
*
*
* 铸 铁 学 教 程 *
*
*

第二分册 铸铁结晶理论及熔炼实践

[试 用 教 材 —— 第 二 稿]

成 都 工 学 院 铸 工 教 研 组 编

一 九 七 四 年 六 月 成 都

第一部分	教材内容	
第一章	灰铸铁的结晶及其控制	7
第一节	双重铁-碳状态图	7
第二节	铸铁的一次结晶	10
第三节	铸铁在固态时的组织变化	20
第四节	灰铸铁结晶过程总结	25
第五节	灰铸铁中石墨片的大小和分布	28
第六节	影响铸铁结晶与组织的因素	29
第二章	灰铸铁的性能	49
第一节	灰铸铁的机械性能	49
第二节	灰铸铁的铸造性能	61
第三章	铸铁的冲天炉熔炼	77
第一节	对冲天炉熔炼过程的基本认识	77
第二节	冲天炉熔炼过程的对立统一规律	78
第三节	冲天炉热过程的分析	84
第四节	冲天炉的送风系统	95
第五节	冲天炉的冶金反应及配料	113
第六节	我国冲天炉的介绍及分析	143
第七节	灰铸铁的孕育处理	157
第四章	无焦化铁炉熔炼	160
第一节	煤粉化铁炉	160
第二节	天然气化铁炉	170
第三节	油化铁炉	171
第四节	煤气——焦炭炉	173
第五节	工频感应电炉	174

第五章	稀土—镁球墨铸铁	179
第一节	在毛泽东思想光辉照耀下,我国球墨铸铁 取得飞跃发展。	178
第二节	球墨铸铁的生产技术	181
第三节	球墨铸铁的热处理	214
第四节	钒钛球墨铸铁	232
第五节	球墨铸铁的球化理论	250
第六章	可锻铸铁	257
第七章	特种性能铸铁	276
第一节	耐磨铸铁	276
第二节	耐蚀铸铁	279
第三节	耐热铸铁	280
第二部分	注 释	282
第三部分	使用资料	292
§ 1.	冲天炉的基本尺寸的决定	292
§ 2.	上海地区冲天炉主要参考数	297
§ 3.	冲天炉用鼓风机的规格性能	297
第四部分	参考资料	299
第一篇	对冲天炉供风的意见	299
第二篇	对复杂薄壁片状石墨铸铁件中形成疏松 的研究	306
第三篇	工频炉熔炼球铁	310

毛 主 席 语 录

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

学制要缩短。课程设置要精简。教材要彻底改革，有的首先删繁就简。

马克思主义的哲学认为十分重要的问题，不在于懂得了客观世界的规律性，因而能够解释世界，而在于拿了这种对于客观规律性的认识去能动地改造世界。

唯物辩证法的宇宙观主张从事物的内部、从一事物对他事物的关系去研究事物的发展，即把事物的发展看做事物内部的必然的自己的运动，而每一事物的运动都和它的周围其他事物互相联系和互相影响着。

说

明

毛主席教导：“教材要彻底改革”。

彻底改革旧教材，编写无产阶级新教材，是无产阶级教育革命的重要组成部分。在毛主席教育革命思想指引下，在广大工农兵和有关工厂、科研单位、高等院校的大力支持和帮助下，我们编写了这份“铸铁学教程”，作为铸造专业的试用教材。

根据本专业以工艺为主的精神，确定本课的性质是：研究铸造合金理论并掌握成分、组织与性能之间的辩证关系，以指导熔炼工艺实际的专业课程；在“铸铁学教程”这一本教材中，改变了旧教材以合金为主的体系，从课程体系上以工艺（工艺理论、工艺方法、工艺性能）为主，从合金种类上，以普通灰铸铁和球墨铸铁为主，从熔炼的方法上以中国式的冲天炉为主。在内容上力求联系我国当前的生产实际，加强理论分析，并总结了一些本地区工农兵的发明创造。这份教材也力求用唯物辩证观点来分析问题。

但是，由于我们对伟大领袖毛主席的教育革命思想理解不深，无论从这份教材的体系上，内容的取舍上，宣传唯物辩证法上，都会有不少缺点和错误，恳切地希望广大工农兵和革命师生以及科技人员批评指正。

成都工学院铸工教研组

1974年7月

铸 铁 学 教 程

绪 言

铸铁是一种应用最为广泛的铸造结构材料，因为它的成本低廉，铸造性能良好，机械性能可以达到一般需要的要求，故被广泛地应用于机器制造、冶金、矿山、建筑、交通运输及国防工业部门。在机器制造业中，铸铁件所占的比重约为机器重量的45~85%，机床和重型机械则要占85~90%。

我国是世界上最早采用铸铁技术的，由铜器时代进入铁器时代，铸铁术是起着了重要作用，它对我国历史的前进作出了很大贡献。

中国人民在世界上首先使用了铁，在周朝(公元前1122~247年)时，用铁已经很普遍了。在当时有“取厉取鍛”、“駟驥孔阜”之句，“取鍛”是指取铁器的意思。驥(音铁)者，马赤黑色的意思，就是以铁色来形容马的颜色，可见当时用铁之普遍。铸铁的技术，我国在公元前五百多年就已经达到了相当高的水平，如“左传”曾记载：“冬，晋赵鞅，荀寅帅师，城汝滨，遂赋晋国一鼓铁，以铸刑鼎，著范宣子所为刑书焉”。即是在说，在公元前513年，晋国的卿大夫赵鞅，荀寅在汝水之滨筑城，广泛征收铁，以把刑律铸造在铁鼎上(“鼓”可释为“鼓铸”之意。)可以设想，这样著有“刑书”的大铁鼎，如果没有很好的冶铁设备，铸铁技术，怎么能够作成这样著名的颁布成文法律的大铁具呢？其他如用生铁铸造的农具、工具、武器，精美的艺术品，都达到了比较高的水平，铸铁术的提高是与铸冶炉的进步分不开的，铸冶炉由原来的人排(人力鼓风)到畜排(畜力鼓风)到水排(水力鼓风)，就使得炉子获得了高温，这就有利于炉内冶金反应的进行。因而保证了铸铁的机械性能和使用性能。

我国的铸铁技术要比欧洲早1500多年。

但是，由于长期的封建统治，特别是近百年来，我国受到帝国主义的残酷掠夺，使我国生产停滞不前，铸铁技术长期得不到发展，很多技艺失传，在解放前夕，只能生产一些简单的农具，修配一些简单的零件。

解放后，在毛主席和中国共产党的英明领导下，无比优越的社会主义制度，为我国充分利用自然资源，发展机器制造业，发展铸铁技术，开辟了广阔的前途。用马克思列宁主义、毛泽东思想武装起来的，战斗在铸造战线上的广大工人、干部、技术人员高举“鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义”总路线的伟大红旗，坚持“独立自主，自力更生”的伟大方针，怀着为伟大社会主义祖国争光的雄心壮志，迅速地改变着铸造业的落后面貌。在铸铁方面，不但建立了各种牌号的灰铸铁，可锻铸铁，球墨铸铁和各种特种性能的铸铁体系，而且闯出了“以铁代钢”“以铸代锻”的发展道路，在熔炼技术方面，更是出现不少新工艺、新技术，都具有中国自己独特的风格，例如小风口，多排风口热风冲天炉，煤粉化铁炉，利用劣质焦熔炼优质铁，利用地方生铁处理球铁。通过史无前例的无产阶级文化大革命，广大铸造工人、干部、技术人员，遵照毛主席“中国应当对于人类有较大的贡献”的伟大教导，“打破洋框框，走自己工业发展道路”，狠批了刘少奇一类骗子的“爬行主义”和“洋奴哲学”，坚持走《鞍钢宪法》的道路，开展“工业学大庆”的群众运动，使我国铸造战线呈现了一派欣欣向荣的繁荣景象。球墨铸铁的迅速发展就是一个典型的例子。

我国球墨铸铁生产是在两条路线斗争的过程中逐渐发展起来的。建国以来，在毛主席的革命路线指引下，我国广大工人和科技人员，破除迷信，解放思想，于1950年试验成功了球墨铸铁；1951年无锡柴油机厂等单位开始生产中试用；以后球铁生产得到迅速发展。1960年正当国内遭受自然灾害，国际上帝、修、反加紧对我国进行封锁时，包钢广大职工贯彻毛主席“独立自主，自力更生”的方针，于1961年成功的从炉渣中提炼

出稀土，为我国发展球铁生产提供了丰富的物质资源，推广了稀土在钢铁中应用的经验。采用稀土镁球化剂冲入法处理球墨铸铁，提高了球铁产品质量、简化了操作、改善了劳动条件，为我国球铁生产技术提高到一个新的水平。无产阶级文化大革命彻底粉碎了刘少奇一类骗子复辟资本主义的阴谋，排除了修正主义路线的干扰，毛主席的革命路线取得了伟大的胜利，大好的革命形势，有力的推动了球铁生产的进一步发展。几年来，我国球铁的产量迅速增长，应用范围不断扩大，一些新的热处理工艺、精密铸造和低压铸造等新工艺在球铁生产中得到应用，使球铁由试验和小批量生产发展到比较广泛应用的阶段。我国不少铸铁车间都能生产球墨铸铁，还建立了年产七千吨的专业球铁生产厂。目前，球铁已比较广泛地应用在柴油机、汽车、农机和矿山，通用机械行业。从重几克的手扶拖拉机调节臂到重卅二吨的水压机零件；从农用 195 小型柴油机到中型载重汽车的曲轴、连杆、凸轮轴以及卅二吨自卸载重汽车的曲轴大都采用球墨铸铁。南京汽车厂生产的一种载重汽车共有廿五个零件采用球铁，占金属材料总重的百分之廿到廿五；无锡机床厂生产的内圆、无心、轴承系列磨床，1972 年已有百分之六十七的机床主轴采用球铁。通用机械方面的冷冻机、压缩机的曲轴、连杆、高压缸等重要零件也基本上采用了球铁，取代了部分铸钢、型钢、合金钢和可锻铸铁。

球铁的广泛应用，代替了大量钢材，据不完全统计，一机系统 1971 年球铁总产量约 $\times\times$ 万吨，为国家节约了 $\times\times$ 万吨的钢材。此外，由于铸件毛坯加工余量少，还节约了加工工时，降低了成本。例如，广州柴油机厂生产的 6300 柴油机曲轴，净重九百公斤，采用铸钢件毛坯重达 4 吨，而改用球铁重量仅 1.2 吨，不仅节约了金属材料，而且使加工工时减少了六分之五，成本由二万一千元下降到三千元，降低了百分之八十五。无锡机床厂的 M250A 型磨床主轴，采用球铁后，每根成本约降低百分之七十一。

国内球铁机械性能不断提高。第一次全国球铁会议以前，生产的普通

球铁的强度仅50公斤/毫米²左右,目前,在保持原来的延伸率的条件下,强度已达到60~70公斤/毫米²,经等温热处理后,普通球铁强度超过100公斤/毫米²,合金球铁等温热处理强度可达120~150公斤/毫米²。

球铁品种也日益增多。近年来发展了中锰球铁、钼合金球铁、铜合金球铁、钼铜合金球铁、钒钛合金球铁、耐酸球铁等十几种类型的特种球铁。基本满足了各种特殊性能的要求,并已在生产中应用。

“思想上政治上的路线正确与否是决定一切的”,在伟大领袖毛主席的革命路线指引下,沿着“十大”团结、胜利的路线,我国工农业必将出现一个新的飞跃,广大铸造工作者必将为我国铸铁技术的发展作出新的贡献。

第一部分 教 材 内 容

第一章 灰铸铁的结晶及其控制

在生产实践中发现，灰铸铁的性能——机械性能和物理化学性能，是为铸铁的组织所决定的。那么，这些金相组织在什么条件下形成的，又是怎样形成的呢？我们遵照毛主席关于“要了解运动的全过程，开始怎样，后来怎样……发生了一些什么矛盾和斗争……从中找出规律性的东西”的伟大教导，对于灰铸铁的结晶过程要进行深入的了解，掌握其变化的规律和组织性能之间的辩证关系。为进一步提高铸铁件的质量，作出我们应有的贡献，以满足社会主义革命和建设的需要。

铸铁可以看作是铁、碳和硅的三元合金，其它元素可以看作是铸铁中的杂质，在研究铸铁结晶现象时，为简化起见，通常以铁、碳二元状态图来分析其组织转化的过程。

第一节 双重铁—碳状态图

从铁—碳状态图知道，含 $C > 2.0\%$ 的铸铁组织是珠光体加渗碳体，即是莱氏体，也就是白口铁组织。白口铁强度很低，既硬又脆，加工困难，因此生产上很少使用。

大量生产实践证明：铸铁不只是能按照铁—碳状态图获得白口组织，而且能够得到具有石墨的灰口组织（因为铸铁虽选 $Fe-C-Si$ 三元合金，但为了讨论的简化，通常仍以 $Fe-C$ 二元合金状态图来分析其组织转化的过程）。

§ 1. 过冷度的概念：

1. 什么叫过冷度：

每一种金属或合金都有一个一定的理论结晶温度 t_1 ，如图1-1。但是，金属（或合金）从液态冷却到理论结晶温度时都不会马上结晶，总要使温度降到比理论结晶温度低一些的温度 t_2 时才能够结晶，并在此温度下

完全结晶，这个理论结晶温度与实际结晶温度之差 Δt 就叫过冷度。

为什么会出现过冷度呢？这可以用自由能来解释。因为理论结晶温度时是固相和液相的自由能相等，在此温度以上时，则液相的自由能 $<$ 固相的自由能，所以金属稳定地处于液态，在此温度以下时，则液相的自由能 $>$ 固相的自由能（图 1-2），所以金属稳定地处于固态。在理论结晶温度时，液相、固相处于平衡状态，液相中可以结晶出固相，固相又可重新熔化为液相，因此只有温度低于它时，才能使结晶完成。

2. 过冷度的大小是由什么决定的？

过冷度的大小则因条件不同而不同。对于铸铁来说，合金本身的成分是其内因，冷却速度的大小是主要的外部因素。所以判断一种合金（一个牌号的铸铁）的过冷度大小是要从这两个方面去考虑的。对于亚共晶铸铁来说：同样冷却速度的条件下，C、Si 含量越低则过冷度就越大，外来晶核多时过冷度就小些。所以孕育处理会减少过冷度。在同样成分的条件下，冷却速度越大则过冷度也越大。

§ 2. 双重 Fe-O 状态图：

双重 Fe-O 状态图见图 1-3，也就是 Fe-Fe₃O 相图和 Fe-O 相图共存，图中虚线表示 Fe-O 石墨相图，称稳定系统状态图，实线表示 Fe-Fe₃O 相图，称介稳定系统状态图。

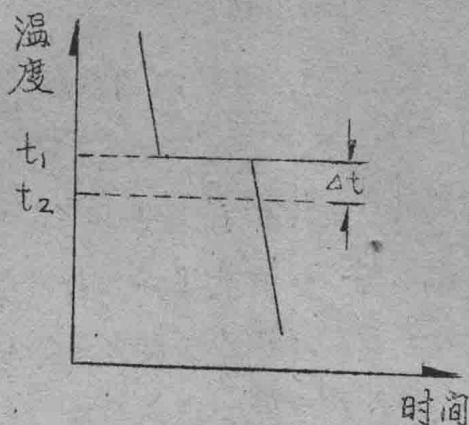


图 1-1

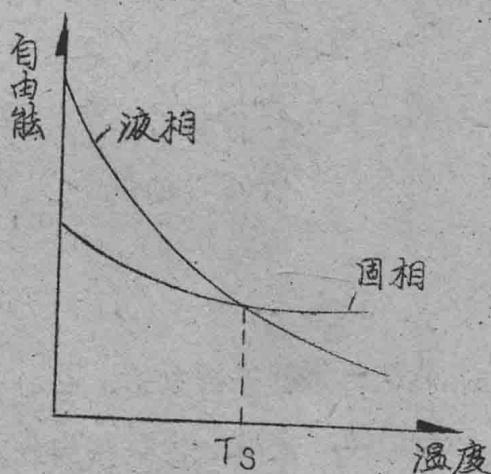


图 1-2

从图中可以看出：铸铁在结晶的过程中，碳可能生成 Fe_3C ，也可能以石墨的状态存在。

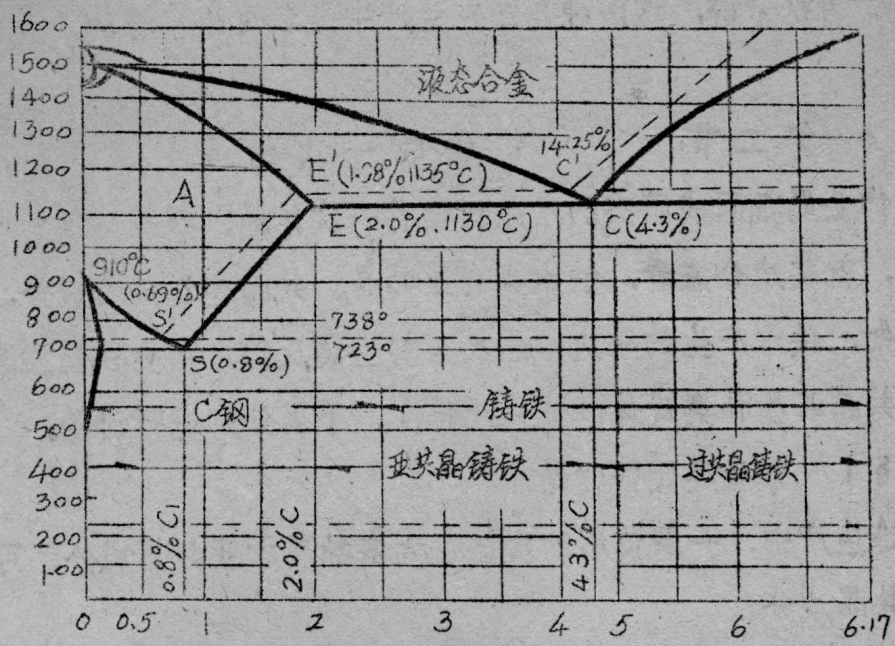
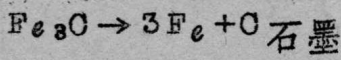


图 1-3 铁碳合金双重状态图

为什么会有双重相图出现呢？这是因为：

1. 是因为石墨是比渗碳体更稳定的相。只要是条件可能的话（过冷度不大），它总是以下式反应，结果形成石墨。



因此在结晶的过程中，长时间的停留，提高温度和缓慢冷却的条件下，石墨总是会析出来的。所以就应该有一个析出石墨的稳定系统的状态图。

2. 虽然石墨是最稳定的相，但是由于石墨含碳量是100%，而渗碳体的含碳量是6.67%，从碳原子扩散的难易程度来看，还是形成渗碳体比较容易。另外渗碳体的结晶构造比石墨更接近于铁的结构，因此从铁水中产生渗碳体比石墨的形核功小，这样产生渗碳体晶核比较容易。所以在实际生产的条件下，过冷度大时合金就要全部或部分（在共析阶段）按介稳定系统转化。

3. 因为析出石墨的稳定系统状态图的共晶与共析温度，都比介稳定系

统的高，其晶点的含碳量（4.25%）都比介稳定系统的（4.3%）低，所以当把它们表示在同一状态图上时，就出现了双重相图。

对于铸铁来讲，这两种相图在生产中是都可以出现的。

第二节 铸铁的一次结晶

液体金属凝固成固态的结晶过程称一次结晶。根据铸铁材料使用的具体情况，就其成分来看，铁水具有亚共晶、共晶和过共晶成分，从双重铁碳图可知，铁水产生的一次结晶相有初生奥氏体、初生石墨或渗碳体和共晶体（共晶石墨和奥氏体，或莱氏体），下面分别进行讨论。

§ 1. 初生奥氏体的结晶：

铸造生产中，一般使用的灰铸铁大多数属于亚共晶成分，可锻铸铁都属于亚共晶成分。

如图 1-4 所示：设亚共晶铁水成分含碳为 $C_1\%$ ，铁水浇注温度为 t_1 （即图 1-4 中的 1 点），浇到铸型后，由于铁水温度下降，必产生结晶。由相图可知，产生的初生相是奥氏体。

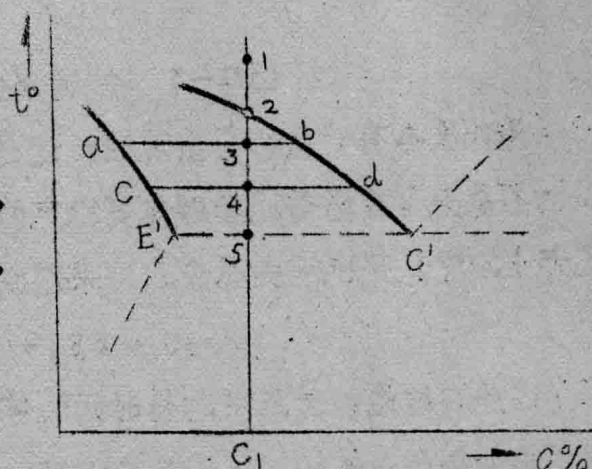


图 1-4 Fe-C 状态图的一部分

同金属学讨论纯金属结晶一样，液体铁水的结晶，铁水温度必须过冷到液相线温度以下某一温度，才能开始。如图 1-4 中，含 C 量为 C_1 的铁水，温度从 t_1 冷却到 t_2 ，显然不可能形成晶核，只有冷却到 t_3 （图中 3 点），才开始结晶。

铁水温度在 t_3 时，在液体中首先析出初生的奥氏体，奥氏体是以树枝状晶体的形式析出的。所生的奥氏体(A)比液体成分含有较多的铁，其成分在状态图上是 a 点的成分，和奥氏体接触的液体成分是 b 点，此处的含碳

量高于液相的平均含碳量（即 3 点成分）。则液相由于奥氏体的形成，产生了浓度梯度，于是发生液体中碳的扩散过程，即碳原子离开结晶前沿着（相界面）背离结晶方向移去，而远离晶核铁水中的铁原子则向结晶前沿扩散转移如图 1-5 所示。这样在相界面上的铁水由于含碳量的减少和铁原子浓度的增加，这就破坏了奥氏体与其靠近的铁水的平衡浓度，这样使析出的奥氏体继续结晶长大，又恢复相界面的两相平衡。这样又造成铁水中碳（或铁）成分的不均匀性，又必然会引起成分的均匀扩散，才促使奥氏体继续长大。如此往复循环，最后在 t_3 温度下，整个液相的含碳量达到 b 点时，奥氏体才停止结晶。

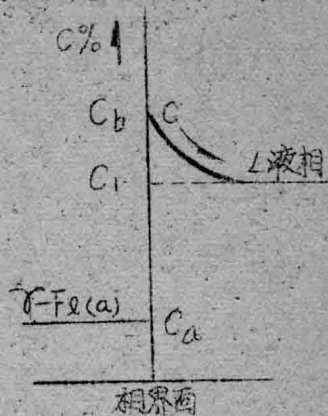


图 1-5 晶核扩散成长的示意图

可见在 t_3 温度下，仍存在着大量铁水，如果要使其继续结晶，就必须继续冷却，设再冷却到 4 点即 t_4 温度，这时可能产生两种情况：一个是此过冷度下再产生新的奥氏体晶核；一个在原奥氏体上继续长大。前者与上面讨论的过程相似。而后一种情况就比较复杂，因为 t_3 时产生奥氏体含碳量对应 a 点即 C_a %，而在 t_4 时在原奥氏体上增大的部分，它的含碳量对应 c 点即 C_c %。由于 $C_c > C_a$ ，这就造成了奥氏体固相中碳（或铁）成分的不均匀性，即先结晶的含碳量低，后结晶的奥氏体含碳量较高。所以在 t_4 温度下继续结晶，除了与上述过程相同的部分外，又加入了固相中的扩散过程，即碳原子向奥氏体晶体内扩散，而铁原子由内向外的扩散转移过程。若此过程在结晶来不及进行，则凝固后得到的奥氏体晶粒内的成分则不均匀，这种晶粒内部化学成分的不均匀性叫晶内偏析，它对铸件质量有不良的影响，特别是对机械性能的影响。为了消除晶内偏析，往往采用均匀扩散化退火。另外，结晶核心多，奥氏体晶粒愈细小，晶内偏析程度也减少。

总之在亚共晶铸铁的第一次结晶中，随着初生奥氏体的不断析出，剩下的液体成分随着 BC' 线不断变化，直至达到共晶温度时，剩下的液体并达到共晶成分 C' ；然后这一部分铁水在共晶温度下发生共晶转变。

至于初生奥氏体的量，可由杠杆定律来确定，如图 1-4。合金为含碳量 C_1 的铸铁，在达到共晶温度时，初生奥氏体的量与共晶成分的液体的量之比等于线段 $5C'$ 与 BC' 之比。

§ 2. 初生石墨与初生渗碳体的结晶：

含过共晶成分的铁水，从图 1-3 双重 $Fe-C$ 状态图中可见，铁水浇入铸型后，冷却过程中，应首先产生初生石墨或初生渗碳体的结晶。到底是先析出石墨，还是先结晶初生渗碳体呢？这要看铁水的结晶条件。

1. 产生初生石墨或初生渗碳体的条件

在实际生产中，同样成分的铁水，当冷却条件速度快，就容易产生白口，而冷却速度较慢的厚壁部分则产生灰口，即是说前者是铁水中结晶出渗碳体，后者则结晶出石墨。

在金属学中我们学习了液体金属的结晶条件，已经知道，要产生结晶必须首先满足热力学条件，系统的自由能必须向最小的自由能方向转化，也即说新相系统必须处于最小的自由能。现在过共晶铁水存在向铁水 + 初生石墨和铁水 + 初生渗碳体二个方向变动。石墨比渗碳体稳定，因为渗碳体本身就是一个不稳定相，在一定条件下就要向石墨转化，所以从自由能观点看，铁水 + 石墨比铁水 + 渗碳体系统的自由能小，因此它们与铁水的自由能和温度的关系可用图 1-6 示意图表示。

曲线 1 和 2 的交点，表示铁水的自由能与铁水 + 初生渗碳体自由能相等，即为图 1-3 双重状态图的平衡点，因该交点即对应 $Fe-C$ 状态图液相线温度。同理曲线 1 和 3 的交点，应对应 $Fe-C$ 状态图 $C'D'$ 液相线温度。

从图 1-6 可见，在 $t_{C'D'}$ 以上温度时，最稳定的液相（铁水的自由

能最低)，因而不发生结晶。当

过共晶铁水过冷到 t_1 产生结晶，

而 $t_{CD} < t_1 < t_{C'D}$ 时，此时，

$\bar{F}_{\text{铁水} + \text{渗碳体}} > \bar{F}_{\text{铁水} + \text{石墨}}$ ，

因而只能由铁水中析出初生石墨，

而不可产生初生渗碳体结晶，如

铁水具有较大的过冷度，这时冷

却到 t_2 才产生结晶。且 $t_2 < t_{CD}$

$< t_{C'D}$ ，这时 $\bar{F}_{\text{铁水}} > \bar{F}_{\text{铁水}}$

$+ \text{渗碳体} > \bar{F}_{\text{铁水} + \text{石墨}}$ 。显然

这时从铁水中既可能结晶出石墨，

又可能结晶出渗碳体，但由于铁水+石墨的自由能最小，因而更有利于初生石墨的结晶。

但从结晶动力学方面来看，我们知道渗碳体的含量为6.67%，而石墨含碳量近100%，两者含碳浓度差别很大，而从两者的晶体结构上来看，我们知道石墨是属于六方晶，它是层状结晶。在每层原子间作用着强大的共价键，而层与层间，彼此有较大的距离，键的作用比较弱，所以很容易分层。至于渗碳体的晶格构造就比较复杂，至今尚无统一看法。在每一个碳原子周围都有6个铁原子。

从渗碳体和石墨的结晶构造来看，可见渗碳体比石墨更接近于铁的结构，因而从铁水产生渗碳体晶核比石墨所需的浓度和结构涨落要小，即形核功也小。所以从动力学观点看，产生渗碳体晶核比形成石墨晶核容易。其次，从晶体成长的难易程度来看，石墨的长大比渗碳体长大更困难。基于上述分析，可见，从结晶动力学观点来看，是有利于渗碳体的形成，而不利石墨的形成。

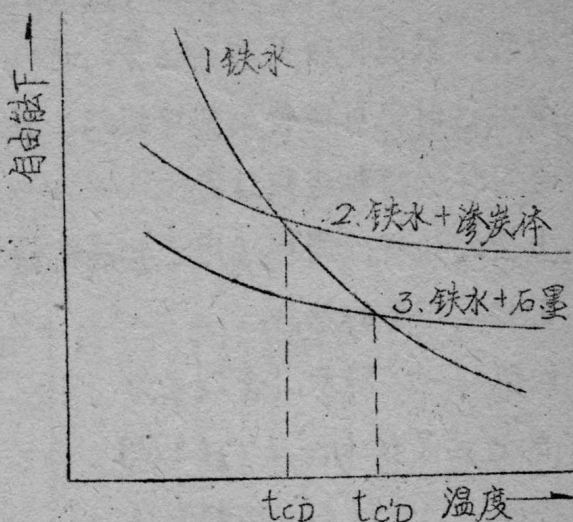


图 1-6 过共晶铁水自由能和温度关系

但是在实际生产中，铸铁结晶过程中，过冷度也并非只是结晶出石墨的唯一条件，如在能产生较大过冷度的金属型中浇铸铁件，如果对铁水进行孕育处理，或配比较高的碳硅量，这样使铁水中产生大量的非自发结晶核心，显然这时仍可能得到灰口组织，且由于过冷度大，非自发与自发核心多，还可促进铸铁组织致密。

上面的分析，同样适用于共晶铸铁的固态转变。

2. 初生石墨的结晶：

如图 1-7 所示，含碳量为 $C_0\%$ 的过共晶铁水，从 t_1 (1 点) 温度冷却，显然从 t_1 冷却到与 $O'D'$ 线相交的 2 点，即 t_2 的温度，无结晶现象发生。但在 t_2 温度铁水已达到石墨的饱和成分，

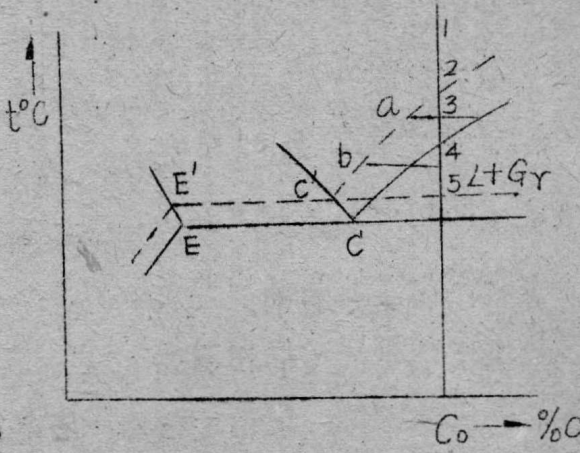


图 1-7 Fe-C 状态图的一部分

如果没有一定的过冷度，也不会产生石墨结晶。若过冷到 3 点，而不超过 4 点 (与 $O'D$ 线相交) 就结晶出石墨。

在 t_2 温度下，形成石墨核心与长大过程与上面讨论的初生奥氏体的结晶过程相似，即析出石墨核心及长大后，在石墨与铁水的界面上铁水含碳量应对应 a 点，而远离这个界面的铁水平均含碳量为 3 点。

如图 1-8 示意图，在 t_2 温度下，铁水内由于形成碳的浓度差，势必造成碳原子向铁水/石墨的相界面

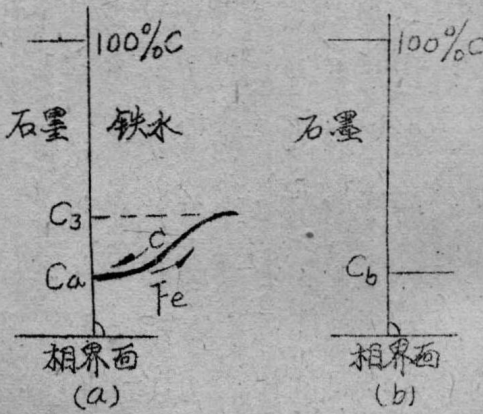


图 1-8 石墨结晶过程原子扩散的示意图

方向扩散，使石墨不断长大，但这一过程也是石墨/铁水界面处，铁水的