

# 材料加工原理

## 第二章 液态金属及其加工

# 第二章 液态金属及其加工

2.1 液态金属的结构与性质

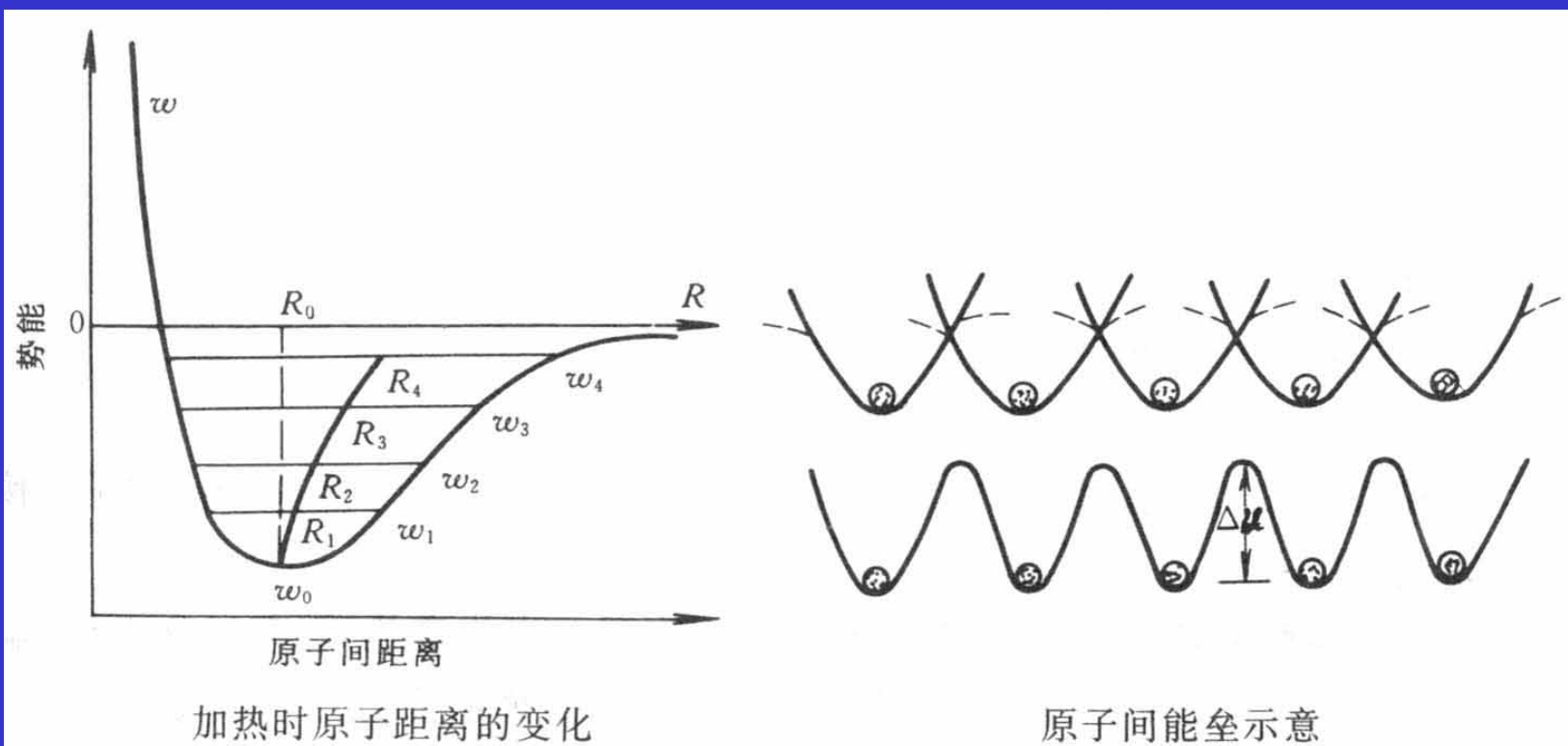
2.2 液态金属凝固结晶的热力学与动力学

2.3 液态金属的冶金处理

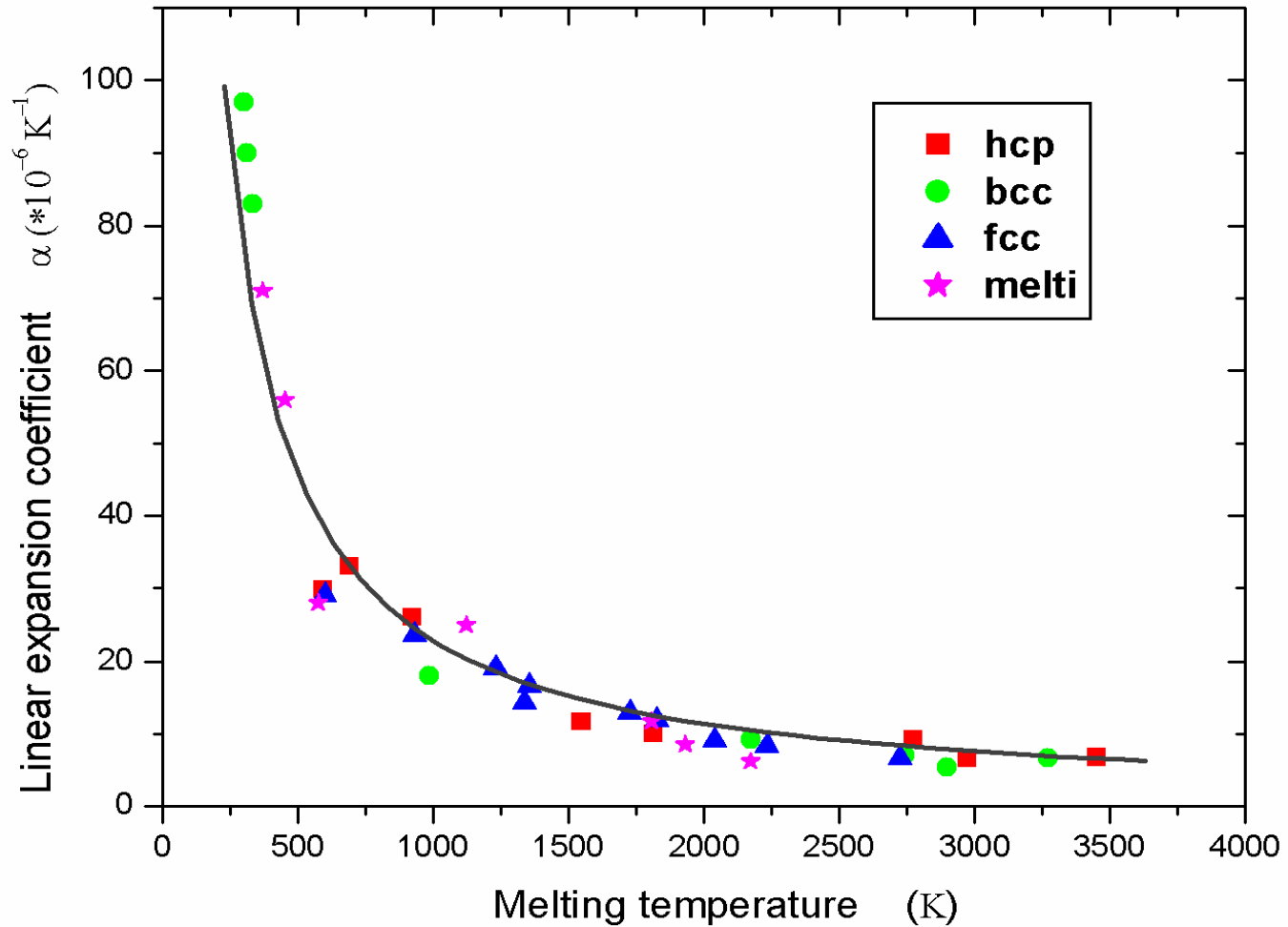
## 2.1 液态金属的结构与性质

- 金属从固态熔化为液态时的变化
- 液态金属的结构
- 液态金属的性质

# 加热时金属原子间距变化与原子间能垒



# The Limit of Thermal Expansion of Pure Metals



# 金属熔化时的熵值变化

表 2-2 一些金属的熵值变化

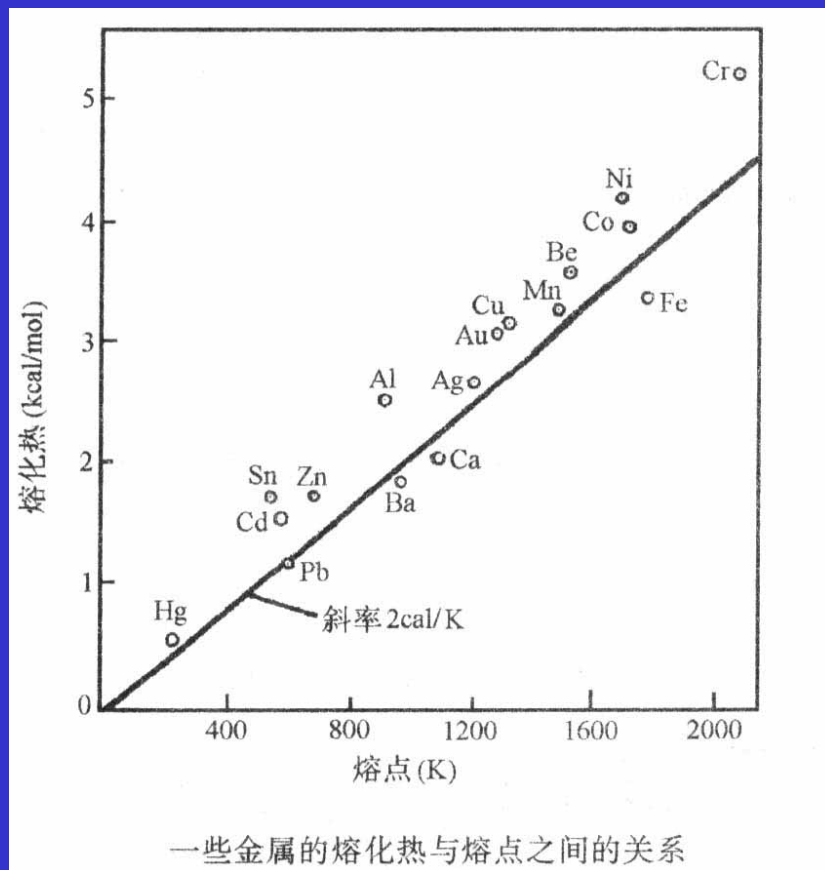
金 属	从 25°C 到熔点熵值变化 $\Delta S$	熔点时的熵值变化 $\Delta S_m$	$\Delta S_m/\Delta S$
Cd	4.53	2.46	0.54
Zn	5.45	2.55	0.47
Al	7.51	2.75	0.37
Mg	7.54	2.32	0.31
Cu	9.79	2.30	0.24
Au	9.78	2.21	0.23
Fe	15.50	2.00	0.13

# 金属的熔化潜热与汽化潜热比较

一些金属的熔化潜热和汽化潜热

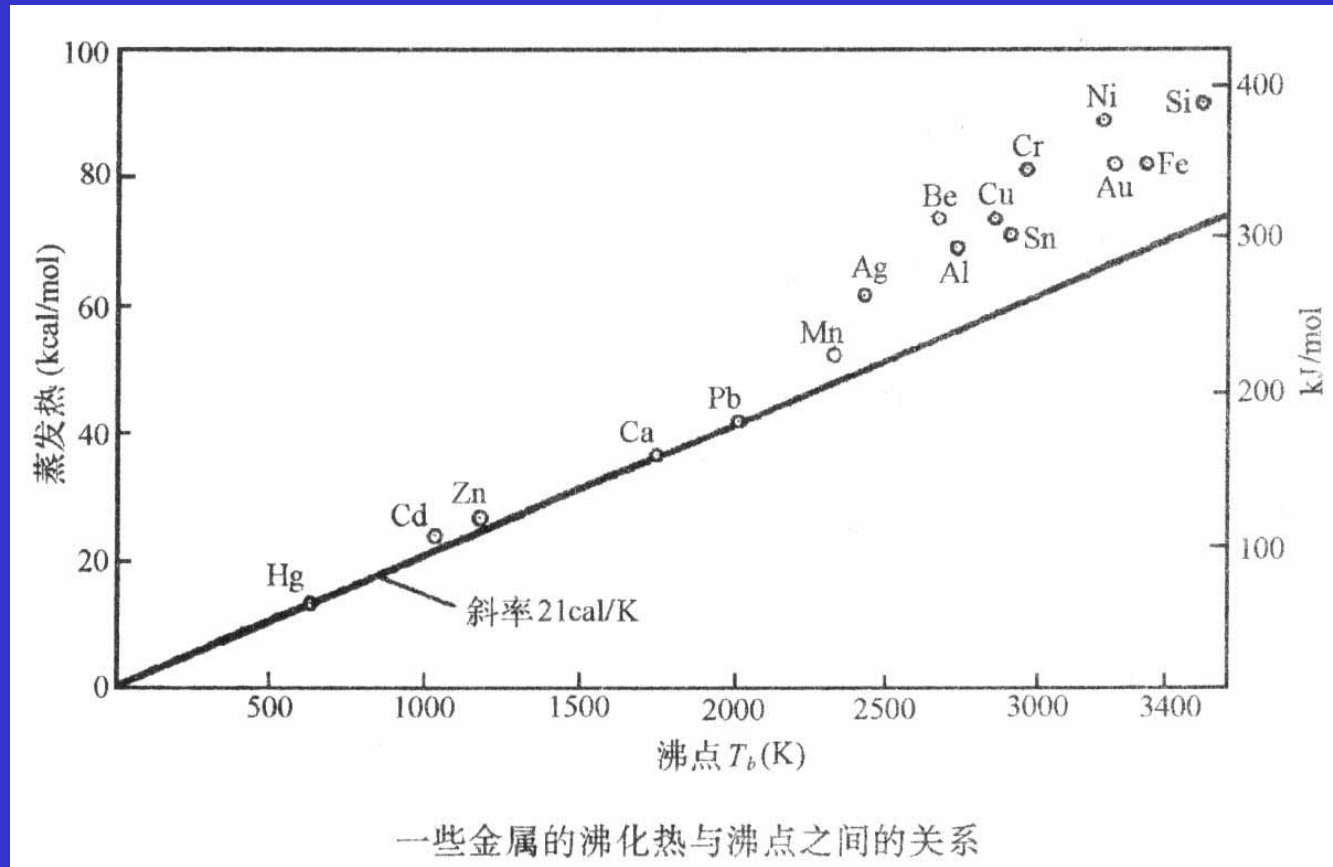
金属	晶体结构	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	熔化潜热 $L_m$ / $(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	沸点/ $^{\circ}\text{C}$	汽化潜热 $L_b$ / $(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	$L_b/L_m$
Al	f. c. c	660	10450	2480	290928	27.8
Au	f. c. c	1063	12790	2950	341924	26.7
Cu	f. c. c	1083	13000	2575	304304	23.4
Fe	f. c. c/b. c. c	1536	15173	3070	339834	22.4
Zn	h. c. p	420	7231	907	114950	16.0
Cd	h. c. p	321	6395	765	99484	15.6
Mg	h. c. p	650	8694	1103	133760	15.4

# Richard规则： $S_m=2\text{cal/K}\cdot\text{mol}$

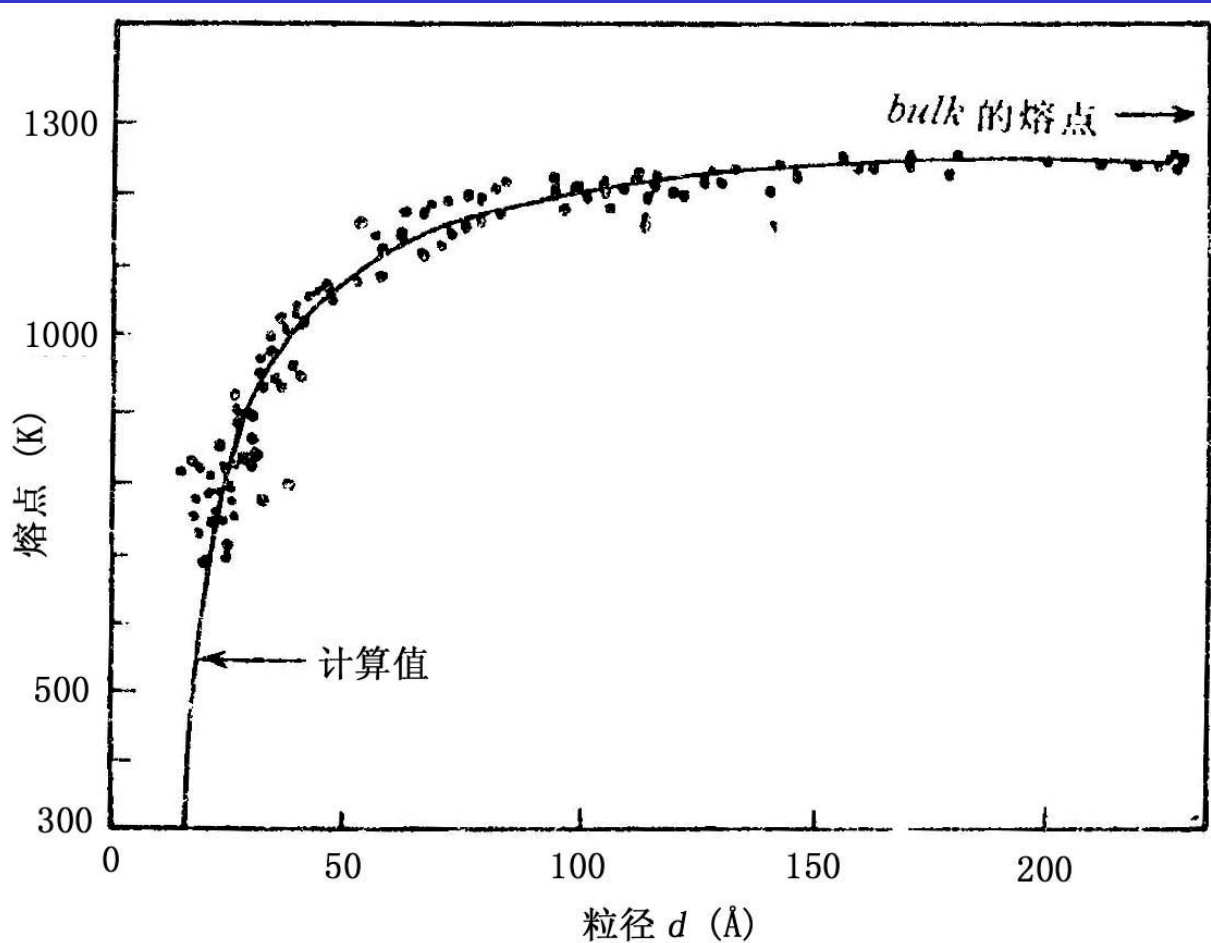




# Trouton规则： $S_v=21\text{cal/K}\cdot\text{mol}$

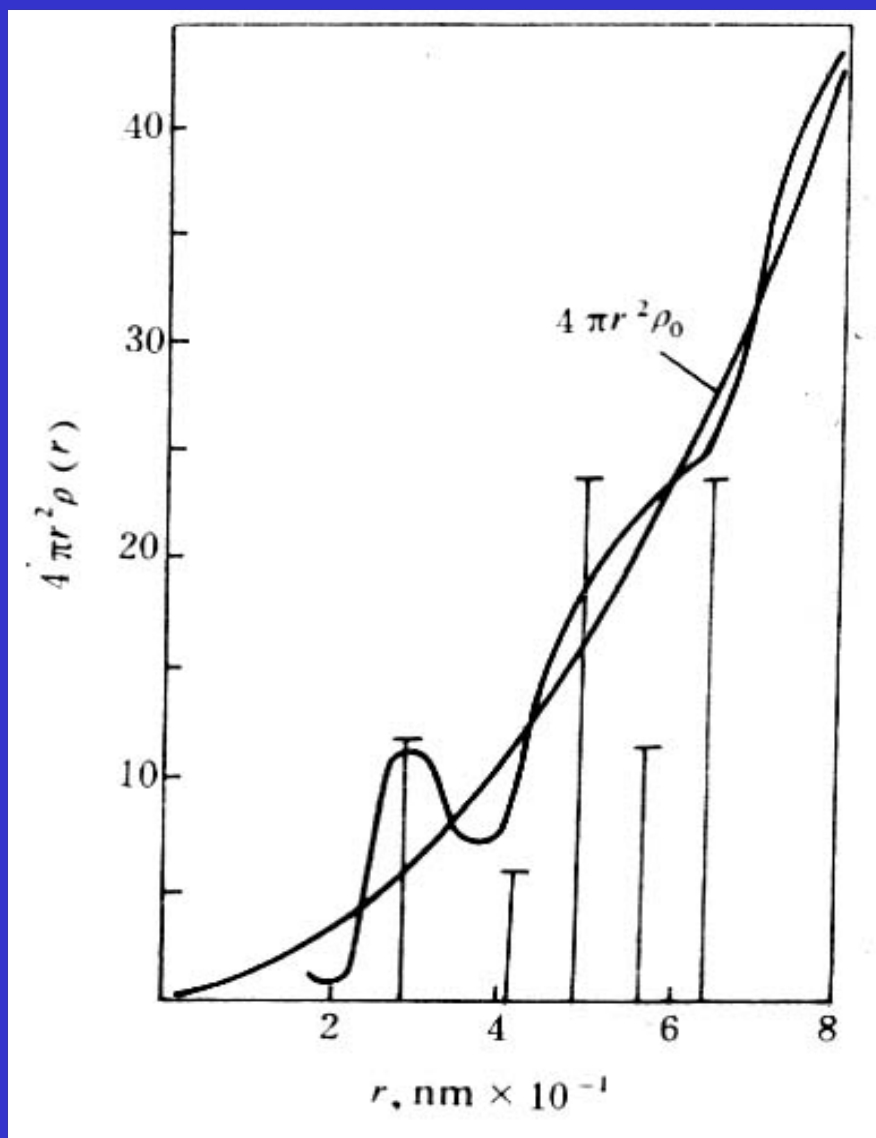


# 液态金属的结构

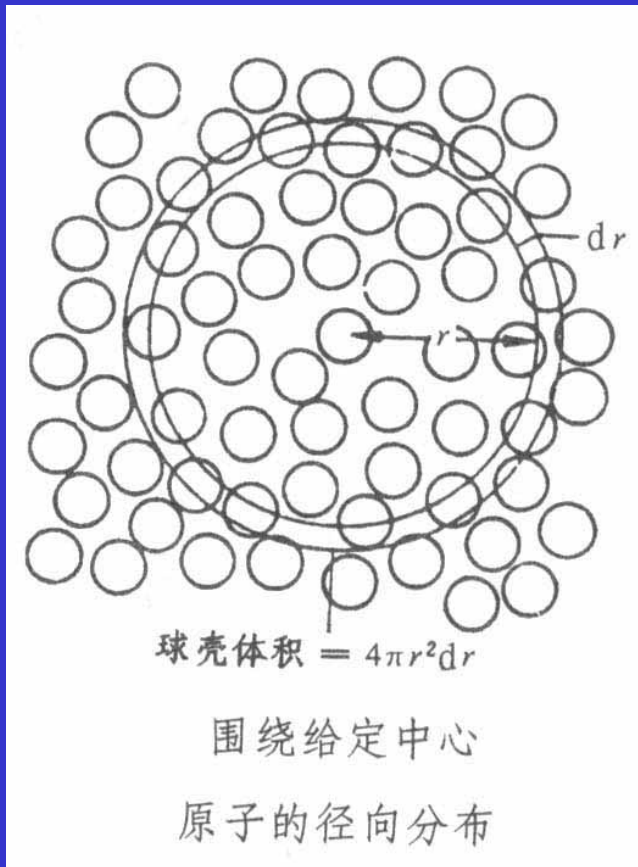


Au 微粒的熔点与粒径的关系

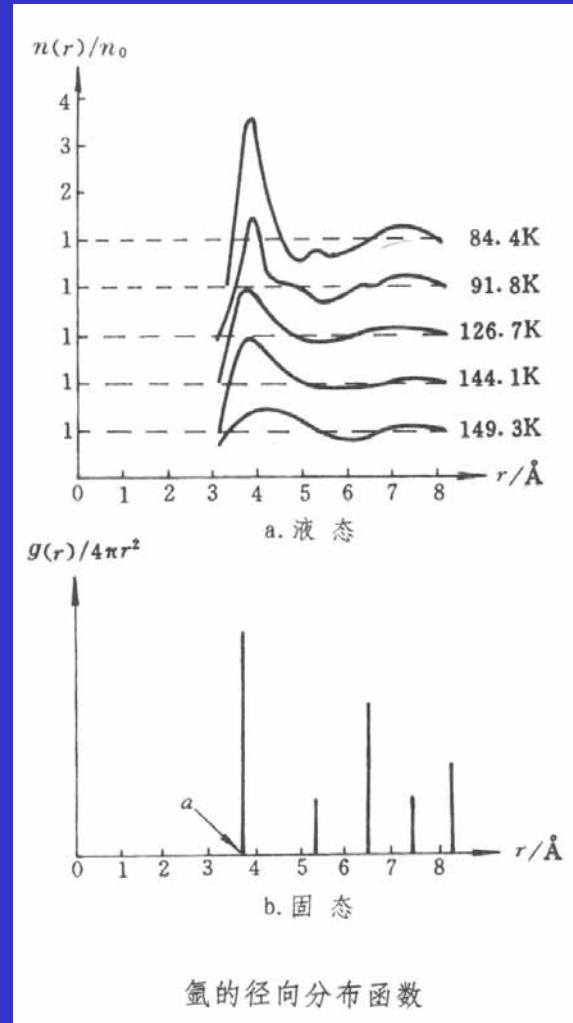
# 973K时液态铝原子径向分布函数曲线



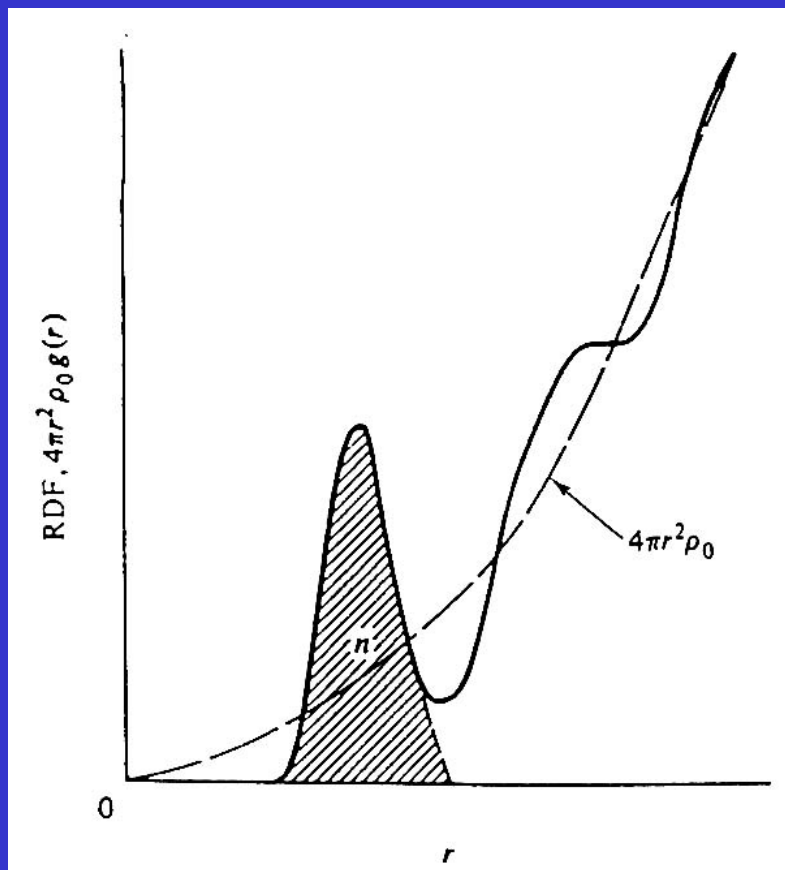
# 液体的径向分布函数与结构分析



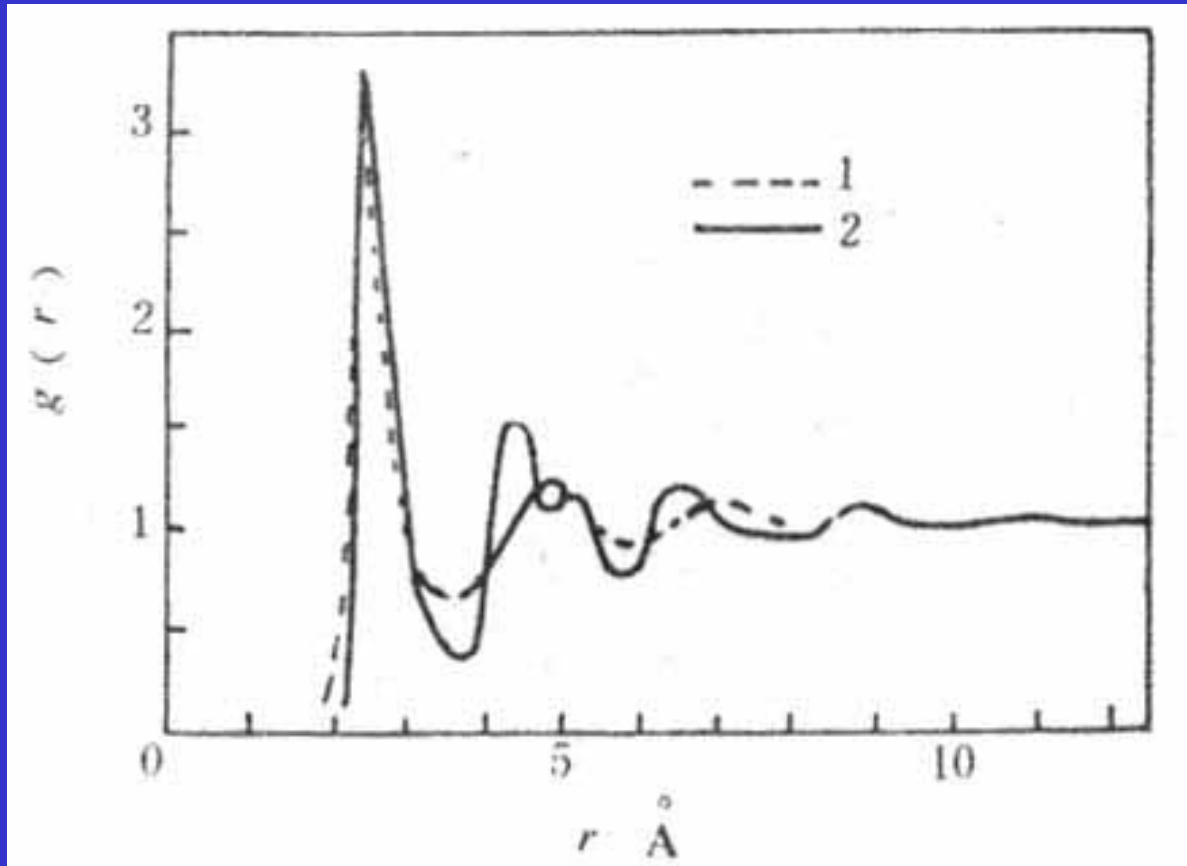
$$g(r) dr = 4\pi r^2 \rho(r) dr$$



# 液体径向分布函数曲线示意图



# 液态铁和非晶铁 的分布函数 $g(r)$



1—液态铁 (1833K)      2—非晶铁

# 液态金属的性质

- 液态金属的粘度
- 表面张力与表面能
- 界面张力与界面能
- Gibbs 吸附方程

# 液体金属性质 - - 粘度

- 动力粘度和运动粘度

粘度 - - 介质中一部分质点对另一部分质点作相对运动时所受到的阻力。

牛顿液体内摩擦定律：层流，所有液层平行运动。

摩擦力：

$$F(x) = \eta S \frac{dv}{dy} \quad \text{其中：} S - \text{接触面积，} v - \text{流速，}$$

$\eta$  - 粘滞系数 / 动力粘度（单位： $P_a \cdot s$ 也即  $N \cdot s/m^2$ ）



# 动力粘度和运动粘度

- 牛顿液体内摩擦定律也叫牛顿粘滞液体流动定律。
- 粘滞系数就是通常所称的粘度，也叫动力粘度。粘度的倒数叫做流动性。
- 运动粘度

$$\text{运动粘度 } \nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad \text{单位 } \text{m}^2/\text{s}$$

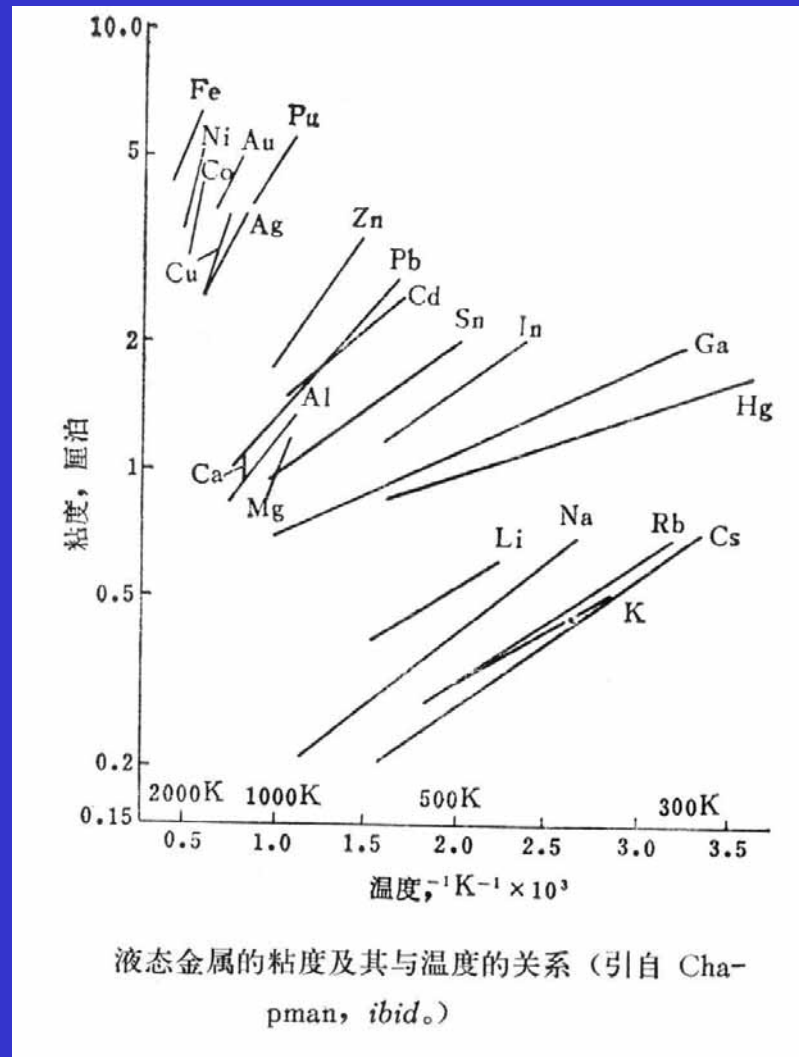
# 影响粘度的因素

- 温度

$$\left. \begin{array}{l} \text{粘滞系数 } \eta = \frac{1}{q\delta} \\ \text{迁移系数 } q = \frac{D}{KT} \\ \text{扩散系数 } D = \frac{\delta^2}{2\tau_0} e^{-U/KT} \end{array} \right\} \Rightarrow \eta = \frac{KT}{D\delta} \left. \right\} \Rightarrow \eta = \frac{2\tau_0 KT}{\delta^3} \cdot e^{U/KT}$$

由上式可知：第二项  $e^{U/KT}$  随温度升高而降低；第一项  $2\tau_0 KT / \delta^3$  则与温度呈直线关系。因此，当温度不太高时（比如熔点附近），指数项随温度增高而急剧变化，因而使粘度下降。但是当温度很高时，指数项趋近于1。这时随温度增高，粘度呈直线增加。显然，这种情况已是接近气态了。

# 液态金属粘度 $\log \eta$ 与 $1/T$ 的关系



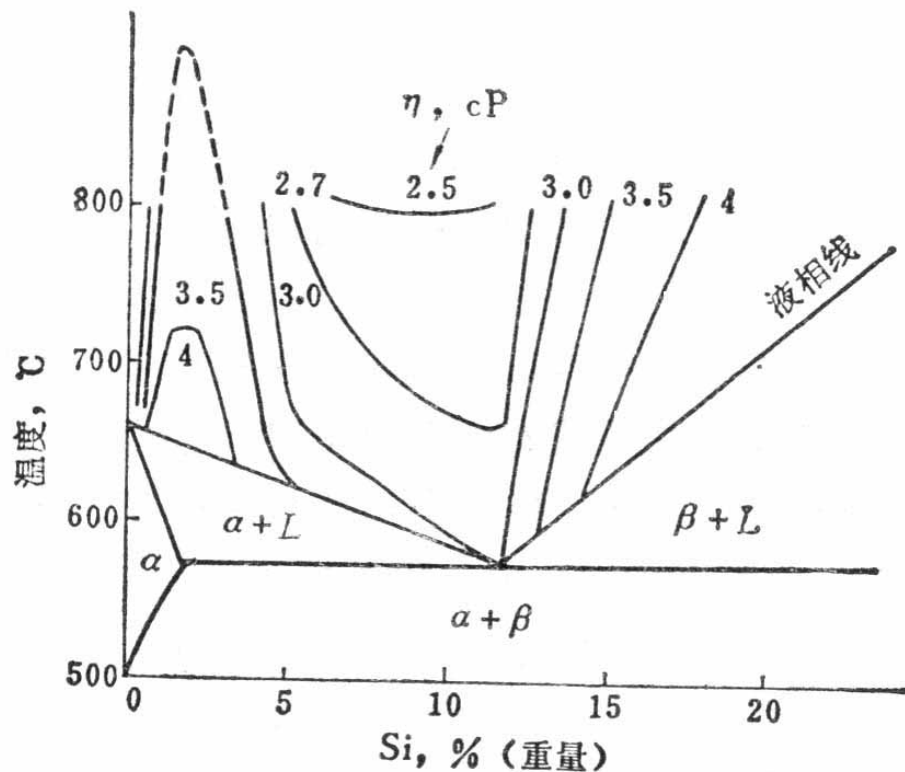
# 影响粘度的因素

- 化学成分

- 固态杂质越多，粘度越大。

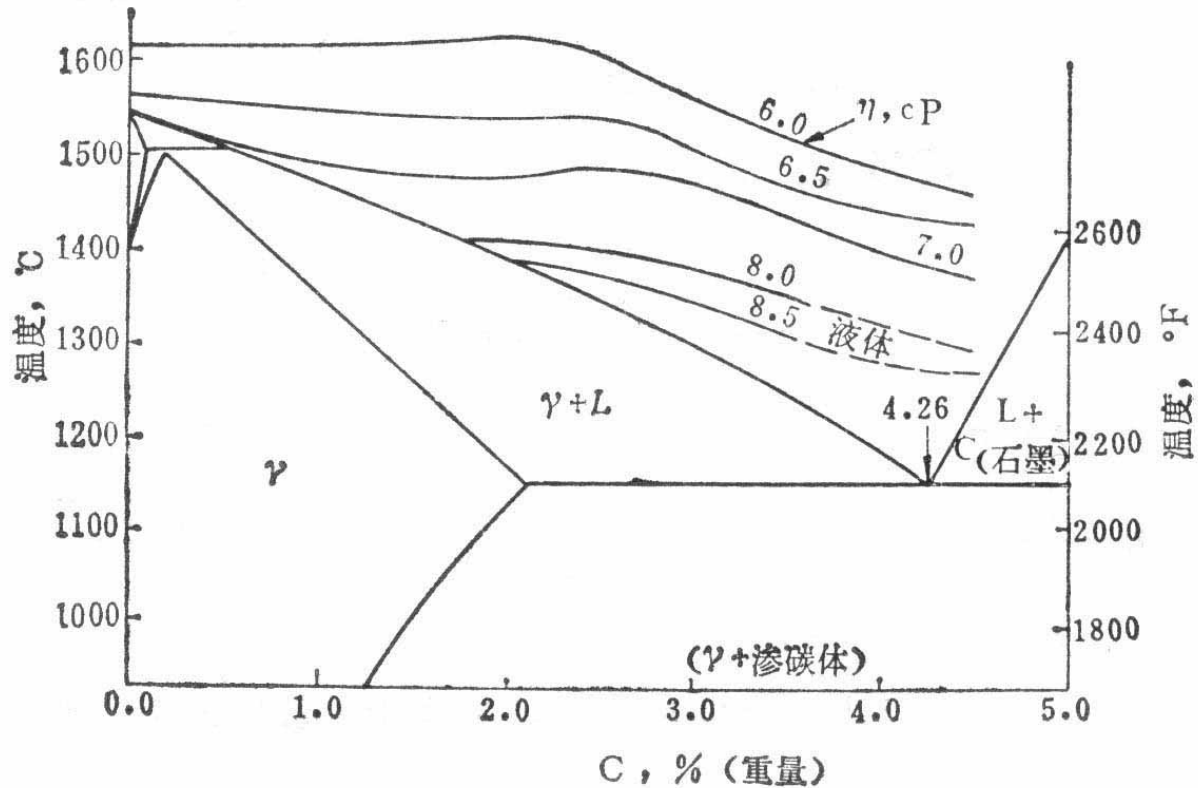
- Fe-C亚共晶合金，随着C含量的升高，粘度下降。共晶点时粘度最小，流动性最好。

# Al-Si合金的粘度



Al-Si合金的粘度 (引自W.R.D.Jones and W.L.Bartlett, *J.Inst.Metals* **81**, 145 (1952))

# Fe-C合金的粘度



Fe-C合金的粘度 (引自R.N.Barfield and J.A.  
Kitchener, *J. Iron and Steel Inst.* **180**, 324(1955).)

# 粘度与Stokes方程

$$P_c = 6\pi r v \eta$$

$$6\pi r v \eta = V(\gamma_1 - \gamma_2)$$

$$v = \frac{2r^2(\gamma_1 - \gamma_2)}{9\eta}$$

# 粘度对液态金属流态的影响

- 雷诺数 *Reynolds number*

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{v d}{\nu}$$

式中： $\rho$  - 液体密度       $v$  - 液体流速

$d$  - 圆管直径       $\mu$  - 粘滞系数

$\nu$  - 运动粘滞系数

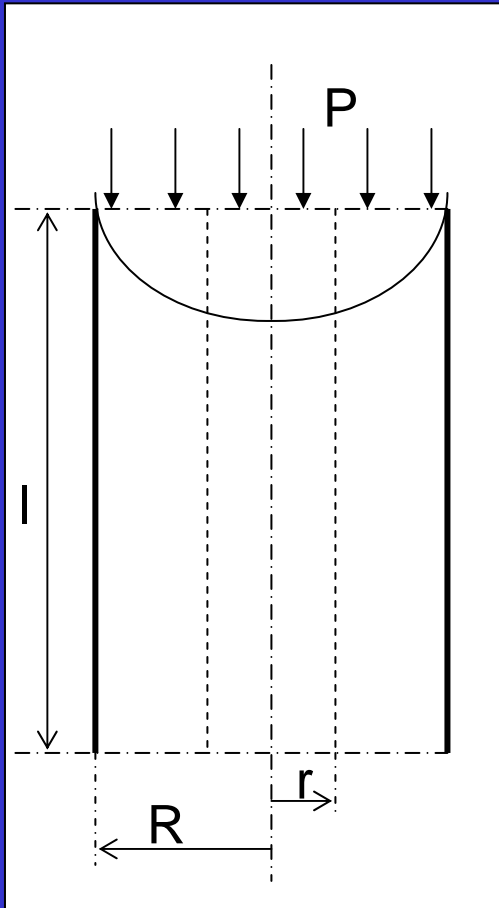
- 临界雷诺数：对于圆管  $Re_k = 2300$

$Re < Re_k$  层流

$Re > Re_k$  紊流



# 粘度对液态金属流量的影响



$$F_{\text{压}} = P \cdot \pi r^2$$

$$F_{\text{阻}} = \eta \cdot S \cdot \frac{dv}{dr}$$

$$\text{其中: } S = 2\pi r l$$

当  $r = R$  时, 流速  $v = 0$

$$\text{稳定流: } F_{\text{压}} = F_{\text{阻}}$$

$$\text{流速 } v = \frac{P}{4l\eta} (R^2 - r^2)$$

一条抛物线

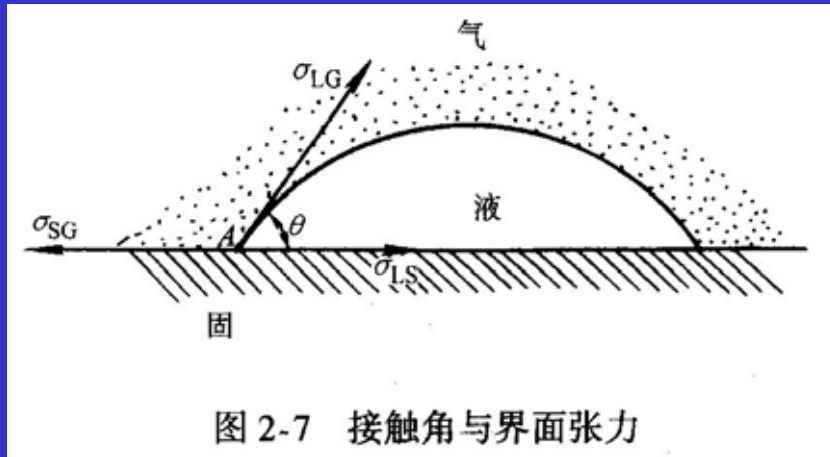
$$\text{流量 } V = \int_0^R v \cdot 2\pi r \cdot dr = \frac{\pi P R^4}{8l\eta}$$

# 表面张力

- 表面张力与表面能
- 界面张力与界面能
- 表面张力的影响因素
- Gibbs吸附方程
- 表面张力与材料加工

# 界面张力与界面能

## 界面张力的表征



## 润湿角（浸润角）

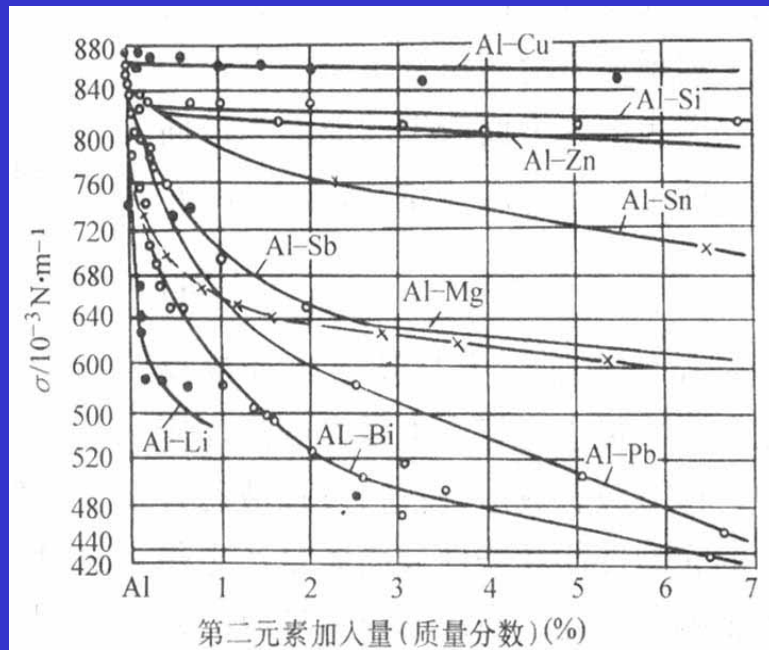
$$\cos \theta = \frac{\sigma_{SG} - \sigma_{SL}}{\sigma_{LG}}$$

$\theta > 90^\circ$  不润湿，球形  
 $\theta < 90^\circ$  润湿，铺展开

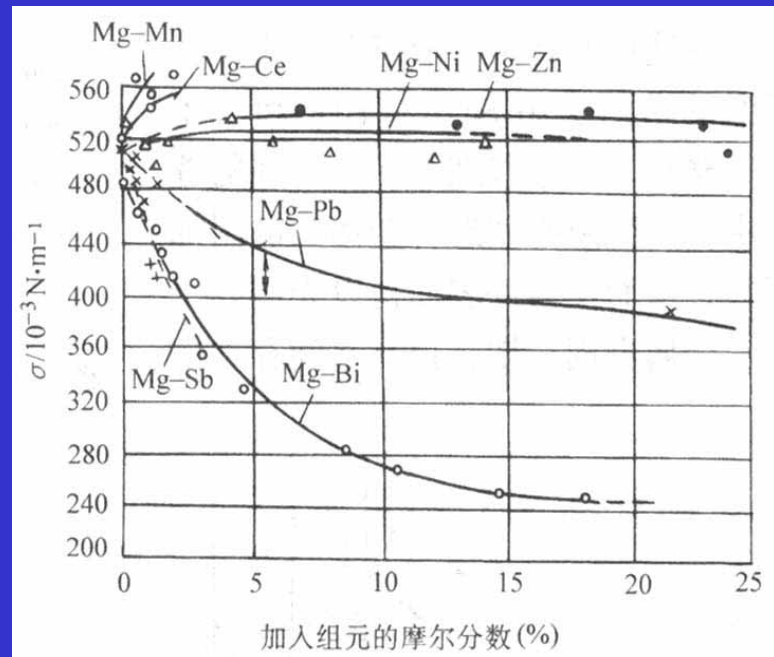
# 影响表面张力的因素

- (1) 熔点 $T_m$ 越高，表面张力 越大。
- (2) 温度 $T$ 升高，表面张力 减小，如Al、Mg、Zn等。  
有例外：铸铁、碳钢、铜及其合金。
- (3) 溶质：  
表面活性物质，则使 减小，有正吸附作用；  
表面非活性物质，使 增大，有负吸附作用。

# 合金元素对Al、Mg液表面张力的影响

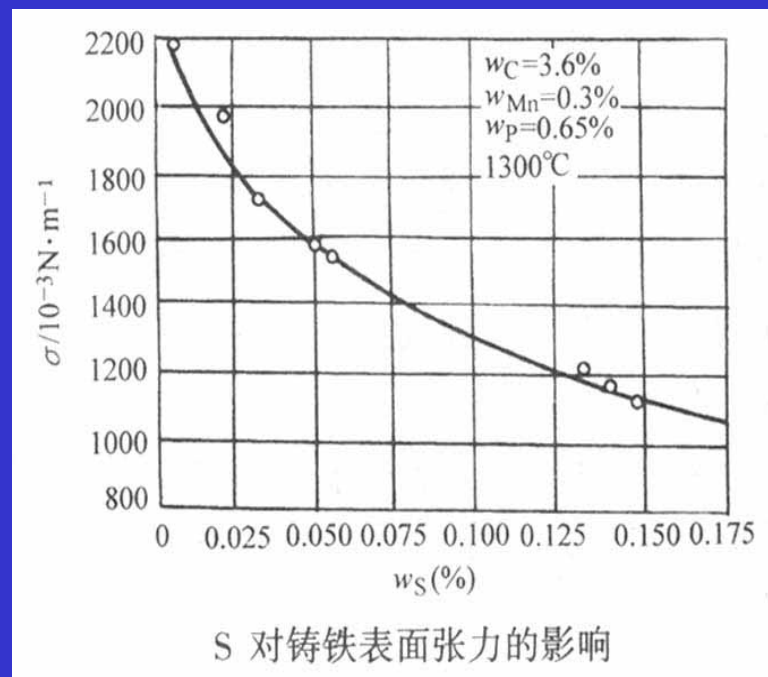
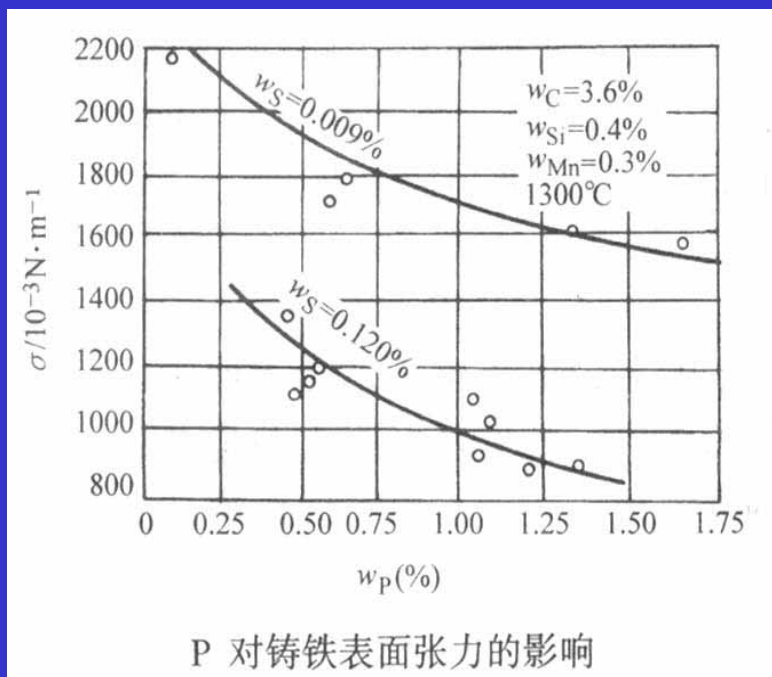


Al 中加入第二组元后表面张力的变化



Mg 中加入第二组元后表面张力的变化

# P、S两元素对铸铁液表面张力的影响



## Gibbs溶液表面吸附方程：

$$\Gamma = -\frac{C}{RT} \cdot \frac{d\sigma}{dC}$$

$\frac{d\sigma}{dC} < 0$ 时,表明浓度增加,  $\sigma$ 降低,即 $\Gamma > 0$ ,正吸附;

$\frac{d\sigma}{dC} > 0$ 时,表明浓度增加,  $\sigma$ 升高,即 $\Gamma < 0$ ,负吸附.

# 表面张力与材料加工

由表面张力引起的附加压力

$$P = \frac{2\sigma}{r} \quad (\text{球形})$$

$$P = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{其它形状})$$



# 表面张力与材料加工

