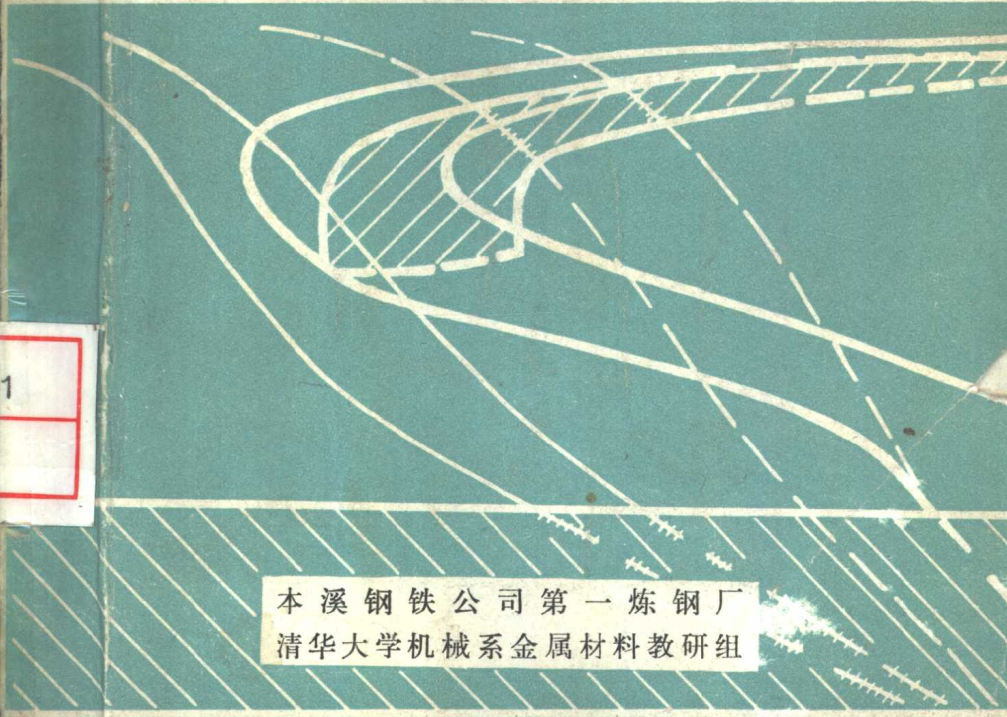


钢的过冷奥氏体转变曲线

导 论



1

本溪钢铁公司第一炼钢厂
清华大学机械系金属材料教研组

钢的过冷奥氏体转变曲线

导 论

本溪钢铁公司第一炼钢厂^编
清华大学机械系金属材料教研组

1979

内 容 提 要

全书分“导论”和“图册”两部出版，本部内容包括钢的相变原理、相变规律以及相变产物的组织形态、性质及应用；并用实验数据表明了合金元素对过冷奥氏体转变曲线的影响。此外，对过冷奥氏体转变曲线的测试和应用也作了简要的叙述。

本书可供各部门从事金相热处理、金属材料工作的科学技术人员和工人参考。

钢的过冷奥氏体转变曲线

导论部分

本溪钢铁公司第一炼钢厂
清华大学机械系金属材料教研组 编

导论和第一图册 编著执笔：

苏东升 马振腾（本钢）

陈南平 仝健民（清华）

（内部资料）

*

本溪钢铁公司第一炼钢厂出版

本溪钢铁公司第一炼钢厂技术情报组发行

北 京 印 刷 一 厂 印 刷

*

1979年10月第一版 1979年10月第一次印刷

印数 000,001~015,000 册 工本费0.91元

钢的过冷奥氏体转变曲线

序

在钢铁生产及使用的漫长发展过程中,到十九世纪后期,已开始知道钢铁材料在不同工艺条件下可以获得不同的组织,从而得到不同的性能。在本世纪初,铁碳状态图基本定形,和近年测定的(如图 01)很相似。这个图阐明了铁碳合

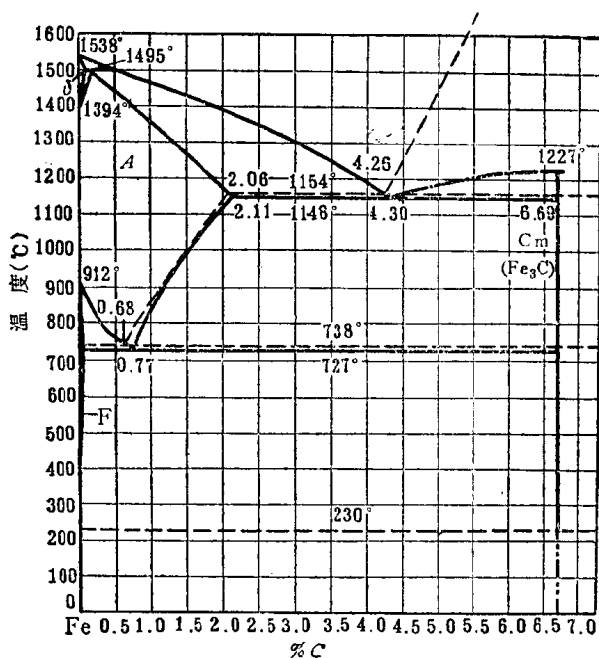


图 01 铁碳状态图^[1]

金在不同成分、温度下形成平衡相的条件。由此可说明相的变化和合金在平衡状态时的金相组织，这是在形成金属学过程中的一大成就。它对制定钢铁材料的生产加工工艺具有规律性的指导作用。但是铁碳状态图只阐明了平衡状态时（即缓慢的加热或冷却条件下）的组织变化规律，不能说明钢在不同冷却速度下各种非平衡状态组织形成的情况，因而尚不便全面指导热处理和其它热加工工艺的制定。在铁碳状态图建立后的约十年工作中，于 1919 年发表了第一个说明钢中奥氏体在不同冷速下的组织转变图，如图 02 所示。

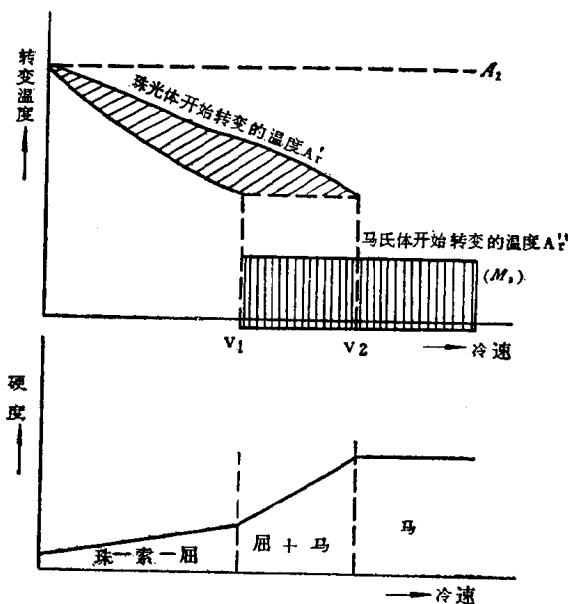


图 02 冷速对奥氏体转变温度及硬度的影响^[2]

此图说明了奥氏体在不同冷却速度条件下可能获得的组织。当冷速在 V_1 以下时，随冷速增加，由层片较粗的珠光

体过渡到层片较细的珠光体(即索氏体)和层片更细的珠光体(即屈氏体)。当冷速在 V_1 和 V_2 之间时,则奥氏体除了发生珠光体型的转变,形成层片更细的珠光体,即屈氏体外,还有部分奥氏体发生马氏体转变,形成马氏体。冷速超过 V_2 ,则奥氏体只发生马氏体转变。从图上还可以看到奥氏体转变温度与冷速的关系。其后几年里,有不少人测量了冷速对不同钢种的奥氏体转变影响的曲线,这对指导热处理工艺更推进了一步,明确了要全部发生马氏体转变有个临界冷却速度(即图 02 上 V_2)的概念。但在当时对测制这种曲线有困难,首先是快冷时冷速测量不正确,再者是样品或工件的冷速是随温度(或冷却时间)而变的,因之这种曲线对奥氏体冷却转变还只能做定性说明。后来就有人采取迴避冷速,用过冷奥氏体(即把奥氏体化的样品急冷到临界点以下某个温度,此时的奥氏体是不稳定的),在不同温度等温,观察在不同等温时间内的变化。在 1930 年发表了第一个以温度—时间为坐标的过冷奥氏体等温转变曲线,如图 03 所示(在英文书刊中按其形状取名 S-曲线,或称 TTT 曲线——系 Time-Temperature Transformation 的缩写;在俄文书刊中叫做 G-曲线)。此时明确了过冷奥氏体可有三种转变产物,即珠光体(可按其中铁素体和渗碳体层片的粗细程度分为珠光体、索氏体和屈氏体)、贝氏体(可按形态分为上贝氏体和下贝氏体)以及马氏体。这类曲线对发展等温退火、等温淬火、分级淬火、形变热处理等热处理工艺有直接指导意义,经修正后并可说明淬火的临界冷速,定性描述与钢的淬透性的关系及不同冷速下的组织转变情况。进一步研究了特别是合金元素对等温转变曲线的影响,对发展合金钢系统也具有一定指导意

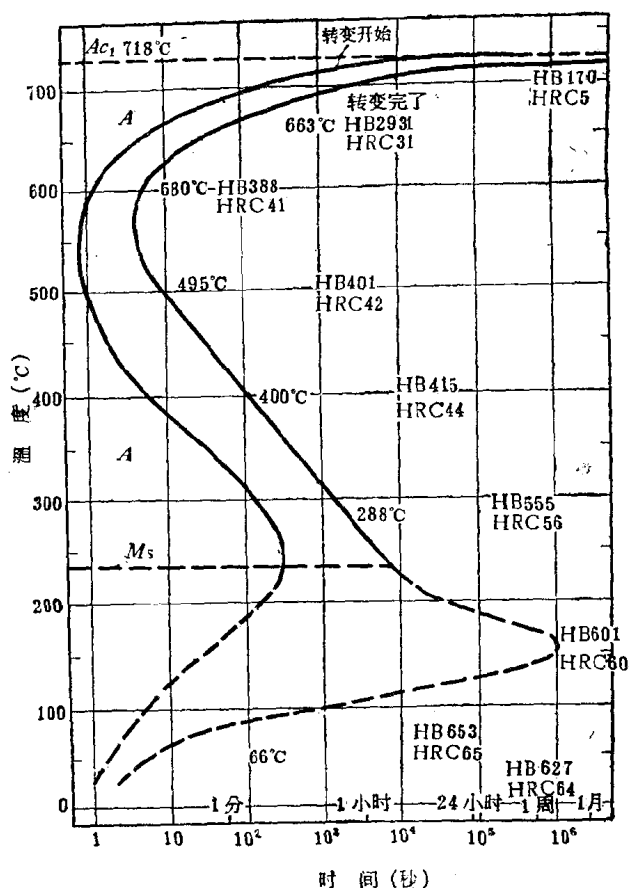


图 03 0.89% C 钢早期的等温转变曲线

义。

为了更能正确反映连续冷却条件下过冷奥氏体的转变情况，例如一般的淬火、正火及退火热处理工艺，或锻、轧特别是焊接后冷却时的组织转变，需要测绘连续冷却转变曲

线。1941 年开始作出了以温度——时间为坐标的连续冷却转变曲线（英文书刊中简称 CCT 曲线—系 Continuous Cooling Transformation 的缩写），如图 04 所示。

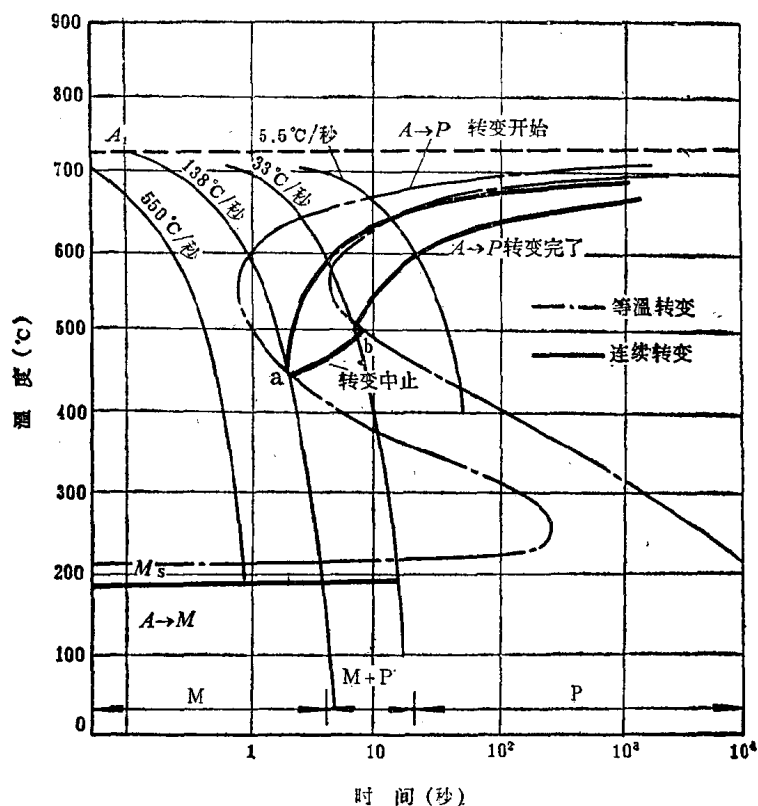


图 04 共析碳素钢的连续冷却转变曲线和等温转变曲线比较图^[8]

近二十多年来，由于实验手段的改进，现已测定了大量钢种的连续冷却转变曲线。这在确定热加工工艺特别是热处理

理和焊接工艺以及研制、使用新钢种中具有很重要的参考价值。

列宁指出：“物质的抽象，自然规律的抽象，价值的抽象以及其它等等，一句话，一切科学的（正确的、郑重的、非瞎说的）抽象，都更深刻、更正确、更完全地反映着自然。”通过实验，归纳总结过冷奥氏体的转变规律，就能更深刻地阐明过冷奥氏体的变化，这在理论上和 实践上都有很大意义。考虑到国内还缺乏这方面的系统资料，感到生产、科研等有关方面对这种资料有所需要，我们根据国家标准或部颁标准中的钢号，新发展的钢种和有参考价值的一些钢种，参考国内外资料，收集了 324 个钢种的过冷奥氏体转变曲线共 652 张图，编成图集。为应用方便起见，对过冷奥氏体转变产物的形貌特征，形成机理和性能，影响过冷奥氏体转变曲线的因素，测定过冷奥氏体转变曲线的方法及过冷奥氏体转变曲线的应用，都做了一些必要的叙述。全书分导论和图册两部出版，图中应用的符号及其代表的意义在第一图册里做了说明。

由于编写人员水平所限，资料收集肯定会有不足，书中不妥之处在所难免，希读者批评指正，并欢迎提供有关资料，以便修订时改正及增添，使之更好的为社会主义建设服务。

钢的过冷奥氏体转变曲线

导论部分 目录

序.....	4
第一章 钢中奥氏体形成及其在冷却时的转变.....	1
1.1 钢中奥氏体的形成、均匀化和粗化.....	1
1.2 过冷奥氏体转变曲线	12
1.2.1 等温转变曲线	16
1.2.2 连续冷却转变曲线	27
1.3 珠光体转变	33
1.3.1 珠光体的形成	33
1.3.2 影响珠光体转变的因素	48
1.4 亚共析和过共析钢中先共析相的析出	54
1.5 马氏体转变	72
1.5.1 马氏体相变基本规律	72
1.5.2 影响马氏体转变的因素	85
1.5.3 钢中马氏体的组织形态	93
1.5.4 影响马氏体形态的因素	109
1.5.5 马氏体形态与显微裂纹	115
1.5.6 马氏体的力学性质	120
1.5.7 马氏体形态学在生产中的应用	124
1.6 贝氏体转变	136
1.6.1 贝氏体转变机理	136
1.6.2 贝氏体转变动力学	142
1.6.3 影响贝氏体转变的一些因素	148
1.6.4 贝氏体的组织形态	151

1.6.5 影响贝氏体机械性能的一些因素	175
第二章 合金元素对过冷奥氏体转变曲线的影响	183
2.1 碳的影响	183
2.2 硅的影响	200
2.3 锰的影响	202
2.4 铬的影响	207
2.5 镍的影响	209
2.6 钨的影响	212
2.7 钼的影响	213
2.8 钒的影响	217
2.9 硼的影响	218
2.10 钴的影响	222
2.11 锆的影响	224
2.12 铜的影响	225
2.13 合金元素对 M_s 及 M_z 点的影响	226
第三章 过冷奥氏体转变曲线的测定	228
3.1 相变临界点的测定	229
3.2 马氏体转变温度 M_s 点的测定	230
3.2.1 金相法	230
3.2.2 膨胀法	232
3.2.3 端淬法	233
3.3 等温转变曲线的测定	234
3.3.1 金相-硬度法	234
3.3.2 膨胀法	237
3.3.3 磁性法	242
3.4 连续冷却转变曲线的测定	244
3.4.1 膨胀法	244
3.4.2 金相-硬度法	247

3.4.3 顶端淬火法	248
3.4.4 算法和作图法	249
第四章 过冷奥氏体转变曲线的应用	253
4.1 确定淬火临界冷速	253
4.2 分析转变产物	254
4.3 确定工艺规范	259
4.4 过冷奥氏体转变曲线在焊接方面的应用	266

第一章 钢中奥氏体的形成及其 在冷却时的转变

1.1 钢中奥氏体的形成、均匀化和粗化

在退火、正火、淬火时，都要把钢加热到临界温度以上获得奥氏体，然后再以不同速度冷却，使奥氏体在冷却过程中发生转变，得到所要求的组织和性能。因之奥氏体化是钢中一种基本转变。奥氏体化的程度不同，会影响奥氏体中合金组元特别是碳的含量及其分布的均匀程度，从而影响到冷却过程中的转变；同时奥氏体的晶粒尺寸也对冷却转变有相当大的影响。下面就对这些问题作简单的讨论。

钢中的奥氏体，位于铁碳状态图（见图 1.1）的 GS, ES 线以上的一个相区，它是碳及其它合金组元在面心立方晶型的 γ 铁中的固溶体。由铁碳状态图上可看到，当钢加热到 PSK 线 (A_1) 以上时，就有奥氏体形成，对亚共析钢或过共析钢来

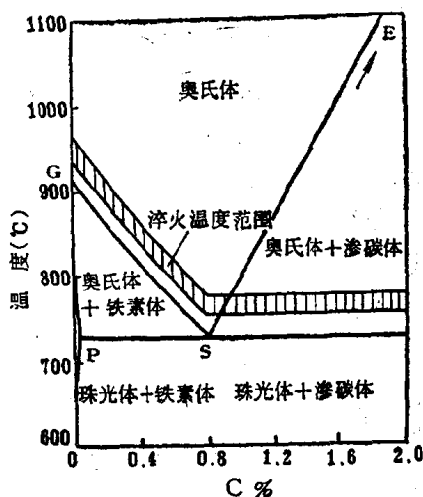


图 1.1 铁碳状态图一角

讲，只要加热到 GS 线 (A_3) 或 ES 线 (A_{cm}) 以上，就可以得到单相的奥氏体。

由加热到不同温度淬火的样品中，可以观察到钢样加热到超过 A_1 温度，其中珠光体要转变为奥氏体，这是因为此时奥氏体的自由能已较珠光体双相组织的自由能低。由珠光体转变为奥氏体是按照成核——长大的规律进行的。优先成核的地点通常是珠光体组织中铁素体与渗碳体片的相界面。因为这里既有现成的界面可减少奥氏体晶核形成时的表面能，同时相界面上容易达到 A_1 温度奥氏体平均碳量 $\sim 0.8\%$ 的浓度起伏。奥氏体形核后的长大，是依赖珠光体中的铁素体继续向奥氏体转变和渗碳体不断固溶于奥氏体的过程进行的。图 1.2 (a, b) 是珠光体转变为奥氏体的显微照片，图 1.3 说明了予先经 875°C 退火的共析碳素钢加热到 A_1 以上由珠光体转变为奥氏体整个过程的曲线，指出了珠光体加热到 A_1 以上某一温度等温时，先是一部分珠光体转变为奥氏体，新形成的奥氏体中还残留有未来得及溶解的渗碳体。即使在全部珠光体变成奥氏体后，渗碳体的溶解也需要一个过程。在渗碳体全部溶解以后，奥氏体中碳浓度的分布也是不均匀的，即在原来渗碳体的部位固溶的碳浓度是偏高的。图 1.4 是以每秒 700°C 快速加热至 780°C 后，迅速淬火的照片，此时奥氏体已全部形成，淬火后变成马氏体，但从中可明显看到未溶渗碳体的形态。奥氏体形成后，要经过一定时间才能使碳扩散均匀，所需时间决定于碳在奥氏体中的扩散速度。由图 1.3 也可看到，等温温度愈高，奥氏体均匀化的时间愈短。

这是因为扩散系数 D 与温度的关系符合指数方程：

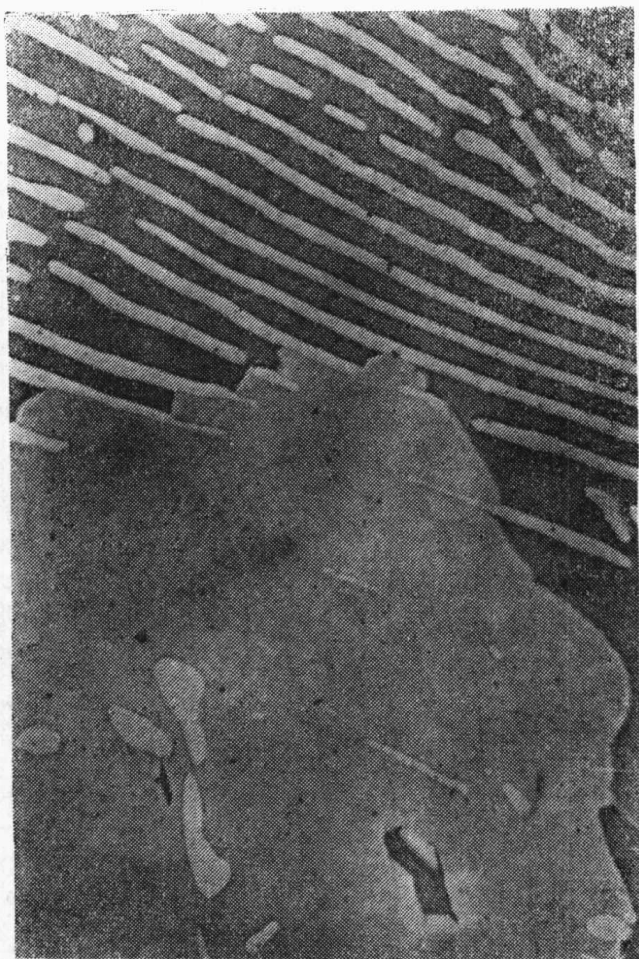
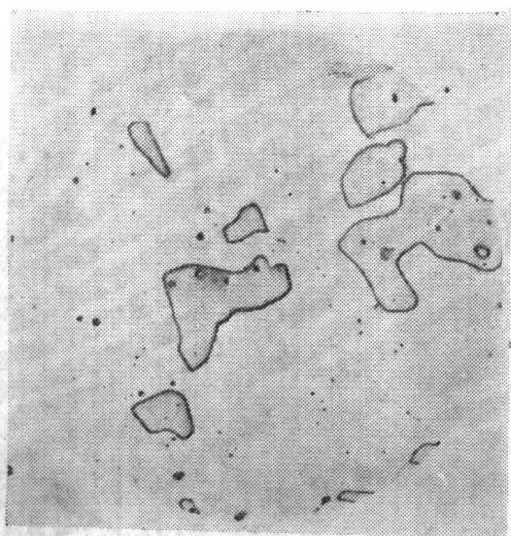
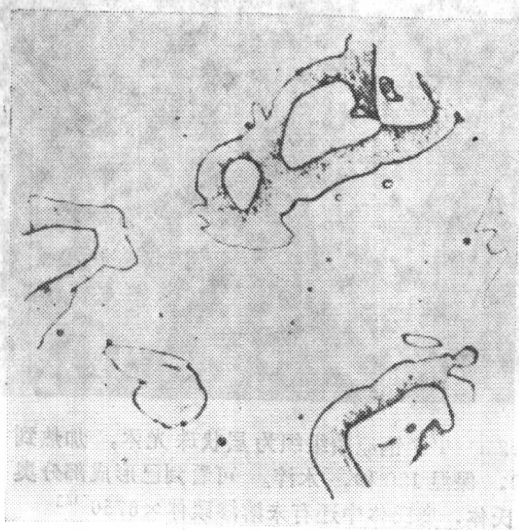


图 1.2a T 7 钢原始组织为层状珠光体，加热到 739℃，保温 120 秒，水淬。可看到已形成部分奥氏体，奥氏体中还有未溶渗碳体 $\times 6750^{[14]}$



a



b

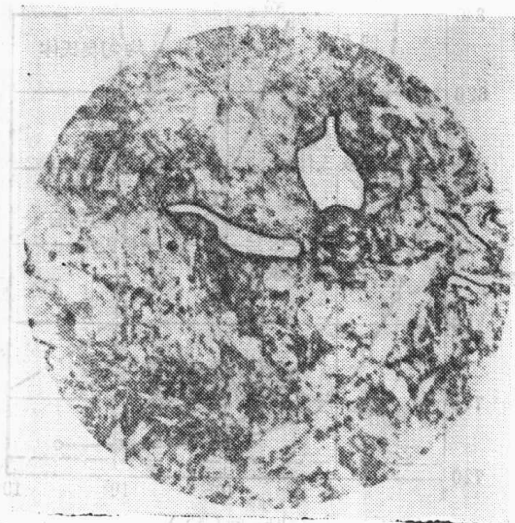
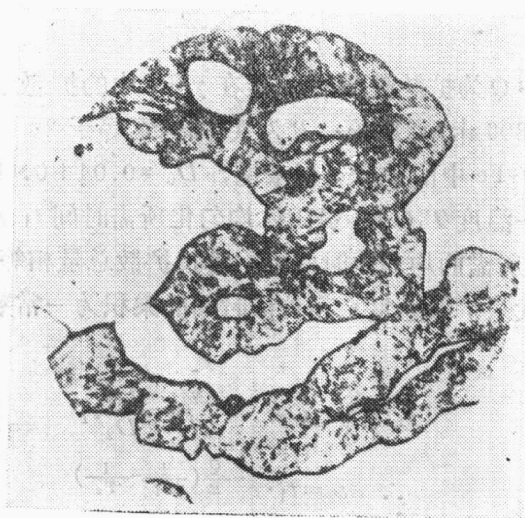


图 1.2.b. 过共析钢粒状珠光体, 加热到 745°C , 奥氏体的形成过程^[7], $\times 2000$
(a) 原始组织粒状珠光体 (b) 5 秒, (c) 15 秒, (d) 60 秒