



机械工程材料及热加工工艺

安玉民

河北工业大学，机械工程学院

邮箱：anyumin@hebut.edu.cn

绪论

第1章 机械工程材料的性能

第2章 金属的晶体结构与结晶

第3章 合金的晶体结构与相图

第4章 铁碳合金相图和碳钢

第5章 钢的热处理

第6章 合金钢

第7章 铸铁

第8章 有色金属及其合金

第9章 非金属材料与新型材料

第10章 铸造成型

第11章 锻压成型

第12章 焊接与胶接成形

第13章 非金属材料成形

第14章 机械零件材料及毛坯的选择与质量检验



第3章 合金的晶体结构与相图

族 周 期	1
	IA
1	1 H ₁ 氢 1.008
2	2 K 钾 39.098

原子序数
元素符号
(红色指放射性元素)
元素名称
(标*的人造元素)
相对原子质量(加括号的是放射性元素最长寿同位素的质量数)

元素周期表

同位素的质量数
(加底线的是天然丰度最大的同位素, 红色指放射性同位素)
金属
稀有气体
非金属
过渡元素
外层电子构型

- 注:
1. 相对原子质量引自国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)相对原子质量表(2013), 删节至五位有效数字, 末尾数的准确度加注在其后括号内。
2. 稳定元素列有其在自然界存在的同位素的质量数; 放射性元素、人造元素同位素质量数的选列参考有关文献。

18 0	电子层 18族 电子数
He ₃ 氦 4.0026	K 2
B ₁₀ 硼 10.81	C ₁₂ 碳 12.011
N ₁₄ 氮 14.007	O ₁₆ 氧 15.999
F ₁₉ 氟 18.998	Ne ₂₀ 氖 20.180
S ₃₂ 硫 32.06	Cl ₃₆ 氯 39.948
P ₃₁ 磷 31.074	Ar ₃₆ 氩 35.45
Si ₂₈ 硅 28.085	Al ₂₇ 铝 26.982
Cl ₃₇ 氯 35.45	Ge ₇₂ 镓 72.630(8)
Br ₈₀ 溴 79.904	As ₇₅ 硒 78.971(8)
I ₈₂ 碘 83.798(2)	Se ₇₆ 溴 77.82
Kr ₈₆ 氪 82.86	Ge ₇₃ 锗 74.922
Xe ₁₃₂ 氙 129.136	As ₇₅ 砷 74.922
Te ₁₃₀ 碲 128.136	Ge ₇₃ 锗 74.922
Rn ₂₂₂ 氡 219.222	As ₇₅ 砷 74.922
O ₁₈ 氧 18.998	Ge ₇₃ 锗 74.922
N ₁₈ 氮 18.998	As ₇₅ 砷 74.922
M ₈ 镁 8.998	Ge ₇₃ 锗 74.922
L ₂ 钙 2.998	As ₇₅ 砷 74.922
K ₄₁ 钾 39.098	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ca ₄₀ 钙 39.098	As ₇₅ 砷 74.922
Sc ₄₅ 钪 44.078(4)	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ti ₄₆ 钛 47.867	As ₇₅ 砷 74.922
V ₅₀ 钒 50.942	Ge ₇₃ 锗 74.922
Cr ₅₄ 铬 51.996	As ₇₅ 砷 74.922
Mn ₅₅ 锰 54.938	Ge ₇₃ 锗 74.922
Fe ₅₆ 铁 55.845(2)	As ₇₅ 砷 74.922
Co ₅₉ 钴 58.933	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ni ₆₀ 镍 58.693	As ₇₅ 砷 74.922
Cu ₆₃ 铜 63.546(3)	Ge ₇₃ 锗 74.922
Zn ₆₄ 锌 65.38(2)	As ₇₅ 砷 74.922
Ga ₆₉ 镓 69.723	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₇₀ 锗 72.630(8)	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₇₄ 硒 78.971(8)	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₇₅ 溴 79.904	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₇₇ 碘 83.798(2)	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₈₂ 氪 82.86	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₈₆ 氙 83.798(2)	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₁₂₀ 氖 20.180	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₁₂₂ 氩 39.948	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₁₂₄ 氯 35.45	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₁₂₆ 硫 32.06	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₁₂₈ 磷 30.974	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₁₃₀ 硅 28.085	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₁₃₂ 硼 10.81	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₁₃₄ 碳 12.011	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₁₃₆ 氮 14.007	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₁₃₈ 氧 15.999	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₁₄₀ 氟 18.998	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₁₄₂ 氖 20.180	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₁₄₄ 氩 39.948	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₁₄₆ 氯 35.45	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₁₄₈ 硫 32.06	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₁₅₀ 磷 30.974	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₁₅₂ 硅 28.085	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₁₅₄ 硼 10.81	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₁₅₆ 碳 12.011	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₁₅₈ 氮 14.007	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₁₆₀ 氧 15.999	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₁₆₂ 氟 18.998	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₁₆₄ 氖 20.180	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₁₆₆ 氩 39.948	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₁₆₈ 氯 35.45	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₁₇₀ 硫 32.06	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₁₇₂ 磷 30.974	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₁₇₄ 硅 28.085	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₁₇₆ 硼 10.81	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₁₇₈ 碳 12.011	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₁₈₀ 氮 14.007	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₁₈₂ 氧 15.999	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₁₈₄ 氟 18.998	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₁₈₆ 氖 20.180	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₁₈₈ 氩 39.948	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₁₉₀ 氯 35.45	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₁₉₂ 硫 32.06	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₁₉₄ 磷 30.974	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₁₉₆ 硅 28.085	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₁₉₈ 硼 10.81	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₀₀ 碳 12.011	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₀₂ 氮 14.007	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₀₄ 氧 15.999	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₀₆ 氟 18.998	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₀₈ 氖 20.180	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₁₀ 氩 39.948	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₁₂ 氯 35.45	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₁₄ 硫 32.06	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₁₆ 磷 30.974	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₁₈ 硅 28.085	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₂₀ 硼 10.81	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₂₂ 碳 12.011	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₂₄ 氮 14.007	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₂₆ 氧 15.999	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₂₈ 氟 18.998	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₃₀ 氖 20.180	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₃₂ 氩 39.948	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₃₄ 氯 35.45	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₃₆ 硫 32.06	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₃₈ 磷 30.974	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₄₀ 硅 28.085	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₄₂ 硼 10.81	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₄₄ 碳 12.011	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₄₆ 氮 14.007	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₄₈ 氧 15.999	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₅₀ 氟 18.998	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₅₂ 氖 20.180	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₅₄ 氩 39.948	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₅₆ 氯 35.45	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₅₈ 硫 32.06	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₆₀ 磷 30.974	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₆₂ 硅 28.085	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₆₄ 硼 10.81	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₆₆ 碳 12.011	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₆₈ 氮 14.007	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₇₀ 氧 15.999	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₇₂ 氟 18.998	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₇₄ 氖 20.180	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₇₆ 氩 39.948	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₇₈ 氯 35.45	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₈₀ 硫 32.06	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₈₂ 磷 30.974	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₈₄ 硅 28.085	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₈₆ 硼 10.81	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₈₈ 碳 12.011	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₉₀ 氮 14.007	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₉₂ 氧 15.999	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₉₄ 氟 18.998	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₂₉₆ 氖 20.180	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₂₉₈ 氩 39.948	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₀₀ 氯 35.45	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₀₂ 硫 32.06	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₀₄ 磷 30.974	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₀₆ 硅 28.085	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₀₈ 硼 10.81	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₁₀ 碳 12.011	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₁₂ 氮 14.007	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₁₄ 氧 15.999	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₁₆ 氟 18.998	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₁₈ 氖 20.180	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₂₀ 氩 39.948	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₂₂ 氯 35.45	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₂₄ 硫 32.06	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₂₆ 磷 30.974	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₂₈ 硅 28.085	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₃₀ 硼 10.81	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₃₂ 碳 12.011	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₃₄ 氮 14.007	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₃₆ 氧 15.999	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₃₈ 氟 18.998	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₄₀ 氖 20.180	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₄₂ 氩 39.948	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₄₄ 氯 35.45	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₄₆ 硫 32.06	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₄₈ 磷 30.974	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₅₀ 硅 28.085	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₅₂ 硼 10.81	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₅₄ 碳 12.011	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₅₆ 氮 14.007	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₅₈ 氧 15.999	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₆₀ 氟 18.998	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₆₂ 氖 20.180	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₆₄ 氩 39.948	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₆₆ 氯 35.45	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₆₈ 硫 32.06	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₇₀ 磷 30.974	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₇₂ 硅 28.085	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₇₄ 硼 10.81	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₇₆ 碳 12.011	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₇₈ 氮 14.007	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₈₀ 氧 15.999	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₈₂ 氟 18.998	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₈₄ 氖 20.180	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₈₆ 氩 39.948	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₈₈ 氯 35.45	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₉₀ 硫 32.06	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₉₂ 磷 30.974	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₉₄ 硅 28.085	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₃₉₆ 硼 10.81	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₃₉₈ 碳 12.011	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₄₀₀ 氮 14.007	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₄₀₂ 氧 15.999	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₄₀₄ 氟 18.998	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₄₀₆ 氖 20.180	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₄₀₈ 氩 39.948	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₄₁₀ 氯 35.45	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₄₁₂ 硫 32.06	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₄₁₄ 磷 30.974	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₄₁₆ 硅 28.085	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₄₁₈ 硼 10.81	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₄₂₀ 碳 12.011	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₄₂₂ 氮 14.007	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₄₂₄ 氧 15.999	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₄₂₆ 氟 18.998	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₄₂₈ 氖 20.180	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₄₃₀ 氩 39.948	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₄₃₂ 氯 35.45	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₄₃₄ 硫 32.06	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₄₃₆ 磷 30.974	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₄₃₈ 硅 28.085	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₄₄₀ 硼 10.81	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₄₄₂ 碳 12.011	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₄₄₄ 氮 14.007	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₄₄₆ 氧 15.999	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₄₄₈ 氟 18.998	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₄₅₀ 氖 20.180	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₄₅₂ 氩 39.948	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₄₅₄ 氯 35.45	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₄₅₆ 硫 32.06	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₄₅₈ 磷 30.974	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₄₆₀ 硅 28.085	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₄₆₂ 硼 10.81	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₄₆₄ 碳 12.011	As ₇₅ 砷 74.922
Ge ₄₆₆ 氮 14.007	Ge ₇₃ 锗 74.922
Ge ₄₆₈ 氧 15.999	As ₇₅ 砷 74.

人类生产合金是从制作青铜器开始的，世界上最早生产合金的是古巴比伦人，6000年前古巴比伦人已开始提炼青铜（红铜与锡的合金）。



黄铜是由铜（Cu）和锌（Zn）的合金；常被用于制造阀门、水管、空调内外机连接管和散热器等；

青铜是铜（Cu）和锡（Sn）的合金，用于雕像、装饰品和教堂钟。

钢是铁碳合金，一些国家的货币都会使用合金（如镍合金）。

由于自然界的纯金属种类有限，加之各种纯金属的强度、硬度等力学性能都比较差，所以在工业生产中，合金的应用要比纯金属广泛得多。

合金的定义

由**两种或两种以上金属元素**，或**金属元素和非金属元素**经熔炼、烧结或其他方法结合在一起组成的具有金属特性的物质。

合金的通性

- (1) 多数合金熔点低于其组分中任一种组成金属的熔点；
- (2) 硬度一般比其组分中任一金属的硬度大；
- (3) 合金的导电性和导热性低于任一组分金属。

利用合金的这一特性，可以制造高电阻和高热阻材料。

- (4) 有的抗腐蚀能力强（如不锈钢）

如在铁中掺入15%铬和9%镍得到一种耐腐蚀的不锈钢，适用于化学工业。

合金区别于纯金属的这些性能特点是由于合金与纯金属中的**原子排列、晶体结构**上存在很大差异所致。

1. 合金的基本概念

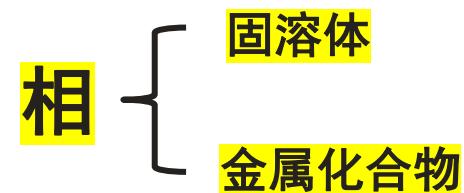
(1) 组元

- 定义：组成合金最简单、最基本且能独立存在的物质。
- 按所含**组元数目**，合金可以分为二元合金、三元合金,或多元合金，如黄铜，铜锌合金，两个组元，为二元合金。
- 由于合金中含有两种或两种以上元素的原子，那么在形成合金时，这些原子之间必然相互发生作用，而使得结晶形成的小晶体（晶粒）具有也含有两种或两种以上的元素。
- 由多种元素构成的小晶体的化学成分和晶格类型可以是完全均匀一致的，也可以是不一致的，它们组成了合金中的相和组织。

»»» §3.1 合金的晶体结构

(2) 相

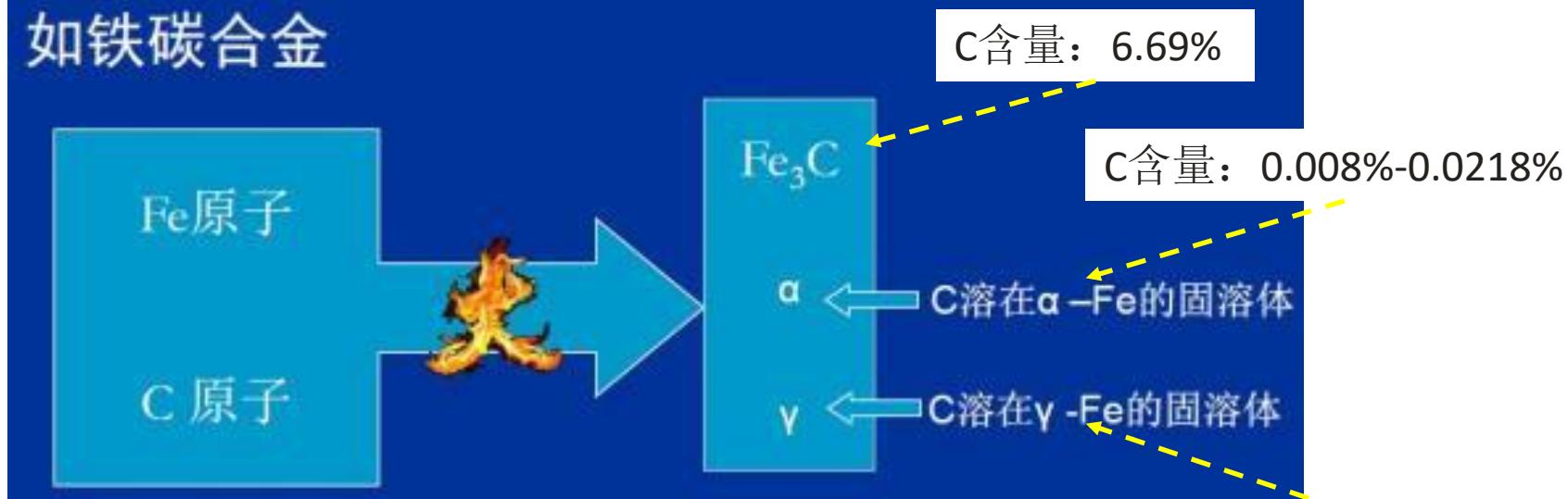
- 定义：在金属或合金中，凡化学成分相同、晶体结构相同，并与其他部分有界面分开的均匀组织部分。
- 固态纯金属一般是一个相，而合金则可能有几个相；
- 组成合金的基本相按其晶体结构特点可分为两大类：**固溶体**和**金属化合物**。



(3) 组织

- 定义：指用肉眼或显微镜所观察到的材料的微观形貌，包含合金不同形状、大小、数量和分布的相；
- 合金的组织可以由一种相组成也可以由多种相组成，而纯金属的显微组织一般都是由一个相组成；
- 不同的相形成不同的显微组织，不同的显微组织导致合金不同的性能，那么合金的组织中到底有哪些相呢？

如铁碳合金



组元: Fe元素、C元素;

相(固溶体+金属间化合物): α-Fe (体心立方晶格)

γ-Fe (面心立方晶格) 、 Fe₃C;

固溶体: α-Fe、 γ-Fe

金属间化合物: Fe₃C

»»» §3.1 合金的晶体结构

2. 合金的相结构

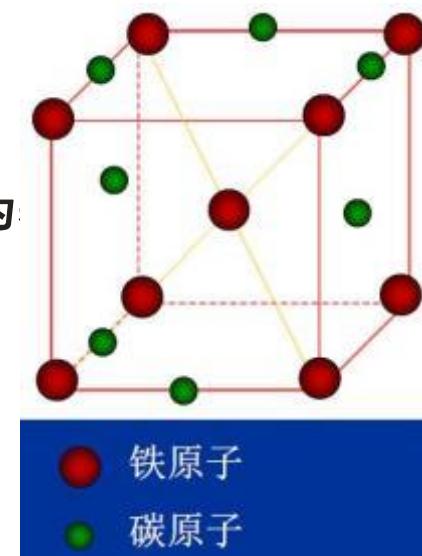
(1) 固溶体

定义：合金中的各组元相互溶解，结晶时形成一种在某组元的晶格中含有其他组元原子的新固相，称为固溶体。通常用希腊字母 α 、 β 、 γ 来表示。

特点：固溶体的晶体结构与组成合金元素之一的晶体结构相同，
固溶体的晶体结构与溶剂相同。如 C 溶入 α -Fe 中，形成以 α -Fe 为
 则该固溶体的晶体结构与 α -Fe 相同，仍为体心立方。

溶剂：与合金晶体结构相同的元素，一般来说，含量较多；

溶质：除溶剂以外的其它元素，含量相对较少；



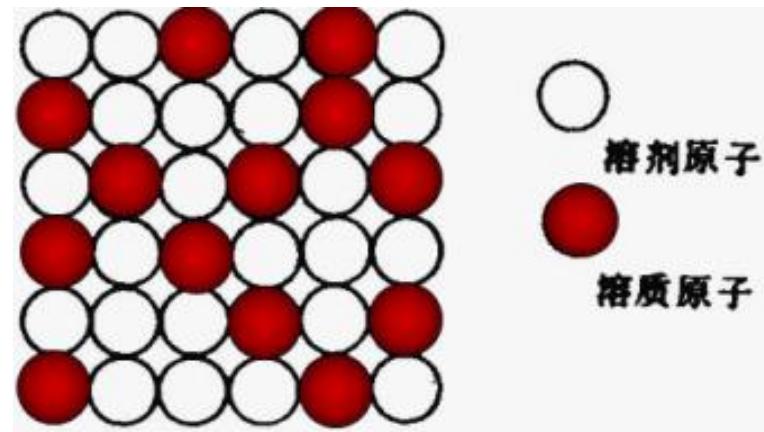
固溶体的分类：根据溶质原子在溶剂原子晶格中所处位置的不同

固溶体 {
 置换固溶体
间隙固溶体

»»» §3.1 合金的晶体结构

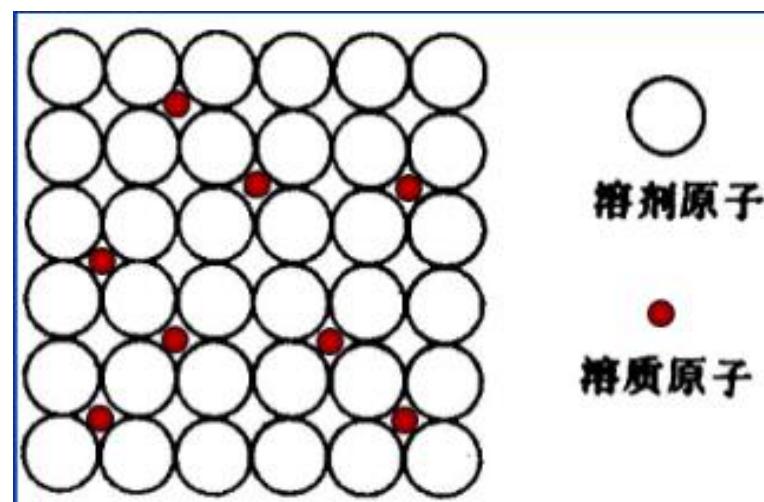
置换固溶体

- 溶质原子取代溶剂原子而占据晶格中某些结点位置而形成的固溶体。



间隙固溶体

- 溶质原子较小分布于溶剂晶格间隙所形成的固溶体。
- 溶剂一般为过渡族元素，由于晶格间隙很小（小于 0.1nm ）溶质元素通常为原子半径较小的非金属元素如碳、氢。



»»» §3.1 合金的晶体结构

固溶体的溶解度

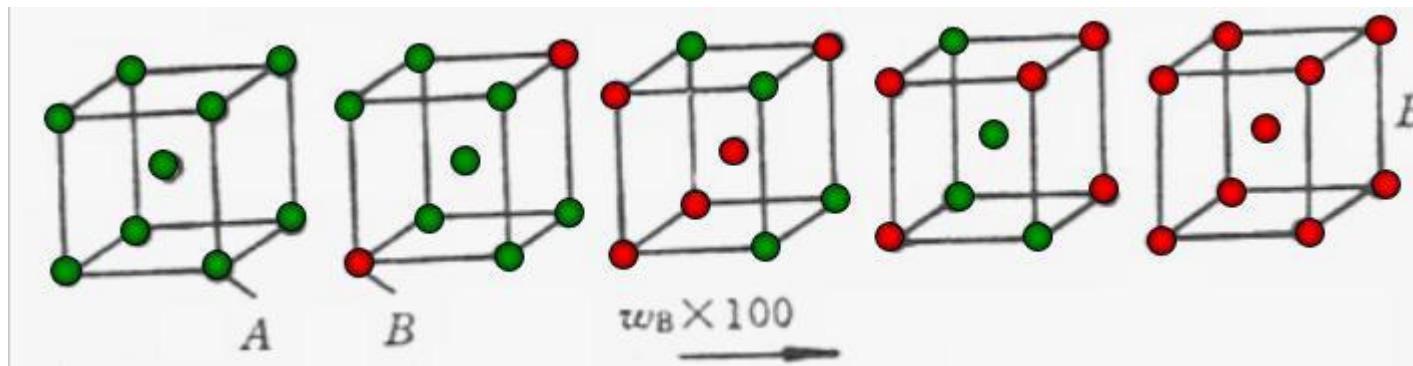
定义：一定条件下，溶质原子在固溶体中的极限浓度。根据溶解度的不同

固溶体

有限固溶体：溶解度有一定限度的固溶体

无限固溶体：组成元素无限互溶的固溶体

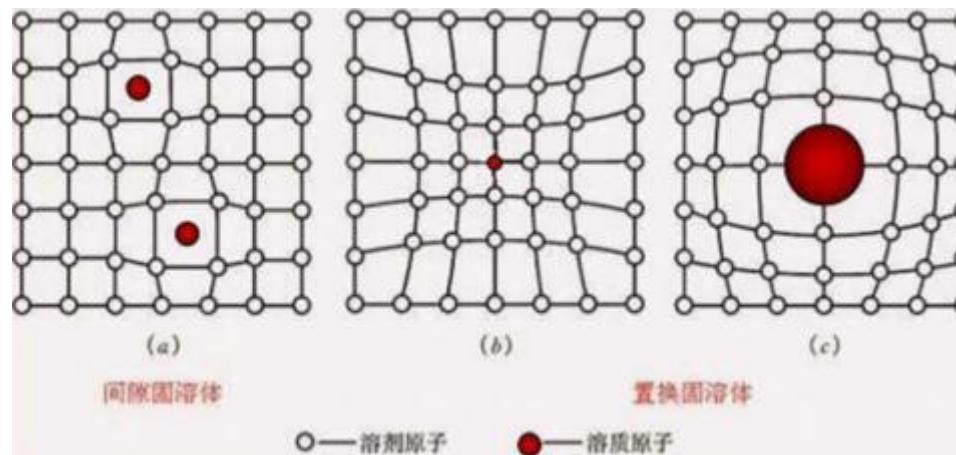
形成无限固溶体的条件：溶质与溶剂组元的晶格类型必须相同，原子的尺寸相差不大，得失电子的能力相当。



无限固溶体没有溶解度限制，可按任何比例溶解，直到溶解100%溶质组元也不改变晶格类型。由于晶格间隙有限，所以间隙固溶体都是有限固溶体。

固溶体的性能

无论是置换固溶体还是间隙固溶体，由于溶质原子和溶剂原子的半径不同，晶格畸变，固溶体强度、硬度上升，韧性下降。



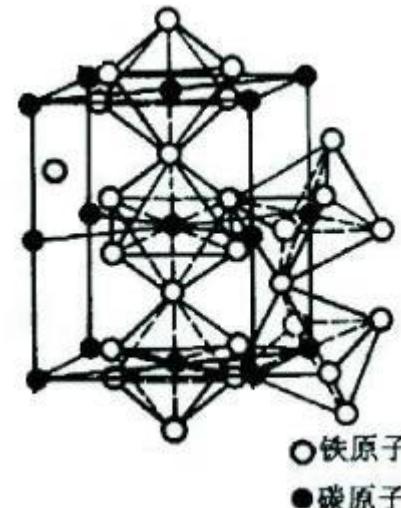
固溶强化：通过形成固溶体而使金属强度、硬度增加的现象。

固溶强化是提高金属材料力学性能的重要途径之一。实践表明，适当控制固溶体的溶质含量，可以显著提高金属材料的强度、硬度的同时，仍能保持良好的塑性和韧性。因此，对综合力学性能要求较高的结构材料，都是以固溶体为基体的合金。

»»» §3.1 合金的晶体结构

(2) 金属化合物

- 定义：合金中其晶体结构与组成元素的晶体结构均不相同的固相。
- 合金组元间发生相互作用生成的一种晶格类型。
- 特点：较高的熔点、硬度和较大的脆性，可用分子式来表示，如Fe-C合金中的 Fe_3C 。



绝大多数合金的组织都是固溶体与少量金属化合物组成的混合物，其性质取决于固溶体与金属化合物的数量、大小、形态和分布状况。

当金属化合物呈细小颗粒均匀分布在固溶体基体上时，将使合金的强度、硬度和耐磨性明显提高，这一现象称为弥散强化。

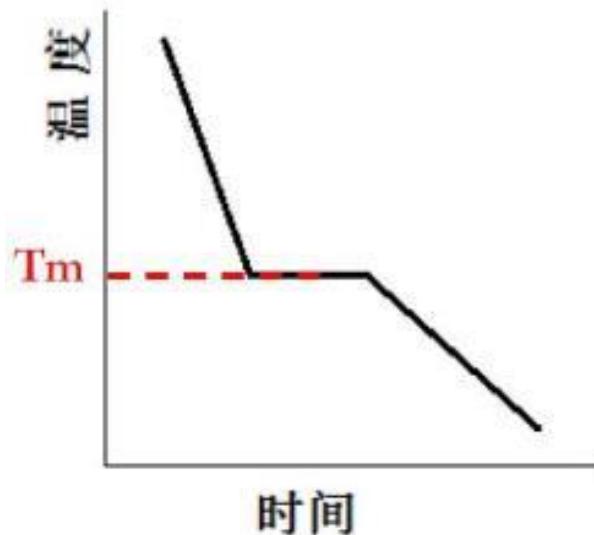
总 结：合金的相有固溶体和金属化合物，**弥散强化**和**固溶强化**都是提高金属材料力学性能的重要手段，所以合金化是提高金属性能的方法之一。



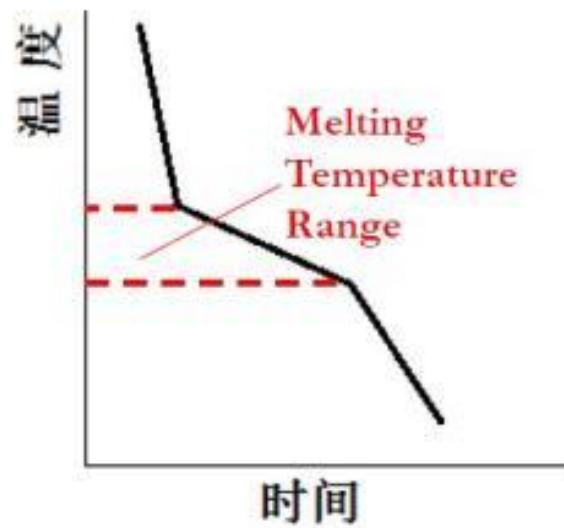
1. 合金的结晶特点

(1) 合金的结晶在变温下完成

如图所示为合金的冷却曲线，与纯金属的冷却曲线相比可以看出，**合金的冷却曲线没有出现水平段，也就意味着合金的结晶过程不一定在恒温下进行**，很多合金的结晶都是在一个温度范围内完成的，而纯金属在恒温下完成。



纯金属



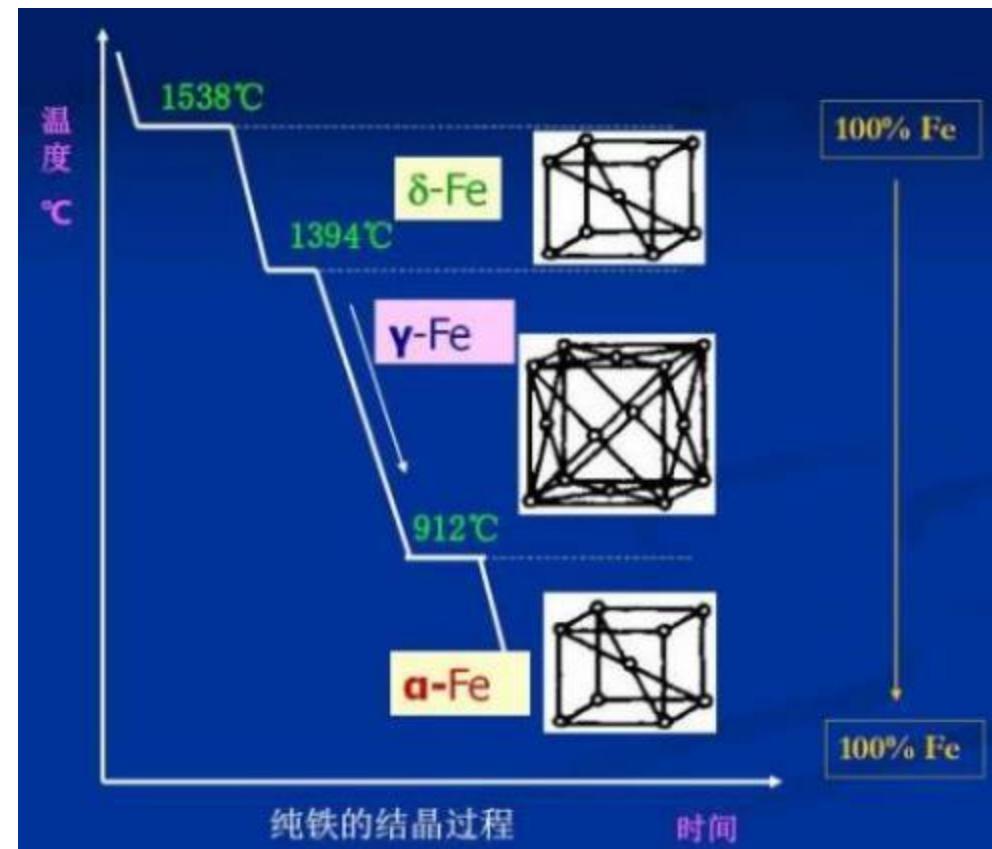
合金



(2) 合金结晶伴随晶体结构和成分的变化。

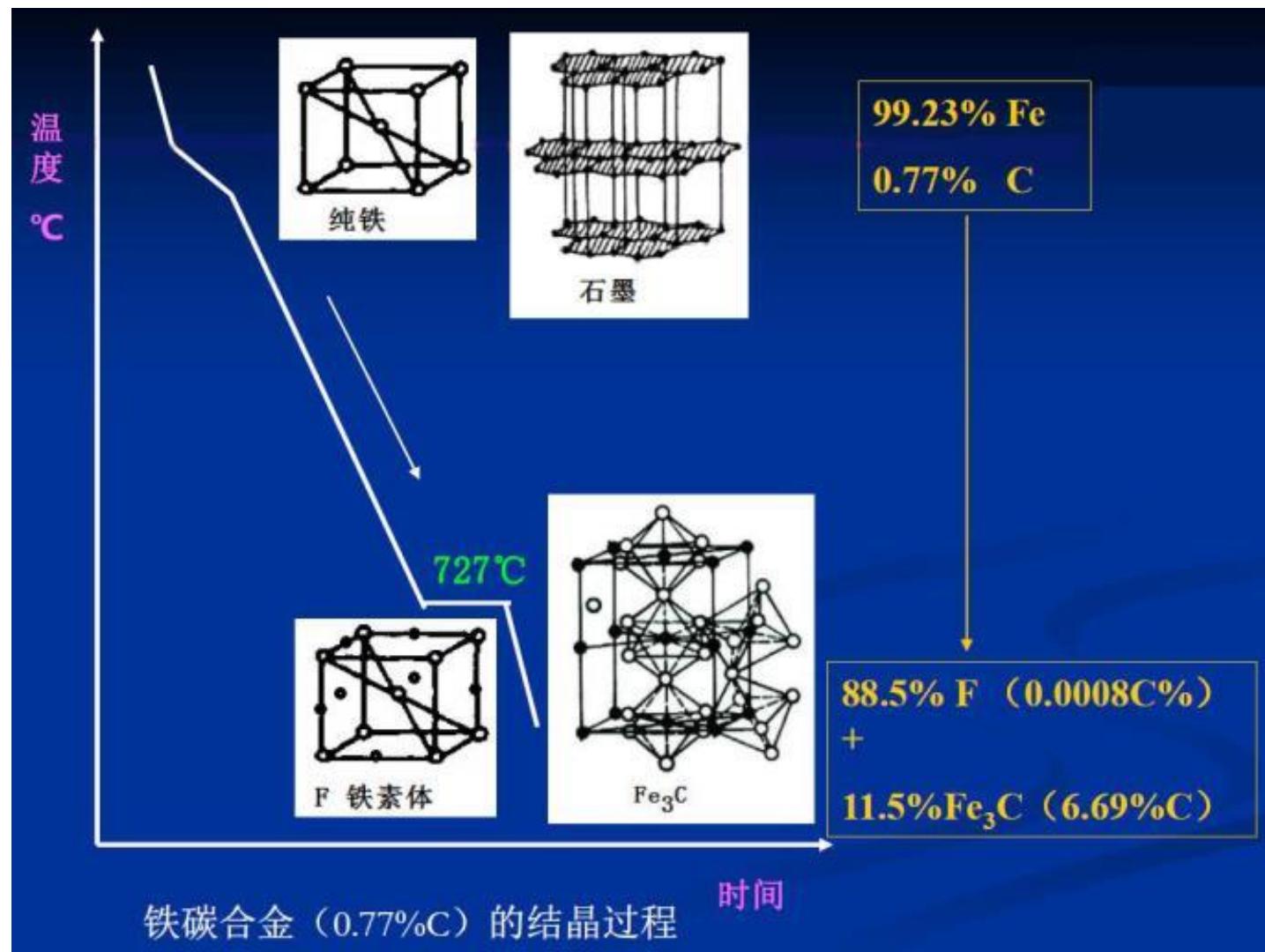
由于合金由两种或两种以上元素组成，合金在结晶过程中不仅会发生晶体结构的变化，还会伴有化学成分的变化，而纯金属的结晶仅发生晶体结构的变化。

总的来说，合金的结晶过程比纯金属复杂，为研究方便，通常采用以温度和成分作为独立变量的相图来分析合金的结晶过程。



晶体结构的变化

»»» §3.2 合金的结晶



化学成分的变化

那什么是相图呢？

- 相图（Phase Diagram）反映的是在平衡条件下各成分合金的结晶过程以及相和组织存在范围与变化规律的简明示意图。此处的平衡条件指的是极缓慢冷却或加热的条件；
- 状态图：相图可以反映材料在不同条件下的状态；
- 平衡图：相图是通过材料在极其缓冷的条件下所测得的试验数据建立的，反映各相平衡状态的关系；
- 相图是制定熔炼、铸造、热加工及热处理工艺的重要依据，根据合金组元的多少，可分为二元相图、三元相图及多元相图，本节只介绍应用最广的二元合金相图。

§3.3.1 二元相图的建立

目前所使用的相图大多数都是根据大量实验结果，以温度为纵坐标、材料成分为横坐标绘制出来的。实验方法有很多，最常用的为有热分析法。

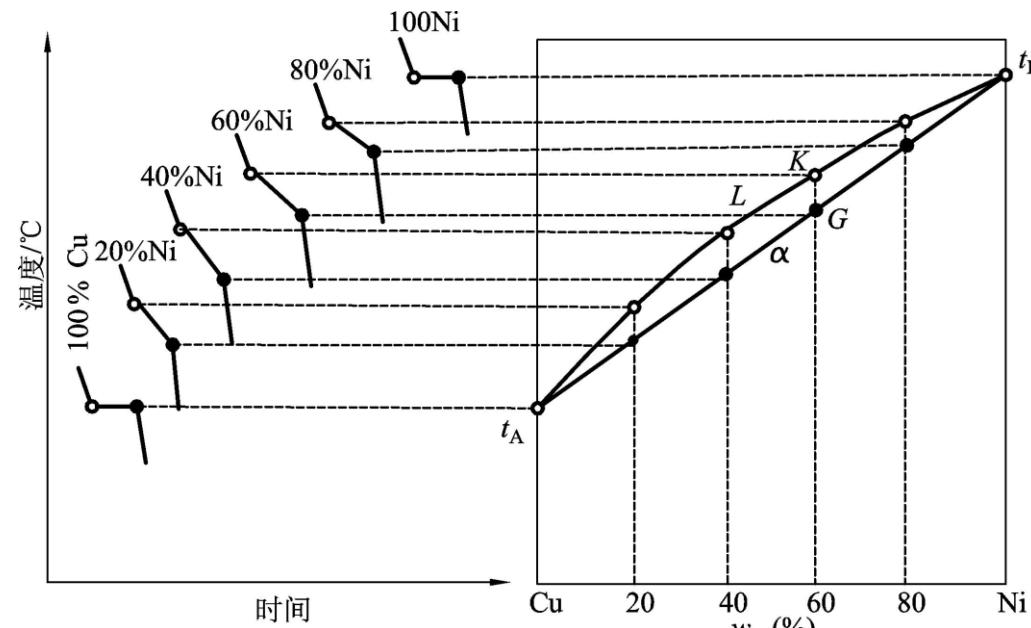
»»» §3.3 二元合金相图

表 3.1 Cu - Ni 合金成分和临界点

$w(\text{合金})/\%$	Ni	0	20	40	60	80	100
	Cu	100	80	60	40	20	0
结晶开始温度/℃		1 083	1 175	1 260	1 340	1 410	1 455
结晶终止温度/℃		1 083	1 130	1 195	1 270	1 360	1 455

(1) 配制不同成分的合金，测出冷却曲线，找出各曲线上的临界点（结晶开始和终了温度）。

(2) 在温度-成分坐标系中过合金成分点作成分曲线，将临界点标在成分线上，将成分线上相同意义的点连接起来，标上相应的数字和字母，得到Cu-Ni二元合金相图。



(a) Cu-Ni合金的冷却曲线

(b) Cu-Ni合金相图



»»» §3.3 二元合金相图

§ 3.3.2 二元基本相图

二元相图的基本类型

- 二元匀晶相图
- 二元共晶相图
- 二元包晶相图
- 具有共析反应的二元合晶相图
- 形成稳定化合物的二元合晶相图

在二元相图中，有的相图很简单，如Cu-Ni合金相图；而有的相图很复杂，如Fe-C合金相图。但不管多么复杂，任何二元相图都可以看成是由几类基本类型的相图迭加、复合而组成的。

相图提供的信息，从相图中我们可以获得以下信息

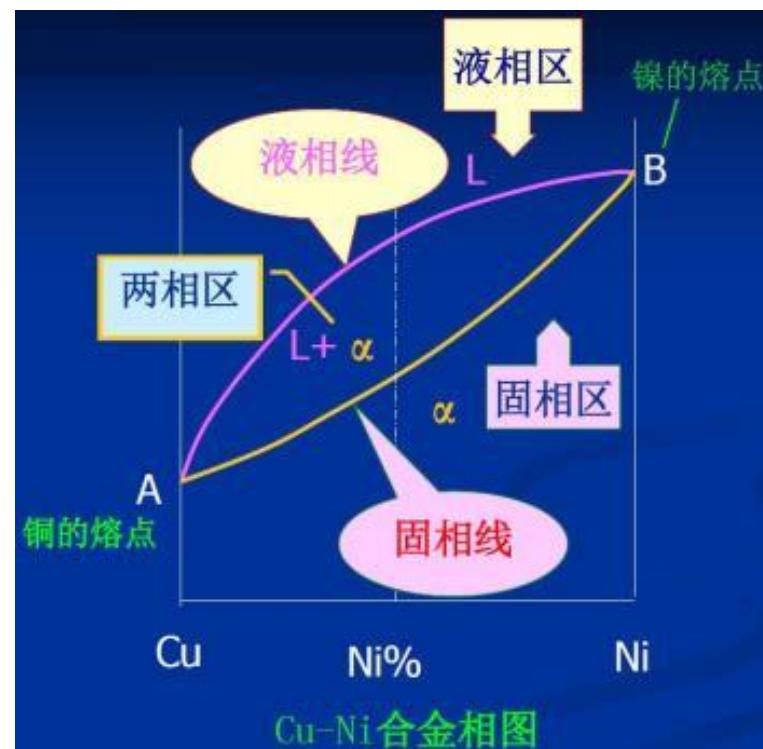
- (1) 某一成分的合金，在一定温度下，所处的**状态、相组成**；
- (2) 合金在冷却过程中，发生了哪些反应或转变，以及**开始转变与转变完成的温度**；
- (3) 一定成分的合金，在室温下的**平衡组织**，并根据**组织与性能的关系**，预测该成**分合金的性能**；
- (4) 根据相图与材料的加工性能之间的关系，**确定材料的加工手段**。



»»» §3.3 二元合金相图

1. 二元匀晶相图

- 定义：两组元在液态和固态下均无限互溶，且只发生匀晶反应的相图。
- 匀晶反应：从液相中直接结晶出固溶体的反应。
- 匀晶反应要求两组元在固态下无限互溶，那么两组元在固态下形成的固溶体为无限置换固溶体
- 二元匀晶相图是最简单的二元相图，**Cu-Ni; Cu-Au; Au-Ag; W-Mo**等合金都具有这类相图
- 匀晶相图是最简单的二元相图。几乎所有的二元合金相图都包含有匀晶转变部分，因此掌握匀晶相图是学习二元合金相图的基础。



»»» §3.3 二元合金相图

(1) 相图分析

相图中的点：**A点**为铜的熔点；**B点**为镍的熔点

相图中的线：**Cu-Ni合金相图中只有两条线**，上面的一条线**AB为液相线**，是加热时合金熔化的终了温度点或冷却时结晶的开始温度点的连线。下面一条线的为**固相线AB**，是加热时合金熔化的开始温度点或冷却时结晶的终了温度点的连线。

相图中的区：

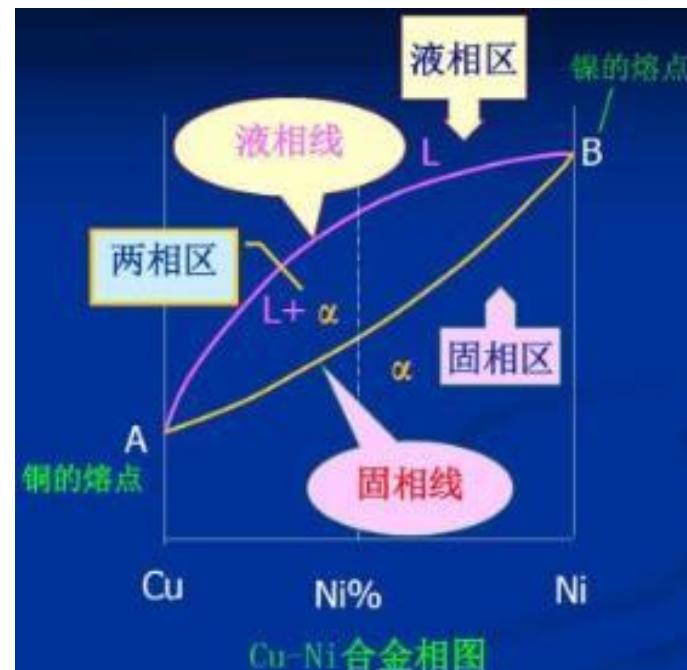
液相区：液相线以上合金全部为液体，用L表示；

固相区：固相线以下，合金全部为 α 固溶体

液相线和固相线之间为液相和固相**两相共存区**，用 $L+\alpha$ 表示。

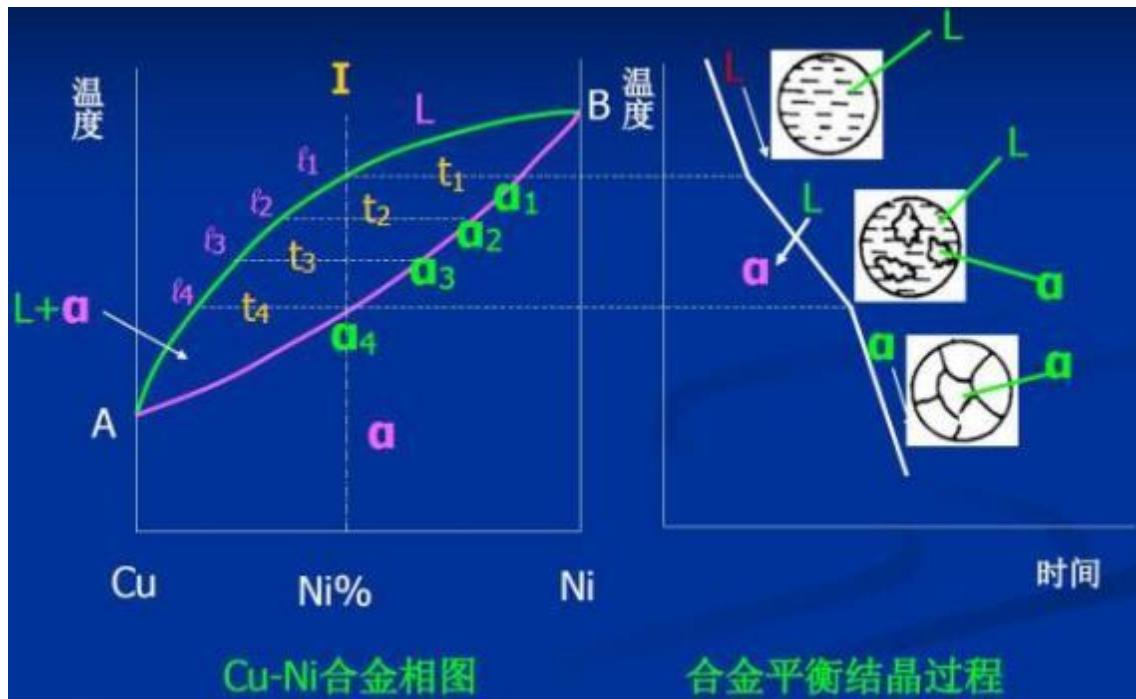
请同学们思考一下Cu-Ni合金所形成的 α 固溶体的晶体结构是什么呢？

Cu-Ni的晶体结构均为面心立方，形成的 α 无限固溶体也必定是面心立方晶体结构



»»» §3.3 二元合金相图

(2) 合金的结晶过程



除了纯组元外，其他合金的结晶过程基本相同，现以合金I为例进行分析

当合金缓冷到 t_1 温度时，开始从液相中结晶出成分为 α_1 的固溶体，温度下降到 t_2 ，析出成份为 α_2 的固溶体，随着温度下降， α 相越来越多，液相越来越少，当温度降到 t_4 温度以下时，合金全部结晶为单相 α 固溶体。

由此可以看出，合金在冷却过程中，液相和固相的成分以及它们的相对重量都是在发生改变的。

»»» §3.3 二元合金相图

那么，有两个值得讨论的问题

- 合金在两相区中，结晶出的 α 固溶体与剩余液相的成分（即含Ni量）各是多少？
- 结晶过程的不同温度下， α 固溶体和液相的质量分数各是多少？

(3) 杠杆定律

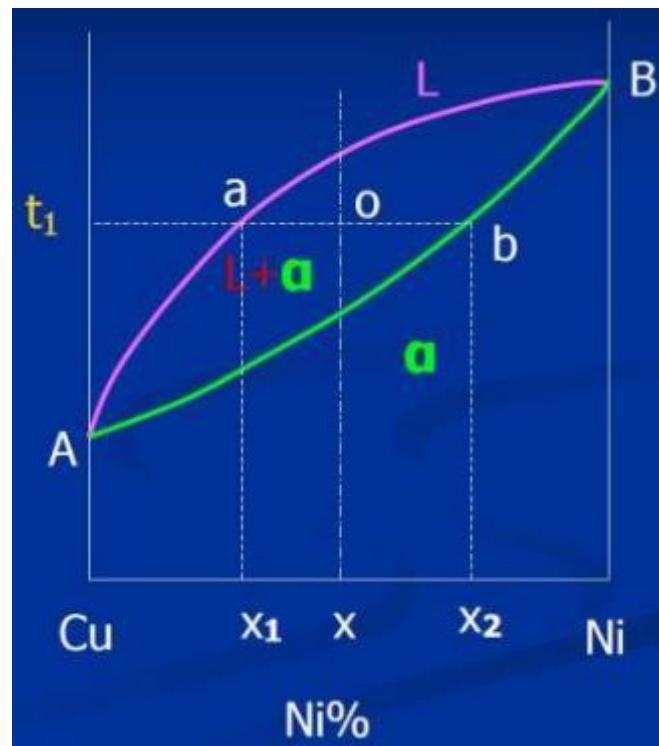
要解决这两个问题，就要引入杠杆定律

杠杆定律解决以下两个问题

- 确定两平衡相的成分；
- 确定两平衡相的相对重量。

确定两平衡相的成分

- 1) 设合金成分为 x ；
- 2) 过 x 作成分垂线
- 3) 在成分垂线上做 t_1 温度的水平线
- 4) 其与液、固相线的交点 a , b 所对应的成分 x_1 , x_2 分别为液相、固相的成分。

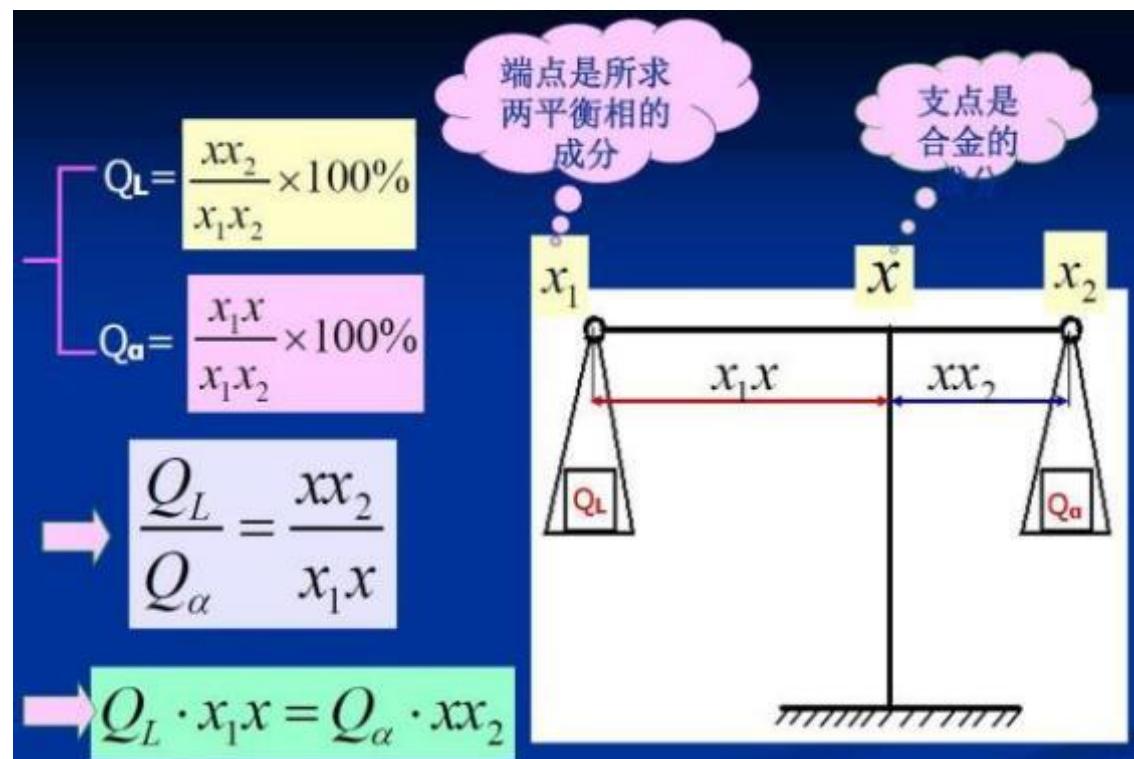
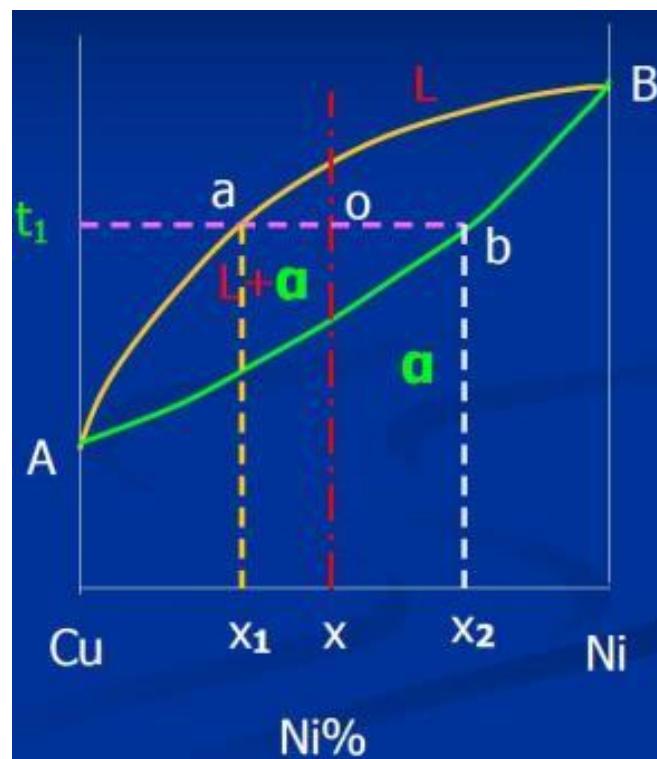


»»» §3.3 二元合金相图

确定两平衡相的相对重量

设：液相的相对重量为 Q_L ，其成分为 x_1 ；固相相对重量为 Q_α ，其成分为 x_2

则 $Q_L + Q_\alpha = 1$; $Q_L x_1 + Q_\alpha x_2 = x$, 解方程组得: $Q_L = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}$, $Q_\alpha = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$

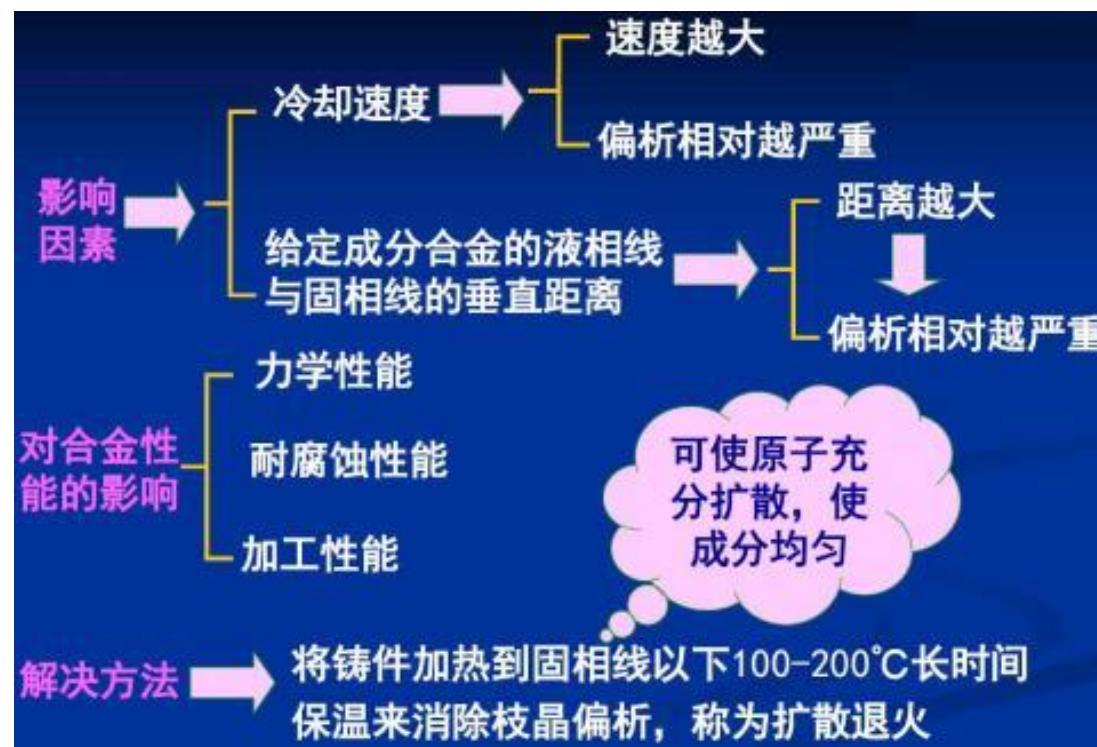




»»» §3.3 二元合金相图

(4) 枝晶偏析（也称晶内偏析）

定义：在一个枝晶范围内或一个晶粒范围内成分不均匀的现象。成因：



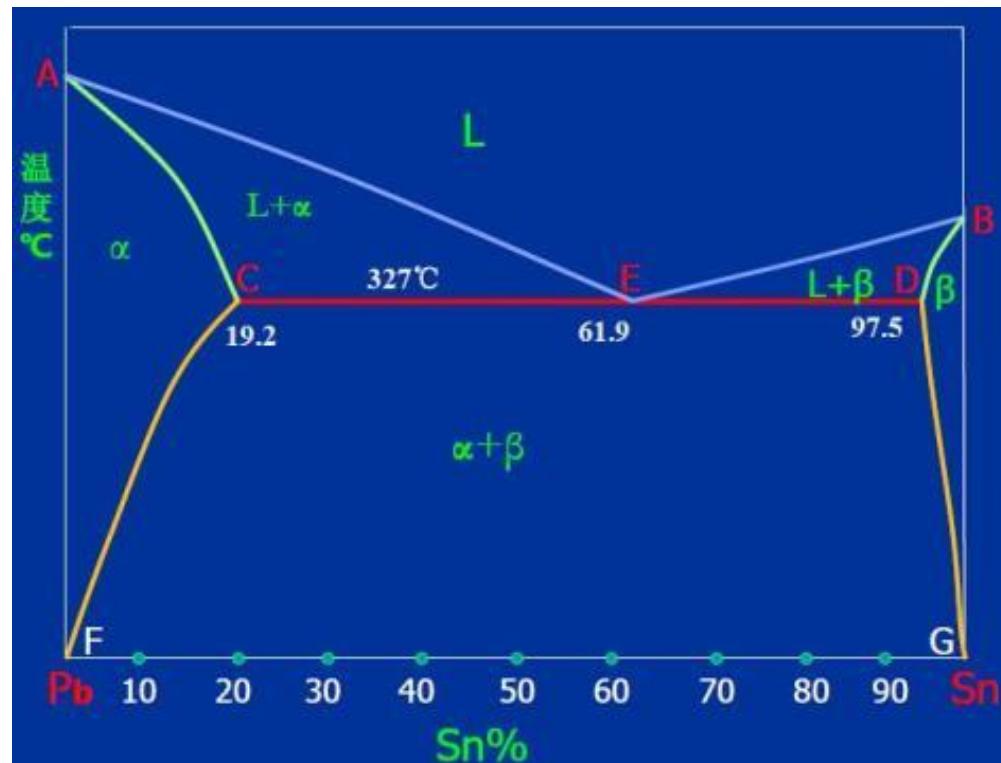
»»» §3.3 二元合金相图

2. 二元共晶相图

共晶反应: 在一定温度下, 由一定成分的液相同时结晶出两个成分和结构都不相同的新固相的转变过程。

二元共晶相图定义: 组成二元合金的两组元, 在液态下能无限互溶, 但在固态只能有限互溶且发生共晶反应时, 其所构成的相图。

Pb-Sb、Al-Si、Pb-Sn、Ag-Cu等二元合金均为这类的相图, 下面以Pb-Sn合金相图来分析共晶相图的特点。如图所示为Pb-Sn合金的共晶相图, 从相图的形状可以看出比匀晶相图复杂得多。



(1) 相图分析——相图中的点和线

A点 → Pb的熔点

B点 → Sn的熔点

AEB → 液相线

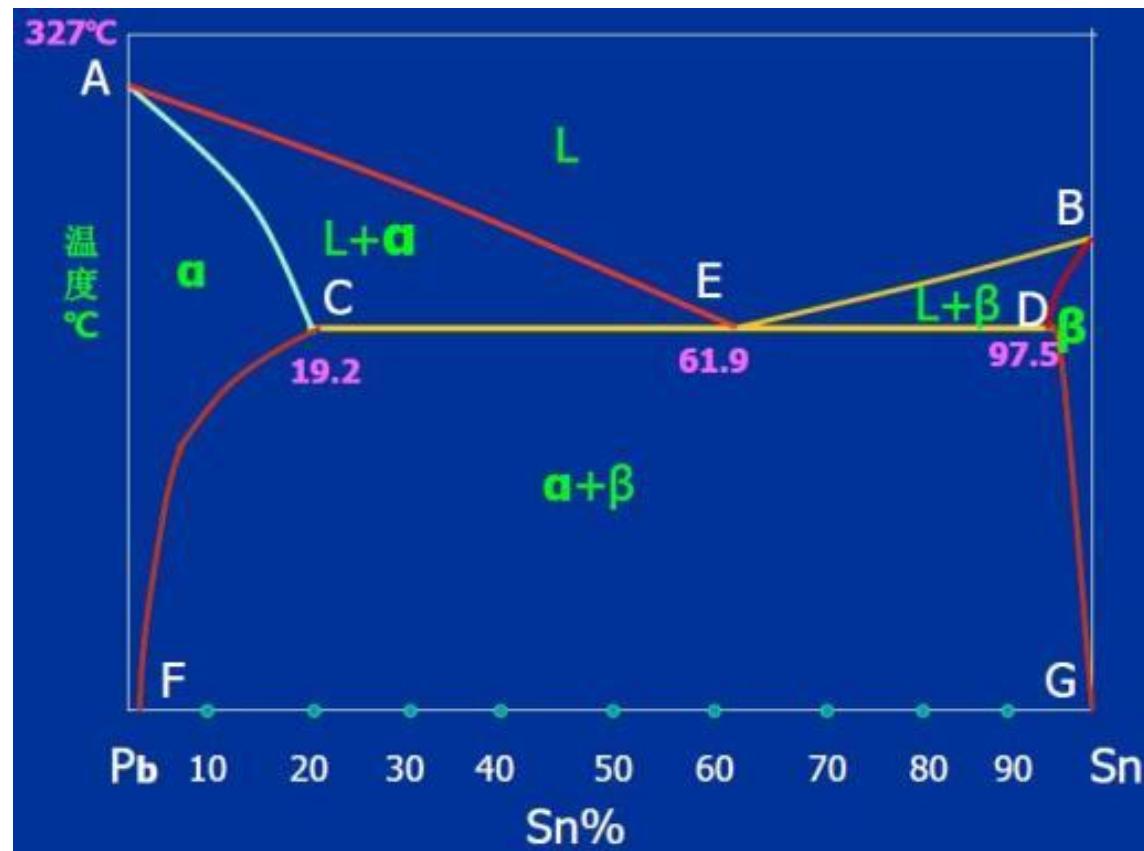
ACEDB → 固相线

E点 → 共晶点

CED线 → 共晶线

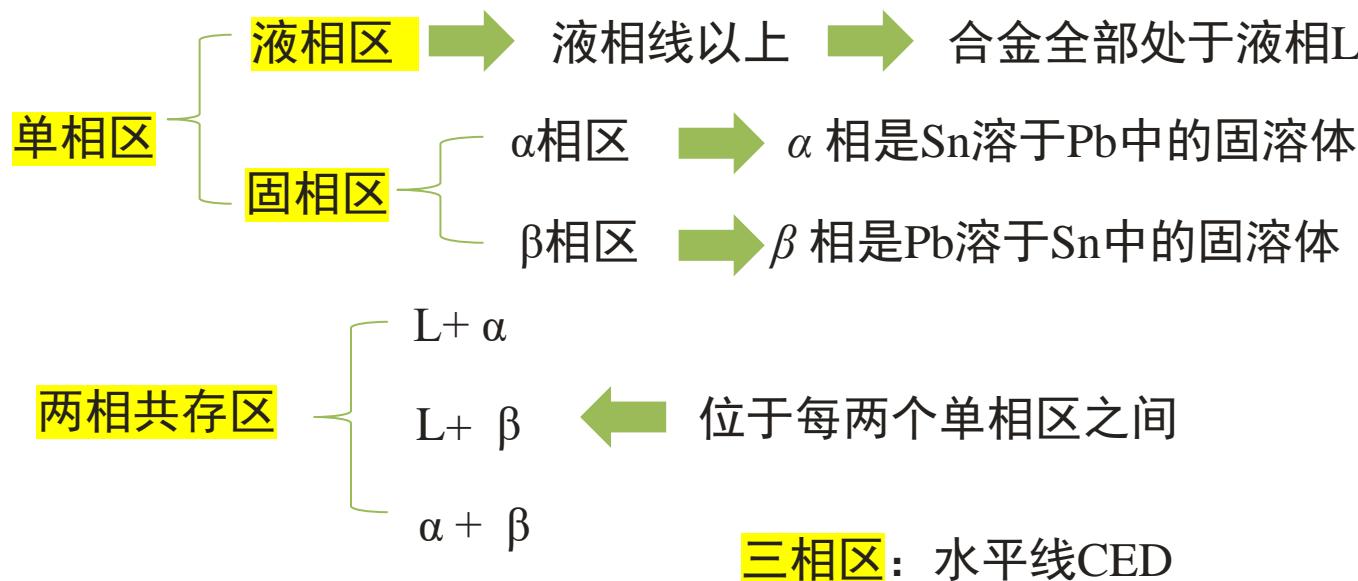
CF线 → Sn在Pb中的溶解度曲线

DG线 → Pb在Sn中的溶解度曲线



»»» §3.3 二元合金相图

(1) 相图分析——相图中的相区



从元素周期表中可以知道，Sn的晶体结构为钻石正方，而Pb的晶体结构为面心立方，此处请大家思考一下，此处 α 固溶体和 β 固溶体的晶体结构分别是什么类型？既然是固溶体，那晶体结构类型必然与某一组元的晶体结构相同， α 相是Sn溶于Pb中的固溶体，则为Pb的晶体结构即面心立方，同理， β 固溶体具有Sn的晶体结构类型，即为钻石正方。

»»» §3.3 二元合金相图

(1) 相图分析——相图中的相区

水平线CED  共晶反应线 (183°C)

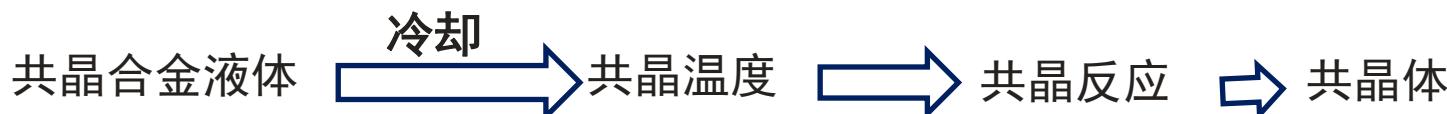
浓度为 E 的 L 相 同时结晶出浓度为 C 的 α 相和浓度为 D 的 β 相。



共晶反应：在一定温度下，由一定成分的液相同时结晶出两个成分和结构都不相同的新固相的转变过程。

- **共晶体：**共晶反应的产物，即两相的机械混合物
- **共晶温度：**发生共晶反应的温度
- **共晶合金**具有共晶成分的合金

共晶反应是在恒温下进行的



注：发生共晶反应时，L、 α 、 β 三个相平衡共存，它们的成分固定，但各自的重量在不断变化。

»»» §3.3 二元合金相图

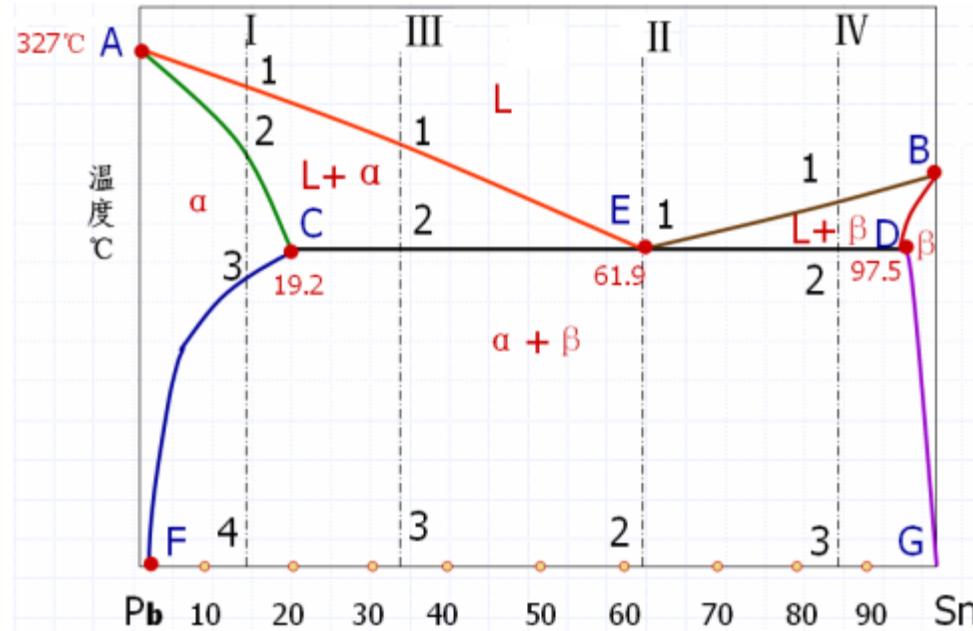
(2) 合金的结晶过程

共晶合金：具有共晶成分的合金

共晶合金液体冷却到共晶温度时发生共晶反应得到共晶体。

此处需要说明的是发生共晶反应时， L 、 α 、 β 三个相平衡共存，它们的成分固定，但各自的重量在不断变化。因此水平线CED是一个三相区。

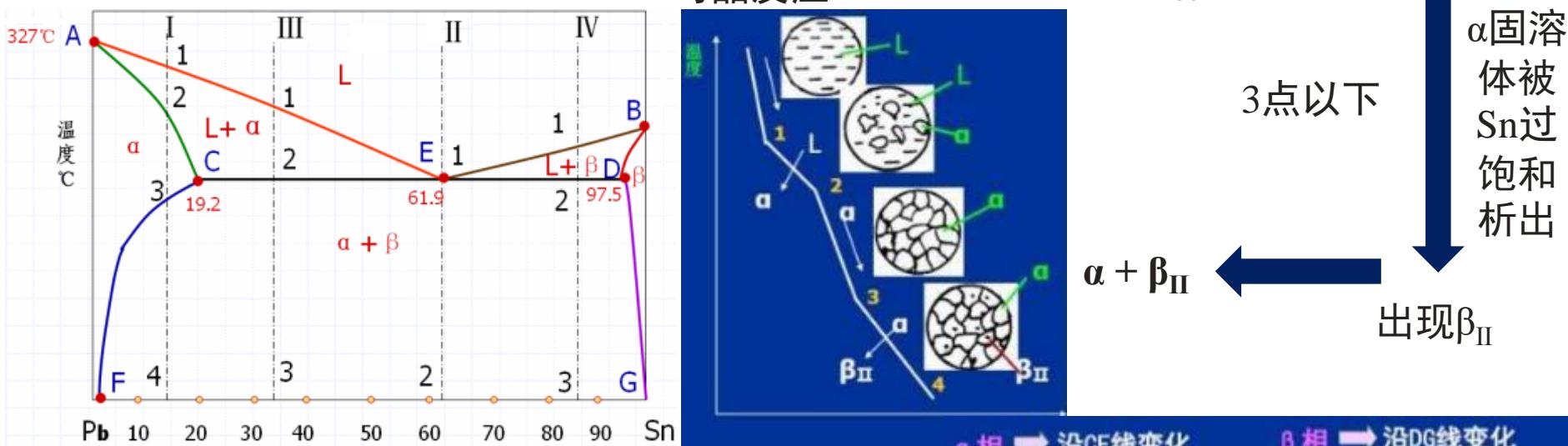
接下来，利用相图分析典型合金的结晶过程，从Pb-Sn二元合金相图中可以看出，可以选取四种典型合金来进行分析。**合金I、合金II、合金III和合金IV**的结晶过程。



»»» §3.3 二元合金相图

1) 含Sn量小于C点成分合金的结晶过程（以合金I为例）

冷却1点 → 开始结晶出 α 相 → 1点到2点 → 单相 α 固溶体 → 2点到3点 → 组织无变化
 合金I → 匀晶反应 → 固溶体冷却



二次相 → 从已有固相中析出的新固相，记作 β_{II}

二次析出 → 形成二次相的过程

冷却过程中两固相的重量变化

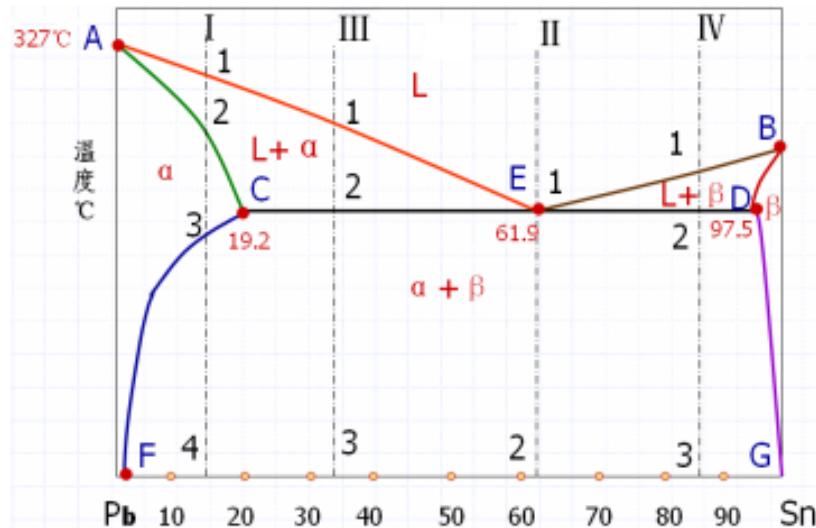
成分大于D点合金的结晶过程与合金I相似，其室温组织为 $\beta + \alpha_{II}$

$$Q_{\beta_{II}} = \frac{F_4}{F_G} \times 100\%$$

合金I 室温下的组织
 \downarrow
 $\alpha + \beta_{II}$

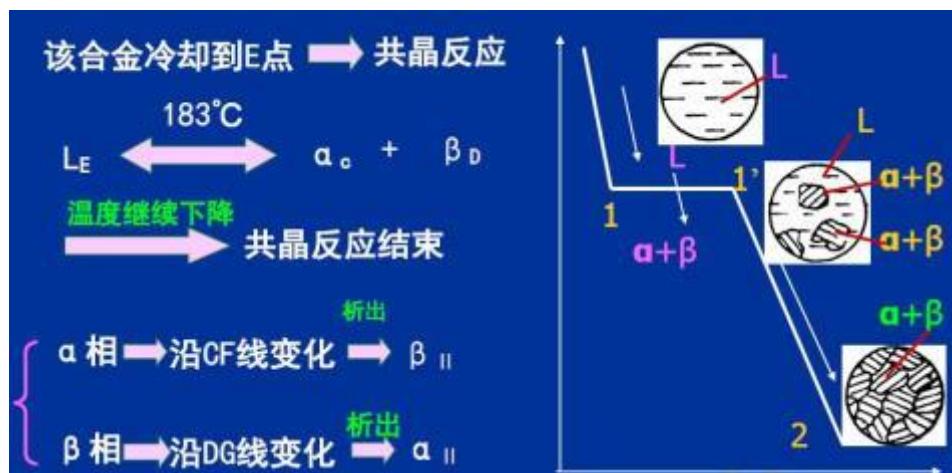
»»» §3.3 二元合金相图

2) 共晶合金的结晶过程（以合金II为例）



α_{II} 和 β_{II} 二次相一般分布于晶界或固溶体中，且量小，不易分辨，故在共晶体中不予考虑。合金II室温下的组织为 $(\alpha + \beta)$ 共晶体。组织组成物只有一个， $(\alpha + \beta)$ 共晶体；而相有两个， α 和 β 固溶体。

具有 E 点成分的合金称为共晶合金。



$$Q_\alpha = \frac{ED}{CD} \times 100\% = \frac{97.5 - 61.9}{97.5 - 19.2} \times 100\% = 45.5\%$$

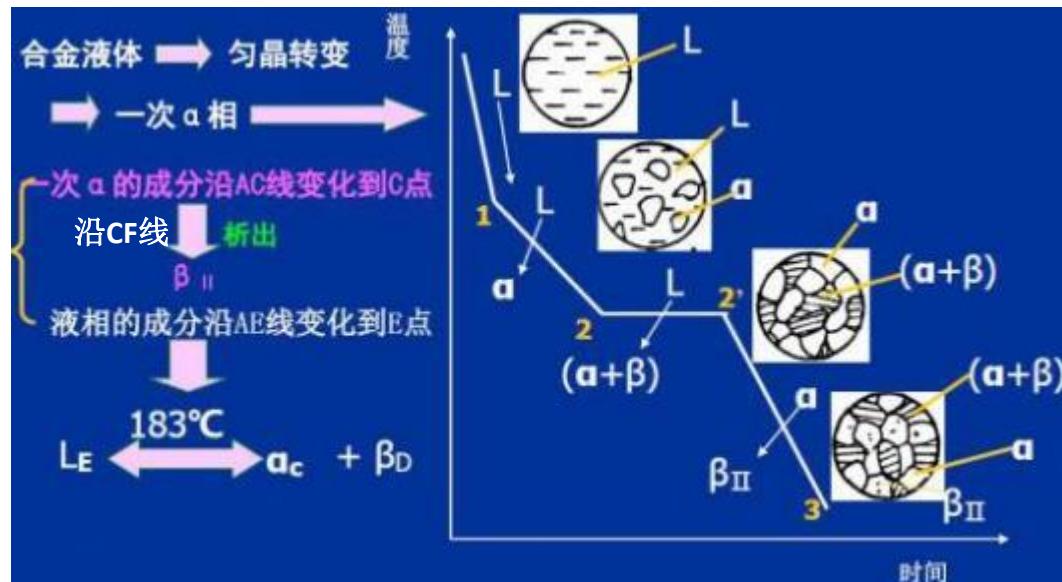
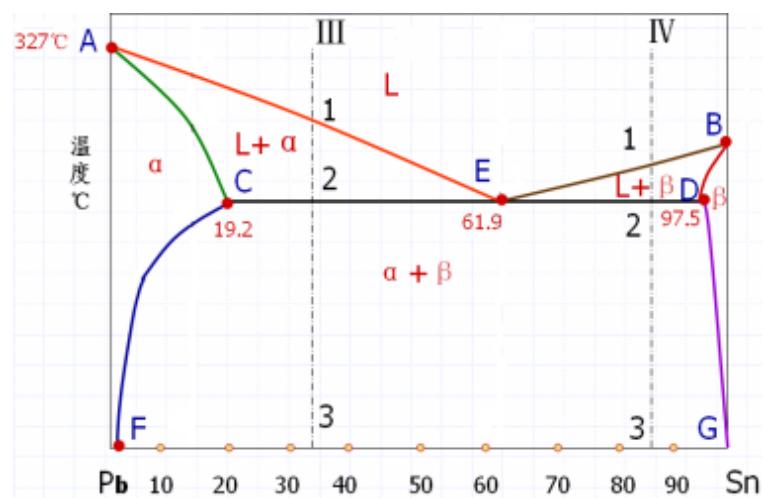
$$Q_\beta = 100\% - Q_\alpha = 54.6\%$$

合金II室温下的组织 → $(\alpha + \beta)$

二次相不易分辨

»»» §3.3 二元合金相图

3) 亚共晶合金的结晶过程（以合金III为例）



匀晶反应 + 共晶反应 + 二次析出

合金III室温下的组织: $\alpha + (\alpha + \beta) + \beta_{II}$

组织组成物有三个: α 固溶体、 $(\alpha + \beta)$ 共晶体和 β_{II} 固溶体
分别具有不同形态的不同组织;

相还是只有两个: α 和 β 固溶体。

»»» §3.3 二元合金相图

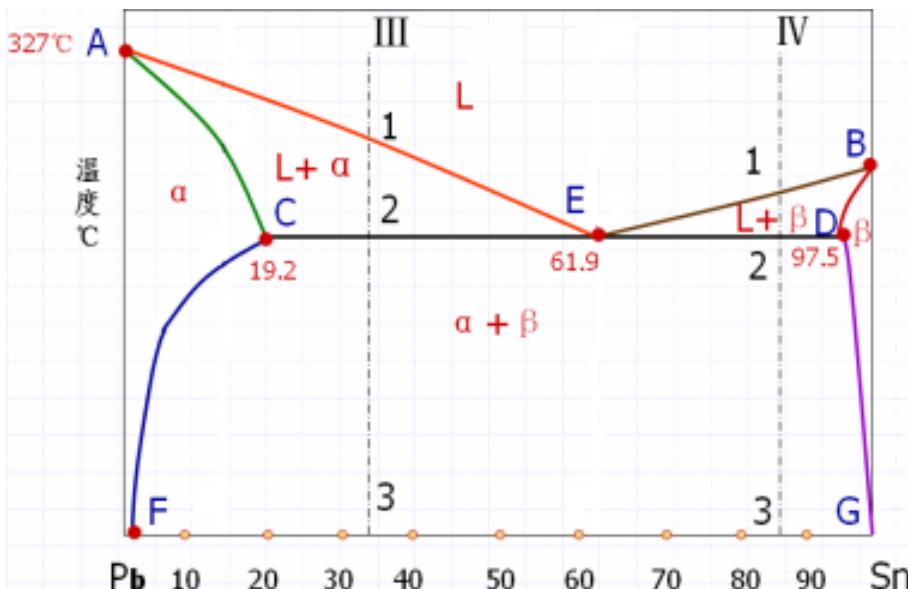
4) 过共晶合金的结晶过程（以合金IV为例）

结晶过程与亚共晶合金相似，不同的是

一次相是 β
二次相 α_{II}

合金IV室温下的组织： $\beta + (\alpha + \beta) + \alpha_{II}$

组织组成物：组成合金显微组织的独立成分



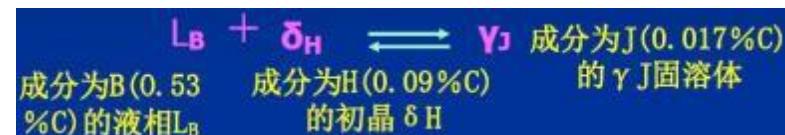
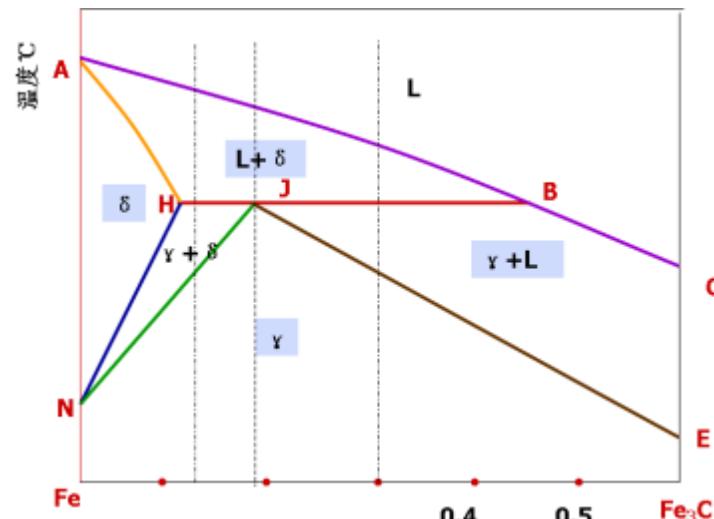
组织和相的区别

相与相的差别主要在结构和成分上

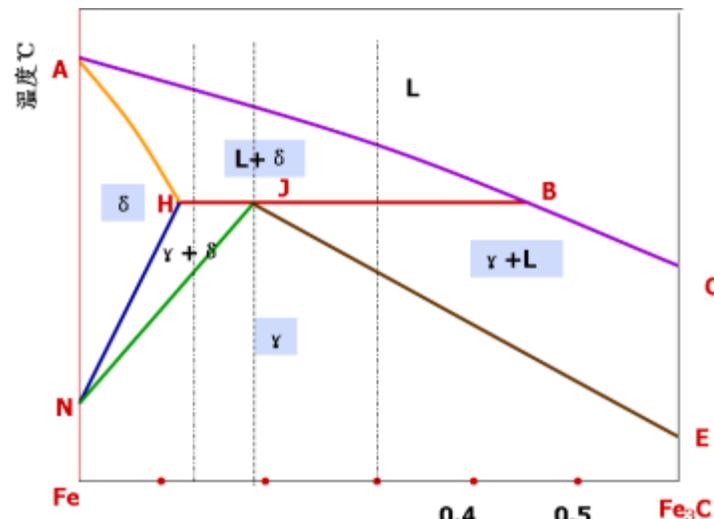
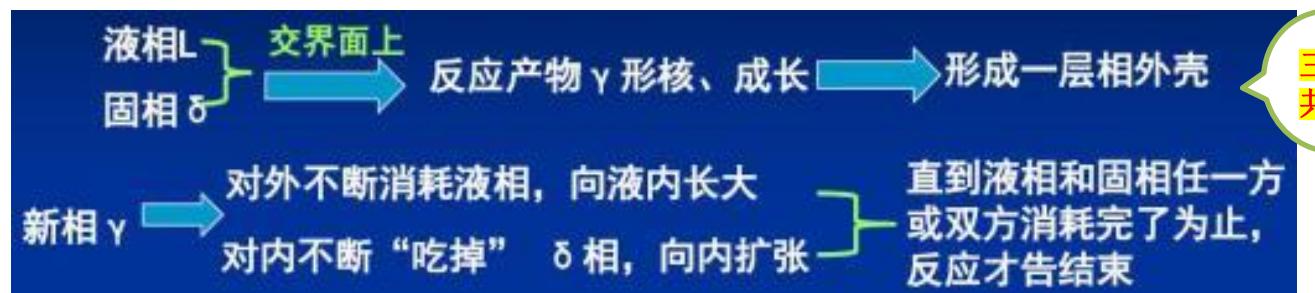
组织组成物之间的差别主要在形态上，如 α 、 α_{II} 和共晶 α 的结构和成分相同，是同一相，但它们的形态不同，分属不同的组织组成物。

3. 二元包晶相图

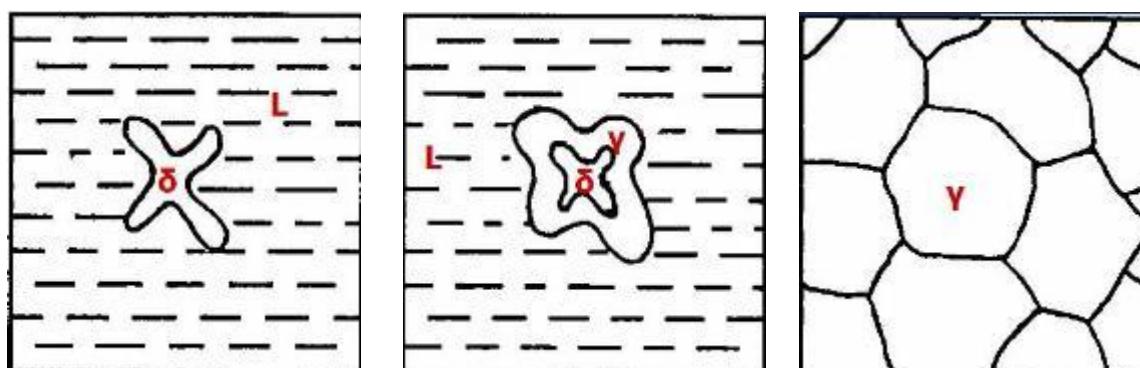
- 包晶反应：由一种液相和一种固相相互作用生成另一种固相的转变过程。
 - 包晶相图定义：当两组元在液态时无限互溶，在固态时形成有限固溶体而且发生包晶反应时，其所构成的相图。
 - 常用的Fe-C, Cu-Zn, Cu-Sn等合金相图中，均包括这种类型的相图。下面以Fe-C合金高温部分的相图为例对包晶相图进行简要分析。
 - 从相图中可以看出，相图包含有 L、 δ 、 γ 三个单相区和 L+ δ 、L+ γ 、 δ + γ 三个两相区。



»»» §3.3 二元合金相图



由于是一相包着另一相进行反应，故称为包晶反应



4. 二元共析相图

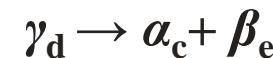
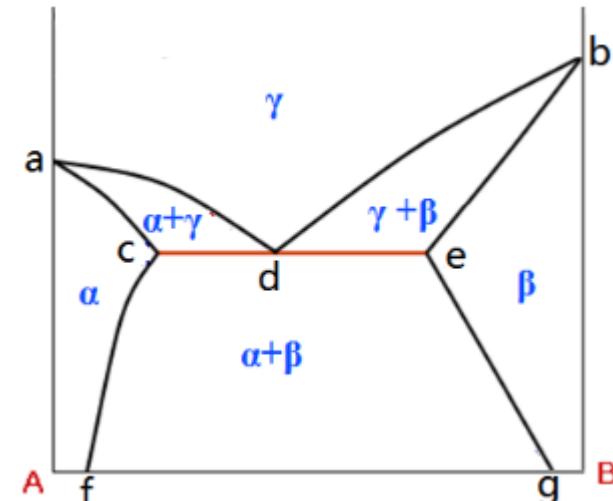
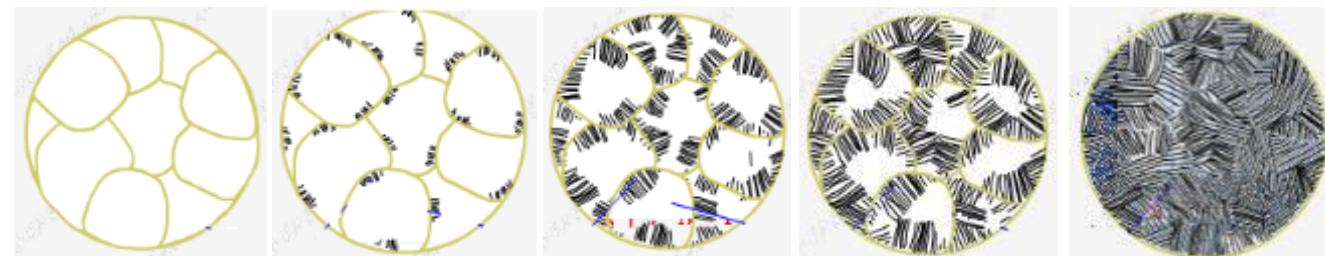
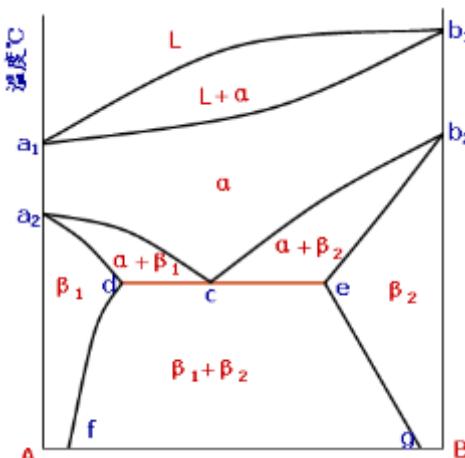
共析反应: 在一定温度下, 由一定成分的固相同时析出两个成分和结构完全不同的新固相的反应

两组元组成的合金系在固态下发生共析反应时所构成的相图

水平线dce线为共析反应线, 在该线温度下发生共析反应, 反应产物为两相机械混合物, 称为**共析体**

► 共析反应的特点

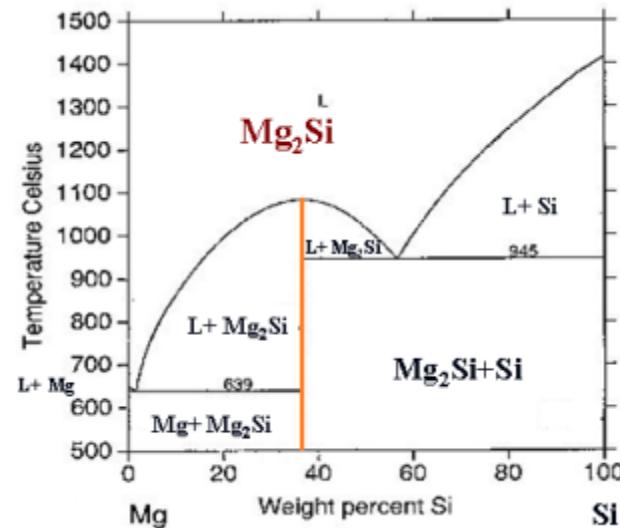
- 共析反应是在固态下进行的
- **反应中的原子扩散比较困难**
- 易于达到较大的过冷度
- **生核率高**
- 与共晶组织相比, 共析组织要细得多



5. 形成稳定化合物的二元相图

稳定化合物是指在熔化前不发生分解的化合物（如Mg-Si系的 Mg_2Si 和Fe-C系的 Fe_3C ）；其成分固定，在相图中是一条垂线（代表一个单相区）；垂足是其成分，顶点是其熔点，结晶过程同纯金属

分析这类相图时，可把稳定化合物当作纯组元看待，将相图分成几个部分进行分析



上面介绍的匀晶相图、共晶相图、包晶相图、共析相图和形成稳定化合物相图等都只是相图的基本类型，而实际的二元相图比较复杂，往往包括几种基本相图，在进行分析时可按下列步骤进行分析。

》》》 本章主要知识点回顾

1. 基本概念：组元、相、固溶体、金属间化合物，固溶强化、弥散强化。

2. 合金的结晶特点：结晶在变温下完成，伴随晶体结构和成分的变化。

3. 二元匀晶相图

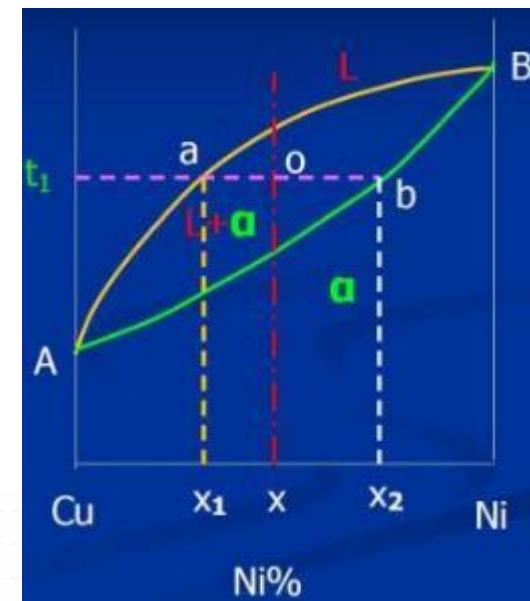
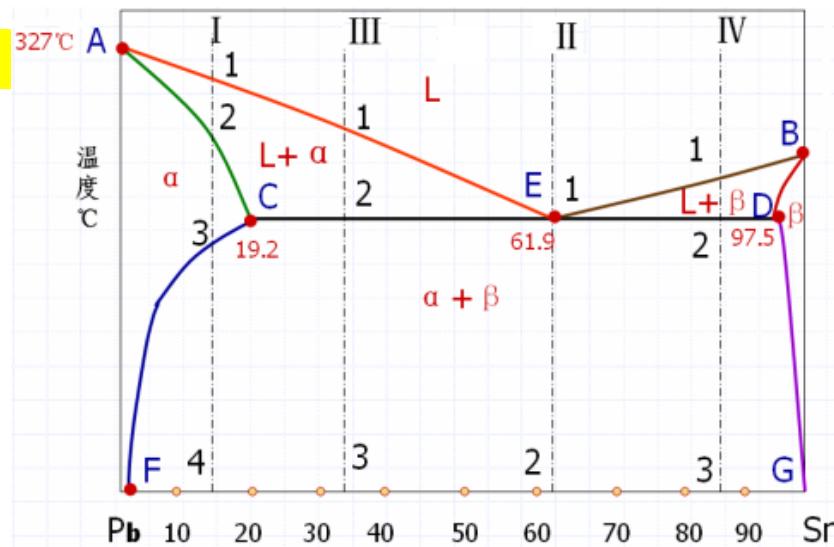
(1) 合金的结晶过程： $L \rightarrow L + \alpha \rightarrow \alpha$ ；

(2) 杠杆定律确定两平衡相的成分和相对重量。

4. 二元共晶相图

(1) 结晶过程；

(2) 组织组成。





感谢同学们的聆听！



河北工业大学
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

勤慎公忠