

18 104-107

# 铁水罐内凝结的传热数学模型\*

## Mathematical Model for Heat Transfer on Solidifying Ladle of Hot Metal

唐鑫  
Tang Xin

徐楚韶  
Xu Chushao

TF531

(重庆大学冶金及材料工程系, 重庆, 630044)

**A 摘要** 从传热角度研究了铁水在罐内的凝结过程, 导出了预测铁水凝固层形状及厚度的数学模型。并讨论了各种参数(如铁罐周转次数、铁罐内表面温度以及不同罐衬耐火材料等)对凝固层形状及厚度的影响。

**关键词** 铁水; 传热; 数学模型; 凝罐; 铁水罐

凝结

中国图书资料分类法分类号 TF531

**ABSTRACT** In this paper, solidifying ladle of hot metal has been studied from the point of view of heat transfer. A mathematical model, which is applied to predict the shape and the thickness of solidifying layer, has been developed. The theoretical calculated results agree with the applied results in production. The effects of various parameters, such as the circulating times, the inner-surface temperature of ladle and the different refractories, on the shape and the thickness of solidifying layer have been discussed. These are contributed to reduce the solidifying ladle of hot metal.

**KEYWORDS** hot metal; heat-transfer; mathematical model; solidifying ladle; ladle

### 0 引 言

铁水在罐内凝结(以下简称凝罐)已愈来愈引起人们的广泛重视, 由于铁水在罐内的凝结, 铁罐容积愈来愈小, 不仅影响铁水罐的周转, 危及高炉生产, 而且增加耐火材料消耗和铁损, 尤其是冶炼钒钛磁铁矿的高炉, 据统计, 攀钢 1200 m<sup>3</sup> 高炉开工前 3 年, 铁罐寿命仅 30~50 次, 由铁水凝罐引起的铁损约占铁水量的 2%~3%, 造成数千万元的经济损失, 因此, 这是生产中迫切需要解决的问题。

目前, 对铁水凝罐的认识尚不统一, 有的认为是过渣造成, 有的认为是铁水中 Si、Ti 等元素在出铁过程中的氧化造成。作者认为: 只要铁水温度低于其凝固点, 就会在罐内发生凝结, 因此从传热角度出发, 用数学模型的方法来研究铁水凝罐现象是可行的。研究的目的在于为减缓铁水凝罐提供理论依据。

\* 收文日期 1994-09-21  
教委博士点基金资助项目

### 1 数学模型

由于罐内铁水的传热很复杂,在建立数学模型时,作如下假设:

- 铁罐中心的铁水温度不变;
- 当铁水在罐内凝结时,内径及高度的减小等于耐火材料厚度的增加;
- 罐内的凝结物由铁和渣组成,其质量分数之比为7:3.

#### 1.1 罐内铁水的传热模型

图1为铁罐装入铁水后的截面示意图.

当铁水装入铁罐后,由于罐的对称性,取1/2作计算域,则在直角坐标系下,描述铁水传热的二维非稳态导热微分方程<sup>[2]</sup>为

$$\frac{\partial T_1(x, y, t)}{\partial t} = a_1(T) \left( \frac{\partial^2 T_1(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1(x, y, t)}{\partial y^2} \right)$$

边界条件:

$$x = R_0, y_0 \leq y \leq y_1; -\lambda_1(T) \frac{\partial T_1(x, y, t)}{\partial y} = q_1 + q_{a1}$$

$$x = 0, y_0 \leq y \leq y_1; -\lambda_1(T) \frac{\partial T_1(x, y, t)}{\partial y} = 0$$

$$0 \leq x \leq R_0; y = y_0; -\lambda_1(T) \frac{\partial T_1(x, y, t)}{\partial x} = q_2 + q_{a2}$$

$$0 \leq x \leq R_0; y = y_1; -\lambda_1(T) \frac{\partial T_1(x, y, t)}{\partial x} = q_3$$

当罐内任意一点铁水温度  $T_1(x, y, t)$  低于凝固点温度  $T_s$  时,铁水或渣就在罐上凝结.凝固点的确定是由碳当量(C.E)来判断<sup>[1]</sup>.当  $C.E > 4.3\%$  时,  $T_s = (w_c - 1.34) / 0.00254$ ,当  $C.E < 4.3\%$  时,  $T_s = 1664 - 124(W_c) + 0.5(W_p) + 0.25(W_m)$

#### 1.2 罐衬的传热模型

铁罐罐衬的传热可认为是二维非稳态导热,其控制方程为:

$$\frac{\partial T_2(x, y, t)}{\partial t} = a_2(T) \left( \frac{\partial^2 T_2(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2(x, y, t)}{\partial y^2} \right)$$

边界条件:

$$x = R_1, 0 \leq y \leq y_1; \lambda_2(T) \frac{\partial T_2(x, y, t)}{\partial y} = d_r [T_s - T_2(x, y, t)]$$

$$x = R_0, y_0 \leq y \leq y_1; T_2(x, y, t) = T_1(x, y, t)$$

$$0 \leq x \leq R_0; y = y_0; T_2(x, y, t) = T_1(x, y, t)$$

$x_0 = R_0; y_2 \leq y \leq y_1$ , 是铁水表面与罐衬内表面的辐射传热,可以认为是由两个共边,宽

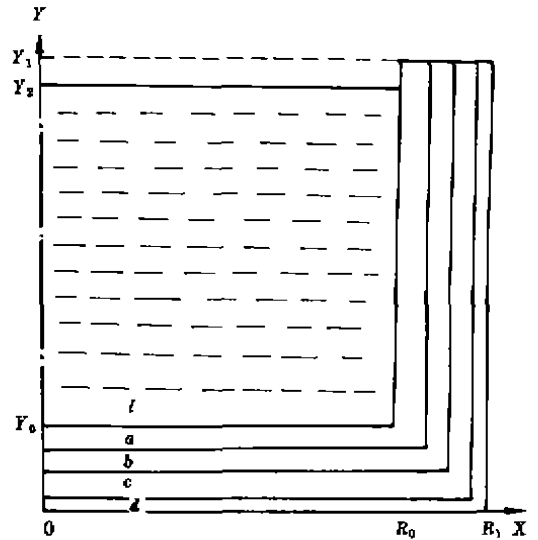


图1 铁罐截面示意图

- a——罐衬工作层; b——罐衬支持层;
- c——罐衬绝热层; d——外壳; l——铁水

度不同,相互垂直的无限长平面之间的传热,则:

$$-\lambda_r(T) \frac{\partial T_r(x, y, t)}{\partial x} = C_0 \left\{ \frac{\varphi_r [(T_r(x, y, t) + 273)^4 - (T_s(x, y, t) + 273)^4]}{1 + \varphi_r(1/\varepsilon_l - 1) + \varphi_r(1/\varepsilon_r - 1)} \right\}$$

$$\text{式中 } \varphi_r = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{y_1 - y_2}{x} - \sqrt{1 + \left( \frac{y_1 - y_2}{x} \right)^2} \right]$$

$$\varphi_n = \varphi_r \cdot x / (y_1 - y_2)$$

铁水表面向罐口的辐射散热  $q_3$  为:

$$q_3 = C_0 \varepsilon_l \varphi_n [(T_l(x, y, t) + 273)^4 - (T_s + 273)^4]$$

$$\text{式中 } \varphi_n = 1 - \varphi_r$$

罐衬的蓄热损失  $Q_{\text{蓄}}$  和罐壳的散热损失  $Q_{\text{散}}$  分别用下式计算:

$$Q_{\text{蓄}} = C_{\text{蓄}} \rho_{\text{蓄}} \Delta V_{\text{蓄}} [T_r(x, y, t + \Delta t) - T_r(x, y, t)] \cdot \Delta t$$

$$Q_{\text{散}} = a_2 A_{\text{散}} [T_r(x, y, t + \Delta t) - T_s] \cdot \Delta t$$

### 1.3 模型计算方法

将上面建立的数学模型经差分处理,以罐内铁水传热为主程序,罐衬传热为子程序。主程序模拟罐内铁水温度分布,子程序用于计算主程序所需的热量。利用该模型可以计算出不同条件下,凝固层的形状及厚度。

## 2 模型验证

### 2.1 计算条件

以攀钢 140 吨铁水罐,实装 120 吨铁水为例,设铁罐中心温度为 1350℃,铁罐内表面温度 300℃,铁水在罐内停留 90 分钟。铁罐的结构参数见表 1,罐衬材质的热物性参数如表 2 所示。罐壳与环境间的综合传热系数为:

$$a_2 = 7.84 + 0.0625T^{[2]}$$

表 1 铁罐的结构参数

参数	内径	外径	高度	钢壳	绝热层	支持层	工作层
尺寸	3.230	3.590	3.580	0.030	0.060	0.030	0.060

表 2 罐衬材质的热物性参数

材 质	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\lambda/\text{J}(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{℃})^{-1}$	$C/\text{J}(\text{kg} \cdot \text{℃})^{-1}$	$\varepsilon$	资料来源
A3 钢	8000	45	468.9	0.8	[2]
高铝砖	2300	$1.52-1.86 \times 10^{-4}T$	$836 + 0.234T$	0.8	[3]
蜡石砖	2000	$0.60 - 7.40 \times 10^{-4}T$	$836 + 0.234T$	0.8	[4]
绝热板	130	0.239	655	—	[3]
铁 水	7360	83.4	754.0	0.30	[2]

### 2.2 模型验证

在 2.1 的计算条件下,利用前面建立的数学模型,计算得到铁水在罐内的凝固层形状及

厚度如图2所示。图3是根据某一铁罐实际使用结果\*和作者所进行的调研结果\*\*而绘制的。

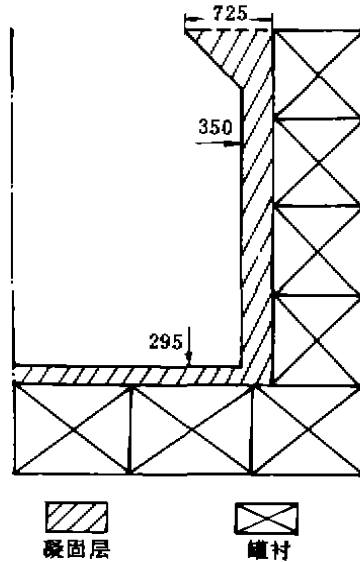


图2 计算的凝固层形状及厚度示意图

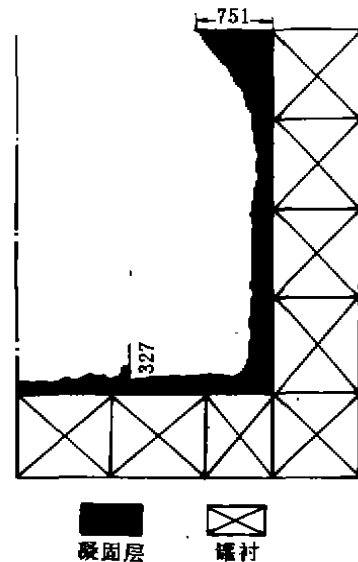


图3 铁水在罐内凝固层形状及厚度的实际使用结果

由图2可知:铁水在罐口的凝固层厚度最大,而罐中部及底部的凝固层较薄。这由于铁水通过罐口向空气散热的辐射热损失比罐衬中部及底部的蓄热和散热的热损失要大<sup>[6]</sup>。比较图2和图3:计算得到的凝固层形状和厚度与实际使用结果<sup>[4]</sup>基本吻合,都呈“J”字型,这表明建立的数学模型是合适的,具有一定的指导意义。

### 3 模型计算

#### 3.1 铁罐周转次数 $n$

不同铁罐周转次数  $n$  对铁水凝固层形状及厚度的影响如图4、5所示。

由图4可知:随着铁罐周转次数  $n$  的增加,凝固层形状都呈“J”字型。这是由于罐内的铁水,在凝固以后,下次使用时,温度降低,铁水粘度增大,而且凝固物的熔点高,约  $1450^{\circ}\text{C}$  [5],所以当有凝固物时,下次装入的铁水不但不能将凝固物熔化掉,反而会使已有的凝固层急剧增厚。这从图4也可以看出。当  $n$  增加,凝固层厚度增厚,只是在不同的部位,增加的幅度不一样。这是因为在罐口,已凝结的铁水将罐口部分封住,在下次使用时,铁水向罐口的散热面积减小,使铁水在罐口的凝固速度降低,而在罐中部及底部,由于凝固的铁水使罐衬厚度增加,蓄热热损失增强,所以,随着铁罐使用次数的增加,罐中部及底部的凝固厚度增幅较大。

将图5中的数据,经回归处理得到:

$$\begin{aligned} \text{罐口:} & \quad y_n = 54.6 + 66.7n; & \quad \text{相关系数} & \quad 0.996 \\ \text{罐中部:} & \quad y_n = 24.2 + 9.31n; & \quad \text{相关系数} & \quad 0.984 \\ \text{罐底部:} & \quad y_n = 7.31 + 6.54n + 2.21n^2; & \quad \text{相关系数} & \quad 0.992 \end{aligned}$$

从上式看出:当  $n = 23$ ,凝固物将罐口封住,而不能使用。在实际使用过程中,铁罐使用

\* 攀钢炼铁厂. 蜡石砖铁罐试验鉴定材料, 1988年11月

\*\* 唐鑫. 攀钢铁水粘罐的调研报告, 内部资料, 1991年11月

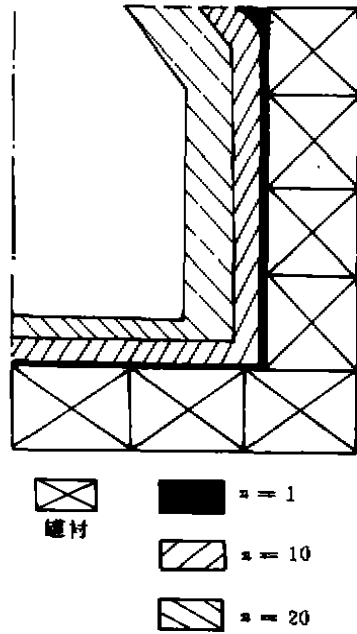


图 4 铁罐周转次数与凝固层形状的关系  
次数大于 23 次,这是因为铁罐使用到一定程度,就要进行氧气化罐或冷扣罐处理,使罐的使用次数增加。

3.2 铁罐使用温度

在不同的铁罐使用温度  $T$  下,铁水在罐内的凝固层厚度  $Y$  如图 6 所示。

由图 6 可知:随着铁罐使用温度的升高,铁水在罐内的凝固层厚度降低。每提高铁罐使用温度  $100^{\circ}\text{C}$  可将罐口罐中部及罐底部的凝固层厚度分别减少  $3.51\text{ mm}$ 、 $3.21\text{ mm}$  和  $2.84\text{ mm}$ 。这是由于提高铁罐使用温度,相当于提高罐内铁水温度增强了铁水的保温<sup>[4]</sup>。为了提高铁罐使用温度可以采用煤气预热铁罐或加速铁罐周转,缩短空罐停留时间。

3.3 不同罐衬材质

表 3 不同的罐衬材质组合

编 号	工 作 层	支 持 层	绝 热 层	钢 壳
1	高铝砖	高铝砖	高铝砖	A3 钢
2	蜡石砖	蜡石砖	蜡石砖	A3 钢
3	蜡石砖	高铝砖	绝热板	A3 钢

在不改变耐火材料厚度和铁罐容积的条件下,采用不同的罐衬材质如表 3 所示。与 2.1 计算条件相同,计算表明:当采用现行的高铝砖铁罐(如表 3 中的“1”),铁水在罐内发生粘结,如图 4 所示;而采用表 3 中的“2”和“3”时,铁水在罐内并不发生凝结。因此,这就给我们提示,铁水凝罐主要是由于铁水温度降低太大,粘度增大,而引起铁水在罐内的凝固。这就为

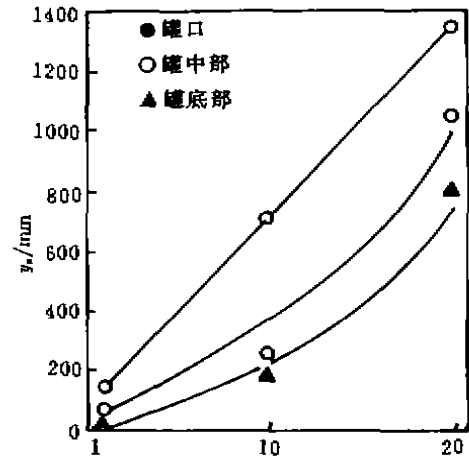


图 5 铁罐周转次数与凝固厚度的关系

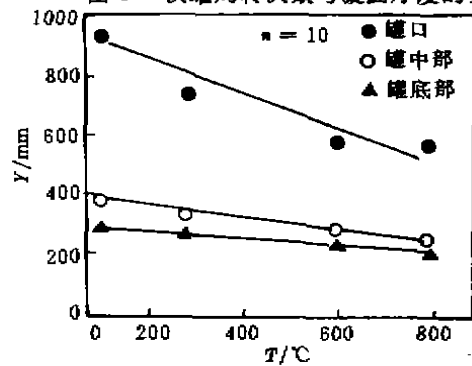


图 6 铁罐使用温度与凝固厚度的关系

降低铁水凝罐提供了理论依据。由此可知,加强铁水罐的保温性能是降低铁水凝罐的主要措施之一。从表 3 可知:改变耐火材料设计,即在普通高铝砖铁罐罐衬上将一层高铝砖改为蜡石砖或绝热板,一方面可以减少罐衬表面的散热,保持较高的铁水温度,另一方面改变材质后的罐衬热容量小蓄,热损失小,使罐衬工作层温度提高,不致发生粘凝。

## 4 结 论

1) 从传热角度出发,研究铁水凝罐导出的预测铁水凝固层形状及厚度的数学模型,其计算结果与实际生产相一致,表明该模型具有一定的正确性。

2) 随铁罐周转次数  $n$  的增加,铁水在罐内的凝固层形状基本一致,呈“ $I$ ”字型分布,且凝固层厚度增加,但在罐的不同部位、凝固层厚度增加的幅度不同。

3) 提高铁罐使用温度以及改进罐衬耐火材料设计,可以减少铁水在罐内的凝固层厚度。

### 符 号 说 明

$T$ —— 温度, $^{\circ}\text{C}$ ;	$R_0$ —— 铁罐内径, $\text{m}$ ;
$t$ —— 时间, $\text{s}$ ;	$R_1$ —— 铁罐外径, $\text{m}$ ;
$a$ —— 导温系数, $\text{m}^2/\text{s}$ ;	$y_x$ —— 铁水在罐内高度 $\text{m}$ ;
$y_0$ —— 罐底耐火材料厚度, $\text{m}$ ;	$y_1$ —— 罐外底部至罐口距离, $\text{m}$ ;
$y_n$ —— 凝固层厚度, $\text{mm}$ ;	$Q_3$ —— 罐口的散热量, $\text{J/s}$ ;
$Q_0, Q_1, Q_2$ —— 分别为罐角部、罐侧面及罐底部的蓄热损失, $\text{J/s}$ ;	
$Q_{s1}, Q_{s2}, Q_{s3}, Q_{s4}$ —— 分别为罐侧面上部、下部、底部和角度的散热损失, $\text{J/s}$ ;	
$q_i$ —— 与 $Q_i$ 相对应的热流, $\text{J/m}^2 \cdot \text{s}$ ;	$c_0$ —— Stefan-Bolizman 常数;
$\alpha_D$ —— 综合传热系数, $\text{J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;	
$\varphi_{i,j}$ —— $i$ 表面对 $j$ 表面的角度系数, $(-)$ ;	
$\varepsilon$ —— 黑度; $(-)$ ;	$n$ —— 铁罐使用次数;
$C_{xy}, \rho_{xy}, \lambda$ —— 节点 $(x, y)$ 处的比热, 密度及导热系数, $\text{J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ; $\text{kg/m}^3$ ; $\text{J/m} \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;	
$V_{xy}, A_{xy}$ —— 节点 $(x, y)$ 的体积和面积, $\text{m}^3; \text{m}^2$ ;	
$W$ —— 质量分数	

### 脚注:

$l$ —— 铁水	$m$ —— 初始态	$r$ —— 耐火材料	$a$ —— 环境
$C$ —— 铁水中 C 元素	$P$ —— 铁水中 P 元素	$Si$ —— 铁水中 Si 元素	

### 参 考 文 献

- 1 盛贞利. 钢铁便览 1. 第三版, 日本钢铁协会, 1987. 76
- 2 高家锐. 动量、热量、质量传输原理. 重庆: 重庆大学出版社, 1987. 395~400
- 3 陈家祥. 炼钢常用数据与图表手册. 北京: 冶金工业出版社, 1984. 58~63
- 4 唐鑫. 铁水温降的数学模型研究. 四川冶金, 1993, 15(4): 35~40
- 5 攀枝花钢铁公司. 攀枝花钒钛磁铁矿选矿烧结高炉冶炼试验资料汇编, 第七卷, 内部资料, 1978 年, 417