

Study on Numerical Simulation of Boron-Containing Slag Sensible Heat Application in Extracting Boron Process

Hongren Zhan^{1,2}, Zhanguo Fan¹, Shujuan Zhou², Sulan Liu¹

1.School of Materials and Metallurgy, Key Laboratory of University of Liaoning Province, Northeastern University, Shenyang 110004, China.

2.School of Mechanical Engineering, Shenyang Institute of Chemical Technology, Shenyang 110142, China.
z_hr555@163.com, fanzg@smm.neu.edu.cn, chipmoon@126.com, liusl@smm.neu.edu.cn

Abstract: With the sensible heat generated during the cooling process of boron-containing slag, slow cooling equipment of boron-containing slag without fuel consumption is designed by numerical simulation. The temperature field of boron-containing slag is relatively uniform and the cooling temperature curve is well consistent with the twin zone slow cooling requirements of boron-containing slag during cooling process. The equipment has several advantages such as energy saving, environment protection and easy operation, which provides an important way to the comprehensive utilization of the boron iron ore resources.

Keywords: boron-containing slag; cooling process; simulation of temperature field; slow cooling equipment

含硼炉渣显热在提硼工艺中应用的数值模拟研究

战洪仁^{1,2}, 樊占国¹, 周淑娟², 刘素兰¹

1.东北大学材料与冶金学院, 沈阳 中国 110004; 2.沈阳化工大学机械工程学院, 沈阳 中国 110142
1. z_hr555@163.com, 2. fanzg@smm.neu.edu.cn, 3. chipmoon@126.com, 4. liusl@smm.neu.edu.cn

摘要: 利用含硼炉渣冷却过程释放的显热, 模拟设计了无燃料消耗的含硼炉渣缓冷设备。冷却过程中含硼炉渣的温度场比较均匀, 冷却温度曲线能很好的符合含硼炉渣两段式缓冷的工艺要求。此设备节约能源、有好环境、操作方便, 为硼铁矿资源的综合利用提供了重要途径。

关键词: 含硼炉渣; 冷却工艺; 温度场数值模拟; 缓冷设备

1 引言

随着经济的持续发展和社会的不断进步, 人类对各种自然资源需求量的不断增加。导致资源迅速减少乃至趋于枯竭, 矿产及一次能源资源的供需矛盾日益突出^[1]。硼铁矿是我国亟待开发的硼矿资源, 硼铁矿经高炉分离后, 可得到含硼生铁和含 B_2O_3 量约在 12~16%^[2] 的含硼炉渣。经实验室研究表明, 这种含硼炉渣在冷却过程中采取两段式冷却工艺^[3], 即在 1500℃~1200℃ 温度范围内的冷却速率大于 10℃/min, 在 1200℃ 以下冷却速率小于 3℃/min, 就可选择性析出作为提硼原料的硼酸镁盐晶体, 从而使含硼炉渣得到合理利用。此研究成果在 13m³ 高炉扩大试验中, 应用传热学“薄材”原理设计的燃煤缓冷炉^[4], 很好的实现了两段式缓

基金资助: “十一五” 国家高技术研究发展计划资助项目 (2006AA06Z368)

冷制度, 获得了高活性物质硼酸镁盐。但直接消耗了一次能源, 造成了环境污染。

高炉渣是具有高显热的二次能源, 其在冷却过程中将放出大量的热量。本文利用这一特点, 基于 FORTRAN 语言, 应用瞬态温度场有限单元法和有限差分的混合解法, 模拟设计了无燃料消耗的含硼炉渣缓冷工业装置, 使熔渣在 1500℃~1200℃ 温度范围内冷却过程中所放出的显热, 合理的利用到了 1200℃ 以下的缓冷过程, 实现了二次能源的合理利用。此模型的建立有助于设计和构造无燃料消耗的含硼炉渣缓冷工业装置, 有效的利用了二次能源, 减少了环境污染。

2 含硼炉渣冷却过程温度场的物理模型

2.1 基本原理

含硼炉渣缓冷过程是一个析晶放出热量的凝固过程，实验室的研究结果表明，若确保遂安石析晶并长大，主要取决于熔渣的温度场。在冷却过程中既要保证两段冷却速率的合理，又要保证任意时刻渣中各点的温度接近均匀。因而，根据传热学不稳态导热原理及工业扩大化试验成果。本文采用无限大平板冷却过程的“薄材”原理^[4-5]，建立其物理模型。其冷却行为取决于无因次数毕渥准则数 Bi 。只要 $Bi < 0.25$ ，就可视为均匀冷却，即所谓的“薄材原理”。

根据“薄材原理”非稳态传热导热微分方程：

$$\rho c V \frac{dt}{d\tau} = -\alpha_{\Sigma} A (t - t_f) \quad (1)$$

其中： α_{Σ} -整个表面上的平均换热系数， $W(m^2 \cdot K^{-4})$ ； t -熔渣温度， $^{\circ}C$ ； t_f -环境温度， $^{\circ}C$ ； ρ -熔渣密度， $kg \cdot m^{-3}$ ； c -熔渣热容， $J/(kg \cdot K)$ ； V -熔渣的体积， m^3 ； τ -冷却时间， s 。

引入过剩温度 $\theta = t - t_f$ ，则初始条件为： $\tau = 0$ 时， $\theta_0 = t_0 - t_f$ ，将式(1)分离变量后积分得(2)式：

$$\tau = -\frac{\rho c V}{\alpha_{\Sigma} A} \ln \frac{\theta}{\theta_0} \quad (2)$$

2.2 熔渣尺寸的确定

计算过程中作了几点假设：

- 1)含硼炉渣由 $1500^{\circ}C$ 冷却至 $1200^{\circ}C$ 过程为液态；
- 2)忽略换热系数 α_{Σ} 不受温度的影响。

根据式(1)、(2)及毕渥数定义式 $Bi = \alpha_{\Sigma} \delta / \lambda$ ，可以计算熔渣的厚度及环境温度与缓冷时间的关系。计算参数如下表 1。

Table 1. The parameters used for calculation
表 1. 计算用熔渣参数列表^[4]

名称	数值
热容/ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	1334.3
密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	2500.0
熔渣的初始温度为/ $^{\circ}C$	1500.0
放热系数/ $W(m^2 \cdot K^{-4})$	75
固体导热系数/ ($W \cdot (m \cdot K)^{-1}$)	21.86
液体导热系数/ ($W \cdot (m \cdot K)^{-1}$)	0.3
环境温度/ $^{\circ}C$	10.0

由图 1 可以看出，环境温度在 $780^{\circ}C$ 以上，熔渣厚度为 $2\delta < 150mm$ 时，符合薄板原理 $Bi < 0.25$ 的要求。图 2 可以看出随渣层厚度的变薄，允许的环境温度相应升高，即不同的厚度下应有一个较合适的环境

温度才能使渣层在 $1500^{\circ}C \sim 1200^{\circ}C$ 区间实现快冷。

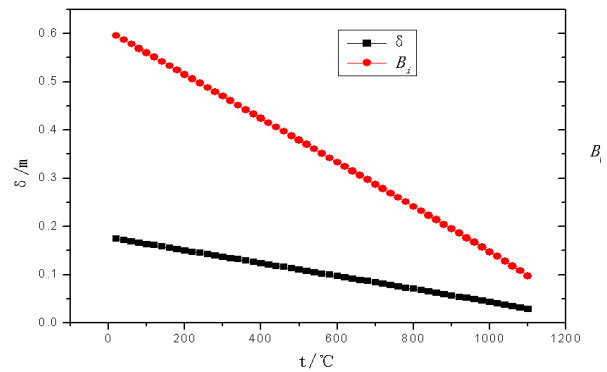


Figure 1. The relationship diagram of environmental temperature and slag layer thickness to Bi

图 1. 环境温度与渣层厚度及相应的 Bi 的关系图

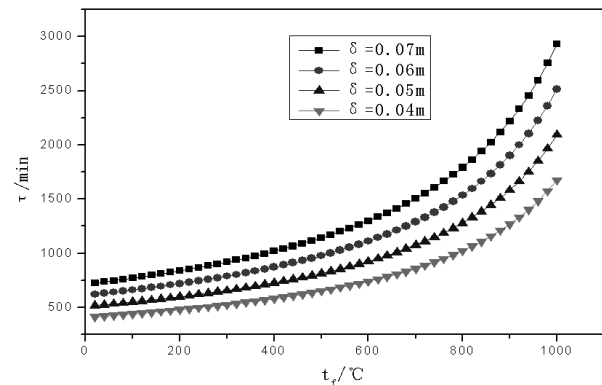


Figure 2. The relationship diagram between environmental temperature and cooling time

图 2. 环境温度与冷却时间的关系

按 $13M^3$ 高炉每炉处理 $500kg$ 渣量的计算，则其体积 $V = 500/2500 = 0.2m^3$ ，取渣层厚度 $2\delta = 100mm$ ，渣形长为 $2000mm$ ，宽为 $1000mm$ ，即渣形为 $2000 \times 1000 \times 100mm$ 的矩形薄板。

3 缓冷炉主要结构的设计

3.1 炉膛尺寸的初步确定^[6]

由于熔渣的冷却条件，本设计依据台车式加热炉的设计方案：

炉长 $L = \text{渣槽长} + (150-300) \times 2mm$ ；

渣槽长 $= 2000 + 40 \times 2 = 2080mm$

则炉长 $L = 2380mm$ ，取整 $2500mm$ ；

炉宽 $B = \text{渣槽宽} + 150 \times 2mm$

$= 1000 + 80 + 300 = 1380mm$ ，取整为 $1400mm$ ；

炉高 预选台车高度为 600-800 mm，考虑便于维修，则炉高 H=1700 mm；

则炉子尺寸为 2500×1400×1700 mm。

3.2 炉墙确定

3.2.1 保温材料的确定

根据含硼炉渣两段式冷却工艺的要求，为了更好的利用熔渣的显热，在炉墙设计中采用了蓄热量少，绝热性能好的高铝纤维毡、普通硅酸铝纤维毡和岩棉板，然后进行浇筑。根据文献[5]，炉衬组成为高温纤维毡 (50 mm) + 硅酸铝纤维毡 (S_{min} -100 mm) + 矿渣棉或玻璃棉 (50 mm)。

3.2.2 炉墙厚度的确定

根据冷却工艺要求，熔渣放出的总热量应大于炉膛的各种热损失以及炉墙散热损失之和，经过迭加计算得到炉墙的厚度。计算公式如下：

放出的总热量：根据“薄材”原理计算公式如下：

$$Q_{\lambda} = (t_0 - t_{\infty}) \rho c V \left(1 - \exp \frac{\alpha_{\Sigma} A}{\rho c V} \tau \right) \quad (3)$$

其中： t_0 -熔渣初始温度，这里取 1500℃；

t_{∞} -环境温度，根据图 2 及熔渣厚度，这里取 700~900℃；

τ -时间。按冷却工艺计算得 $\tau=120\text{min}$ 。

炉膛的各种热损失：热支出项 $Q_{\text{出}}$ 根据工业炉设计手册^[6]得：

$$Q_{\text{出}} = Q_{\text{导热}} + Q_{\text{蓄热}} + Q_{\text{辐}} + Q_{\text{吸}} + Q_{\text{槽}} + Q_{\text{其它}} \quad (4)$$

其中： $Q_{\text{导热}}$ -炉体导热损失 (kJ/h)；

按照稳定态炉墙单位面积散热损失公式，其计算公式如下：

$$q = \frac{t_1 - t_0}{\frac{1}{a_n} + \sum \frac{S_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_w}} \quad (W/m^2) \quad (4)$$

式中： t_1 --炉膛温度 (°C)，这里为常数； t_0 --周围大气温度 (°C)，取年平均温度 15 (°C)； a_n --炉墙内表面传热系数 [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]； $t_1 > 450^\circ C$ ， $1/a_n$ 数值很小可忽略不计； a_w --炉墙外表面换热系数，查文献^[6]，取 $5 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ； S_i --炉墙各层材料的厚度 [m]； λ_i --炉墙各层材料的热导率 [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]；

$Q_{\text{蓄热}}$ -蓄热损失 (kJ/h)；

$Q_{\text{辐}}$ -炉门开启辐射热损失 (kJ/h)；

$Q_{\text{吸}}$ -炉门开启溢气或吸气热损失 (kJ/h)；

$Q_{\text{槽}}$ -渣槽热损失 (kJ/h)；(铸钢渣槽^[4])；

$Q_{\text{其它}}$ -其它热损失 (kJ/h)，包括密封不严、散热损失等，这里按经验取， $Q_{\text{其它}} = 0.03 Q_{\lambda}$ (kJ/h)。

得出炉墙厚度为：

内层高纯高铝耐火纤维毡厚度： $S_1=50\text{mm}$ ；

中层普通硅酸铝耐火纤维毡厚度： $S_2=150\text{mm}$ ；

外层岩棉板厚度： $S_3=50\text{mm}$ ；

且经计算： $Q_{\lambda} - Q_{\text{出}} = 10^4 \text{ kJ} > 0$ ，由此可以看出利用熔渣冷却过程所放出的热量，可以实现熔渣冷却工艺的实现。缓冷炉截面如图 3 所示。

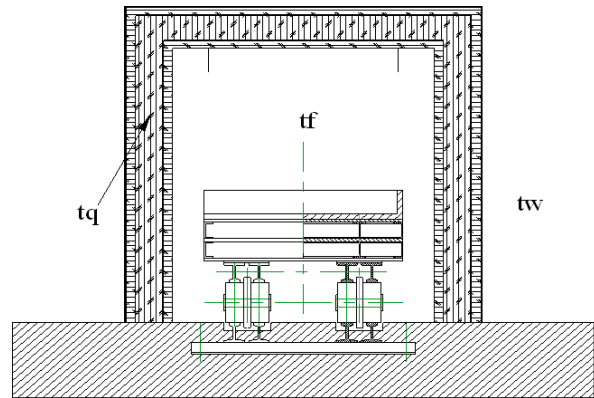


Figure 3 The structure schematic diagram of slow cooling furnace
图 3 缓冷炉结构示意图

4 含硼炉渣凝固过程温度场的数学模型

4.1 基本假设

以炉渣、炉气、炉墙为计算系统，炉子没有外加热源，炉内气体是透热介质空气，不参与热辐射，所以热量传递主要有：炉渣与炉墙的辐射换热，炉渣与炉内空气的对流换热，炉内空气与炉墙的对流换热，炉墙的导热，炉外空气与炉墙的对流换热。因为炉内气体的对流换热为自然对流，值比较小，为了简化，忽略炉内空气与炉墙的对流换热。此计算系统为非稳态具有内热源的热传导问题，在精度允许的情况下，建立数学模型时，作了如下的简化：

1. 所用材料均是各向同性，炉渣和渣槽的密度不随温度变化；
2. 热渣瞬时充满渣槽，故炉渣的初始温度为炉渣出炉后的实际温度；渣槽的初始温度为炉内预热温度 (700~900℃)，炉渣和渣槽的初始温度均匀；
3. 不考虑液相和固相的流动，即炉渣内部没有对流换热，只考虑热传导；

4. 炉渣和渣槽间无间隙;
5. 渣槽的外界与环境进行对流和辐射换热;
6. 渣槽在长度方向可以认为无热量传递;
7. 经计算利用 500-1000 kg 渣量自身的热量, 可将缓冷炉温烘热到 700-1000°C;

4.2 温度场的数学模型

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_v \quad (6)$$

其中: k - 导热系数 ($W / (m^2 \cdot ^\circ C)$); q_v - 内热源项。

4.3 求解条件

熔渣的单值条件:

考虑熔渣的冷却过程是在高温下进行的, 需考虑辐射和对流, 则单值条件为:

$$-k \frac{\partial t}{\partial n} = (h + h_r)(t - t_q)$$

$$-k \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{x=0} = 0$$

$$t \Big|_{\tau=0} = 1500$$

炉气的单值条件:

$$-k_f \frac{\partial t_f}{\partial n} = h(t - t_f)$$

$$-k \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{x=0} = 0$$

$$t_f \Big|_{\tau=0} = t_{f0} \quad (\text{这里分别取 } 700^\circ\text{C}、800^\circ\text{C}、900^\circ\text{C})$$

炉墙单值条件:

$$-k_q \frac{\partial t_q}{\partial n} = h_r(t - t_q) + h_w(t_q - t_w)$$

$$-k \frac{\partial t_q}{\partial n} \Big|_{x=0} = 0$$

$$t_q \Big|_{\tau=0} = t_{q0}$$

其中 t - 炉渣温度; t_f - 炉气温度; t_q - 炉墙温度; t_w - 外界环境温度; h - 炉内对流换热系数; h_r - 炉内辐射换热系数; h_w - 炉外对流换热系数; k - 熔渣导热系数; k_f - 炉气导热系数; k_q - 炉墙的导热系数。

4.4 凝固潜热与热物性的处理

熔渣在凝固过程中会释放出结晶潜热, 这种潜热反过来又会对熔渣凝固时的温度场产生影响, 因此必

须加以综合考虑。本文采用迭代收敛性较好的等效比热法^[7], 在应用程序中采用两次迭代之间用矩阵消元法直接求解法, 再用低松弛因子来确定下次迭代初值。计算证明其能显著改进收敛性能。另外, 通过导热系数的测试, 冷却过程中炉渣的各物性均随温度变化, 因而通过曲线拟合法得到导热系数与温度的关系, 获得了不同温度下的导热系数。

4.5 温度场有限元模型

根据上述假设, 从导热微分方程出发。计算中采用在空间域内用有限元网格划分, 在时间域上用有限差分网格划分的混合解法^[8], 推导出此温度场的有限单元法计算公式, 最后整理得到有限单元法计算瞬态温度场的基本方程:

$$\left([K] + \frac{[N]}{\Delta t} \right) \{T\}_t = \{P\}_t + \frac{[N]}{\Delta t} \{T\}_{t-\Delta t} \quad (4)$$

式中: $[K]$ 称为温度刚度矩阵; $[N]$ 称为非稳态变温矩阵; $\{T\}$ 是未知温度值的列向量; $\{P\}$ 称为等式右端项组成的列向量; Δt 为适当取用的时间步长; $\{T\}_{t-\Delta t}$ 为初始温度场或前一时刻的温度场。

5 模拟结果及分析

5.1 温度曲线

以硼铁矿 13M³ 高炉生产的含硼炉渣为例, 对熔渣缓冷过程进行了数值模拟, 模拟结果如图 4 所示。其中曲线 1、2、3 分别为渣上、中、下点的温度随时间变化曲线; 曲线 4 是渣槽的温度变化曲线; 曲线 5 是炉内气体温度曲线; 曲线 6 是炉墙内壁的温度曲线。其中, 图 (a)、(b)、(c) 分别表示炉内初始温度为 700°C、800°C、900°C 时的缓冷温度曲线。

为了考察 1500°C-1200°C 和 1200°C-900°C 两个温度段的冷却速率, 根据图 4 温度-时间曲线回归方程的形式如下, 其中 a、b、c、d 的值见表 2:

$$t = \begin{cases} a + b\tau & 1500 \geq t > 1200 \\ c + d\tau & 1200 \geq t \geq 900 \end{cases} \quad (5)$$

其中 b、d 为冷却速率, 由图 4 和表 2 可以看出, 炉渣中 1、2、3 点位置均能满足两段式冷却制度的要求, 快冷段冷却速率均大于 20°C/min, 缓冷段均小于 1°C/min。炉内初始温度为 900°C 时, 炉内环境温度较高, 回归方程的系数 b 为正值, 说明炉渣温度是上升

的。这使得炉渣内温度趋于均匀一致，冷却效果好。

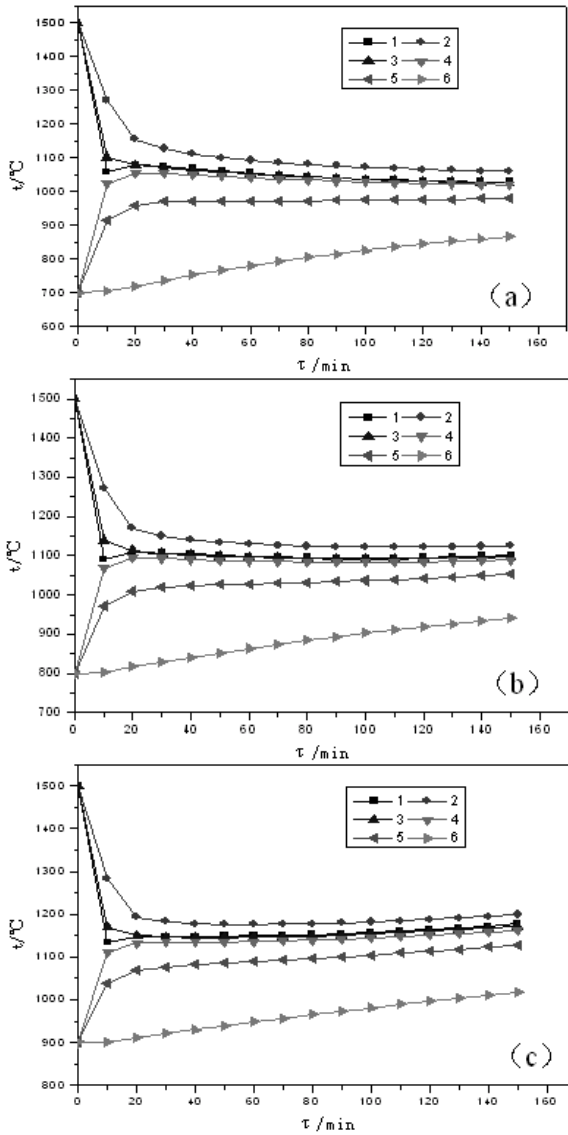


Figure 4. The change curve of temperature with time

图 4. 温度随时间变化曲线图

Table 2: The parameters a、b、c、d of regression equations of different points

表 2: 不同点回归方程参数 a、b、c、d 值列表

环境温度	曲线	快冷段		缓冷段	
		a	b	c	b
700	1	1500	-44.20	1081.76	-0.40
	2	1500	-22.90	1139.36	-0.61
	3	1500	-39.80	1076.83	-0.37

800	1	1500	-41.01	1107.50	-0.11
	2	1500	-22.72	1158.60	-0.34
	3	1500	-36.08	1109.81	-0.16
900	1	1500	-36.57	1136.51	0.24
	2	1500	-21.64	1168.97	0.16
	3	1500	-33.08	1134.35	0.22

4.2 熔渣截面温度分布

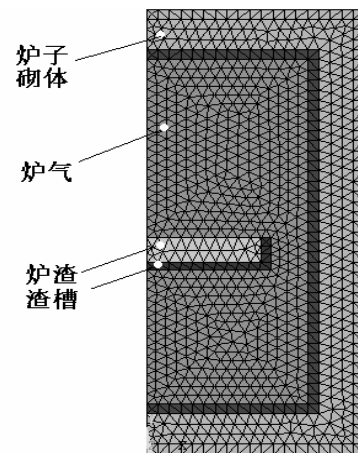


Figure 5. The grid map of simulation model

图 5. 模拟模型网格图

图 5 为模型的网格图。图 6 为炉温初始温度分别为 700、800、900℃ 时，冷却时间为 $\tau=10\text{min}, 50\text{min}, 100\text{min}$ 的截面温度等值线图。由此也可以看出随冷却时间的增加，熔渣的温度场趋于均匀。

6 结论

(1) 基于 FORTRAN 语言，利用熔渣快冷阶段释放出的热量作为缓冷阶段的热源，设计了无一次能源消耗的含硼炉渣缓冷炉的有限元分析模型。

(2) 建立的数学模型模拟出的冷却温度曲线能很好符合含硼炉渣两段式缓冷的工艺要求，且各点的温度比较均匀符合工艺的需要。

(3) 设计的无燃料消耗的含硼炉渣缓冷设备，为硼铁矿资源的综合利用提供了有效途径。此设备结构简单，操作方便，节约能源，有好环境，可实现二次能源的合理利用。

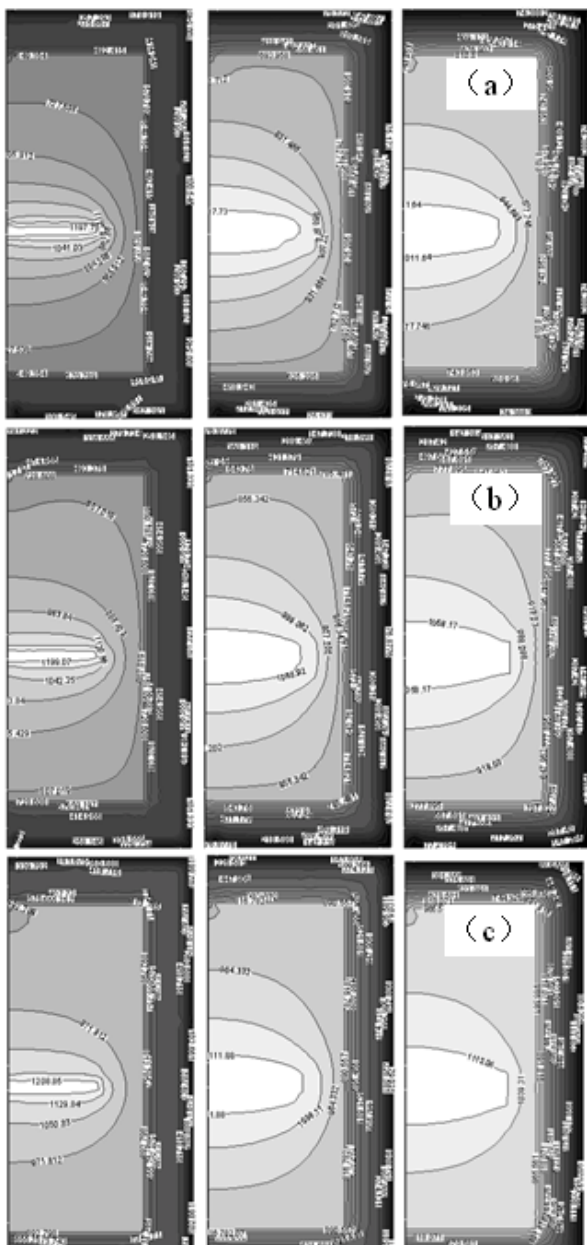


Figure 6. The isotherms under different initial temperatures and different cooling times

图 6. 不同初始温度下的不同冷却时间的温度等值线图

References (参考文献)

- [1] Qian Yi,Tang Xiao-yan, Environment protection and sustainable development[M].Beijing: Higher Education Press,2000.1-5
钱易, 唐孝炎, 环境保护与可持续发展[M].北京:高等教育出版社,2000, 1-5
- [2] PEIXIN ZHANG, ZHITONG SUI. Effect of Factors on the Extraction of Boron from Slags[J].Metallurgical and Materials Transactions,1995.26 (2),345 -351
- [3] Zhan Hongren, Liu Sulan, Fan Zhanguo.Research on the Relation of Cooling Rate and Leaching Ratio of Boron-rich Slags[J].Journal of Northeastern University,2007,28(11),1603-1607.
战洪仁, 刘素兰, 樊占国.含硼炉渣冷却速率与硼提取率关系的研究[J].东北大学学报(自然科学版).2007,28 (11), 1603-1607.
- [4] ZHANG Tingan,WANG Yanling, YANG Huan, CHEN Zhongxin, ZHANG Xianpeng,HEJicheng,SHAO Jianhui,CHUI Yaqi. Study of Industrial Amplification of Cooling Process of Boronic Slag-Mathematical Model. Journal of Northeastern University.1998,19s , 256-261.
张延安, 王延玲, 杨欢, 陈重新, 张显鹏, 赫冀成.富硼渣缓冷工艺放大过程的研究[J].东北大学学报,1998,19s, 256-261.
- [5] Holman J P. Heat Transfer[M]. Washington: McGraw-Hill Education(Asia)Co,2005,139-145.
- [6] Wang Bing-quan. Industrial Furnace Design Manual (Second Edition) [M]. Beijing: CHINA MACHINE PRESS.1996,34-35.
王秉铨.工业炉设计手册(第二版)[M].北京:机械工业出版社, 1996,34-35.
- [7] Xue Zhao-kang. Industrial furnace design basis[M].SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS.2004,92-98
徐兆康.工业炉设计基础[M].上海交通大学出版社, 2004,92-98.
- [8] Kong Xiang-qian. The application of finite element methods in heat transfer[M]. Beijing: Science Press,1998,132-205.
孔祥谦.有限单元法在传热学中的应用[M].北京:科学出版社,1998,132-205.