

普通高等教育机电类规划教材

热处理实验

南京理工大学 杜树昌 编

机械工业出版社

普通高等教育机电类规划教材

热 处 理 实 验

南京理工大学 杜树昌 编



机 械 工 业 出 版 社

前 言

本书是根据1990年4月天津“金属热处理课程研讨会”和1991年9月成都“全国金属材料及热处理专业教学指导委员会会议”的决定，为适应高等学校本专业新定教学大纲和加强实践性教学环节的需要而编写的，可与目前使用的《金属热处理原理》和《热处理工艺学》基本教材配套使用。

“热处理原理”和“热处理工艺”是金属材料及热处理专业的主要专业课，金属材料及热处理是在生产实践中形成和发展起来的一门科学技术，其主要理论都是通过总结实践或实验的规律而建立的。所以本课程与生产实际关系密切，具有很强的实践性特点。因此热处理实验是专业课程的组成部分，是加强实践性教学的主要环节之一。通过实验可以验证和深化课堂讲授的有关理论，又可进一步培养学生分析和解决问题的能力及实际操作技能。

本书在编写内容时，明确提出实验目的和要求，较详细地叙述了实验原理，以便学生有目的地在理论指导下进行实验；对于实验的方法和步骤亦做了相应的介绍，并与工厂热处理产品检验紧密结合，使学生在阅读实验内容后即可动手做实验，同时又兼顾到各院校的具体情况，也可自行设计制定实验方案和方法，以利于学生独立思考和培养实际工作的能力。

全书内容包括十四个实验。按照教学大纲要求，其中必做实验九个（实验一至实验九），选做实验五个（实验十至实验十四）。选做的实验各院校可根据需要和具体条件选定。书中的实验基本上包含了“热处理原理”和“热处理工艺”两课程新定教学大纲及各院校现开设的该课程全部实验课内容。

本书是作者在南京理工大学多年教学实践的基础上编写而成，并由大连铁道学院戚正风教授主审。在审稿时对本书提出了宝贵的意见和建议。在编写过程中，得到了成都科技大学涂铭旌教授、刘民治教授、西安交通大学金志浩教授、华东工学院钱剑晨教授的支持和指导，同时部分院校向作者提供了同类资料做为参考，本院材料科学与工程系杨嘉骅、吴辉文等同志给予了大力协助，在此一并致谢。

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，诚恳希望广大读者批评指正。

杜树昌

1991.10

目 录

实验一	奥氏体晶粒度的测定及加热温度对奥氏体晶粒大小的影响	1
实验二	转变温度 (冷却速度) 对铁素体、珠光体形态及性能的影响	12
实验三	低、中、高碳钢淬火后马氏体形态的观察	19
实验四	低、中、高碳钢等温淬火所得贝氏体形态的观察	24
实验五	用金相法及硬度法测定 TTT 图或不同直径钢材淬火后混合 组织的硬度及显微组织观察	29
实验六	低、中、高碳钢淬火后不同温度回火后的性能及显微组织观察	38
实验七	钢的淬透性测定	44
实验八	各种典型化学热处理显微组织观察	51
实验九	高频表面淬火试验	57
实验十	钢的临界点的测定	65
实验十一	钢的马氏体点的测定	70
实验十二	奥氏体连续冷却转变曲线图的测定	73
实验十三	钢的热处理常见组织缺陷分析	78
实验十四	淬火介质冷却性能的测试	85
附录 A	常用化学浸蚀试剂	95
附录 B	常用钢的临界点、淬火及回火温度参考表	96
附录 C	钢的硬度与强度换算表	98
附录 D	钢的临界直径 D_c	100
附录 E	表 E-1 常用钢材在水、油介质中冷却时对应相同硬度的棒料直径	101
	表 E-2 淬火时各种尺寸的方形、长方形、板形截面换算 成圆形截面的直径	102
附录 F	表 F-1 钢材试样在不同淬火剂中的冷却速度和冷却强度	103
	表 F-2 冷却条件对冷却强度的影响	104
附录 G	盐浴 (碱浴) 介质简表	104
附图 1	碳化物级别标准	105
附图 2	马氏体、残余奥氏体级别标准	107
附图 3	心部铁素体级别标准	109
附图 4	碳素工具钢网状碳化物评级图	111
附图 5	合金工具钢网状碳化物评级图	112
附图 6	碳素工具钢珠光体组织评级图	113
附图 7	钢的魏氏组织评级图	114

实 验 一

奥氏体晶粒度的测定及加热温度对奥氏体晶粒大小的影响

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 Ac_1 或 Ac_3 、 Ac_m ）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。奥氏体晶粒度的级别 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；而本质晶粒度则是在特定加热条件下的奥氏体晶粒大小，可以表征奥氏体晶粒长大、粗化的倾向。晶粒度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化。

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。晶粒的显示是晶粒度测定的先决条件，常用的显示

⊖ 此处英寸暂保留。

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，为显示出原奥氏体晶界，需采取以下一些方法。

(1) 渗碳法 渗碳法显示奥氏体晶粒，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，提高试样表面层的含碳量，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一亮的碳化物（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。

本方法对含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 将欲测晶粒度的钢试样，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更大的化学活性，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。将试样两端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测晶粒度时，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_2 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中冷却，然后用冷水洗净、酒精冲洗并吹干，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 $\underline{C} \leq 0.35\%$ 时为 $900 \pm 10^\circ\text{C}$ ，保温 30min，当含 $\underline{C} > 0.35\%$ 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，可先缓慢冷却至 $700 \sim 730^\circ\text{C}$ ，等温保持十几分钟后再空冷到室温，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。

冷却速度是决定用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，铁素体堆集成块状，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 （冷却速度约为 $80 \sim 100^\circ\text{C} / \text{h}$ ）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，先将试样加热到 $900 \pm 10^\circ\text{C}$ ，保温 1h，然后自炉中取出，一端淬入水中冷却（约入水 1/3~2/5 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。由于试样从下端至上端冷却速度逐渐减小，因而沿轴向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，获得马氏体或贝氏体组织，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。

直接显示奥氏体晶界的腐蚀剂成分与使用条件是:

① 含有 0.5%~1% 烷基苯磺酸钠的 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 (20~70℃), 可选用 0.5min 至 3h, 由试验确定。如再向此腐蚀剂中加入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℃, 浸蚀约 10min 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		
30CrMnNi2MoA	930℃,保温 1.5~3h 水冷	500℃ 保温 30min 空冷
		600℃ 保温 30min 空冷

2) 马氏体腐蚀法。适用于淬火时得到马氏体的钢。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 1~2mL。

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体晶粒的显示，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	10	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。

如果切取及制备的试样，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，则可记录此一种晶粒的级别数，否则应用不同级别来表示该钢的晶粒度，其中第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数间关系表

图象的放 大倍数	与标准评级图编号等同图象的晶粒度级别									
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10
25	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
50	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
100	1	2	3	4	5	6	7	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

钢的晶粒度标准级别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，一般应采用截点法。

(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象投影在毛玻璃上，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)，再依弦的平均长度值根据晶粒级别对照表 (表 1-4)，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 长度的平均截点数量。每一轴线方向的平均截点数，必须在不少于三条直线上求得。

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；

$n_{\text{法}}$ ——法向上每 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，根据表 1-4 数据确定钢的晶粒度。

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 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 20\text{mm}$ 。

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) 制备试样

根据试验条件，选用 1~2 种试验用钢材制备成试样，在所有试样侧面打上钢号和次序号。

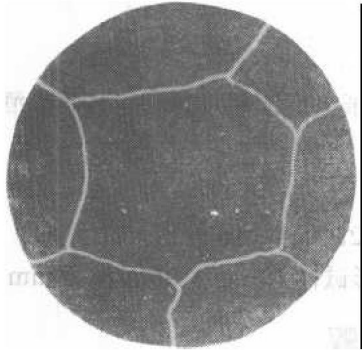
(二) 分组

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。

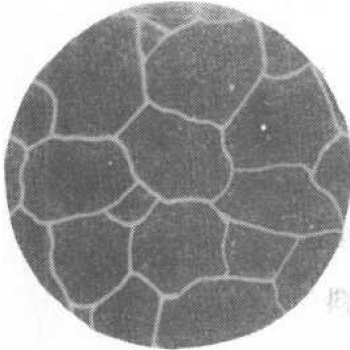
(三) 试样奥氏体晶粒的显示

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。

晶粒度	-3	-1	1	3	5	7
放大倍数	25	50	100	200	400	800



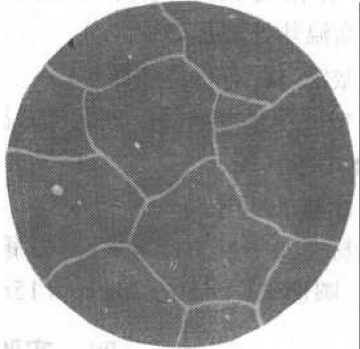
1 级



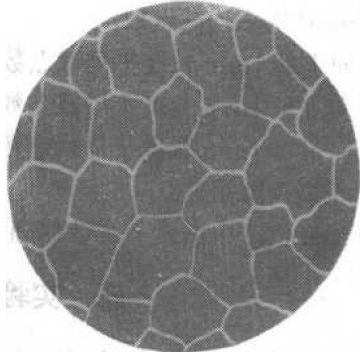
3 级

晶粒度	-1	1	3	5	7	9
放大倍数	25	50	100	200	400	800

晶粒度	-2	0	2	4	6	8
放大倍数	25	50	100	200	400	800



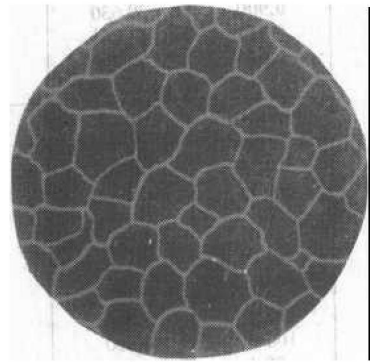
2 级



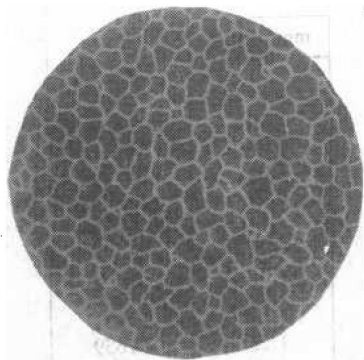
4 级

晶粒度	0	2	4	6	8	10
放大倍数	25	50	100	200	400	800

晶粒度	1	3	5	7	9	11
放大倍数	25	50	100	200	400	800



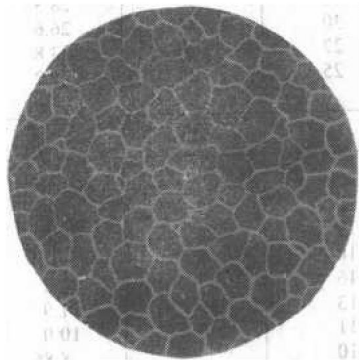
5 级



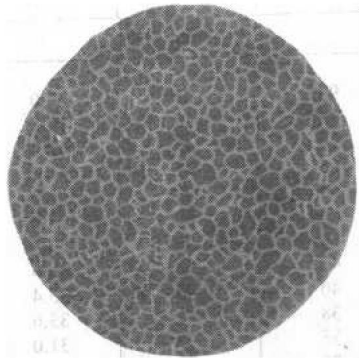
7 级

晶粒度	3	5	7	9	11	13
放大倍数	25	50	100	200	400	800

晶粒度	2	4	6	8	10	12
放大倍数	25	50	100	200	400	800



6 级



8 级

晶粒度	4	6	8	10	12	14
放大倍数	25	50	100	200	400	800

图 1-1 晶粒度标准级别图

表 1-4 任意取向的均匀、等轴晶粒度关系表

晶粒度 级别指数 G	晶粒截面 平均“直径”		平均截距 $\bar{l}(\text{mm})$	每毫米内 截点计数 n_l	平均晶粒 截面面积 $\bar{a}(\text{mm}^2)$	算出每立方毫 米内晶粒数 ^② n_V	平均每平方毫 米内晶粒数 n
	公称直径 $d_n(\text{mm})$	“弗里特”直 径 ^① $d_f(\text{mm})$					
-1	0.51	0.570	0.453	2.210	0.258	6.11	3.88
0	0.36	0.403	0.320	3.125	0.129	17.3	7.75
0.5	0.30	0.339	0.269	3.716	0.0912	29.0	11.0
1.0	0.25	0.285	0.226	4.42	0.0645	48.8	15.50
1.5	0.21	0.240	0.190	5.26	0.0456	82	21.9
...	0.200	0.226	0.177	5.64	0.0400	100	25.0
2.0	0.18	0.202	0.160	6.25	0.0323	138	31.0
2.5	0.15	0.170	0.135	7.43	0.0228	232	43.8
3.0	0.125	0.143	0.113	8.84	0.0161	391	62.0
...	0.120	0.135	0.106	9.41	0.0144	463	69.4
3.5	0.105	0.120	0.095	10.51	0.0114	657	87.7
...	0.100	0.113	0.089	11.29	0.0100	800	100
μm					$\text{mm}^2 \times 10^{-3}$		
4.0	90	101	80.0	12.5	8.07	1 105	124
4.5	75	85	67.3	14.9	5.70	1 859	175
...	70	79	62.0	16.1	4.90	2 331	204
5.0	65	71	56.6	17.7	4.03	3 126	248
...	60	68	53.2	18.8	3.60	3 708	278
5.5	55	60	47.6	21.0	2.85	5 258	351
...	50	56	44.3	22.6	2.50	6 400	400
6.0	45	50	40.0	25.0	2.02	8 842	496
...	40	45	35.4	28.2	1.60	12 500	625
6.5	38	42	33.6	29.7	1.43	14 871	701
...	35	39	31.0	32.2	1.23	18 659	816
7.0	32	36	28.3	35.4	1.008	25 010	992
...	30	34	26.6	37.6	0.900	29 630	1 111
7.5	27	30	23.8	42.0	0.713	41 061	1 400
...	25	28	22.2	45.1	0.625	51 200	1 600
μm					$\text{mm}^2 \times 10^{-6}$	$\times 10^6$	$\times 10^3$
8.0	22	25	20.0	50.0	504	0.0707	1.98
...	20	23	17.7	56.4	400	0.1000	2.50
8.5	19	21	16.8	59.5	356	0.1190	2.81
9.0	16	18	14.1	70.7	252	0.200	3.97
...	15	17	13.3	75.2	225	0.237	4.44
9.5	13	15	11.9	84.1	178	0.336	5.61
10.0	11	13	10.0	100	126	0.566	7.94
...	10	11.3	8.86	113	100	0.800	10.00
10.5	9.4	10.6	8.41	119	89.1	0.952	11.22
...	9.0	10.2	7.98	125	81.0	1.097	12.35
11.0	8	8.9	7.07	141	63.0	1.600	15.87
...	7.0	7.9	6.20	161	49.0	2.332	20.41
11.5	6.7	7.5	5.95	168	44.6	2.692	22.45
...	6.0	6.8	5.32	188	36.0	3.704	27.78
12.0	5.6	6.3	5.00	200	31.5	4.527	31.7
...	5.0	5.6	4.43	226	25.0	6.40	40.0
12.5	4.7	5.3	4.20	238	22.3	7.61	44.9
13.0	4.0	4.5	3.54	283	15.8	12.80	63.5
13.5	3.3	3.7	2.97	336	11.1	21.54	89.8
...	3.0	3.4	2.66	376	9.0	29.6	111.1
14.0	2.8	3.2	2.50	400	7.88	36.2	127
...	2.5	2.8	2.22	451	6.25	51.2	160

注: ① $d_f = \bar{a} / \bar{l}$.② $n_V = 0.5659 (n / \bar{l})^3$.

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 ($10^{\circ} \sim 15^{\circ}$)。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, 透热到温后保温 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 苦味酸饱和水溶液等腐蚀剂浸蚀, 由于晶粒边界被腐蚀变黑, 依此测定奥氏体晶粒度。腐蚀时间根据实验条件经试验确定。配制腐蚀剂时, 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, 或向腐蚀剂中加入少量新洁尔灭, 或将腐蚀剂加热到 $50 \sim 60^{\circ}\text{C}$ 后腐蚀均可。

3. 网状铁素体法

采用网状铁素体法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, 中碳合金钢选用炉冷。

(四) 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

转变温度（冷却速度）对铁素体、珠光体形态及性能的影响

一、实 验 目 的

- 1) 可解铁素体、珠光体组织形态特征及转变温度对组织形态的影响。
- 2) 掌握铁素体与珠光体的力学性能及转变温度对性能的影响。

二、实 验 原 理

钢件热处理时，首先将其加热到奥氏体状态，经保温后再以不同方式冷却而得到不同的组织结构和性能。

奥氏体在临界点温度以下是不稳定的组织，所以当奥氏体被冷却到临界点以下时，将转变为较稳定的组织。如果冷却过程很缓慢（ $<0.5\sim 1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ），则共析成分的奥氏体在冷却到 A_1 点稍下温度将分解为铁素体和渗碳体的机械混合物，即珠光体。而亚共析钢（或过共析钢）奥氏体在缓慢冷却过程中，则首先按 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图中 GS 线（或 ES 线）析出先共析铁素体（或先共析渗碳体）。随着铁素体（或渗碳体）的析出，奥氏体的含碳量逐渐增加（或减少）而向共析成分接近，最后具有共析成分的奥氏体在低于 A_1 点温度时再分解为珠光体。在实际生产中，零件经常采用退火与正火方法，其所发生的组织变化都是珠光体转变。退火与正火若作为最终热处理时，则必须控制珠光体转变产物——铁素体、渗碳体和珠光体的组织形态，以保证零件经退火和正火后的直接使用性能，如退火与正火作为预先热处理，则可为后继的冷、热成型加工或最后热处理作组织准备。因此，了解与掌握珠光体转变产物的组织形态和性能及转变温度（或冷却速度）对它们的影响，具有重要意义。

（一）珠光体组织形态与转变温度对它的影响

1. 组织形态

共析碳钢加热到奥氏体状态，再缓慢冷却到临界点 A_{r1} 温度下，将得到珠光体组织。珠光体的组织形态主要有两种，即片状珠光体和粒状珠光体。

片状珠光体是在奥氏体化温度较高时，由均匀的奥氏体转变而成的。转变开始时，先在缺陷较多、能量较高、原子易于扩散的奥氏体晶界上形成应变能小、容易接受碳原子的薄片状渗碳体晶核，然后



图 2-1 共析碳钢片状珠光体 $600\times$ (930 $^{\circ}\text{C}$ 炉冷)

晶核向前和向两侧长大，致使在渗碳体两侧的奥氏体晶界上又形成了铁素体晶核。如此交替

形成的渗碳体和铁素体晶核，不断地向奥氏体晶粒内部长大，而成长为一层铁素体与一层渗碳体相互交替堆叠成的机械混合物——珠光体。其典型的组织形态是片状的或层状的，如图 2-1 所示。

在片状珠光体中，片层方向大致相同的区域称为珠光体团，或称珠光体领域，亦称“珠光体晶粒”。在一个奥氏体晶粒内，可以形成几个珠光体团，每个珠光体团中，相邻两片渗碳体（或铁素体）中心之间的距离或一对铁素体和渗碳体片的总厚度，称为珠光体的片间距。采用金相法测定片状珠光体的片间距时，由于试样磨面对每个珠光体团切割角度不同，而使在显微镜下观察到的片间距差异很大。只有当试样磨制平面与珠光体片层相垂直时，所得到的片间距才与真实的片间距离相近。且在每个珠光体团内的真实片间距离也不是单值，而是在中间值附近的统计分布值。因而珠光体的片间距离应更确切地称为“平均片间距”，平均片间距一般比从磨面上观察到的最小片间距离约大 50% 左右。在平衡状态下，由杠杆定理可以求得铁素体与渗碳体的重量比约为 7.9 : 1，因此，铁素体片厚，渗碳体片薄。在用硝酸酒精溶液侵蚀情况下，铁素体的溶解速率较渗碳体大，所以渗碳体凸起。铁素体和渗碳体对光的反射能力相近，因此在明视场照明下二者均是明亮的，只是相界呈暗灰色，如放大倍数较低时，渗碳体片两侧相界已无法分辨，而呈黑色条状。

一般的所谓片状珠光体，是指在光学显微镜下能够明显分辨出铁素体与渗碳体片层组织的珠光体。此时片间距约为 150~150nm，这种珠光体，一般叫作“普通片状珠光体”如图 2-2a 所示，在 400~500 倍金相显微镜下，可观察到铁素体和渗碳体的片层状组织。

2. 转变温度的影响

随着奥氏体转变为珠光体温度的逐渐降低，即冷却速度不断增加，转变时的过冷度不断增大，则转变产物珠光体的片间距也不断减小。这是由于转变温度降低，碳的扩散速度减慢，碳原子难以进行较大距离的迁移，从而形成了片间距离较小的珠光体。如果珠光体的片间距离小到在放大倍率不大（<800~1000 倍）的光学显微镜下，也难以分辨铁素体与渗碳体的形态时，这种细片状珠光体称为索氏体（图 2-2b），由电子显微镜测得其片间距约为 80~150nm；如果转变温度再降低，则在更低温度下形成了片间距为 30~80nm 的极细片状珠光体，在光学显微镜下根本无法辨别其层片状特征，这种组织称为屈氏体（又称托氏体）（图 2-2c）。

各种片状珠光体的组织形态，用电子显微镜观察时，不论是片状珠光体还是索氏体或屈氏体，都是层片状珠光体型的组织，只是片间距不同，所以有时常称珠光体、索氏体和屈氏体为珠光体类组织。影响片间距的主要因素是转变温度，碳钢中珠光体的片间距与过冷度的关系，可用经验公式表达为：

$$S_0 = \frac{C}{\Delta T}$$

式中 S_0 ——珠光体片间距离(Å)；

$$C = 8.02 \times 10^4 (\text{Å} \cdot \text{K})$$

ΔT ——过冷度 (K)。

如果过冷奥氏体在连续冷却过程中转变为珠光体时，则珠光体的形成是在一个温度范围内进行的，在这种情况下，高温时形成的珠光体比较粗，低温形成的珠光体比较细，即得到了粗细不均匀的珠光体组织。