

高等学校教学用书

热处理与合金钢实验

冶金工业出版社

高等学校教学用书

热处理与合金钢实验

冶金工业出版社

高等学校教学用书
热处理与合金钢实验
北京钢铁学院 傅立元 主编

★

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街崇文门北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

★

850×1168 1/32 印张 4 字数 103千字

1985年11月第一版 1985年11月第一次印刷

印数00,001~6,450册

统一书号: 15062·4331 定价0.95元

前 言

本书适用于大专院校金属学及热处理专业的实验课教材，也可供从事金属材料及热处理工作的人员参考。

全书包括十五个实验内容，其中前九个为钢的热处理实验，后六个为合金钢实验。

热处理实验内容侧重于两个方面：（一）介绍经常使用的一些测试方法，如钢的临界点测定，奥氏体晶粒大小测定，等温转变及连续转变的 $T-T-T$ 曲线和 $C-C-T$ 曲线的测定，钢的淬透性测定以及化学热处理渗层深度的测定等；（二）提高学生对钢热处理后典型组织及混合组织的识别和分析能力，如用金相法测定 C 曲线时显微组织的分析，淬火及回火组织、化学热处理组织、钢中常见的显微缺陷组织以及钢中混合组织的分析等。

合金钢部分着重介绍合金元素对钢的使用性能和工艺性能的影响，以及合金元素对钢及合金在热处理后显微组织的影响。

通过这些实验，可以进一步培养学生综合分析问题和实际操作的能力。

本书是在北京钢铁学院金相教研室教师多年的教学实践的基础上编写的。实验一～四由胡梦怡编写，实验五～九由傅立元编写，实验十、十一由田琮编写，实验十二由吴承健编写，实验十三由冯松筠编写，实验十四、十五由周绍芳编写。本书由傅立元任主编。

对书中的缺点和错误之处，欢迎读者提出批评指正。

编 者

1985年2月

目 录

实验一	奥氏体晶粒大小的测定	1
实验二	钢的临界点与 M_s 点的测定	17
实验三	过冷奥氏体恒温转变综合动力学曲线($T-T-T$ 曲线)的测定	25
实验四	过冷奥氏体连续冷却转变综合动力学曲线($C-C-T$ 曲线)的测定	45
实验五	钢的淬透性测定	52
实验六	淬火回火对结构钢的组织与性能的影响	61
实验七	常见热处理显微缺陷的分析	65
实验八	化学热处理后渗层组织的观察及渗层厚度的测定	80
实验九	钢中混合组织的分析	91
实验十	合金结构钢的淬透性	95
实验十一	低合金钢焊接特性分析	103
实验十二	钢的低温脆化倾向的测定	108
实验十三	低合金钢的高温回火脆性的测定	111
实验十四	热处理工艺对高速钢组织和性能的影响	117
实验十五	特殊性能钢的显微组织分析	120

实验一 奥氏体晶粒大小的测定

一、实验目的

1. 熟悉钢中奥氏体晶粒大小的测定方法。
2. 研究加热温度对奥氏体晶粒大小的影响。

二、原理简介

共析钢加热温度超过临界点 Ac_1 ，亚共析钢和过共析钢加热温度超过 Ac_3 和 Ac_{cm} 时，全部转变成奥氏体。随着加热温度与保温时间的不同，所得到的奥氏体晶粒大小也不同。不同大小的奥氏体晶粒，对随后冷却过程中所形成的组织、钢的机械性能和工艺性能都有很大影响。例如：粗大的奥氏体晶粒冷却后获得粗大的转变产物，塑性与韧性都比细小的奥氏体晶粒差得多。奥氏体晶粒过份粗大，钢件在淬火时易产生变形、开裂。对于高碳钢，如果奥氏体晶粒粗大，淬火后残余奥氏体多，将降低工具的硬度与耐磨性。所以生产中常把测定奥氏体晶粒大小作为评价钢材质量的重要依据之一。

当前，美、英、苏、日、法等国家的钢的晶粒度检验标准方法，可大致归纳为两种检验制度：一种是检验 $920\sim 930^\circ\text{C}$ 保温时的奥氏体晶粒长大倾向，区别粗晶钢和细晶钢。另一种是检验实际淬火温度下奥氏体晶粒度。前者系测定钢的本质晶粒度，后者系测定钢的实际晶粒度。

我国冶金部颁标准对许多结构钢作了在出厂前需要检查奥氏体的本质晶粒度的规定。本质晶粒度是指钢材加热温度超过临界点以后，奥氏体晶粒长大的倾向。据 YB27—64 部颁标准规定，测定奥氏体本质晶粒度是将钢材加热到 930°C 保温 3 小时后进行，此温度略高于一般热处理温度，而相当于钢的渗碳温度，经此正常处理后，奥氏体晶粒不过份长大，即此钢为本质细晶粒钢。

三、测定方法

奥氏体晶粒度的测定分两个步骤，即奥氏体晶粒的显示与奥氏体晶粒尺寸的测定或评级。现将生产中常用的几种测定方法介绍如下。

1. 显示奥氏体晶粒的方法

绝大部分钢的奥氏体只是在高温下才是稳定的，当冷却时，奥氏体就会分解成其它类型的组织。因此，要测定奥氏体晶粒就得设法将高温状态的奥氏体轮廓的痕迹，在室温下显示出来。常用的显示奥氏体晶粒的方法按其显示原理，可归纳为下列三类：

(1) 渗入外来元素法 钢在奥氏体状态时，渗入碳、氧或其它元素，利用晶界比晶粒内有较大的化学活性的特点，在晶界上优先形成渗碳体或氧化亚铁等组成物，利用这些组成物的网络，显示出高温奥氏体晶粒的轮廓。常采用的有渗碳法、氧化法等。但需注意，这类方法虽被广泛采用，但由于外来元素的渗入，改变了钢的成分，或由于晶界有氧化物影响奥氏体晶粒的长大速度，进而影响测定的准确性。

1) 渗碳法：将试样放在60%木炭+40%BaCO₃或70%木炭+30%Na₂CO₃渗碳剂中进行固体渗碳，测定本质晶粒度时，渗碳温度是930℃±10℃，渗碳时间为8h（以渗碳后渗层深度不小于1mm，表面碳浓度达到过共析为宜）。渗碳后炉冷，冷却速度为：碳钢100℃/h，合金钢为50℃/h。炉冷到600℃以后启封。

渗碳后缓冷时，在过共析层里，渗碳体优先沿奥氏体晶界析出，试样磨制成金相样品后，可以观察到这个渗碳体网络，根据此网络，即可评定奥氏体晶粒度。

显示金相组织的浸蚀剂可采用下列任何一种：

a) 4%硝酸酒精溶液（或5%苦味酸酒精溶液），网状渗碳体呈白色。

b) 沸腾的苦味酸钠溶液（苦味酸2g，NaOH20g，水100ml，浸蚀时间10~20min），网状渗碳体呈黑紫色。

此法适用于≤0.3%C的渗碳钢，也适用于含碳≤0.6%C的

其他类型的钢，但对含碳化物形成元素过多的钢，往往不能形成碳化物网，故不宜采用。

2) 氧化法：试样的一个面应抛光成适合显微金相检验的光洁度，然后把试样放入通有惰性气体（如高纯度氩气）的炉子内，按规定温度和时间进行奥氏体化，当处理完毕时把空气引入炉内，约30~60min后，将试样空冷，油冷或水冷。已形成并粘附在抛光面的氧化物应稍加抛光除去，并用腐蚀剂浸蚀以显示优先氧化的晶界。

我国采用的暴露氧化法，系先将试样抛光，然后放入具有氧化气氛的炉子中加热到奥氏体化温度，保温一定时间后在水中冷却。试样在加热过程中，奥氏体晶界较其晶粒内部更易于氧化，因而晶界氧化较深，这样处理过的试样，再经细心研磨，磨去试样表面大部分的氧化皮，而保留晶界上的氧化物，再经抛光、浸蚀显示出氧化晶界。

浸蚀剂可采用3~4%硝酸酒精溶液，或4%苦味酸酒精溶液。

氧化法适用于任何结构钢与工具钢。用于测定本质细晶粒钢的本质晶粒度较为正确。

(2) 化学试剂腐蚀法 试样经过加热淬火，获得马氏体或贝氏体，有些钢还需经一定温度回火，制成金相磨片再用特殊浸蚀剂浸蚀，即可直接显示出奥氏体晶粒。

本法适用于合金化高的能直接淬硬的钢，例如，高淬透性的镍铬钼钢等。

这种方法的优点是，在加热过程中，奥氏体晶粒长大不象氧化法或渗碳法那样受外来元素渗入的影响，因此能正确反映晶粒大小。但其缺点是：不同的钢材要摸索不同的回火工艺和选择合适的浸蚀剂，故不如氧化法的通用性广。这是近年来采用的方法，还需要在生产中进一步摸索考核。

1) 直接显示奥氏体晶界的浸蚀剂：表1-1和表1-2分别介绍了几种钢材的热处理工艺及浸蚀剂成分。

表 1-1 几种钢材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3 h 水冷	不经回火
12Cr2Ni4A	同 上	同 上
20CrNi3A	同 上	同 上
40Cr或45Cr	同 上	同 上
60碳钢	同 上	同 上
38CrMoAlA	同 上	200~250℃保温15~30min空冷
40CrVA	同 上	同 上
18Cr2Ni4WA	同 上	400℃保温30min空冷
40CrNiMoA	930℃保温3 h 油冷	不经回火
18CrMnTi	同 上	同 上
38CrA	同 上	同 上
30CrMnSiA	同 上	同 上
30CrMnSiNi2A	同 上	500℃保温30min空冷
30CrMnNi2MoA	同 上	600℃保温30min空冷

表 1-2 直接显示奥氏体晶界的浸蚀剂

序 号	浸 蚀 剂 成 分	浸 蚀 温 度	浸 蚀 时 间
1	饱和苦味酸水溶液（配制时应煮沸，充分溶解），使用前加入： 烷基苯磺酸钠1% ^① 新洁尔灭0.05% ^②	室温（20℃）	5min~3h
		50~70℃	0.5~30min
2	饱和苦味酸水溶液 烷基苯磺酸钠1%	室温（20℃）	5min~3h
		50~70℃	0.5~30min

① 烷基苯磺酸钠是洗衣粉的原材料，此成分亦可用洗衣粉代替。

② 新洁尔灭为医用表面活性消毒剂。如无上面二药剂，可用海鸥洗涤剂代替。

上述两者都可抑制马氏体组织出现，促使奥氏体晶界的显示。

2) 马氏体腐蚀法所用的浸蚀剂：马氏体腐蚀法并不一定显示奥氏体晶界，而是利用不同位向的马氏体，经浸蚀后由于腐蚀的深浅不同，颜色有差异而显示出奥氏体晶粒的大小。在浸蚀前，试样一般都预先经过200~250℃，15min的短时回火。

此法浸蚀剂可用：盐酸1~5ml，苦味酸（饱和的）及乙醇或甲醇，95%或纯的100ml。

此法对粗大奥氏体晶粒较为有效，但对细晶粒浸蚀后会出现混杂图形。钢中有带状组织或树枝状偏析存在时，也会使图形混杂不清，影响正确测定。

（3）控制冷却速度的方法

1) 网状铁素体法：此法适用于含碳量在0.25%~0.6%C的亚共析钢。试样经加热奥氏体化后，根据含碳量不同，选用水冷（低碳钢）、油冷（低合金钢）、空冷（中碳钢）、炉冷（中碳合金钢），或700~730℃等温十几分钟后空冷（≥0.5%钢）。冷却时，先共析铁素体优先沿晶界析出，呈网状分布，可借铁素体网勾划出奥氏体晶界。

实际上，不同钢的冷却速度应通过多次实验来选择，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；如冷却太慢，铁素体堆集成块状，也不能达到勾划奥氏体晶界的作用。

≥0.7%C的钢，铁素体量太少，往往无法形成完整的铁素体网，故此法不适用。

2) 网状渗碳体法：过共析钢空冷一般难以获得完整的渗碳体网，为了保证渗碳体呈网状分布，可在奥氏体化后炉冷到600℃，冷却速度约为80~100℃/h。

3) 网状屈氏体法：接近共析成分的亚共析钢和过共析钢，都不能获得完整的铁素体和渗碳体网，可采用网状屈氏体法。

采用φ20×40mm的圆柱形试样，经加热到奥氏体温度并保温后，自炉中取出，迅速将试样一端淬入水中（约入水1/3~2/5），注意不要上下运动试样，只可作水平移动；试样另一端在空气中冷却，由于试样从下端到上端冷却速度逐渐减小，沿轴向组织依次由马氏体向珠光体过渡。经这样处理的试样，沿纵向磨去约2~3mm厚以后，制成金相磨片，在淬硬与未淬硬的过渡区可以找到冷却速度正好使部分屈氏体（黑色）优先沿晶界析出的

区域，而屈氏体网络所包围的内部却为灰白色的马氏体。借屈氏体网勾划出高温下存在的奥氏体晶界。

现将所用显示奥氏体晶粒度的试验方法及适用钢种归纳于表1-3中。

表 1-3 试验方法及适用钢种

试验方法的种类		适 用 钢 种
渗碳晶粒度试验方法		主要适用于渗碳使用的钢种的晶粒度测量
热处理晶粒度试验方法	缓冷方法	主要适用于中碳以上的亚共析钢，对于过共析钢限于测定 A_{cm} 点以上温度的晶粒度
	淬火回火法	主要适用于机械结构用的碳钢及结构用合金钢
	两次淬火法 ^③	主要适用于中碳以上的亚共析钢及共析钢
	单端淬火法 ^②	主要适用淬透性低的中碳以上的亚共析钢和共析钢
	固溶处理法	主要用于奥氏体不锈钢和奥氏体型耐热钢
	淬火法	主要用于高速工具钢及合金工具钢
	氧化法	主要适用于机械结构用的结构钢和合金钢

① 热处理晶粒度试验方法，当实际进行钢的退火、正火、淬火、固溶处理等热处理工序时，适用于测量最高加热温度时的晶粒度。

② 单端淬火法，即网状屈氏体法。

③ 两次淬火法是将直径或边长10~15mm长度为30~50mm的试样，以规定淬火温度保温规定时间水淬后，将其一端10~15mm放入比钢的 A_1 相变点高20~50℃的浴槽与铅槽中，保温20~30min后，将试样全部放入水中淬火。然后将试样表面沿轴向除去厚度大于0.4mm进行研磨加工，再用苦味酸酒精溶液腐蚀，按网络马氏体的折出相显示晶粒，用显微镜进行测量。

2. 评定奥氏体晶粒大小的方法

评定奥氏体晶粒大小的方法有比较法与弦计法两种。工厂中大量检验时都采用比较法，只有在要求精确测定时，才采用弦计法。

(1) 比较法 比较法简单方便，但精确度稍差。它是在放大100倍的显微镜下观察奥氏体晶粒的，并与YB27—64部颁标准

晶粒级别图相比较，以确定其大小。

标准中级数愈大晶粒愈细。如果由于晶粒过细或过粗，需要选比100倍为大或小的放大倍数进行观察，可按表1-4换算成100倍的标准级别来记数。如用50倍时应将评定的级别降低两级。200倍时则应提高两级，其它放大倍数亦依此类推。

表 1-4 换算为100倍的晶粒度表

其它放大倍数	放 大 100 倍																
	晶 粒 度 级 别																
	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
50	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
200						0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
300							0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
400								0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
500									0	1	2	3	4	5	6	7	8

由于在显微镜下观察到的奥氏体晶粒度，实为晶粒截面的大小，若在大晶粒内出现个别的晶粒（面积 $<10\%$ ），实际是通过大晶粒角的截面，不能代表真实晶粒大小，可以不予考虑。但若组织中大多数小晶粒混杂有大晶粒时，则表示奥氏体晶粒大小不均匀，应估计出不同大小晶粒在视场中各占面积的百分比。若占优势晶粒所占面积 $\geq 90\%$ ，可只记录此种晶粒级别。否则应用不同级别分别表示钢的晶粒度，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%）。

在钢铁材料中，常见的晶粒度一般在1~8级范围，其中1~3级属粗晶粒，4~6级属中晶粒，7~8级属细晶粒。亦有以1~4级属粗晶粒，5~6级属细晶粒的。

（2）弦计法 弦计法如图1-1所示，把显微镜象投射在毛玻璃上或摄成照片，放大倍数选择应保证在 $\phi 80\text{mm}$ 的视场内，晶粒不少于50个。在其上划出长度为 L （mm）的三根平行线，分别统计与三根线直接相截的晶粒总数 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 。用相截的晶粒总

数除以直线的总长度，得到晶粒的平均直径 d ：

$$d = \frac{3 \cdot L \cdot 10^3}{(Z_1 + Z_2 + Z_3) \cdot M}, \mu$$

式中 M 为显微镜的放大倍数。

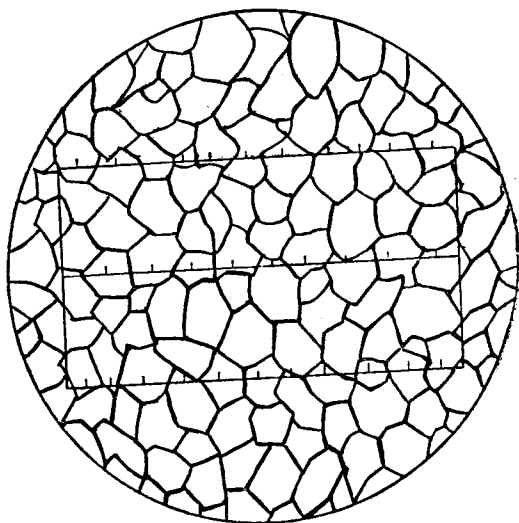


图 1-1 弦计法示意图

除了用上述的晶粒度数与晶粒的平均直径来表示晶粒大小之外，还有一些其它的表示方法，表1-5列出了晶粒度与其它晶粒大小表示方法的比较。

四、实验步骤

1. 本实验采用钢材为：20MnVB、50、T12A、T8A。

2. 实验共分四个大组，每组做一种钢材，将其加热至850℃、900℃、950℃、1000℃、1050℃、1100℃六个温度。其中20MnVB系采用氧化法，50钢系采用单端淬火法，T12A钢可采用常化(正火)法，T8A可采用淬火法。具体操作如下：

(1) 氧化法(20MnVB) 为了获得正确的结果，可采用暴露氧化法，操作过程中应注意下列几点：

表 1-5 晶粒度与其它晶粒大小表示方法的比较

晶粒 号数	放大100倍时, 每6.45mm ² 面积所 含的晶粒数目			实际 每 mm ² 面积中平均 含有晶粒数	平均每一晶 粒所占面积 (mm ²)	计算的晶粒 平均直径 (mm)
	最 多	最 少	平 均			
-3 ^①	0.09	0.05	0.06	1	1	1.00
-2 ^①	0.19	0.09	0.12	2	0.5	0.707
-1 ^①	0.37	0.17	0.25	4	0.25	0.500
0	0.75	0.37	0.5	8	0.125	0.353
1	1.5	0.75	1	16	0.0625	0.250
2	3	1.5	2	32	0.0312	0.177
3	6	3	4	64	0.0156	0.125
4	12	6	8	128	0.0078	0.088
5	24	12	16	256	0.0039	0.062
6	48	24	32	512	0.00195	0.044
7	96	48	64	1024	0.00098	0.031
8	192	96	128	2048	0.00049	0.022
9	384	192	256	4096	0.000244	0.0156
10	768	384	512	8192	0.000122	0.0110
11	1536	768	1024	16384	0.000061	0.0078
12	3072	1536	2048	32768	0.000030	0.0055

① 为了避免在晶粒号前出现“-”号, 近来有人把-3, -2, -1等晶粒度号改为0000, 000及00号。

1) 试样先经抛光, 然后放入上列温度的具有氧化气氛的炉子中, 待炉温到达所需温度后保温半小时取出, 进行水冷。

2) 为了避免铁素体呈块状析出, 使铁素体晶粒界与奥氏体晶界相混淆, 试样出炉后冷却要快。试样出炉后用水(或油)冷却, 获得马氏体组织。由于试样表面强烈脱碳, 有时也会出现部分铁素体, 但在快冷条件下析出的铁素体总是沿奥氏体晶界呈白色网络分布, 它能更明显地显示出奥氏体晶界。

3) 暴露氧化法显示奥氏体晶粒是否准确, 关键在于掌握试样处理后研磨和抛光的程度。

如果研磨量太少, 只能看见氧化膜而看不见奥氏体晶界。有时在氧化膜上(往往呈淡灰色)出现网络, 不仔细区别就会把它误认为是氧化晶界。

晶界被氧化的深度随钢的成分、加热温度及加热时间而异。因此应根据钢的成分加热条件来控制研磨量。磨量不足会出现假象，使“晶粒”变小。而磨量过多，会将氧化晶界全部磨掉。为了适当地掌握研磨量，有意把试样表面磨成一个倾斜面，这样在磨面上总能找到一个合适的评级区域。试样经磨光，当表面有大半光亮，其余呈黑灰色时，即可进行抛光。

4) 氧化法的主要缺点是所显示的奥氏体晶粒往往比真实的稍小，这是因为在开始形成的奥氏体氧化晶界上的氧化物会阻碍奥氏体晶粒继续长大。因此，晶界氧化层外部区域比内部区域呈现较细的奥氏体晶粒。为了获得正确的结果，应在靠近钢的内部组织而又具有完整氧化网络的区域里获取，而不应在氧化皮近邻区域评级。如果将试样表面磨成一个倾斜面，这个区域是易于找到的。

5) 抛光后，试样应进行浸蚀（浸蚀剂可采用3~4%硝酸酒精溶液或4%苦味酸酒精溶液）。愈是靠试样里边，奥氏体晶界氧化程度愈小。晶界上氧化质点也愈细，因此，在未经浸蚀的抛光试样上，往往不能暴露完整的氧化晶界。经浸蚀后，晶界上形成槽形凹沟，在明场照明下、借显微镜的微动螺丝，使物镜移近或移远试样，分别可以看到奥氏体呈白色和黑色网络。

6) 某些含碳量很低的钢，或试样冷却比较慢时，将产生块状铁素体。因为沿奥氏体晶界上存在着氧化质点和晶界移动痕迹，晶界很粗，所以易于与较细的铁素体晶界区分开来。

(2) 单端淬火法(50钢) 详细方法已在前面网状屈氏体法中叙述。试样磨成金相试样以后，可在3~4%硝酸酒精溶液中浸蚀，待表面颜色变成灰色为止。

(3) 网状渗碳体法(T12A) 网状渗碳体法是将试样放入所需温度的炉子中，达到规定温度后保温30min，然后随炉冷却600℃（冷却约80~100℃/h），取出试样，进行水冷，磨去氧化层并制成金相试样，用3~4%硝酸酒精溶液浸蚀。

(4) 淬火法(T8A) 此法系直接显示奥氏体晶界的浸蚀法。将试样放入所需温度的炉子中，达到规定温度后保温30min，

然后取出试样放入水中冷却。磨去氧化层并制成金相试样，用饱和苦味酸水溶液（加入几滴海鸥牌洗涤剂）浸蚀5分钟~3h，或升温到50~70℃浸蚀5~30min。

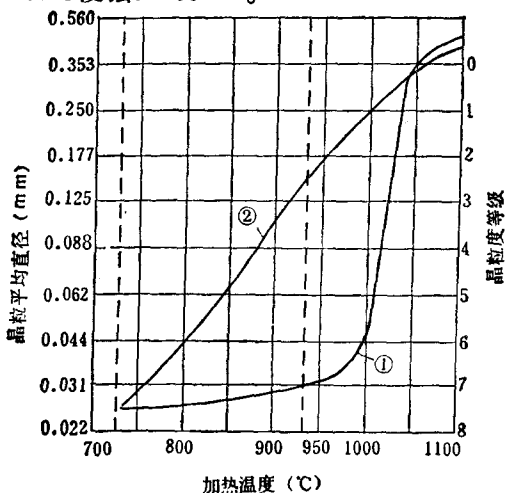


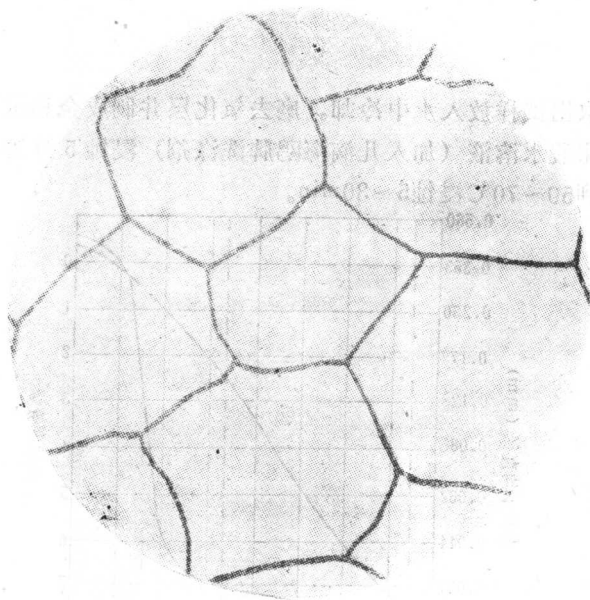
图 1-2 加热温度和晶粒大小的关系

3. 评定奥氏体晶粒度采用比较法。在100×显微镜下与标准级别图对照。将所得晶粒号数在图1-2中标上，如近似曲线①为本质细晶粒钢，近似曲线②为本质粗晶粒钢。

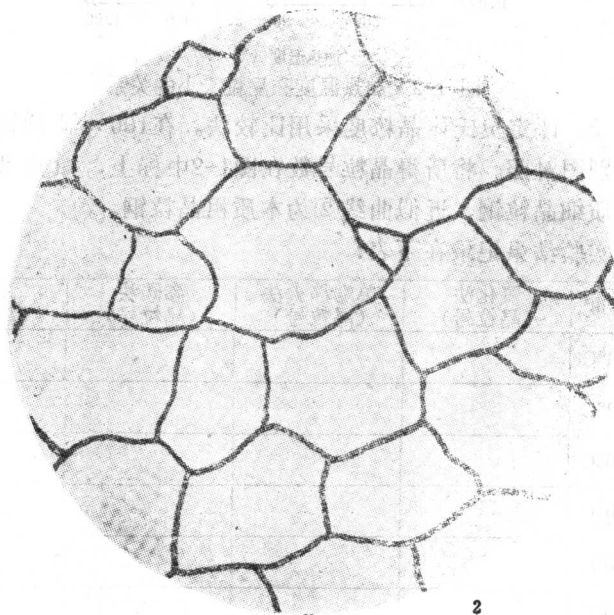
实验结果记录在下表：

温 度	氧化法 (晶粒号)	单端淬火法 (晶粒号)	渗碳法 (晶粒号)	淬火法 (晶粒号)
850°C				
900°C				
950°C				
1000°C				
1050°C				
1100°C				

钢的晶粒度级别图：



1



2