

# 桥梁工程检测手册

Manual of Engineering Testings and Inspections of Bridges

(第二版)

主 编：刘自明 陈开利

副主编：党志杰 林亚超



人民交通出版社

China Communications Press

要 容 内

# 桥梁工程检测手册

## Manual of Engineering Testings and Inspections of Bridges

### (第二版)

主 编：刘自明 陈开利

副 主 编：党志杰 林亚超

主 编：刘自明 陈开利

编写组成员：副主编：党志杰 林亚超

ISBN 978-7-114-08355-8

定价：48.00元

人民交通出版社

ISBN 978-7-114-08355-8

定价：48.00元

人民交通出版社

地址：北京人民交通出版社

电话：(010)59754000

网址：http://www.jtbp.com.cn

电子邮箱：jtbp@163.com

总发行：人民交通出版社

经销：各地新华书店

印 刷：北京人民交通出版社

开 本：880×125

定 价：48.00元

字 数：244千字

第 1 版 2002年4月 第 1 版

第 2 次 2010年8月 第 2 次

第 1 次 2010年8月 第 1 次

ISBN 978-7-114-08355-8

定价：48.00元



人民交通出版社

China Communications Press

## 内 容 提 要

桥梁工程检测工作是保证在建桥质量、成桥安全运营和旧桥承载力评估的必要技术手段。本手册(第二版)依据我国现行公路和铁路工程方面的相关标准、规范,以及目前桥梁工程检测中广泛采用的新技术和新方法,对桥梁工程检测的内容进行了全面、系统的论述。全书共4篇计32章,内容包括:工程材料检测,地基基础检测,上部结构检测,以及桥梁检测主要元件、仪器设备和检测技术。

本手册可供桥梁工程技术人员参考,可作为从事检测工作人员的实用手册,亦可作高等院校有关工程专业的教学参考书。

(第二版)

### 图书在版编目(CIP)数据

桥梁工程检测手册/刘自明,陈开利主编—2版.

—北京:人民交通出版社,2010.8

ISBN 978-7-114-08322-8

I. ①桥… II. ①刘… ②陈… III. ①桥梁工程—检测—技术手册 IV. ①U446-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 050371 号

书 名:桥梁工程检测手册(第二版)

著 者:刘自明 陈开利

责任编辑:吴有铭 李 农 王 霞

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757969,59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市凯鑫彩色印刷有限公司

开 本:880×1230 1/16

印 张:68.5

字 数:2045千字

版 次:2002年4月 第1版

2010年8月 第2版

印 次:2010年8月 第2版 第1次印刷 总第3次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-08322-8

定 价:198.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书,由本社负责调换)



# 《桥梁工程检测手册》 编写委员会

主 编：刘自明 陈开利

副 主 编：党志杰 林亚超

编写组成员：(按姓氏笔画为序)

王天亮 王戒躁 田启贤 刘 宏

刘德煜 安群慧 汪双炎 汪正兴

吴海涛 林一宁 张国庆 欧阳华林

周明星 郑平伟 姜 辉 胡贵琼

赵 建 钟继卫 彭旭民 程宝辉

童智洋 魏利明

由于水平所限,时间仓促,错误和不安之处,恳请读者指正。

编 者

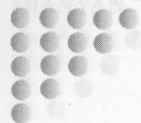
2010年2月于武汉



## 第二版

# 前言

QIANYAN



本手册第二版仍着重于在建桥质量、成桥安全运营检测和旧桥承载力评估检测。本次再版,系依据我国现行公路和铁路工程新标准、规范,以及目前桥梁工程检测工作中已被广泛应用的新技术和新方法,对手册第一版进行增删补改,以适应当前桥梁工程检测实践的需要。

相对第一版,有如下主要改动。第一篇,第一章钢材的力学性能测试和第二章水泥及混凝土的检测根据新标准、新规范对内容作了大量增删补改,第三章新材料的检测为新增内容。第二篇,新增内容主要有:第四章基桩承载能力自平衡测试,第六章地下连续墙深基坑施工监测,第七章深水钻孔桩钢护筒和海洋超长钢管桩施工检测,第八章钢吊箱施工安全监测和承台大体积混凝土温控检测。第三篇,第一章钢结构检测、第五章斜拉桥检测和第六章悬索桥检测根据新标准、新规范和当前新进展对内容做了必要的修改充实,第四章钢管混凝土拱桥检测和第十一章桥梁健康监测为新增内容。第四篇,新增内容主要有:第八章光导纤维传感器和全球定位系统(GPS),第九章桥梁工程检测单位主要仪器设备,第十章桥梁工程检测技术。

本手册共4篇,计32章,较第一版篇幅、内容相应增多。随着我国公路、铁路桥梁建设规模扩大,发展速度加快,在建桥梁须确保工程质量,成桥须确保安全运营,旧桥须确保承载力评估后的维修和加固,因而,桥梁工程检测任务仍将日趋繁重。希本手册能对读者有所裨益,编者幸甚。

由于水平所限,时间仓促,错误和不妥之处,恳请读者指正。

编者

2010年2月于武汉

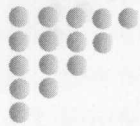
编者

2001年9月于武汉

第一版

# 前言

QIANYAN



## 第一篇 工程材料检测

### 第一章 钢材力学性能测试

#### 第一节 桥梁用钢标准、化学成分和力学性能要求

近 50 年来,特别是改革开放 20 余年来,我国兴建了许多各种类型的公路桥梁、铁路桥梁、铁路公路两用桥梁、城市桥梁及立交桥等。这些桥梁在建设和运营管理期间都需要进行大量的检测工作,以保证建设质量和运营安全。

实践证明,对桥梁工程进行客观、准确、及时的检测,是保证在建桥工程质量的重要技术手段,有时甚至是施工必不可少的步骤之一;同时也是了解成桥(特别是病害桥)健康状况、查清病害程度与原因的重要手段。

本书编著者们的所在单位——铁道部大桥工程局桥梁科学研究院自 1959 年建院以来,曾先后为南京长江大桥、枝城长江大桥、九江长江大桥、长东黄河大桥、天津永和斜拉桥、钱塘江二桥、孙口葵河大桥、深圳大沙河桥、武汉长江二桥、广东虎门大桥、广东汕头海湾大桥、南昆铁路清水河大桥、宜昌西陵长江大桥、武汉白沙洲长江大桥、武汉军山长江大桥、武汉江汉五桥和芜湖长江大桥等近 100 座各类桥梁工程进行过一系列的试验、检测和研究工作,在钢结构、预应力混凝土结构、钢筋混凝土结构、地基基础、建筑材料和桥梁科技信息等方面均有所成就。本书的编著者们曾长期从事相关工作,既有相关的理论水平,又有丰富的实践经验。本手册有理论、有实例,全面系统地讲述了桥梁工作检测工作,具有较强的实用性和可操作性,能较好地满足桥梁工作检测工作的实际需要。

笔者认为,系统地分析和总结国内外桥梁工程检测的经验和方法,可以促进桥梁结构检测理论和技术的发展,是进一步发展桥梁建设事业的需要,是确保桥梁安全运营的需要,也是从事桥梁设计、施工、检测和管理工作人员的愿望。

本书共 4 篇,计 24 章。第一篇讲述工程材料检测,第二篇讲述地基基础检测,第三篇讲述上部结构检测,第四篇讲述检测使用的主要元件、仪表和仪器设备等。笔者在介绍检测方法的同时,一般都在理论上作了一些论述,力图将理论与实践相结合的原则贯穿于本书的始终。

笔者在此对支持本书出版的人民交通出版社表示感谢。

限于水平,本书内容如有错误和不妥之处,恳请读者指正。

笔者

2001 年 9 月于武汉

# 目录 MULU



第一章 混凝土结构检测	第一章 混凝土结构检测
第一节 顶面混凝土结构检测	第一节 顶面混凝土结构检测
第二节 梁板混凝土结构检测	第二节 梁板混凝土结构检测
第三节 剪力墙混凝土结构的其他性能检测	第三节 剪力墙混凝土结构的其他性能检测
第四节 预应力混凝土结构检测	第四节 预应力混凝土结构检测
第五节 混凝土结构的其他性能检测	第五节 混凝土结构的其他性能检测
第六节 混凝土结构的其他性能检测	第六节 混凝土结构的其他性能检测
第七节 混凝土结构的其他性能检测	第七节 混凝土结构的其他性能检测
第八节 混凝土结构的其他性能检测	第八节 混凝土结构的其他性能检测
第九节 混凝土结构的其他性能检测	第九节 混凝土结构的其他性能检测
第十节 混凝土结构的其他性能检测	第十节 混凝土结构的其他性能检测

## 第一篇 工程材料检测

第一章 钢材力学性能测试	3
第一节 桥梁用钢标准、化学成分和力学性能要求	3
第二节 拉伸试验	45
第三节 硬度试验	56
第四节 弯曲试验	65
第五节 夏比摆锤冲击试验	72
第六节 疲劳试验	78
第七节 有关线材的几项试验	80
第二章 水泥及混凝土的检测	89
第一节 水泥的检测	89
第二节 水泥混凝土拌合物试验检测	113
第三节 硬化水泥混凝土性能试验检测	127
第三章 新材料的检测	148
第一节 高性能混凝土的检测	148
第二节 改性沥青 SMA 铺装材料检测	171
第三节 环氧沥青混凝土铺装材料检测	182
参考文献	194

## 第二篇 地基基础检测

第一章 地基承载力检测	199
第一节 浅平基的特点及设计原则	199
第二节 土及碎石地基承载力检测	200
第三节 荷载板试验	202
第四节 触探试验法	204
第二章 沉井下沉时的检测	209
第一节 沉井基础的特点	209
第二节 沉井侧面摩阻力检测	219
第三节 沉井正面阻力检测	221
第四节 沉井下沉现场检测实例	224

第三章 基桩检测	248
第一节 预制钢筋混凝土桩质量控制和检测	248
第二节 钻(挖)孔灌注桩质量控制和检测	263
第三节 基桩承载力检测	273
第四节 基桩负摩阻力检测	280
第五节 基桩承载力检测实例	281
第四章 基桩承载能力自平衡测试	291
第一节 自平衡测试法的基本原理及其优越性	292
第二节 加载系统	294
第三节 测试、采集系统	298
第四节 自平衡测试方法	302
第五节 单桩极限承载力的确定	304
第六节 自平衡测试相关计算指标及试验	311
第七节 现场对比试验	313
第八节 实例	318
第五章 管柱检测	326
第一节 管柱基础的几个问题	326
第二节 管柱振动因素分析	327
第三节 管柱振动下沉时的应力检测	330
第四节 管柱钻孔岩石承载力检测	332
第六章 地下连续墙深基坑施工监测	343
第一节 监测目的、项目及监测设计	343
第二节 监测测试方法和施工监控	345
第三节 实例	354
第七章 深水钻孔桩钢护筒和海洋超长钢管桩施工检测	374
第一节 深水钻孔桩钢护筒施工检测	374
第二节 海洋超长钢管桩施工测试	381
第八章 钢吊箱施工安全监测和承台大体积混凝土温控检测	387
第一节 钢吊箱施工安全监测	387
第二节 承台大体积混凝土温控检测	399
参考文献	408

### 第三篇 上部结构检测

第一章 桥梁钢结构	411
第一节 钢桥制造概述及质量控制基础	411
第二节 钢桥制造和架设的质量控制	420
第三节 斜拉桥及悬索桥钢箱梁制造与安装	438
第四节 钢管拱制造质量与吊装检测	458
第五节 高强度螺栓制造质量与施拧检测	477
第六节 钢桥连接的疲劳试验实例	490
第七节 桁梁整体节点模型试验实例	494



<b>第二章 钢筋混凝土结构检测</b> .....	506
第一节 预制混凝土结构检测.....	506
第二节 现浇混凝土结构检测.....	514
第三节 钢筋混凝土结构的其他性能检测.....	523
<b>第三章 预应力钢筋混凝土结构检测</b> .....	545
第一节 预应力张拉锚固体系.....	546
第二节 桥梁预应力锚具、夹具和连接器检测.....	559
第三节 张拉设备校验.....	571
第四节 张拉工艺和张拉力控制.....	574
第五节 成品梁试验.....	580
<b>第四章 钢管混凝土拱桥检测</b> .....	586
第一节 钢管混凝土拱桥设计及试验检测.....	586
第二节 钢管混凝土拱桥施工检测.....	597
第三节 钢管混凝土拱桥静动载试验检测.....	609
<b>第五章 斜拉桥检测</b> .....	623
第一节 斜拉桥的组成和结构特点.....	623
第二节 斜拉索的检测.....	624
第三节 斜拉桥施工过程中塔梁的检测.....	644
第四节 斜拉桥的施工控制.....	650
<b>第六章 悬索桥检测</b> .....	666
第一节 悬索桥的组成和结构特点.....	666
第二节 主缆制造与安装.....	668
第三节 吊索制造与安装.....	690
第四节 锚碇建筑质量控制.....	698
第五节 主鞍、散索鞍、索夹制造与安装.....	710
第六节 主塔的建造和质量控制.....	719
第七节 钢加劲梁制造和安装质量检测.....	719
第八节 悬索桥的施工控制.....	719
<b>第七章 支座与伸缩装置检测</b> .....	726
第一节 支座的检测.....	726
第二节 伸缩装置检测.....	743
<b>第八章 桥面及有关设施检测</b> .....	751
第一节 桥面铺装检测.....	751
第二节 有关设施检测.....	779
<b>第九章 成桥检测</b> .....	783
第一节 静载试验.....	783
第二节 动载和运营荷载试验.....	796
第三节 成桥检测实例.....	803
<b>第十章 旧桥检测与评估</b> .....	812
第一节 检测与评估的意义.....	812
第二节 检查、检测及其分类.....	813
第三节 检测与评估的内容和方法.....	814
第四节 检测与评估的依据以及应提交的成果.....	822

第五节 旧桥检测与评估实例——杭州钱塘江大桥检测与评估	826
第六节 关于剩余寿命的评估	854
<b>第十一章 桥梁健康监测</b>	871
第一节 桥梁健康监测的意义及其系统设计	873
第二节 桥梁健康监测系统	875
第三节 桥梁健康监测系统实例简介	906
<b>参考文献</b>	920

## 第四篇 桥梁检测主要元件、仪器设备及检测技术

<b>第一章 机械式仪表</b>	927
第一节 位移计	927
第二节 手持式引伸仪	931
第三节 水准管式倾角仪	933
<b>第二章 电子仪器</b>	934
第一节 电子位移计	934
第二节 光电挠度计	936
第三节 全站仪	941
第四节 超声波传感器	948
第五节 其他电子仪器	955
<b>第三章 电阻应变片及电阻应变仪</b>	961
第一节 电阻应变片的种类及其选择	961
第二节 电阻应变片的贴片技术	962
第三节 电阻应变仪的原理	964
第四节 电阻应变仪的种类及其选择	967
第五节 电阻应变片的特性和温度补偿	970
第六节 电阻应变片的布置与应变测点的布置	973
第七节 电阻应变仪的操作	977
<b>第四章 电阻应变式传感器</b>	978
第一节 应变式测力传感器	978
第二节 应变式位移传感器	979
第三节 差动式应变计和土压力计	981
<b>第五章 动力检测仪器</b>	984
第一节 振动传感器概述	984
第二节 电动式传感器	986
第三节 压电晶体传感器	992
第四节 常用记录与分析仪器	997
<b>第六章 钢弦式传感器及其接收仪</b>	1001
第一节 工作原理	1001
第二节 类型及型号	1002
第三节 基本构造和使用方法	1005
<b>第七章 测温元件及其接收仪</b>	1006

第一节	元件类型与工作原理 .....	1006
第二节	感温元件的结构及标定 .....	1010
第三节	使用方法 .....	1014
<b>第八章</b>	<b>光导纤维传感器和全球定位系统(GPS) .....</b>	<b>1016</b>
第一节	光导纤维传感器 .....	1016
第二节	全球定位系统(GPS) .....	1027
<b>第九章</b>	<b>桥梁工程检测单位主要仪器设备 .....</b>	<b>1036</b>
第一节	桥梁工程检测单位常用的仪器设备 .....	1036
第二节	桥梁工程检测单位的新型仪器设备 .....	1039
<b>第十章</b>	<b>桥梁工程检测技术 .....</b>	<b>1053</b>
第一节	检测技术基础 .....	1053
第二节	检测资料的整编与分析 .....	1058
第三节	自动化检测技术和智能系统 .....	1064
<b>参考文献</b>	.....	<b>1070</b>
<b>附录 A</b>	<b>汕头海湾大桥成桥后历次检测主要数据摘要及结论 .....</b>	<b>1071</b>

第一章 钢材力学性能测试  
第二章 水泥及混凝土的检测  
第三章 新材料的检测

# 第一章 钢材力学性能测试

## 第一节 桥梁用钢标准、化学成分和力学性能要求

### 一、钢材性能的基础知识

#### 1. 铁碳合金状态图

先解释几个名词：

- 组元：组成合金的元素和稳定化合物称组元。
- 晶格：金属原子均依一定规律排列，称空间格子或晶格。
- 体心立方晶格：此种晶格，立方体八个角和立方体中心各有一原子，如 $\alpha$ 铁。
- 面心立方晶格：立方体八个角和六个面的中心各有一个原子，如 $\gamma$ 铁。
- 固溶体：组成合金的组元之一溶解在另一组元晶格中的合金，称固溶体。

生铁与钢都是铁和碳的合金。含碳大于2%的称为生铁，小于2%的称为钢。为了对生铁的内部组织构造及其变化有比较完整的概念，以便更好地利用它们，并且为制订热处理、焊接等打下基础，必须首先研究铁碳合金。

铁碳状态图如图1-1-1所示，而只是含碳在6.67%以下的部分，这是因为，在实际生产中含碳高于6.67%的合金，而且Fe<sub>3</sub>C中的含碳量恰好是6.67%。此处将要研究的铁碳状态实际上就是图1-1-1中A~G部分。

(1) 铁素体：根据铁的同素异晶转变可知，在910℃以下是呈体心立方晶格的 $\alpha$ 铁，在910~1390℃之间是呈面心立方晶格的 $\gamma$ 铁。碳能溶于 $\alpha$ 铁中形成固溶体，称铁素体。但碳在 $\alpha$ 铁中的溶解度很小，在725℃时，最大溶解度为0.02%，在室温时只有0.008%。因此，铁素体的性质与纯铁相差不多(HB=80,  $\delta=50\%$ )。

(2) 奥氏体：碳也能溶解于 $\gamma$ 铁而形成固溶体，称为奥氏体。碳在 $\gamma$ 铁中的最大溶解度为2% (1390℃)。奥氏体为高温组织，无磁性，塑性很好(HB=160~200,  $\delta=40\%~50\%$ )。

(3) 渗碳体：铁与碳的化合物(Fe<sub>3</sub>C)称为渗碳体，共熔点大约为1550℃，硬度极高(HB=800)，塑性极低( $\delta=0\%$ )。

(4) 珠光体：铁素体与渗碳体组成的共析体，即一种固相同时析出两种新的固相形成机械混合物(共析反应)。

(5) 莱氏体：奥氏体和渗碳体组成共晶体，即一种液相同时结晶出两种固相形成的机械混合物(共晶反应)。

#### 2. 铁碳状态图分析

如图1-1-1, A点(1535℃)为纯铁的熔点, D点(1550℃)为Fe<sub>3</sub>C的熔点, G点(910℃)为纯铁 $\alpha \rightarrow \gamma$ 的同素异晶转变温度, E点为1390℃时碳在 $\gamma$ 铁中的最大溶解度(2.0%), C点为共晶点。图中左上角的部分, 在实际应用中意义不大, 为了简便起见, 将这部分省略而集中为一点A。简化

### 第一章 钢材力学性能测试

### 第二章 水泥及混凝土的检测

### 第三章 新材料的检测





# 第一章 钢材力学性能测试

## 第一节 桥梁用钢标准、化学成分和力学性能要求

### 一、钢材性能的基础知识

#### 1. 铁碳合金状态图

先解释几个名词：

- 组元：组成合金的元素和稳定化合物称组元。
- 晶格：金属原子均依一定规律排列，称空间格子或晶格。
- 体心立方晶格：此种晶格，立方体八个角和立方体中心各有一原子，如 $\alpha$ 铁。
- 面心立方晶格：立方体八个角和六个面的中心各有一个原子，如 $\gamma$ 铁。
- 固溶体：组成合金的各组元，在凝固后，仍保持相互溶解的状态，则形成固溶体。

生铁与钢都是铁和碳的合金。含碳大于2%的称为生铁，小于2%的称为钢。为了对生铁与钢的内部组织构造及其变化有比较完整的概念，以便更好地利用它们，并且为制订热处理、焊接等工艺规程打下基础，必须首先研究铁碳合金状态图。

铁碳状态图如图1-1-1所示。该图并不是一张完整的状态图，而只是含碳在6.67%以下的部分，这是因为，在实际生产中含碳高于5%的合金没有实用价值，而且 $\text{Fe}_3\text{C}$ 中的含碳量恰好是6.67%。此处将要研究的铁碳状态实际上是 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 的状态图。

(1) 铁素体：根据铁的同素异晶转变可知，在 $910^\circ\text{C}$ 以下是呈体心立方晶格的 $\alpha$ 铁，在 $910\sim 1390^\circ\text{C}$ 之间是呈面心立方晶格的 $\gamma$ 铁。碳能溶于 $\alpha$ 铁中形成固溶体，称铁素体。但碳在 $\alpha$ 铁中的溶解度极小，在 $725^\circ\text{C}$ 时，最大溶解度为0.02%，在室温时只有0.008%。因此，铁素体的性质与纯铁相差不大( $\text{HB}=80, \delta=50\%$ )。

(2) 奥氏体：碳也能溶解于 $\gamma$ 铁而形成固溶体，称为奥氏体。碳在 $\gamma$ 铁中的最大溶解度为2% ( $1130^\circ\text{C}$ )。奥氏体为高温组织，无磁性，塑性很好( $\text{HB}=160\sim 200, \delta=40\%\sim 50\%$ )。

(3) 渗碳体：铁与碳的化合物( $\text{Fe}_3\text{C}$ )称为渗碳体，共熔点大约为 $1550^\circ\text{C}$ ，硬度极高( $\text{HB}=800$ )，塑性极低( $\delta\approx 0\%$ )。

(4) 珠光体：铁素体与渗碳体组成的共析体，即一种固相同时析出两种新的固相形成机械混合物(共析反应)。

(5) 莱氏体：奥氏体和渗碳体组成共晶体，即一种液相同时结晶出两种固相形成的机械混合物(共晶反应)。

#### 2. 铁碳状态图分析

如图1-1-1, A点( $1535^\circ\text{C}$ )为纯铁的熔点, D点( $1550^\circ\text{C}$ )为 $\text{Fe}_3\text{C}$ 的熔点, G点( $910^\circ\text{C}$ )为纯铁 $\alpha\leftrightarrow\gamma$ 的同素异晶转变温度, E点为 $1130^\circ\text{C}$ 时碳在 $\gamma$ 铁中的最大溶解度(2.0%), C点为共晶点。

图中左上角的部分,在实际应用中意义不大,为了简便起见,将这部分省略而集中为一点A。简化

后,液相线为  $ACD$ ,固相线为  $AECF$ 。沿液相线  $AC$  由液体中结晶出奥氏体;而沿液相线  $CD$ ,则结晶出渗碳体。在温度  $1130^{\circ}\text{C}$ ,碳的含量为  $4.3\%$ ( $C$ 点的含碳量)时,将从液体中同时结晶出奥氏体和渗碳体而形成共晶体,这种共晶体称为莱氏体,它是机械混合物(奥氏体+渗碳体)。

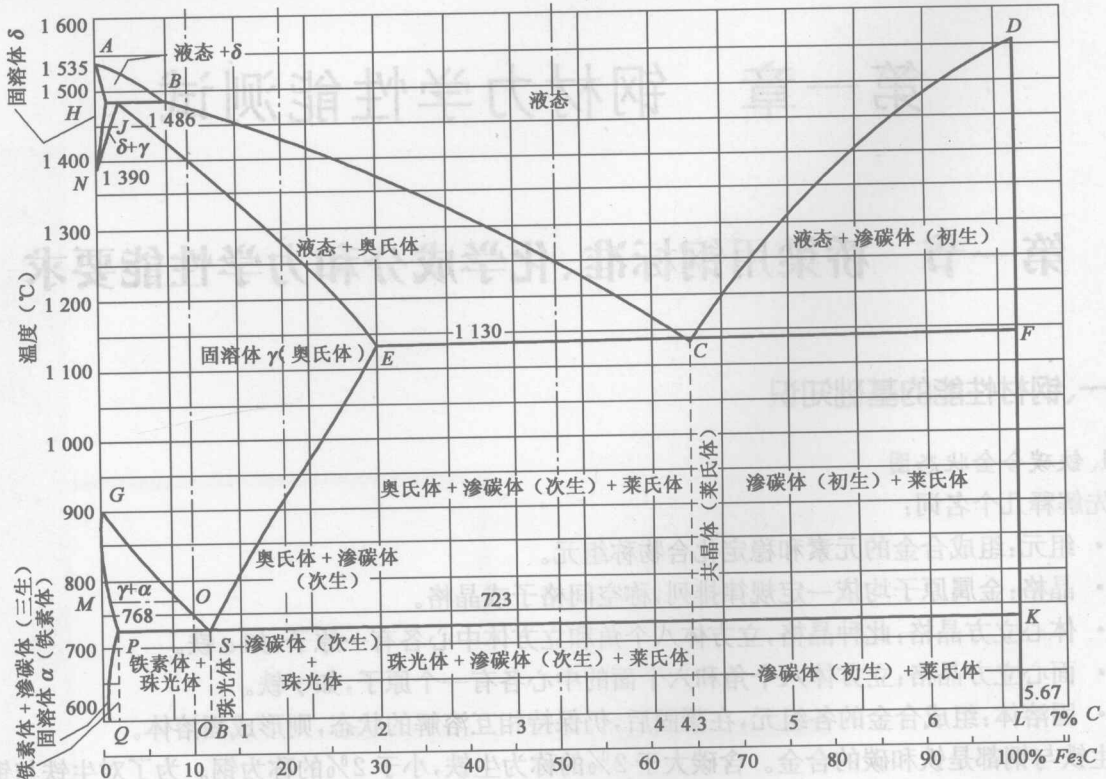


图 1-1-1 铁碳合金状态图

我们感兴趣的是含碳量  $1\%$  及以下部分。含碳量为  $1\%$  的钢,当温度达到  $t_1$  时便开始结晶,此时由液体中开始结晶出奥氏体(固溶体)。随着温度的下降,奥氏体增多,而奥氏体与液体的成分各沿着固相线( $AE$ )和液相线( $AC$ )变化。如在温度  $t_2$  时,奥氏体的成分由  $a$  点确定,液体的成分由  $b$  点确定。当温度降到  $t_3$  时合金全部凝固。此时合金组织仅由奥氏体所组成。

现在来研究一下在固态下所发生的转变(二次结晶,为铁碳状态图的左下部分)。铁碳合金中所发生的二次结晶是由于  $\gamma$  铁在冷却时转变成  $\alpha$  铁,从而使奥氏体发生分解。这种分解是在温度为  $723^{\circ}\text{C}$ ,含碳量  $0.8\%$  的条件下,即在  $S$  点时产生的。奥氏体分解后形成了铁素体与渗碳体的机械混合物(如层片状结构)——珠光体。

含碳量低于  $0.8\%$  的钢(亚共析钢)在温度高于  $GS$  时呈单相组织——奥氏体。 $GS$  线相应于奥氏体开始析出铁素体的温度,通常以  $A_3$  表示。因此自  $GS$  线上的温度  $t_4$ ,便有铁素体自奥氏体中析出,因而在  $GS$  线以下,合金呈二相组织——奥氏体+铁素体。所有成分的铁碳合金(钢和生铁)中的奥氏体冷却到  $PSK$  线( $723^{\circ}\text{C}$ )时,都分解成珠光体。 $PSK$  线通常称  $A_1$  线。应当指出,上述的  $A_1$  与  $A_3$  等都是平衡状态下的临界点,而在实际的冷却条件下,总有过冷(加热时转变也有滞后现象),因而实际的临界点(不平衡状态)就与状态图中(平衡状态)有所不同。为了区别起见,把冷却时的临界点加上注脚“ $r$ ”,把加热时的临界点加上注脚“ $c$ ”,如冷却时奥氏体分解为珠光体的温度称  $A_{r1}$ ,加热时珠光体转变成奥氏体的温度称  $A_{c1}$ 。同理,冷却时从奥氏体析出铁素体的开始温度称  $A_{r3}$ ,加热时铁素体溶入奥氏体的终了温度称  $A_{c3}$ 。

### 3. 钢加热时的相变

钢常温下平衡状态时具有铁素体和珠光体的组织(亚共析钢)、珠光体组织(共析钢)或珠光体和渗碳体的组织(过共析钢)。当将这样的组织加热时,将发生遵循于铁碳状态图的相变。为说明这个相变

过程,可以共析钢为例,当它被加热至  $A_{c1}$  温度时,在渗碳体及铁素体片层的相界面上将形成奥氏体的晶核,随着温度的升高及时间的延续,这些晶核逐渐长大形成一个一个的奥氏体晶粒,直到将所有珠光体组织取代完了为止。这样就得到了在  $A_{c1}$  温度以上高温状态的奥氏体组织。

由此可见,这个相变过程虽然是在固态下进行的,但它与液体金属的结晶过程相似,也包含有晶核的形成及长大,因此有时将此过程称为重结晶过程。

当加热温度超过相变温度不多时,形成的新的奥氏体晶粒总是很细小的,但如果进一步提高加热温度或保温时间过长,则将发生奥氏体晶粒的相互吞并长大。因此加热温度超过相变温度愈多,则得到的奥氏体晶粒亦愈大。

只要控制加热温度略超过相变温度,则将得到细小的奥氏体晶粒,如果自这样的状态进行冷却,则不论其加热前原始组织的晶粒是多么粗大,都将获得性能较好的细晶粒珠光体组织,这就是重结晶退火细化晶粒的原理。

#### 4. 钢冷却时的相变

仍以共析钢为例,大家知道,当自高温奥氏体状态缓慢冷却至  $A_{c1}$  温度时,奥氏体将分解为珠光体。这个相变过程也包含结晶核心的形成及长大。首先沿奥氏体晶界形成珠光体晶核,然后长大,直到奥氏体完全消失。

形成的珠光体是层片状渗碳体及铁素体的机械混合物,它是在缓慢的冷却速度下形成的,因而相变过程是遵循铁碳状态图进行的,所得组织是平衡组织。

如果自高温奥氏体状态进行较快的冷却,则由于条件不同,相变过程也将与状态图所示情况相脱离。所得产物将属于不平衡组织。当冷却速度很快时,奥氏体分解过程甚至受到某种抑制,以至于得到完全不同的相变过程。

图 1-1-2 所示为共析钢在各种不同冷却速度下奥氏体分解温度的变化及分解产物的名称。以低于  $v_1$  的速度缓慢冷却时,过冷度较小, $A_{c1}$  点降低不多,奥氏体分解形成珠光体。当以  $v_1 \sim v_2$  之间的速度进行冷却时,由于过冷度增大,奥氏体将在较低的温度分解,得到较细的产物(铁素体及渗碳体的片层较薄、较短),强度、硬度也较通常的珠光体高(HB250~300),称为索氏体。当以  $v_2 \sim v_3$  之间的速度冷却时,奥氏体分解温度更低,分解产物的组织更细,其强度、硬度更高(HB350~400),称为屈氏体(Troostite,也有译为托氏体)。

索氏体与屈氏体都是铁素体与渗碳体的机械混合物,和珠光体无本质上的差别,只是由于它们是在较快的冷却速度下形成的,故组织较细。

当以  $v_3 \sim v_4$  之间的速度冷却时,此时由于冷却速度更快,奥氏体来不及完全分解,只是其中的一部分分解形成屈氏体,而另一部分则只发生  $\gamma \rightarrow \alpha$  的晶格转变而渗碳体来不及析出,结果形成了碳在  $\alpha$  铁中的过饱和固溶体,通常称为马氏体。马氏体的形成是在显著低于  $A_{c1}$  的另一个临界点  $M$  下发生的,因此在  $v_3 \sim v_4$  的范围内临界点也分裂为两个。

继续提高冷却速度至  $v_4$  以上时,奥氏体全部趋向马氏体转变,此时  $A_{c1}$  点消失。

马氏体是钢淬火后的基本组织,它与珠光体、索氏体及屈氏体完全不同。其显微组织具有针状特征,具有很高的硬度(HB $\approx$ 680)和较大的脆性。奥氏体转变为马氏体是在一定的温度范围内进行的。图 1-1-2 中  $M$  线是马氏体开始转变的温度,而其转变终了的温度则还要更低一些。从  $M$  线起温度降得愈低,形成的马氏体数量也愈多,但即使冷却至马氏体转变终了的温度也还或多或少会保留一部分残余奥氏体,也就是说马氏体转变是不可能进行得很完全的。马氏体转变的开始温度及终了温度决定于钢的化学成分,不依冷却速度而改变。

钢中保证奥氏体完全趋向马氏体转变的最低冷却温度(图 1-1-2 中的  $v_4$ )称为临界淬火速度。不同

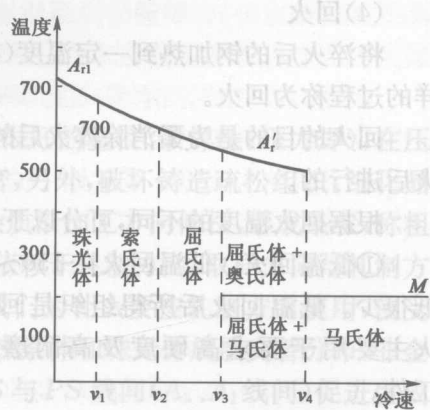


图 1-1-2 奥氏体转换—冷却速度的关系



化学成分的钢，具有不同的临界冷却速度。

5. 钢的正火、淬火、回火和再结晶退火

(1) 正火

将钢加热至  $A_{c3}$  以上  $30\sim 50^\circ\text{C}$ ，保温一定时间后，在空气中冷却，这一过程称为正火。其冷却速度介于淬火及退火之间，所得组织是片状的索氏体组织。尤其对于微合金化的钢，获得细化晶粒，增加韧性，优化钢的综合性能。

正火是一种方便而经济的热处理工序。通常对于低碳钢工件可用正火来代替重结晶退火。

(2) 重结晶退火

将工件加热到相变温度以上，通常亚共析钢的加热温度为  $A_{c3}$  以上  $20\sim 30^\circ\text{C}$ 。此时形成的奥氏体具有细小的晶粒尺寸。工件在该温度保温一段时间，然后缓慢地冷却下来，冷却速度一般不应大于  $50\sim 100^\circ\text{C}/\text{h}$ ，通常是随炉冷却。

重结晶退火的目的就在于细化晶粒，消除内应力以及使金属硬度降低以利于切削加工等。

(3) 淬火

淬火是将钢加热到  $A_{c3}$  以上  $30\sim 50^\circ\text{C}$  的温度，在该温度下保持一段时间，然后以大于临界淬火速度的冷却速度急速冷却。淬火后形成马氏体及少量残余奥氏体。

淬火时为了得到足够的冷却速度，必须选择适当的淬火剂。水是最便宜而冷却能力又较强的一种淬火剂，常用于碳素钢工件的淬火。当水中溶有少量的盐类时，还可显著地改善其淬火的能力。油也是应用很广的淬火剂，但其冷却能力较水低，常用于合金钢工件或小的碳素钢工件的淬火。淬火时冷却速度很快，因而会在材料内部造成很大的内应力。对塑性好的金属来说，内应力可以引起塑性变形，从而使一部分内应力得到解除；而对脆性金属来说，当内应力超过它们的强度极限时，就会产生裂纹。

(4) 回火

将淬火后的钢加热到一定温度（在临界点  $A_{c1}$  以下），在该温度下停留一定时间，然后加以冷却。这样的过程称为回火。

回火的目的是为了消除淬火后的内应力、提高钢的韧性和适当降低钢的硬度。回火总是紧接在淬火后进行的。

根据回火温度的不同，可分以下三种方式：

① 低温回火 低温回火在  $150\sim 250^\circ\text{C}$  时进行。主要是为了减小内应力，提高冲击韧性，而硬度降低很少。低温回火后所得组织是回火马氏体。这种回火主要用于要求高硬度及高耐磨性的刀具、量具等工件。

② 中温回火 中温回火在  $300\sim 450^\circ\text{C}$  时进行，所得组织为回火屈氏体。此时内应力大部分消除，硬度下降一些，韧性提高。弹簧、锻模等工件常进行淬火及中温回火。

③ 高温回火 高温回火在  $500\sim 650^\circ\text{C}$  时进行，所得组织为回火索氏体。此时内应力完全消除，韧性进一步提高，硬度又下降一些。高温回火后材料具有良好的综合机械性能，即其强度、硬度、冲击韧性等指标都不差，因此许多重要的机器零件，如轴、齿轮等先进行淬火，然后进行回火。淬火后加高温回火，总称调质处理。

6. 钢的焊接

焊接是利用局部加热的方法，使被焊件在连接处达到熔化状态，相互融合并冷却凝固而连接成整体。图 1-1-3 示出焊缝区域划分和相应温度范围，将其和铁碳

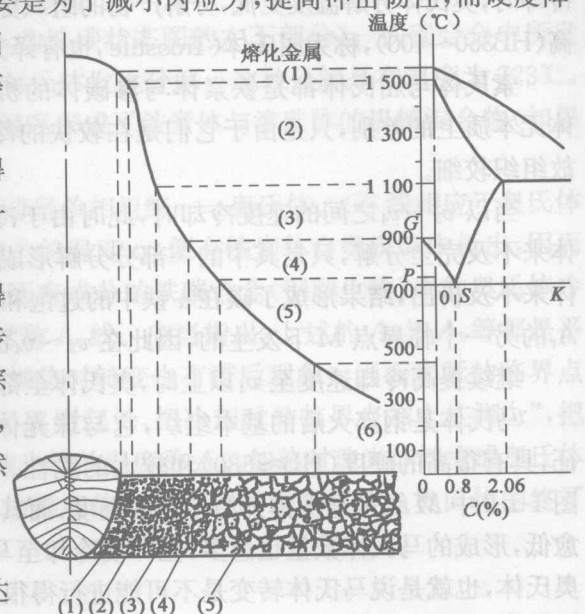


图 1-1-3 焊接时冶金作用示意图