

# · 铸造理论基础

日本横浜国立大学  
工学部教授 冲 进

上海工业大学

1980.5

# 内 容 介 绍

本书是冲进教授于一九八〇年六月在上海工业大学讲学时所用讲义的中译本，讲学时间共三十学时。

本书介绍了近代有关铸造工程的理论基础，并与铸造实践作了有机的联系。其中对铸钢的粘砂、凝固收缩、凝固应力及裂纹的产生等问题作了尤为深入的探讨。

本书可供高等学校铸造专业学生阅读，并适于讲授“铸造理论”的高等学校教师及有关科研与工程技术人员参攷。

上海工业大学机械工程系  
铸造教研组

# 目 录

1. 铸型热传导 ----- (1)
  - 1.1 铸型热传导的两大类
  - 1.2 砂型的热传导
  - 1.3 热传导的基本公式
  - 1.4 砂型温度分佈的数字解
  - 1.5 铸件向砂型的传热量
2. 砂型铸件的凝固速度 ----- (7)
  - 2.1 简化情况的理论
  - 2.2 上述理论的适用性
  - 2.3 Chvorinov 法则
  - 2.4 热传导及凝固过程的数值解法
3. 溶质扩散的基本内容 ----- (13)
  - 3.1 凝固过程中的溶质扩散现象
  - 3.2 扩散基本方程式, Fick 定律
  - 3.3 用模拟法 (Analog) 表示溶质或温度的扩散 —— 实验法
4. 冒口理论\* ----- (20)
  - 4.1 凝固时发生体积减少
  - 4.2 缩孔 (Shrinkage Cavity)\* 的生成
  - 4.3 安放冒口来防止缩孔

#### 4.4. 根据 Chvorinov 法则来决定冒口大小和形状的方法

4.4.1. Adams Taylor 公式 (1953)\*

4.4.2. 冲进 (Oki) 公式 (1959)\*

4.4.3. Bishop 和 Pellini 的形状系数  $(W+L)/T$  和  $T$  的关系

#### 5. 液态金属的结晶形态----- (31)

5.1. 平衡时的形态和生长中的形态

5.2. 树枝状晶为什么以树枝状方式生长

#### 6. 表面和介面张力与自由能----- (38)

6.1. 日常生活中的表面作用

6.2. 表面张力的定义和大小

6.3. 表面张力的形成原理

6.3.1. 两分子间的引力与分子间距离的关系

6.3.2. 结晶表面张力的形成原理

6.4. 表面自由能

6.4.1. 何谓表面自由能

6.4.2. 所谓表面自由能

#### 7. 金属中表面张力和介面张力的作用举例-- (51)

7.1. 曲面的表面(或介面)张力作用

7.1.1. 曲面两侧的压强差, 毛细作用

7.1.2. 液体金属侵入铸型毛细管的压力

### 7.1.3. 具有液体膜的固体断裂强度

(凝固末期多晶体的结合力)

## 7.2. 相界和晶界等交点处的界面(或表面)张力作用

### 7.2.1. 三相点上力的平衡和稳定二面角

### 7.2.2. 稳定二面角与凝固的关系

## 8. 临近凝固点的金属弹性和蠕变及断裂 (68)

### 8.1. 蠕变性能为什么会影响临近金属熔点时的缺陷生成

#### 8.1.1. 蠕变对偏析的影响

#### 8.1.2. 蠕变对缩孔的影响

#### 8.1.3. 蠕变对高温热裂的影响

### 8.2. 金属熔点附近弹性率和蠕变资料

### 8.3. 金属在熔点附近的断裂强度

# 1. 铸型热传导

## 1.1 铸型热传导的两大类

铸型热传导可分为两大类,如图1.1所示。人们总是从最简单的情况着手分析事物。设铸型与铸件的交界面为大平面,则此时铸型的温度只随与铸型及铸件界面垂直的距离和时间而变化。此外,如果仅只考虑两极端的情况,温度分布就可分为如图1.1a和1.1b所示的两大类。图1.1a表示界面处的铸件

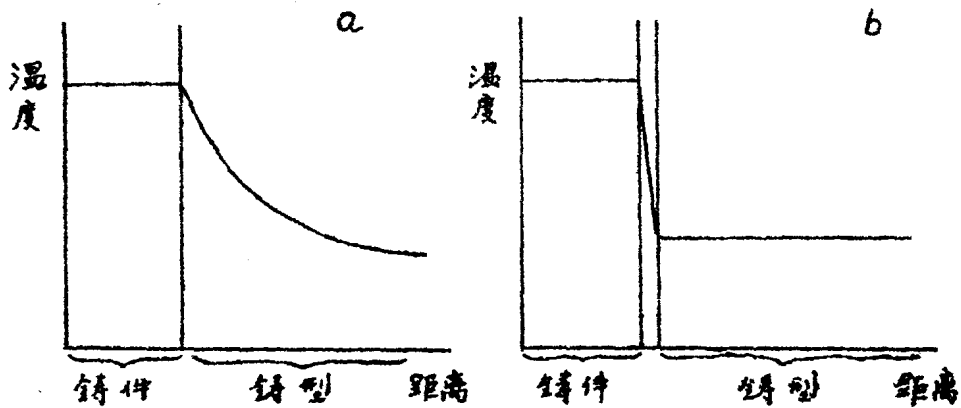


图 1.1

温度和界面处的铸型温度相等,而铸型内部的温度则随距离而变化;图1.1b表示铸型内部的温度相等,而在铸型与铸件之间极薄的界面层中温度发生急剧的变化。

图a的场合,对热流起决定作用的是铸型材料的热传导性质,界面不影响热流。图b的场合,起决定作用的是界面的热传导性质,而铸型对热流没有影响。

形成 a 与 b 两类不同类型的原因，主要是由于铸型热传导率大小的不同。砂型的热传导率小，形成图 a 的结果。金属型的热传导率大，形成图 b 的结果。实际上遇到的是 a、b 之间的中间状态。

## 1.2 砂型的热传导

砂型中以如图 1.1a 那样的温度分布进行热传导。为简化起见，设铸型的厚度为无限大，并且铸型初始温度  $T_0$  各处相等。此外，由于铸件的温度在凝固时变化不大，所以也为简化起见，把它看作为定温  $T_1$ 。在上述情况下，温度分布曲线随时间的变化如图 1.2 所示。

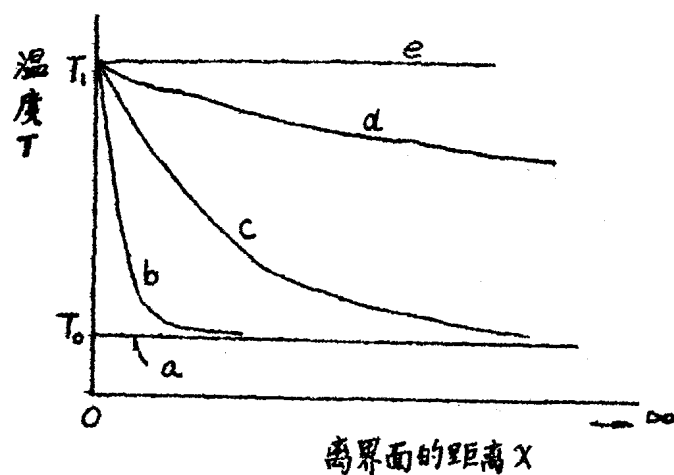


图 1.2

图中曲线 a~e 为对应于  $t_1 \sim t_5$  各时间的曲线。

曲线 a 为时间  $t_1$  的曲线

曲线 b 为时间  $t_1$  的曲线

曲线 c 为时间  $t_2$  的曲线

曲线 d 为时间  $t_3$  的曲线

曲线 e 为时间  $t_4$  的曲线

设  $t$  为铸型与铸件的接触时间, 图 1.2 中各个  $t$  值分别如下:

$$t_0 = 0, \quad t_4 = \infty$$

$$t_0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_4$$

可用热传导理论说明取得图 1.2 结果的原因。为此首先看一下热传导的基本公式。

### 1.3 热传导的基本公式

热传导的基本公式为付立叶热传导公式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -K \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.1)$$

式中  $t$  为时间,  $x$  为温度梯度方向上的距离,  $T$  为温度,  $Q$  为与  $x$  轴垂直的单位面积上沿  $x$  轴方向所通过的热量\*。 $K$  是表示导热材料特性的值, 称为热传导率。此外, 设  $K$  不随  $x$  和  $T$  而变化, 并且温度只与  $x$  轴方向有关, 与  $y$ 、 $z$  轴方向的距离无关, 则从式 (1.1) 可导出下面的基本公式:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1.2)$$

式中  $\alpha =$

(1.3)

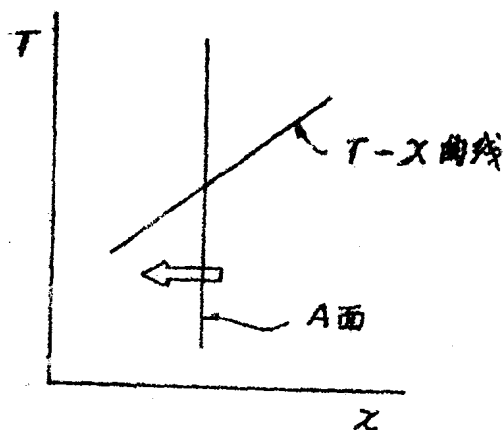
$C$  为  $\rho$  为密度。

$\alpha$  称为导热系数，一般为正值。因此，温度分布曲线 ( $T-x$  曲线) 各点上的  $\frac{\partial T}{\partial x}$  (如曲线已知，则各点上的  $\frac{\partial T}{\partial x}$  也已知) 乘以一定的正值，就是该点的温度上升速度。<sup>\*\*</sup>

根据式 (1.1)，由于曲线随时间的变化速度已给出，如果材料的初始温度分布 ( $T-x$  曲线) 以及材料的边界温度未定，则在各时刻  $t$  内温度分布 ( $T-x$  曲线) 就成为与  $t$  有关的函数，这一点是可以理解的。这样，该函数在一定的初始条件和边界条件下，通过数学解析方法求解式 (1.2) 就能得到。

\*

(1.1) 式的意义：

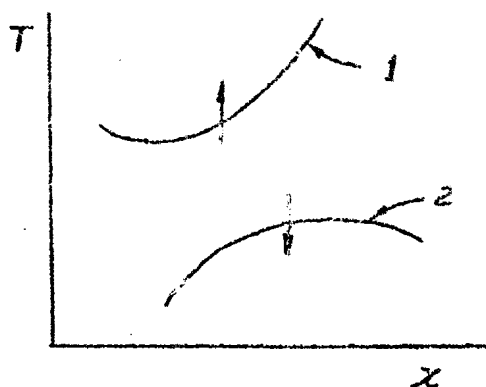


$\longleftrightarrow$  表示通过  $A$  面的热量的矢量或 (1.1) 表示  $\longleftrightarrow$  的大小与温度梯度成正比。

\*\*

曲线如何上凹，则  $\frac{\partial T}{\partial x}$  是正值，温度上升速度也为正

值。如曲线向下凹， $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$  是負值，温度上升速度也為負值。



曲线 1 和 2 中，温度分別按箭头方向变化。

#### 1.4 砂型温度分布的数学解

在上述简化了的砂型条件下，初始条件如下：

$t=0$  時， $T$  与  $x$  无关

$T=T_0$  (除  $x=0$  外)

边界条件如下：

$x=0$ ， $T$  与  $t$  无关

$T=T_1$  (除  $t=0$  外)

在上述条件下求解式 (1.2)，结果如下：

$$\frac{T_1 - T}{T_1 - T_0} = \operatorname{erf} x \quad (1.4)$$

$$x = \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (1.5)$$

式(1.4)中的  $\text{erf } X$  称为误差系数。<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> 误差系数如下:

$$\text{erf } X = \int_0^X \exp(-u^2) du$$

$X$  与  $\text{erf } X$  的关系经计算后, 以图表的形式表示之。

### 1.5 铸件向砂型的传热量

铸件向铸型的传热量或可称之为铸型的吸热量, 或可称之为铸型的散热量。在砂型の場合, 可从式(1.4)求出在  $x=0$  附近各时间的  $\frac{\partial T}{\partial x}$  值。把它代入式(1.1), 可得  $\frac{\partial Q}{\partial t}$ , 它表示铸型单位面积的吸热速度。

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right)_{x=0} = \frac{K}{\sqrt{\pi\alpha}} \frac{T_1 - T_0}{\sqrt{t}} \quad (1.6)$$

由式(1.6), 至时间  $t$  时的铸型界面单位面积的吸热量可用下式表示:

$$Q_{x=0} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} (T_1 - T_0) \frac{K}{\sqrt{\alpha}} \sqrt{t} \quad (1.7)$$

以式(1.3)代入, 则式(1.7)成为

$$Q_{x=0} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} (T_1 - T_0) \sqrt{k\rho c} \sqrt{t} \quad (1.8)$$

$\sqrt{k\rho c}$  是导热材料的固有的特性,  $T_1$  约等于铸件的凝固温度( $T_s$ ),  $T_0$  约等于室温  $T_r$ , 即  $T_1 \approx T_s$ ,  $T_0 \approx T_r$  (1.9)

## 2. 砂型铸件的凝固速度

### 2.1 简化情况的理论

与简化铸件的凝固潜热 (Latent Heat of Solidification)

相比, 浇注后熔融金属的显热 (从熔点到达浇注温度的显热 Sensible Heat) 可忽略不计, 且应用了节 1 中所用的简化条件。此时单位界面面积的铸件凝固量由 (1.8) (1.9) 和 (2.1) 三式得出 2.2 式。

$$Q_{x=0} = L \rho_c v \quad (2.1)$$

其中  $L$ : 单位铸件质量的凝固潜热;  
 $\rho_c$ : 铸件的密度 (单位体积的质量);  
 $v$ : 单位界面面积的凝固体积。

$$v = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{(T_s - T_f) \sqrt{K \rho_f}}{L \rho_c} \sqrt{t} \quad (2.2)$$

在薄层型凝固情况下,  $v$  等于凝固部分的厚度 (薄层厚度)  $D_s$ 。若铸件材料和铸型材料均不变, 则 (2.2) 式用常数  $q$  表示, 得出下列式子。

$$v = q \sqrt{t} \quad (2.3)$$

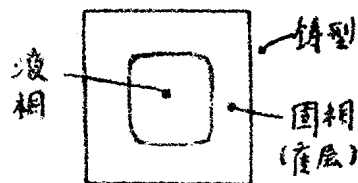
且

$$D_s = q \sqrt{t} \quad (2.4)$$

\* 薄层型凝固

铸件的凝固部分是从铸件和铸型界面向铸件内部成长。在

固体和液体所占部分与铸件整体相比其量较少时，固体呈薄层状凝固。这种凝固型或称为薄层型 (Skin型) 凝固。而在铸件整体中固体和液体的共存部分较多时，该共存部分称为糊状区 (Mushy Zone)。糊状层多的凝固型或称为糊状 (Mush) 型凝固。

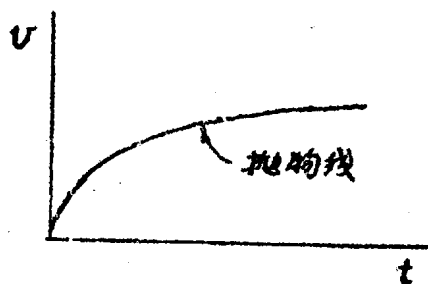


\*\*\*  

$$v = \frac{1}{\delta} \sqrt{t}$$

因此在砂型中的凝固量与  $\sqrt{t}$  成正比，这种成长形式称为抛物线形成长 (Parabolic Growth)。

若不在砂型中而是在金属型中凝固时，则  $v$  大致与  $t$  成正比。



## 22 上述理论的适用性

上述理论，仅为简化条件，因此必须研究上述理论对下列各项的适用性。

a. 铸型的  $K, C$  值是否一样都随着温度而变化?

$K$  和  $C$  都随温度的变化而有明显的变化。

b. 铸型和铸件的界面与铸件的厚度相比是否能看成大平面?

板状铸件的板面凝固时, 该板面可看成大平面。所以上述理论是可以适用于此种凝固的。那么立方体 (Cube)、圆角四棱柱、圆柱体、球体等是否适用呢? 因为这些铸件中热的流线 (流线 Flow Line) 是不平行的\*, 所以铸型内的温度不只是  $x$  和  $t$  的函数, 因而式 (1.2) 不能正确成立。

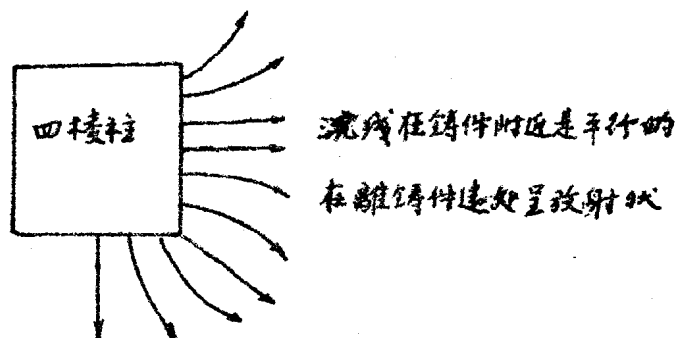
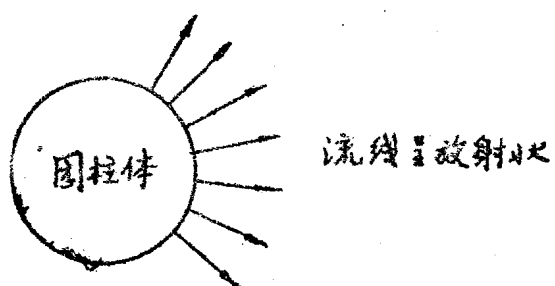
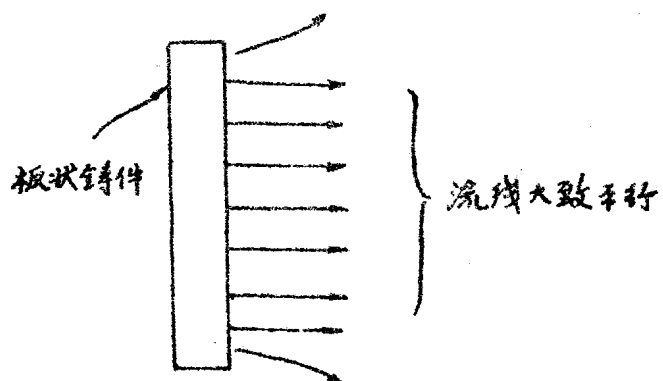
c. 铸型的厚度与铸件的壁厚相比能否看成无限大? 普通砂型情况下可看成无限大但壳型 (Shell Mold) 时须看作是有限厚度。泥芯通常亦看成有限厚度。

d. 铸件与铸型的界面温度是否不随时间而变化?

因为合金自凝固开始至凝固结束温度是降低的, 因此在凝固过程中界面温度亦是降低的。

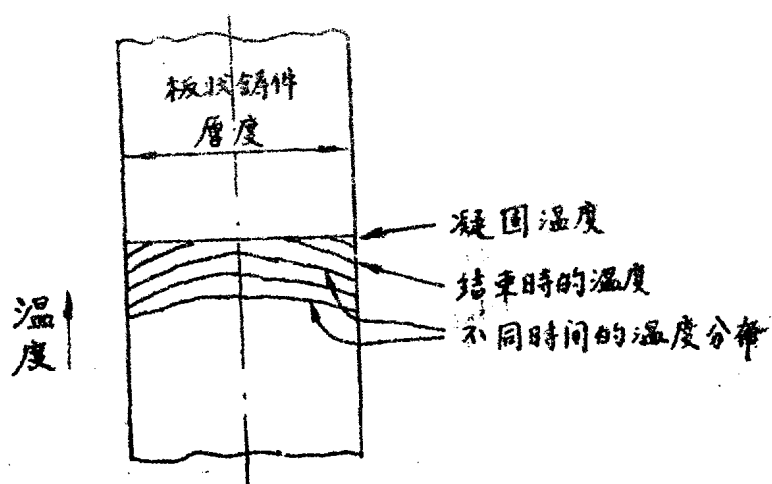
纯金属和共晶合金的凝固温度不变, 但除板状铸件外其他铸件在接近凝固结束时, 外表面的温度比铸件中心低得多, 而且凝固结束后, 铸件温度当然是随时间下降的。\*\*\*

\*  
铸型内的热流线

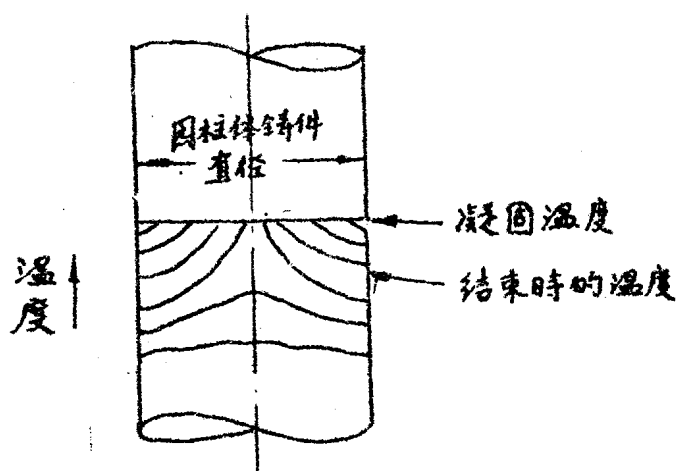


※※

凝固结束前界面温度的下降



板状铸件直到凝固结束时，温度变化小。



## 2.3 Chvorinov 法则

根据前面 2.2 中所列举的各种理由，认为 (2.3) 式中的理论是不正确的，但 Chvorinov (Giesserei 1940) 对圆柱体、切棱柱、球等各种形状铸件进行了研究，证实 (2.3) 式相当接近实验结果。

设铸件的体积为  $V_c$ ，凝固体积为  $V_s$ ，表面积（界面面积）为  $A$ ，凝固结束时间为  $t_f$ ，则

$$V_s = A v$$

根据 (2.3) 式得

$$V_s = g A \sqrt{t} \quad (2.5)$$

在凝固结束时（凝固时间为  $t_f$ ），则  $V_s = V_c$ ，由 (2.5) 式可得

$$V_c = g A \sqrt{t} \quad (2.6)$$

在铸件材料相同、铸型材料相同时， $g$  值相同，由 (2.6) 式得到如下的理论结果：

$(V_c/A)^2/t_f$  是与铸件形状无关的定值。

Chvorinov 用实验证实了该理论，把该法则称为 Chvorinov 法则。<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Chvorinov 的实验结果。

## 24 热传导及凝固过程的数值解法

Chvorinov 法则的最大误差约为 20%，与实验一致的是圆柱体和球体。此外，用解析法来预测其它复杂形状铸件的热传导和凝固是不可能的。