

# Temperature Simulation of Slab Cooling Process in Slow-Cooling Pit

Fangmin Quan<sup>1,2</sup>, Wenqiang Sun<sup>1\*</sup>, Jiuju Cai<sup>1</sup>, Qian Yang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Thermal and Environmental Engineering, Northeastern University, Shenyang

<sup>2</sup>Chief Engineer Office, Jiuquan Iron & Steel (Group) Co. Ltd., Jiayuguan

Email: \*neu20031542@163.com

Received: Mar. 13th, 2012; revised: Mar. 26th, 2012; accepted: Apr. 6th, 2012

**Abstract:** Based on energy balance equation of slow-cooling pit and heat transfer equations of steel slab and the pit, a mathematical model of slab cooling process in slow-cooling pit was established to give a mathematical description of the whole slow-cooling process. The concept of total radiant exchange area was employed is the radiant heat transfer section of the model, which avoids the repeated computation. The offline simulation of the cooling process and temperature distribution were realized in this paper.

**Keywords:** Slow-Cooling Pit; Cooling Process; Slab; Mathematical Model; Temperature Simulation

## 板坯在缓冷坑中冷却过程的温度模拟

权芳民<sup>1,2</sup>, 孙文强<sup>1\*</sup>, 蔡九菊<sup>1</sup>, 杨倩<sup>1</sup>

<sup>1</sup>东北大学, 热能与环境工程研究所, 沈阳

<sup>2</sup>酒泉钢铁(集团)股份有限公司, 总工程师室, 嘉峪关

Email: \*neu20031542@163.com

收稿日期: 2012年3月13日; 修回日期: 2012年3月26日; 录用日期: 2012年4月6日

**摘要:** 以缓冷坑能量平衡方程和钢坯、坑体的热传导方程为基础, 建立了钢坯在缓冷坑中冷却过程的数学模型, 实现了缓冷坑冷却全过程的数学描述。模型的辐射热交换部分采用了全交换面积的概念, 有效减少了重复计算, 在此基础上实现了缓冷坑冷却过程及其温度的离线模拟。

**关键词:** 缓冷坑; 冷却过程; 板坯; 数学模型; 温度模拟

### 1. 引言

在热轧生产中, 为解决钢坯的缓冷问题, 尽可能提高板坯热装温度, 均匀各板坯入炉温度, 避免入炉温度的较大波动, 通常在轧制生产线上设置缓冷坑, 用来对加热前的板坯进行缓冷和保温<sup>[1-3]</sup>。缓冷坑用来使连铸下线的高温板坯的温度缓慢下降, 并使板坯在一定的时间内保持一定的温度。缓冷坑内部不设烧嘴, 其坑温和板坯冷却速度的调整可根据坑盖开启度的大小进行调整。

缓冷坑的生产工艺流程是: 从连铸送来的高温板坯, 用天车吊入缓冷坑内。在坑内根据不同的钢种、规格、板坯数量和温降速度要求, 通过控制坑体散热速度(如坑盖的开启大小), 来控制板坯温降速度。板坯需要出坑时通过天车将坑内的板坯吊走。

缓冷坑的结构为地上式结构, 其坑墙的四周设有保温及耐火材料, 带保温材料的坑盖置于坑顶, 并可在水平轨道上移动。缓冷坑内砌纤维材料, 坑内可进行双排和单排装钢, 钢坯与缓冷坑底部采用不锈钢垫铁技术, 最大限度降低底部板坯的温度。

本文将建立缓冷坑的动态数学模型, 用作缓冷过

\*通讯作者。

程离线温度控制的基础。

## 2. 缓冷坑内冷却过程的数学模型

与退火炉的工作不同，缓冷坑为间歇式操作，其特征是整批装料和出料，坑温在生产过程中呈周期性的变化。在热坯缓冷时，开始坑围温度和钢坯表面温度随钢坯心部温度的下降而升温，随后缓冷时，坑围温度随钢坯一起缓慢冷却<sup>[4]</sup>。缓冷坑为减少散热损失及坑墙的蓄热，坑围选用轻质耐火纤维作材料。因此，坑内的传热主要是通过坑围的对流换热、辐射换热和坑盖的开启进行的。

为建立缓冷坑内冷却过程的数学模型，需要对坑内的传热过程进行必要的简化。将缓冷坑的坑壁看作是由气体(g)、钢坯(s)和坑围(w)组成的三元体系(如图1所示)，并作如下假定：1) 坑壁表面和钢坯表面均为灰表面，气体为灰气体，以上三部分温度各自均匀；2) 钢坯表面为不可自见面；3) 忽略坑内其他部件的吸热。

在此三元体系中，钢坯温度、气体温度和坑围温度是相互影响的。在某一时刻，只有已知体系中任意两个组成部分的温度才可以求出另一组成部分的温度。在本模型中，计算的目的是为了模拟出钢坯温度。为此，需要已知相关的气体和坑围温度，用他们用来求解钢坯的表面热流，然后进一步求得钢坯的温度分布。钢坯的表面热流由辐射换热热流及对流换热热流共同组成。

### 2.1. 辐射交换面积

本文对辐射换热量的计算采用全交换面积的目的

$$\frac{\overline{gs}}{F_s} = \frac{[1 + \phi_{ws}(1 - \varepsilon_g)(1 - \varepsilon_w)] \varepsilon_g \varepsilon_s F_s}{1 - (1 - \varepsilon_g)(1 - \varepsilon_w) [\phi_{ws}(1 - \varepsilon_g)(1 - \varepsilon_s) + (1 - \phi_{ws})]}, \quad (1)$$

$$\frac{\overline{gw}}{F_s} = \frac{[1 + \phi_{ws}(1 - \varepsilon_g)(1 - \varepsilon_s)] \varepsilon_g \varepsilon_w F_s}{\left\{ 1 - (1 - \varepsilon_g)(1 - \varepsilon_w) [\phi_{ws}(1 - \varepsilon_g)(1 - \varepsilon_s) + (1 - \phi_{ws})] \right\} \phi_{ws}}. \quad (2)$$

设钢坯或坑围为唯一辐射源，通过以上类似的推导，便可得到：

$$\frac{\overline{ws}}{F_s} = \frac{(1 - \varepsilon_g) \varepsilon_w \varepsilon_s F_s}{1 - (1 - \varepsilon_g)(1 - \varepsilon_w) [\phi_{ws}(1 - \varepsilon_g)(1 - \varepsilon_s) + (1 - \phi_{ws})]}. \quad (3)$$

式(1)~(3)中， $\phi_{ws}$ 为坑围对钢坯的角系数； $\varepsilon_g$ ， $\varepsilon_w$ 和 $\varepsilon_s$ 分别为气体、坑围内表面和钢坯表面黑度； $F_s$ 为钢坯表面积， $m^2$ 。

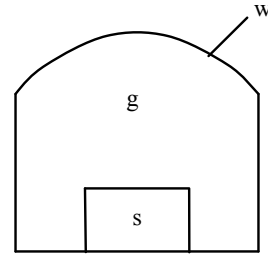


Figure 1. Schematic diagram of ternary system  
图 1. 三元体系简图

在于计算各段的辐射差额热流量，即辐射净换热量。用直接交换面积虽然也可以达到这个目的，但是比较麻烦。因为运用直接交换面积，在这种计算中，一个段的差额热流量不仅是各段黑体辐射力的函数，而且也是各表面段有效辐射函数。为了求解各表面段的有效辐射，需要列出所有无源节点的热量平衡方程，并组成方程组进行求解。而在求解过程中，各表面段的温度并非已知量。所以，求解过程中的温度仅是假定值或中间迭代值，只有达到收敛时，温度才是确定值，这意味着无源节点的平衡方程需要反复求解。为了避免反复的计算过程，我们引入了辐射全交换面积的概念。

本文对辐射换热的计算通过辐射网络法<sup>[5]</sup>，使用直接交换面积或使用全交换面积确定有关热阻。网络法中物体的黑体辐射力为有源节点，表面的有效辐射为无源节点。空间辐射热阻和表面热阻相当于电路中的电阻。参照电路中的克希荷夫定律，列出各无源节点的热流平衡方程，联立方程即可求解辐射换热问题。本研究中，钢坯与气体、气体与坑墙、坑墙与钢坯之间的全辐射交换面积计算公式如下：

## 2.2. 能量平衡方程

### 2.2.1. 坑围吸收的热量

钢坯传给坑内气体和坑围的对流和辐射热量:

$$Q_{sg} = \sigma \overline{sg} (T_s^4 - T_g^4) + \sigma \overline{sw} (T_s^4 - T_w^4) + h_s (T_s - T_g) F_s. \quad (4)$$

式(1)中,  $\sigma$  为黑体辐射常数,  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $h_s$  为钢坯对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $T_s$  和  $T_g$  分别为钢坯和气体的温度,  $\text{K}$ 。

坑内气体把吸收的热量通过对流和辐射传给坑围的热量:

$$Q_{gw} = \sigma \overline{gw} (T_g^4 - T_w^4) + h_w (T_g - T_w) F_w. \quad (5)$$

式(5)中,  $h_w$  为坑围的对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $F_w$  为坑围的换热面积,  $\text{m}^2$ ;  $T_w$  为坑围的温度。

综合式(4)和(5), 坑围吸收的总热量为:

$$Q_{\text{炉围}} = \sigma \overline{gw} (T_g^4 - T_w^4) + \sigma \overline{sw} (T_s^4 - T_w^4) + h_w (T_g - T_w) F_w. \quad (6)$$

### 2.2.2. 钢坯通过坑盖开孔散失的热量

对于缓冷坑上部开孔在空冷状态下进行的板坯冷却, 开孔与周围环境进行辐射和自然对流的热量为<sup>[6]</sup>:

$$Q_{\text{开孔}} = \left[ \sigma_0 \varepsilon_s (T_s^4 - T_a^4) + 2.2 (T_s - T_a)^{5/4} \right] \cdot F_{\text{开孔}}. \quad (7)$$

式(7)中,  $T_a$  为环境温度,  $\text{K}$ ;  $F_{\text{开孔}}$  为开孔面积,  $\text{m}^2$ 。

### 2.2.3. 钢坯放出的热流量

缓冷坑中钢坯的对流和辐射热量的计算式为:

$$Q_s = \sigma \overline{sg} (T_s^4 - T_g^4) + \sigma \overline{sw} (T_s^4 - T_w^4) + h_s (T_s - T_g) F_s + \left[ \sigma_0 \varepsilon_s (T_s^4 - T_a^4) + 2.2 (T_s - T_a)^{5/4} \right] \cdot F_{\text{开孔}}. \quad (8)$$

根据缓冷坑热平衡原理可知, 钢坯损失的总辐射等于坑围的散热损失和通过开孔损失的热量之和, 因此, 钢坯表面的热流量还可按式(9)进行计算:

$$Q_s = Q_{\text{坑围}} + Q_{\text{开孔}}. \quad (9)$$

式(9)中,  $Q_{\text{坑围}}$  为坑围的散热损失, 其值与坑围散失的热量  $Q_{\text{坑围}}$  相等。

坑围散失的热量是通过坑体外部进行散失的, 其热量可以看作是稳态的传热过程, 通常采用式(10)计算<sup>[6]</sup>:

$$Q_{\text{端出}} = \frac{K \Delta t A}{P}. \quad (10)$$

式(10)中,  $K$  为传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $\Delta t$  为气体温度和环境温度的差值,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $P$  为坑体的生产率,  $\text{kg}/\text{s}$ ;  $A$  为坑体的散热面积,  $\text{m}^2$ 。

式(10)中的  $K$  可由式(11)求出:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (11)$$

式(11)中,  $\delta$  为透热深度,  $\text{m}$ ;  $\lambda$  为坑墙的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。由于墙体热阻和气体与坑体对流换热系数都很小, 其换热系数  $\alpha_1$  可按式(12)求得:

$$\alpha_1 = \frac{C \left[ \left( \frac{\overline{t_g} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{\overline{t_b} + 273}{100} \right)^4 \right]}{\overline{t_g} - \overline{t_b}}. \quad (12)$$

式(12)中,  $C$  为气体对坑墙的导来辐射系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $\alpha_2$  为坑壁外表面对环境的对流换热系数,  $18.6 \sim 19.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $\overline{t_b}$  为坑壁的温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

假定气体均匀地充满缓冷坑, 在坑围内壁的差额热流等于零的条件下, 式(12)中的导来辐射系数可按式(13)进行计算<sup>[6]</sup>:

$$C = 10^8 \sigma = \frac{5.67 \varepsilon_1 \varepsilon_2 [1 + \phi(1 - \varepsilon_1)]}{\varepsilon_1 + \phi(1 - \varepsilon_1) [\varepsilon_2 + \varepsilon_1(1 - \varepsilon_2)]}. \quad (13)$$

式(13)中,  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  分别为气体和钢坯的黑度, 对于钢铁为  $0.75 \sim 0.8$ , 气体黑度一般为  $0.2 \sim 0.4$ ;  $\phi$  为钢坯与坑壁面积之比, 角系数。当角系数为  $0.5$  时, 导来辐射系数为  $3.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

坑体的散热损失还可以根据式(14)进行计算:

$$Q_{\text{端出}} = \frac{qA}{P}. \quad (14)$$

式(14)中,  $q$  为坑壁外表面的辐射热流,  $\text{W}/\text{m}^2$ 。

$$q = 5.67 \varepsilon \left[ \left( \frac{\overline{T_b}}{100} \right)^4 - \left( \frac{\overline{T_a}}{100} \right)^4 \right] + \alpha_2 (\overline{T_b} - \overline{T_a}). \quad (15)$$

式(15)中,  $\varepsilon$  为坑壁外表面黑度, 一般取  $0.6$ ;  $\alpha_2$  为坑壁外表面对周围空气的对流传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

$\alpha_2$  可按式(16)进行计算<sup>[6]</sup>:

$$\alpha_2 = B (\overline{T_b} - \overline{T_a})^{1/4}. \quad (16)$$

式(16)中,  $B$  为与散热面积有关的系数: 当热面向上时,  $B = 11.7$ ; 热面向下时,  $B = 6.3$ ; 热面垂直时,  $B = 9.2$ 。

当坑底直接与基础接触时, 通过坑底的散热损失可按式(17)进行计算:

$$Q_{\text{底}} = S\lambda A' \frac{(t_{\text{in}} - t_a)}{DP} \quad (17)$$

式(17)中,  $A'$  为坑底面积,  $\text{m}^2$ ;  $t_{\text{in}}$ ,  $t_a$  分别为坑底内表面和环境温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda$  为坑底的导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ;  $S$  为坑底形状系数: 圆形底  $S = 4$ , 方形底  $S = 4.4$ , 矩形底  $S = 3.73$ ;  $D$  为坑底直径或最小宽度,  $\text{m}$ 。

### 2.3. 钢坯内部的导热微分方程

导热方程的基本形式为:

$$\rho(t_s)c(t_s)\frac{\partial t_s(x,y,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(t_s)\frac{\partial t_s(x,y,\tau)}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda(t_s)\frac{\partial t_s(x,y,\tau)}{\partial y}\right] \quad (18)$$

初始条件为:

$$t_0(x,y,\tau)|_{\tau=0} = t_0(x,y,0) \quad (19)$$

边界条件为(钢坯入坑和出坑时, 认为其表面绝热):

$$-\lambda(t_s)\frac{\partial t_s(x,y,\tau)}{\partial x}\bigg|_{x=0} = q_s(0,y,\tau), \quad (20)$$

$$-\lambda(t_s)\frac{\partial t_s(x,y,\tau)}{\partial x}\bigg|_{x=L} = -q_s(L,y,\tau), \quad (21)$$

$$-\lambda(t_s)\frac{\partial t_s(x,y,\tau)}{\partial y}\bigg|_{y=0} = q_s(x,0,\tau), \quad (22)$$

$$-\lambda(t_s)\frac{\partial t_s(x,y,\tau)}{\partial y}\bigg|_{y=th} = -q_s(x,th,\tau), \quad (23)$$

$$Q_s = \sigma \left[ \overline{sg}(T_s^4 - T_g^4) + \overline{sw}(T_s^4 - T_w^4) \right] \cdot F_s + \sigma_0 \varepsilon_s (T_s^4 - T_a^4) \cdot F_{\text{穿孔}} + h_s (T_s - T_g) \cdot F_s \quad (24)$$

式(18)~(24)中,  $\rho$  为钢坯的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c$  为钢坯的比热,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ;  $\lambda$  为钢坯的导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ;  $x$ ,  $y$ ,  $\tau$  分别为  $x$  方向、 $y$  方向及时间坐标;  $\tau$  为时间,  $\text{s}$ ;  $t_0$  为初始温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.4. 数学模型的求解

在缓冷坑工作的某一阶段内, 以坑内能量平衡方程和钢坯热传导差分方程为基础, 对气体温度、钢坯温度分布和坑围温度分布进行跟踪计算。具体步骤如下(流程框图详见图 2):

- 1) 输入缓冷坑的结构、操作和物性参数及缓冷坑、坑围起始温度, 确定坑内全交换面积和对流换热系数;
- 2) 建立缓冷坑能量平衡方程和钢坯内部的导热方程;
- 3) 计算缓冷坑各时段的气体温度和钢坯物性参数, 并计算钢坯和坑围的表面热流;
- 4) 计算钢坯和坑围的截面温度和平均温度;
- 5) 因缓冷坑内上一个时段的终冷温度是下一个时段的起始温度, 需要返回步骤(3), 求解气体和钢坯的其它各时段温度, 直至整个缓冷过程结束。

式(18)的离散采用节点法和显式差分格式, 求解差分方程可得钢坯温度分布。

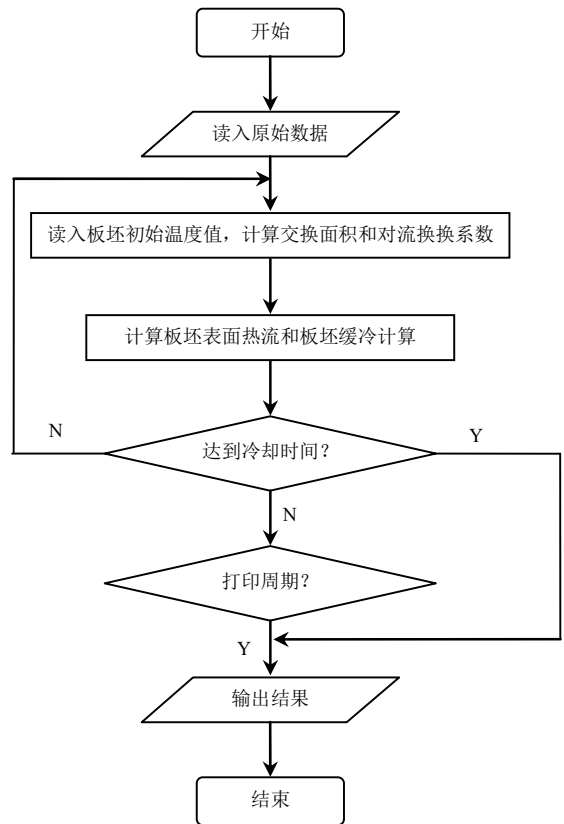


Figure 2. Computation process of slab temperature  
图 2. 板坯温度计算流程

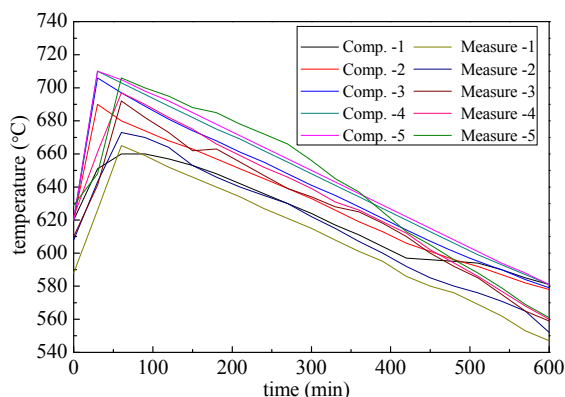


Figure 3. Comparison of calculation and measure values of slab surface temperatures

图 3. 板坯表面温度计算值与实测值的比较

钢坯缓冷过程中, 钢坯温度影响坑内气体和坑围的温度, 同时坑围的散热量大小也影响坑内气体和钢坯的温度, 坑内气体也通过坑盖的散热影响钢坯和坑围温度, 因此, 缓冷坑能量平衡方程、钢坯热传导方程及坑围热传导方程三者是相互耦合的, 只有联立求解才能求得任意时刻的钢坯温度分布。

### 3. 算例与分析

本文以某公司的不锈钢板坯缓冷坑进行模拟, 缓冷坑的内部尺寸为高 2.7 m, 长 7.0 m, 宽 13.5 m, 每一个缓冷坑内放置 2 垛板坯, 板坯最高入坑温度为  $700^{\circ}\text{C}\sim 750^{\circ}\text{C}$ , 最低出坑温度为  $300^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$ , 缓冷时间为 10 小时。

板坯在缓冷过程中, 每垛除上、下两块板坯是三面散热外, 其余板坯可假定为两面散热, 考虑到缓冷过程中热气流上浮和板坯下表面与坑底接触等因素, 模拟中假设所有板坯均可按二维传热进行计算, 据此来计算板坯在缓冷坑中温度变化过程曲线, 并与实测值比较, 详见图 3。

图 3 示出了板坯缓冷过程中断面温度分布随时间

变化的规律, 可以看出, 从连铸机出来的板坯刚进入缓冷坑之后, 其断面温差较大, 在缓冷坑的保温作用下, 其断面温差迅速减小, 并随着缓冷时间的延长, 板坯温度在缓慢降低的过程中其断面温差也减小, 在板坯出坑前其断面温差已经很小, 说明钢坯温度能够实现内外均匀和缓冷的作用。

由于现场测试条件的限制, 本模型只对板坯上表面的 5 点温度进行测量, 图 3 示出了板坯上表面实测 5 点的温度。从图 3 中计算温度与实测温度的比较可以看出, 模型计算温度与实测温度较为接近, 说明模型可用于生产之中。

### 4. 结论

1) 根据缓冷坑的工作特点, 通过缓冷坑能量平衡方程和钢坯热传导方程的求解, 可得到板坯在缓冷坑中的温度随时间的变化规律, 这对板坯在缓冷坑中的温度控制提供了依据。

2) 通过对缓冷坑内钢坯温降过程的数学模拟, 可以获得板坯在坑内不同时刻的钢温及断面温度分布规律, 这对于不同规格、钢种、入坑温度的生产过程控制具有指导意义。

### 参考文献 (References)

- [1] 欧阳德刚, 胡清明, 李平等. 缓冷坑改造方案的研究与实施[J]. 武钢技术, 2000, 38(4): 6-9.
- [2] 王志明, 马驰. 缓冷坑热处理工艺的开发与应用[J]. 宽厚板, 2002, 8(2): 15-18.
- [3] 高仲龙, 蒋扬虎, 高光宁等. 连铸坯在保温坑内的保温过程和效果分析[J]. 工业加热, 1999, 1: 1-3.
- [4] 韩小良. 间歇式热处理炉传热计算与分析[J]. 工业加热, 2001, 28(5): 12-15.
- [5] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第3版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998: 279-287.
- [6] 陆钟武. 火焰炉[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995: 19-43.