

# “Iron-Carbon Phase Diagram” and “Solid-State Phase Transformation”

Huimin Liu, Jingshun Liu, Jun Liu, Ding Nan

School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot Inner Mongolia  
Email: huimin\_72@163.com

Received: Jun. 26<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jul. 10<sup>th</sup>, 2017; published: Jul. 13<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

In this paper, from the perspective of solid-state phase transformation, a systematic analysis of the phase transformation under the solid line during iron carbon phase diagram was studied, and then deepens the cognition of phase transformation line (phase boundary), further to understand their multiple meanings. On the other hand, a variety of states of the iron carbon alloy were understood by the perspective of solid-state phase transformation, and it can provide a train of thought for establishing inner relation between material microstructure and macro properties, also provide a certain reference to the teaching processes of iron carbon phase diagram and solid-state phase transformation.

## Keywords

Iron-Carbon Phase Diagram, Solid-State Phase Transformation, Iron-Carbon Alloys

---

# “铁碳相图”与“固态相变”

刘慧敏, 刘景顺, 刘 军, 楠 顶

内蒙古工业大学, 内蒙古 呼和浩特  
Email: huimin\_72@163.com

收稿日期: 2017年6月26日; 录用日期: 2017年7月10日; 发布日期: 2017年7月13日

---

## 摘 要

本文从固态相变的角度, 系统地分析铁碳相图中固相线以下的相变, 进而加深对相变线(相区的分界线)的认识, 来理解其多重含义。另一方面, 从固态相变的角度理解铁碳合金的多种状态, 为建立材料微观组织结构与宏观性能之间的内在联系提供一种思路, 为“铁碳相图”与“固态相变”的教学过程提供一

定的借鉴与参考。

## 关键词

铁碳相图, 固态相变, 铁碳合金

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

相图作为学习或研究金属材料的必备工具, 通常用于确定在不同的成分与不同的温度条件下的合金状态。合金由一种相区(状态)进入另一种相区(状态), 即为发生了相变, 如果在固相线以下发生的相变, 则属于固态相变。在学习或讲授相图及其合金的结晶过程中对固态相变的阐述不够突出。减弱了相图这一重要工具对理解或掌握固态相变过程与机理的作用[1] [2]。本文以“铁碳相图”为例, 深入解析相图中的点线区与组元 Fe 的相变点之间的联系、相图中的点线区与固态相变之间的关系, 将金属材料的结晶(凝固)及其后续冷却过程中发生的固态相变合为一个整体, 使得相图的工具作用同样发挥于学习或研究“固态相变”过程中。

## 2. 二元相图中的相变点、相变线和相区

相图中的任意点称为表象点[1]。从数学的角度的理解二元相图中的表象点, 相当于 x-y 二维坐标系中的坐标点。表象点落在某个相区内, 代表合金的某个状态, 此时可以确定其 x-y 坐标, 也即合金的成分和温度。反之, 已知合金的成分和温度, 即可确定对应的表象点(合金状态)。相变点可理解为发生相变的表象点, 对于不同成分(x 坐标)的合金, 对应不同的相变点(y 坐标), 而不同的相变点构成不同相变线, 将合金状态区分为单相区、两相区和三相区。

从平面几何的角度考察二元相图中各个相区特点可知, 单相区可以是任意形状, 如图 1 中的 ABCF 线之上的部分; 两相区为共轭曲线组成, 如图 1 中的 HE 与 BC 两条共轭曲线围成的 HBCE 区域; 三相区的形状是一条等温线, 如图 1 中的三条水平线。再根据二元相图在常压条件下的相律  $F = 3 - P$  ( $F = C - P + 1$ ;  $C = 2$ )可知[2]: ① 单相区( $P = 1, F = 2$ )中的任意一点的成分和温度都可以独立变化而不影响系统的状态、恒压下,  $F_{\max} = 2$ , 成分、温度均可变; ② 两相区( $P = 2, F = 1$ )中只有一个独立变量, 温度一定成分一定, 反之亦然。③ 三相区( $P = 3, F = 0$ )中没有独立变量, 温度与每一相的成分均不能变, 端点和中间点分别表示三个相的成分。

## 3. 铁碳相图中的相变点、相变线和相区

### 3.1. 纯铁的相变点

如图 2 所示, 关于纯铁(对应相图左侧的纵坐标), 就有四个相变点。① A 点为纯铁的熔点, 其对应的温度为  $1538^{\circ}\text{C}$ , 温度高于熔点, 则纯铁以液态形式存在, 温度低于熔点, 则纯铁以固态形式存在, 所以熔点是固液两相的相变点。②  $A_4$  为  $\delta\text{-Fe}$  与  $\gamma\text{-Fe}$  二者之间的相变点, 对应的温度为  $1394^{\circ}\text{C}$ , 温度高于  $1394^{\circ}\text{C}$ , 则纯铁以  $\delta\text{-Fe}$  的形式存在, 具有体心立方晶体结构, 温度低于  $1394^{\circ}\text{C}$ , 则纯铁以  $\gamma\text{-Fe}$  的形式存在具有面心立方晶体结构, 所以  $A_4$  点是纯铁的同素异构相变点。③  $A_3$  是  $\gamma\text{-Fe}$  与  $\alpha\text{-Fe}$  二者之间的相

变点, 对应的温度为  $912^{\circ}\text{C}$ 。温度高于  $912^{\circ}\text{C}$ , 则纯铁以  $\gamma\text{-Fe}$  的形式存在, 具有面心立方晶体结构, 温度低于  $912^{\circ}\text{C}$ , 则纯铁以  $\alpha\text{-Fe}$  的形式存在, 具有体心立方晶体结构, 所以  $A_3$  点是纯铁的另一个同素异构相变点。虽然  $\delta\text{-Fe}$  和  $\alpha\text{-Fe}$  均属于体心立方晶体结构类型, 但二者的晶体结构参数是不同的。④  $A_2$  是磁性转变点。纯铁在固态下除了上述两次同素异构转变( $A_4$  转变和  $A_3$  转变), 还有一次磁性转变, 对应  $A_2$  点的温度为  $770^{\circ}\text{C}$ , 温度高于  $A_2$  点  $770^{\circ}\text{C}$ , 则纯铁具有顺磁性, 温度低于  $A_2$  点  $770^{\circ}\text{C}$ , 则纯铁具有铁磁性。

### 3.2. 铁碳合金的相变点

铁碳相图中有很多点值得关注, 其中: ① 包晶点  $H$ :  $J$  点成分的  $\delta$  相和  $B$  点成分的液相在  $1495^{\circ}\text{C}$  条件下发生包晶反应, 生成具有  $H$  点成分的奥氏体  $A$ 。② 共晶点  $C$ : 具有  $C$  点成分的液相在  $1148^{\circ}\text{C}$  条件下发生共晶反应, 生成具有  $E$  点成分的奥氏体和渗碳体。③ 共析点  $S$ : 具有  $S$  点成分的  $A$  在  $727^{\circ}\text{C}$  条件下发生共析反应, 生成具有  $P$  点成分的铁素体和渗碳体。④  $E$  点和  $P$  点: 渗碳体在  $\delta\text{-Fe}$  和  $\alpha\text{-Fe}$  中最大溶解度。

### 3.3. 铁碳合金的相变线及相区

相图中的线条可以认为是相变线。相变线具有双重含义, 一是成分垂线或温度线与相变线有交点时, 发生相变线所对应的相变, 二是合金成分的变化曲线。如图 1 所示, 液相线( $ABCF$ )和固相线( $AJHECF$ )是两条横穿整个区域的相变线, 它不能终止于中间某个位置。两者之间的区域为固液两相并存的液相区, 也是结晶或熔化过程的进行区。液相线之上为液相区(不规则形状的单相区); 固相线之下为固态区或者叫固态相变区。包括多型性转变、平衡脱溶和共析转变。多型性转变线( $JN + NH$ ;  $GS + GP$ ), 以纯铁的同素异构转变点  $A_4$  和  $A_3$  为起点构成的相变线。平衡脱溶线  $ES$  和  $PQ$  是碳在  $\gamma\text{-Fe}$  和  $\alpha\text{-Fe}$  中的固溶线(溶解度曲线), 也可理解为平衡脱溶线。共析转变线是  $A_1$  线, 也称共析线, 对应的温度为  $727^{\circ}\text{C}$ 。具有  $S$  点成分的铁碳合金(奥氏体  $A$ )在  $727^{\circ}\text{C}$  温度条件下同时分解为铁素体  $F$  和渗碳体  $\text{Fe}_3\text{C}$ 。从相数来看, 固态相变区也包括单相区、两相区和三相区。而且三者之间按照“相邻相区的相数差为 1, 点接触除外的”的规律分布的。相变线的两个端点一般为相图中的特征点。

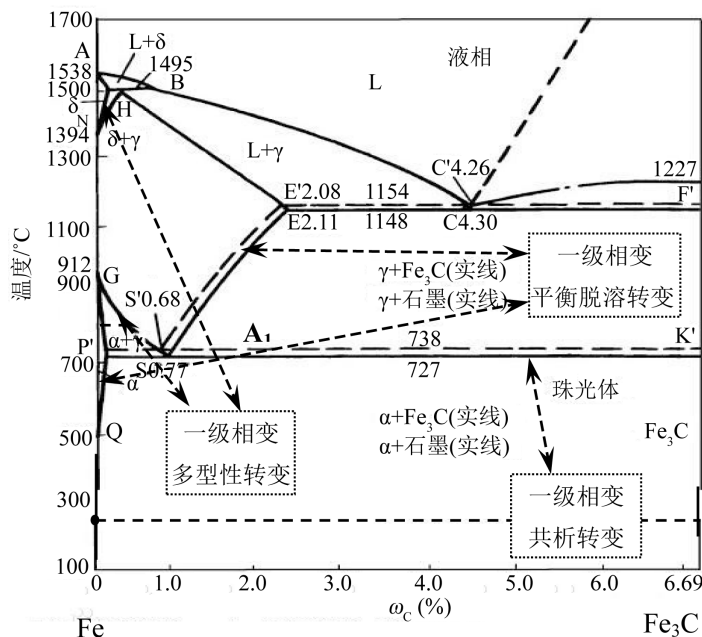


Figure 1. Fe - C two-tier binary phase diagram

图 1. Fe - C 双重相图

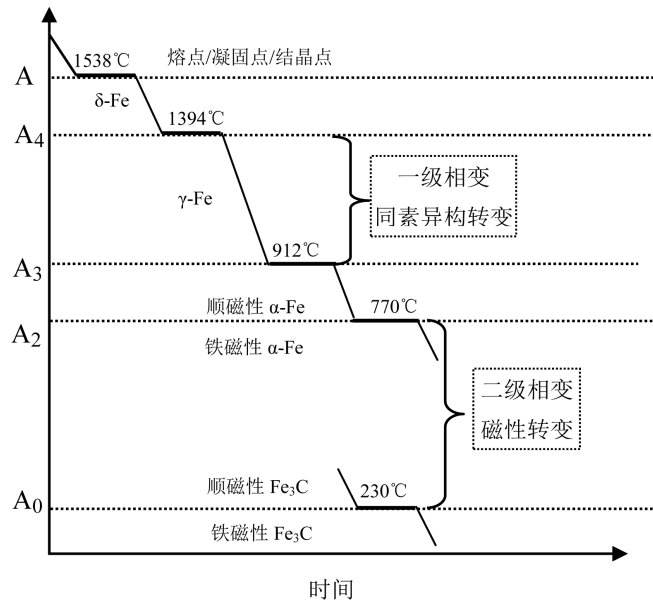


Figure 2. Dimension of phase transformation point of Fe and Fe<sub>3</sub>C  
 图 2. Fe 及 Fe<sub>3</sub>C 的相变点示意图

#### 4. 铁碳相图中的固态相变

最简单的理解固态相变就是没有液相和气相参与的相变。在合金相图中，低于固相线以下发生的相变，对于已知成分的合金，随着成分垂线，合金状态由一个相区进入另一个相区的过程即为固态相变过程，包括新相的形成及母相的消失。对应平衡相图，固态相变具体有 7 种类型：纯金属的同素异构转变、固溶体的多型性转变、共析转变、平衡脱溶、包析转变、调幅分解和有序化转变。

固态相变的分类方法很多，其中有根据相变前后热力学函数的变化，可将相变分为一级相变、二级相变和高级相变[3]。一级相变是在临界温度、压力时，化学位相等；化学位的一级偏导数不相等的相变。即有体积和熵的突变，意味着晶体结构的变化。二级相变：在临界温度、压力时，化学位的一级偏导数相等化学位的二级偏导数不等的相变。二级相变时，系统的化学势、体积、熵无突变。但是恒压热容  $C_p$ 、热膨胀系数  $\alpha$ 、压缩系数  $\beta$  均不连续变化，发生突变。

$$\text{一级相变: } \left(\frac{\partial U_1}{\partial P}\right)_T \neq \left(\frac{\partial U_2}{\partial P}\right)_T; \left(\frac{\partial U_1}{\partial T}\right)_P \neq \left(\frac{\partial U_2}{\partial T}\right)_P; \left(\frac{\partial U}{\partial P}\right)_T = \bar{V}; \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_P = -\bar{S}$$

$$\text{二级相变: } \left(\frac{\partial^2 U}{\partial T^2}\right)_P = -\frac{C_p}{T}; \frac{\partial^2 U}{\partial T \partial P} = V\alpha; \left(\frac{\partial^2 U}{\partial P^2}\right)_T = -V\beta$$

铁碳相图(如图 1 所示)中的固态相变类型有：纯铁的同素异构转变、合金的多型性转变、Fe<sub>3</sub>C<sub>II</sub>和 Fe<sub>3</sub>C<sub>III</sub>的平衡脱溶和奥氏体的共析转变均属于一级相变(① + ② + ③ + ④)；两个磁性转变(⑤ + ⑥)属于二级相变，共五种类型的固态相变，包括了七个转变。

- ① A<sub>4</sub> 转变:  $\delta\text{-Fe} \longleftrightarrow \gamma\text{-Fe}$ ,  $\delta \longleftrightarrow \gamma$ , BCC  $\longleftrightarrow$  FCC;
- ② A<sub>3</sub> 转变:  $\gamma\text{-Fe} \longleftrightarrow \alpha\text{-Fe}$ ,  $\gamma \longleftrightarrow \alpha$ , FCC  $\longleftrightarrow$  BCC;
- ③ 平衡脱溶转变: Fe<sub>3</sub>C<sub>II</sub>由铁素体的析出、Fe<sub>3</sub>C<sub>III</sub>由奥氏体的析出;
- ④ 共析转变(A<sub>1</sub> 转变):  $A \longleftrightarrow P$  (F+Fe<sub>3</sub>C)共析转变温度为 727°C;
- ⑤ A<sub>2</sub> 转变:  $\alpha\text{-Fe}$  及  $\alpha$  相的磁性转变, 顺磁性(高温) $\longleftrightarrow$ 铁磁性(低温), 居里点温度为 770°C;
- ⑥ A<sub>0</sub> 转变: Fe<sub>3</sub>C 的磁性转变, 顺磁性(高温) $\longleftrightarrow$ 铁磁性(低温), 居里点温度为 230°C。

$A_2$  和  $A_0$  点在铁碳相图(见图 2)中也分别形成的一条磁性转变线, 对应  $770^\circ\text{C}$  和  $230^\circ\text{C}$  的两条虚线。前者是铁素体( $\alpha$ 相)的、后者是  $\text{Fe}_3\text{C}$  的磁性转变线。表明对应的合金也具有磁性转变特征。 $\text{Fe}_3\text{C}$  是溶质含量超过极限后形成的金属间化合物, 有趣的是, 不仅由  $\alpha\text{-Fe}$  和碳形成的固溶体(铁素体)具有铁磁性, 而且由纯  $\text{Fe}$  和  $\text{C}$  形成的金属间化合物  $\text{Fe}_3\text{C}$  也具有铁磁性, 只是二者的居里点温度不同而已, 前者的居里点温度与  $\alpha\text{-Fe}$  的居里点温度相同(均为  $A_2$  点)。

上述一级相变伴有晶体结构的变化、成分的变化, 自然也带有性能的变化。磁性转变前后没有体积和熵值的突变, 即没有晶体结构的变化, 但是具有磁性的变化[4]。如此多种转变, 使得铁碳合金的状态的丰富多彩, 性能的多样性, 可以说实现了结构和功能一体化, 为材料的使用, 带来了多种选择。因此掌握铁碳合金固态相变的规律, 了解对应的工艺性能和使用性能, 为其实际生产和使用, 提供可靠的理论依据。

## 5. 结论

“相图”描述了“相变”, 包括结晶(凝固)与固态相变。“铁碳相图”同样可以成为学习或研究“固态相变”的重要的必不可少的工具。借助“铁碳相图”的图解, 更加容易掌握或讲授“固态相变”的知识。

## 基金项目

内蒙古工业大学“固态相变”精品课程建设项目(JP201605); 内蒙古自治区“金属学与热处理”精品课程建设项目。

## 参考文献 (References)

- [1] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理[M]. 第二版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [2] 石德珂. 材料科学基础[M]. 第二版. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [3] 刘宗昌. 金属固态相变教程[M]. 第二版. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [4] 黄昆. 固体物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.

### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ojs@hanspub.org](mailto:ojs@hanspub.org)