



新能源系列 —— 风能专业规划教材

风力发电设备 制造工艺

FENGLI
FADIAN SHEBEI
ZHIZAO
GONGYI

王昌国 卢卫萍 秦燕 主编



化学工业出版社

013070748

TM621.3

35



新能源系列 —— 风能专业



FENGLI
FADIAN SHEBEI
ZHIZAO
GONGYI

风力发电设备 制造工艺

王昌国 卢卫萍 秦燕 主编



TM 621.3
35



化学工业出版社



北航

C1678227

847070810

本书以职业能力培养为目标,以理实一体化为内容组织形式,系统介绍了叶片、轮毂、传动系统、机舱与底盘、发电机、控制系统、塔架及塔基基础的结构设计、材料选择、制造方法、生产过程和检验要求以及施工方法,较系统地介绍了常用金属材料、非金属材料及相关制造加工技术。

本书适合作为风能与动力技术等相关专业的教材,同时还可以为风力发电领域的工程技术人员和技术工人提供参考。

风力发电设备制造工艺

风能专业规划教材

图书在版编目(CIP)数据

风力发电设备制造工艺/王昌国,卢卫萍,秦燕主编. —北京:化学工业出版社,2013.8

(新能源系列)

风能专业规划教材

ISBN 978-7-122-17903-6

I. ①风… II. ①王…②卢…③秦… III. ①风力发电-发电设备-机械制造-教材 IV. ①TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 150470 号

责任编辑:刘哲

责任校对:蒋宇

装帧设计:韩飞

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)

印装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张17½ 字数460千字 2013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:39.00 元

版权所有 违者必究



前言



近年来,风电行业正蓬勃发展,在世界范围内的地位也日益重要。风电装机容量的快速增长,带动着风电设备的生产与制造技术的不断进步与完善,同时风电技术领域内也急需一批风电设备生产制造类的高技能人才。然而,目前有关风电设备类书籍非常缺乏,本书就是在此背景下,与行业企业合作编写。本书的出版将填补风电设备生产制造类教材的空白。

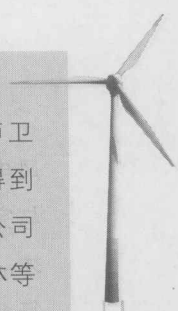
本书采用模块化的编写体例,每个模块又下分若干个任务,将各个任务中的主要知识点蕴含在各个任务载体中,对理论知识以简练、通俗的语言进行阐述,对操作性的方法和技巧的介绍给予充足的篇幅,并力争做到具体、细致、实用。每一模块的学习内容以最新、最典型的案例引导将要阐述的问题,激发学生的学习兴趣,提高学习的效果。

本书是在多年“工学结合、校企合作”人才培养模式的教学改革经验的基础上,以职业能力培养为目标,以理实一体化为组织形式编写的,集中体现了学校教学和企业实践的有机统一、传统工艺和现代技术的有机融合,并严格贯彻最新标准、规范、工艺和规程要求。教材在编写过程中注重特定教学对象的认识能力和认知规律,语言通俗易懂、简洁流畅,避免出现繁琐的理论分析和数学公式,以期达到教得会、学得进、用得上的教学目标。

全书系统介绍了叶片、轮毂、传动系统、机舱与底盘、发电机、控制系统、塔架及塔基基础的结构设计、材料选择、制造方法、生产过程和检验要求以及施工方法,较系统地介绍了常用金属材料、非金属材料及相关制造加工技术。



前言



本书由王昌国、卢卫萍、秦燕、丁宏林等合作编写，由王昌国、卢卫萍、秦燕任主编，岳云峰教授担任主审。同时，本书在编写过程中，得到了江苏天地风能有限公司高级工程师冯永赵、中航虹波风电设备有限公司的高级工程师戴锦明、扬州神州风力发电机有限公司的高级工程师尤林等多位工程师的支持与帮助，他们提供了大量宝贵的资料，在此一并表示感谢。

本书适合作为学校风能与动力技术相关专业的教材，同时还可以为风力发电领域的工程技术人员和技术工人提供参考。

本书在编写过程中得到化学工业出版社以及编者单位领导的支持与帮助。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编者
2013年5月

目 录

模块一 风力发电设备制造及工艺基础	1
任务一 认知风电设备制造常用的金属材料	1
任务二 认知风电设备制造常用非金属材料	22
任务三 熟识风电设备典型的加工制造技术	31
模块二 风叶的制造及工艺	59
任务一 风叶的结构设计及材料选择	59
任务二 风叶的制造及加工工艺	73
任务三 风叶的检查与验收	78
模块三 轮毂的制造及工艺	86
任务一 轮毂结构的设计及材料选择	86
任务二 轮毂的制造及加工工艺	98
任务三 轮毂的检查与验收	105
模块四 风电机组传动系统的制造及工艺	111
任务一 传动系统结构设计	112
任务二 传动轴的制造及工艺	121
任务三 齿轮箱的制造及工艺	127
任务四 传动系统的检查与验收	132
模块五 机舱、底盘的制造及工艺	138
任务一 机舱的制造及加工工艺	138
任务二 底盘的制造及加工工艺	143

目 录

模块六 发电机的制造及工艺	148
任务一 发电机的结构类型	148
任务二 发电机零部件的机械加工及工艺	153
任务三 发电机铁芯的制造工艺	160
任务四 发电机绕组的制造工艺	169
任务五 发电机的装配及检验	177
模块七 控制系统的制造及工艺	185
任务一 控制系统的结构及功能	185
任务二 控制系统的制造工艺	190
任务三 控制系统的检查与验收	219
模块八 塔架的制造及工艺	226
任务一 塔架的结构设计及材料	226
任务二 塔架的制造及加工工艺	230
任务三 塔架的检查与验收	242
模块九 风电机组基础施工及工艺	252
任务一 风电机组基础设计	252
任务二 风电机组基础施工	264
参考文献	274



模块一

风力发电设备制造及工艺基础

本模块主要介绍风电设备制造常用的金属材料、非金属材料以及风电设备典型的制造加工技术。

任务一 认知风电设备制造常用的金属材料

【学习背景】

工程材料分为金属材料和非金属材料，其中金属材料是工程材料中应用最为广泛的，包括碳钢、合金钢、铸铁、有色金属等。风力发电设备中常用的钢、铝、铜均为金属材料，其中，钢是黑色金属（通常把以铁元素为基体的金属材料称为黑色金属），铝、铜属于有色金属（通常把非铁合金及其合金称为有色金属）。

【能力目标】

- ① 了解风电设备常用的金属材料。
- ② 掌握金属材料的性能，包括力学性能、工艺性能、物理和化学性能。
- ③ 掌握风电设备常用金属材料的种类及牌号。
- ④ 掌握风电设备常用金属材料的表面处理和热处理方式。

【基础知识】

一、金属材料的性能

金属材料的性能决定着材料的适用范围及应用的合理性。金属材料的性能主要分为四个方面，即力学性能、化学性能、物理性能、工艺性能。



1. 金属材料的力学性能

金属在一定温度条件下承受外力（载荷）作用时，抵抗变形和断裂的能力称为金属材料的力学性能。金属材料承受的载荷有多种形式，可以是静态载荷，也可以是动态载荷，包括单独或同时承受的拉伸应力、压应力、弯曲应力、剪切应力、扭转应力，以及摩擦、振动、冲击等等。

衡量金属材料力学性能的指标主要有以下几项。

(1) 强度

强度是指材料在外力作用下抵抗塑性变形和断裂的能力，表征材料在外力作用下抵抗变形和破坏的最大能力，可分为屈服强度、抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度等。工程上，一般用屈服强度和抗拉强度来表示金属材料强度的主要指标。

由于金属材料在外力作用下从变形到破坏有一定的规律可循，因而通常采用拉伸试验进行测定，即把金属材料制成一定规格的试样，在拉伸试验机上进行拉伸，直至试样断裂。低碳钢的拉伸试件与特性曲线如图 1-1 所示。

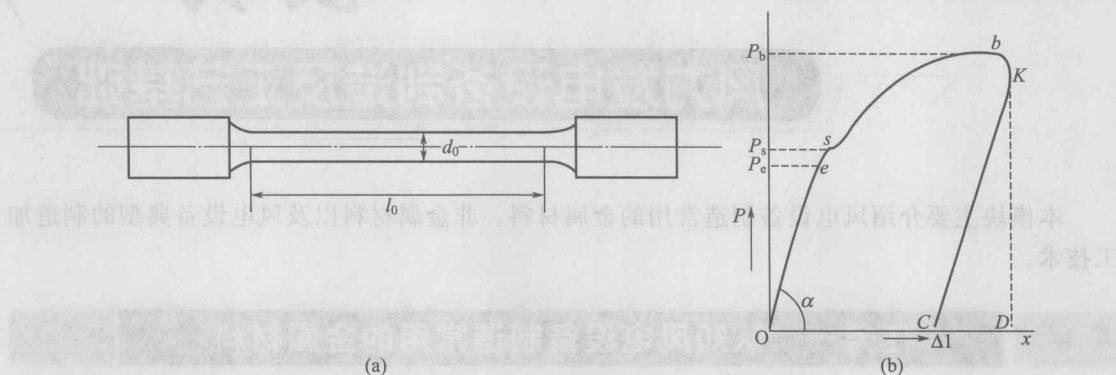


图 1-1 低碳钢的拉伸试件与特性曲线

① 弹性极限 在图 1-1(b) 中， oe 拉伸段为一直线，称为弹性变形阶段。弹性极限用 σ_e 来表示：

$$\sigma_e = \frac{P_e}{A_0} \quad (\text{MPa}) \quad (1-1)$$

式中 P_e ——试样产生弹性变形时的载荷，即拉伸曲线中 e 点所对应的外力，N；

A_0 ——试样的原始横截面积， mm^2 。

② 屈服强度 在图 1-1(b) 中， es 拉伸段为一曲线，其中有弹性变形和塑性变形， s 点开始明显产生塑性变形。

屈服强度是指在外力作用下开始产生明显塑性变形的应力，用 σ_s 表示：

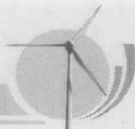
$$\sigma_s = \frac{P_s}{A_0} \quad (\text{MPa}) \quad (1-2)$$

式中 P_s ——试样产生塑性变形时的载荷，即拉伸曲线中 s 点所对应的外力，N；

A_0 ——试样的原始横截面积， mm^2 。

③ 抗拉强度 在图 1-1(b) 中， sb 拉伸段为一曲线，其为均匀的塑性变形阶段， b 点出现缩颈现象，即试样局部截面明显缩小，试样承载能力降低，拉伸力达到最大值，试样即将断裂。

抗拉强度是指金属材料断裂前所承受的最大应力，故又称为强度极限，常用 σ_b 表示：



$$\sigma_b = \frac{P_b}{A_0} \text{ (MPa)} \quad (1-3)$$

式中 P_b ——试样被拉断前所承受的最大外力，即拉伸曲线中 b 点所对应的外力，N；
 A_0 ——试样的原始横截面积， mm^2 。

在选择金属材料 and 设计时，屈服极限和抗拉强度有着重要的意义。因为金属材料必须在小于其屈服极限 σ_s 下进行工作，否则会造成零件的塑性变形。金属材料也不能在超过 σ_b 下进行工作，否则将会导致零件的断裂。

(2) 塑性

塑性是指金属材料在外力作用下产生塑性变形而不发生断裂的能力。工程中评定金属材料的塑性指标有伸长率和断面收缩率。

断后伸长率是指试样拉断后的伸长量与原始长度之比的百分率，用符号 δ 表示：

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 L_0 ——试样的原始长度，mm；

L_1 ——试样拉断后的长度，mm。

断面收缩率是指试样拉断后，断面发生颈缩后的面积与原来截面积之比，用 ψ 表示：

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 S_0 ——试样的原始横截面积， mm^2 ；

S_1 ——试样拉断后发生处的横截面积， mm^2 。

伸长率和断面收缩率越大，其塑性越好；反之，塑性越差。良好的塑性是金属材料进行压力加工（轧制、锻压等）的必要条件，也是保证机械零件工作安全、不发生突然脆断的必要条件。因此，大多数机械零件除要求具有较高的强度外，还必须有一定的塑性。通常，依据断后伸长率是否达到 5% 作为划分塑性材料和脆性材料的判据。

(3) 硬度

硬度是指材料抵抗局部变形，特别是塑性变形、压痕和划痕的能力，是评定材料软硬的判据，是一个综合性的指标。材料的硬度越高，则耐磨性越好，故常将硬度值作为衡量材料耐磨性的重要指标之一。硬度的测试方法很多，生产中常用的硬度测试方法有布氏硬度测试法和洛氏硬度试验方法两种。

① 布氏硬度试验法 布氏硬度试验法是用一直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球作为压头，在载荷 P 的作用下压入被测试金属表面，保持一定时间后卸载，测量金属表面形成的压痕直径 d 。以压痕的单位面积所承受的平均压力作为被测金属的布氏硬度值，其原理图和试验设备分别如图 1-2 和图 1-3 所示。

布氏硬度指标有 HBS 和 HBW，前者所用压头为淬火钢球，适用于布氏硬度值低于 450 的金属材料，如退火钢、正火钢、调质钢及铸铁、有色金属等；后者压头为硬质合金，适用于布氏硬度值为 450~650 的金属材料，如淬火钢等。HBS (HBW) 值越大，则材料的硬度越大。

布氏硬度测试法，因压痕较大，故不宜测试成品件或薄片金属的硬度。

② 洛氏硬度试验法 洛氏硬度试验法是用一锥顶角为 120° 的金刚石圆锥体或直径为 $\phi 1.588\text{mm}$ ($1/16''$) 的淬火钢球为压头，以一不定的载荷压入被测试金属材料表面，根据压痕深度可直接在洛氏硬度计的指示盘上读出硬度值。常用的洛氏硬度指标有 HRA、HRB 和 HRC 三种。

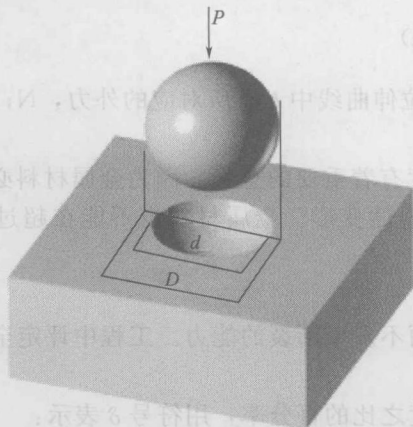
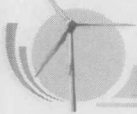


图 1-2 布氏硬度试验原理示意图

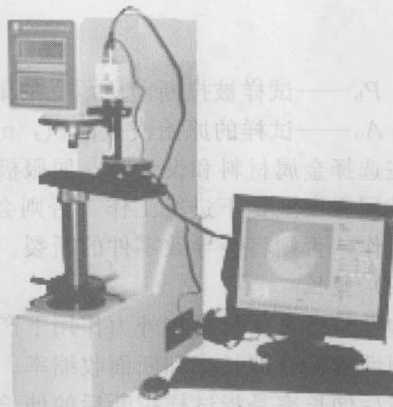


图 1-3 布氏硬度试验设备

采用 120° 金刚石圆锥体为压头，施加压力为 600N 时，用 HRA 表示。其测量范围为 60~85，适于测量合金、表面硬化钢及较薄零件。

采用 $\phi 1.588\text{mm}$ 淬火钢球为压头，施加压力为 1000N 时，用 HRB 表示，其测量硬度值范围为 25~100，适于测量有色金属、退火和正火钢及锻铁等。

采用 120° 金刚石圆锥体为压头，施加压力为 1500N 时，用 HRC 表示，其测量硬度值范围为 20~67，适于测量淬火钢、调质钢等。

洛氏硬度测试，操作迅速、简便，且压痕小不损伤工件表面，故适于成品检验。

(4) 冲击韧性

金属材料抵抗冲击载荷的能力称为冲击韧性，用 a_k 表示，单位为 J/m^2 。

冲击韧性常用一次摆锤冲击弯曲试验测定，即把被测材料做成标准冲击试样，用摆锤一次冲断，测出冲断试样所消耗的冲击功，然后用试样缺口处单位截面积 F 上所消耗的冲击功 a_k 表示冲击韧性。

a_k 值越大，则材料的韧性就越好。 a_k 值低的材料叫做脆性材料， a_k 值高的材料叫韧性材料。很多零件，如齿轮、连杆等，工作时受到很大的冲击载荷，因此要用 a_k 值高的材料制造。铸铁的 a_k 值很低，灰口铸铁 a_k 值近于零，不能用来制造承受冲击载荷的零件。

(5) 疲劳强度

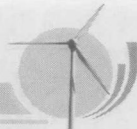
有些机器零件（如轴、齿轮、弹簧等）是在方向、大小反复变化的交变载荷下工作的。这种承受交变载荷的机件，往往在应力远低于屈服强度 σ_s 的条件下发生断裂，这种现象称为疲劳破坏。一般认为，产生疲劳破坏的原因在于材料存在夹杂、表面划痕及其他引起应力集中的缺陷导致产生微裂纹，在交变载荷的长期作用下，微裂纹逐渐扩展，最终致使零件不能承受所施加的载荷而突然破坏。

材料在无数次重复交变载荷作用下不致引起断裂的最大应力，称为疲劳强度，用符号 σ_{-1} 表示。实际上不可能进行无数次试验，因而对各种材料分别规定有一定的应力循环基数。例如，钢材的应力循环基数为 10^7 ，有色金属和某些超高强度钢的应力循环基数为 10^8 。如果材料达到规定的应力循环基数仍未发生破坏，即认为不会再发生疲劳破坏。

改善零件的结构形状，避免应力集中，降低零件的表面粗糙度值，以及进行表面热处理、表面滚压和喷丸处理等措施，均可有效地提高其抗疲劳能力。

2. 金属材料的工艺性能

工程材料的工艺性能是指其物理、化学、力学的综合性能。根据工艺方法的不同，材料的工艺性能可分为热处理性、铸造性、锻造性、焊接性和切削加工性等。



在设计零件和选择工艺方式时,为了使工艺简便,成本低廉,并能保证产品质量,必须要求材料具有良好的工艺性能。例如,灰铸铁的铸造性、切削加工性能很好,而锻造性和焊接性很差,故只能用于制造铸件。低碳钢的铸造性和焊接性很好,而高碳钢的锻造性和焊接性都较差,切削加工性也不好。

3. 工程材料的物理、化学性能

工程材料的主要物理性能有密度、熔点、热膨胀性和导电性等。不同的机器零件有不同的用途,对材料物理性能的要求亦不相同。例如,大型风力发电机的外壳应选用密度小、强度高的铝合金制造,以减轻风机的重量;电气零件应选用导电性良好的材料;内燃机活塞应选用热膨胀性小的材料。

材料的化学性能是指其在室温或高温下抵抗各种化学作用的性能,包括耐酸性、耐碱性、抗氧化性等。在腐蚀介质中或高温下工作的零件比在空气中或在室温下工作的零件腐蚀更加强烈。在设计这类零件时,要特别注意材料的化学性能。例如设计海上风机的桩基础、海上舰艇等,可采用耐腐蚀性好的不锈钢、钛以及钛合金等材料。

二、金属的结晶与合金的结构

1. 金属的晶体结构

固态物质的性能与原子在空间的排列情况有着密切的关系。固态物质按原子排列特点,可分为晶体和非晶体两大类。

凡原子按一定规律排列的固态物质,称为晶体。在自然界中除了一些少数的物质(如塑料、玻璃、松香、沥青)以外,包括金属在内的绝大多数固体都是晶体。

晶体的特点是:

- ① 原子在三维空间呈现有规则的周期性重复排列;
- ② 具有一定的熔点,如 Fe 的熔点为 1538°C , Cu 的熔点为 1083°C ;
- ③ 晶体的性能随着原子的排列方位不同而改变,即晶体具有各向异性。

非晶体的特点是:

- ① 原子在三维空间呈现不规则的排列;
- ② 没有固定的熔点,随着温度的升高将逐渐变软,最终变为有明显流动性的液体;
- ③ 在各个方向上的原子聚集密度大致相同,即具有各向同性。

图 1-4(a) 为晶体中原子排列的空间球体模型。这种模型立体感很强,但不能清楚地显

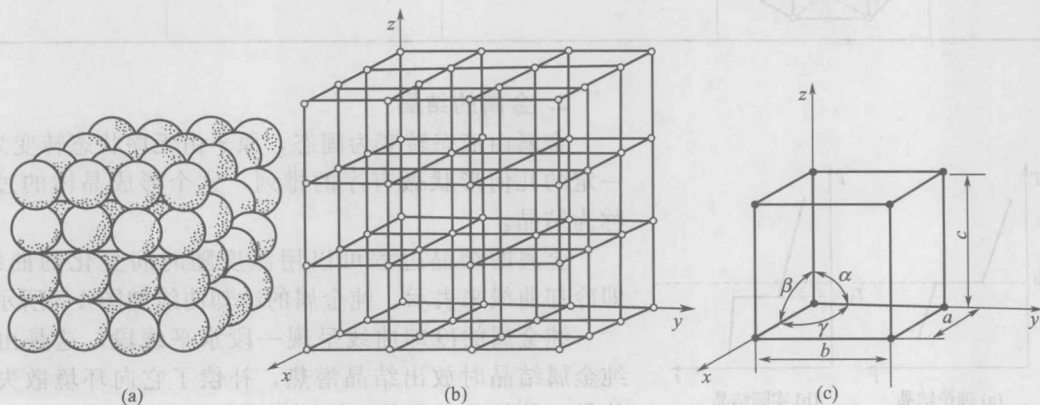
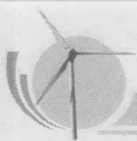


图 1-4 晶体、晶格和晶胞的示意图



示内部原子的排列规律。为了便于研究,可将每个原子抽象为一个几何质点,并用一些假想的线条将这些质点连接起来,所形成的空间格架称为晶格,如图 1-4(b) 所示。晶格是由许多大小、形状和方位相同的基本几何单位晶胞堆砌而成的,如图 1-4(c) 所示。金属的晶格有各种不同的形式,最常见的体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格如表 1-1 所示。

表 1-1 常见的金属晶格类型

晶 格 类 型	晶格示意图	晶 格 特 征	具有相应晶格的金属	性 能 特 点
体心立方晶格		晶胞为一个立方体,立方体的每个顶点和中心处各有一个原子	铬(Cr)、钨(W)、钒(V)以及在 912℃ 以下存在的 α -Fe 等	具有相当高的强度和较好的塑性
面心立方晶格		晶胞为一个立方体,立方体的每个顶点及每个面的中心处各有一个原子	铝(Al)、铜(Cu)、镍(Ni)以及 912℃ 以上而低于 1394℃ 的 γ -Fe 等	具有很好的塑性
密排六方晶格		晶胞是在正六方柱体的 12 个结点和上、下两底面的中心处各排列一个原子,中间还有 3 个原子	铍(Be)、镁(Mg)、锌(Zn)、镉(Cd)、 α -Ti 等	

2. 金属的结晶

金属由液态转变为固态,原子由无序状态转变为按一定的几何形状做有序的排列,这个形成晶体的过程称为结晶。

金属的结晶过程可以用温度随时间变化的曲线,即冷却曲线来表示。纯金属的冷却曲线如图 1-5 所示。

纯金属的冷却曲线呈现一段水平线段,这是由于纯金属结晶时放出结晶潜热,补偿了它向环境散失的热量,其结晶过程是在恒温下进行的。从图 1-5 还可以看到,金属的实际结晶温度低于其理论结晶过程,这

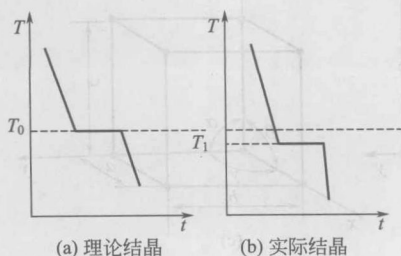
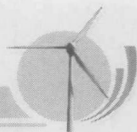


图 1-5 纯金属的结晶过程



种现象称为过冷。理论结晶温度 T_0 与实际结晶温度 T_n 之差 ΔT , 称为过冷度。过冷度的大小与冷却速度有关。冷却速度越快, 则过冷度越大。

金属的结晶过程如图 1-6 所示。当液态金属的温度降低至实际结晶温度时, 开始结晶。首先, 在液态金属中生成一些微小的晶体——晶核, 液态金属的原子就以它们为中心, 按照金属晶体的固有规律排列起来; 随着晶核的不断长大而形成晶体; 与此同时, 在液态金属的其他部分新的晶核又不断生成和长大, 直到全部长大的所有晶体的各个方面都相互抵触, 液态金属全部凝固成固态时, 结晶过程即告结束。综上所述, 液态金属的结晶过程包括两个环节, 即晶核的形成和晶核的长大。

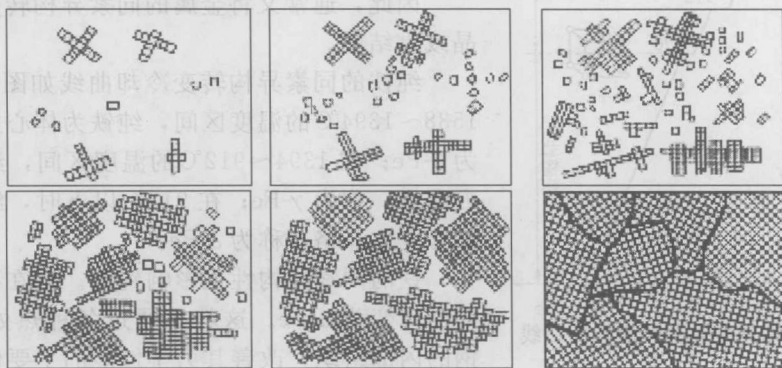


图 1-6 金属的结晶过程

晶核的形成有两种方式: 一种是液态金属中某些能量较低的原子自发地聚集在一起, 呈规则排列而形成的, 称为自发晶核; 另一种是液态金属中的一些高熔点微细固态质点, 称为外来晶核或非自发晶核。晶核长大时, 沿着各个方向的生长速度是不均匀的, 主要是沿着生长线速度最大的方向发展, 这样就形成了晶轴。晶轴继续长大, 并在其上长出许多小晶轴, 发展成为树枝状, 这在结晶初期是常见的形状。

金属结晶后, 每个晶核长大成为一个晶体, 称为晶粒。晶粒与晶粒间的接触界面称为晶界。每个晶粒的外形取决于它与相邻晶粒之间相互抵触的条件, 因而不规则的。由此也可以说, 金属是由许多大小、外形、晶格位向各不相同的晶粒组成的多晶体。

3. 晶粒的大小及其细化

晶粒大小对金属力学性能有较大的影响。常温下工作的金属, 其强度、硬度、塑性和韧性, 一般是随着晶粒细化而有所提高的。金属的晶粒越细, 则晶界越多。由于晶界处的晶格排列位向不一致, 犬牙交错, 相互咬合, 从而加强了金属的结合力, 提高了金属的力学性能。

晶粒的粗细与晶核的数目和晶核长大的速度有关。液态金属中的晶核越多, 则每个晶核长大的余地越小, 长成的晶粒就越细。生产中常采用以下措施来细化金属的晶粒:

- ① 提高液态金属的冷却速度, 即增大过冷度, 使原子容易聚集, 从而增加自发晶核;
- ② 在液态金属结晶前即加入某些金属或合金, 造成大量不熔杂质微粒, 从而形成大量外来晶核, 这种方法称为变质处理;
- ③ 采用电磁搅拌和机械振动等附加振动的方法破碎枝晶, 从而细化结晶组织。

三、金属的同素异构转变

大多数金属结晶后都具有一定的、不变的晶格类型。但是, 某些金属 (如铁、锡、钛、

锰等)的晶格类型却随着温度的变化而变化。一种金属能以几种晶格类型存在的性质,称为金属的同素异构性。金属在固态下改变其晶格类型的过程,称为金属的同素异构转变。

金属的同素异构转变过程与液态金属的结晶过程很相似,也是通过原子的重新排列而实现的,也要遵循结晶的一般规律:

- ① 包括晶核形成和晶核长大两个基本环节;
- ② 需要过冷;
- ③ 纯金属的同素异构转变也是在恒温下进行的。

因此,通常又将金属的同素异构转变称为二次结晶或重结晶。

纯铁的同素异构转变冷却曲线如图 1-7 所示。在 1538~1394℃ 的温度区间,纯铁为体心立方晶格,称为 δ -Fe; 在 1394~912℃ 的温度区间,纯铁为面心立方晶格,称为 γ -Fe; 在 912℃ 以下时,纯铁又转变为体心立方晶格,称为 α -Fe。

铁的同素异构性也影响到钢。钢在冷却时, γ -Fe 同样转变为 α -Fe。这就是通过各种热处理工艺改变钢的内部组织,改善其力学性能的主要依据。

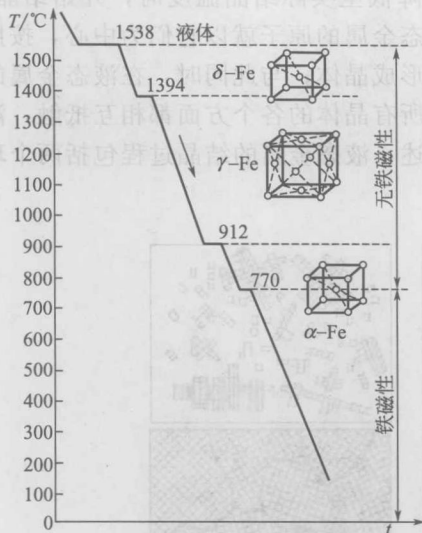


图 1-7 纯铁的同素异构转变冷却曲线

四、合金的结构

1. 合金的概念

一般来说,纯金属大都具有优良的塑性、导电性、导热性等性能,但纯金属制取困难、价格较贵、种类有限,特别是力学性能难以满足各种高性能的要求。因此,工程上大量使用的金属材料为合金,如碳钢、合金钢、铸铁、铝合金及铜合金等。

合金是指由两种或两种以上的金属元素或金属与非金属元素组成的具有金属特性的物质。如黄铜是铜和锌组成的合金;碳钢是铁和碳组成的合金;硬铝是铝、铜和镁组成的合金等。

组成合金的最基本的、独立的物质,称为合金的组元。它包括组成合金的元素和稳定化合物。按照组元的数目,可将合金分为二元合金、三元合金等。

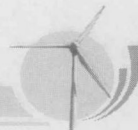
在金属的组织中,凡化学成分和晶格类型相同,且与其他部分有界面分开的均匀组成部分,称为“相”。纯金属在液态和固态下均属于单相,在熔化与结晶过程中则是液态和固态共存的两个相。合金在液态时属于单一的液相,在固态下则可能是单相,也可能是多相。

2. 合金的基本组成物

合金的结构是由合金内组元在结晶时的相互作用决定的,比纯金属的结构要复杂得多。两种或两种以上的组元相互作用可以形成固溶体、金属化合物和机械混合物三种基本组成物。

(1) 固溶体

某些合金的组元在固态下仍具有相互溶解的能力。例如,碳及许多元素的原子能够溶解于铁。这时铁是溶剂,碳或其他元素是溶质。这种溶质原子溶入溶剂晶格所形成的单一均匀的晶体,称为固溶体,即使在显微镜下充分放大,也不能区别它所含有的各个组元。在固溶体中,溶剂原子仍然保持原来的晶格类型。大多数固溶体的溶解度是有限的,其饱和溶解度



随温度的升降而增减。根据溶质原子在溶剂晶格中所占据的位置,可将固溶体分为以下两类。

① 置换固溶体 是由溶质原子置换了某些溶剂原子的位置所形成的固溶体,如图 1-8(a) 所示。

② 间隙固溶体 是由溶质原子侵入溶剂晶格的间隙所形成的固溶体,如图 1-8(b) 所示。

无论形成何种固溶体,都会导致溶剂的晶格发生畸变,结果使固溶体的强度和硬度均高于纯金属。这种现象称为固溶强化,是提高合金力学性能的一种重要途径。

(2) 金属化合物

金属化合物是合金组元之间相互发生作用而形成具有金属特性的一种新相,其晶格类型和性能完全不同于合金中的任一组元,一般可用分子式来表示。如碳钢中的 Fe_3C , 各种钢中都有的 FeS 、 MnS 等,都是化合物。

金属化合物通常具有复杂的晶格结构,硬度高、脆性大。金属化合物是许多合金的重要强化相,其存在会使合金的强度、硬度和耐磨性大大提高,而塑性下降。

(3) 机械混合物

机械混合物是合金中的一类复相混合物组织,不同的相均可互相组合形成机械混合物。各相在机械混合物中仍保持原有的晶格和性能,机械混合物的性能介于组成相的性能之间。工业上大多数合金均由机械混合物组成,如钢、铸铁、铝合金等。

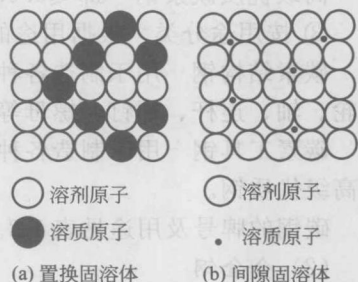


图 1-8 固溶体

五、常见的金属元素

1. 钢

钢的种类繁多,按化学成分可将其分为碳素钢和合金钢;按用途可将其分为结构钢、工具钢、特殊性能钢;按质量可将其分为普通钢、优质钢、高级优质钢;按脱氧程度可将其分为镇静钢、半镇静钢、沸腾钢。

(1) 碳钢

碳钢又称碳素钢,其碳的质量分数低于 1.5%,并含有少量硅、锰、硫、磷等杂质元素的铁碳合金。

含碳量的高低对碳钢力学性能的影响极大。当碳的质量分数低于 0.9% 时,碳钢的强度和硬度随含碳量的增加而提高,塑性和韧性则随含碳量的增加而降低;当碳的质量分数高于 0.9% 时,碳钢的硬度仍随含碳量的增加而提高,但其强度、塑性和韧性均随含碳量的增加而降低。

碳钢中的杂质硅、锰能使钢强化(强度、硬度提高),锰还能降低硫的有害影响,它们是钢中的有益元素;硫使钢热脆(在 800~1200℃ 进行热加工时,易引起破断),磷导致钢冷脆(在低温时变脆),它们是钢中的有害元素。

碳钢的主要分类方法如下。

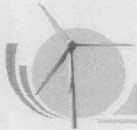
① 按含碳量分类 根据含碳量的多少,碳钢可分为三类:

低碳钢 $\omega_{\text{C}} \leq 0.25\%$;

中碳钢 $0.25\% \leq \omega_{\text{C}} \leq 0.60\%$;

高碳钢 $\omega_{\text{C}} \geq 0.60\%$

② 按质量分类 根据有害杂质 P、S 含量的不同,碳钢可分为三类:



普通碳素钢 $\omega_P \leq 0.045\%$, $\omega_S \leq 0.050\%$;

优质碳素钢 $\omega_P \leq 0.040\%$, $\omega_S \leq 0.040\%$;

高级优质碳素钢 $\omega_P \leq 0.035\%$, $\omega_S \leq 0.030\%$ 。

③ 按用途分类 根据用途的不同,碳钢可分为两大类:

碳素结构钢 用于制造各种工程构件,如桥梁、船舶、建筑构件等,制造机器零件,如齿轮、轴、连杆、螺钉、螺母等;

碳素工具钢 用于制造各种刀具、量具、模具等,一般为高碳钢,在质量上都是优质钢或高级优质钢。

碳钢的牌号及用途见表 1-2。

(2) 合金钢

碳钢的价格较低廉,加工较容易,通过含碳量的增减和不同的热处理,它的性能可以得到改善,能满足生产上的很多使用要求。但是,碳钢还存在着淬透性低、回火抗力差、不能满足一些特殊要求等缺点。为了弥补碳钢性能的不足,目前工业上广泛使用合金钢。

表 1-2 碳钢的牌号及用途

类别	编牌号的方法		主要性能特点	应 用	
	示例	说明		常用牌号	用途举例
碳素结构钢	Q235-AF 或 Q235AF	“Q”为“屈”的汉语拼音字首;“Q235”为屈服点(强度)值(N/mm ²);A、B、C、D为质量等级,由A到D依次提高;F、BZ、Z、TZ分别表示沸腾钢、半镇静钢、镇静钢、特殊镇静钢,“Z”与“TZ”常省略	含碳量较低,含S、P杂质较多,硬度较低,塑性较好,价格便宜	Q195、 Q215A、Q215B	薄板、焊接钢管、铁丝、铁钉
				Q235A、 Q235B、Q235C	薄板、中板、钢筋、条钢、钢管、焊接件、铆钉、螺栓、外壳、法兰
				Q255A、 Q255B、Q275	拉杆、连杆、键、轴、销钉、要求强度较高的结构件
优质碳素结构钢	45 65Mn	正常含锰量时,以平均含碳量的万分数表示;较高含锰量($\omega_C \leq 0.6\%$ 时, $0.7\% \leq \omega_{Mn} \leq 1.2\%$; $\omega_C > 0.6\%$ 时, $0.9\% \leq \omega_{Mn} \leq 1.2\%$)时,以平均含碳量的万分数后附Mn表示	含P、S有害杂质较少,化学成分控制较严,力学性能较高,价格较低	08F、08、 10F、10、15F、 15、20、25	属于低碳钢,塑性、韧性好,焊接性好,用于冲压板、焊接件、渗碳件、一般螺钉、铆钉、轴、垫圈
				30、35、40、 45、50、55	属中碳钢,综合力学性能好,机械加工性较好,用于各种受力较大的零件(如连杆、齿轮等),也用于制造具有一定耐磨性的零件(50、55用作凸轮等)
				60、65、70、 75、80、85	属于高碳钢,强度、硬度较高,弹性较好,用作各种弹性元件,如弹簧垫圈和耐磨零件(如凸轮、轧辊等)
				15Mn、 25Mn、30Mn、 40Mn、45Mn、 50Mn、60Mn、 65Mn、70Mn	性能与相应正常含锰量的各号钢基本相同,强度稍高,淬透性稍好,应用范围基本相同。宜制造截面尺寸较大,强度要求较高的零件
碳素工具钢	T10、 T10A	“T”为“碳”的汉语拼音字首,后面的数值为碳的平均质量分数的千分数,当为高级优质碳素钢($\omega_P \leq 0.02\%$, $\omega_S \leq 0.03\%$)时,其牌号后加“A”	碳的质量分数较高(0.65%~1.35%),含P、S较低,属高碳优质钢,热处理后可获得较高硬度和耐磨性	T7、T7A、 T8、T8A	韧性较高,用作要求有较高韧性的工具,如木工工具、冲头等
				T9、T9A、 T10、T10A、 T11、T11A	要求中等韧性、较高硬度的工具,如丝锥、铰刀、板牙等
				T12、T12A、 T13、T13A	要求耐磨性好、但韧性可较低的工具,如量具、锉刀、刻字刀