

高等学校试用教材

铸造合金金相图谱

陕西机械学院黄积荣 主编

机械工业出版社

铸造合金金相图谱

陕西机械学院黄积荣 主编

*

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)

北京市密云县印刷厂印刷

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 $15 \frac{1}{4}$ · 字数 371 千字

1980 年 11 月北京第一版·198 年 11 月北京第四次印刷

印数 14,301—17,600 · 定价 5.50 元

*

统一书号: 15033 · 4862

编 者 的 话

人们发现并使用金属材料已有近六千年的历史,但是利用光学显微镜来观察、分析金属材料的微观组织及缺陷,仅有一百多年,并促进了材料科学的发展。近二十多年,尤其是进入七十年代以来,由于电子显微镜的不断完善和电子成像理论的迅速发展,电子显微镜已成了观察和分析金属微观和极微观组织、结构及其缺陷的重要手段,促使材料科学的发展进入了“极微世界”。现代金相技术包括光学和电子显微分析技术两个方面。

现代金相分析技术所获得的结果是联系材料加工工艺科学及材料性能之间的桥梁,它提供了为提高金属材料各种性能而制定或改善加工工艺的途径。金相分析是检查产品质量的依据之一,又是发展新材料,探索材料、工艺科学理论的重要手段之一。

对于铸造合金而言,铸造工艺和其他冷、热加工工艺、化学成分和夹杂物,对其微观或极微观组织、结构及缺陷的影响特别明显,而要正确地反映这些显微组织、结构及缺陷,必须选择适当的金相分析手段、分析方法及适宜的参数等等。

根据一机部教材编审计划,《铸造合金金相图谱》是为了配合高等工业学校铸造合金系统课程的教学而编制的,同时,也可供铸造专业研究生、其他热加工专业师生及工厂、科研单位有关人员参考。它的内容包括五个部分共十三章和两个附录,有金相照片 513 幅。第一部分是反映液一固、固一固相变的部分基础理论的照片;第二部分是铸造黑色合金的显微组织;第三部分是铸造有色金属及其合金的显微组织;第四部分是铸件缺陷的金相照片;第五部分是附录,介绍了金相样品制备技术和经验、宏观分析的一般方法以及电子金相分析的一般原理和应用,还收入了国际铸工协会推荐的铸铁金相标准照片。第一、二、三、四部分是本书的主体,主要由金相照片构成,在每一章开头均冠以文字说明,对显微组织及缺陷的金相特点、形成过程及影响因素等加以简要分析。凡属其他教材中已有论述的基本概念(例如成分过冷、相图等),这里直接引用而不再加以解释;反之,如胞状组织、钛合金等,考虑到今后的发展,则力求有所述说。

本图谱由陕西机械学院铸造教研室黄积荣同志主编,参加者还有陈令昌、姜淑艳、王贻青、王家炘、甘雨、朱锦侠和周君淑等七位同志。

在编制过程中,得到了西安交通大学金相教研室王小同和饶启昌二位老师的大力协助和铸造教研室的大力支持以及陕西机械学院卞为一老师的帮助,同时,还得到了清华大学、福州大学、北京钢铁学院等兄弟院校以及沈阳铸造研究所、北京冶炼厂、上海华丰钢铁厂、西安红旗机械厂、陕西陇西铸造厂、水电部西安热工研究所、洛阳 725 所和郑州机械科学研究所等工厂、科研单位的支持和帮助。均在此表示感谢。

图谱初稿由华南工学院铸造教研室主审,参加审稿的单位还有:西安交通大学、北京钢铁学院、沈阳铸造研究所、华中工学院、郑州机械科学研究所、江西机械科学研究所、北京

IV

钢铁研究院和洛阳 725 所，西北工业大学和水电部西安热工研究所的代表也参加了部分章节的审稿工作。感谢他们提出了许多宝贵意见。

本图谱的金相照片，除少数选自国内外资料外，大部分是收集国内实际生产的原始样品或自制样品进行磨制和摄录的。由于时间仓促以及条件和水平所限，缺点和错误在所难免，敬请广大读者批评指正，并希望提供更好的样品及资料，以便今后改进。

编著者

1978 年12月于西安

目 录

编者的话	
第一章 结晶及铸锭组织	1
(一) 纯金属的结晶	1
(二) 铸锭的宏观组织	3
第二章 二元合金的凝固组织	12
(一) 固溶体合金的凝固组织	12
(二) 共晶系合金的凝固组织	14
(三) 包晶系合金的凝固组织	16
第三章 Fe-Fe ₃ C 合金的平衡组织及钢的热处理组织	21
(一) 先共析铁素体与先共析渗碳体	22
(二) 珠光体	22
(三) 贝氏体	24
(四) 马氏体	26
(五) 回火组织	27
第四章 灰铸铁	36
(一) 石墨相	37
(二) 基体组织	38
(三) 磷共晶	40
(四) 共晶团	41
(五) 常用的几种典型灰铸铁组织	41
第五章 球墨铸铁	56
(一) 石墨的结构与形态	56
(二) 铸态基体组织	57
(三) 热处理后的组织	58
(四) 合金球墨铸铁	60
第六章 可锻铸铁	74
(一) 石墨形态	74
(二) 基体组织	74
(三) 可锻化退火过程	75
(四) 表皮层组织及其他缺陷组织	76
第七章 特种性能铸铁	84
(一) 耐磨铸铁	84
(二) 耐热和耐蚀铸铁	87
第八章 铸钢	97
(一) 铸造碳素钢	97
(二) 铸造合金钢	98

(三) 非金属夹杂物	101
第九章 铸造铝合金	116
(一) Al-Si 类合金中可能形成的相	120
(二) Al-Cu 类合金中可能形成的相	124
(三) Al-Mg 类合金中可能形成的相	126
(四) Al-Zn 类合金中可能形成的相	128
(五) “变质”、“弥散”及“晶粒细化”组织	130
(六) 铝合金的时效	131
(七) 铝合金中含金相的鉴别	133
第十章 铸造铜合金	156
(一) 纯铜	156
(二) 普通黄铜	158
(三) 特殊黄铜	159
(四) 锡青铜	161
(五) 铝青铜	162
(六) 铍青铜	164
第十一章 轴承合金	177
(一) 锡基轴承合金	177
(二) 铅基轴承合金	178
(三) 铝基轴承合金	179
(四) 铜铅系轴承合金	180
第十二章 其他铸造有色金属及其合金	184
(一) 铸造镁合金	184
(二) 铸造钛和钛合金	186
(三) 压铸锌合金	187
第十三章 铸件缺陷	192
(一) 锡汗、磷汗及其晶渗出物	192
(二) 石墨飘浮断口	192
(三) 热裂与冷裂	193
(四) 气孔	193
(五) 反白口断口	194
(六) 树枝状晶、贝壳状及柱状断口	194
(七) 不均匀组织	194
(八) 可锻铸铁中的氧化皮区	194
附录一 金相技术	202
一、金相样品的制备技术	202
二、宏观检验	217
三、电子金相显微分析技术简介	221
附录二 国际铸工协会推荐的铸铁金相标准	233
参考资料	237

第一章 结晶及铸锭组织

本章包括：（一）纯金属的结晶，（二）铸锭的宏观组织。共有照片 21 幅。

（一）纯金属的结晶

为了了解各种铸造合金的金相组织，必须对金属及合金的组织形成过程——结晶及其规律有一个基本的了解。纯金属的结晶过程虽然比较简单，却包含了所有铸造合金结晶过程的基本规律。

金属从液态结晶成固态的过程是一个形核和长大的过程。当液态金属冷却到熔点温度以下时，就不断地从液相中产生出固相的核心（晶核），接着这些核心逐渐长大，同时在剩余的液相中继续出现新的核心并长大，直至液相消耗完毕，结晶终了。所以，整个结晶过程也就是形核和长大交替进行的过程。

图 1-1 显示了从饱和的氯化铵水溶液中结晶出氯化铵的过程。这个过程与金属的结晶过程十分相似。所以借用它来近似地描述纯金属和合金的结晶过程。

与凝固后的组织形态有直接关系的是结晶过程中晶体长大的形态。目前的研究表明，晶体长大方式有下列三种可能：即平面长大、胞状长大和树枝状长大。究竟以何种方式长大，则取决于结晶过程中固—液界面的类型以及界面前沿液相中过冷度的分布情况。

就原子尺度而言，固—液界面可分为两类：一类是“小平面”的，又称“光滑”的，另一类是“非小平面”的，又称“非光滑”的或“粗糙”的。所谓“非小平面”界面，指的是从固相到液相的过渡区有若干原子层，在每一层中只有 50% 的原子位置被固相原子所占据（图 1-1）。所谓“小平面”的界面，就是固相表面差不多是一层光滑的原子面（图 1-2）。这两种假设已被实验所证实。

对于典型的金属来说，它们的固—液界面都是“非小平面”的；对于大多数非金属盐类或金属性较弱的金属及类金属而言，例如镓、铋、锗、硅、碳等，它们的固—液界面是“小

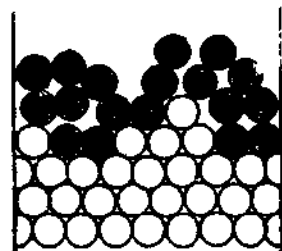


图 1-1 “非小平面”

固-液界面示意图

暗球—液相原子

亮球—固相原子

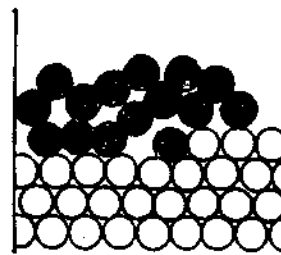


图 1-2 “小平面”

固-液界面示意图

暗球—液相原子

亮球—固相原子

平面”的。后者在液相中自由长大时，容易形成规则的几何形状。

另一方面，长大过程中的晶体形状还与固相前沿液相中的过冷度分布情况有关。

过冷度的分布可能有两种情况，即“正过冷度分布”和“负过冷度分布”。如图 I-3 所示。

负过冷度分布及其形成的条件是这样的：当液态金属在铸模中凝固时，热量通过固相传递给模壁向外散失，在固相前沿的液相中，距固—液界面越远温度越高，形成如图 I-3 a) 所示的正温度梯度。如果金属是绝对纯的话，则理论熔点是一条水平线，在这样的情况下，越远离固—液界面的液相中，过冷度就越小，便形成了所谓的“负过冷度分布”。这时，固相某处突入液相向前生长是不容易的，而固相整个界面向前推进就比较容易，所以固相表面在宏观尺度上看是平面状的。

正过冷度分布及其形成的条件有两种情况：

(1) 是由于负温度梯度造成的。液态金属在结晶过程中使热量能同时通过固相和液相散失，或只通过液相散失(如处于液相之中的晶体长大时的情况)。就可能得到如图 I-3 b) 所示的负温度梯度的情况。显然，这就在固相前沿液相中造成了所谓“正过冷度分布”，即越远离固—液界面过冷度越大。

(2) 如果金属中含有一些杂质(如工业纯铝的最高纯度也只是 99.996%)，那怕只有百万分之几，也时常会产生“成分过冷”现象，而形成固—液界面前沿液相中的“正过冷度分布”区域，如图 I-3 c) 所示。

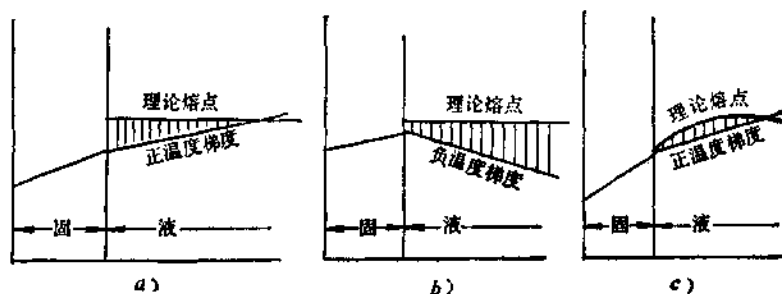


图 I-3 过冷度分布示意图

a) 由正温度梯度引起的负过冷度分布 b) 由负温度梯度引起的正过冷度分布
c) 由成分过冷引起的正过冷度分布

在正过冷度分布的情况下，固相表面上的凸起部位便容易地深入到液相中过冷度较大的区域里，这时固相表面就不再是平面的而会产生所谓胞状长大及树枝状长大。前者发生在正过冷度分布区域较小的情况下，后者发生在正过冷度分布区域较大的情况下。

值得注意的是，在结晶过程中，如果液态金属可以充分地补缩，而且金属纯度亦极高，那么即使在按胞状长大或树枝状长大的情况下凝固后，在金相截面上都将显示不出胞状及树枝状形态，而是较规则的晶粒(见第三章图 3-1)。但是，如果液体补缩不充分，则在铸锭和铸件的表面上缩孔处，可以看到明显的树枝状晶(图 1-2)。如果金属中存在低熔点的杂质，那么就会产生成分偏析(胞状偏析与枝晶偏析)，在经腐蚀后的金相截面上，可能显示出胞状亚晶及树枝状晶。另外，用倾液法，即将结晶过程中剩余液相倾倒入铸模，便会清楚地显示出平面的、胞状的及树枝状的固—液界面形态(见第二章图 2-1)。

(二) 铸锭的宏观组织

图 1-2 至图 1-7 及图 1-11 是各种铸锭的宏观组织。从这组图中可以看到, 液态金属在铸模内凝固时, 由于液态金属的成分、熔化温度及浇注温度的不同, 由于铸模材料、壁厚及形状、温度的不同, 以及浇注方法的不同等等, 可以获得各种不同的凝固组织。

一般地说, 工业上铸锭的宏观组织具有三个区域, 见图 1-4 b)。

(1) 激冷区 位于铸锭的最外层, 它是由细小等轴晶粒所组成的, 所以又称为表面细等轴晶区。

(2) 柱状晶区 它位于激冷区的里边, 是由垂直于模壁, 彼此平行的柱状晶粒所组成的。

(3) 中心粗大等轴晶区 它位于铸锭中心区域, 是由比激冷区中的晶粒还粗大的等轴晶所组成。

从图 1-4 至图 1-7 都可以看到铸锭三个晶区的大小是随着铸造条件的不同而有所差异, 一般情况是激冷区较小, 其余两个区较大。有时候甚至只有一个区域或两个区域。如图 1-6 f) 只有柱状晶, 它从铸锭表面一直伸展到中心, 这种组织称为“穿晶”。

三个晶区的形成机理, 概要的阐述为: 激冷区的形成是由于高温液态金属注入铸模, 与冷的模壁接触, 在液相层中立即造成很大的过冷度, 产生了大量的晶核, 并且长大。这些在模壁上形核并长大的晶体, 往往由于模壁处强烈的成分过冷效应和液态金属的流动, 而引起颈缩及脱离模壁的现象, 如图 1-4 所示。

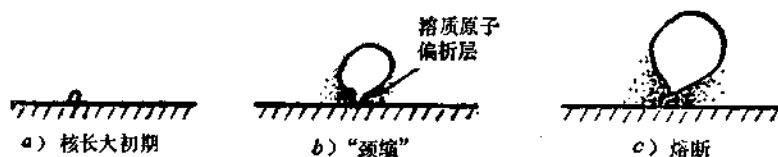


图 1-4 在模壁上形成核的晶体产生“颈缩”及熔断脱离的示意图

从模壁上脱离的晶体一部分随着液流被推进中心区, 另一部分留在模壁附近继续长大直到与相邻晶体相互接触为止。激冷区中的晶体是以树枝状形态长大的 (图 1-5)。最后因相互抑制而成为等轴晶体。影响激冷区范围的因素是很多的, 例如模子材料、浇注温度、模子温度及液态金属的性质等等。

图 1-4 表明, 含 2.6%Si 的钢锭在不同浇注温度时的宏观组织, 自 a) 至 c), 随着浇注温度逐渐减低, 激冷区则从小逐渐增大。

图 1-6 中 a) 与 b) 比较, a) 为砂型铸造, b) 为金属型铸造, 因后者冷却能力较强, 所以在相同的熔化温度和浇注温度下就显示出激冷区, 而砂型铸造则不明显。

如果浇注温度和模子温度过高, 也可能造成激冷区晶体的重新熔化或使近模壁处的金属液体的过冷度极小, 这样, 激冷区也就极小, 甚至可能完全不出现。

柱状晶区中的晶体一般起源于激冷区。

激冷区中的部分晶体, 由于它们具有迅速长大的有利位向一枝晶方向垂直于模壁, 因此优先地迅速长大而成为柱状晶。柱状晶是以枝晶状的固-液界面形式长大, 还是以平面状的

固-液界面形成长大？这取决于界面前沿液相中的过冷度分布是正的还是负的。一般说，平衡分配系数 K 减 1 的绝对值较大的合金，即具有宽的凝固温度范围的合金，因成分过冷比较严重，晶体常以枝晶生长。

铸锭中激冷区和柱状区的发展情况示于图 I-5 中。

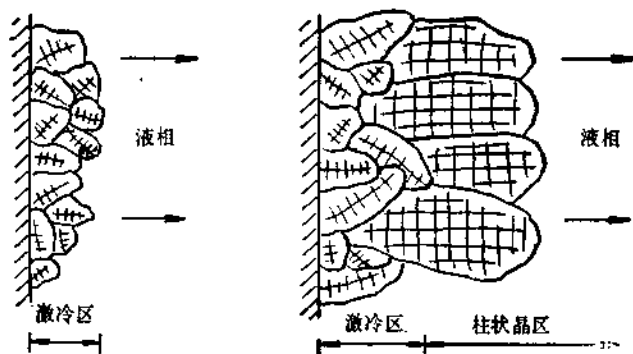


图 I-5 由激冷区中合适取向的晶粒而成长的柱状晶示意图

由于液态金属中的热量不仅通过辐射而且通过固相传导逐渐散失，所以柱状晶垂直于模壁朝向铸模中心成长。当铸锭中心的液相出现过冷时，则中心液相区的任何萌芽晶体就会长大为等轴的树枝晶。这样，柱状晶区的推进就受阻而停止。

对于给定的金属而言，柱状晶区的范围随着熔化温度和浇注温度的提高而增大，如图 1-4、图 1-6 b) 与 f) 所示。

对于给定的浇注条件而言，柱状晶区的范围随着溶质元素含量的增加而减少。

控制柱状晶区的主要因素是在其前沿的液相中是否出现了等轴晶。如果条件对于形成等轴晶有利的话，则柱状晶就不发达，例如施加振动，就会破坏柱状晶的生长而获得细小等轴晶粒，如图 1-11 b) 所示。孕育处理可以完全消除柱状晶而获得百分之百的细小等轴晶。另外，采用定向凝固的方法亦可获得百分之百的柱状晶甚至可获得单晶。

多年来，对于中心等轴晶区的形成过程均处于推测的阶段，现在经实验证实，主要有如下三种机构：

第一种机构：在模壁上形成的晶体，由于成分过冷效应和液态金属的对流，在激冷区形成之前便脱离模壁，被扫进中心区域，如果浇注温度较低，这些晶体就不会完全被重新熔化，残存下来的晶体就成为中心等轴晶的萌芽晶体。

第二种机构：在合金铸锭中，柱状晶以枝晶形态长大时，往往由于成分过冷效应而使枝晶的根部发生“颈缩”现象，这些颈缩的枝由于液相对流，温度反复变化而被熔断（图 1-8，图 1-9）。熔断脱离的晶体碎片被液相对流带到铸锭中心区，一部分残留下来而成为中心等轴晶的萌芽晶体。这个过程称之为“枝晶增殖”。

第三种机构：铸锭自由表面因辐射散热而产生结晶，一部分晶体因液体对流或振动等原因而下沉到铸锭中心区域（这种现象称之为“晶体雨”），残留下来的部分成为中心等轴晶的萌芽晶体。

这三种机构在不同情况下起着不同程度的作用。

中心等轴晶的长大一般也以树枝状形态进行，直至相邻枝晶相接触为止，最后成为等轴

晶，如图 1-5 及 1-10 所示。

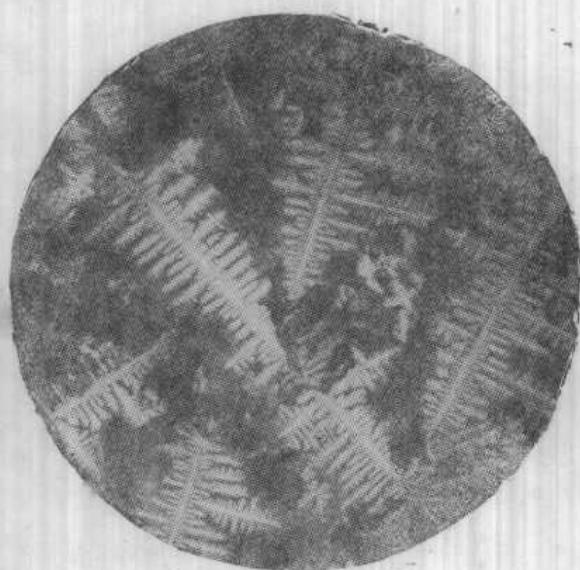
通过上述分析，可以获得细化铸锭（或铸件）晶粒的基本途径，如改变化学成分、孕育、改变铸造条件以及增加液体的流动等等（图 1-11）。



a) 结晶开始 $\times 50$



b) 结晶正在进行 $\times 50$



c) 结晶終了 $\times 50$

图1-1 结晶过程（饱和的氯化铵水溶液）

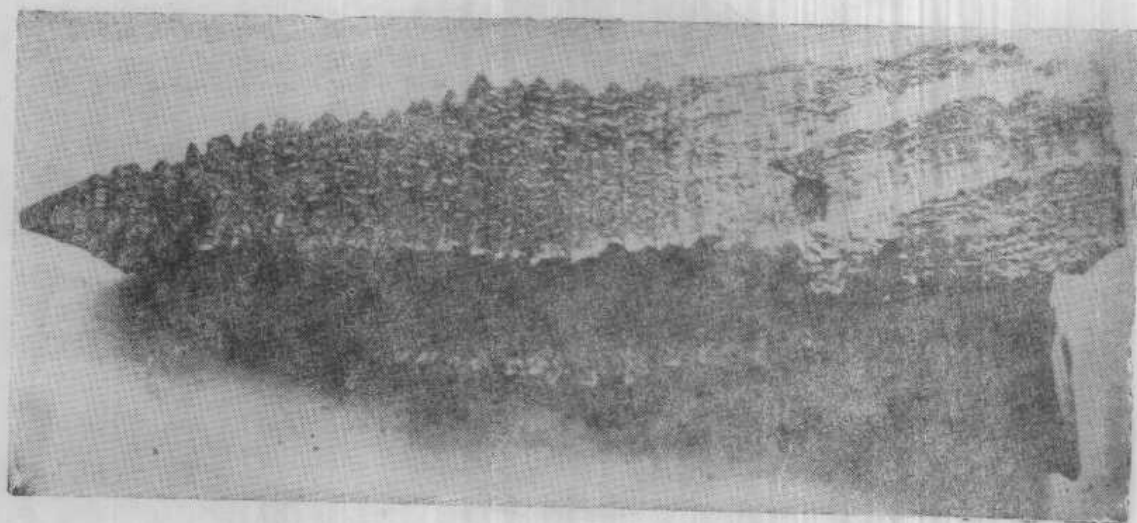


图1-2 钢锭缩腔中的大树枝状单晶体
1:1

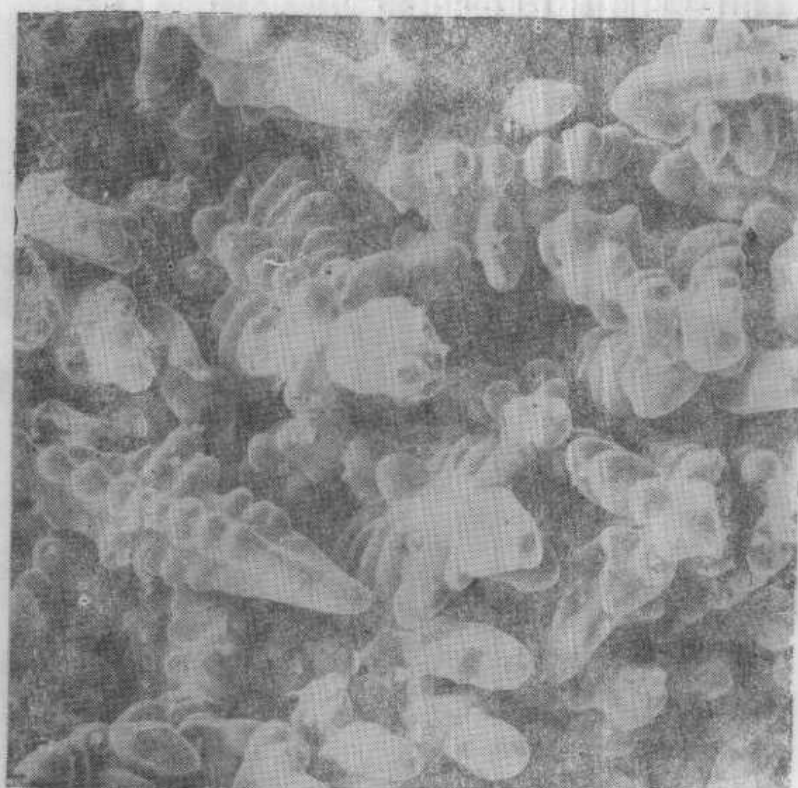
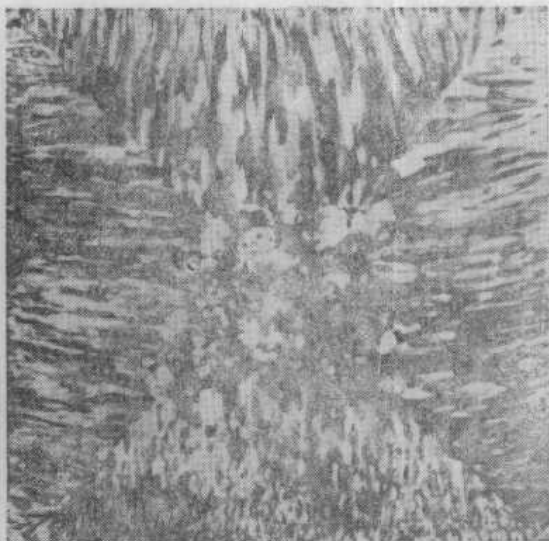
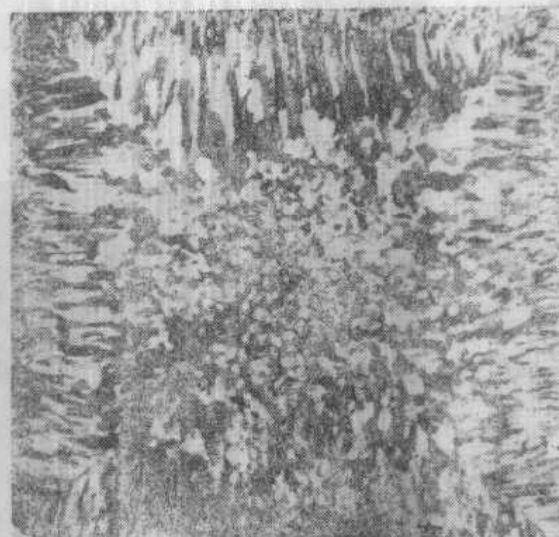


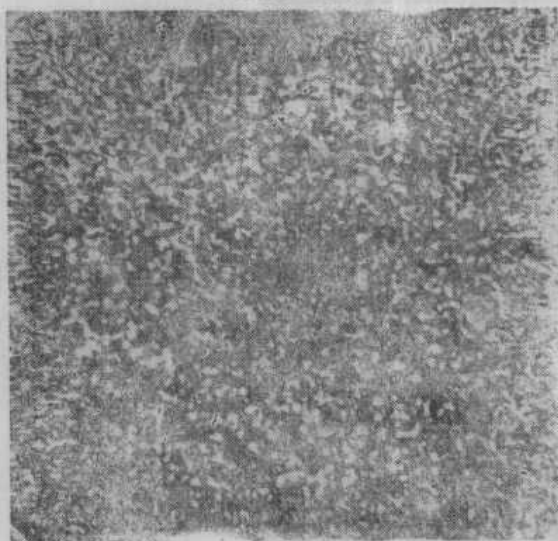
图1-3 亚共晶白口铁中的奥氏体树枝状晶 (扫描电镜照片)
×200



a) 浇注温度最高 1:3



b) 浇注温度较高 (中等) 1:3



c) 浇注温度最低 1:3

图1-4 含2.6%Si的钢锭在不同浇注温度下的宏观组织

由a到c随着浇注温度的下降, 表面激冷区与中心等轴晶区增大而柱状晶区减小, 三个晶区的晶粒度亦随之减小

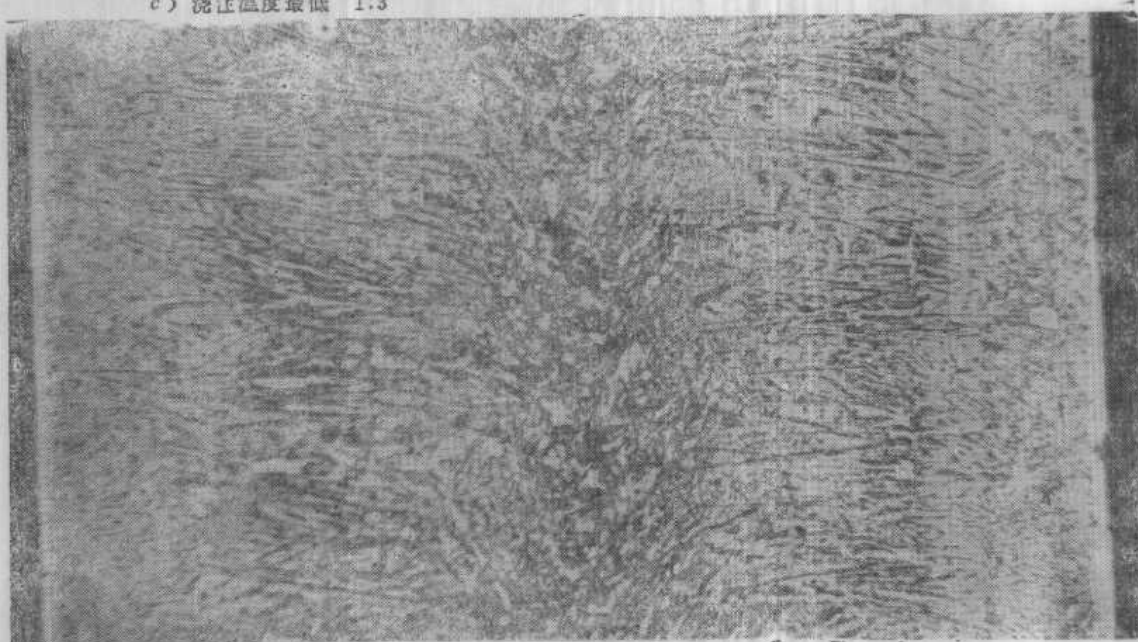
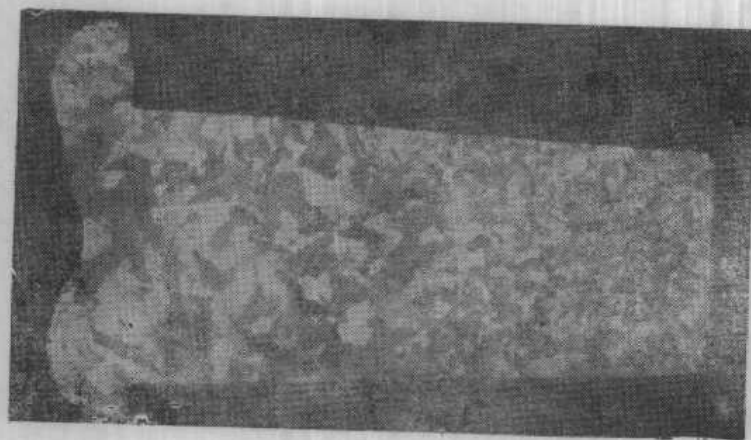
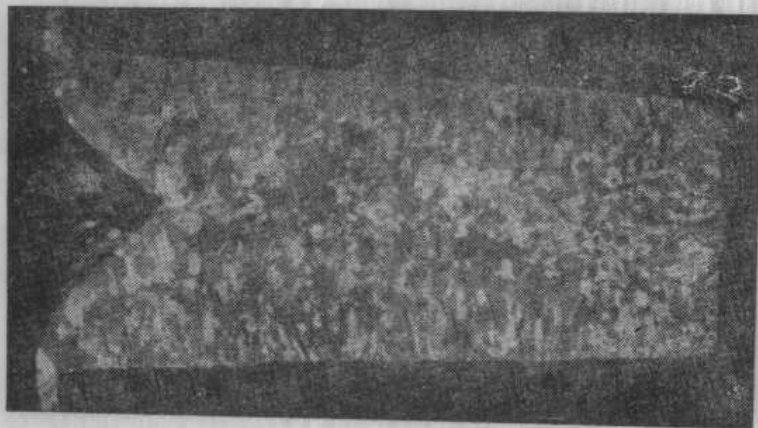


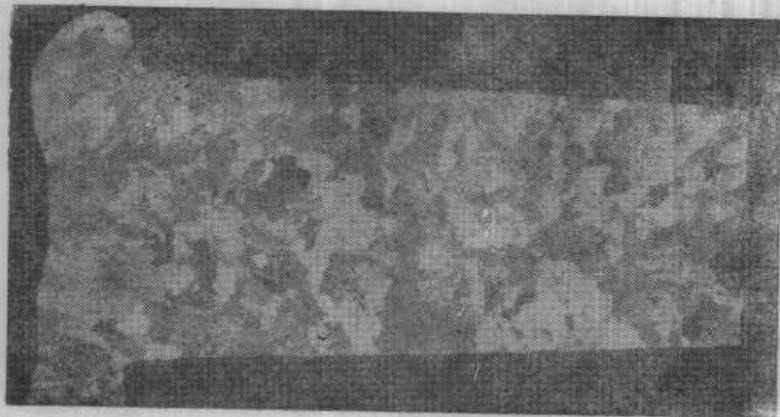
图1-5 钢锭三个晶区的树枝状结构 2:1



a) 熔化温度: 680°C
 浇注温度: 630°C
 砂型铸造, 均为较粗大的等轴晶



b) 熔化温度: 680°C
 浇注温度: 680°C
 金属型铸造, 显示出三个晶区



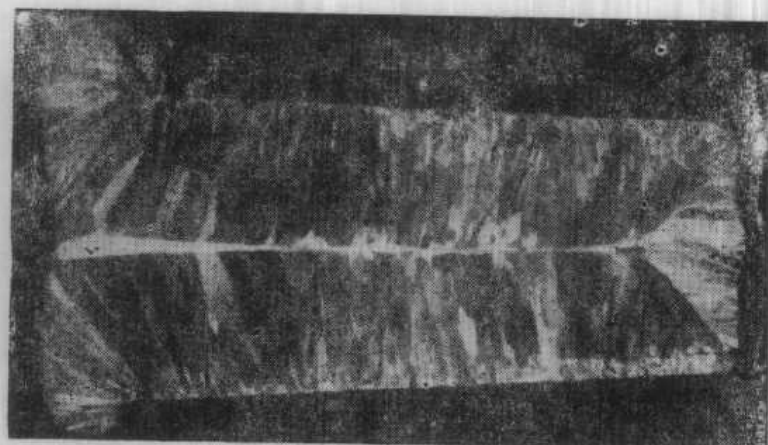
c) 熔化温度: 800°C
 浇注温度: 800°C
 砂型铸造, 显示出比 a 更为粗大的等轴晶



d) 熔化温度: 800°C
浇注温度: 800°C
金属型铸造, 显示出比晶粒尺寸大的柱状晶区和中心等轴晶区



e) 熔化温度: 900°C
浇注温度: 800°C
砂型铸造, 显示出极为粗大的等轴晶



f) 熔化温度: 900°C
浇注温度: 800°C
金属型铸造, 显示出“穿晶”组织

图1-6 不同铸造条件对纯铝铸造宏观组织的影响
均为1.5:1, 皆用硝酸盐酸 (1:1) 混合液浸蚀

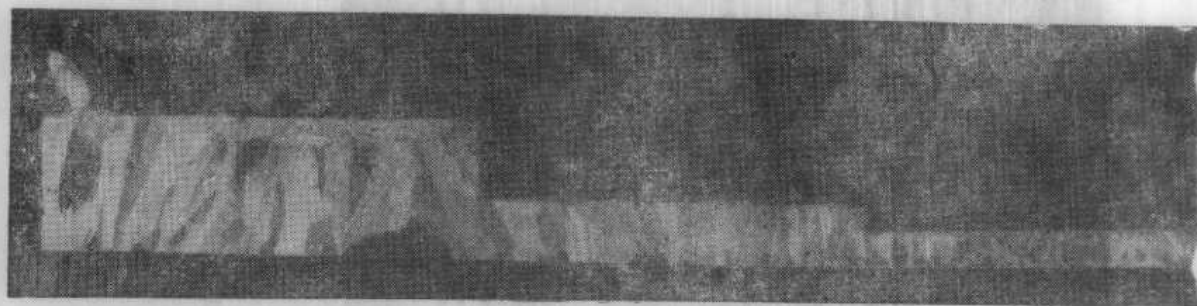


图1-7 纯铝阶梯试块的宏观组织，熔化温度 900°C ，浇注温度 800°C 。可以清楚地看出铸件壁厚对组织的影响

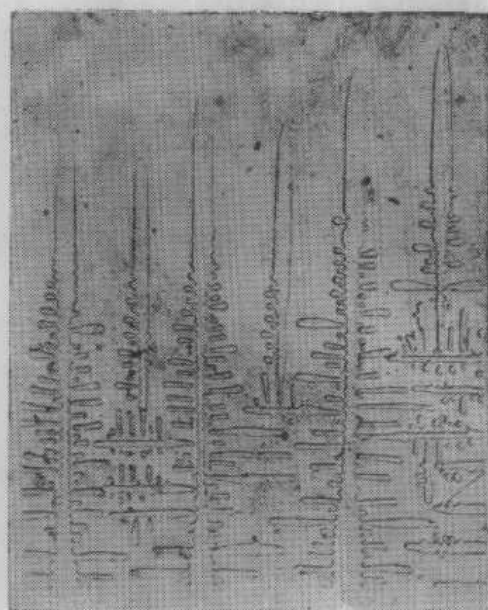
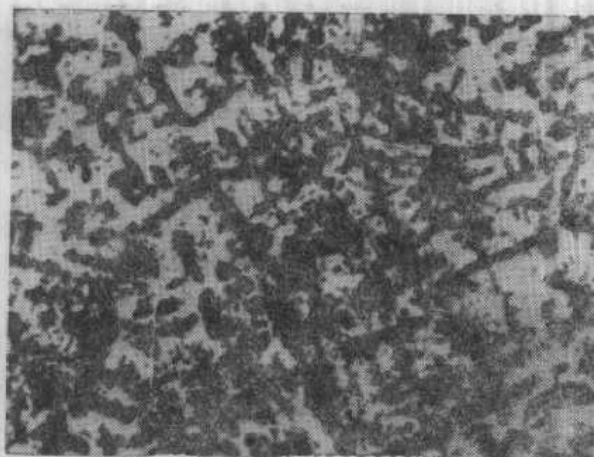


图1-8 樟脑结晶过程中枝晶根部颈缩熔断情况

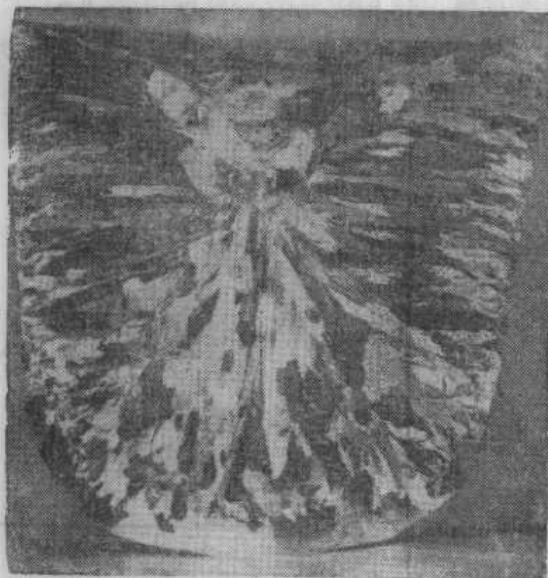


图1-9 亚共晶铸铁奥氏体树枝晶的缩颈及其枝被熔断后的痕迹



10:1

图1-10 4吨重的中碳钢铸锭横截面，显示出以树枝状方式长大。黑色为树枝晶轴，白色网状为原始奥氏体晶界



硝酸盐酸 (1:1)

a)

1:1



硝酸盐酸 (1:1)

b)

1:1

图1-11 振动对纯铝锭凝固组织的影响

a) 静置凝固：基本为粗大柱状晶组织

b) 振动下凝固：振动频率50Hz，浇注后立即振动。周围约1.5mm厚的粗晶层是在浇注过程中凝固的柱状晶振动后柱状晶被破坏，凝固成细小等轴晶粒