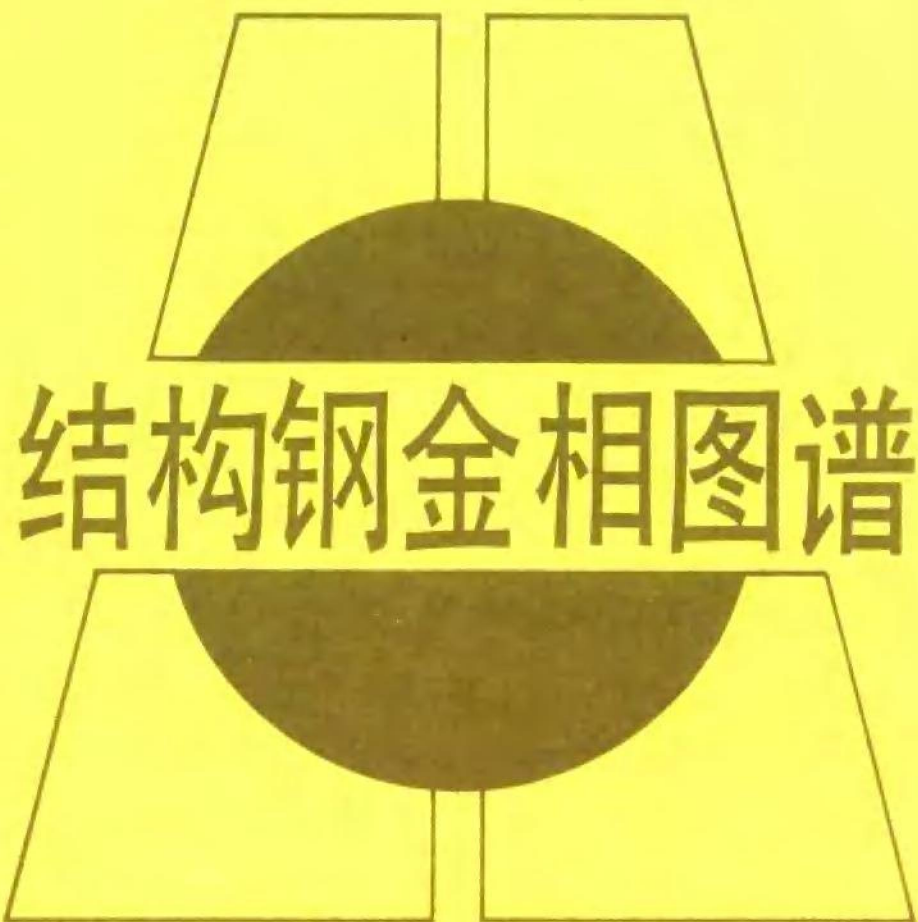




JIEGOU GANG JIN XIANG
TU PU

机械工业出版社

结 构 钢 金 相 图 谱

机械工业部上海材料研究所 编著



机 械 工 业 出 版 社

本图谱包括三十余种主要结构钢经不同热处理后的光学显微镜和部分电子显微镜图片，共 300 余幅。主要是对各种显微组织特征进行描述和诠释。书中还介绍了结构钢加工缺陷特征、主要金相检验方法及主要侵蚀剂、电解抛光试剂。

本图谱可供有关工厂、科研机构及大专院校从事金属学、金相热处理工作的人员参考。

结构钢金相图谱

机械工业部上海材料研究所 编著

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $9\frac{3}{4}$ · 插页 2 · 字数 232 千字

1985 年 10 月北京第一版 · 1985 年 11 月北京第一次印刷

印数 0,001—5,170 · 定价 6.15 元

*

统一书号: 15033 · 5846

前 言

金属材料的各种性能特别是机械性能，与材料的显微组织有关。结构钢在机械工业中的应用量大面广，而且其使用性能主要指机械性能，所以对其进行显微组织检查尤属必要。然而目前有关这方面的检查方法和组织图例仍缺乏系统的介绍。本图谱即是为满足这一需要而进行编制的。

图谱选择了有代表性的常用钢号，叙述了概况。对每一种钢号，首先介绍其在各种组织情况下的物理机械性能数据，再叙述其热处理特点和应用范围。然后对通过典型或非典型的热处理工艺所得到的不同组织图片进行诠释，并对其中有代表性的一部分附以电子显微镜图片，主要是马氏体和贝氏体形貌特征。书中还介绍了与结构钢金相检验有关的常见加工缺陷特征、检验方法和常用侵蚀剂、电解抛光剂。

本图谱在编制过程中得到上海锅炉厂、上钢五厂、上海中国弹簧厂、上海木螺钉一厂、沈阳重型机器厂、沈阳第二机床厂、大连红旗造船厂、哈尔滨锅炉厂、哈尔滨汽轮机厂、南京汽车制造厂、江西拖拉机厂、无锡动力机厂等单位的大力协助，在此表示谢意。参加本图谱编制工作的有：李晋、任金城、舒文芬、张月英、陈金宝、李炯辉、刘长春、强明道等同志；本图谱经桂立丰、唐汝钧二同志审阅。

目 录

前言

一、概述	1
二、结构钢的牌号及应用举例	1
三、合金元素在结构钢中的作用	3
四、结构钢的组织	4
1. 结构钢的基本组织	4
2. 结构钢加工后组织	6
五、结构钢常见缺陷特征	8
1. 铸钢中缺陷	8
2. 锻造缺陷	8
3. 焊接缺陷	8
4. 热处理缺陷	9
5. 冷加工所引起的缺陷	9
六、结构钢的金相检验	9
1. 取样及常用试验方法	9
2. 结构钢常用化学侵蚀剂和电解抛光试 剂	10
七、金相图谱	13
08F 钢组织	14
20 钢组织	16
25 钢、35 钢组织	30
45 钢组织	32
50 钢组织	38
20MnMoB 钢组织	40
25MnVCu 铸钢组织	40
16Mn、20MnMoNb 钢组织	42
12CrMoV 钢与 20MnMoNb 钢手工焊接	

头组织	44
20Mn 2 钢组织	46
40Cr 钢组织	56
45Cr 钢组织	60
50B 钢组织	62
硼化物的形态	66
30SiMn 钢组织	68
30CrMnSi 钢组织	72
37SiMnMoV 钢组织	78
35CrMo 钢组织	80
34CrMo、34CrMoV、38CrMoAl 钢组织	84
34CrNi 3 Mo 和 40CrNiMoA 钢组织	86
12CrMoV 钢组织	88
14MnMoVB 钢焊接组织	94
15MnV 钢组织	96
15MnVB 钢组织	100
16Mn 钢焊接组织	102
1Cr18Ni9Ti 钢与 18MnMoNb 钢角焊缝组织	110
60Si 2 MnA 钢石墨含量	112
弹簧钢中珠光体形态参考图	114
50CrV 钢组织	116
60Si 2 MnA 钢组织	122
65Si 2 MnWA 钢组织	132
65Mn 钢组织	134
70Si 3 MnA 钢组织	136
结构钢中常见缺陷组织	142

一、概 述

机械制造用结构钢通常包括碳素结构钢、合金结构钢、低合金高强度钢和弹簧钢等。用于支承载荷或抵抗作用于结构上的力,如建筑、桥梁、塔型建筑等建造用结构钢,用于表面化学热处理工艺部分的主要钢种,均有专门图谱叙述,此图谱不多加列举。

由于机械零件所用的钢种、工艺较为复杂,此处仅选择一般钢种和常用工艺以及常见的显微组织加以叙述。这些结构钢通常都属于亚共析范畴;如果从正火后的显微组织上来看,它们是珠光体型和贝氏体型钢。

了解结构钢的组织形态(包括锻造、焊接、热处理等状态下的显微组织),并将其与实际生产工艺相联系,这对于广大从事生产和检验的人员是很必要的。

光学金相学的发展使人们开始了对金属和合金的组织与性能之间关系的研究,而电子显微镜的应用更扩大了这种研究的范围。本图谱以光学金相方法为主,电子金相方法为辅。大部分电子显微镜照片是采用二次覆膜法制备试样的,通过电子显微镜观察,可对结构钢显微组织的纤细部分作进一步的研究和分析。

二、结构钢的牌号及应用举例

1. 碳素结构钢(或称普碳钢)

可分为易切削结构钢和优质结构钢两种。它们的标准化学成分见 YB 191-63 和 GB 669-65。按技术条件的要求,这类钢必须保证钢的化学成分、机械性能合格。钢中硫、磷及非金属夹杂物的含量应比较少,塑性韧性比较优良。其特点是热加工性能好,回火脆性倾向不大,但其淬透性、热稳定性比较差。主要牌号及应用举例如表 1 所列。

表 1 碳素结构钢主要牌号、特点及应用

牌 号	特 点	用 途
10 钢	抗拉及屈服强度较低,塑性及韧性较高,在冷态下有很好的塑性,宜于冷冲拉模压成形。焊接及切削性均良好	卡头、垫圈、铆钉等
20 钢	强度高于 10 钢、15 钢,焊接和切削性良好,无回火脆性,常用作受力不大、而要求韧性良好的零件	轴套、螺钉、拉杆、起重钩等,或压力小于 60 大气压、温度低于 450℃ 的非腐蚀介质中使用的管子、导管等
40 钢	具有较高的强度,加工性能良好,冷变形时塑性中等,并能进行焊接,但焊前需经 150℃ 预热	用于机械运动零件:轴、轴、曲轴、曲柄销、传动轴、活塞杆、连杆圆盘等
45 钢	通常用做调质件,加工性良好,能焊接,但焊前要预热,焊后退火	透平机的叶轮,压缩机曲柄,泵的运动零件,轴、齿轮、曲轴,活塞销(需进行表面热处理)
50 钢	属于高强度中碳优质结构钢,切削性中等,焊接性较差,冷变形时塑性低	用于做耐磨性要求高,动载荷及冲击作用不大的零件,锻造齿轮、轴、摩擦盘,次要的弹簧,农机犁铧,重载齿轮、心轴等

2. 合金结构钢

按 YB 6-59, 我国结构钢系列以铬、硅、锰、钛、硼等为主要合金化元素。经过调质处理后, 使其得到综合机械性能良好的索氏体、贝氏体或细珠光体组织, 屈服比可达到 0.85。这类结构钢淬透性都较好。主要牌号及应用举例如表 2 所列。

表 2 合金结构钢主要牌号及应用

钢 号	特 点	用 途
20MnV 钢	韧性、强度均比 20Mn2 钢好, 因含钒 0.07~0.12%, 减少了晶粒长大倾向	用于制造锅炉、高压容器、大型高压管道
30CrMnSi 钢	经淬火回火后具有很高的强度和韧性, 切削性及焊接性良好, 冷变形塑性良好	用于制造重要零件, 如高压鼓风机叶片、钢板, 高速载荷的砂轮轴、齿轮、链轮、轴、离合器轴套、飞机起落架等
35SiMn 钢	具有高的强度和耐磨性、良好的韧性、耐疲劳性, 但焊接性差, 冷变形塑性中等, 切削性良好	用于制造中等速度、中等载荷或高载荷而冲击不大的零件, 如传动齿轮、轴、连杆、蜗杆、发电机轴、电车轴, 汽轮机中直径小于 250 毫米的主轴, 轮毂厚度小于 170 毫米的叶轮, 以及温度在 400°C 以下的重要紧固件等
35CrMo 钢	具有高的强度、韧性和淬透性, 高温下蠕变强度和持久强度都较高。焊接、冷变形塑性中等	用于高载荷下的重要零件, 特别是受冲击、震动、弯曲、扭曲载荷的零件, 如车轴、发动机转动轴、叶轮、曲轴、连杆, 以及石油工业中的穿孔器, 锅炉上用于制造 480°C 以下的螺栓, 510°C 以下的螺帽, 化工中 450~500 毫米厚的无缝高压管道等
40Mn2 钢	强度、塑性和耐磨性良好, 热处理工艺性好, 但焊接性能差, 冷变形塑性不高	用于高载荷下的零件, 如轴、半轴、曲轴、蜗杆、活塞杆、操作杆、连杆, 有载荷的螺栓、螺钉、加固环等
40MnB 钢	良好的韧性, 较高的强度	主要用于中、小型截面零件, 可代替 40Cr 钢
40Cr 钢	抗拉强度和屈服强度比 40 钢高 20%, 并具有良好的淬透性, 断面小于 50 毫米时油淬具有较高的疲劳强度, 调质后有良好的综合机械性能。切削加工性尚好, 冷变形性中等, 冷顶锻前最好要进行球化处理	多用于调质件, 如交变载荷下的零件, 中等转速、中等载荷零件, 耐磨性高而无很大冲击的工作, 如齿轮、套筒、轴、曲轴、销子、连杆、螺钉、螺帽及进气阀等

3. 低合金高强度钢

主要牌号见 YB 13-63, 此类钢的主要特点是具有高的强度、好的塑性、较低的冷脆倾向和时效敏感性, 良好的耐腐蚀性和焊接性能, 举例如下。

12CrMoV 钢 由于钢中含有 0.50% 以上铬, 0.40~0.55% 钼, 使钢具有较高的热强度和足够的热稳定性, 并消除了钢在中温时, 石墨化敏感性和空淬倾向。冷加工及焊接性良好, 焊后需进行局部消除应力退火, 壁厚者焊前应预热到 200~300°C。可制造温度达 510°C 以下的主汽管和管壁温度达 540°C 以下的过热器管和锻件。

15MnV 钢 是在 16Mn 钢基础上发展起来的新钢种, 其淬透性好, 多用于汽车拖拉机零件。

16Mn 钢 这种钢我国最早使用, 在热轧状态下就具有较高的强度和韧性, 有良好的焊

接性。此外还有较好的低温冲击韧性。一般轧成板材或型材使用，特别是用于中压容器和船体用材等。

4. 弹簧钢

按 YB 8-59，一般来说要求弹簧钢的屈强比高，弹性极限高和疲劳强度高。从工艺上要求有一定的淬透性，过热敏感性小，塑性好，容易热成形。主要牌号及应用举例如表 3 所列。

表 3 弹簧钢主要牌号及用途

钢 号	特 点	用 途
70 钢	强度及弹性较 65 钢高，其他性能与 65 钢相近，但淬透性较低，大于 $\phi 15$ 的钢丝不能全部淬透	制造截面较小的弹簧，如扁、圆弹簧、链轮圈等
50CrV 钢	淬火回火后具有较好的韧性，高的比例极限和强度极限，淬透性高，过热敏感性小，切削加工性好，冷变形塑性低	制造承受大应力的各种尺寸的螺旋弹簧，也可用做大截面的及在 400℃ 以下工作的重要零件，如发动机气门弹簧、车柄弹簧、扭杆弹簧等
60Si2Mn 钢	强度、弹性极限和屈强比都较高，但由于含硅量较高，故钢中夹杂物数量较多，表面易脱碳	用于制造铁道车轮，汽车、拖拉机上的板簧和螺旋弹簧，汽缸安全阀簧及止回阀簧。对于承受交变载荷及在高应力下工作的大型重要卷制弹簧和其他受剧烈磨损的零件
65Mn 钢	脱碳倾向小，但有过热敏感性和回火脆性，易产生淬火裂纹	制作各种规格的扁、圆弹簧，弹簧发条、座垫板簧、汽门簧，小于 7 毫米的冷拔钢丝，冷卷弹簧等

三、合金元素在结构钢中的作用

对于合金元素在钢中对相变的影响的认识，目前仍是不完全的，尤其是各种元素的综合作用，相互制约作用，了解的更不完整。但是，合金元素综合作用的结果是明显的。它们可以显著地改善钢的工艺性能，如淬透性、回火稳定性、切削性等。

碳是结构钢中最基本的元素。碳素结构钢的性能主要取决于碳在钢中的分布形式和碳化物形态等。钢的强度随碳量的增加而增加；塑性和韧性随着含碳量的增加而下降。

各种合金元素在钢中有两种表现形式。

1. 形成合金化合物，以提高钢的某些性能，满足使用上的需要。按形成碳化物的倾向不同可分为：

- (1) 不形成碳化物而只溶于铁素体或奥氏体中的有硅、铝、铜、镍、钴等；
- (2) 形成碳化物，在含碳量较少时才溶于铁素体或奥氏体的有钒、铌、铌、钛、钼、钨、铬等；

(3) 元素之间相互作用形成金属间化合物，如 FeSi 、 Fe_2W 、 Ni_3Al 、 Ni_3Ti 等。

2. 能和某些金属元素相结合的氧、氮等，形成钢中夹杂。磷、硫等一般称做有害元素，但仍可利用它以达到改善钢的某些性能的目的，如适当加入硫可以提高钢的切削加工性能。

还有一些元素，如铜、铅等在钢中以游离状态出现。

在奥氏体化过程中，奥氏体的形成与均匀化的全过程都和碳的扩散有关，而碳的扩散又与温度、合金元素有关。镍、钴是非碳化物形成元素，增加奥氏体形成速度。钒、钛、钨、钼

是强碳化物形成元素，它们与碳有较强的亲合力，妨碍了碳在钢中的扩散，减慢奥氏体化过程。由于这类碳化物稳定性各不相同，在一般的奥氏体化温度尚不能溶解，因此为了达到奥氏体均匀化，必需高温长时间保温。强碳化物形成元素亦可阻止晶粒长大，起细化晶粒的作用，其中，钛、钒、铌、锆作用强烈；钨、钼、铬作用中等；而非碳化物形成元素，镍、硅、铜、钴阻止晶粒长大作用轻微，锰、磷有促使奥氏体晶粒长大倾向。铝对晶粒作用比较复杂，当钢中含铝0.02~0.08%时，最有效地限制晶粒粗化，它在钢中与氮形成细小弥散的氮化铝，但在温度过高时反而使氮化铝发生聚合、溶解，而起到更坏的作用。

合金元素的加入降低了钢的临界冷却速度，提高淬透性。对珠光体转变的影响主要是：

(1) 除钴、铝外所有元素都不同程度地延缓珠光体转变，其中钼的作用最显著，钨、铬、锰次之，非碳化物形成元素较弱，钴有加速作用，铝的作用尚未确定；(2) 强碳化物形成元素的碳化物稳定，在奥氏体化不能充分溶解时，成为珠光体转变时的核，从而加速相变；(3) 数种合金元素同时存在时，对延缓珠光体转变的作用不是迭加的，而是迭乘的。在总合金量相同时，多元素低含量的效果远大于单元素高含量的效果；(4) 硼对珠光体的转变是改变晶界状态，使成核困难，从而延长转变的孕育期，但对晶核的长大无显著作用。

过冷奥氏体在中温相变时，由于过冷度较大，以致扩散更加缓慢，扩散距离短，它也包括了成核与长大过程，转变产物与母相奥氏体的某些惯习面保持一定关系，这就是贝氏体转变。由于合金元素有扩大（如锰、镍）或缩小（如钼、钨、钒）奥氏体相区的作用，结果，阻碍了碳的扩散，使贝氏体转变速度变慢，而扩大奥氏体相区的元素又能使奥氏体分解减慢，可推迟相变。

合金结构钢中常用元素（锰、钼、铬、镍、铜等）均有降低马氏体转变开始温度 M_s 点的作用，其中以锰的作用最强烈，而硅对 M_s 点没有影响，提高 M_s 点的元素是铝、钴。当然钢中多种合金元素的作用是复杂的，但总的规律是相互促进，可由下列经验公式表达：

$$M_s(^{\circ}C) = 538 - 317C(\%) - 33Mn(\%) - 28Cr(\%) - 17Ni(\%) - 11Si(\%) - 11Mo(\%) - 11W(\%)$$

四、结构钢的组织

结构钢根据用途不同，有它们自己的技术条件。有些技术条件已列入国家标准或冶金部颁标准，有关半成品或成品零件的质量标准，一般各厂可根据产品的要求不同而自行制定。

1. 结构钢的基本组织

铁素体 铁和其他合金元素形成的体心立方结构的固溶体。它具有两种结构，高于 A_4 点时称 δ 铁素体，高于 A_3 点和低于 A_1 点称 α 铁素体。一般所讲的铁素体是指碳或（和）其他合金元素在 α 铁中的固溶体。铁素体的性能与下述几点有关：

- (1) 晶粒的大小，晶粒愈大，铁素体的硬度和塑性愈低；
- (2) 嵌镶块尺寸（精细结构的尺寸）；
- (3) 固溶体成分的变化；
- (4) 热处理或塑性变形而引起的晶格的畸变。

合金元素在固溶后所起的作用各不相同，如镍能减小铁素体的冷脆性。硅能促使晶粒粗

化,并能提高比例极限,使铁素体滑移面数目减少。镍、铬、锰能显著地降低奥氏体 $\rightarrow\alpha$ 铁素体转变温度,促使实际上不含碳的铁中形成马氏体组织,并使硬度提高。钼、钨稍微降低 $\gamma\rightarrow\alpha$ 的转变温度。碳在 α 铁中最大溶解度为0.0218%,在钢中临界点以上冷却时,由于成分及冷却条件不同,一般可出现三种分布形态的铁素体,即等轴(块状)铁素体、网状铁素体和针状铁素体。

奥氏体 在Fe-C二元合金中铁和其他元素形成的面心立方结构的固溶体,最大固溶碳量为2.11%,固溶其他合金元素时形成固溶体。奥氏体是在高温下存在的组织,只有在高合金中奥氏体才能在室温下存在。在金相显微镜下观察时可观察到多边形晶粒,晶界平直,呈等轴晶粒,轮廓清晰,有明显的孪晶特征。结构钢中奥氏体多以残余奥氏体形式存在。

珠光体 铁素体和渗碳体片交替排列的混合组织。它是高温奥氏体冷却到727°C以下时共析反应的产物,含碳量为0.77%,也可以说是奥氏体等温转变曲线“鼻子”上部区域等温分解产物。等温温度越高,形成的片层越厚,硬度较低;反之,形成的片层愈薄,硬度越高。例如,在700°C等温形成粗片状珠光体(层片间距 $d>0.7\mu\text{m}$),硬度为HRC 15左右;650°C左右等温形成细珠光体(层片间距 $d\approx 0.25\mu\text{m}$),硬度为HRC 30左右,这种细珠光体中渗碳体细片在显微镜下能清晰地分辨。细珠光体又称淬火索氏体。在接近等温转变曲线鼻子尖附近等温形成极细片状珠光体(层片间距 $d\approx 0.1\mu\text{m}$),硬度为HRC 40左右,极细珠光体在显微镜下已很难分辨出其中的渗碳体片,只能看到团状黑色组织,这种组织有时和马氏体共存,它常分布于晶界处作网络的团状分布,极细珠光体又称为淬火屈氏体。

表4 钢中基本组织物理性能

物 理 性 质	奥 氏 体	铁 素 体	珠 光 体	碳 化 物	马 氏 体
比容 (cm^3/g)	0.123	0.127	0.129	0.130	0.127~0.131
密度 (g/cm^3)	8.130	7.864	7.778	7.670	7.864~7.633
线膨胀系数 ($\alpha\cdot 10^6$)	23.0	14.5	—	12.5	11.5
体膨胀系数 ($\beta\cdot 10^6$)	69.0	43.5	—	37.5	34.5

马氏体 是过冷奥氏体通过无扩散型相变而成的亚稳定相,它是碳在铁中的过饱和固溶体,具有体心立方结构或体心正方结构。在形态上通常分为条状(低碳、位错)马氏体和片状(高碳、孪晶)马氏体。

条状马氏体的特征 呈细长条状,同向生长,并平行排列成为一个集合体(区域、群、板块),在集合体之间存在着较大的位向差。一个奥氏体晶粒可以生成几个集合体,马氏体条的宽度为0.1~0.2 μm 之间,马氏体内具有密度很高的位错。这种马氏体多出现在低碳的碳素结构钢或合金结构钢中,故条状马氏体又可通称为低碳马氏体或位错马氏体。有人测定过条状马氏体含碳量达0.25%。

片状马氏体的特征 马氏体呈片状或竹叶状,针叶之间呈60°或120°角。在显微镜下常可看到针叶上有一条中脊线。在电子显微镜下这个中脊线的两侧存在很多孪晶。通常,在一个奥氏体晶粒中的第一片马氏体往往是分割整个晶粒。这种马氏体又叫孪晶马氏体。片状马氏体中含碳量有人测定约为1%,按我们最近试验结果,含碳量超过0.6%时,淬火后即可获得全部是片状的马氏体。

贝氏体 是奥氏体在低于珠光体转变温度和高于马氏体形成温度范围非共析相变的产物,呈铁素体和碳化物的非层状混合组织。按贝氏体形态的不同,一般可出现羽毛状贝氏体(上贝氏体)、针状贝氏体(下贝氏体)、无碳贝氏体和粒状贝氏体。

上贝氏体形成于贝氏体转变温度的上部,贝氏体常在奥氏体晶界上形成,然后向晶内生长,组织由不规则的针状铁素体和与铁素体针轴方向大致平行的杆状或粒状碳化物所组成。在金相显微镜下观察时,上贝氏体呈羽毛状,而在电子显微镜下观察时,碳化物颗粒明晰可辨。

下贝氏体形成于贝氏体转变温度范围的下部,组织由规则的针状铁素体和与铁素体针叶构成约 55° 或 60° 角的断续平行排列的碳化物组成,碳化物分布在下贝氏体的铁素体针内,因而与上贝氏体中碳化物分布于铁素体针叶之间不同。据测定,含有 ϵ 碳化物的下贝氏体,其铁素体的固溶含碳量实际上为 $0.1\sim 0.15\%$ 。

无碳贝氏体又称针状铁素体,类似于魏氏组织中的铁素体。这种组织的形成,是因奥氏体成分不均匀,当达到上贝氏体形成温度范围时,从贫碳的奥氏体区域内析出针状铁素体向晶内长大,而在铁素体周围常伴有碳化物颗粒存在。

粒状贝氏体 一般常出现在低碳低合金钢中,它是连续转变较快时的产物。当结晶核心生成后,生长速度较快,在铁素体上布有“小岛”状的残余奥氏体及碳化物颗粒,而在随后的冷却过程中,这些块状分布的残余奥氏体有可能转变为马氏体或细珠光体。

屈氏体 结构钢淬火后,在 $300\sim 400^\circ\text{C}$ 回火时转变产物。它是高度弥散分布的极细点状渗碳体和铁素体构成的混合物,点粒状渗碳体颗粒在一般光学显微镜下很难分辨,要在电子显微镜下才能看出其颗粒大小。

索氏体 结构钢淬火后在 $400\sim 650^\circ\text{C}$ 回火时的转变产物。由于回火温度的升高,马氏体中析出的渗碳体亦随之聚集而长大,它是由粒状渗碳体与铁素体构成的混合物,在500倍放大下,能清晰地分辨出渗碳体的颗粒大小。索氏体有时是均匀分布的,有时则仍保持马氏体针叶位向,这主要与位错亚结构中回复的程度有关。

2. 结构钢加工后组织

(1) 锻造后结构钢组织

1) 热加工的主要目的是使塑性变形所引起的加工硬化立即被再结晶的作用消除。一般钢的热轧或锻造温度为 $1100\sim 1200^\circ\text{C}$,晶粒大小与热加工温度和锻压比有关,应特别注意控制终锻温度和锻后冷却方式,以改善钢的性能。

带状组织是锻轧所引起的。带状组织特征是珠光体和铁素体呈相互交替的排列。带状组织的轻重程度按有关标准评定,评定时主要是依据铁素体和珠光体条带的宽度、连续性及贯穿整个视场的条带数。

2) 经热锻轧后,有些钢的板材、带材和线材等尚需进行冷轧或冷拔等工艺,经冷变形后晶内将出现滑移带,各晶粒均沿变形方向延伸或扭曲,其变形程度与工件外形的改变成比例。当金属变形量很大时,晶粒被显著拉长,呈纤维状线条,此时各晶粒取向大体一致,这种具有择优取向的组织叫做“变形组织”。由于“组织”的存在会使冷冲成型的工件出现“制耳”,从而造成工件边缘不整齐,壁厚不均匀等。

(2) 焊接后结构钢组织

1) 焊缝组织 焊缝金属凝固后,随着温度的逐渐下降,焊缝组织具有与铸钢组织相似

的特征。由于冷却速度相当大，故一般呈树枝状分布。如 10 号碳钢，当冷速为 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 时，珠光体含量约为 12%；冷速为 $60^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 时，珠光体含量可达 50%。

在合金钢中，由于合金元素较多，一般在近焊缝区的母材部位容易产生淬硬组织。

2) 热影响区组织 在焊接热循环作用下，焊缝附近发生组织变化的区域，称为热影响区。根据焊接工艺的不同，热影响区的宽狭和区段分布也不同。下面以低碳结构钢手工焊为例进行说明。

半溶化区 温度处于固相线和液相线之间的狭窄 ($0.1\sim 1$ 毫米) 区，组织特征是晶粒粗大，具有过热特征，常为裂纹易于产生的地方，或是局部脆性破坏的发源地。

过热区 温度约为 $1100\sim 1400^{\circ}\text{C}$ ，组织粗大，呈魏氏组织分布，一般晶粒在 3 级以上。这个区段是焊接接头的危险区，在合金钢中易出现贝氏体和马氏体，与索氏体构成混合组织。

正火区或完全结晶区 温度约为 $900\sim 1100^{\circ}\text{C}$ ，相当于在奥氏体区短暂停留后冷却下来。显微组织一般为珠光体和铁素体，分布较为均匀，机械性能良好。

不完全重结晶区 温度在 $A_{c1}\sim A_{c3}$ 之间。当焊接加热时，珠光体向奥氏体转变，部分铁素体溶于奥氏体。当冷却时，从奥氏体中先析出细小铁素体，冷至 A_{r1} 以下时，剩余奥氏体转变为珠光体，而未溶入奥氏体中的铁素体则不发生转变，仅晶粒长大。因此焊后晶粒粗细不一致。此段为焊接接头强度最低的部位。

再结晶段和兰脆区 温度低于 A_{c1} ，故显微组织变化不大。如果工件在焊接前经过塑性变形，在再结晶温度区就会使铁素体发生再结晶。有些钢在 300°C 左右回火会产生回火脆，因此也会发生硬度升高、塑性下降的现象。

如果采用其他方法焊接，则以上几个区组织区分有时并不都很清楚。例如碰焊时，热影响区就很狭；电渣焊时，热影响区很宽，但上述几区的界限就不很明显。

(3) 热处理后结构钢组织

1) 退火、正火以及正火并高温回火后的显微组织 大部分接近平衡状态的组织，为铁素体和珠光体，有时或为细珠光体（又称淬火索氏体）。

2) 淬火后的组织 结构钢经淬火后得到体心正方晶格的马氏体。碳在马氏体中以间隙固溶状态存在于铁原子之间。马氏体是在母相奥氏体的一定晶面上形成的，这些晶面称为惯习面。淬火后奥氏体通常不能全部转变成马氏体，残余的部分叫残余奥氏体。由于马氏体的针叶和板条比较细小，故在光学显微镜下不易区分，应用电子显微镜可进一步分辨它们的细节。

条状和针状马氏体的数量与含碳量多少有一定关系，因此其性能也有所区别，见表 5。

表 5 不同含碳量马氏体的性能

含 碳 量 (%)	延 伸 率 (%)	收 缩 率 (%)	冲 击 值 ($\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$)
0.25	5~8	10~20	2~4
0.35	2~4	7~12	1.5~3.0
0.45	1~2	2~4	0.5~1.5

3) 淬火、回火后的组织 回火时钢的组织改变情况主要取决于工件的加热温度和保温时间。

在 80~130℃回火，有部分碳化物自马氏体中析出，但由于十分细小，只能在电镜下分辨，通过观察，能分辨出碳化物呈弥散状分布在马氏体上，而在合金钢中，可以发现 ϵ 型碳化物在马氏体内沉淀出来。

在 200~300℃回火，残余奥氏体发生分解，分解产物为贝氏体。

在 300~400℃回火， α 固溶体中过饱和的碳已完全析出，极细的点状渗碳体在马氏体内沉淀，内应力得到消除， ϵ 型碳化物重新溶解。细小点状渗碳体与 α 固溶体（铁素体）构成弥散分布的混合物，称为屈氏体。

在 400~500℃回火，渗碳体由点状聚集长大呈细球状，并与铁素体构成混合物，称为索氏体。此时，位错亚结构得到回复， α 嵌块细化。

在 500~700℃回火，渗碳体颗粒继续聚集长大，至 650℃以上，因已达到再结晶温度，使晶粒长大，渗碳体球随之粗化，为较粗的索氏体，或称为球状珠光体。此组织基本上与球化退火组织相同。

五、结构钢常见缺陷特征

1. 铸钢中缺陷

由于工艺上的原因，常常可能出现缩孔、疏松、裂纹、气泡、偏析、非金属夹杂等缺陷。铸锭中有些缺陷可以通过以后的锻造、轧制等热加工进行改善或消除，而铸件则不能做到这一点，故要求质量就高一些。

常见的裂纹有晶间裂纹或因应力集中而引起的开裂。如水爆清砂处理时，因铸件未冷透即取出，故易在铸件的尖角处产生平直裂纹。

非金属夹杂物的存在属于冶金质量问题，如钢水脱氧不良，或镇静时间不够，致使在铸件的复杂部位存在聚集的夹杂。

2. 锻造缺陷

（1）过热、过烧 过热的主要特征是晶粒粗大，有明显的魏氏组织。出现过烧缺陷说明加热温度更高，断口晶粒更加粗大，凹凸不平，无金属光泽，晶界周围有氧化脱碳现象。

（2）锻造裂纹 常产生于组织粗大、应力集中处，或合金元素偏析处。裂纹内常充满氧化皮。锻造温度高，或者终锻温度低，都容易产生裂纹。还有一种裂纹是锻造后喷水冷却所形成的淬火裂纹。

（3）折迭 冲孔、切料、刀板磨损、锻造粗糙等原因，造成了表面缺陷，在继续锻造时，将表面氧化皮等缺陷卷入锻件本体内而形成折缝。在显微镜下观察时，可发现折迭周围有明显的脱碳。

3. 焊接缺陷

在焊接件的显微组织中不允许存在马氏体，因它使焊接件的塑性明显下降。焊接时产生的裂纹有三种：热裂纹、冷裂纹、再热裂纹。

（1）热裂纹 一般是指高温下产生的裂纹，其特征是沿晶开裂，故又称为晶间裂纹。裂纹大部分与焊缝的鱼鳞状波纹线相垂直。引起热裂纹的因素很多，主要可归结为应力的因素和冶金因素两种。前者是由于在焊接后的冷却过程中，一部分金属发生收缩，对邻近部分施加了拉应力，如果邻近刚结晶部分的强度不够，就会被拉开而形成裂纹。后一因素是由于

某些材料在高温固相线附近有脆性的夹杂物或低熔点相存在，以致引起开裂。

(2) 冷裂纹 一般是指焊后在冷至 A_{r3} 以下所产生的裂纹。这种裂纹大多数出现在近热影响区的母材上，且多是穿晶的。产生裂纹的主要原因是含氢量偏高或冷速太快。

(3) 再热裂纹 指焊后回火处理时所产生的裂纹。因有些低合金高强度钢，在加热回火时，一部分已固溶在基体内的碳化物或合金化合物会再次沿晶界析出，降低了材料的塑性，从而发生开裂。

4. 热处理缺陷

常见的有淬裂、过热、过烧、软点、脱碳、石墨析出等。

(1) 淬裂 裂纹特点是刚健挺直，呈穿晶分布，起始点较宽，尾部细长曲折。此种裂纹多产生于马氏体转变之后，故裂纹周围的显微组织与其他区域无明显差别，也无脱碳现象。

(2) 过热 显微组织粗大。如果是轻度过热，可以采用二次淬火来挽救。严重过热时，晶粒普遍长大，不易挽救。

(3) 过烧 除晶粒粗大外，部分晶粒已趋于熔化，晶界极粗。这种情况除因仪表控制失灵外，在正常生产中很少出现。

(4) 软点 结构钢中的淬火软点主要表现在显微组织中有块状或网状屈氏体，和未溶的铁素体等。

加热不足、保温时间不够、冷却不均匀等都会引起软点。出现软点使零件的机械性能不均匀，易发生早期磨损或断裂。

(5) 脱碳 淬火前零件要求表面无脱碳现象，脱碳将使零件表面硬度降低，并影响其使用质量。特别是弹簧钢的要求更为严格，表面脱碳会大大降低弹簧的疲劳强度。

(6) 石墨碳的析出

含硅的弹簧钢，在退火过程中有时会析出游离石墨碳。这样会大大降低弹簧的强度。产生这种缺陷的原因是：退火时保温时间过长，冷却速度过于缓慢。

5. 冷加工所引起的缺陷

若加工刀痕太粗、太深，会使零件在淬火或其他热处理时产生沿刀痕走向的裂纹。此外，零件结构不合理，拐角 R 处的曲率半径太小，经多次交变载荷后，也会从 R 处开裂并向内延伸。此时虽然显微组织正常，但由于该处应力易于集中，因此还是有可能发生开裂的。

由于磨加工工艺选择不当，或零件的内应力大，容易产生磨削裂纹。这种裂纹在零件表面上细而浅，在裂纹周围有较明显的回火色。磨削裂纹形状较多，大部分与磨削方向垂直。对圆柱体零件来讲，常为沿周向分布的细小裂纹。

六、结构钢的金相检验

1. 取样及常用试验方法

切取的试样必须具有代表性。要慎重确定检验面的取向，不同取向所要解决的问题是不同的。

横截面 主要检验非金属夹杂物的数量和分布；原材料或零件表面的脱碳层、渗层以及淬硬层的深度等。

纵截面 主要检验非金属夹杂物的数量、塑性变形情况及其分布，同时还能检验材料或零件的变形程度、带状组织或严重程度等。

如果要求分析零件产生缺陷的原因，则首先要了解其全部工艺流程，并仔细拍摄被检件的外观状况，以作今后备查，然后截取试样进行制备。制备时不要使试样发热或受污损。制备的顺序是：先用砂轮切割机或线切割机切取试样，然后按粗细次序逐级磨抛（用手工磨抛或自动磨抛机）。

试样显微组织的显示，除用化学试剂或电解侵蚀外，尚可采用下述的一些其他特殊方法。

(1) **热染法** 将抛光后试样加热至 500°C 左右，使表面形成一层氧化膜。通过氧化膜间的干涉色来显示显微组织。具体操作方法是：将试样用四氯化碳或乙醚等清洗干净，然后浸入铅浴或置于电热板上，试样面暴露于空气当中，加热到所需温度后，停留适当时间，然后取出迅速冷却，即可进行观察。

(2) **高温挥发** 将抛光好的试样，放入真空室内(或通有惰性气体)，加热到一定温度，借晶面和晶界上原子挥发速度的不同形成沟壑来显示组织。

(3) **真空离子侵蚀** 亦称阴极真空侵蚀，是将抛光试样放在侵蚀室内作为阴极，在一定距离处另外装置阳极，在大约 $10^{-2}\sim 10^{-3}$ 托真空度下加直流高压，侵蚀室内低压气体电离产生辉光放电，阴极受到正离子轰击，使金属粒子（原子或离子）从其表面逸出，这就是阴极溅射。在真空度、电压、电流、时间、阴阳极形状、电极距离等条件相同的情况下，溅射率与不同金属或相有关，因此这种方法能显示一般金相方法所不易显示的显微组织。

2. 结构钢常用化学侵蚀剂和电解抛光试剂（表6、表7）

表6 结构钢常用化学侵蚀剂

序号	试剂名称	试 剂 配 分	适用范围
1	硝酸酒精溶液	2~5 ml 100 ml 硝酸 酒精	碳素钢和合金钢各种热处理组织
2	苦味酸酒精溶液	2~4 g 100 ml 苦味酸 酒精	碳素钢和合金钢组织
3	碱性苦味酸钠溶液	2~5 g 20~25 g 75~100 ml 苦味酸 氢氧化钠 水	区别渗碳体及铁素体
4	中性苦味酸钠溶液	3%碱性苦味酸钠，用苦味酸中和	普通钢、特殊钢组织
5	赤血盐氢氧化钾溶液	1~4 g 10 g 100 ml 赤血盐 氢氧化钾 水	用着色法区别铁素体和奥氏体
6	王水酒精溶液	10 ml 3 ml 100 ml 盐酸 硝酸 水	高锰钢及低碳合金钢中铁素体晶界
7	复合试剂	30 ml 5 ml 15 ml 3~5 g 1 g 2~3 g 酒精 硝酸 盐酸 重铬酸钾 苦味酸 氯化高铁	碳钢、不锈钢焊接件组织同时显示（试剂需按表中顺序配制）

(续)

序号	试剂名称	试剂配分	适用范围
8	亚硫酸氢钠水溶液	10~20 g 100 ml 亚硫酸氢钠 水	低碳马氏体
9	海鸥试剂	3~4 g 1~1.5 ml 100 ml 苦味酸 海鸥洗涤剂 水	淬火-回火钢 晶界 70~85°C, 7~8 min
10	苦味酸钠水溶液	3~5 g 2~3 ml 100 ml 苦味酸 0.5%硝酸钠 + 0.5%氯化钠水溶液 水	低碳合金钢 晶界 60~70°C, 5~7 min
11	苦味酸新洁尔灭水溶液	3 g 1 ml 100 ml 苦味酸 0.2%新洁尔灭 + 0.5%亚硝酸钠水溶液 水	低碳合金钢、含硼钢 晶界 55~65°C, 5~7 min
12	P. P. P 试剂	10 g 1 g 30 g 100 ml 铁氰化钾 亚铁氰化钾 氢氧化钾 水	显示照相, FeB 为深棕至蓝色, Fe ₂ B 为黄至棕色

表 7 结构钢常用电解抛光试剂

序号	电解抛光液组成	电解条件	适用范围
1	25 ml 醋酸乙脂(或醋酸甲脂) 5 ml 高氯酸 70 ml 酒精	4~5 A/cm ² <20°C 3~4 min	不锈钢、耐热钢、碳钢、合金钢
2	10 ml 高氯酸 90 ml 酒精	2 A/cm ² (33 V) 20°C 10 min	各种钢
3	70 ml 醋酸 20 ml 75% 铬酸 10 ml 水	0.1~0.2 A/cm ² 室温	铝和铸铝

