

林蔚,冯妍卉.耦合煤焦收缩的焦炉炭化室传热过程数值分析[J].煤炭学报,2014,39(S2):513-518. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.0655

Lin Wei ,Feng Yanhui. Numerical analysis on heat transfer processes with consideration of the coal/coke bed shrinkage in the coking chamber[J]. Journal of China Coal Society 2014 ,39( S2) : 513-518. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.0655

## 耦合煤焦收缩的焦炉炭化室传热过程数值分析

林蔚<sup>1</sup>,冯妍卉<sup>1,2</sup>

(1. 北京科技大学机械工程学院,北京 100083; 2. 北京科技大学冶金工业节能减排北京市重点实验室,北京 100083)

**摘要:** 为进一步提高焦炉的生产操作,需要更精准的理论模型与数据,针对焦炉炭化室内煤/焦床层的焦化传热过程,考虑煤结焦过程中的收缩情况,建立相应的耦合数理模型,并开展了数值求解。考虑焦饼收缩的模拟提高了计算精度,所得煤/焦饼温度变化、结焦时间 17.97 h,收缩量 3.15 mm 与实测值吻合较好。进一步分析了操作参数和设计结构参数的影响。结果表明,随着煤水分含量降低、燃烧室温度升高和炭化室宽度减小,结焦时间缩短,有利于单炭化室生产效率的提高。随着煤水分含量的降低、燃烧室温度降低和炭化室宽度增加,焦饼收缩量增加,有利于推焦作业。焦饼的收缩量更大程度受到煤焦收缩系数的第 2 收缩峰的影响。

**关键词:** 焦炉; 炭化室; 传热; 收缩

中图分类号: TQ522.1 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2014)S2-0513-06

### Numerical analysis on heat transfer processes with consideration of the coal/coke bed shrinkage in the coking chamber

LIN Wei<sup>1</sup>, FENG Yanhui<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing Key Laboratory of Energy Saving and Emission Reduction for Metallurgical Industry, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to improve the operation of coke ovens, the predictions with higher accuracy are required. Accordingly, a mathematical model was developed in this paper with consideration of the shrinkage of coal/coke bed. The numerical results of the temperature evolution and the shrinkage of the bed are in accordance with the experimental data. The coking time is 17.97 h and the lateral shrinkage is 3.15 mm. Compared with the previous research results, the accuracy of modeling was improved. The effects of moisture, the combustion chamber temperature and the coking chamber width on the coking time and the shrinkage of coal/coke were analyzed. The results show that: the reduction of moisture, the increase of the combustion chamber temperature and the decrease of the coking chamber width will lead to a decrease in the coking time. The reduction of moisture, the decrease of the combustion chamber temperature and the increase of the coking chamber width will lead to an increase in the shrinkage of coal/coke bed. Compared with the first peak, the second peak of temperature-dependent contraction coefficient of char plays a more important role in the coal bed shrinkage.

**Key words:** coke oven; coking chamber; heat transfer; shrinkage

焦炭主要用于冶金、化工等行业作为动力和原料<sup>[1]</sup>。焦煤在焦炉炭化室结焦的过程中会产生膨胀

和收缩,对焦炉的寿命影响很大。

由于煤成分的多样性和复杂性,关于煤热解膨胀

收稿日期: 2014-05-21 责任编辑: 张晓宁

作者简介: 林蔚(1985—),男,山西朔州人,博士研究生。Tel: 010-62333874 E-mail: linwei-ham@sohu.com。通讯作者: 冯妍卉(1974—),女,四川蓬溪人,教授,博士。Tel: 010-62334971 E-mail: yhfeng@me.ustb.edu.cn

与收缩规律的研究主要集中于实验研究。顾金凤<sup>[2]</sup>用型块收缩仪研究了由鹤壁煤制取的冷压型煤在炭化过程中的膨胀与收缩特性。付志新等<sup>[3]</sup>建立了图像在线测量法研究煤热解过程中的膨胀与收缩特性。日本 S. Nomura 等<sup>[4]</sup>利用 600 mm×600 mm×400 mm 的小型移动壁实验焦炉研究了焦化压力、水平收缩、垂直收缩之间的关系。付志新等<sup>[5]</sup>利用装有移动测量标尺的筒状加热炉(φ150 mm×300 mm)研究了梯度温度分布下半焦/焦炭收缩规律。日本主代晃一等<sup>[6]</sup>研究了炭化室内焦饼收缩的计算方法。

炭化室内热过程的研究历史可以追溯到 20 世纪 60 年代,日本田代清等<sup>[7]</sup>率先模拟了常物性参数条件下炭化室内的传热过程。日本松原健次等<sup>[8]</sup>耦合燃烧室,研究了炭化室内的热过程。英国 David Merrick 等<sup>[9-13]</sup>建立了一系列煤热解过程数学模型。近年来,姚昭章<sup>[11]</sup>、司俊龙<sup>[14]</sup>、金珂<sup>[15-16]</sup>、张安强<sup>[17-18]</sup>等也分别对炭化室二维、三维温度场进行了深入的研究工作。上述研究者无一例外地忽略了焦饼在炭化室内的收缩情况,即假定计算区域不发生变化。大型化是现代蓄热室焦炉发展的方向之一,炭化室宽度从 400 450 mm 向 500 600 mm 发展<sup>[19]</sup>。炭化室宽度增加造成了焦饼收缩的变化,势必给热过程模拟和优化造成更大的影响。迄今为止,关于焦饼收缩与炭化室热过程耦合的模拟鲜有报道。

因此,本文拟建立耦合焦饼收缩过程的焦炉炭化室内的热过程数学模型,数值模拟炭化室的温升规律与焦饼的收缩量,与实验结果进行对比验证,并进一步分析装炉煤水分含量、燃烧室温度、炭化室宽度、煤种等的影响。以期对炼焦生产工业优化、焦炉设计革新及延长焦炉寿命提供理论基础和积极的指导作用。

## 1 炭化室物理模型

以国内有代表性的顶装蓄热室焦炉为研究对象,炭化室平均宽 450 mm,墙体宽 100 mm。由于炭化室结构具有对称性,以炭化室中心面为对称面,选取系统的 1/2 作为计算区域,如图 1 所示(炭化室高宽比较大,图 1 非等比例绘制)。

## 2 煤焦化收缩过程的数学模型

### 2.1 假设条件

在炭化室煤焦化传热过程中,参考前人的假设和本文的计算条件,突出传热和收缩的本质过程,假设如下:① 将挥发分析出、流动、二次分解等过程中化学反应热,气固换热等热效应以等效比热形式考虑;② 为炭化室供热的燃烧室内温度较为稳定,因此燃

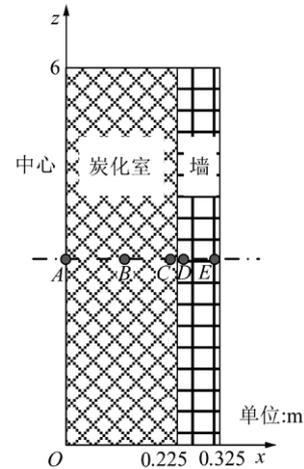


图 1 焦炉炭化室结构

Fig. 1 Physical model of coking chamber

烧室-炭化室的墙面(图 1 中的墙面 E)以恒壁温处理。

### 2.2 控制方程组

计算模型中包含了炭化室墙和炭化室内煤料两部分传热。

炭化室炉墙导热方程为

$$\rho_w C_w \left( \frac{\partial T_w}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) \quad (1)$$

式中  $\rho_w$  为硅砖密度, kg/m<sup>3</sup>;  $C_w$  为硅砖比热容, J/(kg·K);  $\lambda_w$  为硅砖导热系数, W/(m·K);  $T_w$  为炉墙温度, K;  $t$  为时间, s。

炭化室煤料导热方程为

$$\rho_c C_c \left( \frac{\partial T_c}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial x} \right) + S \quad (2)$$

式中  $\rho_c$  为煤料密度, kg/m<sup>3</sup>;  $C_c$  为煤料比热容, J/(kg·K);  $\lambda_c$  为煤料导热系数, W/(m·K);  $S$  为化学反应热等内热源, W/m<sup>3</sup>;  $T_c$  为煤料温度, K。

煤和硅砖的热物性根据文献[14]获得。对水分蒸发潜热和化学反应热,采用等效比热容法来处理。相关模型参考前期工作<sup>[15-16]</sup>。

### 2.3 煤料收缩量的计算

材料的体积或长度随温度的升高而缩小的现象称为热收缩。热收缩系数是材料的物理性质之一,是衡量材料的热稳定的一个重要指标。热收缩系数<sup>[6]</sup>定义为

$$\alpha(T) = \frac{1}{l_0} \frac{dl}{dT} \quad (3)$$

式中  $l_0$  为材料初始温度下长度, m;  $l$  为长度。

炭化室内煤料焦化的过程中会形成焦炭层、塑性层和煤层。焦炭层结焦收缩与塑性层中热解气体膨胀的相互作用导致煤料产生膨胀和收缩。焦饼的收

缩不仅依赖于煤的收缩,而且与煤种热塑相之间的扩散有关,煤焦的收缩机理与焦饼的水平收缩量的关系较为复杂,多数的研究工作通过实验来研究温度等因素对最终水平收缩量的影响<sup>[20]</sup>。

煤焦收缩系数随温度的变化如图 2 所示,在 550 和 750 °C 左右,煤焦收缩系数  $\alpha$  存在较大的收缩峰值,分别称为第 1 收缩峰和第 2 收缩峰<sup>[1]</sup>。一般而言,第 1 收缩峰随煤挥发分的增加而增大。

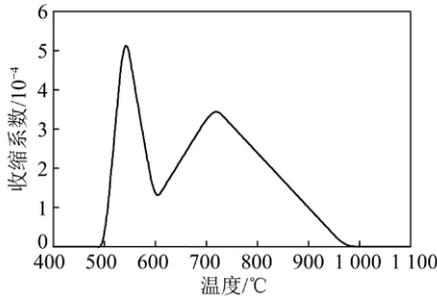


图 2 收缩系数随温度的变化

Fig. 2 Change of the contraction coefficient of char with temperature dependence

结合热过程数值计算的网格划分,将煤料划分为  $N$  个区间,每个区间的收缩量为

$$W_i(T_i) = \Delta x \int_{T_{wi}}^{T_i} a(T) dt \quad (4)$$

式中,  $W_i$  为  $i$  区间的收缩量,  $m$ ;  $\Delta x$  为区间初始宽度,  $m$ ;  $T_i$  为  $i$  区间当前温度,  $K$ ;  $T_{wi}$  为  $i$  区间开始收缩温度,  $K$ 。

煤/焦的网格距离为

$$\Delta x(T_i) = \Delta x - W_i(T_i) \quad (5)$$

$N$  个区间总的收缩量为

$$W = \sum_{i=1}^n W_i(T_i) \quad (6)$$

式中,  $W$  为  $N$  个区间总的收缩量,  $m$ 。

焦饼总收缩量包括焦饼中心收缩量和焦饼炉墙侧的收缩量(即外收缩),如图 3 所示。同一种装炉煤的情况下,焦饼收缩越大,推焦越容易<sup>[21]</sup>。焦饼收缩量可以通过测量焦饼与炉墙的间隙获得<sup>[4,6]</sup>。焦饼的中心收缩量、焦饼炉墙侧的外收缩是以焦饼收缩中心区分。焦饼收缩中心发生位置受到焦饼裂纹的影响较大。由于偶发因素影响较大,因此焦饼中心收缩位置很不稳定。本文将距炭化室中心半炉宽的 1/5 处确定为焦饼收缩中心<sup>[6]</sup>。即定义收缩分配系数  $\gamma=0.2$ ,同时结合实验数据<sup>[6]</sup>提出了收缩分配系数  $\gamma$  与炉宽  $B$  的修正关系式  $\gamma_1/\gamma_2=B_2/B_1$ 。本文以炭化室的 1/2 为研究对象,因此总收缩为图 3 中外收缩量加 1/2 中心收缩量。

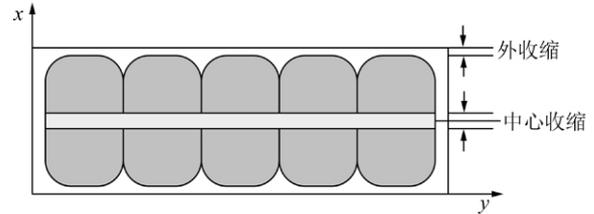


图 3 炭化室焦饼收缩示意

Fig. 3 Schematic diagram of coal/coke bed shrinkage in the coking chamber

### 2.4 初始条件和边界条件

(1) 初始条件。

炭化室内煤料初始温度  $T_c = 20$  °C,炭化室墙面初始温度  $T_{wo} = 1\ 250$  °C。

(2) 边界条件。

燃烧室墙面:

$$T_x = T_{fuel}$$

式中,下标  $x$  表示位置;  $fuel$  表示燃烧室墙面处。

炭化室煤料中心处:

$$\frac{\partial T_c}{\partial x} = 0$$

煤焦层与炭化室墙的接触面:

焦饼收缩前

$$q_{wc} = -q_{cw} = \lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial x} = \lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial x}$$

式中  $q$  为热量,  $W/m^2$ ;  $\lambda$  为热导率,  $W/(m \cdot K)$ ; 下标  $w, c$  分别代表墙和煤。

焦饼收缩后

$$q_{wc} = -q_{cw} = \sigma_0 \varepsilon (T_w^4 - T_c^4) + h(T_w - T_c)$$

式中  $\varepsilon$  为黑度,  $\varepsilon = 1/\varepsilon_w + 1/\varepsilon_c - 1$ ;  $\sigma_0$  为玻尔兹曼常数;  $h$  为对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ 。

在实际的生产过程中,由于焦炉燃烧室燃料燃烧温度较为稳定。因此可将燃烧室墙面做恒壁温处理。煤焦层与炭化室墙的接触面(内边界),已有研究者按导热<sup>[15-16]</sup>、辐射换热<sup>[14]</sup>、或对流传热<sup>[8]</sup>处理。其中黑度  $\varepsilon$ 、对流换热系数  $h$  根据文献[8,14]获取。根据焦饼收缩情况与已有的研究成果,分为前后 2 个阶段定义此交界面条件。

### 3 模型的数值求解

将计算区域进行网格划分,离散控制方程组,采用三对角矩阵(TDMA)进行迭代求解。程序框图如图 4 所示。

### 4 结果分析与讨论

#### 4.1 耦合模型

焦炉生产过程中将结焦终了时焦饼中心温度作

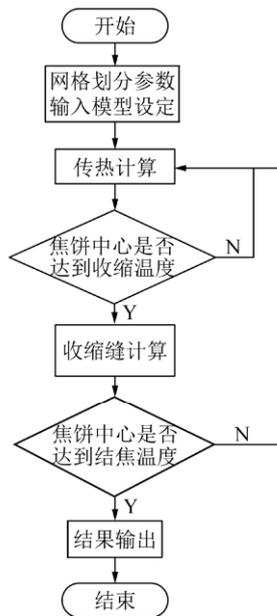


图4 程序框图

Fig. 4 Program flow chart

为整个炭化室焦炭成熟的标志,称为结焦温度,通常为 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 左右。根据实际生产过程,模拟基本工况为:入炉煤温度 $20\ ^\circ\text{C}$ ,入炉煤水分 $10\%$ ,入炉煤堆密度 $740\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,入炉煤挥发分 $28.5\%$ 。设立了5个温度监测点,位置分布如图1中标记点所示,其中A为焦饼中心,B为 $1/4$ 焦饼处,C为焦饼表面,D为炭化室墙面,E为燃烧室墙面。

炭化室内煤焦的模拟温度随时间的变化如图5所示,中心温度在 $17.97\ \text{h}$ 达到 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 。相比较忽略焦饼收缩的结焦时间( $18.13\ \text{h}$ ),耦合了焦饼收缩过程模拟所需时间与实际 $18\ \text{h}$ 更为接近。炭化室中心温度的模拟值与实测数据吻合较好,计算获得结焦时刻焦饼外收缩 $3.15\ \text{mm}$ 与实测值 $3.2\ \text{mm}$ 相比,误差小于 $5\%$ 。表明本文所建立的耦合模型能够真实地反映炭化室内的温升规律和收缩情况。

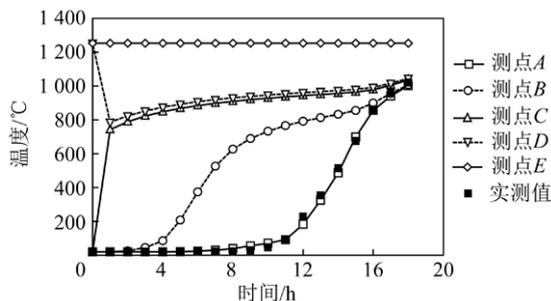


图5 炭化室内温度随时间的变化

Fig. 5 Change curves of temperature with time in the coking chamber

## 4.2 影响因素

焦炉生产和设计中,结焦时间对整个生产周期影

响很大,而结焦时间受到多种因素的影响,本节对入炉煤水分、燃烧室温度、炭化室宽度和不同煤种分别进行分析考察,得到焦饼中心温度、结焦时间和焦饼结焦收缩量随影响因素的变化规律。

### 4.2.1 入炉煤水分含量的影响

常见炼焦煤水分含量在 $8\% \sim 12\%$ ,入炉煤水分含量分别为 $8\%$ 、 $10\%$ 和 $12\%$ 三种工况的计算结果如图6和表1所示,水分含量的变化对结焦过程和收缩情况的影响较小。随着水分含量的增高,用于蒸发水分的热量增加,因此焦饼温升推迟,结焦时间相应的延长。水分含量对焦饼收缩的影响见表1,随着水分含量的增高,收缩量略有减小。通过调节水分来调节焦饼收缩量,收效较低。在低水分时,即收缩量大的时候,忽略收缩的获得结焦时间差别较大。

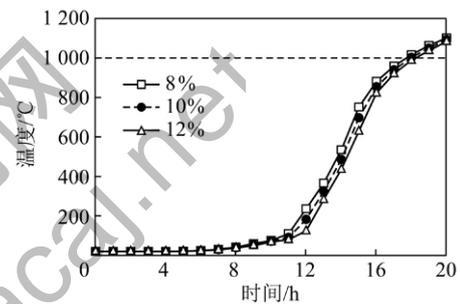


图6 入炉煤水分对焦饼中心温度的影响

Fig. 6 Effects of initial moisture content on the central temperature of coal/coke bed

表1 入炉煤水分对结焦时间和焦饼收缩的影响

Table 1 Effects of initial moisture content on the coking time and shrinkage of coal/coke bed

参 数	水分含量/%		
	8	10	12
耦合收缩结焦时间/h	17.68	17.97	18.23
忽略收缩结焦时间/h	17.87	18.13	18.38
外收缩量/mm	3.18	3.15	3.13
总收缩量/mm	7.44	7.40	7.36

### 4.2.2 燃烧室温度的影响

通过调节煤气、空气配比能够调节燃烧室温度,进而改变结焦速度。燃烧室壁面温度分别为 $1\ 200$ 、 $1\ 250$ 和 $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ 三种工况的计算结果如图7和表2所示,燃烧室壁面温度的改变对炭化室内焦饼的结焦过程和结焦时间影响较大,由表2可得,燃烧室壁面温度的提高,极大的减少了结焦时间,有利于生产效率的提高。但是结焦时间的缩短,造成了焦饼收缩的减少,不利于推焦作业。在燃烧室温度较低的情况下,即收缩量大的时候,忽略收缩所需的结焦时间差别较大。因此在生产过程中,应该合理控制燃烧室

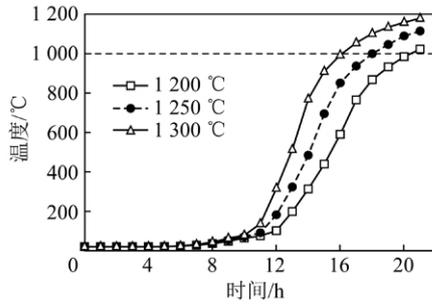


图 7 燃烧室温度对焦饼中心温度的影响

Fig. 7 Effects of combustion chamber temperature on the central temperature of coal/coke bed

表 2 燃烧室温度对结焦时间和焦饼收缩的影响

Table 2 Effects of combustion chamber temperature on the coking time and shrinkage of coal/coke bed

参 数	温度/°C		
	1 200	1 250	1 300
耦合收缩结焦时间/h	20.32	17.97	16.07
忽略收缩结焦时间/h	20.53	18.13	16.20
外收缩量/mm	3.84	3.15	2.57
总收缩量/mm	8.20	7.40	6.71

温度从而平衡结焦时间和收缩量。

#### 4.2.3 炭化室宽度的影响

炭化室宽度是焦炉设计参数,炭化室宽度为 450、500 和 600 mm 三种设计工况的计算结果如图 8 和表 3 所示。随着炭化室宽度的增加,结焦时间显著增加,炭化室宽度从 450 mm 增加到 600 mm,结焦时间延长了 8 h 左右,与文献[19]结果相符。炭化室宽度的增加,延长了结焦时间,增大了焦饼收缩,有利于推焦作业。炭化室宽度越大,即收缩量大的时候,忽略收缩所需的结焦时间差别较大。炭化室宽度的增加,虽然延长了结焦时间,但由于宽度增加,炭化室容量增大,反而提高了焦炉的年产量。因此宽炭化室成为了主流的发展方向之一。

表 3 炭化室宽度对结焦时间和焦饼收缩的影响

Table 3 Effects of coking chamber width on the coking time and shrinkage of coal/coke bed

参 数	宽度/mm		
	450	500	600
耦合收缩结焦时间/h	17.97	20.47	25.80
忽略收缩结焦时间/h	18.13	20.67	26.00
外收缩量/mm	3.15	3.47	4.01
总收缩量/mm	7.40	7.72	8.32

#### 4.2.4 收缩系数对收缩量的影响

结合图 9 中 3 种不同收缩系数的煤种(C1、C2、

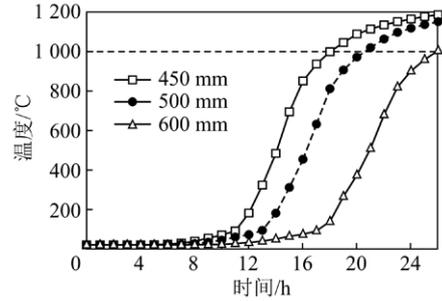


图 8 炭化室宽度对焦饼中心温度的影响

Fig. 8 Effects of coking chamber width on the central temperature of coal/coke bed

C3 挥发分分别为 30.8%、28.5%、28.0%) ,分析了 3 种煤焦化过程中煤收缩量随时间的变化,计算结果见表 4。与 C2 相比,C1 的第 1 收缩峰差别较大,C1 峰值更高;C3 的第 2 收缩峰差别较大,C3 峰值更高。从表 4 可知,C3 煤结焦后收缩量较其他两种煤增加明显,可见第 2 收缩峰的变化对煤焦化收缩量影响较大,与实际生产结果相同<sup>[1]</sup>,同时也证明了本文模型的合理性。第 2 收缩峰更大程度上决定了焦饼的收缩量。第 1 收缩峰取决于煤的挥发分,第 2 收缩峰取决于煤的最大流动度、堆密度等多种因素,因此调节影响第 2 收缩峰的因素能更大程度的改善收缩情况。

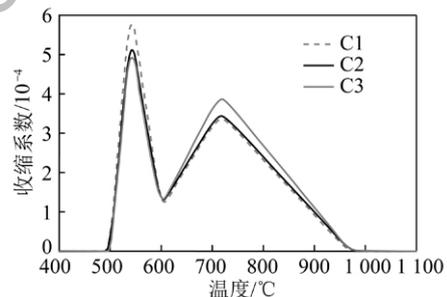


图 9 3 种煤的热收缩系数

Fig. 9 Contraction coefficients of different coal

表 4 不同煤结焦时刻的收缩量

Table 4 Shrinkage of coke bed for different coal

煤种	C1	C2	C3
外收缩量/mm	2.99	3.15	3.51
总收缩量/mm	7.27	7.40	8.06

## 5 结 论

(1) 考虑焦饼收缩后模拟煤/焦饼温度变化和收缩量与实测值吻合较好,提高了计算精度,说明本文模型的实用性和正确性。焦饼收缩量越大,忽略焦饼收缩的所获得结焦时间误差越大。

(2) 随着煤水含量降低、燃烧室温度升高和炭

化室宽度减小,有利于炭化室结焦时间的缩短。随着煤水分含量的降低,燃烧室温度降低和炭化室宽度增加,焦饼收缩量增加,有利于推焦作业。

(3) 不同收缩系数的煤,相较于第 1 收缩峰,煤焦化的收缩量更大程度受到第 2 收缩峰的影响。

#### 参考文献:

- [1] 姚昭章. 炼焦学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- [2] 顾金凤. 冷压型煤在炭化过程中的膨胀与收缩特性[J]. 煤化工, 1996, 74(1): 37-43.  
Gu Jinfeng. The characteristics of dilatation and contraction of the cold-pressed briquette during carbonization [J]. Coal Chemical Industry, 1996, 74(1): 37-43.
- [3] 付志新, 郭占成, 袁章福, 等. 图像在线测量法研究煤热解过程中的膨胀与收缩特性[J]. 燃料化学学报, 2005, 33(5): 525-529.  
Fu Zhixin, Guo Zhancheng, Yuan Zhangfu, et al. Shrinkage characteristics of briquette during pyrolysis using online images collection [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2005, 33(5): 525-529.
- [4] Nomura S, ARIMA T. Coke shrinkage and coking pressure during carbonization in a coke oven[J]. Fuel, 2000, 79(13): 1603-1610.
- [5] 付志新, 郭占成, 王申祥. 梯度温度分布下半焦/焦炭收缩规律的研究[J]. 燃料化学学报, 2006, 34(2): 136-141.  
Fu Zhixin, Guo Zhancheng, Wang Shenxiang. Experimental study on shrinkage characteristics of semi-coke/coke under gradient temperature during coking process [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2006, 34(2): 136-141.
- [6] Kouichi Nushiro, Takashi Matsui. Mathematical modeling of clearance between wall of coke oven and coke cake [J]. Steel, 1995, 81(6): 625-630.
- [7] Tashiro Kiyohide. Computer analysis of heat transfe in coke oven [J]. Fuji Iron & Steel, 1969, 8: 31-43.
- [8] Kenji Matsubara. New simulation model for coke oven and some Application [J]. Tetsu-to-Hagane, 1982, 68(15): 2148-2155.
- [9] Merrick D. Mathematical models of the thermal decomposition of coal 1. The evolution of volatile matter [J]. Fuel, 1983, 62(5): 534-539.
- [10] Merrick D. Mathematical models of the thermal decomposition of coal 2. Specific heats and heats of reaction [J]. Fuel, 1983, 62(5): 540-546.
- [11] Merrick D. Mathematical models of the thermal decomposition of coal 3. Density, porosity and contraction behaviour [J]. Fuel, 1983, 62(5): 547-552.
- [12] Atkinson B, Merrick D. Mathematical models of the thermal decomposition of coal 4. Heat transfer and temperature profiles in a coke-oven charge [J]. Fuel, 1983, 62(5): 553-561.
- [13] Voller V R, Cross M, Merrick D. Mathematical models of the thermal decomposition of coal 5. Distribution of gas flow in a coke oven charge [J]. Fuel, 1983, 62(5): 562-566.
- [14] 司俊龙, 温治, 刘训良. 基于水分蒸发非线性迁移的炭化室传热模型[J]. 浙江大学学报, 2007, 41(10): 5-12.  
Si Junlong, Wen Zhi, Liu Xunliang. Heat transfer model of coking chamber based on moisture nonlinear evaporation [J]. Journal of Zhejiang University, 2007, 41(10): 5-12.
- [15] 金珂, 冯妍卉, 张欣欣. 耦合分级燃烧的大容积焦化过程的仿真[J]. 中国电机工程学报, 2012, 35(32): 13-20.  
Jin Ke, Feng Yanhui, Zhang Xinxin. Simulation of coking processes in large capacity coke ovens with staging combustion [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 35(32): 13-20.
- [16] 金珂, 冯妍卉, 张欣欣, 等. 耦合燃烧室的焦炉炭化室内热过程的数值分析[J]. 化工学报, 2012, 63(3): 788-795.  
Jin Ke, Feng Yanhui, Zhang Xinxin, et al. Numerical analysis on thermal processes in coupled coking and combustion chambers of coke oven [J]. CIESC Journal, 2012, 63(3): 788-795.
- [17] 张安强, 冯妍卉, 张欣欣, 等. 焦炉燃烧室-炭化室热过程数值模拟及解耦算法[J]. 化工学报, 2012, 63(2): 455-462.  
Zhang Anqiang, Feng Yanhui, Zhang Xinxin, et al. Decoupling numerical methods for simulation of thermal processes in coupled combustion and carbonization chambers of coke oven [J]. CIESC Journal, 2012, 63(2): 455-462.
- [18] Zhang A Q, Feng Y H, Zhang X X, et al. Decoupling simulation of thermal processes in coupled combustion and carbonization chambers of a coke oven [J]. ISIJ International, 2013, 53(6): 995-1001.
- [19] 沈为清, 梁丽彤. 宽炭化室大容积焦炉的利弊分析[J]. 燃料与化工, 2007, 38(6): 16-18.  
Shen Weiqing, Liang Litong. Advantage and disadvantage analysis on high capacity coke oven with wider chamber [J]. Fuel & Chemical Processes, 2007, 38(6): 16-18.
- [20] 贝昆仑, 王鹏, 张永发. 温度梯度下配合煤成焦和收缩特性研究[J]. 煤炭转化, 2006, 29(1): 49-52.  
Bei Kunlun, Wang Peng, Zhang Yongfa. Study on blended coal coking and shrinkage at temperature gradient [J]. Coal Conversion, 2006, 29(1): 49-52.
- [21] 张雷红, 薛改凤, 宋子逵, 等. 焦炉炭化室宽度对炼焦配煤影响的研究[J]. 武钢技术, 2010, 48(4): 59-61.  
Zhang Leihong, Xue Gaifeng, Song Zikui, et al. Study on the effect of carbonization chamber breadth on coal blending for coking [J]. Wisco Technology, 2010, 48(4): 59-61.