



高职高专“十一五”规划教材

模具材料

MUJU CAILIAO

李有才 主编 刘小宁 主审



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

模具材料

李有才 主编
刘 兵 袁小会 副主编
刘小宁 主审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书将工程材料及热处理与模具材料及表面处理有机地整合为一体,适应了目前教学改革的需要。可以满足教学课时数为30~72学时的教学需要。

本书各章内容基本上是按照材料性能、制造加工工艺、材料应用的顺序编写的。全书除绪论外共分为6章,包括工程材料基础、模具材料与模具失效分析、冷作模具材料、热作模具材料、塑料模具材料、模具表面强化技术等内容。各章配有一定量的实例和复习思考题供学习时选用。

本书主要适应于职业技术院校和成人教育院校模具设计与制造专业的学生使用,也可供从事模具设计与制造的工程技术人员、中等职业学校模具专业的学生和自学者参考。

图书在版编目(CIP)数据

模具材料/李有才主编. —北京:化学工业出版社,2009.9

高职高专“十一五”规划教材

ISBN 978-7-122-06370-0

I. 模… II. 李… III. 模具-材料-高等学校:技术学院-教材 IV. TG76

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第125772号

责任编辑:高 钰

文字编辑:李 娜 王金生

责任校对:李 林

装帧设计:张 辉

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:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张14¼ 字数371千字 2009年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 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:25.00元

版权所有 违者必究

前 言

本书是在总结编者多年教学经验的基础上进行编写的，在编写过程中充分考虑了现代企业对高职高专人才知识与能力的要求，遵循了教育的基本规律，注重培养学生分析问题、解决问题的能力，本书是职业技术学院和成人教育院校模具设计与制造专业学生的必备书，也可供从事模具设计与制造的工程技术人员、中等职业学校模具专业学生和自学者的参考。本书具有如下特点。

1. 内容新。本书在内容的选取方面吸收了多年高职高专教改的成果，吸收了许多已经成功使用的新材料和新的工艺。

2. 整合。将工程材料及热处理与模具材料及表面处理两门课程有目的性地进行整合，合二为一，删繁就简，使工程材料的基本理论有针对性的为模具材料所用。解决了高职高专需开设这两门课程时的学时不足问题和知识衔接性问题。

3. 系统性强。从工程材料的基本理论到常用的模具钢，从传统的材料到新开发的材料，从常规加工工艺到改进性热处理，结构上层次分明，内容上环环相扣。

4. 主题明确。始终保持着论述模具材料、选用模具材料、加工模具材料的三条主线。达到了多一句嫌累赘，少一句则表达不透彻的境界。

5. 直观性强。图表并茂，案例讲解，使学生能直接找出各种材料的性能特点、应用范围、加工方法，以及各种模具材料间的异同，易于理解和记忆，便于教学和自学。

6. 衔接性。能将冲压模设计、塑料模设计、模具制造工艺学等核心专业课程紧密联系在一起，形成扎实的专业技能，实现专业培养目标的要求。

本书配有一份 48 课时的电子教案和一份多媒体课件，将免费提供给采用本书作为教材的院校使用。如有需要，请发电子邮件至 cipedu@163.com 获取。

参加本书编写的人员有武汉软件工程职业学院的刘兵、袁小会、程婧璠、吴元祥、李有才和武汉工业科技学校的黄莉。全书由李有才担任主编，刘兵、袁小会担任副主编，由刘小宁担任主审。本书参考了国内外许多同行所编著的教材和其他著作，在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中疏漏和欠妥之处在所难免，恳请专家、同行、读者不吝赐教。

编 者
2009 年 6 月

目 录

绪论	1
第 1 章 工程材料基础	3
1.1 金属材料的机械性能	3
1.1.1 强度	3
1.1.2 塑性	3
1.1.3 硬度	4
1.1.4 冲击韧度	5
1.1.5 耐磨性	5
1.1.6 疲劳强度	5
1.1.7 工艺性能	6
1.2 晶体的结构与结晶	6
1.2.1 金属的晶体结构	6
1.2.2 金属的结晶	8
1.2.3 合金的晶体结构与组织	9
1.3 铁碳合金	10
1.3.1 铁碳合金的基本组织及性能	10
1.3.2 铁碳合金状态图	11
1.4 钢的分类、用途及牌号	15
1.4.1 碳钢的分类、用途及牌号	15
1.4.2 合金钢的分类、用途及牌号	16
1.5 铸铁	18
1.5.1 铸铁的分类	18
1.5.2 石墨在铸铁中的作用	18
1.5.3 灰铸铁	18
1.5.4 球墨铸铁	20
1.5.5 可锻铸铁	21
1.5.6 蠕墨铸铁	21
1.5.7 合金铸铁	21
1.6 钢的热处理	23
1.6.1 钢在加热和冷却时的组织转变	23
1.6.2 钢的退火	27
1.6.3 钢的正火	28
1.6.4 钢的淬火	29
1.6.5 钢的回火	32
1.6.6 热处理设备	34
1.7 非铁金属	38
1.7.1 铝及其合金	38
1.7.2 铜及其合金	41
1.7.3 滑动轴承合金	44
1.8 非金属材料	45
1.8.1 工程塑料	45

1.8.2 橡胶	47
1.9 工程材料的选择	48
1.9.1 零件的失效分析	48
1.9.2 工程材料的选用	49
复习思考题	52
第 2 章 模具材料与模具失效分析	53
2.1 模具及模具材料分类	53
2.1.1 模具的分类	53
2.1.2 模具材料的分类	53
2.2 模具失效形式及失效分析	53
2.2.1 模具失效形式	53
2.2.2 模具失效分析	54
2.2.3 模具失效分析实例	55
2.3 模具材料的选用	57
2.3.1 模具材料选用的一般原则	57
2.3.2 影响模具材料选用的具体因素	58
2.4 影响模具寿命的主要因素	58
2.4.1 模具结构设计对模具寿命的影响	59
2.4.2 模具制造质量对模具寿命的影响	60
2.4.3 模具材料对模具寿命的影响	61
2.4.4 模具热处理与表面处理对模具寿命的影响	61
2.4.5 模具的使用对模具寿命的影响	62
复习思考题	62
第 3 章 冷作模具材料	63
3.1 冷作模具材料的性能要求	63
3.1.1 冷作模具材料的使用性能要求	63
3.1.2 冷作模具材料的工艺性能要求	64
3.1.3 冷作模具材料的成分特点	64
3.2 冷作模具材料	65
3.2.1 低淬透性冷作模具钢	65
3.2.2 低变形冷作模具钢	70
3.2.3 高耐磨微变形冷作模具钢	74
3.2.4 高强度高耐磨冷作模具钢	81
3.2.5 抗冲击冷作模具钢	85
3.2.6 高强韧性冷作模具钢	87
3.2.7 高耐磨高强韧性冷作模具钢	93
3.2.8 硬质合金	96
3.3 冷作模具材料的选用	97

3.3.1 冷作模具材料选用的原则	97	5.2.1 渗碳型塑料模具钢	146
3.3.2 冷冲裁模具材料的选用	98	5.2.2 调质型塑料模具钢	151
3.3.3 冷锻模具材料的选用	100	5.2.3 淬硬型塑料模具钢	155
3.3.4 冷挤压模具材料的选用	102	5.2.4 预硬型塑料模具钢	155
3.3.5 冷拉深模具材料的选用	103	5.2.5 时效型塑料模具钢	160
3.4 冷作模具钢的热处理	104	5.2.6 耐蚀型塑料模具钢	166
3.4.1 冷作模具的制造工艺路线	104	5.2.7 其他塑料模具材料	170
3.4.2 冷作模具钢的淬火与回火	105	5.3 塑料模具材料的选用	170
3.4.3 冷作模具钢的强韧化处理工艺	106	5.3.1 塑料模具的工作条件及失效形式	170
3.4.4 主要冷作模具的热处理特点	107	5.3.2 塑料模具材料的选用	171
3.4.5 冷作模具的热处理实例	108	5.4 塑料模具的热处理	175
复习思考题	115	5.4.1 塑料模具的制造工艺路线	175
第4章 热作模具材料	116	5.4.2 塑料模具材料的热处理	176
4.1 热作模具材料的性能要求	116	5.4.3 塑料模具材料热处理实例	179
4.1.1 热作模具材料的使用性能要求	116	5.5 塑料模具的表面处理	180
4.1.2 热作模具材料的工艺性能要求	116	复习思考题	181
4.1.3 热作模具材料的成分特点	117	第6章 模具表面强化技术	182
4.2 热作模具材料	117	6.1 表面热处理技术	182
4.2.1 低耐热性热作模具钢	117	6.1.1 渗碳	182
4.2.2 中耐热性热作模具钢	122	6.1.2 渗氮	186
4.2.3 高耐热性热作模具钢	125	6.1.3 渗硫	189
4.2.4 其他热作模具材料	132	6.1.4 渗硼	190
4.3 热作模具材料的选用	133	6.1.5 多元共渗	193
4.3.1 热锻模材料的选用	134	6.2 涂镀技术	196
4.3.2 热挤压模材料的选用	136	6.2.1 电镀	196
4.3.3 压铸模材料的选用	137	6.2.2 电刷镀	199
4.3.4 热冲裁模材料的选用	137	6.2.3 化学镀	201
4.4 热作模具钢的热处理	138	6.3 其他表面强化技术	203
4.4.1 锤锻模的热处理	138	6.3.1 喷丸表面强化	203
4.4.2 热挤压模具的热处理	139	6.3.2 电火花表面强化	205
4.4.3 压铸模具的热处理	140	6.3.3 激光表面强化	210
4.4.4 热冲裁模具的热处理	141	6.3.4 气相沉积技术	211
4.4.5 热作模具钢的热处理实例	141	复习思考题	216
复习思考题	144	附录	218
第5章 塑料模具材料	145	附录 I 国内外常用模具钢钢号对照表	218
5.1 塑料模具材料的性能要求	145	附录 II 黑色金属硬度及强度换算表	219
5.1.1 塑料模具材料的使用性能要求	145	参考文献	221
5.1.2 塑料模具材料的工艺性能要求	145		
5.2 塑料模具材料	146		

绪 论

(1) 模具材料的概况

模具是国民经济各工业部门发展的重要基础之一。而模具材料及其热处理、表面处理是影响模具寿命诸因素中的主要因素。世界各国都在采用先进设备和制造工艺的同时,不断地开发模具新材料,应用强韧化热处理新工艺和表面强化新技术,以降低模具生产成本,保证高质量,提高模具寿命。

我国在模具材料的研究开发、强韧化处理和表面强化技术方面已收到明显成效,同时也存在一些问题,主要表现在以下几个方面。

① 模具钢年产量已居世界前列,但系列化程度低,品种、规格较少,冶金质量不高。

② 现已研究开发了许多新的模具材料,如具有较高强韧性、耐磨性和良好综合工艺性能的冷作模具钢 LD (7Cr7Mo2V2Si)、ER5 (Cr8MoWV3Si)、65Nb (6Cr4W3Mo2VNb)、GD (6CrNiMnSiMoV) 钢等;具有高的热稳定性、高温强度、热疲劳性及耐磨性的热作模具钢 4CrMnSiMoV、5Cr2NiMoVSi、GR (4Cr3Mo3W4VNb)、H13 (4Cr5MoSiV1)、HM3 (3Cr3Mo3VNb)、冷热兼用的 012Al (5Cr4Mo3SiMnVAl)、CG-2 (6Cr4Mo3Ni2WV)、RM2 (5Cr4W5Mo2V) 等;具有强韧性适当、热处理工艺较简便、变形小、易于切割加工的塑料模具用钢预硬钢 SM1 (Y55CrNiMnMoV)、5NiSCa,时效硬化钢 25CrNi3MoAl,耐蚀钢 PCR (0Cr16Ni4Ca3Nb),镜面塑料模具钢 PMS (06Ni6CrMoVTiAl) 等。但重视新材料的应用不够,如国外早已很少使用的模具钢,如 Cr12、3Cr2W8V 在国内还在广泛使用。

③ 有很多强韧化处理新工艺,如片状珠光体组织预处理工艺,细化碳化物和消除链状碳化物组织的预处理工艺,Cr12 型冷作模具钢的低温淬火回火工艺,热作模具中温回火 ($\leq 450^{\circ}\text{C}$) 等都显著提高了模具的综合性能和使用寿命。但我国轻视材料加工过程中的质量控制,如模具钢材出厂时通常为退火状态,大多数用户需要对这些钢材进行改锻后再用,但是,目前厂家对改锻工艺和锻造后的退火处理工艺执行不严,甚至在采用 Cr12 钢时不经锻造而直接加工成模。另外,模具粗加工后的消除应力处理,电加工后降低变质层脆性的处理,使用过程中的中间去应力退火处理,也往往被忽略,致使钢材使用性能的潜力难以发挥,导致模具使用寿命缩短。

④ 表面处理技术有了很大发展。提高模具寿命的表面强化处理技术,除了传统的渗碳、渗氮、碳氮共渗、渗硫、渗硼、渗金属等被广泛利用外,还发展了各种涂覆技术。如热锻模应用 Ni-Co-ZrO₂ 符合电刷镀,可提高模具寿命 50%~200%;采用化学沉积 Ni-P 复合涂层后的耐磨性相当于硬质合金,对于填充玻璃纤维的塑压膜有很好的效果。采用 DVC、PVC 在各种模具上沉积 TiC、TiN 可有效地改善模具表面的抗黏着性和抗咬合性,延长模具寿命。但不重视新热处理新工艺的应用。模具设计人员习惯应用传统的模具钢和传统的热处理工艺而忽视新工艺的应用。

(2) 本课程的性质和任务

本课程是模具设计与制造专业的一门专业课。本教材系统介绍了模具行业常用材料的化学成分、力学性能、工艺性能及应用范围,既介绍传统的材料和传统的热处理方法,又介绍新材料、新工艺、新表面处理技术和选用模具材料的思路,加强模具设计与模具制造的联系,是职业技术学院和成人教育院校模具设计与制造专业学生的必备书,也可供从事模具设

计与制造的工程技术人员、中等职业学校模具专业学生和自学者作参考书。

通过本课程的学习，以期能达到如下要求。

① 掌握各类模具材料的性能、强韧化方法、应用范围。

② 根据模具的工作条件和模具结构正确合理选用模具材料。

③ 根据模具的工作条件和模具结构制定模具材料的加工工艺，特别是模具材料的热处理工艺和表面处理技术。明确模具的质量、寿命、成本与模具材料选择及强化技术之间的关系。

(3) 本课程的学习方法

① 本门课程的理论性很强，工程材料基础中的“热处理原理”、“合金钢知识”是其重要的理论基础。因此，在学习本课程时，必须注意上述两部分的学习。

② 本门课程的实践性较强，通过金相实验、硬度测试实验、力学性能实验以增加学生对材料的感性认识；再通过参观一些模具制造厂家和模具使用厂家，以进一步增加学生对模具材料的了解。

③ 选用材料结果的多样性和加工工艺的多样化。选用模具材料是系统性很强的工作，同一副模具，其成型零件（模具材料）可选用多种模具材料来进行设计和制造，需经过对模具材料的力学性能、采购成本、加工方法、加工难易、生产周期、模具的工作条件和结构、使用性能要求等进行比较，方能确定出较为合理的选材结果；同一种模具材料又可用于制造多种结构类型的模具，因其性能要求等的不同，其热处理工艺等要求也不同。要做到这些，需要积累一定的经验。学生通过学习，建立综合选材的思想，掌握模具材料的加工方法。

第1章 工程材料基础

工程上所涉及的材料统称为工程材料，它应用在机械制造、交通运输、国防工业、石油化工和日常生活各个领域。工程材料分为金属材料和非金属材料，其中金属材料应用得最广泛。本章主要介绍金属材料，论述金属材料的基础理论，为合理选用材料、制定制造工艺、充分利用材料性能奠定基础。

1.1 金属材料的机械性能

金属材料制件在工作时，常受到各种外力的作用。金属材料在外力作用下抵抗破坏的能力称为金属材料的机械性能。一般机械制造中主要考虑的常温机械性能指标包括：强度、塑性、硬度、冲击韧度、耐磨性和耐疲劳性等。

1.1.1 强度

强度是指材料在载荷作用下抵抗塑性变形或断裂的能力。材料的强度愈高，所能承受的载荷愈大。按照载荷作用方式不同，强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度和抗剪强度等。工程上常以常温下的屈服强度和抗拉强度作为强度指标。

① 屈服点 σ_s 材料产生屈服时的最小应力，单位为 MPa。

屈服点表明材料抵抗塑性变形的能力。而绝大多数机械零件及工程构件在工作时都不允许产生明显的塑性变形。因此，它是机械设计的主要依据，也是评定材料优劣的重要指标之一。对于无明显屈服现象的金属材料（如铸铁、高碳钢等），测定 σ_s 很困难，通常规定产生 0.2% 塑性变形时的应力作为条件屈服点，用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

② 抗拉强度 σ_b 材料在拉断前所能承受的最大应力，单位为 MPa。

抗拉强度表示材料抵抗均匀塑性变形的最大能力，表明材料在拉伸条件下，单位截面积上所能承受的最大载荷，是设计机械零件和选材的主要依据。

对于脆性材料， $\sigma_{0.2}$ 通常较难测量，因此在使用脆性材料制作零件时，一般也用 σ_b 作为选材和设计的依据。零件在较高的温度下工作时（如热作模具），零件材料的塑性变形抗力指标则是高温屈服点或高温抗拉强度，同时还应考虑断裂韧度的影响。

影响强度的因素较多。钢的成分、晶粒的大小、金相组织、碳化物的类型、形状、大小及分布、残余奥氏体量、内应力状态等都对强度有显著影响。

1.1.2 塑性

材料在载荷作用下产生塑性变形而不断裂的能力称为塑性，塑性指标也是通过拉伸试验测定的。常用塑性指标是断后伸长率和断面收缩率。

① 断后伸长率 δ 拉伸试验试样拉断后，标距长度的相对伸长值，即

$$\delta = (l_1 - l_0) / l_0 \times 100\%$$

式中 l_0 ——试样原始标距长度，mm；

l_1 ——试样拉断时标距的长度，mm。

② 断面收缩率 ψ 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，即

$$\psi = (A_0 - A_1) / A_0 \times 100\%$$

式中 A_0 ——试样原始横截面积, mm^2 ;

A_1 ——试样拉断后缩颈处最小横截面积, mm^2 。

通常认为断后伸长率 $\delta \geq 5\%$, 或者断面收缩率 $\psi \geq 10\%$ 为塑性材料; 反之称为脆性材料。

1.1.3 硬度

硬度是衡量材料软硬程度的指标, 其物理含义与试验方法有关。硬度值实际上是一种工程量或技术量而不是物理量。一般认为, 硬度是指材料局部表面抵抗塑性变形和破坏的能力。

工程上应用广泛的是静载荷压入法硬度试验, 即在规定的静态试验力下将压头压入材料表面, 用压痕深度或压痕表面面积来评定硬度。常用的主要有布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等。

(1) 布氏硬度

布氏硬度是用一定直径的淬火钢球或硬质合金球, 以相应的试验力压入试样表面, 并保持规定的时间, 然后卸除试验力; 用读数显微镜测量试样表面的压痕直径, 试验力除以压痕球形表面积所得的商即为布氏硬度。

压头为淬火钢球时, 布氏硬度用符号 HBS 表示, 它适用于布氏硬度值在 450 以下的材料; 压头为硬质合金球时, 用 HBW 表示, 它适用于布氏硬度值在 650 以下的材料。通常用硬度值 + 符号 (HBS 或 HBW) 表示, 如 217HBS 表示用淬火钢球测定的布氏硬度值为 217。

(2) 洛氏硬度

用顶角为 120° 的金刚石圆锥体或直径 1.588mm 的淬火钢球作压头, 以规定的试验力使其压入试样表面, 根据压痕的深度确定被测金属的硬度值。

根据所加的载荷和压头不同, 洛氏硬度值有三种标度: HRA、HRB、HRC。HRA 通常用于测量硬质合金、表面淬火钢、渗碳钢等; HRB 通常用于测量非铁金属、退火钢、正火钢等; HRC 通常用于测量调质钢、淬火钢等。

洛氏硬度是在洛氏硬度试验机上进行的, 其硬度值可直接从表盘上读出。洛氏硬度符号 HR 前面的数字为硬度值, 后面的字母表示级数, 如 60HRC 表示 C 标尺测定的洛氏硬度值为 60。

(3) 维氏硬度

维氏硬度试验原理与布氏硬度相同, 同样是根据压痕单位面积上所受的平均载荷计量硬度值, 不同的是维氏硬度的压头采用金刚石制成的锥面夹角为 136° 的正四棱锥体。

维氏硬度试验是在维氏硬度试验机上进行的, 用符号 HV 表示, 其标注方法与布氏硬度相同。维氏硬度的适用范围宽, 从极软的材料到极硬的材料都可以测量, 能够更好地测量极薄试件的硬度, 尤其是化学热处理的渗层硬度等。

材料的硬度主要决定于材料的化学成分和组织。例如钢完全淬成马氏体时的硬度取决于马氏体中的含碳量, 而合金元素的含量影响不大; 淬火组织中的残余奥氏体量 (体积分数) $> 10\%$ 时, 淬火硬度显著下降; 钢材淬透性不足, 造成不完全淬火时, 则组织中会出现珠光体或下贝氏体而引起淬火硬度下降; 如果球化退火后的渗碳体粗大, 则在淬火加热时, 难以溶入奥氏体中, 也使淬火硬度下降。

实际上, 硬度是材料的弹性、塑性、形变强化率、强度和韧性等一系列不同物理量组合

的一种综合性能指标,硬度与其他力学性能指标之间存在一定的关系,因主要的力学性能指标测定较难,所以常常由硬度来间接反映零件的强度、塑性、韧性、疲劳抗力和耐磨性。

1.1.4 冲击韧度

许多机械零件是在冲击载荷下工作的,例如,锻锤的锤杆、冲床的冲头等。冲击载荷比静载荷的破坏能力大,对于承受冲击载荷的材料,不仅要求具有高的强度和一定塑性,还必须具备足够的冲击韧度。金属材料抵抗冲击载荷作用而不破坏的能力称为冲击韧度,冲击韧度通常用一次摆锤冲击试验来测定,用 a_K 表示冲击韧度,单位为 J/cm^2 。冲击韧度 a_K 值愈大,表明材料的韧性愈好,受到冲击时不易断裂。因此冲击韧度值一般只作为选材时参考,而不作为计算依据。冲击韧度是材料的强度和塑性的综合表现,其影响因素有材料的化学成分、组织和冶金质量。含碳量越低、杂质越少、晶粒越细,材料的韧性越高。

工程实际中,在冲击载荷作用下工作的机械零件,很少因受大能量一次冲击而破坏,大多数是经千百万次的小能量多次重复冲击导致断裂的。例如,冲模的冲头,凿岩机上的活塞等,所以用 a_K 值来衡量材料的冲击抗力,不符合实际情况,而应采用小能量多次重复冲击试验来测定。试验证明,材料在多次冲击下的破坏过程是裂纹产生和扩展过程,它是多次冲击损伤积累发展的结果。因此材料的多次冲击抗力是一项取决于材料强度和塑性的综合性指标,冲击能量高时,材料的多次冲击抗力主要取决于塑性;冲击能量低时,主要取决于强度。除了用 a_K 表示冲击韧度外,还有用静弯曲挠度 f 和断裂韧度 K_{Ic} 来表示材料抗冲击的能力。

1.1.5 耐磨性

耐磨性是指材料抗磨损的能力,常用常温下的磨损量或相对耐磨性来表示。

耐磨性的主要影响因素有硬度、组织和冶金质量。当冲击载荷较小时,耐磨性与硬度成正比,即可用硬度来判断材料的耐磨性好坏;当冲击载荷较大时,耐磨性受强度和韧性的影响,此时表面硬度不是越高越好,而是存在一个合适的范围,硬度超过一定值后耐磨性反而下降。

材料组织中碳化物的性质、数量和分布状态对耐磨性也有很大影响。在钢的基体组织中,铁素体的耐磨性最差,马氏体的耐磨性较好,下贝氏体的耐磨性最好;对于淬火回火钢,一般认为在含有少量残余奥氏体的回火马氏体的基体上均匀分布着细小碳化物的组织,其耐磨性为最好;在冲击力较大的情况下,细晶马氏体由于强韧性高,故耐磨性较好。

1.1.6 疲劳强度

许多机械零件是在交变应力作用下工作的,如轴类、弹簧、齿轮、滚动轴承等。虽然零件所承受的交变应力数值小于材料的屈服强度,但在长时间运转后也会发生断裂,这种现象叫疲劳断裂。疲劳断裂不管是脆性材料还是韧性材料,都是突然发生,事先均无明显的塑性变形,具有很大的危险性,常常造成严重事故。据统计,机械零件断裂中,有80%是由于疲劳引起的。因此,研究疲劳现象对于正确使用材料,合理设计零件具有重要意义。

工程上规定,材料经无数次重复交变载荷作用而不发生断裂的最大应力称为疲劳强度。当应力低于一定值时,试样经无限周次循环也不破坏,此应力值称为材料的疲劳强度,常用 σ_r 表示,如对称循环 $r=-1$,疲劳强度用 σ_{-1} 表示。材料的疲劳极限与其抗拉强度之间存在着一定的经验关系,如碳钢 $\sigma_{-1} \approx (0.4 \sim 0.5)\sigma_b$,灰铸铁 $\sigma_{-1} \approx 0.4\sigma_b$,非铁金属 $\sigma_{-1} \approx (0.3 \sim 0.4)\sigma_b$,因此在其他条件相同的情况下,材料的疲劳强度随其抗拉强度的提高而增加。

研究表明,疲劳断裂的产生原因是在零件应力集中部位、表面划痕、残余内应力或内部

某一薄弱部位（如夹杂、气孔、疏松等）产生微裂纹即裂纹源，然后在变应力作用下，裂纹不断向纵深扩展，使零件有效承载截面不断减小，最终当减小到不能承受外加载荷作用时，产生突然断裂。

1.1.7 工艺性能

材料的工艺性能是物理、化学和力学性能的综合，指的是材料对各种加工工艺的适应能力。它包括铸造性能、锻压性能、焊接性能、切削加工性能和热处理性能等。工艺性能好坏直接影响零件的加工质量和生产成本，所以在设计时的选材和制定零件加工工艺必须加以考虑。不同的材料对应不同的加工工艺，材料的工艺性能好坏，对于零件加工的难易程度、生产效率、生产成本等方面起着决定性的作用。因此，工艺性能是选材时必须同时考虑的一个重要因素。材料的工艺性能主要包括下列几个方面。

① 铸造性能 是指金属能否用铸造的方法获得合格铸件的能力。一般是根据流动性、收缩性和偏析倾向进行综合评定。不同的材料其铸造性能不同。在常用的几种铸造合金中，铸造铝合金和铸造铜合金的铸造性能优于铸铁，铸铁的铸造性能优于铸钢。在铸铁中以灰铸铁（ $w_C=2.7\%\sim 3.6\%$ ）的铸造性能最好。

② 焊接性能 是指材料在一定焊接条件下获得优质焊接接头的难易程度。一般用焊缝处出现裂纹、脆性、气孔或其他缺陷的倾向来衡量焊接性能。焊接性能优良的材料除焊接时不易产生各种缺陷外，其焊接工艺简单，且焊缝处具有足够的强度和韧性。通常低碳钢和低合金钢（当量碳 $\leq 0.4\%$ ）具有良好的焊接性能；高碳钢、高合金钢、铜合金和铝合金的焊接性能较差；铸铁基本上不能焊接。

③ 压力加工性能 包括锻造性能、冷冲压性能等。材料塑性高，成形性好，则压力加工后表面质量优良，不易产生裂纹；变形抗力低，则变形比较容易，金属易于实现固态下的流动，易于充填模具，不易产生缺陷。一般低碳钢的压力加工性能比高碳钢好（ w_C 越低，压力加工性能越好），非合金钢的压力加工性能比合金钢好（合金含量越低，压力加工性能越好）。

④ 切削加工性能 是指材料接受切削加工而成为合格工件的难易程度。一般用切削抗力大小、零件表面粗糙度值的大小、加工时切屑排除的难易程度以及刀具磨损大小来衡量其性能好坏。一般情况下， $w_C \approx 0.4\%$ 的碳钢其切削加工性能最好，材料切削时的硬度在 170~230HBS 之间时其切削加工性能较好。

⑤ 热处理工艺性能 主要包括淬透性、淬硬性、变形开裂倾向、回火脆性、回火稳定性、氧化脱碳的倾向性等。材料的热处理操作容易（即淬火温度范围宽）、淬透性和淬硬性高、淬火变形小、加工成本低，即材料的热处理工艺性能好。

1.2 晶体的结构与结晶

1.2.1 金属的晶体结构

(1) 晶体结构的基本概念

① 晶体与非晶体 在自然界中，除了少数固体物质（如松香、沥青、玻璃等）属于非晶体外，大多数固态物质都是晶体。常见的固态金属一般都是晶体，其内部的原子排列具有规律性。

晶体与非晶体的区别表现在许多方面。非晶体没有规则的外形，没有固定的熔点，在各方向上的原子聚集密度大致相同，因此表现出各向同性或等向性；而晶体物质有规则的外

形,有固定的熔点,在不同方向上具有不同的性能,即表现出各向异性的特征。

② 晶格与晶胞 为了描述晶体内部原子排列的规律,可以把原子假想成为刚性小球,晶体则是许多小球堆积而成的物质,如图 1-1 (a) 所示。如果把原子看成是一个点,并用假想的线条把原子连接起来构成一个几何格架,这种用以描述原子在晶体中排列方式的几何格架称为晶格,如图 1-1 (b) 所示。由于晶格中原子的排列具有周期性变化的特点,通常从晶格中取出一个能够反映晶格特征的最小的几何单元来研究晶体中原子排列的规律,这个最小的几何单元称为晶胞,如图 1-1 (c) 所示。由观察可知,晶格是由晶胞在空间重复堆积排列而成的。因此,晶胞的特征就可以反映出晶格和晶体的特征。在晶体学中,用来描述晶胞大小与形状的几何参数称为晶格常数。包括晶胞的三个棱边 a 、 b 、 c 和三个棱边夹角 α 、 β 、 γ 共六个参数。

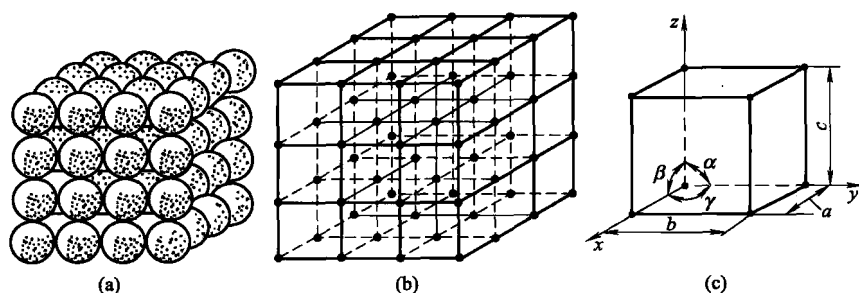


图 1-1 晶体中原子的排列与晶格示意图

(2) 常见金属的晶体结构

① 体心立方晶格 体心立方晶格的晶胞是一个立方体,如图 2-2 (a) 所示,即在晶胞的中心和八个顶角各有一个原子,因每个顶角上的原子同属于周围八个晶胞所共有,所以每个体心立方晶胞的原子数为: $1/8 \times 8 + 1 = 2$ 。

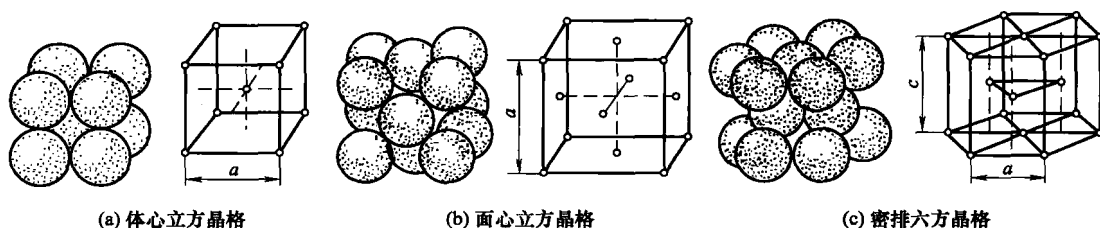


图 1-2 常见晶格结构

具有这类晶格的金属有铁 (α -Fe)、铬、钼、钨、钒等,这类金属的塑性较好。

② 面心立方晶格 面心立方晶格的晶胞也是一个立方体,如图 1-2 (b) 所示,即在立方晶格的晶胞的八个顶角和六个面的中心各有一个原子。因每个面中心的原子同属于两个晶胞所共有,故每个面心立方晶胞的原子数为 $1/8 \times 8 + 1/2 \times 6 = 4$ 。

具有这类晶格的金属有铝、铜、金、镍、铁 (γ -Fe) 等,这类金属的塑性优于具有体心立方晶格的金属。

③ 密排六方晶格 密排六方晶格的晶胞是一个六棱柱体,如图 1-2 (c) 图所示。原子位于两个底面的中心处和 12 个顶点上,棱柱内部还包含着三个原子,其晶胞的实际原子数为 $12 \times 1/6 + 2 \times 1/2 + 3 = 6$ 。

具有这类晶格的金属有镁、锌、铍等,这类金属通常较脆。

金属的晶格类型不同,其性能必然存在差异。即使晶格类型相同的金属,由于元素的原

子直径及原子间距不同等原因，其性能也不尽相同。

(3) 金属的实际晶体结构

① 多晶体结构 前面讨论金属的晶体结构时，把晶体看成是原子按一定几何规律作周期性排列而成，即晶体内部的晶格位向是完全一致的，这种晶体称为单晶体。目前，只有采用特殊方法才能获得单晶体。

实际使用的金属材料绝大都是多晶体结构，即它是由许多不同位向的小晶体组成，每个晶体内部晶格位向基本上是一致的，而各小晶体之间位向却不相同，这种外形不规则，呈颗粒状的小晶体称为晶粒。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。由许多晶粒组成的晶体称为多晶体。

② 晶体缺陷 在金属晶体中，由于晶体形成条件、原子的热运动及其他各种因素影响，原子规则排列在局部区域受到破坏，呈现出不完整的排列，通常把这种不完整排列的区域称为晶体缺陷。晶体缺陷的存在对金属的性能和组织转变会产生很大的影响。根据晶体缺陷的几何特征，其可分为以下三类。

a. 点缺陷。最常见的点缺陷有空位、间隙原子和置换原子等。由于点缺陷的出现，使周围原子发生“撑开”或“靠拢”现象，这种现象称为晶格畸变。晶格畸变的存在，使金属产生内应力，晶体性能发生变化，如强度、硬度和电阻增加，体积发生变化，它也是强化金属的手段之一。

b. 线缺陷。线缺陷主要指的是位错。最常见的位错形态是刃型位错。这种位错的表现形式是晶体的某一晶面上多出一个半原子面，它如同刀刃一样插入晶体，故称刃型位错，在位错线附近一定范围内，晶格发生了畸变。

位错的存在对金属的力学性能有很大影响，例如金属材料处于退火状态时，位错密度较低，强度较差；经冷塑性变形后，材料的位错密度增加，故提高了强度。位错在晶体中易于移动，金属材料的塑性变形是通过位错运动来实现的。

c. 面缺陷。通常指的是晶界和亚晶界。实际金属材料都是多晶体结构，多晶体中两个相邻晶粒之间晶格位向是不同的，所以晶界处是不同位向晶粒原子排列无规则的过渡层，晶界原子处于不稳定状态，能量较高。因此晶界与晶粒内部有着一系列不同特性，例如，常温下晶界有较高的强度和硬度；晶界处原子扩散速度较快；晶界处容易被腐蚀、熔点低等。亚晶界处原子排列也是不规则的，其作用与晶界相似。

1.2.2 金属的结晶

液态纯金属在冷却到结晶温度时，其结晶过程是：先在液体中产生一批晶核，已形成的晶核不断长大，同时继续产生新的晶核并长大，直到全部液体转变成固体为止。最后形成由许多外形不规则的小晶粒所组成的多晶体，如图 1-3 所示。

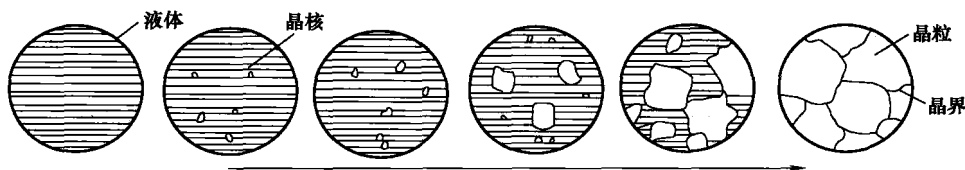


图 1-3 金属结晶过程示意图

在晶核开始长大的初期，因其内部原子规则排列的特点，其外形也是比较规则的。随着晶棱长大和晶体棱角的形成，在棱角处优先长大，其生长方式像树枝状一样，先长出枝干，然后再长出分枝，最后把晶间填满，得到的晶体称为树枝状晶体，简称为枝晶。

晶粒大小影响到金属力学性能,在常温下的细晶粒金属比粗晶粒金属具有较高的强度、硬度、塑性和韧性。生产中,细化晶粒的方法如下。

① 增加过冷度 结晶时增加过冷度 ΔT (理论结晶温度 T_0 与实际结晶温度 T_1 之差) 会使结晶后晶粒变细。增加过冷度,就是要提高金属凝固的冷却转变速度。实际生产中常常是采用降低铸型温度和采用导热系数较大的金属铸型来提高冷却速度。但是,对大型铸件,很难获得大的过冷度,而且太大的冷却速度,又增加了铸件变形与开裂的倾向。因此工业生产中多用变质处理方法细化晶粒。

② 变质处理 变质处理是在浇注前向液态金属中加入一些细小的难熔的物质(变质剂),在液相中起人工晶核的作用,使形核率增加,晶粒显著细化。如往钢液中加入铝、钒、硼;向铸铁液中加入 Si-Fe、Si-Cu;向铝液中加入钛、锆等。

③ 附加振动 金属结晶时,利用机械振动、超声波振动、电磁振动等方法,既可使正在生长的枝晶熔断成碎晶而细化,又可使破碎的枝晶尖端起晶核作用,以增大形核率。

1.2.3 合金的晶体结构与组织

(1) 合金的基本概念

① 合金 一种金属元素与其他金属元素或非金属元素,经熔炼、烧结或其他方法结合成的具有金属特性的物质。例如碳钢就是铁和碳组成的合金。

② 组元 组成合金的最基本的独立物质称为组元,简称元。组元可以是金属元素或非金属元素,也可以是稳定化合物。由两个组元组成的合金称为二元合金,三个组元组成的合金称为三元合金。

③ 合金系 由两个或两个以上组元按不同比例配制成一系列不同成分的合金,称为合金系。例如,铜和镍组成的一系列不同成分的合金,称为铜-镍合金系。

④ 相 合金中具有同一聚集状态、同一结构和性质的均匀组成部分称为相。例如,液态物质称为液相;固态物质称为固相;同样是固相,有时物质是单相的,而有时是多相的。

⑤ 组织 用肉眼或借助显微镜观察到材料具有独特微观形貌特征的部分称为组织。组织反映材料的相组成、相形态、大小和分布状况,因此组织是决定材料最终性能的关键。在研究合金时通常用金相方法对组织加以鉴别。

(2) 合金的组织

多数合金组元液态时都能互相溶解,形成均匀液溶体。固态时由于各组分之间相互作用不同,形成不同的组织。通常固态时合金中形成固溶体、金属化合物和机械混合物三类组织。

① 固溶体 合金由液态结晶为固态时,一组元溶解在另一组元中,形成均匀的相称固溶体。占主要地位的元素是溶剂,而被溶解的元素是溶质。固溶体的晶格类型保持着溶剂的晶格类型。

根据溶质原子在溶剂中所占位置的不同,固溶体可分为置换固溶体和间隙固溶体两种。

a. 置换固溶体。溶剂结点上的部分原子被溶质原子所替代而形成的固溶体,称为置换固溶体。如图 1-4 (a) 所示。溶质原子溶于固溶体中的量称为固溶体的溶解度,通常用质量百分数或原子百分数来表示。按固溶体溶解度不同,置换固溶体可分为有限固溶体和无限固溶体两类。例如,在铜镍合金中,铜与镍组成的为无限固溶体;而锌溶解在铜中所形成的固溶体为有限固溶体,当质量分数 w 大于 39% 时,组织中除了固溶体外,还出现了铜与锌的化合物。置换

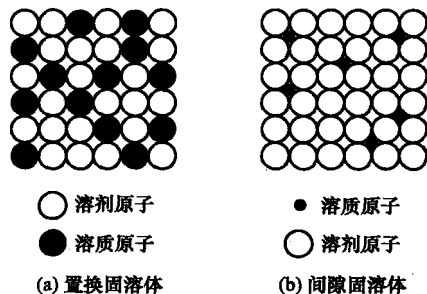


图 1-4 固溶体结构

固溶体中溶质在溶剂中的溶解度主要取决于两组元的晶格类型、原子半径和原子结构特点。通常两组元原子半径差别较小，晶格类型相同，原子结构相似，固溶体溶解度较大。事实上，大多数合金都为有限固溶体，并且溶解度随温度升高而增大。

b. 间隙固溶体。溶质原子溶入溶剂晶格之中而形成的固溶体，称为间隙固溶体，如图 1-4 (b) 所示。由于溶剂晶格的间隙有限，通常形成间隙固溶体的溶质原子都是原子半径较小的非金属元素，例如，碳、氮、氢等非金属元素溶入铁中形成的均为间隙固溶体。间隙固溶体的溶解度都是有限的。

无论是置换固溶体还是间隙固溶体，溶质原子的溶入，都会使点阵发生畸变，同时晶体的晶格常数也要发生变化，原子尺寸相差越大，畸变也愈大。畸变的存在使位错运动阻力增加，从而提高了合金的强度和硬度，而塑性下降，这种现象称为固溶强化。固溶强化是提高金属材料力学性能的重要途径之一。

② 金属化合物 合金组元间发生相互作用而形成一种具有金属特性的物质称为金属化合物，它的晶格类型和性能完全不同于任一组元，一般可用化学分子式表示，如 Fe_3C ， TiC ， CuZn 等。 Fe_3C 就具有与铁及碳不同的复杂斜方晶格类型。

金属化合物具有熔点高、硬度高、脆性大的特点，在合金中主要作为强化相，可以提高材料的强度、硬度和耐磨性，但塑性和韧性有所降低。

③ 机械混合物 两种或两种以上的相按一定质量百分数组成的物质称为机械混合物。混合物中各组成相仍保持自己的晶格，彼此无交互作用，其性能主要取决于各组成相的性能以及相的分布状态。工程上使用的大多数合金的组织都是固溶体与少量金属化合物组成的机械混合物。通过调整固溶体中溶质含量和金属化合物的数量、大小、形态和分布状况，可以使合金的力学性能在较大范围变化，从而满足工程上的多种需求。

1.3 铁碳合金

铁碳合金是以铁和碳为基本组元组成的合金，它是目前现代工业中应用最为广泛的金属材料。要熟悉并合理地选择铁碳合金，就必须了解铁碳合金的成分、组织和性能之间的关系。而铁碳合金相图正是研究这一问题的重要工具。

1.3.1 铁碳合金的基本组织及性能

为了提高纯铁的强度、硬度，常在纯铁中加入少量碳元素，由于铁和碳的交互作用，可形成下列五种基本组织：铁素体、奥氏体、渗碳体、珠光体和莱氏体。

① 铁素体 碳溶于 $\alpha\text{-Fe}$ 中所形成的间隙固溶体称为铁素体，用符号 F 表示，它仍保持 $\alpha\text{-Fe}$ 的体心立方晶格结构。因其晶格间隙较小，所以溶碳能力很差，在 727°C 时最大 w_{C} 仅为 0.0218% ，室温时降至 0.0008% 。铁素体由于溶碳量小，力学性能与纯铁相似，即塑性和冲击韧度较好，而强度、硬度较低。

② 奥氏体 碳溶于 $\gamma\text{-Fe}$ 中所形成的间隙固溶体称为奥氏体，用符号 A 表示，它保持 $\gamma\text{-Fe}$ 的面心立方晶格结构。由于其晶格间隙较大，所以溶碳能力比铁素体强，在 727°C 时碳的质量分数 w_{C} 为 0.77% ， 1148°C 时 w_{C} 达到 2.11% 。奥氏体的强度、硬度较低，但具有良好的塑性，它是绝大多数钢高温进行压力加工的理想组织。

③ 渗碳体 渗碳体是铁和碳组成的具有复杂斜方结构的间隙化合物，用化学式 Fe_3C 表示。渗碳体中的碳的质量分数 w_{C} 为 6.69% ，硬度很高，塑性和韧性几乎为零。主要作为铁碳合金中的强化相存在。

④ 珠光体 珠光体是铁素体和渗碳体组成的机械混合物，用符号 P 表示。在缓慢冷却

条件下,珠光体中 w_C 为 0.77%, 力学性能介于铁素体和渗碳体之间, 以层片状出现, 具有良好综合力学性能。

⑤ 莱氏体 莱氏体是碳的质量分数 w_C 为 4.3% 的铁碳合金, 缓慢冷却到 1148℃ 时从液相中同时结晶出奥氏体和渗碳体的共晶组织, 用符号 L_d 表示。冷却到 727℃ 温度时, 奥氏体将转变为珠光体, 所以室温下莱氏体由珠光体和渗碳体组成, 称为变态莱氏体, 用符号 L_d' 表示。莱氏体中由于有大量渗碳体存在, 其性能与渗碳体相似, 即硬度高, 塑性差。

由此可以看出, 铁碳合金在不同的温度条件下具有不同的晶体结构, 这是对钢进行热处理的基础所在。

1.3.2 铁碳合金状态图

铁碳合金相图是表示在缓慢冷却的条件下, 表明铁碳合金成分、温度、组织变化规律的简明图解, 它也是选择材料和制定有关热加工工艺时的重要依据。

由于 $w_C > 6.69\%$ 的铁碳合金脆性极大, 在工业生产中没有使用价值, 所以我们只叙述 w_C 小于 6.69% 的部分。 $w_C = 6.69\%$ 对应的正好全部是渗碳体, 把它看作一个组元, 实际上我们研究的铁碳相图是 $Fe-Fe_3C$ 相图。 $Fe-Fe_3C$ 相图左上部分实用意义不大, 为了便于研究分析将其简化, 便得到了简化的 $Fe-Fe_3C$ 相图, 如图 1-5 所示。

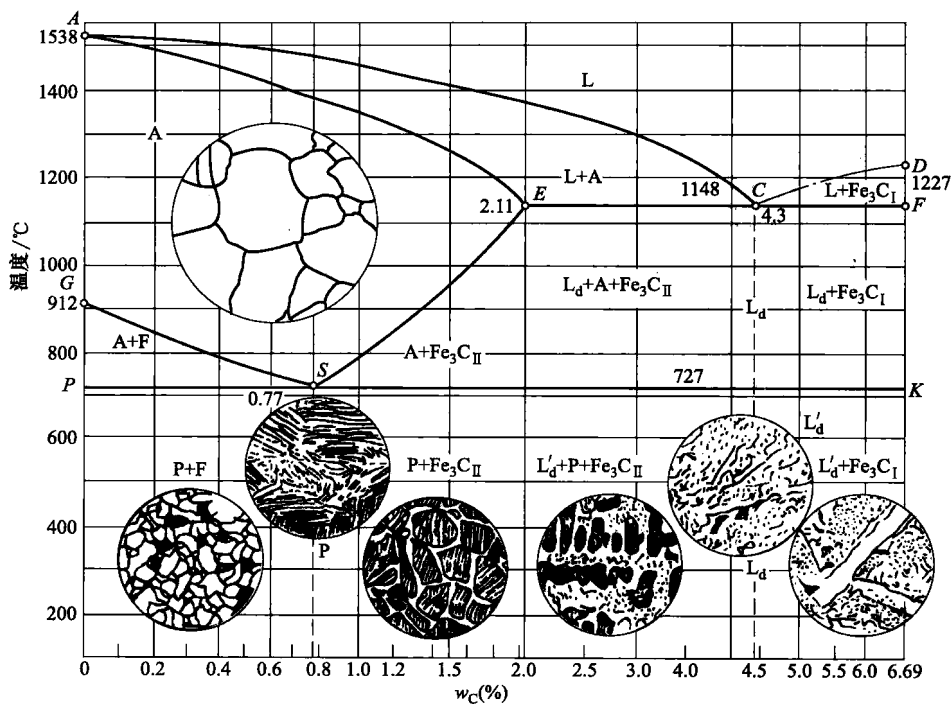


图 1-5 简化后的 $Fe-Fe_3C$ 相图

(1) 铁碳合金相图分析

简化的 $Fe-Fe_3C$ 相图纵坐标为温度, 横坐标为碳的质量百分数, 其中包含共晶和共析两种典型反应。

① $Fe-Fe_3C$ 相图中特性点的含义见表 1-1。

应当指出, $Fe-Fe_3C$ 相图中特性的数据随着被测试材料纯度的提高和测试技术的进步而趋于精确, 因此不同资料中的数据会有所出入。