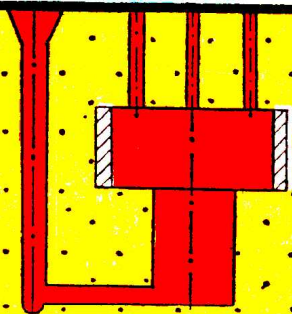
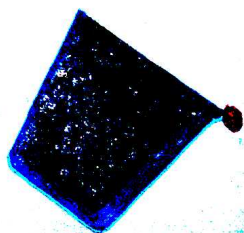


普通高等教育  
兵工类规划教材

# 球墨铸铁件无冒口铸造

穆光华 赵忠兴 编著



兵器工业出版社

# 球墨铸铁件无冒口铸造

穆光华 赵忠兴 编著

兵器工业出版社

**(京)新登字049号**

## **内 容 简 介**

本书除总结了作者及国内外学者关于球墨铸铁件无冒口铸造的理论研究成果和实践经验外,还较系统地介绍了球墨铸铁的结晶规律、熔化和处理工艺、凝固特点和铸造性能。本书理论与实践相结合,可以促进球墨铸铁件无冒口铸造技术的推广和应用。

本书可供从事球墨铸铁生产和科学研究的广大科技人员及大专院校师生参考,亦可作为铸造专业学生的选修课教材。

## **球墨铸铁件无冒口铸造**

**穆光华 赵忠兴 编著**

**\***

**兵器工业出版社 出版**

(北京市海淀区车道沟10号)

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经销

北京市通县向阳印刷厂印装

**■**

开本: 850×1168 1/32 印张: 6.125字数: 155,904千字

1994年2月第1版 1994年2月第1次印刷

印数: 1-1200 定价: 2.90元

ISBN 7-80038-655-4/TG·39(课)

## 出 版 说 明

遵照国务院国发[1978]23号文件精神,中国兵器工业总公司承担全国高等学校兵工类专业教材的规划、编审、出版的组织工作。兵总教材编审室自1983年成立以来,在广大教师的积极支持和努力下,在国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的积极配合下,已完成两轮兵工类专业教材的规划、编审、出版任务,共出版教材211种。这批教材的出版对解决兵工专业教材有无问题、稳定教学秩序、促进教学改革、提高教学质量都起到了积极作用。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设的需要,特别是适应国防现代化培养人才的需要,反映国防科技的先进水平,达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求,我们以提高教材质量为主线,完善编审制度、建立质量标准、明确岗位责任,建立了主审审查、责任编委复审和教编室审定等5个制度,并根据兵工类专业的特点,成立了九个专业教学指导委员会和两个教材编审小组,以加强对兵工类专业教材建设的规划、评审和研究工作。

为贯彻国家教委提出的“抓好重点教材,全面提高质量,适当发展品种,力争系统配套,完善管理制度,加强组织领导”的“八五”教材建设方针,兵总教材编审室在总结前两轮教材编审出版工作的基础上,于1991年制订了1991~1995年兵工类专业教材编写出版规划,共列入教材220种。这些教材都是从学校使用两遍以上、实践证明是比较好的讲义中遴选的。专业教学指导委员会从兵工专业教材建设的整体考虑,对编写大纲进行了审查,认为符合兵工专业培养人才要求,符合国家出版方针。这批教材的出

版必将为兵工专业教材的系列配套、为教学质量的提高、为培养国防现代化人才、为促进兵工类专业科学技术的发展，都将起到积极的作用。

本教材由杨景祥主审，经中国兵器工业总公司教材编审室审定。

限于水平和经验，这批教材的编审出版难免有缺点和不足之处，希望使用本教材的单位和广大读者批评指正。

中国兵器工业总公司教材编审室

1992年12月

# 前 言

球墨铸铁具有良好的机械性能，其成本与铸钢、锻钢相比可降低三分之一到二分之一，而且易于组织生产。自1948年球墨铸铁用于工业生产以来，虽然仅有四十多年的历史，但发展很快，使用范围遍及机械、汽车、农机、船舶、冶金、化工、管道工程等各个工业部门。其产量远远超过铸钢和可锻铸铁，已成为一种重要的铸造合金材料。

但众所周知，球墨铸铁件容易产生缩孔、缩松等铸造缺陷。为了防止这些缺陷的产生，常常采用铸件重量30%~50%的冒口进行补缩。这样既浪费原材料，又增加了清理工作的困难，影响生产效率和经济效益。

从70年代起，国外学者开始就对球墨铸铁件产生缩孔、缩松问题密切相关的球铁共晶膨胀问题进行了研究。一些国家的铸造工作者先后设计了各自的测试装置，对镁球墨铸铁的共晶膨胀参数进行了研究和测定。我国学者也于80年代初，对稀土镁球墨铸铁的共晶膨胀参数进行了研究和测定，从而为无冒口铸造工艺奠定了理论基础。

球墨铸铁件无冒口铸造，早在三十多年前就开始研究和应用，但它被得到公认和重视，还是近十几年的事。加拿大铁及钛公司总冶金师S·I·卡塞(S.I.Karsay)博士做了卓有成效的工作，提出了重要论述。国内也有不少工厂与大专院校合作实现了球墨铸铁件的无冒口铸造，取得了明显的经济效益和宝贵的经验。

本书除总结了作者本人及国内外学者关于球墨铸铁件无冒口铸造的理论研究成果和实践经验外，还较系统地介绍了球墨铸铁的结晶规律、熔化和处理工艺、凝固特点和铸造性能。本书力求

理论与实践相结合，以促进无冒口铸造技术的推广和应用。书中介绍的无冒口铸造工艺实例，都已为国内外生产实践证明是有效的。本书是一部对实际生产有指导意义的专业著作，并有一定的理论深度，可供从事球墨铸铁件无冒口铸造的广大科研人员、工程技术人员、大专院校师生参考，亦可作为铸造专业学生的选修课教材。

本书由沈阳工业大学杨景祥教授审阅并提出宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳切希望读者批评指出。

编者

1992年11月

# 目 录

|                            |        |
|----------------------------|--------|
| <b>第一章 球墨铸铁的结晶规律</b> ..... | ( 1 )  |
| 第一节 铁-碳及铁-碳-硅相图 .....      | ( 1 )  |
| 一、铁-碳合金双重相图及分析 .....       | ( 1 )  |
| 二、铁-碳-硅相图的分析.....          | ( 3 )  |
| 三、球化元素对相图的影响.....          | ( 6 )  |
| 第二节 球状石墨的形核.....           | ( 8 )  |
| 一、球状石墨的结构及化学成分.....        | ( 8 )  |
| 二、球状石墨的析出温度.....           | ( 11 ) |
| 三、球状石墨的形核.....             | ( 13 ) |
| 第三节 球状石墨的生长.....           | ( 20 ) |
| 一、球状石墨的生长条件.....           | ( 20 ) |
| 二、球状石墨的生长机构.....           | ( 27 ) |
| 三、球状石墨生长过程的三个阶段.....       | ( 30 ) |
| 第四节 球墨铸铁的孕育理论.....         | ( 34 ) |
| 一、孕育处理的实质.....             | ( 34 ) |
| 二、孕育衰退.....                | ( 36 ) |
| 三、孕育对球化的影响.....            | ( 37 ) |
| 第五节 球墨铸铁结晶时的元素偏析.....      | ( 39 ) |
| 一、偏析的概念.....               | ( 39 ) |
| 二、球墨铸铁的晶内偏析.....           | ( 40 ) |
| 第六节 球墨的畸变.....             | ( 44 ) |
| 一、球墨自由生长阶段的畸变.....         | ( 44 ) |
| 二、球墨在奥氏体壳包围下生长阶段的畸变.....   | ( 46 ) |
| 三、大断面球墨铸铁件的石墨畸变.....       | ( 48 ) |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 第七节 球墨铸铁的二次结晶             | (51)  |
| 一、转变过程及基体的形成              | (51)  |
| 二、球墨铸铁铸态金属基体组织的特点         | (53)  |
| <b>第二章 球墨铸铁的熔化和处理</b>     | (55)  |
| 第一节 原铁水制备                 | (55)  |
| 一、化学成分选择                  | (55)  |
| 二、炉料要求                    | (59)  |
| 三、熔炼                      | (63)  |
| 第二节 球化剂                   | (66)  |
| 一、球化元素与反球化元素              | (66)  |
| 二、球化剂                     | (77)  |
| 第三节 球化处理工艺                | (84)  |
| 一、冲入法球化工艺                 | (84)  |
| 二、压力加镁球化工艺                | (88)  |
| 三、型内球化处理                  | (92)  |
| 四、转包法                     | (92)  |
| 五、镁焦法                     | (93)  |
| 第四节 孕育处理                  | (94)  |
| 一、孕育剂                     | (94)  |
| 二、孕育处理工艺                  | (95)  |
| 三、孕育衰退的防止和补救              | (100) |
| <b>第三章 球墨铸铁的凝固特点及铸造性能</b> | (102) |
| 第一节 球墨铸铁的凝固特点             | (102) |
| 一、“粥状”凝固                  | (102) |
| 二、共晶凝固温度范围宽、凝固时间长         | (104) |
| 三、石墨晶核多、共晶团细              | (105) |
| 四、共晶膨胀大                   | (105) |
| 第二节 球墨铸铁共晶膨胀参数的测定         | (107) |
| 一、各国学者设计的测试装置和测试结果        | (107) |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 二、作者设计的测试装置和测试结果 .....           | (110) |
| 第三节 球墨铸铁的铸造性能 .....              | (118) |
| 一、流动性 .....                      | (118) |
| 二、收缩特性 .....                     | (120) |
| 三、铸造应力 .....                     | (124) |
| <b>第四章 球墨铸铁件的无冒口铸造</b> .....     | (125) |
| 第一节 球墨铸铁的浇注系统 .....              | (125) |
| 一、球墨铸铁浇注系统的特点 .....              | (125) |
| 二、浇注系统的类型 .....                  | (126) |
| 三、浇注时间与内浇口(阻流)截面积的确定 .....       | (128) |
| 第二节 球墨铸铁的冒口与冷铁 .....             | (134) |
| 一、冒口补缩原理 .....                   | (135) |
| 二、冷铁的作用和使用 .....                 | (136) |
| 第三节 球墨铸铁件的无冒口铸造 .....            | (138) |
| 一、关于球墨铸铁件产生缩孔及缩松的看法 .....        | (138) |
| 二、利用自身石墨化膨胀消除缩孔<br>及缩松的可能性 ..... | (140) |
| 三、影响石墨化膨胀的因素 .....               | (142) |
| 四、铸型刚度对球墨铸铁件缩孔的影响 .....          | (147) |
| 五、实现无冒口铸造的工艺条件 .....             | (148) |
| 六、无冒口与有冒口铸件质量对比 .....            | (149) |
| <b>第五章 无冒口铸造工艺实例</b> .....       | (151) |
| 第一节 国内球墨铸铁件无冒口铸造的工艺实例 .....      | (151) |
| 一、接皮带机半体的无冒口铸造 .....             | (151) |
| 二、油泵转子的无冒口铸造 .....               | (154) |
| 三、汽车前轮毂的无冒口铸造 .....              | (156) |
| 四、ZY33/30型氧压机曲轴的无冒口铸造 .....      | (156) |
| 五、大型球墨铸铁卷筒的无冒口铸造 .....           | (159) |
| 六、球墨铸铁角型轴承的无冒口铸造 .....           | (160) |

|                                          |       |
|------------------------------------------|-------|
| 七、 $\phi 2200\text{mm}$ 冲模镶块的无冒口铸造 ..... | (161) |
| 八、N80.24导叶持环的无冒口铸造 .....                 | (165) |
| 九、环形铸件的无冒口铸造 .....                       | (167) |
| 十、多级泵中段的无冒口铸造 .....                      | (168) |
| 十一、钢锭模的无冒口铸造 .....                       | (170) |
| 十二、液压油缸体的无冒口铸造 .....                     | (171) |
| 十三、板条类球墨铸铁件的无冒口铸造 .....                  | (173) |
| 第二节 国外球墨铸铁件无冒口铸造的工艺实例 ...                | (175) |
| 一、球墨铸铁输气管的无冒口铸造 .....                    | (176) |
| 二、液压塑料压铸机架座的无冒口铸造 .....                  | (176) |
| 三、夹紧缸的无冒口铸造 .....                        | (178) |
| 四、液压阀体的无冒口铸造 .....                       | (179) |
| 五、无冒口与有冒口铸件的对比 .....                     | (179) |
| <b>参考文献</b> .....                        | (181) |

# 第一章 球墨铸铁的结晶规律

研究球墨铸铁的结晶规律(石墨形态、数量、分布、尺寸及基体组织的形成等),了解影响结晶过程的因素及有关的基本理论,对控制球墨铸铁的组织 and 性能有重要意义。

## 第一节 铁-碳及铁-碳-硅相图

合金相图是研究合金结晶规律、分析合金金相组织的重要工具。

普通球墨铸铁是以铁元素为基的含有碳、硅、锰、磷、硫等元素及微量球化元素的多元铁合金。但其中对金相组织起决定作用的除球化元素外主要是铁、碳和硅。所以除根据铁-碳相图来分析球铁的金相组织外,还必须研究铁-碳-硅三元合金相图。

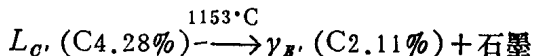
本节主要讨论Fe-C相图和Fe-C-Si相图的等硅切面图及球化元素对相图的影响。

### 一、铁-碳合金双重相图及分析

对铸铁合金长期使用与研究的结果,人们得到了如图1-1所示的铁-碳合金双重相图,即Fe-Fe<sub>3</sub>C相图与Fe-C(石墨)相图。因为从热力学观点看,Fe-Fe<sub>3</sub>C相图是介稳定的,只有Fe-C(石墨)相图才是稳定的。所以Fe-Fe<sub>3</sub>C相图称为介稳定系相图,Fe-C(石墨)相图称为稳定系相图,并分别以实线和虚线表示。

Fe-C(石墨)相图和Fe-Fe<sub>3</sub>C相图的主要不同处在于:

(1) 稳定平衡的共晶点C的成分和温度与C点不同,即



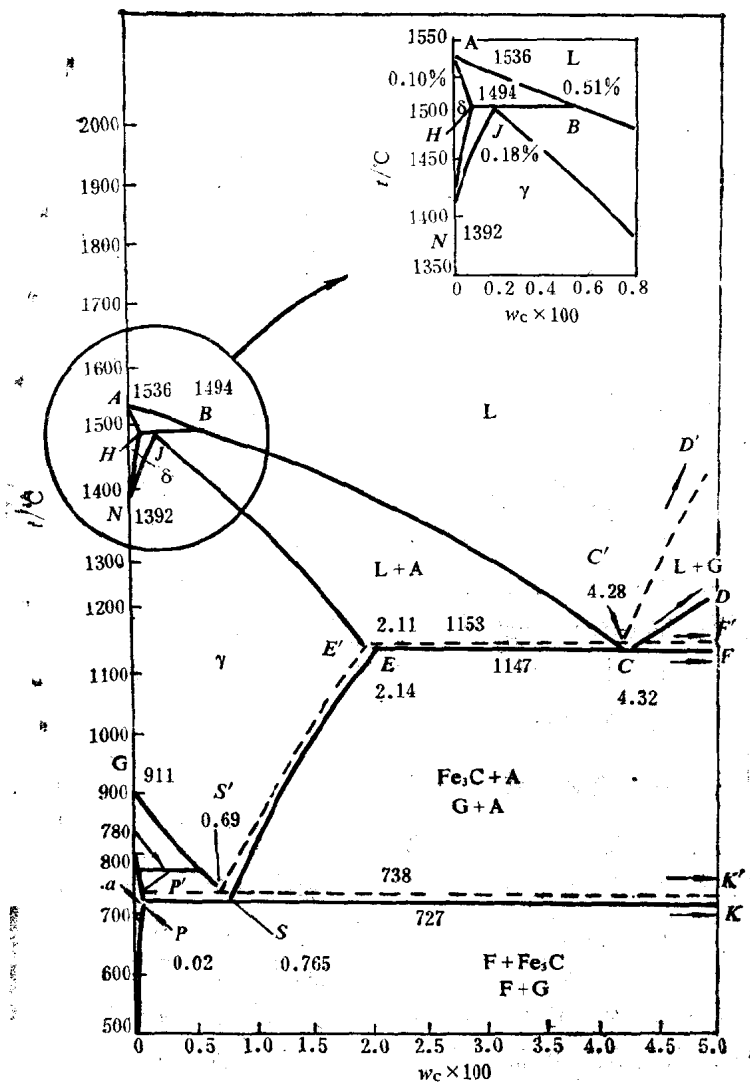


图1-1 铁-碳合金双重相图

$L_C(C4.32\%) \xrightarrow{1147^\circ\text{C}} \gamma_E(C2.14\%) + \text{渗碳体(二相组成莱氏体)}$

(2) 稳定平衡的共析点 $S'$ 的成分和温度与 $S$ 点不同, 即

$\gamma'_s(C0.69\%) \xrightarrow{738^\circ\text{C}} \alpha_{p'} + \text{石墨}$

$\gamma_s(C0.765\%) \xrightarrow{727^\circ\text{C}} \alpha_p + \text{渗碳体(二相组成珠光体)}$

不难看出, 稳定平衡的Fe-C相图共晶的温度和共析温度都比介稳定平衡的要高一些。

由于共晶转变和共析转变都是恒温转变, 所以稳定平衡相图中的共晶线 $E'C'F'$ 要和 $BC$ 线交于 $C'$ , 与 $JE$ 线交于 $E'$ 。显然 $C'$ 和 $E'$ 的含碳量要比 $C$ 、 $E$ 的含碳量低一些; 稳定平衡共析线 $P'S'K'$ 要和 $GS$ 线交于 $S'$ , 与 $GP$ 线交于 $P'$ , 显然 $S'$ 和 $P'$ 的含碳量也要比 $S$ 、 $P$ 的含碳量低一些。因此,  $E'C'F'$ 、 $E'S'$ 、 $P'S'K'$ 各线由于转变温度较高, 含碳量较低, 就分别落在 $ECF$ 、 $ES$ 和 $PSK$ 的上方或左上方。石墨的熔点 $D'$ 高达 $3700^\circ\text{C}$ 左右, 所以 $C'D'$ 线亦在 $CD$ 线的左上方。分别把这些线段画在Fe-Fe<sub>3</sub>C相图上, 就构成了双重相图。

## 二、铁-碳-硅相图的分析

### 1. 铁-碳-硅准二元相图

普通球墨铸铁中除碳以外, 硅的含量较多, 变化幅度也较大。要理解硅对铁碳合金结晶过程、金相组织和性能的影响, 应该根据铁-碳-硅三元的立体相图来进行分析。

但三元相图的建立比较复杂, 目前对铁-碳-硅三元相图的分析研究还很不彻底。通常固定某一硅量, 建立铁碳相图, 这种相图称为准二元相图(一定含硅量的铁-碳-硅三元相图的纵截面图)。在一定条件下建立起来的铁-石墨-硅准二元相图如图1-2所示。利用这样的图, 可分析球铁中碳、硅含量对结晶过程和组织

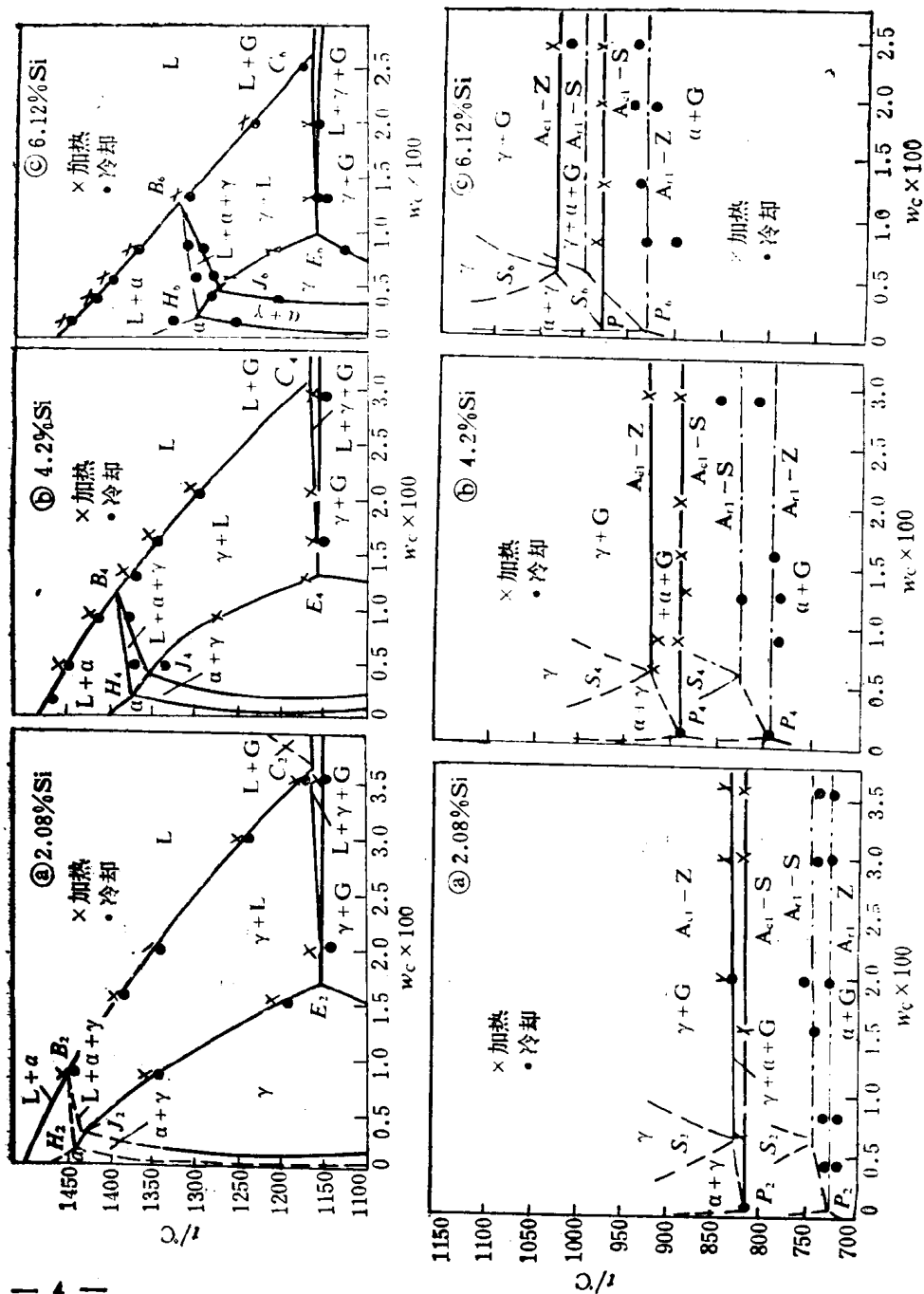


图1-2 铁-石墨-碳二元相图

的影响。

图中,  $Ac_1-S$  和  $Ac_1-Z$  分别表示加热时临界温度范围的开始及终了;  $Ar_1-S$  和  $Ar_1-Z$  分别表示冷却时临界温度范围的开始及终了。

对比铁-石墨相图和铁-石墨-硅准二元相图可见, 硅的作用有:

(1)  $C'$ 、 $S'$ 、 $E'$  点含碳量随硅量的增加而减少。亦即碳在液体共晶合金及奥氏体固溶体中的溶解度减少了。

(2) 硅的加入使相图上出现了共晶和共析转变的三相共存区(共晶区: 液相+奥氏体+石墨; 共析区: 奥氏体+铁素体+石墨)。

(3) 由图1-2及图1-3可见, 随着硅含量的增加, 稳定系的共晶转变温度提高, 介稳定系的共晶转变温度下降, 两个共晶温度的差别扩大; 而稳定系与介稳定系的共析转变温度均随含硅量的增加而提高。可见, 硅是一个很有利于石墨化的元素。

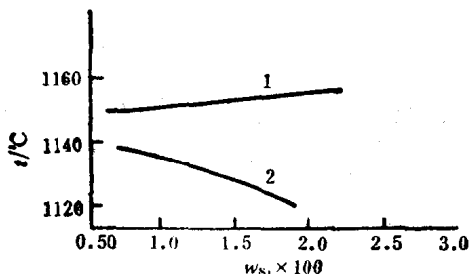


图1-3 硅对共晶温度的影响

1—稳定系平衡共晶温度 2—介稳定系平衡共晶温度

(4) 随着含硅量的增加, 相图上的奥氏体区缩小。

以上这些作用, 对分析铸铁的结晶、组织以及制订热处理工艺, 都有重要的实际意义。

## 2. “碳当量”及“共晶度”的概念

为了分析某一具体成分铸铁的结晶过程、组织和性能, 首先需要知道该铸铁是属于亚共晶、共晶, 还是共过晶, 偏离共晶的程度有多大。这时常用到“碳当量”和“共晶度”的概念。

所谓“碳当量”，就是将铸铁中各元素对共晶点实际碳量的影响折算成碳量的增减。这样算得的碳量称为“碳当量”，用C.E.表示，即

$$C.E. = C + 0.31Si + 0.33P - 0.027Mn + 0.40S$$

式中 C.E. 以%表示。

一般铸铁中硫很低，而锰又影响较小，为简化起见，可按下式计算，即

$$C.E. = C + 0.3(Si + P)$$

若C.E. = 4.28%，为共晶成分；C.E. < 4.28%，为亚共晶成分；C.E. > 4.28% 则为过共晶成分。

所谓“共晶度”，是衡量某一含碳量的铸铁在成分上相当共晶的程度，常用铸铁含碳量与共晶点实际碳量的比值来表示。这个比值称为“共晶度”，以 $S_c$ 表示。为简化起见，其值可按下式计算，即

$$S_c = \frac{C}{C_e'} = \frac{C}{4.28 - 0.3(Si + P)}$$

式中 C——铸铁含碳量质量分数；

$C_e'$ ——铸铁共晶点实际碳量质量分数(稳定系)。

若 $S_c = 1$ ，为共晶成分； $S_c < 1$ ，为亚共晶成分； $S_c > 1$  为过共晶成分。

### 三、球化元素对相图的影响

镁是常用的球化元素，它几乎不溶于铁。镁使共晶温度下降，使共晶点的含碳量增大。随残余镁量的增多，共晶点右移距离加大，如图1-4所示。

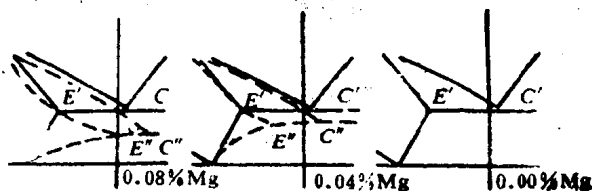


图1-4 镁对共晶温度及共晶含碳量的影响趋势示意图