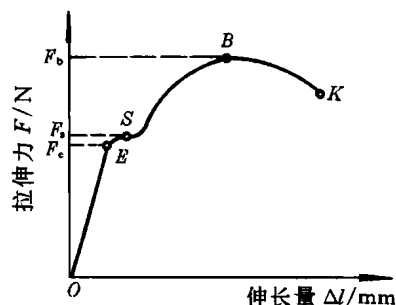


图 1-2 低碳钢的力 - 伸长曲线

1. 弹性极限

弹性极限是指试样产生完全弹性变形时所能承受的最大拉应力，用符号 σ_e 表示。

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0} \quad \text{MPa}$$

式中： F_e ——试样产生完全弹性变形时的最大拉伸力，N；

A_0 ——试样原始横截面积， mm^2 。

2. 屈服点

屈服点是指试样在试验过程中力不增加(保持恒定)仍能继续伸长(变形)时的应力，用符号 σ_s 表示。

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0} \quad \text{MPa}$$

式中： F_s ——产生屈服时的拉伸力，N。

许多金属材料(如铸铁、高碳钢等)拉伸时没有明显的屈服现象。按国家标准 GB 10623—1989 规定，以试样去掉拉伸力后，其标距部分的残余伸长达达到规定的原始标距百分比时的应力，作为该材料的条件屈服点(屈服强度)。例如， $\sigma_{r0.2}$ 表示规定残余伸长率达 0.2% 时的应力。

σ_s 或 $\sigma_{r0.2}$ 表示了材料对微量塑性变形的抵抗能力，零件工作时，一般不允许产生塑性变形，因此，屈服点是设计和选材时的主要参数。

3. 抗拉强度

抗拉强度是指试样被拉断前所能承受的最大拉应力，用符号 σ_b 表示。

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0} \quad \text{MPa}$$

式中： F_b ——试样拉断前的最大拉伸力，N。

σ_b 表征了材料对最大均匀塑性变形或断裂的抵抗能力。屈强比(σ_s/σ_b)越小，零件可靠性越高，因为若超载也不会立即断裂。但屈强比太小，则材料强度的有效利用率降低。 σ_b 也是设计和选材时的主要参数。

二、塑性

塑性是指断裂前材料发生不可逆塑性变形的能力。其主要判据为断后伸长率和断面收缩率，它们也是通过拉伸试验测得的。

1. 断后伸长率

断后伸长率是指试样拉断后标距的伸长与原始标距的百分比，用符号 δ 表示。

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中： l_0 ——试样原始标距长度，mm；

l_k ——试样拉断后的长度，mm。

同一材料标距长度不同，其断后伸长率数值也不同，而且不能直接比较。长试样的伸长率用符号 δ_{10} 表示，通常写成 δ ；短试样用 δ_5 表示。同一材料 $\delta_5 > \delta_{10}$ 。

2. 断面收缩率

断面收缩率是指试样拉断后，缩颈处横截面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比，用符号 ψ 表示。

$$\psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \times 100\%$$

式中： A_k ——试样拉断后缩颈处最小横截面积，mm²。

断面收缩率不受试样尺寸影响，因此能比较确切地反映材料的塑性。

一般， δ 或 ψ 的值越大，表明材料塑性越好。塑性好的材料可用轧制、锻造、冲压等方法加工成形。塑性好的零件若超载，也可因其塑性变形而避免突然断裂，提高了工件的安全性。

§ 1-2 硬 度

硬度是指材料抵抗局部变形，特别是塑性变形、压痕或划痕的能力。硬度是衡量材料软硬程度的判据。

材料的硬度可用硬度试验测定。硬度试验设备简单、操作简便、迅速，可直接在半成品或成品件上进行试验而不损坏被测件，并且还可根据硬度值估计出材料的近似强度和耐磨性。因此，硬度在一定程度上反映了材料的综合力学性能，应用很广。常将硬度作为技术要求标注在零件图样和工艺文件中。硬度试验方法较多，最常用的有以下几种。

一、布氏硬度

布氏硬度试验原理如图 1-3。用直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球做压头，以相应试验力 F 压入试件表面，经规定的保持时间后，卸除试验力，得到一直径为 d 的压痕。用试验力除以压痕表面积，所得值即为布氏硬度值，用符号 HB 表示。淬火钢球为压头时，符号为 HBS；硬质合金球为压头时，符号为 HBW。

$$\text{HBS (HBW)} = \frac{F}{A_{\text{压}}} = \frac{F}{\pi D h} = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \text{kgf/mm}^2 \quad (\text{试验力 } F \text{ 的单位为 kgf})$$

$$\text{HBS (HBW)} = 0.102 \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \text{kgf/mm}^2 \quad (\text{试验力 } F \text{ 的单位为 N})$$

式中： $A_{\text{压}}$ ——压痕表面积， mm^2 ；

h 、 d 、 D ——压痕深度、压痕直径、压头直径， mm 。

实际实验时，布氏硬度不需计算，只需根据测出的压痕直径 d 值查表即可得到硬度值。 d 值越大，硬度值越小； d 值越小，硬度值越大。布氏硬度一般不标单位，其表示方法为：在符号 HBS 或 HBW 之前写出硬度值，符号后面依次用相应数字注明压头直径、试验力和保持时间（10 ~ 15 s 不标注）。例如 120HBS10/1 000/30 表示用直径为 10 mm 的淬火钢球作压头，在 1 000 kgf (9.807 kN) 试验力作用下保持 30 s 所测得的布氏硬度值为 120。

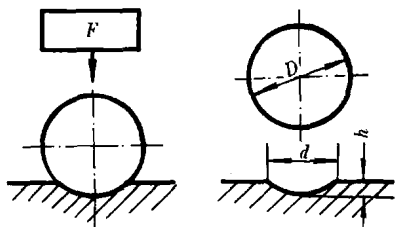


图 1-3 布氏硬度试验原理示意图

布氏硬度压痕面积较大，能反映较大范围内材料的平均硬度，测定的结果较稳定、准确。但布氏硬度试验不够简便。又因压痕大，对金属表面损伤较大，故不宜测试薄件或成品件。HBS 适于测量硬度值小于 450 的材料，HBW 适于测量硬度值较高的材料。因目前使用的布氏硬度计多数用淬火钢球作压头，故主要用来测定灰铸铁、有色金属以及经退火、正火和调质处理的钢材等。

二、洛氏硬度

洛氏硬度试验是采用顶角为 120° 的金刚石圆锥或直径为 1.588 mm 的淬火钢球作压头，在初始试验力及总试验力先后作用下，将压头压入试样表面，在规定的保持时间后卸除主试验力，用测量的残留压痕深度增量计算硬度的一种压痕硬度试验方法。

如图 1-4，1—1 为加上初试验力后，压头经试样表面 a 压入到 b 处， b 处为测量压痕深度的起点（可防止试样表面不平引起的误差）；2—2 为初试验力和主试验力共同作用下，压头压入到 c 处；3—3 为卸除主试验力但保持初试验力的条件下，因试样弹性变形的恢复使压头回升到 d 处。因此，压头在主试验力作用下，实际压入试样产生塑性变形的压痕深度为 bd （ bd 为残留压痕深度增量）。用 bd 值可判断被测材料的硬度。 bd 值越大，材料硬度值越低； bd 值越小，硬度值越高。为适应习惯上数值越大，硬度越高的概念，故用一常数 K 减去 bd 作为硬度值（每 0.002 mm 的压痕深度为一个硬度单位），直接由硬度计表盘上读出。洛氏硬度用符号 HR 表示。

$$\text{HR} = K - \frac{bd}{0.002}$$

金刚石作压头时， K 为 100；淬火钢球作压头时， K 为 130。

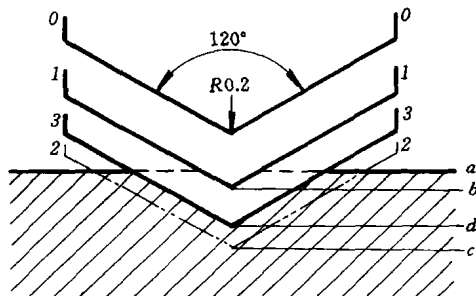


图 1-4 洛氏硬度试验原理示意图

为使同一硬度计能测试不同硬度范围的试件，可采用不同的压头和试验力。根据压头和试验力不同，洛氏硬度有不同的标尺。按 GB/T 230—1991 规定有九种，但常用的有 HRA、HRB 和 HRC 三种，其中 HRC 应用最广。洛氏硬度的表示方法为：在符号前面写出硬度值，如 62HRC、85HRA 等。洛氏硬度的试验条件和应用范围见表 1-1。

表 1-1 常用洛氏硬度的试验条件和应用范围

硬度符号	压头类型	总试验力 $F_{总}/\text{kgf (N)}$	硬度值有效范围	应 用 举 例
HRA	120°金刚石圆锥	60 (588.4)	70 ~ 88	硬质合金，表面淬火、渗碳钢等
HRB	$\phi 1.588\text{ mm}$ 淬火钢球	100 (980.7)	20 ~ 100	有色金属，退火、正火钢等
HRC	120°金刚石圆锥	150 (1 471.1)	20 ~ 70	淬火钢，调质钢等

注：总试验力 = 初试验力 + 主试验力；初试验力为 10 kgf (98.07 N)。

洛氏硬度试验操作简便、迅速，压痕小，无损于试件表面，可直接测量成品或较薄工件的硬度值。但因压痕小，对组织和硬度不均匀的材料，所测结果不够准确。因此，需在试件上测定三点取其平均值。洛氏硬度没有单位，各标尺之间没有直接的对应关系。

* 三、维氏硬度

维氏硬度试验原理与布氏硬度试验原理相似，不同的是，压头采用两相对面夹角为 136°的正四棱锥金刚石。试验时，在规定试验力 F 作用下，压头压入试件表面，保持一定时间后卸除试验力，测量压痕对角线长度 d ，可计算出压痕表面积。压痕单位面积上所承受的平均压力即为维氏硬度值，用符号 HV 表示。

维氏硬度值不需计算，一般是根据 d 值查 GB 4340—1984 附表得出。维氏硬度习惯上不标单位，其表示方法为：在符号 HV 前面写出硬度值，HV 后面依次用相应数字注明试验力和保持时间(10 ~ 15 s 不标)。例如 640HV30/20 表示在 30 kgf (294.2 N) 试验力作用下，保持 20 s 测得的维氏硬度值为 640。

与布氏、洛氏硬度相比，维氏硬度不存在布氏压头变形和洛氏各种标尺不能相互对应的问题。维氏硬度试验因试验力小(常用 49.03 N)，压痕浅，轮廓清晰，数值准确可靠，故广泛用于测量金属镀层、薄片材料及化学热处理后的表面硬度。又因其试验力可在很大范围内选择(49.03 ~ 980.7 N)，所以可测量从很软到很硬材料的硬度。但维氏硬度不如洛氏硬度试验简便、迅速，故不适于成批生产的常规试验。

§ 1-3 韧性与疲劳强度

一、韧性

韧性是指金属在断裂前吸收变形能量的能力。金属的韧性一般随加载速度提高、温度降

低、应力集中程度的加剧而减小。韧性的判据是通过冲击试验确定的，它表示了金属材料抵抗冲击的能力。

试验时，将试样缺口背向摆锤冲击方向放在试验机支座上(图 1-5a)，摆锤举至 h_1 高度，

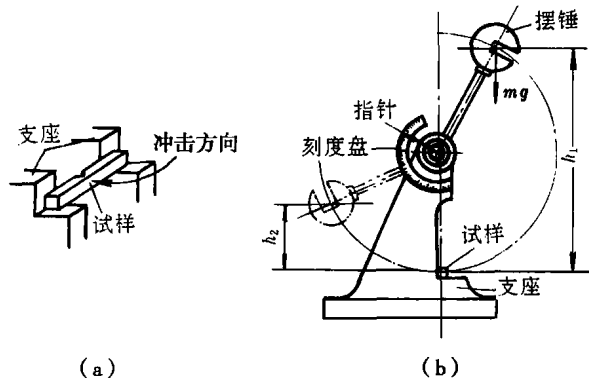


图 1-5 摆锤式冲击试验原理示意图

具有位能 mgh_1 ，然后让摆锤自由落下，冲断试样后，摆锤升至高度 h_2 (图 1-5b)，此时摆锤的位能为 mgh_2 。摆锤冲断试样所消耗的能量，即试样在冲击试验力一次作用下折断时所吸收的功，称为冲击吸收功，用 A_K 表示，U 型缺口试样用 A_{KU} 表示，V 型缺口试样用 A_{KV} 表示。

$$A_K = mgh_1 - mgh_2 = mg(h_1 - h_2) \quad J$$

A_K 值可由冲击试验机刻度盘上直接读出，不需计算。冲击试样缺口底部处单位横截面积上的冲击吸收功，称为冲击韧度，用符号 a_K 表示，

$$a_K = \frac{A_K}{A} \quad J/cm^2$$

式中： A ——试样缺口底部横截面积， cm^2 。

冲击试验时，冲击吸收功中只有一部分消耗在断开试样缺口的截面上，冲击吸收功的其余部分则消耗在断开试样前，缺口附近体积内的塑性变形上。因此，冲击韧度不能真正代表材料的韧性，而用冲击吸收功 A_K 作为材料韧性的判据更为适宜。

冲击吸收功越大，材料韧性越好。冲击吸收功与温度有关。由图 1-6 可知， A_K 值随温度降低而减小。在不同温度的冲击试验中，冲击吸收功急剧变化或断口韧性急剧转变的温度区域，称为韧脆转变温度。韧脆转变温度越低，材料的低温抗冲击性能越好。

冲击吸收功还与试样形状、尺寸、表面粗糙度、组织和缺陷等有关。因此，冲击吸收功一般作为选择材料的参考，而不能直接用于强度计算。

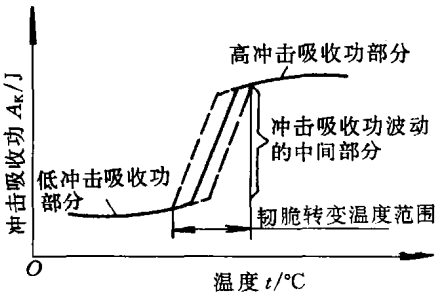


图 1-6 温度对冲击吸收功的影响

二、疲劳强度

按循环应力大小和方向不同，零件承受的应力分为交变应力和重复应力两种。零件在循环

应力作用下，在一处或几处产生局部永久性累积损伤，经一定循环次数后产生裂纹或突然发生完全断裂的过程，称为金属疲劳(疲劳断裂)。疲劳断裂前无明显塑性变形，因此危险性很大，常造成严重事故。据统计，大部分零件的损坏都是由疲劳造成的。

实验证明，钢铁材料能承受的交变应力 σ 与断裂前应力循环基数 N 之间的关系如图 1-7。由图可知，当 σ 低于某一值时，曲线与横坐标平行，表示材料可经无数次循环应力作用而不断裂，这一应力称为疲劳强度，用 σ_{-1} 表示光滑试样对称弯曲疲劳强度。

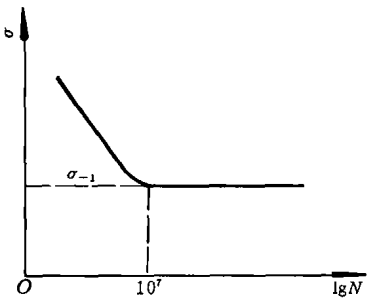


图 1-7 钢铁材料的疲劳曲线

一般，交变应力越小，断裂前所能承受的循环次数越多；交变应力越大，循环次数越少。工程上用的疲劳强度，是指在一定的循环基数下不发生断裂的最大应力，通常规定钢铁材料的循环基数取 10^7 ，有色金属为 10^8 。

材料存在气孔、微裂纹、夹杂物、表面划痕、局部应力集中、刀痕等因素，均可加快疲劳断裂。减小零件表面 Ra 值和进行表面淬火、喷丸、表面滚压等方法都可提高疲劳强度。

思考题与作业题

- 1-1 什么是金属的力学性能及其判据？金属的力学性能主要有哪些判据？
- 1-2 按 GB/T 699—1999 规定，15 钢的力学性能判据应不低于下列数值： $\sigma_b \geq 375 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_s \geq 225 \text{ MPa}$ 、 $\delta_5 \geq 27\%$ 、 $\psi \geq 55\%$ 。现将购进的 15 钢制成 $d_0 = 10 \text{ mm}$ 的圆形截面短试样，经拉伸试验测得 $F_b = 33.81 \text{ kN}$ 、 $F_s = 20.68 \text{ kN}$ 、 $l_k = 65 \text{ mm}$ 、 $d_k = 6 \text{ mm}$ ，试问这批 15 钢的力学性能是否合格？
- 1-3 现测得长、短两根圆形截面标准试样的 δ_{10} 和 δ_5 均为 30%，求两试样拉断后的标距长度是多少？两试样中哪一根塑性好？为什么？
- 1-4 什么是硬度？常用的硬度试验方法有哪些？
- 1-5 试述布氏硬度和洛氏硬度的试验原理、优缺点及应用范围。
- 1-6 下列情况应采用什么方法测定硬度？写出硬度值符号：
钳工用手锤锤头，铸铁轴承座毛坯，硬质合金刀片，铝合金气缸体，钢件表面很薄的硬化层。
- 1-7 什么是冲击吸收功？冲击吸收功大小对材料韧性有何影响？
- 1-8 金属的疲劳断裂是怎样产生的？如何提高零件的疲劳强度？

* 第二章 金属的结构与结晶

不同的金属材料具有不同的性能，金属材料性能取决于材料的结构和结晶后形成的组织。因此，研究金属结构和结晶是掌握、改善金属材料性能的必要基础。金属包括纯金属与合金。

§ 2-1 纯金属的结构

一、金属结构的基本知识

1. 晶体与非晶体

自然界中一切物质都是由原子组成的，根据固态物质内部原子的聚集状态，固体分为晶体和非晶体两大类。非晶体的原子是无规律地堆积在一起的，如沥青、玻璃、松香等。晶体的原子按一定几何形状作有规律的重复排列(图 2-1a)，如金刚石、石墨及固态纯金属与合金。

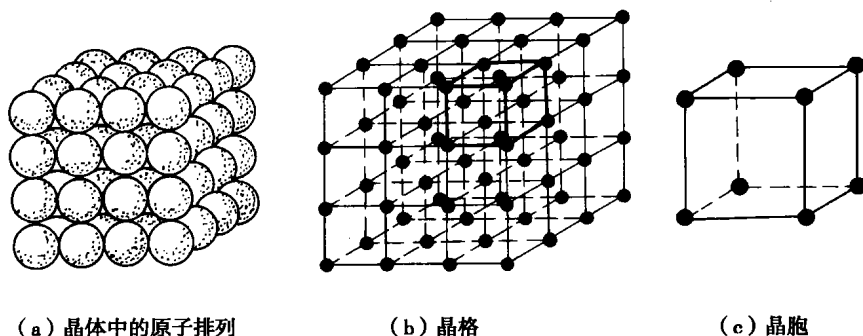


图 2-1 简单立方晶格与晶胞示意图

晶体具有固定的熔点，而非晶体没有固定熔点。

2. 晶格与晶胞

为便于描述晶体内部原子排列的规律及几何形状，可将原子近似地看成一个点，并用假想的线条(直线)将各原子中心连接起来，便形成一个空间格子(图 2-1b)。这种抽象的用于描述原子在晶体中规律排列方式的空间几何图形，称为结晶格子(简称晶格)。晶格中直线交点称为结点。

晶格是由最基本的几何单元重复堆砌而成的，这种最基本的几何单元称为晶胞(图 2-1c)。分析晶胞便能从中找出晶体特征及原子排列规律。晶胞大小和形状用棱边长度 a 、 b 、 c 和棱边夹角 α 、 β 、 γ 来表示，如图 2-2。棱边长度称为晶格常

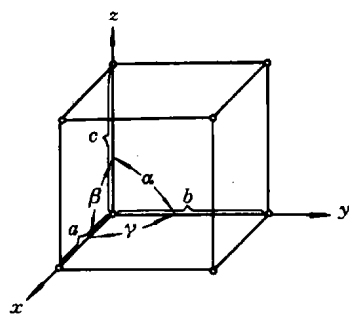


图 2-2 晶胞的表示方法