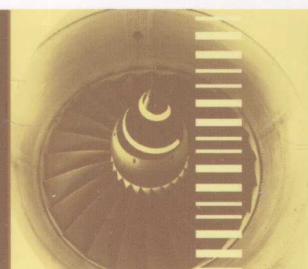


中国民航无损检测人员培训教材 **CANDTB**

# 航空器无损检测综合知识

■ 民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会 编

Hangkongqi  
Wusunjiance Zonghe Zhishi



中国民航出版社

中国民航无损检测人员培训教材

# 航空器无损检测综合知识

民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会 编

中国民航出版社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

航空器无损检测综合知识/民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会编. 北京: 中国民航出版社, 2008. 11  
中国民航无损检测人员培训教材  
ISBN 978-7-80110-874-6

I. 航 ... II. 民 ... III. 航空器-无损检验-技术培训-教材 IV. V267

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 135871 号

责任编辑: 邢 璐

**航空器无损检测综合知识**

民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会 编

---

出版 中国民航出版社  
社址 北京市朝阳区光熙门北里甲 31 号楼 (100028)  
排版 中国民航出版社照排室  
印刷 中国电影出版社印刷厂  
发行 中国民航出版社 (010) 64297307 64290477  
开本 787 × 1092 1/16  
印张 8.25  
字数 182 千字  
印数 1500 册  
版本 2009 年 4 月第 1 版 2009 年 4 月第 1 次印刷

---

书号 ISBN 978-7-80110-874-6  
定价 28.00 元

(如有印装错误, 本社负责调换)

# 前言

民用航空使用的航空器，是用当今世界最新技术制造的。随着我国改革开放和经济的繁荣，民用航空事业飞速发展，航空企业引进了大批新飞机，而原有的飞机逐步老龄化，这些变化促进了航空维修业迅速发展。航空维修/检查是航空器设计的延伸，在保持航空器固有安全性和可靠性水平等方面发挥着关键作用，是航空公司使用航空器不可缺少的行业，无损检测（NDT）是航空器维修、改装和保持持续适航的重要手段。

无损检测具有显著的行业特征，不同的行业根据其检测对象的不同而采用了不同的检测方法和技术。航空器无损检测侧重于在役航空器的原位检测，主要针对民用航空器使用过程中因疲劳、腐蚀、过载和意外损伤等原因造成的缺陷进行检测。为了有针对性地培训航空器无损检测人员，民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会先后选用过中国机械工程学会无损检测学会培训教材、航空航天无损检测人员资格鉴定培训教材、中国航空维修 NDT II 级教材和国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材。这些教材是由国内各行业无损检测知名专家学者编著，内容详尽，论述准确，具有很高的理论水平和很强的实用性，为民航无损检测人员培训提供了很好的指导。但是上述教材侧重于各自行业特点，很少涉及在役航空器，与民用航空器无损检测实际联系不紧密。

为了进一步提高民航无损检测人员培训质量，民航局飞行标准司要求民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会根据航空器维修无损检测的特点，编写一套具有本行业特色的无损检测人员技术资格培训教材。按照飞行标准司的要求，民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会组织了民航系统的专家和技术人员，在总结多年从事无损检测人员培训和实际检测工作经验的基础上，参考国内其他行业培训教材和主要机型的 NDT 手册等资料，完成了本套教材的编写。

本套教材作为民航无损检测 2、3 级人员培训和自学使用，其内容分为基本部分和扩展部分，扩展部分注有“\*”号，不作为 2 级人员资格鉴定考试要求。教材内容翔实，篇幅较多，教员可根据培训学时和培训大纲的要求有所取舍。

本套教材参考了中国机械工程学会无损检测学会培训教材、航空航天无损检测人员资格鉴定培训教材、国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材，在此表示感谢！

本套教材包括《航空器无损检测综合知识》、《航空器磁粉检测》、《航空器渗透检测》、《航空器涡流检测》、《航空器超声检测》和《航空器射线检测》。

其他检测方法的教材将根据需要陆续增加。

本教材在基础理论方面与先前采用过的教材保持了一致性，在专业知识和实际应用方面加入了大量航空器维修无损检测的相关知识和实例，重点讲述在役民用航空器原位无损检测基本要求、规范和程序。体现民用航空器维修的特色，将民用航空器无损检测中的典型事例升华为教材，指导检测实践，是本套教材的创新。本教材经过 2007—2008 年几期培训班试用，后又进行了补充修改，现才正式出版。

参与本套教材策划、编写、审核的人员有徐超群、陈伦、许万忠、王学民、潘建华、聂有传、张晓、李光浩、侯树聪、常士基、李淑贤、刘兆江、付杭君、胡小虎、杨剑英、郑勇、苏金波、胡良进、刘仲文、张循等。

《航空器无损检测综合知识》一书共分 12 章，其中第 1 章～第 6 章由王学民编写，第 7 章由常士基编写，第 8 章～第 9 章由刘仲文编写，第 10 章由常士基编写，第 11 章由许万忠编写，第 12 章由张晓、付杭君编写，全书由刘仲文统稿，李淑贤、许万忠主审。

由于编写、审核人员的水平有限和时间仓促，教材中难免存在缺陷和错误，欢迎指正。

民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会

2009 年 3 月

## 概 述

无损检测 (Nondestructive Testing, 缩写为 NDT) 是以不损及将来使用和使用可靠性的方法, 对材料和/或制件进行宏观缺陷检测, 几何特性测量, 化学成分、组织结构和力学性能变化的评定, 并进而就材料或制件对特定应用的适用性进行评价的一门科学。一般来说, 缺陷检测是无损检测中最重要的方面。因此, 狭义而言, 无损检测是基于材料的物理性质因有缺陷而发生变化这一事实, 在不改变、不损害材料和工件的状态及使用性能的前提下, 测定其变化量, 从而判断材料和零 (部) 件是否存在缺陷的技术。就是说, 无损检测是利用材料组织结构异常引起物理量变化的原理, 反过来用物理量的变化来推断材料组织结构的异常。它既是一门区别于设计、材料、工艺和产品的相对独立的技术, 又是一门贯穿于航空器和主导产品设计、研制、生产和使用全过程的综合技术。在设计阶段, 用于支持损伤容限设计; 在研制、生产阶段, 用于剔除不合格的原材料、坯料及工序不合格品, 改进制造工艺, 鉴定产品对验收标准的符合性, 判断合格与否; 在在役检测中, 用于监测产品结构和状态的变化, 确保产品运行的安全可靠。在核能、航天、航空、兵器和船舶等国防科技工业的产品设计、研制、生产和使用中, 无损检测技术已经获得广泛应用。

由于物理量的变化与材料组织结构的异常不一定是一一对应的, 因此, 不能盲目地使用无损检测, 否则不但不能提高产品的可靠性, 还要增加制造成本。因而必须掌握无损检测的理论基础, 选用最适当的无损检测方法, 应用正确的检测技术, 在适当的时机进行检测, 正确评价检测获得的信息, 才能充分发挥其效果。例如要发现锻造及冲压加工所产生的缺陷, 不宜采用射线检测; 对于表面淬火裂纹等则应选用磁粉、渗透检测等。此外, 无损检测的时机也是一个重要因素, 例如经过焊接或热处理的某些材料会出现延迟断裂现象, 即在加工或热处理后, 经过几个小时甚至几天才产生裂纹。因此, 必须了解这些情况以确定检测时机。

无损检测的可靠性与被检件的性质、组成、形状、表面状态、所采用的物理量的性质以及被检工件异常部位的性质、形状、大小、取向和检测装置的特性等关系很大, 而且, 需要根据不同的情况选用不同的物理量, 而且有时往往需要综合考虑几种不同物理量的变化情况, 才能对材料组织结构的异常情况做出可靠的判断。可见, 不管采用哪一种检测方法, 要完全检测出异常部位是十分困难的, 而往往不同的检测方法会得到不同的信息, 因此综合运用几种方法可以提高无损检测的可靠性。

根据物理原理的不同,无损检测方法多种多样。工程应用中最普遍采用的有涡流检测(ET)、渗透检测(PT)、磁粉检测(MT)、射线照相检测(RT)和超声检测(UT),通称五大常规无损检测方法。其中,射线照相检测和超声检测主要用于检测内部缺陷,磁粉检测和涡流检测可以检测表面和近表面缺陷,渗透检测只能检测表面开口缺陷。已获工程应用的其他无损检测方法主要有声发射检测、计算机层析成像检测、全息干涉/错位散斑干涉检测、泄漏检测、目视检测和红外检测。

随着我国改革开放和经济的繁荣,民用航空事业飞速发展,我国逐步淘汰了老龄化飞机并且大量引进了新飞机,这促进了航空维修业的迅速发展。航空维修是航空器设计的延伸,是航空公司使用航空器不可缺少的行业,无损检测是航空维修不可缺少的手段。

无损检测技术始于上世纪初,它的发展主要经历了无损探伤(NDT)、无损检测(NDI)和无损评估(NDE)三个阶段。现在所说的无损检测包括了以上三方面的工作。

民航无损检测采用的技术规范是制造方提供或要求的 NDT 手册/检验程序/书面工艺规程等,使用的设备绝大部分是当今世界上最先进的,能满足航空器的各种无损检测工作需要。我国民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会(CANDTB)参照世界先进标准(美国 ASTM 标准、NAS 和 MIL 等标准)制定了民航无损检测人员资格鉴定与认证行业标准。经过多年的努力,民航培养造就了一批具有很高技术素质和管理水平的从事无损检测的专家、高级工程师和教员队伍。按照这些标准进行人员培训和资格鉴定,并颁发了相应的资格证书,保证了无损检测人员的培训质量。目前,我国民航的无损检测总体水平与国际航空维修业的水平相当。北京 AMECO 和广州 GAMECO 等维修公司均分别取得了 CAAC、FAA 和 EASA/JAA 的 NDT 许可批准,在国内以及美国、西欧、亚非等国家的民用航空器维修行业中建立了良好的信誉,得到了国内外同行的认可。无损检测在提高维修/检测质量、保证飞行安全中取得了明显成效,获得了巨大的社会经济效益。

我国民用航空器无损检测的发展,大致经历了以下五个阶段:

1. 与制造业同步发展阶段(1958—1975.12)
2. 维修业无损检测特点形成阶段(1975.12—1984.6)
3. 行业雏形的形成和自由发展阶段(1984.7—1989.9)
4. 与军方共同开发和民航体系的形成阶段(1989.10—1995.12)
5. 依靠民航行业标准和依托适航管理的民航无损检测发展阶段(1996 至今)

民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会发展过程:

1. 第一届民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会(1996.1—2002.1)
2. 第二届民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会(2002.1—2005.1)
3. 第三届民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会(2005.1 至今)

我国民用航空器的无损检测在适应航空运输发展中迅速发展,增加了设备,壮大了队伍,加强了人员培训,提高了素质,形成了独立的、具有民航维修特色的、新兴的无损检测行业,为民用航空器的安全可靠运行和提高经济效益作出了重要贡献。随着飞机

设计和维修思想的发展、航空制造业和飞机维修业的发展、民用航空器无损检测技术的发展，民用航空器无损检测的特点将得到进一步补充和发展。

民用航空器的无损检测进入新阶段主要表现在以下方面：

1. 检测理论方面，由损伤定位向损伤定性和定量方向发展，由损伤发现向损伤检测和损伤评价方向发展；

2. 检测技术方面，由五种 NDT 常规方法向更多的新方法、新技术（如声发射、红外热成像和磁光涡流技术等）发展，由离位静态检测向原位静态检测发展，由原位静态检测向原位动态监测以及实时监测监控方向发展；

3. 检测设备方面，将检测与计算机控制技术和信号处理技术相结合，由仪表指示向数字式和视频图像发展，由单一功能向多功能、自动化和智能化方向发展；

4. 在检测人员方面，向专业化（检测技术等级证书）、高学历、高层次及复合型方向发展。

上述诸方面的变革正极大地推动着航空维修无损检测技术的进步和无损检测质量的提高，推动着航空安全水平的提高。

# 目 录

## 前言

## 概述

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| <b>第 1 章 金属材料的组织结构与性能</b> .....   | 1  |
| 1.1 金属材料的微观组织结构 .....             | 1  |
| 1.2 铁碳合金的平衡相图* .....              | 2  |
| 1.3 金属材料组织的微观分析方法* .....          | 4  |
| 1.4 金属材料的性能 .....                 | 6  |
| 1.5 金属材料的力学性能试验方法简介 .....         | 7  |
| <b>第 2 章 金属材料的加工工艺及常见缺陷</b> ..... | 10 |
| 2.1 铸造 .....                      | 10 |
| 2.2 压力加工 .....                    | 13 |
| 2.3 切削 .....                      | 14 |
| 2.4 焊接 .....                      | 14 |
| 2.5 热处理 .....                     | 18 |
| <b>第 3 章 钢铁材料</b> .....           | 23 |
| 3.1 钢铁材料的分类及用途 .....              | 23 |
| 3.2 常见钢铁材料的牌号及性能特点 .....          | 24 |
| <b>第 4 章 铝及铝合金</b> .....          | 27 |
| 4.1 铝合金的分类和牌号表示方法 .....           | 27 |
| 4.2 铸造铝合金* .....                  | 32 |
| 4.3 变形铝合金 .....                   | 34 |
| 4.4 铝合金的热处理* .....                | 35 |

|                        |    |
|------------------------|----|
| <b>第5章 镁合金与铜合金</b>     | 39 |
| 5.1 镁合金                | 39 |
| 5.2 铜合金*               | 40 |
| <b>第6章 钛合金</b>         | 42 |
| 6.1 钛与钛合金的性能特点         | 42 |
| 6.2 钛合金的分类及常用牌号        | 43 |
| <b>第7章 复合材料与胶接结构</b>   | 45 |
| 7.1 复合材料               | 45 |
| 7.2 胶接结构               | 50 |
| 7.3 复合材料及胶接结构的常用无损检测方法 | 51 |
| <b>第8章 金属材料的失效与预防</b>  | 54 |
| 8.1 主要失效形式             | 54 |
| 8.2 常见失效形式的特点及预防       | 55 |
| 8.3 失效分析的基本方法*         | 59 |
| <b>第9章 结构的力学分析基础*</b>  | 60 |
| 9.1 古典力学常识             | 60 |
| 9.2 断裂力学简介             | 63 |
| <b>第10章 飞机结构和无损检测</b>  | 66 |
| 10.1 相关名称与代码           | 66 |
| 10.2 飞机主要结构部件功能和受力     | 67 |
| 10.3 飞机结构设计和维修的发展过程*   | 70 |
| 10.4 飞机结构分类和损伤容限       | 71 |
| 10.5 飞机结构的完整性*         | 76 |
| 10.6 结构维修大纲及其发展*       | 78 |
| 10.7 无损检测的检出概率和置信度*    | 80 |
| 10.8 民用航空器无损检测的特点      | 82 |
| <b>第11章 常用无损检测方法简介</b> | 85 |
| 11.1 涡流检测              | 85 |
| 11.2 渗透检测              | 87 |

|                                      |                       |     |
|--------------------------------------|-----------------------|-----|
| 11.3                                 | 磁粉检测 .....            | 89  |
| 11.4                                 | 射线照相检测 .....          | 91  |
| 11.5                                 | 超声检测 .....            | 93  |
| 11.6                                 | 其他无损检测方法 .....        | 95  |
| <br><b>第 12 章 民航法规、标准和规范简介</b> ..... |                       | 99  |
| 12.1                                 | 民用航空法律体系和规范性文件* ..... | 99  |
| 12.2                                 | 标准 .....              | 101 |
| 12.3                                 | 其他技术资料 .....          | 108 |

# 第1章 金属材料的组织结构与性能

## 1.1 金属材料的微观组织结构

金属材料是指纯金属和以某一金属元素为基体，添加一种或多种其他元素，通过冶金或粉末冶金方法制成的具有金属特性的材料（即合金）的总称。

只有在特定的场合下才使用纯金属，如电工用纯铜、照相底版用纯银等。通常情况下，工业上使用的金属材料均为合金。同样，也只有在特定的场合下，才使用单晶体材料，如单晶硅等。而实际使用的金属材料都为多晶体。从力学性能上看，单晶体呈各向异性，而多晶体在宏观上表现出各向同性的特点。

固态金属通常具有多晶体结构，即由许多不同位向的小晶体组成。这些小晶体呈不规则的颗粒状，称为晶粒，晶粒之间的交界面称为晶界。在晶体内原子在空间呈有规则的周期排列，在晶界处原子呈无序排列（图 1.1）。描述晶体中原子空间排列方式的空间格架称为晶格，金属中最常见的晶格有下面三种：

体心立方晶格（图 1.2a）：室温下的铁、铬、钨、钼、钒、铌等；

面心立方晶格（图 1.2b）：室温下的铜、镍、金、银、铝等；

密排六方晶格（图 1.2c）：室温下的钴、镁、锌、镉、钛等。

图 1.2 是不同晶格的几何模型。具有不同晶格的金属在强度、塑性、硬度、韧性和热处理合金化效果及其他物理性能、化学性能等方面明显不同。

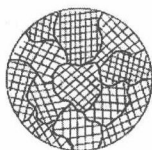


图 1.1 多晶体的晶粒与晶界示意图

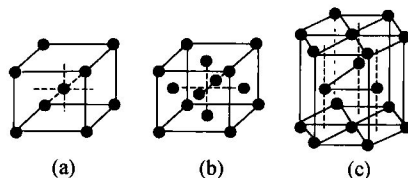


图 1.2 金属常见的晶格

晶体结构是在金属从液态转变为固态的凝固过程中形成的，这个过程称为金属的结晶过程。金属的结晶过程主要分为三个阶段，见图 1.3。当液态金属趋近凝固温度时，在一些部位形成晶核，即微小体积内出现规则排列的原子集团（极细小的晶体）。在继续凝固的过程中，晶核长大同时形成新的晶核。每个晶核不断长大，直到彼此接触，最后形成金属的晶体结构。图 1.4 为典型的铸锭组织示意图。

许多金属在一定温度下可改变其晶体结构，即发生晶格改变。合金中具有同一化学成分、同一聚集状态并以界面互相分开的各个均匀组成部分称为“相”。晶粒、晶界及相的总体分布受合金成分、热加工、冷作和热处理影响，也显著受焊接影响。

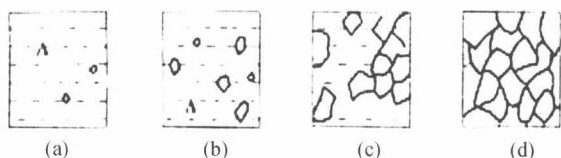


图 1.3 金属结晶过程的示意图

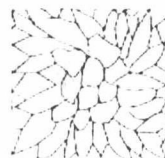


图 1.4 典型的铸锭组织

工业上使用的金属材料绝大部分是合金，即由两种以上的金属或金属与非金属元素组成，合金可具有纯金属达不到的许多优异性能。合金的相结构大致可分为固溶体和化合物两大类型，此外还有两种晶体的机械混合物。

固溶体是一种晶格、组织结构均匀的固态相。保持晶格不变的元素称为溶剂，其他元素称为溶质。按溶质原子在溶剂晶格中所占位置的不同，固溶体分为置换固溶体和间隙固溶体。当合金元素的原子在尺寸和化学性质上与原始未合金化的金属原子相近时，形成置换固溶体，溶质原子部分占据了溶剂原子的晶格结点。当合金元素的原子小于基体元素的原子时，形成间隙固溶体，溶质原子溶入溶剂原子晶格的间隙之中。化合物的晶格与形成的各元素的晶格不同，它不能单独构成合金，只能分布在固溶体中或纯金属的基体组织中。机械混合物中各组元保持各自的晶格和性能。

## 1.2 铁碳合金的平衡相图\*

铁的熔点为  $1534^{\circ}\text{C}$ 。在  $910^{\circ}\text{C}$  以下铁为体心立方晶格，称为  $\alpha$  铁 ( $\alpha\text{-Fe}$ )。在  $910^{\circ}\text{C} \sim 1390^{\circ}\text{C}$  之间，铁为面心立方晶格，称为  $\gamma$  铁 ( $\gamma\text{-Fe}$ )。在  $1390^{\circ}\text{C} \sim 1534^{\circ}\text{C}$  之间，铁又为体心立方晶格，称为  $\delta$  铁 ( $\delta\text{-Fe}$ )。铁与碳、氮、氢形成间隙固溶体，铁的溶碳能力取决于其晶格中的原子间隙。铁碳合金的基本组织结构有：

铁素体 (F)：碳在  $\alpha\text{-Fe}$  的间隙固溶体，呈体心立方晶格，铁素体的塑性和韧性好，但强度和硬度低。碳在  $\delta\text{-Fe}$  的固溶体称为  $\delta$  铁素体。

奥氏体 (A)：碳在  $\gamma\text{-Fe}$  的间隙固溶体，呈面心立方晶格，奥氏体晶粒呈多面体

形，塑性高，强度不大，没有磁性。

渗碳体 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )：铁与碳的化合物，呈复杂的斜方晶格，渗碳体的塑性和韧性很低，硬度高、脆性大。

珠光体 (P)：铁素体与渗碳体的机械混合物，呈铁素体与渗碳体相间排列的片层状组织，珠光体的强度较高，硬度适中，具有一定塑性。

图 1.5 是铁碳合金状态图。铁碳合金状态图表示在平衡状态下不同含碳量的铁碳合金在不同温度下所处的状态、晶体结构和显微组织特征。含碳量高于 5% 的铁碳合金性能很脆，没有实用价值，因此，通常的铁碳合金状态图实际是  $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$  部分的状态图。

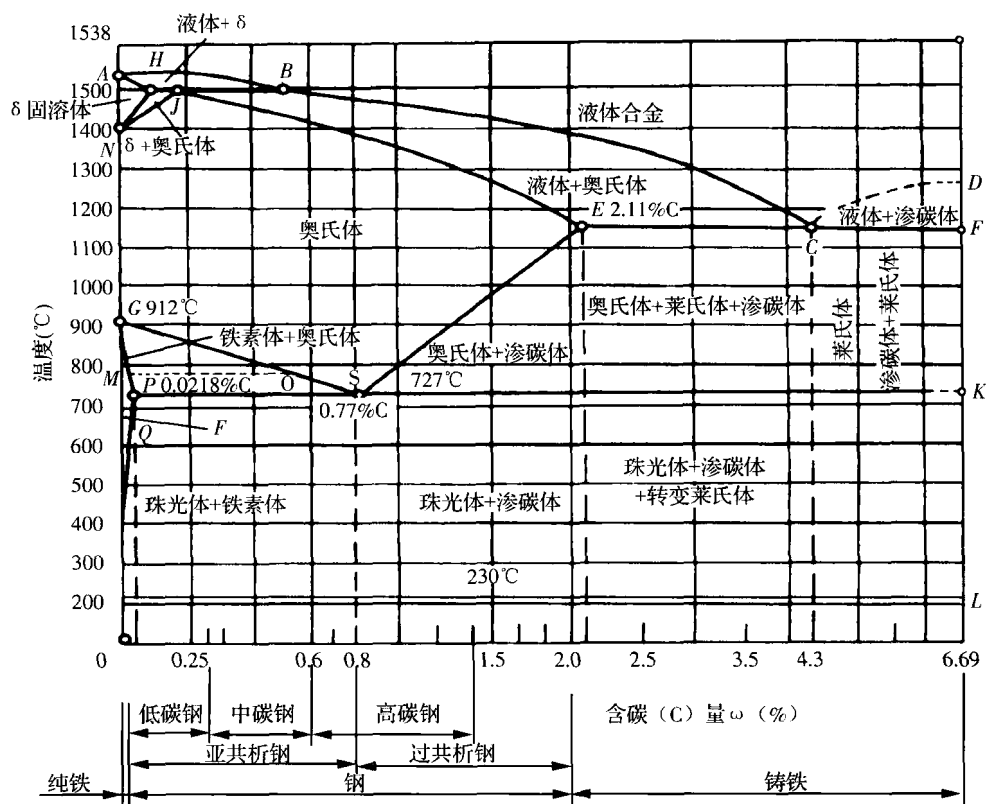


图 1.5  $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$  平衡相图

图 1.5 的纵坐标是温度，横坐标是含碳量。图中的连线常称为特征线，连线上的点称为特征点，部分特征线和特征点的意义如下：

ABCD：液相线，合金加热到此线温度时将全部熔化为液体，冷却到此线温度时 will 开始结晶；

AHJECF：固相线，合金加热到此线温度时开始出现液体，冷却到此线以下温度时将全部结晶为固体；

MO（虚线）：磁性转变线，当加热到此线温度以上时，铁素体呈顺磁性，在此线温度以下时出现铁磁性。

A 点是纯铁熔点；M 点和 O 点是磁性转变点；S 点是共析点，在此点发生共析反应，奥氏体全部转变为珠光体，直至冷却到室温珠光体不发生变化（共析钢）。

铁碳合金状态图对于钢铁材料的应用以及热处理工艺和热加工工艺的制定具有十分重要的意义，根据该图可以分析不同含碳量的铁碳合金的结晶过程、不同温度下的状态、相组成，从而选择合理的热处理温度和热加工温度等。

### 1.3 金属材料组织的微观分析方法\*

金属材料的性能，特别是力学性能和物理性能，在很大的程度上取决于金属材料的显微组织结构。即便是同一牌号的金属材料，经过不同的方式进行机械加工或热处理后，其力学和电学性能往往存在巨大的差异。究其原因，正是因为材料的显微组织不同所致，见表 1-1。

表 1-1 45 号钢经不同的热处理后的组织和性能

| 热处理状态 | 组织                   | $\sigma_b$ (MPa) | $\delta$ (%) | $a_k$ (MJ/m <sup>2</sup> ) | HB        |
|-------|----------------------|------------------|--------------|----------------------------|-----------|
| 退 火   | 珠光体 + 铁素体            | 650 ~ 700        | 15 ~ 20      | 0.4 ~ 0.6                  | ~ 180     |
| 正 火   | 细密的珠光体，少而小的<br>游离铁素体 | 700 ~ 800        | 15 ~ 20      | 0.5 ~ 0.8                  | ~ 220     |
| 调 质   | 回火索氏体                | 750 ~ 850        | 20 ~ 25      | 0.8 ~ 1.2                  | 210 ~ 250 |

金属材料的显微组织结构，主要指金属中各组成相的形状、性质、尺寸和分布形态，以及晶界结构、位错线的分布。研究显微组织的目的，在于了解微观组织的形成与变化规律，以及其与成分、性能的相互关系，以便控制影响组织的工艺参数，获得所需要的性能。

按照观察方式和所需放大倍数来分，对金属的显微组织观察可分为低倍组织观察与高倍组织观察。通常需要对被观察样品表面进行机械加工（包括磨光和抛光）及腐蚀（用化学试剂浸蚀或揩拭）。

#### 1.3.1 低倍组织观察

通常指放大倍率不超过 30 倍，借助肉眼或低倍放大镜，对经过表面粗磨并用特定试剂腐蚀后的试样表面进行的观察（某些特殊检查项目，如铜断口的气孔、夹杂和裂纹检查，则不需要研磨和腐蚀）。

观察内容一般包括：组织特征、晶粒大小、晶界状况以及材料内部存在的各种缺陷（如气孔、夹杂、裂纹、疏松和显微偏析等，见图 1.6 和图 1.7）。

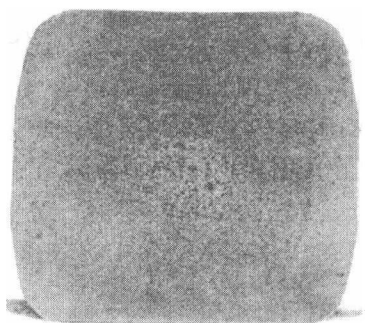


图 1.6 铸锭低倍组织——中心疏松

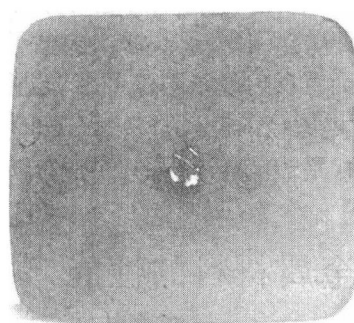


图 1.7 铸锭低倍组织——非金属夹杂

### 1.3.2 高倍组织观察

高倍组织观察是指在较高倍率下，借助光学金相显微镜或电子显微镜来观察试样的微观组织特征。

试样经过研磨并抛光至镜面后，用特定试剂腐蚀，使不同的相或晶界被腐蚀的程度不同，产生高度差，对入射光产生不同的反射效果而被显示出来，见图 1.8 和图 1.9。



图 1.8 20 钢高倍组织——铁素体 + 珠光体

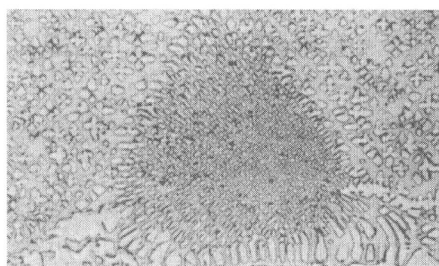


图 1.9 镍基高温合金高倍组织——奥氏体基体 + 共晶团 ( $\gamma + \gamma'$ ) + 强化相 ( $\gamma'$ )

#### 1.3.2.1 光学金相显微术

借助金相显微镜对试样进行的高倍率观察是一项传统的金相检查方法，一般从 100 倍至 1000 倍左右。金相显微镜结构相对简单，但因倍数越高，景深越小，因而制样质量的高低将直接影响到高倍率下的成像清晰度。

#### 1.3.2.2 电子显微术

扫描电子显微镜 (SEM——Scanning Electronic Microscope) 是利用高能电子束 (1 ~ 30keV) (亦称一次电子束)，以光栅状方式对试样表面进行扫描 (扫描电子显微镜也

因此得名), 分析区域约为  $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 。同时, SEM 将捕获到入射电子与试样表面发生相互作用所获得的信息进行分析。

所获得的反射电子 (即二次电子) 图像适用于表面微区形貌的分析, 分辨率可达  $0.6\text{nm}$ 。而背反射电子图像可用于进行相分析。

透射电子显微镜 (TEM——Tele-Electronic Microscope) 是利用高能电子束 ( $500 \sim 1000\text{keV}$ ) 穿透试样过程中, 与试样原子发生相互作用而产生的电子信息。

## 1.4 金属材料的性能

金属材料的性能主要包括物理性能、化学性能、力学 (机械) 性能和工艺性能。

物理性能取决于各组成相的成分、原子结构、键合状态、组织结构特征及晶体缺陷等因素。物理性能主要包括密度、比热容、熔点、热膨胀性、导电性、磁性和反射率以及折射率等等。

化学性能是金属材料与其他物质发生化学反应的特性, 在工业应用中特别注意的是抗蚀性和抗氧化性。

力学性能主要包括强度、塑性、硬度、韧性和疲劳强度极限等指标, 是材料受外力作用时, 抵抗变形或断裂的能力。

材料受力作用将产生变形, 同时在材料中产生抵抗变形的力。材料中单位面积上的抵抗变形的力称为应力, 单位为  $\text{Pa}$  ( $\text{N}/\text{m}^2$ )。

强度是金属材料在外力作用下抵抗变形和断裂的最大能力, 通常以抗拉 (压) 强度  $\sigma_b$  (MPa) 来表示。

塑性是材料在外力作用下产生永久变形但不破坏的最大能力, 通常以拉伸试验的断面收缩率  $\psi$  (%) 和延伸率  $\delta$  (%) 表示。

硬度是材料抵抗其他物体压入表面的能力。常用的硬度指标有洛氏硬度  $HRC$ 、布氏硬度  $HB$ 、维氏及显微维氏硬度  $HV$  等。

韧性是材料在冲击载荷作用下抵抗断裂的能力, 通常以  $a_k$  ( $\text{J}/\text{cm}^2$ ) 表示。

疲劳强度极限是材料抵抗长期交变应力破坏的能力, 通常以  $\sigma^{-1}$  (MPa) 表示。

工艺性能是适应各种加工的特性, 主要是铸造性、锻造性、切削性和焊接性。

铸造性主要包括流动性、收缩性和偏析性。流动性是液态金属填充铸型的能力, 收缩性是合金在凝固和冷却过程中体积和尺寸变化的特性, 偏析性是铸件中化学成分不均匀的现象。

焊接性是材料对焊接加工的适应性, 即在一定的焊接工艺条件下获得优质焊接接头的的能力。它包括: 在一定的冶金过程中的物理化学变化对焊缝金属性能和产生缺陷的影响; 在一定的焊接热环境下对焊接接头热影响区组织、性能及产生缺陷的影响; 在一定焊接条件下得到性能优良焊接接头的的能力。焊后热处理对消除残余应力、改善焊接接头的机械性能具有重要作用。焊接性试验主要是焊接裂纹敏感性试验和焊接接头使用性能