

实验一 钢的奥氏体晶粒度与加热温度的关系

一、实验目的

- 1、了解测定奥氏体晶粒度的常用方法。
- 2、掌握用氧化法或直接腐蚀法显示钢的奥氏体晶粒及用比较法评定晶粒度。
- 3、研究加热温度对奥氏体晶粒大小的影响。

二、实验原理

钢材加热到相变温度（临界点 A_{C1} 或 A_{C3} 、 A_{Cm} ）以上，形成奥氏体组织。由于钢种、加热温度和保温时间等因素的不同，所得到的奥氏体晶粒大小也不相同。

奥氏体晶粒大小可用晶粒直径（ d ）或单位面积中晶粒数（ n ）等方法表示。为了方便，生产上多采用晶粒度来表示晶粒大小。奥氏体晶粒的级别 G 与晶粒大小的关系是：

$$n=2^{G-1}$$

式中 n ——放大 100 倍时每平方英寸（ 645mm^2 ）面积内的平均晶粒数目。

根据奥氏体形成过程和晶粒长大的不同情况，奥氏体晶粒度分为起始晶粒度、实际晶粒度和本质晶粒度。起始晶粒度系指奥氏体刚形成时晶粒的大小；实际晶粒度是钢材在某一具体热处理加热条件下所得到的奥氏体晶粒大小；而本质晶粒度则是表示晶粒大小的一种尺度，对钢来说，如不特别指明，晶粒度一般是指奥氏体化后的实际晶粒度。而实际晶粒度主要受加热温度和保温时间的影响。加热温度越高，保温时间越长，奥氏体晶粒越易长大粗大。

生产实践表明，钢材加热时形成的奥氏体晶粒大小，对冷却转变及对钢的力学性能与工艺性能均有很大影响。例如粗大的奥氏体晶粒冷却后获得粗大的转变产物，这种产物的塑性与韧性比细小的奥氏体晶粒转变产物差，而且其屈服点亦较细小奥氏体晶粒转变者为低。如果奥氏体晶粒过分粗大，钢件在淬火时还易于变形和开裂。高碳钢加热时，如形成粗大的奥氏体晶粒，淬火后残余奥氏体将增多，致使刀具的硬度和耐磨性能降低。

另外，细晶粒度的板材易于冲压加工，可获得表面光洁的冲压件，而粗晶粒的板材冲压时容易开裂，冲压成型后的表面亦比较粗糙。

晶粒度是表示材料性能的重要指标，是评定钢材质量的主要依据之一，所以生产中常需测定奥氏体晶粒大小，以保证产品质量。

钢中晶粒度的测定分为本质晶粒度和实际晶粒度的测定。晶粒度的测定包括两个步骤，即晶粒的显示和晶粒尺寸的测定或评级。晶粒的显示是晶粒测定的先决条件，常用的显示方法如下。

（一）奥氏体晶粒的显示

1、奥氏体本质晶粒的显示

奥氏体本质晶粒度是指在 $930 \pm 10^\circ\text{C}$ ，保温一定时间后的奥氏体晶粒大小，本质晶粒度可以反映奥氏体晶粒长大倾向，根据它能正确估计零件经过热处理后晶粒的大小，从而评定零件的力学性能。故在生产中常需要测定奥氏体本质晶粒度。由于奥氏体在冷却过程中可能已发生相变，冷至室温时已不再是奥氏体组织，为显示处原奥氏体晶界，需采取以下一些方法。

（1）渗碳法 渗碳体显示奥氏体晶粒，广泛应用于渗碳钢或含碳量 $\leq 0.6\%$ 的其它类型的钢种。

本法系采用渗碳热处理方法，提高试样表面的含碳量，渗碳后的试样表层为过共析成分。试样在渗碳后缓慢冷却过程中，先共析的渗碳体优先沿原奥氏体晶粒边界析出，勾划出了奥氏体晶粒。

为了在黑灰色珠光体组织的背景上显露出亮的碳化物（渗碳体）网，常选用下列浸蚀剂腐蚀试样。

1) 3%~4%硝酸酒精溶液，晶界呈现白色网状碳化物。

2) 5%苦味酸酒精溶液，晶界亦呈现白色网状碳化物。

3) 沸腾的碱性苦味酸钠水溶液：苦味酸 2g、氢氧化钠 25g、水 100mL，腐蚀时间为 10~25min，晶界网状碳化物呈现黑色。

本方法对碳化物形成元素过多的钢，由于难以形成完整的碳化物网络，故不宜采用。

(2) 氧化法 将预测晶粒度的钢试样，加热到奥氏体状态，保温一定时间，使试样表面受到氧化，由于晶界比晶内具有极大的化学活性，故奥氏体晶界较晶粒内部更易于氧化。适当地保温可使晶界发生氧化，而晶粒内部不受影响，故使奥氏体晶粒得以清晰地显示，氧化法主要有气氛氧化法和熔盐氧化腐蚀法，其中以气氛氧化法较为简便，应用最多。

1) 气氛氧化法。将试样两段面先用细砂纸磨光和抛光制成金相试样，然后将试样的抛光面向上装入预先加热到 $860 \pm 10^\circ\text{C}$ 的具有氧化性气氛炉中（普通空气炉）加热，并在该温度保温 1h。试样在加热和保温过程中暴露氧化，待试样保温后出炉水冷。水冷是为了避免铁素体呈块状析出，以防铁素体晶界与奥氏体晶界相混淆，造成误评。

再将水冷后的试样仔细研磨和抛光，使晶粒表面的氧化膜几乎完全磨去，而晶界处的氧化物只部分被磨掉，在显微镜下，借助晶界处的黑色氧化物即可显示出高温时的奥氏体晶粒大小。如用 15%盐酸酒精溶液或 2%~4%硝酸酒精溶液浸蚀试样磨面，则所形成的黑灰色网络将显露得到更为清楚。选择试样的奥氏体晶界轻微氧化或轻度脱碳区域观察晶粒度时，沿氧化了的奥氏体晶界形成槽形凹沟，可在显微镜下清晰地聚焦成线状，它与真实的奥氏体本质晶粒度最为接近。

奥氏体晶粒显示的结果是否清晰准确，关键在于试样冷却后的研磨与抛光。研磨过少，只能看到氧化膜而看不到晶界，研磨过多，则可能将氧化晶界全部磨掉，这样就无法观测奥氏体晶粒大小，因此应严格控制研磨量。

此法的缺点是所显示的往往为保温初期的奥氏体晶粒大小。

2) 熔盐氧化腐蚀法。将制备好的金相试样，放入预先加热至 $930 \pm 10^\circ\text{C}$ 不氧化的碳酸钠盐浴、硼砂槽或其它盐浴中加热，保温 3h 后，再转入成分为 BaCl_2 1/3 + NaCl 1/3 + CaCl 1/3 (重量比) 未经脱氧的盐浴中进行腐蚀，腐蚀温度为 $930 \pm 10^\circ\text{C}$ ，腐蚀时间为 2~5min，腐蚀后的试样在煤油后的试样在煤油中冷却，然后用冷水洗净、酒精冲洗吹干，经适宜的抛光，在显微镜下放大 100 倍进行观察。如氧化网络不清晰时，可用 4%苦味酸酒精溶液浸蚀。

氧化法适用于显示各种钢的奥氏体本质晶粒度、尤以中碳钢及中碳合金钢为宜。

(3) 网状铁素体法 此方法仅适用于亚共析钢，对中碳调质碳素钢较为合适，而对某些亚共析合金钢，即使在很小的冷却速度下，铁素体也不呈网状，故此法不宜选用。

将欲测试样加热含 $\text{C}\% \leq 0.35$ 时为 $900 \pm 10^\circ\text{C}$ ，保温 300min，当 $\text{C}\% > 0.35$ 时，为 $860 \pm 10^\circ\text{C}$ ，保温 30min 水冷或空冷，在冷却过程中，当通过临界温度区域时，先共析铁素体优先沿奥氏体晶粒边界析出，呈网状分布，晶粒内部为珠光体。除去试样表面层，根据围绕在奥氏体晶粒周围的网状铁素体测定钢的本质晶粒度。对接近共析成分的亚共析钢，在奥氏体化后，可预先缓慢冷却至 $700 \sim 730^\circ\text{C}$ ，等温保持十几分钟后在空冷到室温，也可得到明显的铁素体网。

网状铁素体法显示奥氏体晶粒的浸蚀剂，可采用 3%~4%硝酸酒精溶液或苦味酸酒精溶液，腐蚀后晶界呈白色网状铁素体。

冷却速度是决定铁素体网勾划出奥氏体晶界质量好坏的关键，如果冷却速度过快，铁素体网未能布满奥氏体晶界，易产生奥氏体晶粒过大的错觉；若冷却太慢，铁素体堆积成块状，也难以显示出奥氏体晶界。所以对不同钢种的冷却速度，应通过多次试验选择确定。

(4) 网状渗碳体法 适用于过共析钢的奥氏体晶粒的显示。将试样加热到 $820\pm 10^{\circ}\text{C}$ ，保温 30~60min 后，炉冷到 600°C （冷却速度约 $80\sim 100^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ）出炉，以保证渗碳体呈网状分布。除去试样表面氧化层，制成金相试样，用 3%~4% 硝酸酒精溶液或苦味酸酒精溶液浸蚀，此时晶界网状碳化物呈现白色。根据碳化物沿奥氏体晶界析出的网络。测定钢的奥氏体晶粒度，晶粒内部是珠光体。

(5) 网状珠光体法（一端淬火法） 适用于淬透性较低的碳素钢和低合金钢以及不能获得完整铁素体或渗碳体网的钢。如含碳量接近共析成分的钢。

实验时，可采用 $\Phi 20\text{mm}\times 40\text{mm}$ 的圆柱形试样，现将试样加热到 $900\pm 10^{\circ}\text{C}$ ，保温 1h，然后自炉中取出，一端淬入水中冷却（约入水 $1/3\sim 2/5$ 长度），冷却时不要上下运动，只可水平移动；试样另一端在空气中冷却。由于试样从下端之上端冷却速度逐渐减小，因而沿轴组织的组织依次由马氏体向珠光体过渡。经过这样处理的试样，沿纵向磨去约 2~3mm 厚以后，制成金相试样，在淬硬与未淬硬的过渡区，则可以找到黑色屈氏体优先沿奥氏体晶界析出的区域。在屈氏体网所包围的内部则为灰白色的马氏体。根据黑色屈氏体网，可以测定钢的晶粒度，所用浸蚀剂与网状铁素体法相同。

(6) 化学试剂腐蚀法 此方法分为直接腐蚀法和马氏体腐蚀法。

1) 直接腐蚀法。将试样加热到 $900\pm 10^{\circ}\text{C}$ ，保温 1h 后水冷淬火，获得马氏体和贝氏体组织，有的钢种还需经过一定温度的回火。除去试样表面脱碳层和氧化层，制成金相试样，选用具有强烈选择性腐蚀的腐蚀剂浸蚀，使原奥氏体组织晶界变黑，而基体组织腐蚀轻微，从而直接显现奥氏体晶粒。

本法适用于合金化高的能直接淬硬的钢，如高淬透性的铬镍钼钢等。

直接显现奥氏体晶界的腐蚀剂成分与使用条件是：

① 含有 0.5%~1% 烷基苯磺酸钠 100mL 饱和苦味酸水溶液（亦可用合成洗衣粉代替烷基苯磺酸钠）；浸蚀时间依温度不同（ $20\sim 70^{\circ}\text{C}$ ），可选用 0.5min 至 3h，由试验确定。如再向此腐蚀剂中加少量医用消毒剂新洁尔灭，则能更好控制腐蚀，使样品更加清晰。

② 含有 0.1~0.15g 十二醇硫酸钠的 100mL 饱和苦味酸水溶液，加热到 30°C ，浸蚀约 100min 即可。

上述两种腐蚀剂都可抑制马氏体组织出现，促使奥氏体晶界的显示。

采用直接腐蚀法显示奥氏体晶粒的常用钢种热处理工艺列于表 1-1。

表 1-1 直接显示奥氏体晶粒的热处理工艺

钢号	淬火工艺	回火工艺
12CrNi3A	930℃，保温 1.5~3h 水冷	不经回火
12Cr2Ni4A		
20CrNi3A		
40Cr 或 45Cr		
60 碳钢		
38CrMoAlA	930℃，保温 1.5~3h 水冷	200~250℃,保温 15~30min 空冷
18Cr2Ni4WA		400℃保温 30min 空冷
40CrNiMoA	930℃，保温 1.5~3h 油冷	不经回火
18CrMnTi		
38CrA		
30CrMnSiA		
30CrMnSiNi2A	930℃，保温 1.5~3h 水冷	500℃保温 300min 空冷
30CrMnNi2MoA		600℃保温 300min 空冷

2) 马氏体腐蚀法。适用于淬火是得到马氏体的钢。先将试样加热到 930℃，保温 3h 后淬火得到马氏体，然后再进行 150~250℃，15min 短时间回火，以增加衬度，选用适当腐蚀剂浸蚀。由于原始奥氏体各晶粒位向不同，则各晶粒间马氏体被腐蚀的深浅亦不同。借此衬度颜色差异而显示出奥氏体晶粒大小，为得到清晰的组织，可重复进行抛光和腐蚀。

此法腐蚀剂可用：1g 苦味酸+5mL 盐酸+100mL 酒精或 1g 氯化铁+1.5mL 盐酸+100mL 酒精。

马氏体腐蚀法对粗大奥氏体晶粒较为有效，但对细晶粒奥氏体以及钢中存在带状和树枝状偏析腐蚀时会出现混杂图形，影响正确测定。

另外，还有真空法、高温金相法和氢气脱碳法等，但因测试条件所限，尚未普遍应用。如选用时，可参阅有关资料。

2、实际晶粒度的显示

测定实际晶粒度时，试样直接在交货状态的钢材或零件上切取。在切取及制备试样过程中，应避免冷、热加工的影响。试样一般不经任何预先热处理直接测定。制备好的试样用适合的腐蚀剂浸蚀而显示晶粒。但这种方法因钢的种类、化学成分及状态的不同，其效果亦有所不同。应根据试验实践选择确定。

对结构钢淬火和调质状态的原奥氏体晶粒的显示，常用的腐蚀剂为：

- (1) 饱和苦味酸水溶液。
- (2) 结晶苦味酸 4g，水 100mL，加热至沸腾，浸蚀时间约 15~20s
- (3) 饱和苦味酸水溶液—海鸥牌洗净剂混合试剂：饱和苦味酸水溶液 100mL 加海鸥牌洗净剂 1g。
- (4) 饱和苦味酸水溶液加少量新洁尔灭。
- (5) 10%苦味酸乙醚溶液加盐酸 1~2 mL。

对于结构钢，在正火和退火后，还常测定其铁素体晶粒度。其方法是将试样研磨抛光后，以 5%的硝酸酒精溶液腐蚀约 15s 后进行观察，并与铁素体标准级别图相比较来评定晶粒度。

对于大多数钢种淬火回火态的原奥氏晶粒的显示，以苦味酸为基的试剂较适宜。试剂成分为：

饱和苦味酸水溶液 100mL+洗净剂 10mL+酸（微量）

对不同钢种和不同热处理状态的原奥氏体晶粒的显示，只要适当改换微量酸的种类（盐酸、硝酸和磷酸等）和调整微量酸的加入量（5~10 滴）就可获得良好的效果。

高速钢淬火后一般均需测定奥氏体晶粒度，以间接考察马氏体针的粗细，作为判定淬火加热温度高低和工具热处理质量的主要依据，从而控制合适的淬火温度。另外，分析高速钢成品刀具或进行缺陷分析时，还需要检验回火后的晶粒度。

高速钢奥氏体晶界可用 4%硝酸酒精溶液或表 1-2 所列试剂浸蚀显示，然后按晶粒度评级标准图依不同产品和材料，确定不同的晶粒度要求。

表 1-2 高速钢晶粒显示试剂

编号	成分（%）					
	饱和苦味酸水溶液	浓硝酸	浓盐酸	乙醇	甲醇	海鸥洗净剂
I	15	1	25	50	—	—
II	—	10	30	59.5	—	0.5
III	20	10	30	—	40	—

注：I 号试剂可用以显示淬火、回火后的晶界和马氏体形态；II 号试剂可用以显示淬火、回

火后的晶界；III号试剂可用以显示淬火、回火后的晶界，深腐蚀可显示马氏体形态。

如果切取及制备试样，借腐蚀直接观察难以分辨晶粒边界，无法测定原奥氏体晶粒大小时，试样可经适当热处理后再进行测定，具体试验方法可按有关规定进行。

(二) 奥氏体晶粒度的评定

奥氏体晶粒度的评定，有比较法和截点法两种，一般多采用比较法。

1、比较法

比较法评定晶粒大小是通过与标准评级图相比较来确定晶粒度级别的。图 1-1 是钢的晶粒度标准级别图。

选用此法测定晶粒度时，是先将制备好的试样在放大 100 倍的显微镜下全面观察晶粒，然后选择晶粒度具有代表性的视场与标准级别图比较，当二者大小相同时，试样的晶粒度就是标准级别图上所标定的级别。如试样晶粒大小不均匀时，若占优势晶粒所占面积不少于视场的 90% 时，则可记录些一种晶粒的级别数，否则应用不同级别来表示该钢的晶粒度，其中一个级别代表占优势的晶粒级别，例如 8 级 (75%)，4 级 (25%) 等。

当钢的晶粒过大或过小，而用 100 倍的放大倍数不方便时，可改用其它放大倍数观察和评定，然后按照表 1-3 的关系换算成 100 倍下的标准级别。

表 1-3 常用放大倍数下晶粒度级别间关系表

图像的放大倍数	与标准评级图编号等同图像的晶粒度级别									
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10
25	-6	-2	-1	0	1	8	3	4	5	6
50	-1	0	1	2	3	4	7	6	7	8
100	1	2	3	4	5	6	5	8	9	10
200	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
400	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
800	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

钢的晶粒度标准评级是将钢中晶粒度分为 8 级，其中 1~4 级的属粗晶粒，5~8 级的为细晶粒，8 级以上称为超细晶粒。

比较法评定晶粒度简便迅速，但不够准确。

2、截点法

当晶粒度测量准确性要求较高或晶粒为椭圆形时，一般采用截点法。

(1) 等轴晶粒计算法 当欲测定的奥氏体晶粒基本上是等轴时，可先进行初步观察，以确定晶粒的均匀程度，然后选择有代表性的部位和适合的放大倍数。测定时先用 100 倍观察，当晶粒过大或过小时，可适当缩小或放大显微镜倍数，以在 80mm 视场直径内不少于 50 个晶粒为限，再将所选定部位的图像投影在毛玻璃上，计算与一条直线相交截的晶粒数目（截点数），直线要有足够长度 (L)，以使与直线相交截的截点数目不少于 10 个，计算时，直线端部未被完全交截的晶粒应以一个晶粒计算之。选择三条以上不同部位的直线来计算相截的截点数。用相截的截点总数 (Z) 除所选用的直线总长度 (实际长度以 mm 计)，得出弦的平均长度 a (mm)，再以弦的平均长度值根据晶粒级别对照表，便可确定钢的晶粒度。

弦的平均长度为：

$$d = \frac{nL}{(Z_1 + Z_2 + Z_3)M}$$

式中 M ——显微镜的放大倍数。

截点法也可在带有目镜测微尺的显微镜下，通过平行移动视场直接观察计数，一般也是测 Z 个晶粒的总长度，再求弦的平均长度 (a)。

(2) 非等轴晶粒计算法 沿试样的三轴线分别计算出各轴线方向每 1mm 长度的平均节点数量。每一轴线方向的平均截点数，必须在不少于三条直线下求得。

由试样的三个轴线方向得出每 1mm 长度的平均截点数量值，按下式计算出每 1mm^3 内平均截点数。

$$N=0.7n_{\text{纵}}n_{\text{横}}n_{\text{法}}$$

式中 n ——每 1mm^3 内平均截点数；

$n_{\text{纵}}$ ——纵向上每 1mm 长度平均截点数；

$n_{\text{横}}$ ——横向上每 1mm 长度平均截点数；

$n_{\text{法}}$ ——横向上每 1mm 长度平均截点数；

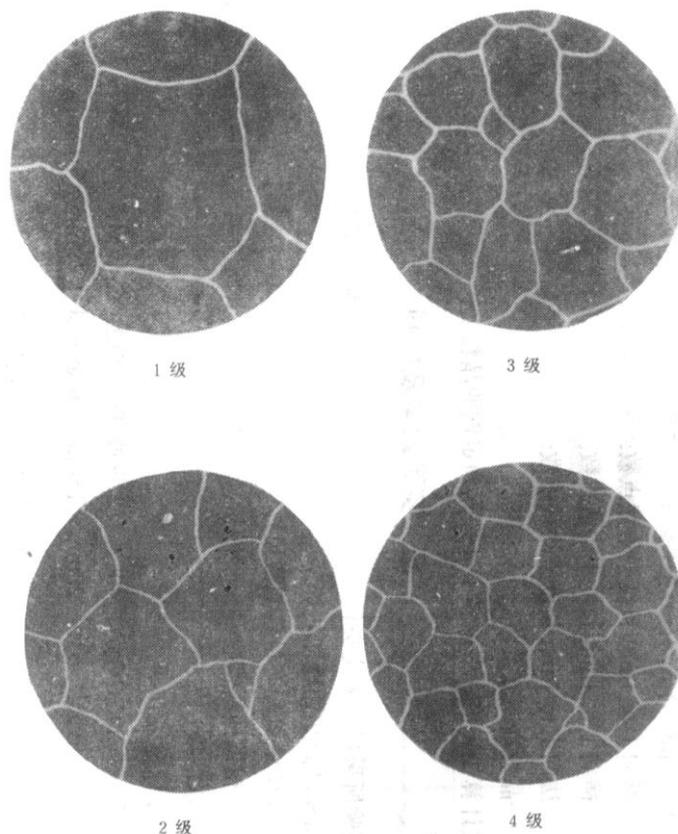
0.7——晶粒扁圆度系数。

由上式计算出 n 值，根据晶粒级别对照表确定钢的晶粒度。

三、实验设备及材料

根据实验所采用的测定奥氏体晶粒度的方法，选用所需要的设备和材料。

- 1、中温和高温热处理加热炉。
- 2、金相显微镜（配有目镜测微尺）。
- 3、制备金相试样所需物品：砂轮机、抛光机、砂纸、腐蚀剂（2%~4%硝酸酒精溶液或饱和苦味酸水溶液）等。
- 4、晶粒度标准级别图。
- 5、试验钢材：20CrNi3A、40Cr、45 钢或 T8、T12、CrWMn 等钢。
试样尺寸：圆形试样 $\Phi 10\sim 20\text{mm}\times 15\text{mm}$ ，或矩形试样 $10\text{mm}\times 10\text{mm}\times 20\text{mm}$ 。



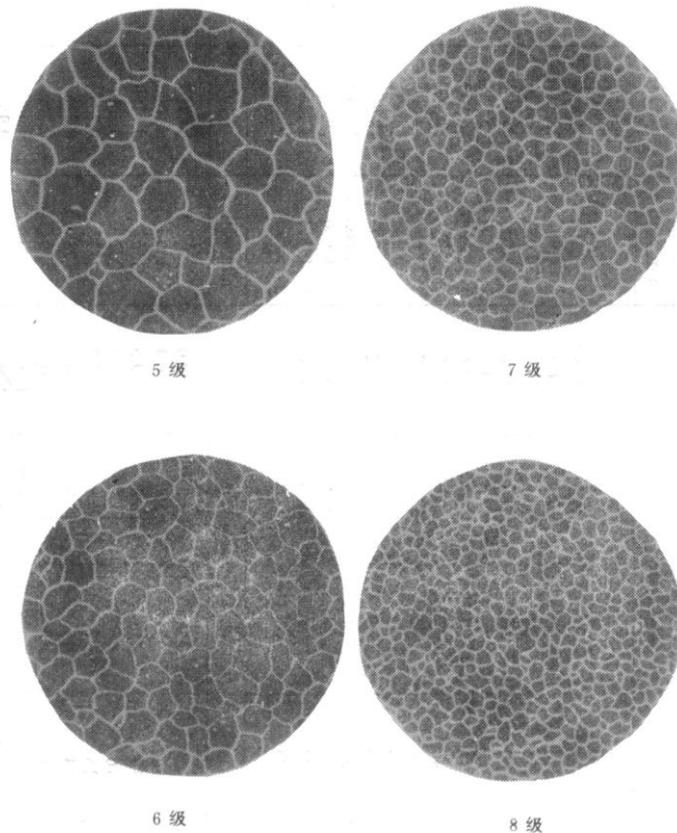


图 1-1 晶粒度标准级别图

四、实验内容及步骤

采用氧化法或直接腐蚀法显示钢的奥氏体晶粒，并用比较法或计算法评定晶粒度级别。同时验证加热温度对奥氏体晶粒大小的影响。实验步骤如下：

（一）分组

试验人员按不同加热温度分成若干组，试样的加热温度为：850℃、900℃、930℃、950℃、1000℃、1100℃等。

（二）试样奥氏体晶粒的显示

进行测定奥氏体晶粒度时，先选用下列一种方法显示出奥氏体晶粒。

1、氧化法

(1) 每人取试样一块、将其两端面研磨并抛光，制成金相磨片。

(2) 将制备好的试样，分别放置于加热到上述规定温度的热处理炉中，试样磨面向上，并应使加热和氧化均匀一致。试样在指定温度保温 30min 后，取出放入水中冷却。

(3) 将冷却后的试样磨面在 04 号砂纸上仔细研磨，待磨面磨至大部分发亮时，进行抛光。为找到一个合适的评级区域，可将试样研磨抛光成一个倾斜面（10°~15°）。有时还可配合显微镜观察，控制研磨量。

(4) 试样抛光后，若晶界显示不清晰时，可采用浸蚀剂将试样磨面适度浸蚀，便可清晰地显示出奥氏体晶界网络。

2、直接腐蚀法

(1) 选用 20CrNi3A 或 40Cr 等钢制成 $\Phi 10\text{mm} \times 10 \sim 20\text{mm}$ 圆形（或矩形）试样。

(2) 先将试样放入规定温度的热处理炉中加热，加热到温后保温 30min，然后迅速淬入水中冷却，以获得马氏体组织。

(3) 淬火后的试样，磨去脱碳层制成金相试样，选用含有 0.5%~1% 烷基苯磺酸盐的

100mL 苦味酸饱和溶液等腐蚀剂浸蚀，由于晶粒边界被腐蚀变黑，依次测定奥氏体晶粒度。腐蚀时间根据试验条件经试验确定。配置腐蚀剂时，应煮沸和充分溶解。

(4) 为获得更清晰光亮的组织，试样可经二次或三次腐蚀抛光重复进行，或向腐蚀剂中加少量新结尔灭，或将腐蚀剂加热到 50~60℃后腐蚀均可。

3、网状铁素体法

采用网状铁素体显示亚共析钢的奥氏体晶粒，其热处理条件与氧化法相同，但是试样预先不需研磨。在加热过程中应防止氧化，冷却速度应依次不同钢种恰当选择。通常对低碳钢可选用油冷，中碳钢选用空冷，中碳合金钢选炉冷。

(三) 评级

待奥氏体晶粒显示后，即可根据试验条件和需要，采用比较法或计算法评定试验钢材(试样)奥氏体晶粒度级别。

五、实验报告要求

- 1、写出对实验目的及所选用奥氏体晶粒显示和评级方法原理的简要叙述。
- 2、记录及画表格列出全组（或全班）实验结果并确定本实验用钢奥氏体晶粒度级别。
- 3、绘出实验用钢（或不同实验用钢）加热温度与奥氏体晶粒长大关系曲线（或比较不同实验用钢奥氏体晶粒长大的倾向性），并说明加热温度对奥氏体晶粒大小的影响。
- 4、实验结果的分析讨论。

实验二 钢的淬透性

一、实验目的

- 1、了解钢的淬透性测定方法。
- 2、掌握用末端淬透性试验法测定钢的淬透性。
- 3、研究合金元素等对钢的淬透性的影响。

二、实验原理

钢的淬透性是结构钢与工具钢的重要热处理工艺性能之一。钢的淬透性对钢材的组织及性能有着十分重要的影响。因而钢的淬透性亦是机械零件设计时选择钢种和生产上制定热处理工艺的主要依据之一，为了合理地选择和使用工业用钢，以及正确地进行钢的热处理。对钢的淬透性进行测定和了解具有很大的实际意义。

（一）淬透性的本质与评定

钢的淬透性也称可淬性，是指钢在淬火时能够获得马氏体的能力。它是钢材本身固有的一个属性。它主要与钢的过冷奥氏体稳定性或钢的临界淬火冷却速度有关。

淬火是最常用的一种热处理工艺，对结构钢和工具钢来说，淬火是为了获得马氏体组织。零件淬火时，表面冷却快，愈向心部冷却愈慢，如果中心点的冷却速度达到或超过该钢种的临界淬火速度，则钢件整个界面均可得到马氏体组织，即钢件被淬透，而当心部冷却速度小于临界淬火速度时，则将在心部出现非马氏体，称为未淬透。在未淬透的情况下，全淬成马氏体的区域就是淬硬层（或淬透层）。钢件经淬火后，一般从表面到心部一定深度均可获得马氏体组织，这种马氏体组织的深度通常称为淬透层深度或淬硬层深度。

钢的淬透性反映了钢在淬火时获得马氏体的能力，因此通常用标准尺寸试样在一定条件下，淬火而得到的淬硬层深度（ h ）或全部淬透的最大直径（ D_c ）来表示淬透性大小。然而，由于不同钢种的淬透性不同，故其淬硬层深度以及能淬透的最大直径也不同。淬硬层深度及直径愈大，表面该钢种的淬透性愈高。

在实际的淬火钢件中，由于从表面到中心各个部位的冷却速度不同，因而各部位的组织及性能也就不同，从表面全部马氏体组织开始，向内依次为屈氏体、索氏体、珠光体，甚至在心部出现铁素体。此时，显然应以全部马氏体组织或包含有很少量残余奥氏体组织层的深度作为判定淬透性的标准。但是实际上，当马氏体组织中含有 5%~10% 非马氏体组织时，是很难准确分辨出来的，在硬度上亦无法测量出来。因此现多采用由表面至半马氏体组织（即 50% 马氏体和 50% 非马氏体组成）的距离为淬透层深度，并以此深度作为判定淬透性的标准。这是因为半马氏体区域硬度变化显著，很容易测量，在酸蚀的断面上呈现出明显的明暗分界面，见图 2-1。因此，可以认为淬火后的马氏体组织大于 50% 的部分即是被淬透的。半马氏体组织的硬度主要与含碳量有关，如图 2-2 所示。实践证明，对碳素钢和不具有复杂奥氏体等温转变曲线的低合金钢及中合金钢，采用半马氏体作为判定淬透性的标准是没有重大误差的。但近年来，贾查克（Jatezak）等认为，在淬火钢中存在 50% 的非马氏体组织，与具有 90% 马氏体的性能有很大差异，而建议用 90% 马氏体作为淬透性判据。

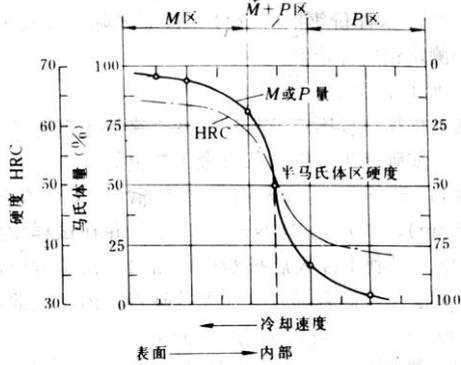
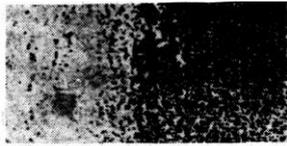


图 2-1 冷却速度对金相组织和硬度的影响

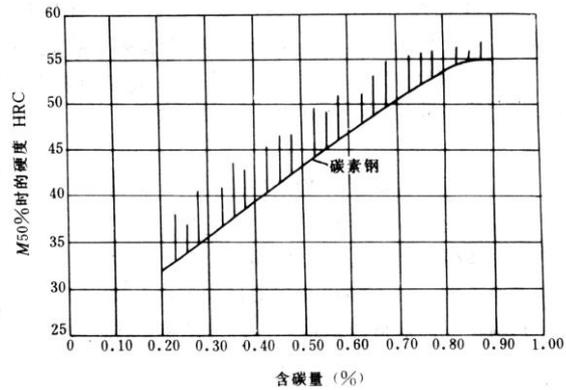


图 2-2 50%马氏体的硬度与含碳量关系

(阴影线为中、低合金钢的硬度波动范围)

应特别指出的是，钢的淬透性和钢件的淬透层深度虽有密切联系，但不能混为一谈。钢的淬透性乃是钢材本身所固有的属性，不受外部因素的影响，而钢件的淬透层深度除取决于钢材的淬透性之外，还与所采用的冷却介质、零件尺寸等外部因素有关。淬透性还应区别于淬硬性，后者系指钢在正常淬火条件下所能达到的最高硬度的能力，它主要与钢的含碳量有关。

钢的淬透性对钢件热处理后的组织和力学性能有很大的影响。因为完全淬透的零件在回火后，其组织是均一的，整个截面上的性能均匀一致，而未淬透的钢经回火后，虽硬度也趋于一致，但未淬透部分的屈服点 (σ_s) 和冲击韧性 (a_k) 均有所降低。所以凡是要求高的综合力学性能的零件都应全部淬透。但对工作是最大应力在零件外缘，愈向心部应力愈小的某些轴类零件（如机床主轴等），凡要求淬硬 1/2 或 1/3 半径的外层即可，而无需全部淬透。各类钢制零件所要求的淬硬层深度应按其工作条件而定，并非一律要求全部淬透。

(二) 影响淬透性的因素

淬透性是钢的一种属性，不同种类钢材其淬透性高低差别较大。影响淬透性的主要因素是钢的化学成分，此外，奥氏体均匀度、晶粒大小及非金属夹杂物与未溶碳化物的存在等因素对淬透性亦均有影响。

碳完全固溶于奥氏体中时，其含量愈多，奥氏体愈不易分解，愈使奥氏体等温转变曲线向右移动，增大奥氏体的稳定性而减小临界冷却速度，使淬透性提高；但超过共析含碳量以后，由于未溶解碳化物成为相变核心，促进珠光体转变，临界冷却速度又复增大而使淬透性降低。合金元素除钴和铝 (>2.5%) 以外，都不同程度地增加奥氏体的稳定性，因而均提高钢的淬透性。常用合金元素对淬透性的影响以锰最为强烈，其次是钼、铬、钒、硅和镍等。

奥氏体化温度愈高，奥氏体晶粒愈粗大，成分愈均匀，则钢的淬透性愈高。反之，晶粒愈细小，成分愈不均匀，特别是存在未溶的碳化物时，要求的临界冷却速度亦愈快，其淬透性愈低。

(三) 淬透性常用测定方法简介

测定钢的淬透性有计算法和实验法两大类，计算法是根据钢的化学成分和本质晶粒度计算出该钢种的理想临界直径 (D_1)，再依此计算出末端淬透性曲线。而实验法则是通过测定标准试样上的淬透直径或深度，或是测定标准试样在末端淬火试验后的半马氏体区至水冷端距离大小，来评价钢的淬透性。目前国际上和我国多用断口的检验法、U 曲线和末端淬火法

等来测定钢的淬透性。

1、断口检验法

这是根据试样断口所呈现的状态来评定钢的淬透性的一种方法，主要适用于淬透性不高的钢种。如碳素工具钢及低合金工具钢等。

(1) 试样 在退火钢条中部截取 3 个方形试样，其截面尺寸为 $20\text{mm} \times 20\text{mm} (\pm 0.2\text{mm})$ ，长度为 $100\text{mm} \pm 5\text{mm}$ 。并在试样中间的一个侧面上刻一深度为 $3 \sim 5\text{mm}$ 的“V”形槽，以利于淬火后折断观察断口。由于方形试样淬火时，冷却速度不均匀容易开裂，测量淬透层深度时易发生误差等缺点，因而也常采用圆形试样，其直径为 $22 \sim 23\text{mm}$ ，长度为 100mm ，刻槽深度亦为 $3 \sim 5\text{mm}$ 。

(2) 热处理 试样在箱式电炉加热后淬火，淬火温度和保温时间规定为： 760°C 、 800°C ，保温 20min ； 840°C 保温 150min 。在加热过程中应保证试样受热均匀，保温后取出迅速淬入 $10 \sim 30^\circ\text{C}$ 水中，淬火时，钳子应夹持试样端部，垂直入水并在水中上下搅动，以获得均匀的淬透层。

(3) 淬透层深度测量与评级 将淬火后的试样，用手锤或压力机从刻槽处折断。然后按照图 2-3 中心线方向测量淬透层深度，取其三面平均值（刻槽一面不计），再按图 2-4，根据 800°C 淬火后的试样进行评级。测定淬透层深度的精确度为 0.5mm ，评定的等级应取整数。淬透层深度还可采用金相法检验，现将断口磨平、抛光，然后用 $2\% \sim 10\%$ 硝酸酒精溶液侵蚀，显示的淬透层为浅色而未淬透部分深灰色。

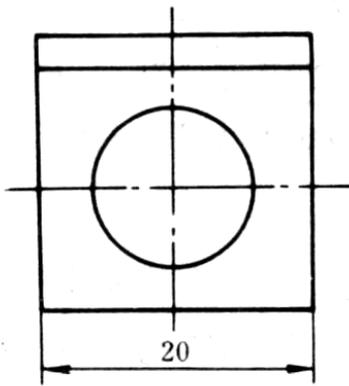


图 2-3 测量试样淬透层深度的方向图

等级	淬火温度及断口形状			断口符号
	760 $^\circ\text{C}$	800 $^\circ\text{C}$	840 $^\circ\text{C}$	
	试样一	试样二	试样三	
0		0.3~0.5 		未淬硬
I		>0.5~2 		软心
II		>2~3.5 		淬透
III		>3.5~6 		过热
IV		>6~9 		裂纹
V				

图 2-4 碳素工具钢淬透性评级图

图中 $>0.3 \sim 0.5$ 等字样是指方形淬火试样从边缘到心部的淬头距离，单位 mm 。

2、某端淬火法

末端淬透性试验法亦称为末端淬火法，是目前应用最广泛的淬透性试验方法。它通常适用于测定优质碳素钢及合金结构钢的淬透性，也可用于弹簧钢、轴承钢和合金工具钢等钢中淬透性测定，但对低淬透性钢和高淬透性钢不宜采用。

末端淬火法所用试样和试验条件均已标准化，如表 2-1 所示。

表 2-1 末端淬火法试验条件

试样			保温时间 (min)	喷水口直径 (mm)	自由水柱高度 (mm)	喷水口至试样 端面间的距离(mm)
直径 (mm)	头部直径 (mm)	长度 (mm)				
25±0.5	300	100±0.5	30±5	12.5	65±5	12.5±0.5
20	25	100	30	12.5	65±5	12.5
12	17	100	15	6	100±5	10

这种测试方法是將一圆柱形试样加热至淬火温度，然后在试样末端喷水淬火。由于试样仅从末端喷水冷却，所以整个圆柱形试样沿长度方向，从末端至顶端由下而上冷却速度逐渐减小，由于各处冷却速度不同，致使试样各部位所获得的淬火组织和硬度亦不相同。根据沿试样长度向所测定的硬度值，便可绘制出至水冷端距离的硬度变化曲线，即末端淬透性曲线如图 2-5 所示。

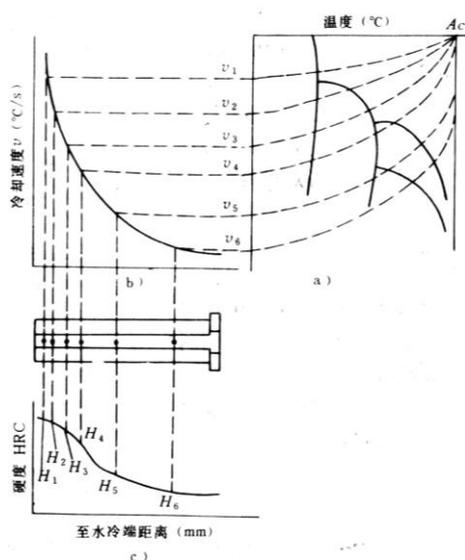


图 2-5 冷却速度曲线、奥氏体转变曲线与末端淬透性曲线三者的关系

a) 奥氏体转变曲线；b) 冷却速度曲线；c) 末端淬透性缺陷

注：根据试样断口上淬透部分晶粒的粗化程度以确定钢的过热现象

在淬透性曲线上，根据硬度变化的不同特征，便可判定钢的淬透性的高低，具体测定方法如下：

(1) 试样 标准试样尺寸为 $\Phi 25\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的圆柱形试样，仅试样顶端 3~5mm 处的直径为 28~30mm，以供淬火试验时悬挂试样之用，如图 2-6。需要时，亦可用较小尺寸试样作淬透性试验。

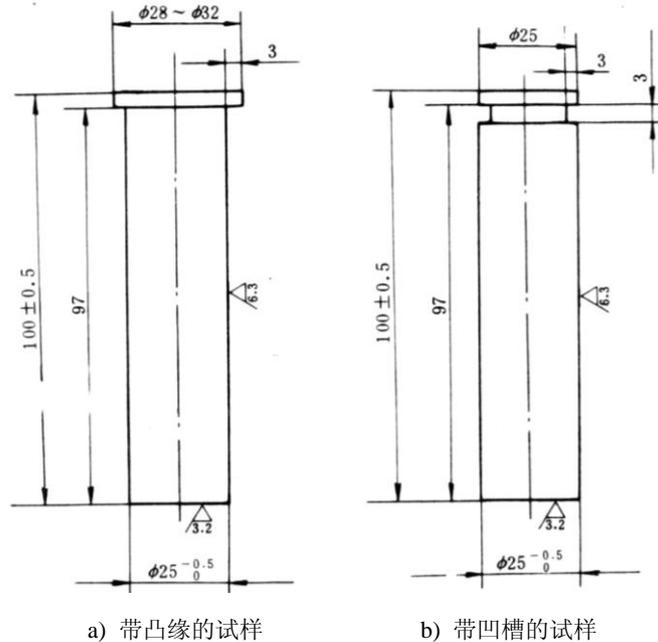


图 2-6 标准试样尺寸

(2) 试样加热 试样在温度准确的箱式电炉中加热。淬火温度根据钢种化学成分而定，或以该钢种标准技术条件中规定的温度为准。保温时间为 $30 \pm 5\text{min}$ ，加热时应防止试样表面发生氧化和脱碳。

(3) 末端淬火 淬火是在末端淬火设备上进行，图 2-7 为淬火试验示意图。试验前，先根据试样直径，按表 2-1 规定条件，调整测试设备，调试好后即可向试样末端喷水淬火。

(4) 硬度测定与淬透性曲线绘制 淬火后，将试样圆柱表面相对 180° 的两边各磨去 $0.4 \sim 0.5\text{mm}$ 的深度，以获得相互平行的两平面，然后用洛氏硬度计沿磨面中心线测量硬度。由试样水冷端起每隔 1.5mm 测量一次，或从淬火端起所测前八个点至水冷端的距离（以 mm 表示）依次为：1.5-3-5-7-9-11-13-15 当硬度下降趋于平稳时，其后各点可每隔 $3 \sim 5\text{mm}$ 测量一次，直至硬度下降后再无明显变化为止。再以硬度值(HRC)为纵坐标，以距淬火末端的距离(mm)作横坐标，绘制淬透性曲线。由于材料成分和晶粒度等均有一定的波动，使硬度亦在一定范围变化，因此淬透性曲线一般用一宽带表示，称为淬透性带。不同钢种具有不同的淬透性曲线。各种钢的淬透性曲线均已测出，使用时间可查阅有关手册。

钢的淬透性值以 $J \frac{\text{HRC}}{d}$ （或 $J \times \times - d$ ）表示，其中 d 为距水冷端的距离（ mm ），HRC

（或 $\times \times$ ）为该处测得的洛氏硬度值，如淬透性 $J \frac{42}{5}$ （或 J42-5），即表示距水冷端 5mm 处的硬度值为 42HRC。

在生产中，还常采用临界直径法来表示钢的淬透性的高低。临界直径系指钢在某种淬火介质中，其心部恰好能被淬透（淬成 50% 马氏体）时的最大直径（ D_c ）。通过在相同淬火介质中 D_c 大小的不同，即可判别不同钢种淬透性的高低，显然，临界直径愈大，钢的淬透性就愈好。但是在其它条件一定时，临界直径将随淬火介质的冷却能力而改变。为了排除冷却条件的影响，引入了理想临界直径的概念。所谓理想临界直径（ D_I ），是假设淬火介质的淬火烈度值 H 为 ∞ 时，试样表面温度能立即冷却到淬火介质温度，而心部获得 50% 马氏体的最大直径。由于末端淬透性曲线图不能直接确定淬透工件尺寸大小。所以常通过理想临界直径和借助换算图表与末端淬火试验数据进行换算，便可求出不同直径圆柱形零件截面上的硬度分布，及实际淬透临界直径和确定零件的淬透层深度等。

换算图表的使用方法如图 2-8 所示。首先根据所测钢件的含碳量，由图 2-2 查出半马氏体区的硬度，并在该钢的淬透性曲线上找到相同硬度点，由此确定半马氏体区至淬火末端距离 (x)，然后在线解图（从略，可在相应教材或手册中查到）上方的横标尺上找出“ x 值”，引垂线和理想冷却介质 ($H=\infty$) 直线相交于点 1，再从交点 1 向左引水平线至选定的冷却介质的直线上（如水），交于点 2，再自点 2 引垂线到所测件形状的横坐标标度上，标度上所得读数即是实际临界直径或淬透层深度，如已知在水中的淬透性和零件形状时，还可按图 $1' \rightarrow 2' \rightarrow 3' \rightarrow 4'$ 的程序确定在其它淬火介质（如油）中的淬透层深度。

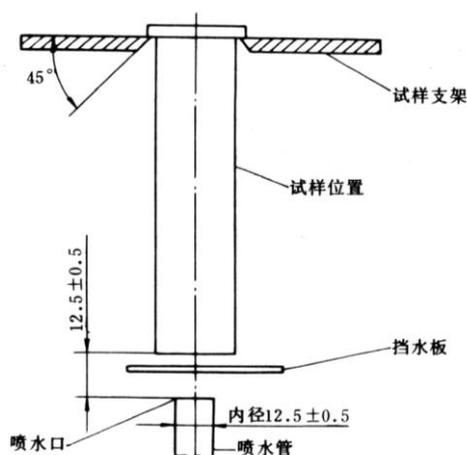


图 2-7 末端淬火试验示意图

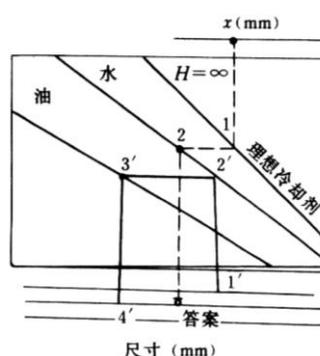


图 2-8 换算图表的使用方法

三、实验设备及材料

- 1、箱式电炉及控温仪表。
- 2、末端淬火设备。
- 3、砂轮机。
- 4、洛氏硬度计及测量夹具。
- 5、末端淬火试样（45 钢或 40 钢，与 45Cr、40Cr 等合金钢）或断口试验法圆柱形试样。试样尺寸均按“国标”规定。
- 6、游标卡尺。

四、实验内容及步骤

采用末端淬火法测定碳钢和合金钢的淬透性，实验步骤如下：

- 1、全班可分若干组进行实验。每组领取碳钢和合金钢试样各一件，并根据所测定的钢中确定淬火加热温度。
- 2、将试样先放入保护钢管内，并在钢管底部填方少量石墨粉，木炭或生铁屑，以防止加热时试样表面氧化及脱碳，然后把试样装入预先加到规定淬火温度的电炉中加热。
- 3、熟悉末端淬火操作方法，按标准中规定的试验条件要求，调整末端淬火设备，待调整完毕后用玻璃板盖好喷水口，做好淬火前准备。
- 4、试样加热到温并保温 30min 后，用钳子夹住头部取出，迅速准确放入末端淬火支架孔中，立即抽去玻璃板进行末端喷水淬火。试样自炉内取出至水淬开始的时间不得超过 5s，水淬时间应大于 10min，并保证试样轴线始终对准喷水口中心线，勿使水滴喷溅到试样侧面上，水压应稳定，以利冷却均匀。
- 5、将淬火后试样相对的两边各磨去 0.4~0.5mm 的深度（约 3~5mm 宽），在得到的两

相互平行的平面上，按规定测量硬度，一般测至 45~50mm 即可。在磨制试样时，应设法防止回火现象。

6、根据实验数据，绘制出所测试钢种的淬透性曲线。

五、实验报告要求

- 1、绘制所测定钢种的淬透性曲线，并分析合金元素对其淬透性的影响。
- 2、根据实验所绘出的淬透性曲线，利用淬透性换算图表，确定所试验钢种的理想临界直径以及在水中和油中淬火时的临界直径及钢件中心的冷却速度。
- 3、结合试验用钢的标准淬透性曲线，分析说明影响本实验结果精确性的因素。

实验三 钢铁材料的非平衡组织

一、实验目的

- 1、观察和研究碳钢经不同热处理后的显微组织。
- 2、了解几种钢铁材料在不同使用条件下的组织和性能的变化。

二、实验原理

碳钢退火后的组织是平衡组织，正火后的组织接近平衡组织；而经淬火得到的是不平衡组织。研究不平衡组织时，不仅要用铁碳合金相图来加以分析，而且更重要的是参考 C 曲线（钢的等温转变曲线）。图 3-1 为共析钢的 C 曲线图，它能说明一定成分的钢在不同冷却条件下的结晶过程以及所得到的组织。

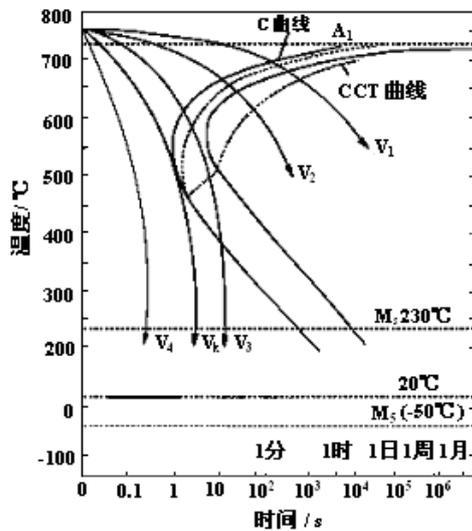


图 3-1 共析钢的 C 曲线图

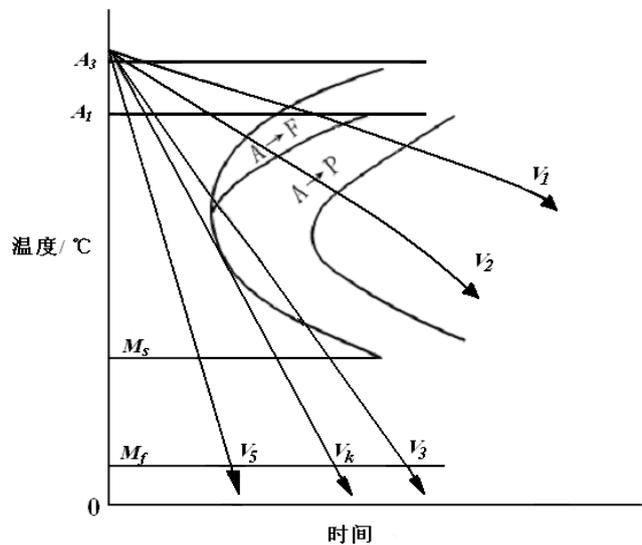


图 3-2 亚共析钢的 C 曲线图

V_1 —炉冷； V_2 —空冷； V_3 —油冷； V_4 —水冷

（一）共析钢连续冷却时的显微组织

共析钢经奥氏体化后慢冷时（例如炉冷、相当于图 3-1 中的 V_1 ），应得到 100% 的珠光体。冷速增大到 V_2 时（相当于空冷），得到的是较细的珠光体，即索氏体或屈氏体。当冷速增大到 V_3 时（相当于油冷），得到的为屈氏体和马氏体。冷速再增大到 V_k 、 V_4 时（相当于水冷），很大的过冷度使奥氏体骤冷到马氏体转变开始点（ M_s ），瞬时转变成马氏体。其中与 C 曲线鼻尖相切的冷却速度（ V_k ）称为淬火的临界冷却速度。

（二）亚共析和过共析钢连续冷却时的显微组织

亚共析钢的 C 曲线与共析钢相比，在珠光体转变开始前多一条铁素体析出线，如图 3-2 所示。

当钢缓慢冷却时（相当于炉冷，见图 3-2 中的 V_1 ），得到的组织为接近于平衡状态的铁素体加珠光体。随冷速的逐渐增加，由 $V_1 \rightarrow V_2$ 时，奥氏体的过冷程度增大，生成的先共析铁素体量减少，并且要沿晶界分布；同时珠光体量增多，含碳量下降，组织变得更细。因此与 V_1 、 V_2 对应的组织将为：铁素体+珠光体、铁素体+索氏体。

当冷却速度增加到 V_3 时，只析出很少量的网状铁素体和屈氏体（有时可见到少量的贝氏体），奥氏体则主要转变为马氏体。当冷速超过临界冷速 V_k 时，钢全部转变为马氏体组织。

过共析钢转变与亚共析钢相似，不同之处是亚共析钢先析出的是铁素体，而过共析钢先析出的是渗碳体。

(三) 基本组织的金相特征

1、索氏体(S)：是铁素体与片状渗碳体的机械混合物。片层分布比珠光体细密，在高倍(700×左右)显微镜才能分辨出层片状。

2、屈氏体(T)：也是铁素体与片状渗碳体的机械混合物。片层分布比索氏体更细密，在一般光学显微镜下无法分辨，只能看到黑色组织如墨菊状。当其少量析出时，沿晶界分布呈黑色网状包围马氏体。当析出量较多时，则呈大块黑色晶粒状，只有在电子显微镜下观察才能分辨其中的片层状。

层片愈细，则塑性变形抗力愈大，强度及硬度愈高，另一方面，塑性及韧性则有所下降。

3、贝氏体(B)：贝氏体主要有三种形态，即羽毛状上贝氏体、针状下贝氏体及粒状贝氏体。

a.上贝氏体(B_上)基本特征：条状铁素体大致平行排列，在铁素体条间分布与铁素体条轴相平行的条状渗碳体，同时铁素体条内有较高的位错密度，如图 3-3 所示。

b.下贝氏体(B_下)基本特征：有一定取向的黑色针状组织，比淬火马氏体易腐蚀，极类似于针状回火马氏体。针状铁素体内沉淀有碳化物，碳化物的取向与铁素体的长轴线呈 55~60°，如图 3-4 所示。

c.粒状贝氏体(B_粒)：在低中碳合金钢中，特别是连续冷却时(如正火、热轧空冷或焊接热影响区)往往出现这种组织，在等温冷却时也可能形成，其形成温度在中温转变区的较高温度，是由铁素体和它所包围的小岛状组织所组成，如图 3-5 所示。岛状组织刚形成时为富碳奥氏体，随后的转变可以有三种情况：分解为铁素体和碳化物；发生马氏体转变；仍然保持为富碳的奥氏体。



图 3-3 B_上 500×

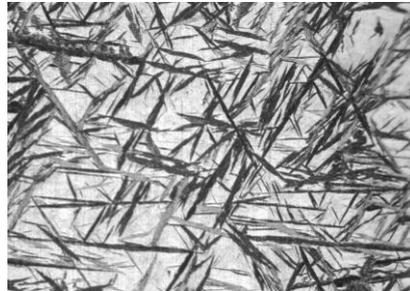


图 3-4 B_下 500×



图 3-5 B_粒 200×

4、马氏体(M)：是碳在 α -Fe中的过饱和固溶体。马氏体组织形态按其碳含量的高低分为两种，即板条马氏体和片状马氏体。

a.板条状马氏体：一般低碳钢或低碳合金钢淬火后得到图 3-6 所示的板条状马氏体组织。其组织特征：尺寸大致相同的细马氏体条定向平行排列组成马氏体束或马氏体领域。在领域

与领域之间位向差较大，一颗原始的奥氏体晶粒内可形成几个不同的马氏体领域。板条状马氏体具有较低的硬度，好的韧性。

b.片状马氏体：含碳量较高的钢淬火后马氏体呈片状（针状、透镜状、竹叶状）存在，如图 3-7 所示。它区别于板条状马氏体的主要特征：板条状马氏体中毗邻的一根根马氏体是平行的，长度大致相同的狭条；而在片状马氏体中片间不相互平行，在一个奥氏体晶粒内形成的第一片马氏体较粗大，往往横穿整个奥氏体晶粒，将奥氏体晶粒加以分割，使以后形成的马氏体片的大小受到限制。因此片状马氏体的大小不一。同时有些马氏体有一条中脊面，并在马氏体片周围有残余奥氏体存在。

片状马氏体具有高的硬度，低的韧性。

5、回火马氏体：片状马氏体经低温回火（150~250℃）后，得到图 3-8 所示的回火马氏体。它仍具有针状特征，由于有极小的碳化物析出使回火马氏体易受浸蚀，所以在光学显微镜下，颜色比淬火马氏体深。

6、回火屈氏体：淬火钢在中温回火（350~500℃）后，得到回火屈氏体组织。其中金相特征是：原来条状或片状马氏体的形态仍基本保持，第二相析出在其上。回火屈氏体中的渗碳体颗粒很细小，以致在光学显微镜下难以分辨，用电镜观察时发现渗碳体已明显长大。

7、回火索氏体：淬火钢在高温回火（500~650℃）后得到图 3-9 所示的回火索氏体组织。它的金相特征是：铁素体基体上分布着颗粒状渗碳体。碳钢调质后回火索氏体中的铁素体已成等轴状，一般已没有针状形态。

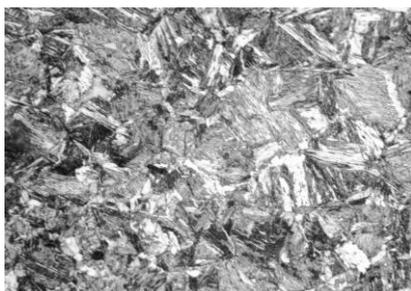


图 3-6 M_板 200×

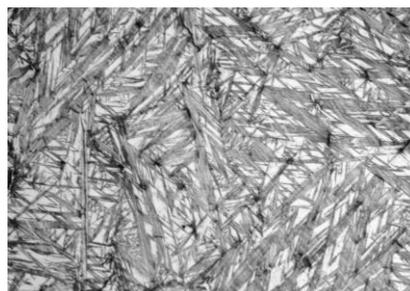


图 3-7 M_针（淬火态，白针） 200×

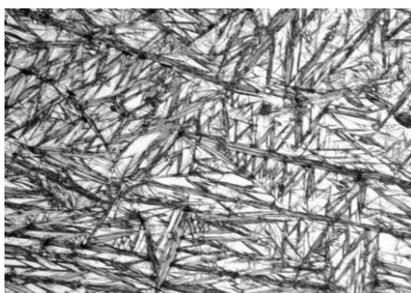


图 3-8 M_针（回火态，黑针） 200×

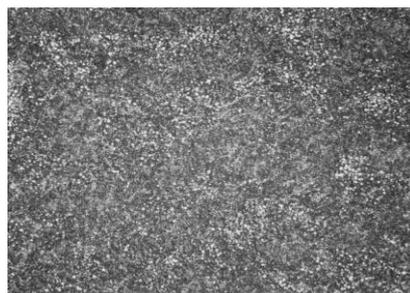


图 3-9 S_回（GCr15 淬火+回火） 500×

(四) 电厂金属的组织与性能

在火力发电行业中，用作蒸汽参数不超过 540℃、金属壁温不超过 580℃的锅炉管件材料主要为 20、15CrMo、12Cr1MoV 等碳钢或低合金钢，在高温长时（达数万、甚至数十万小时）运行过程中，其组织会发生明显的变化，特别是珠光体球化，即珠光体中的渗碳体（碳化物）形态由最初的片层状逐渐转变成球状，材料的力学性能也随之下降。球化现象的产生是因为层片状渗碳体的表面能较高，它总是要向能量低的球状渗碳体形状转变。在常温下，由于原子的扩散速度非常缓慢，即使使用很长时间，也不易觉察到这种转变过程。随着温度的提高，原子扩散速度加快，球化过程就变得明显，性能趋势劣化。

对 12Cr1MoV 而言，其正常供货状态（正火态）的显微组织为铁素体+珠光体，珠光体区域明显，珠光体中的碳化物呈层片状，如图 3-10 所示；图 3-11 为发生部分球化（轻度球化）的组织特征，珠光体区域仍较完整，部分碳化物呈粒状，晶界出现较多的碳化物颗粒；图 3-12 为完全球化组织，原珠光体的区域形态特征消失，只留有少量粒状碳化物，晶界碳化物聚集长大。

图 3-13 为锅炉管 12Cr1MoV 的纵向带状组织。带状组织常常出现在热轧低碳钢和低合金钢中，其产生与钢锭中树枝状偏析有关，树枝状结晶导致钢锭中某些合金元素偏析，形成合金元素贫区和富区。在轧制过程中合金元素贫区和富区均沿轧制方向延伸，在轧后的冷却或热处理中优先沿贫区析出铁素体，沿富区析出珠光体，从而形成带状组织。此外，钢中的显微夹杂物也容易在树枝状结晶区富集，在热轧中这些夹杂物呈带状分布，在冷却时铁素体就会以此为核心首先析出，形成铁素体带状组织。

带状组织使金属材料的机械性能产生方向性，特别是横向的塑性和韧性明显降低，使材料的切削性能恶化。试验表明，带状组织使钢在垂直于轧制方向（即垂直于带状组织方向）的伸长率、断面收缩率及冲击值降低，但对钢的屈服强度和抗拉强度影响不大。

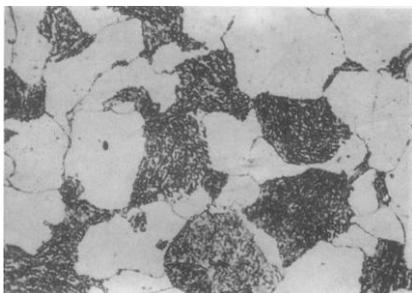


图 3-10 12Cr1MoV 一级 1000×

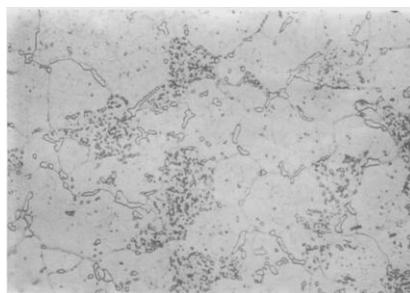


图 3-11 12Cr1MoV 三级 1000×



图 3-12 12Cr1MoV 五级 1000×

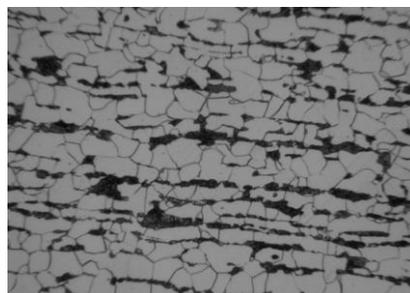


图 3-13 12Cr1MoV 带状组织 200×

三、实验设备及材料

- 1、金相显微镜
- 2、各种碳钢热处理后的显微样品及其它使用后的样品一套（见表 3-1）

四、实验内容与步骤

- 1、观察和分析表 3-1 所列试样的显微组织。
- 2、给出所观察样品的显微组织示意图，画图时应抓住组织形态的主要特征，并在图中表示出来。

表 3-1 要求观察的样品

序号	材料	处理状态	浸蚀剂	显微组织
1	20	920℃水冷	4%硝酸酒精	M _板
2	T12	1100℃水冷	4%硝酸酒精	M _针 +A _残
3	T12	1100℃水冷 150℃回火	4%硝酸酒精	M _针 +A _残
4	65Mn	等温淬火	4%硝酸酒精	B _上
5	65Mn	等温淬火	4%硝酸酒精	B _下
6	GCr15	淬火+回火	4%硝酸酒精	S _回
7	12Cr1MoV	新管（正火态）	4%硝酸酒精	F+P
8	12Cr1MoV	540℃高温运行约 5 万小时	4%硝酸酒精	F+C _m
9	12Cr1MoV	540℃高温运行约 12 万小时	4%硝酸酒精	F+C _m
10	12Cr1MoV	新管（正火态）	4%硝酸酒精	带状组织（F+P）

五、实验报告要求

- 1、简述实验目的与实验方法。
- 2、本实验的组织应用铅笔描绘在专门实验报告页中，并注明材料、状态、放大倍数，组织特征应在图中用引线标注。
- 3、对有关联的组织应作必要的分析，并对它们的性能变化作出基本描述。

实验四 其它常用金属材料的显微组织

一、实验目的

- 1、观察几种常用合金钢、铸铁和有色金属的显微组织。
- 2、分析这些金属材料的组织和性能的关系及应用。

二、实验原理

1、几种常用合金钢的显微组织

一般合金结构钢、低合金工具钢都是低合金钢。即合金元素总量小于 5% 的钢，由于加入了合金元素，使相图发生了一些变化，但其平衡状态的显微组织与碳钢没有质的区别。热处理后的显微组织仍然可借助 C 曲线来分析，除了 Co 元素之外，合金元素都使 C 曲线右移，所以低合金钢用较低的冷却速度即可获得马氏体组织。例如，40Cr 钢经调质处理后的显微组织和 45 钢调质后的显微组织基本相同，都是回火索氏体。又如 GCr15 钢，除作滚动轴承外，还广泛用作切削工具、冷冲模具、冷轧辊及柴油机喷嘴等。该钢经过球化退火、840℃ 油淬和低温回火后，得到的组织为隐针或细针回火马氏体和细颗粒状均匀分布的碳化物以及少量残余奥氏体（图 4.1）。

高速钢是一种常用的高合金工具钢。如 W18Cr4V 高速钢，因为含有大量合金元素，使 Fe-Fe₃C 相图中的 E 点大大向左移动，所以它虽然只含有 0.7%~0.8% 的碳，但已经含有莱氏体组织。在高速钢的铸态组织中可看到鱼骨状共晶碳化物，这些粗大的碳化物，不能用热处理方法去除，只能用锻造的方法将其打碎。锻造退火后高速钢的显微组织是由索氏体和分布均匀的碳化物组成。高速钢淬火加热时，有一部分碳化物未溶解，淬火后得到的组织是马氏体、碳化物和残余奥氏体（图 4.2）。碳化物呈颗粒状，马氏体和残余奥氏体都是过饱和的固溶体，腐蚀后都呈白色，无法分辨，但可看到明显的奥氏体晶界。为了消除残余奥氏体，需要进行三次回火，回火后的显微组织为暗灰色回火马氏体、白亮小颗粒状碳化物和少量残余奥氏体（图 4.3）。

1Cr18Ni9 是铬镍不锈钢中应用最广泛的一种奥氏体不锈钢。铬在钢中主要是产生钝化作用、提高电极电位而使钢的耐蚀性提高，镍的加入在于扩大 γ 相区以及降低 Ms 点，以保证室温下得到奥氏体组织。这种钢缓冷到室温时，在奥氏体晶界处常会出现碳化物和铁素体，易引起晶间腐蚀，所以必须加热到 1050~1100℃ 左右迅速水冷（固溶处理），使其得到全部奥氏体的单相组织（图 4.4），才具有良好的耐腐蚀性能，但若使用温度较高（450~850℃）时，从奥氏体晶界处又会有碳化铬（Cr₂₃C₆）析出造成晶间腐蚀，为防止晶间腐蚀的产生，钢中的含碳量应降至 0.06% 以下，或是加入少量的钛或铌。因此出现了 1Cr18Ni9Ti、0Cr18Ni9Ti 等以及更复杂牌号的奥氏体镍铬不锈钢。

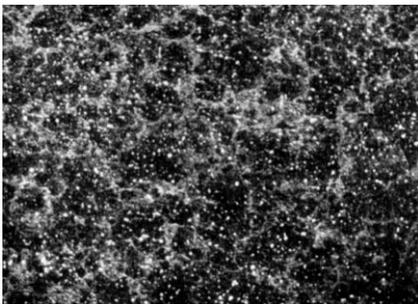


图 4.1 GCr15 钢的淬火回火组织

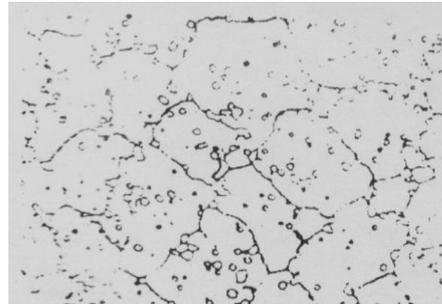


图 4.2 W18Cr4V 钢的淬火组织

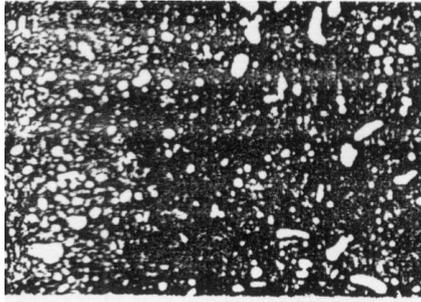


图 4.3 W18Cr4V 钢的淬火回火组织

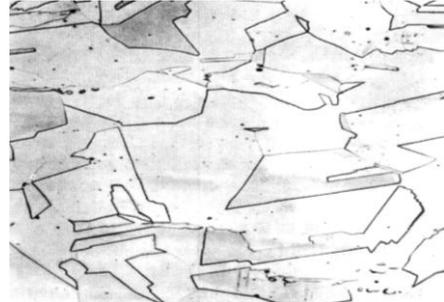


图 4.4 1Cr18Ni9 钢淬火后的组织

2、铸铁的显微组织

依铸铁在结晶过程中石墨化程度不同，可分为白口铸铁、灰口铸铁和麻口铸铁。白口铸铁具有莱氏组织而没有石墨，碳几乎全部以碳化物形式 (Fe_3C) 存在；灰口铸铁没有莱氏组织，而有石墨，即碳部分或全部以石墨的形式存在。因此，灰口铸铁的组织可以看成是由钢基体和石墨所组成，其性能也由组织的这两个特点所决定；麻口铸铁的组织介于灰口铸铁与白口铸铁之间。白口铸铁和麻口铸铁由于莱氏体的存在而具有较大的脆性。

(1) 石墨。石墨本身的强度、硬度、塑性都很低，几乎等于零。因此，石墨对铸铁的性能影响极大。石墨的形状愈细长、粗大或分布不均匀，则产生应力集中的程度就愈严重，从而大大降低铸铁的强度和塑性。

(2) 基体组织。根据石墨化程度不同，铸铁的基体组织亦不同，一般情况下，可分为三种：铁素体、珠光体+铁素体、珠光体。

(3) 各种铸铁的显微组织特征。

灰口铸铁：石墨呈粗片状析出，如图 4.5 所示。

球墨铸铁：在铁水中加入球化剂，浇注后石墨呈球状析出，如图 4.6 所示。球状石墨的存在可使铸铁内部的应力集中现象得到改善，同时减轻了对基体的割裂作用，从而充分地发挥了基体性能的潜力，使球墨铸铁获得很高的强度和一定的韧性。

可锻铸铁：将白口铸铁可锻化退火，使石墨呈团絮状析出，如图 4.7 所示。

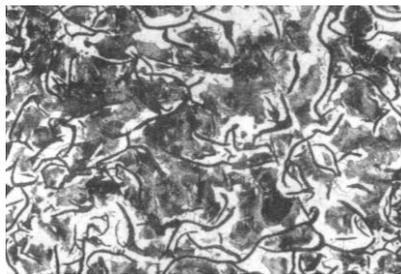


图 4.5 F+P 基体灰口铸铁组织

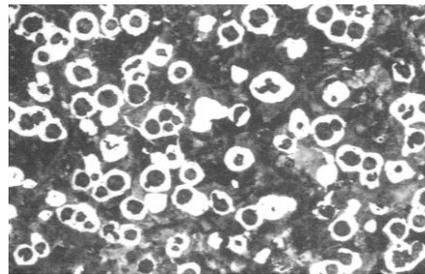


图 4.6 P+F 基体球墨铸铁组织

3、几种常用有色金属的显微组织

(1) 铝合金。铝合金应用十分广泛，分为形变铝合金和铸造铝合金。

铝硅合金是广泛应用的一种铸造铝合金，俗称硅铝明，含 11%~13%的 Si。从 Al-Si 合金相图可知，硅铝明的成分接近共晶成分，铸造性能好，铸造后得到的组织是粗大的针状硅和 α 固溶体组成的共晶体 (图 4.8)。硅本身极脆，又呈针状分布，因此极大地降低了合金的塑性和韧性。为了改善合金质量，可进行“变质处理”。即在浇注时，往液体合金中加入 2%~3%的变质剂 (常用钠盐混合物： $2/3\text{NaF}+1/3\text{NaCl}$)，可使铸造合金的显微组织显著细化。变质处理后得到的组织已不是单纯的共晶组织，而是细小的共晶组织加上初晶 α 相，即亚共晶

组织，如图 4.9 所示。

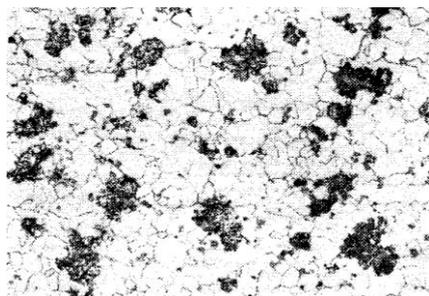


图 4.7 F 基体可锻铸铁组织

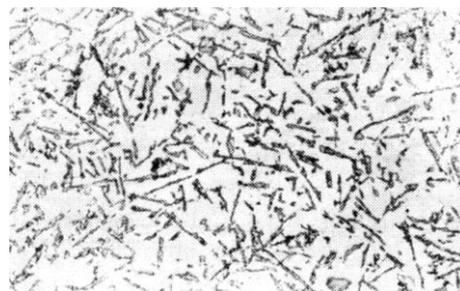


图 4.8 未变质处理的硅铝明合金组织

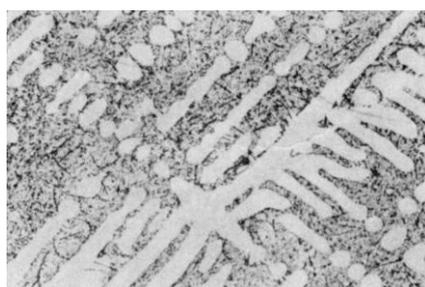


图 4.9 经变质处理后硅铝明合金组织



图 4.10 单相黄铜的组织

(2) 铜合金。最常用的铜合金为黄铜（Cu-Zn 合金）及青铜（Cu-Sn 合金）。

根据 Cu-Zn 合金相图，含 39% 以下 Zn 的黄铜，其显微组织为单相 α 固溶体，故称单相黄铜，其塑性好，可制造深冲变形零件。常用单相黄铜为含 30% 左右 Zn 的 H70 黄铜，在铸态下因晶内偏析经腐蚀后呈树枝状，变形并退火后则得到多边形的具有退火孪晶特征的 α 晶粒，如图 4.10 所示，因各个晶粒位向不同，所以具有不同深浅颜色。

含 39%~45% Zn 的黄铜，其组织为 $\alpha + \beta'$ (β' 是 CuZn 为基的有序固溶体)，故称双相黄铜。在低温时性能硬而脆，但在高温时有较好的塑性，适于热加工，可用于承受大载荷的零件，常用的双相黄铜为 H62，其铸态组织经三氯化铁盐酸水溶液浸蚀后， α 晶粒呈亮白色， β' 晶粒呈暗黑色，如图 4.11 所示。

(3) 轴承合金。巴氏合金是滑动轴承合金中应用较多的一种。锡基巴氏合金中含 83% Sn、11% Sb、6% Cu。其显微组织是在软的 α 固溶体的基体上分布着方块状 β' （以化合物 SnSb 为基的有序固溶体）硬质点及白色星状或放射状的 Cu_6Sn_5 ，如图 4.12 所示。

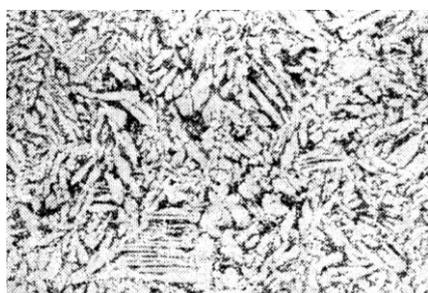


图 4.11 双相黄铜组织

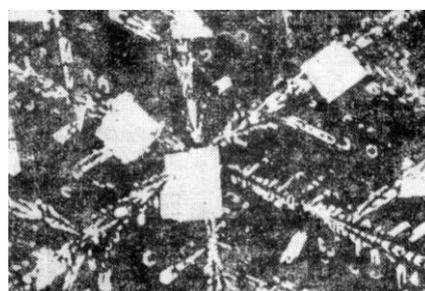


图 4.12 ZChSnSb11-6 合金组织

三、实验设备及材料

- 1、金相显微镜；
- 2、各类合金材料的金相显微试样（表 4.1）。

四、实验内容及步骤

- 1、领取各种类型合金材料的金相试样（表 4.1），在显微镜下进行观察，并分析其组织形态特征。
- 2、观察各类成分的合金要结合相图和热处理条件来分析应该具有的组织，着重区别各自的组织形态特点。
- 3、认识组织特征之后，再画出所观察试样的显微组织图。画组织图时应抓住组织形态的特点，画出典型区域的组织。

表 4.1 常用金属材料显微样品

序号	材料	处理状态	浸蚀剂
1	GCr15	840℃油淬，150℃回火	3%硝酸酒精溶液
2	W18Cr4V	1 260℃~1 280℃油淬	3%硝酸酒精溶液
3	W18Cr4V	1 270℃油淬，560℃三次回火	3%硝酸酒精溶液
4	1Cr18Ni9	1050~1100℃水冷	王水溶液
5	灰铸铁	铸造状态	3%硝酸酒精溶液
6	可锻铸铁	可锻化退火	3%硝酸酒精溶液
7	球墨铸铁	正火	3%硝酸酒精溶液
8	硅铝明（ZL102）	铸态(未变质处理)	0.5%氢氟酸溶液
9	硅铝明（ZL102）	铸态(变质处理)	0.5%氢氟酸溶液
10	H70 黄铜	退火态	3%FeCl ₃ +10%HCl 水溶液
11	锡基轴承合金	铸态	3%硝酸酒精溶液

五、实验报告要求

- 1、写出实验目的。
- 2、画出所观察过的组织，并注明材料名称、处理状态、浸蚀剂和放大倍数。显微组织图画在直径为 40mm 的圆内，并将组织组成物名称以箭头引出标明。

综合 A 铝合金的制备加工与组织性能分析

一、实验目的

- 1、通过对形变铝合金进行熔铸、热挤压、热处理、组织性能分析等全过程的试验分析，了解形变铝合金的制备加工方法，掌握时效热处理工艺对形变铝合金组织性能的影响规律。
- 2、通过不同的热处理工艺探索，获得试验用材的最佳时效热处理工艺方案。

二、实验原理

1、铝合金的熔炼与铸锭

熔炼和铸锭生产是铝及铝合金加工工艺中首要的组成部分，其主要目的是：配制合金；通过适当的工艺措施（如精练和过滤）提高金属净度；铸造成型。它不仅提供符合加工要求的优质铸锭，而且铸锭质量在很大程度上会影响后续压力加工过程和制品的质量。

铝合金在熔炼过程中吸气能力很强，容易产生气孔，这就给熔炼过程带来很大的困难。铸锭中的夹杂物，除少量是由生产设备和工艺过程带入外，主要是铝的化学性质非常活泼，在熔融状态下与氧、氮等元素化合而生成氧化物、氮化物、碳化物和硫化物等非金属夹杂物及氧化膜。因此，在熔铸过程中，若对液态铝中所溶解的气体和含有的非金属夹杂物处理不当时，就会在铸锭中造成疏松、气孔、夹杂等冶金缺陷。为此必须采用相应的净化处理措施予以防止和消除。

铝及铝合金的铸锭方法，随着生产技术的不断进步，已出现二十余种，总的可归纳为铁模、水冷模铸锭法，连续、半连续铸锭法及连续铸轧法三大类。实验室条件下一般采用铁模铸造。

2、铝合金的热挤压

在铝及铝合金半成品生产中，挤压是主要的成型工艺之一，挤压产品（型材、管板、线材及棒材）占全部半成品的 30% 左右。挤压方法的基本特点是：（1）具有有利于金属塑性变形的应力状态，即强烈的三向压缩应力状态。（2）变形金属与工具间存在着较大的外摩擦力，使变形很不均匀。（3）对生产许多高合金化的铝合金，可获得挤压效应。由于挤压具有以上特点，因而获得了广泛的应用。

根据金属对挤压杆运动的特点，金属挤压方法主要有正向挤压法和反向挤压法。其他的还有连续挤压法、横向挤压法、联合挤压法、液体金属挤压法和冲击挤压法等。

实验室条件下为了获得后续试验用的棒状试样，一般采用正向挤压法。

3、铝合金的热处理

热处理是为了改变金属制品的力学性能、冶金组织或残余应力状态而进行的加热与冷却的作业。然而对铝合金来说，往往局限于为增加可沉淀硬化的锻造和铸造铝合金的强度与硬度。这类铝合金被称作为“可热处理强化的合金”。而另一类铝合金通过加热和冷却不能达到明显强化，通常称为“非热处理强化的合金”，在锻造形式下主要靠冷作加工提高硬度，如防锈铝合金。本试验用材属可热处理强化的合金。

众所周知，对于含碳量较高的钢，经淬火后立即获得很高的硬度，而塑性则很低。然而对铝合金则不然，铝合金刚淬火后，强度与硬度并不立即升高，至于塑性非但没有下降，反而有所上升。但这种淬火后的合金，放置一段时间（如 4-6 昼夜后），强度和硬度会显著提高，而塑性则明显降低。淬火后铝合金的强度、硬度随时间增长而显著提高的现象，称时效。时效可以在常温下发生，称自然时效，也可以在高于室温的某一温度范围内发生，称人工时效。

三、实验设备与材料

1、实验用材料为某锻造铝合金(LDX)，由于本综合实验的特殊要求，指导教师不提供明确的锻铝型号。

2、ZG25 真空感应电炉一套，315T 液压机一套，铸模、挤压模若干组。

3、各类热处理炉、显微镜、硬度计。

4、各类金相制样设备，各类微观分析用耗材。

四、综合实验的要求

1、实验安排的建议

建议采用的工艺路线为：备料（由实验室完成）→熔铸→热变形（热挤压）→热处理→组织分析、性能分析。对铝合金的熔铸及热挤压过程，主要以观摩或部分参与的方式进行，获得棒材后的后续试验工作，则建议全班同学按自由结合或抽签方式，分为若干组进行，如铸态及热形变态铝合金的组织性能分析、热处理（自然时效）后的性能变化、热处理（人工时效）后的性能变化等，其中人工时效的工作量较大，所需人员应充分配备，建议按 1:1:8~10 分组。

分组确定后按各自的实验目标进行文献查阅，讨论拟定试验方案，形成实验预习报告并经指导老师确认后进入开放实验室进行试验。

试验时间的具体安排由各组向实验室预约，一般应在三周内完成试验任务，在各组完成实验总结并形成报告（PPT 格式）后，进行全班集中汇报、讨论。

2、关于实验预习报告的要求

- ① 简述实验目的及实验原理
- ② 实验方案及热处理工艺参数
- ③ 可能选用的设备
- ④ 金相组织侵蚀剂的选择

五、实验报告要求(电子版)

- 1、简述实验目的、原理、实验方法、设备及材料
- 2、实验结果(金相组织均采用数码采集)
- 3、分析讨论(各个阶段的组织与性能变化规律等)
- 4、参考文献
- 5、建议

六、注意事项

1、实验室在三周中对实验学生重点支持，实行 24 小时完全开放的管理模式，双休日也可安排进行试验。使用热处理炉及大型设备，应提前半天向实验室预约。热处理炉、显微镜及大型设备均应填写使用记录。

2、安全有序开放。开始实验前进行一次集中安全教育。

综合 B 钢铁材料

一、实验目的

1、通过完全开放的实验模式，针对不同专题的内容与要求，自主进行试验方法的设计与实施，充分发挥学生的自主创新能力，注重灵活运用专业知识能力的培养。

2、灵活掌握现代分析测试技术（如数码采集、图像分析软件、计算机模拟仿真、电子版报告等）。

二、实验原理

本实验分为若干个专题，没有设定现成的实验过程与方法，各专题所依据的实验原理必须通过实验者本人按实验要求去进行检索、查阅。

三、实验设备与材料

1、可供选择的仪器设备

- ① 各类制样设备，各类化学药品等耗材
- ② 各类显微镜
- ③ 各类硬度计、试验机
- ④ 各类热处理炉：高温炉（1000~1250℃）、中温炉（300~1000℃）、烘箱（室温~300℃）、硝盐炉（150~550℃）。

2、可供选择的原材料

工业纯铁、20、20G、HRB335、Q235、Q345、45、T8、T12、40Cr、65Mn、GCr15、12Cr1MoV、35CrMo、5CrNiMo、CrWMn、6542、3Cr2W8V、Cr12MoV、2Cr13、3Cr13、1Cr18Ni9Ti、1Cr17Ni7、Cr25Ni20、ZG20CrMo、T22(10CrMo910)等。

四、综合实验的内容及要求

1、实验安排

本实验设立了近 20 个专题，每个专题由 2~3 人完成，一般按自由结合或抽签方式完成分组，分组确定后按各自的实验目标进行文献查阅，拟定试验方案，形成实验预习报告并经指导老师确认后进入开放实验室进行试验。

试验时间的具体安排由各组向实验室预约，一般应在二周内完成试验任务，个别专题可能难度较大、反复较多，可放宽至三周内完成，在各组完成实验总结并形成报告（PPT 格式）后，进行全班集中汇报、讨论。

2、实验预习报告要求

- ① 简述实验目的及实验原理
- ② 实验步骤及工艺参数(包括热处理温度、保温时间、冷却方式等)
- ③ 可能选用的设备及原材料
- ④ 金相组织侵蚀剂的选择

3、部分候选专题

- 1[#] 制备粗大针状马氏体组织的金相样品(黑针及白针)，自选材料及工艺。(*)
- 2[#] 制备含上贝氏体组织的金相样品，自选材料及工艺。(***)
- 3[#] 制备含下贝氏体组织的金相样品，自选材料及工艺。(*)
- 4[#] 钢板中魏氏组织的分析与改善。(*)
- 5[#] 钢管中带状组织的改善或消除。(20G)(*)

- 6[#] 合金铸钢(主汽门套盖)中魏氏组织的改善或消除。(ZG20CrMo) (**)
 - 7[#] 无磁不锈钢(对焊三通)的磁性消除。(1Cr18Ni9Ti) (*)
 - 8[#] 不锈钢板的组织与性能改善。(1Cr17Ni7) (**)
 - 9[#] 锅炉管的组织状态鉴别。(T22) (**)
 - 10[#] 铝线夹的断裂原因分析。 (***)
 - 11[#] 锅炉高温悬吊管爆管原因分析。(20G) (**)
 - 12[#] 不锈钢螺栓的断裂原因分析。 (**)
 - 13[#] 钢板冷弯开裂原因的分析 (***)
 - 14[#] 45[#]钢圆(Φ 18 \times 5), 要求硬度达到 HRC 55~60 及 HRC 28~32, 含各阶段的组织分析。
 - 15[#] T12 钢圆(Φ 16 \times 5), 要求硬度达到 HRC 62~66 及 HRC 58~62, 含各阶段的组织分析。
 - 16[#] 球铁及灰铁的组织评定。
 - 17[#] 6542 高速钢的性能改善 (***)
 - 18[#] 其它工程实际项目若干
- 上述各项目注有不同数量的“*”号, “*”越多, 表示难度越大。

五、实验报告要求(电子版)

- 1、简述实验目的、原理、实验方法、设备及材料
- 2、实验结果(处理前后的组织图片, 均采用数码采集)
- 3、分析讨论(包括对缺陷组织的评价, 热处理前后的组织与性能变化规律等)
- 4、参考文献
- 5、建议

六、注意事项

- 1、实验室在三周中对实验学生重点支持, 实行 24 小时完全开放的管理模式, 双休日也可安排进行试验。使用热处理炉及大型设备, 应提前半天向实验室预约。热处理炉、显微镜及大型设备均应填写使用记录。
- 2、安全有序开放。开始实验前进行一次集中安全教育。

附录 I 常用金属材料的浸蚀剂

	序号	浸蚀剂名称	成分	作用与使用特点
铸铁和钢	1	硝酸酒精溶液	HNO ₃ 1~5ml C ₂ H ₅ OH 100 ml	显示一般组织
	2	苦味酸酒精溶液	C ₆ H ₂ (NO ₂) ₃ OH 4g C ₂ H ₅ OH 100ml	显示一般组织，作用较缓。
	3	氯化高铁盐酸酒精溶液	FeCl ₃ 5g HCl 2ml C ₂ H ₅ OH 95ml	显示奥氏体钢组织。
	4	硝酸盐酸甘油溶液	HNO ₃ 1份 HCl 2份 甘油 3份	显示奥氏体不锈钢中δ-Fe。
	5	硝酸盐酸水溶液	HNO ₃ 10% HCl 10% H ₂ O 80%	显示奥氏体钢组织。
	6	荷性苦味酸钠水溶液	C ₆ H ₂ (NO ₂) ₃ OH 2g NaOH 25g H ₂ O 100ml	铸铁磷共晶中碳化物着色（热浸蚀）。
铝及铝合金	7	混合酸溶液	HF 1ml HCl 1.5ml HNO ₃ 2.5ml H ₂ O 95ml	适用于形变铝合金组织的显现。
	8	氢氟酸水溶液	HF 0.5ml H ₂ O 99.5ml	适用于铸铝合金组织的显现。
	9	氢氧化钠水溶液	NaOH 10g H ₂ O 100ml	适用于显现铸造铝合金的树枝状组织特殊相（热浸蚀）。
铜及铜合金	10	氯化高铁盐酸水溶液	FeCl ₃ 5g HCl 10ml H ₂ O 100ml	使用于铜合金组织的显现。
	11	氯化高铁盐酸酒精溶液	FeCl ₃ 5g HCl 2ml C ₂ H ₅ OH 95ml	作用同上，腐蚀较缓和。
	12	氢氧化铵—双氧水混合溶液	NH ₄ OH 40ml H ₂ O ₂ 10ml	适用铸造铜合金组织的显现。
镁及镁合金	13	硝酸酒精溶液	HNO ₃ 2~10ml C ₂ H ₅ OH 100ml	擦蚀
	14	醋酸水溶液	CH ₃ COOH 20ml HNO ₃ 1ml 蒸馏水 19ml	显示锍偏析作用与硝酸酒精相反。
低熔点合金	15	硝酸酒精溶液	HNO ₃ 1~5ml C ₂ H ₅ OH 100ml	显示低熔点合金一般组织。
	16	氯化高铁盐酸酒精溶液	FeCl ₃ 5g HCl 2ml C ₂ H ₅ OH 95ml	一般组织显示，但作用较强烈。

附录 II 参考文献

- 1、戚正风. 热处理原理. 机械工业出版社, 1986
- 2、刘永铨. 钢的热处理. 机械工业出版社, 1986.8
- 3、王笑天. 金属材料学. 机械工业出版社, 1986.6
- 4、崔崑. 钢铁材料及有色金属材料. 机械工业出版社, 1980.4
- 5、胡志忠. 钢及其热处理曲线手册. 国防工业出版社, 1986.6
- 6、杜树昌. 热处理实验. 机械工业出版社, 1994.5
- 7、张士林等. 简明铝合金手册, 上海科技出版社. 2001.2
- 8、实验室收藏的各类金相组织图谱等, 校图书馆资料, 网上资源。