

# 氧化球团在熔渣中熔化过程的数值模拟

何奕波, 魏 国, 高强健, 邹宗树  
(东北大学 材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 基于一维非稳态导热原理建立了球团在熔渣中熔化的数学模型, 并采用有限差分方法对模型进行求解. 通过编程计算, 分析了不同条件对球团渣壳熔化时间的影响. 计算结果与球团在熔渣中的熔融实验结果相近. 球团渣壳在 1 450, 1 500, 1 550 ℃ 渣浴中渣壳熔化时间为 56, 36, 25 s, 渣壳最大厚度分别为 0. 211, 0. 149 和 0. 109 cm; 随着渣浴温度升高、球团初始温度升高, 球团熔化速度变快; 熔渣碱度在 0. 8 ~ 1. 2 之间时, 球团熔化时间基本无变化, 但当碱度继续降低, 熔化时间将大幅增长; 随着球团金属化率的升高、球团直径的增大, 渣壳最大厚度变大, 但前者对渣壳熔化时间影响不大, 后者使得渣壳熔化时间增长.

**关 键 词:** 氧化球团; 熔渣; 渣壳; 熔化速率; 数值模拟

中图分类号: TF 535. 2      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2014)06-0804-05

## Numerical Simulation of Melting Process of Iron Oxide Pellet in Molten Slag

HE Yi-bo, WEI Guo, GAO Qiang-jian, ZOU Zong-shu  
(School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZOU Zong-shu, E-mail: zouzs@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** On the basis of one-dimension non-steady heat transfer theory, a numerical model of the dynamic behavior of oxide pellet in molten slag was established and solved with finite difference method. The melting time under different conditions was calculated with the model, and the results showed good agreement with the experimental data. The melting time of pellet at 1 450, 1 500, 1 550 ℃ in molten slag bath is 56, 36, 25 s, and the maximum thickness of slag shell is 0. 211, 0. 149, 0. 109 cm, respectively. The melting rate increases with the increase of slag bath temperature and pellet pre-heating temperature. The melting time is almost the same when the slag basicity is in the range of 0. 8 ~ 1. 2, but the melting time increases obviously when the basicity is below 0. 8. The maximum thickness of slag shell increases with the increase of pellet metallization ratio and diameter, but the former has less effect on melting time than the latter.

**Key words:** oxide pellet; molten slag; slag shell; melting rate; numerical simulation

铁浴熔融还原法是一种使用粉矿、块矿、烧结矿或球团矿等为原料, 以煤炭为主要能源, 在液态条件下的熔融还原炼铁法<sup>[1]</sup>. 采用球团矿的厚渣层铁浴熔融还原工艺具有原料适应性强、操作稳定、节能环保等优点<sup>[2]</sup>. 为考察厚渣工艺的动力学特征, 对球团在熔渣中熔化速率进行了数值模拟和实验研究, 建立了球团矿在熔渣中的熔化过程的数学模型, 通过实验结果对数值模拟的可靠性进行验证, 并考察不同条件对球团熔化速率的影响.

### 1 球团熔融动力学模型

冷球团进入熔池后, 首先与熔渣接触, 在表面形成渣壳, 随后渣壳与球团相继熔化, 如图 1 所示.

在球坐标系下,球团的一维非稳态导热微分方程可表示为

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right).$$
 (1)

式中: $T$  为温度; $\alpha$  为导热系数; $r$  为球坐标.

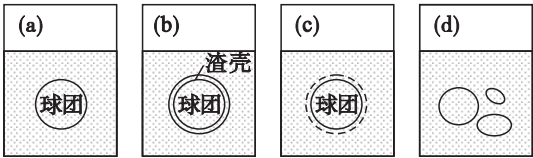


图 1 球团熔化过程示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of pellet melting process

a. 初始条件.

当  $t=0$  时,在球团的界面及内部,温度是均匀的,且恒定为初始温度,即

当  $r \leq R_0$  时,  $T = T_0$ . (2)

当  $t=0$  时,在球团外部,即渣浴中,  $T = T_\infty$ . 即

当  $r > R_0$  时,  $T = T_\infty$ . (3)

式中: $T_\infty$  为环境温度; $T_0$  为球团初始温度; $R_0$  为球团初始半径.

b. 边界条件.

在球团的中心处. 当  $t \geq 0, r = 0$  时,

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0.$$
 (4)

在渣壳以外为环境温度. 当  $t > 0, r > R_L$  时,

$$T = T_\infty.$$
 (5)

$R_L$  为球团与渣壳的总半径.

固、液态渣的交界面处的温度等于渣的熔点, 即当  $t > 0, r = R_L$  时,

$$T = T_m.$$
 (6)

式中  $T_m$  为渣的熔点.

由于接触面的不平整,在球团与固态渣壳之间存在着界面接触热阻,所以球团表面的传热可以认为属于第三类边界条件,即对流边界条件,传热方程可表示为

$$q = -\kappa \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_0} = \frac{1}{R} (T - T_p) = h_s (T - T_p).$$
 (7)

式中: $q$  为热通量; $R$  为界面热阻; $h_s$  为界面综合换热系数; $T$  为渣壳内表面温度; $T_p$  为球团外表面温度.

在固态渣壳和液态渣之间,有以下相变条件:

$$\kappa_s \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_L} = \bar{h} (T_\infty - T_m) + \rho_s \Delta H_m \frac{d\Delta V_i}{dt}.$$
 (8)

式中: $\kappa_s$  为固态渣壳导热系数; $\bar{h}$  为固、液渣对流传热系数; $\rho_s$  为渣密度; $\Delta H_m$  为渣熔化潜热; $\Delta V_i$  为  $\Delta t$  时间内渣壳体积的变化.

以上各部分的传热方程以及初始条件和边界条件方程,构成了球团在渣壳熔化之前模型的定解

问题. 在渣壳熔化之后,固态球团外表面温度与渣熔点一致,球团与渣之间依靠对流换热进行热量的传导,文献[3]对此时传热过程给出了详细的解析解.

当  $Bi \rightarrow 0$  时,

$$\frac{T - T_\infty}{T_\infty - T_0} = 1 - e^{-3BiFo}.$$
 (9)

当  $Bi \rightarrow \infty$  时,

$$\frac{T - T_\infty}{T_\infty - T_0} = 1 - 2R \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \sin \mu_n \frac{r}{R}}{\gamma \mu_n^2} e^{3\mu_n^2 Fo}.$$
 (10)

因此,在渣壳完全熔化后,球团温度的变化就可根据式(9)或式(10)计算得出. 球团熔化分解的动力学特征会在以后的工作中进行探讨.

综上,球团在熔渣中的熔化及导热过程均已给出数值表征方程. 本研究采用有限差分方法进行求解,并编写计算程序来得到结果. 计算过程中使用的参数来源在表 1 中列出.

表 1 模型计算参数的数据来源 Table 1 Source of data for model parameters	
参数名称	来源
球团导热系数 $K_p$	两相固体有效导热系数 <sup>[4]</sup>
炉渣导热系数 $K_s$	高炉渣导热系数经验式 <sup>[5]</sup>
自然对流传热系数 $h$	绕流球体传热修正准数方程 <sup>[6]</sup>
炉渣熔化潜热 $\Delta H_m$	硅酸盐熔化潜热测定 <sup>[7]</sup>
球团密度 $\rho_p$	“阿基米德法”实验测定
炉渣密度 $\rho_s$	高炉渣密度推算式 <sup>[8]</sup>
炉渣黏度 $\eta$	高炉渣黏度推算式 <sup>[9]</sup>
炉渣熔点 $T_m$	“半球法”实验测定
界面热阻 $1/h_s$	一般形式 <sup>[10]</sup> 与实验回归

2 模型的实验验证

模型的可靠性可通过与作者此前进行的球团在熔渣中熔融实验结果<sup>[11]</sup>的比较来验证. 数值模拟与实验所用球团与熔渣成分分别列于表 2 和表 3 中.

表 2 氧化球团成分(质量分数) Table 2 Chemical composition of oxide pellet (mass fraction)			
			%
TFe	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO
62.84	0.79	88.89	0.29
SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Other
9.0	0.23	0.60	0.2

表 3 基准渣成分(质量分数) Table 3 Chemical composition of base slag (mass fraction)			
			%
CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
44.7	37.3	8.0	10.0

实验将氧化球团直接投入高温熔渣,在一定时间后连同坩埚急冷,切开凝固渣试样进行分析,确定球团在熔渣中的熔融特征并计算熔化速率.实验考察球团在 1 450,1 500,1 550 ℃时,熔融时间为 30,60,90 s 时的状况.

图 2 所示为球团熔化时间为 30 s 时的实验结果.原始球团直径为 1.2 cm,因此,1 450 ℃时,球团渣壳厚度为 0.19 cm;1 500 ℃,渣壳厚度为 0.05 mm;1 550 ℃时球团渣壳已经完全熔化.

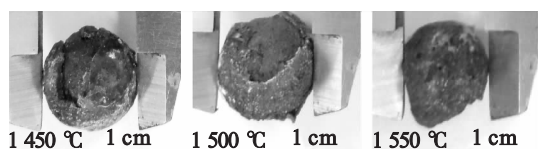


图 2 球团熔融实验结果

Fig. 2 Experiment results of pellet melting

图 3 为不同渣浴温度下渣壳厚度随时间的变化曲线.由图可见,随着渣浴温度的升高,渣壳最大厚度降低,渣壳熔化时间减少.温度为 1 450,1 500,1 550℃时,渣壳最大厚度分别为 0.211,0.149,0.109 cm;渣壳生成并熔化时间为 56,36,25 s.

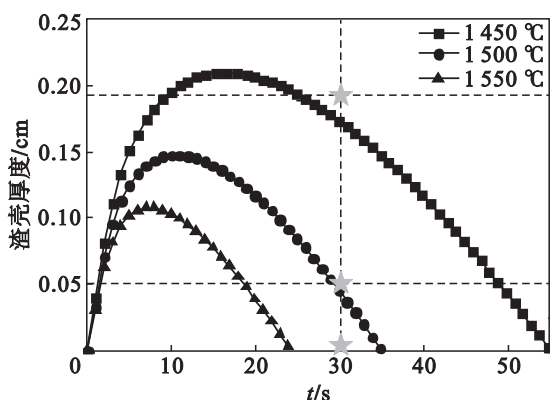


图 3 渣壳厚度实验结果与计算结果的比较

Fig. 3 Comparison of slag shell thickness between calculation and experiment

将实验结果(图 3 中五角星所示)与计算结果进行比较,可见两者较为吻合.

### 3 不同条件下球团渣壳熔化速率

#### 3.1 球团表面温度的变化规律

以 1 450 ℃渣浴中球团熔化规律为例(图 4),球团刚进入熔渣,渣壳形成的初期,由于存在较大的温度差,球团外表面与渣壳内表面之间的热量传递速率很快,温度变化剧烈;随着渣壳逐渐变厚,两者温度以较平缓的速率上升;渣壳内表面温度达到渣熔点(1 357 ℃)后,渣壳完全熔化,球团

表面传热条件变为与液态渣之间的对流给热,使之迅速达到渣浴温度.

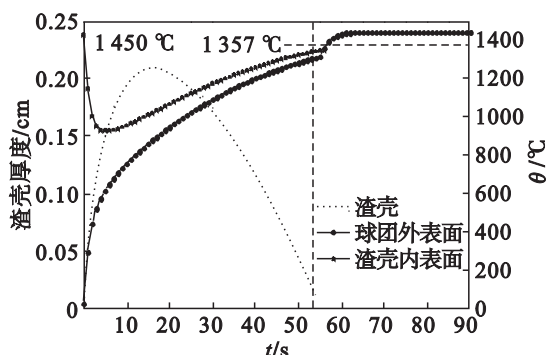


图 4 球团表面温度随时间的变化规律

Fig. 4 Change of pellet surface temperature with time

综上,球团表面温度的变化可分为三个阶段:

- 1) 冷球团进入熔渣温度变化剧烈的初始期;
- 2) 受渣壳的影响温度平缓上升的中期;
- 3) 渣壳熔化后的温度上升后期.

#### 3.2 熔渣碱度对球团熔融现象的影响

本文考察了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  质量分数 10%,  $\text{SiO}_2$  质量分数 8%, 熔渣碱度分别为 0.3,0.5,0.8,1.0,1.2 时对球团熔化速率的影响,如图 5 所示.碱度在 0.8~1.2 之间时,球团熔化时间基本相同,但当碱度继续降低,熔化时间大幅增长.随着碱度的升高,同一时刻渣壳厚度减少.

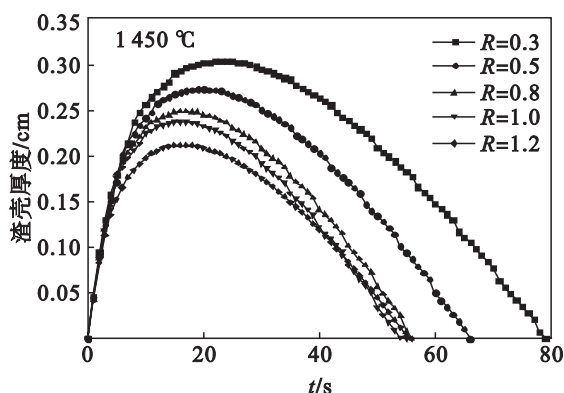


图 5 渣碱度对渣壳厚度的影响

Fig. 5 Change of slag shell thickness with slag basicity

随着碱度的升高,渣的导热系数会随之降低<sup>[5]</sup>,黏度逐渐降低<sup>[9]</sup>,实验测得熔渣熔点各不相同,这些熔渣的特性综合决定了渣壳厚度的变化规律.因此可以综合考虑熔炼设备的生产能力和目的,选择合理的熔渣碱度,以实现熔炼工艺生产原料的优化.

#### 3.3 球团金属化率对球团熔融现象的影响

本文考察球团金属化率为 30%,50%,70% 时对球团熔融现象的影响,如图 6 所示.

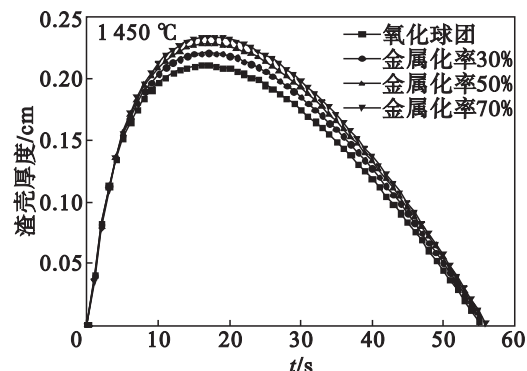


图 6 球团金属化率对渣壳厚度的影响  
Fig. 6 Change of slag shell thickness with pellet metallization ratio

随着金属化率的升高,渣壳最大厚度变大,渣壳长大与熔化过程基本相同,渣壳完全熔化时刻基本相同.这是由于,较高的金属化率提高了球团的导热效率,使得渣壳温度变化也随之加快,降温快,厚度就大,升温快,熔化就快,但最终熔化时间差别不大.实际应用中应平衡预还原球团能耗与铁浴熔炼能耗,实现最佳的能量利用.

### 3.4 球团直径对球团熔融现象的影响

本文考察球团直径为 0.5,0.8,1.2,1.5,1.8 cm 时,球团熔融现象的差异,如图 7 所示.随着球团直径的增大,渣壳最大厚度增大,渣壳熔化时间增长.随着球团直径由 1.8 cm 缩小到 0.5 cm,渣壳的熔化时间的变化为 >90,75,56,32,17 s.

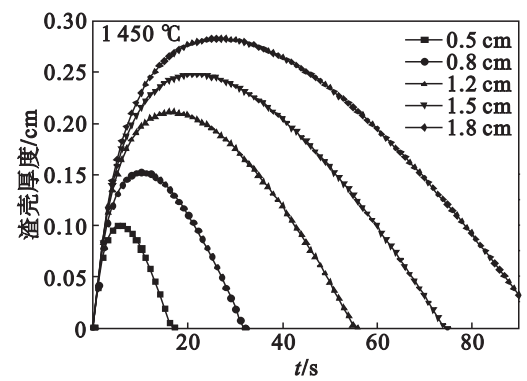


图 7 球团直径对渣壳厚度的影响  
Fig. 7 Change of slag shell thickness with pellet diameter

随着球团直径的增加,球团质量增大,表面积增大,导致球团升温所需热量增加,单位厚度渣壳形成与熔化过程所需热量也增加,而球团向内传热时间变长,使得渣壳厚度大幅增加.因此应避免球团直径有较大的波动,才能实现稳定的生产.

### 3.5 球团初始温度对球团熔融现象的影响

本文考察了球团初始温度为 300,500,800,1 100 ℃ 时对球团熔融现象的影响.图 8 为球团初

始温度对渣壳厚度的影响.

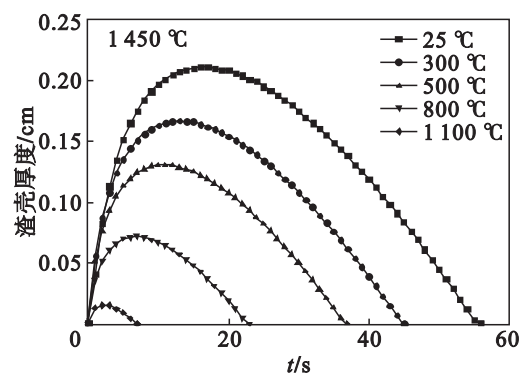


图 8 球团初始温度对渣壳厚度的影响  
Fig. 8 Change of slag shell thickness with pellet pre-heating temperature

由图可见,随着球团初始温度的升高,渣壳最大厚度降低,熔化时间减少,长大速率降低.球团初始温度升高,热量传输平衡过程中需要靠凝固渣潜热提供的热量减少,渣壳厚度自然变薄;较高的初始温度降低了渣壳导热的温度差,导致了渣壳长大速率的降低.

铁浴反应器熔炼过程产生的大量高温尾气可用于球团预热,不仅可以提高熔炼炉的能量利用率,也能够减轻球团进入渣铁熔池后造成的不利影响.将球团初始温度升高 300 ~ 500 ℃,与冷球团直接加入渣浴熔池相比,渣壳的熔化时间缩短了 10 ~ 20 s.

## 4 结 论

1) 球团表面温度的变化可分为三个阶段,即冷球团进入熔渣温度变化剧烈的初始期;受渣壳的影响温度平缓上升的中期;渣壳熔化后的温度上升后期.球团在 1 450,1 500,1 550 ℃ 渣浴中渣壳最大厚度分别为 0.211,0.149,0.109 cm;渣壳熔化时间为 56,36,25 s.

2) 熔渣碱度在 0.8 到 1.2 之间时,球团熔化时间变化不明显,当碱度继续降低,熔化时间大幅增长,同一时刻渣壳厚度随着碱度的升高而减少;随着金属化率的升高,渣壳最大厚度变大,渣壳长大与熔化过程基本相同,渣壳完全熔化时刻基本相同;随着球团直径的增大,渣壳最大厚度增大,渣壳熔化时间增长;随着球团初始温度的升高,渣壳最大厚度降低,熔化时间减少,长大速率降低.

3) 为使熔炼工艺更加稳定,除了适宜的熔渣碱度和球团金属化率外,还需要保证球团生产质

量,控制球团直径的波动. 另外,利用余热提高球团初始温度是一种节能高效的生产措施.

参考文献:

[ 1 ] Fruehan R J. Iron bath smelting-current status and understanding [ C ]//Elliot Symposium Proceedings. Boston,1990:1 – 10.

[ 2 ] Hiroyuki K. Smelting reduction process with a thick layer of slag for producing ferroalloys and iron [ J ]. *Materials Transactions*,1992,33( 6 ):531 – 542.

[ 3 ] 俞昌铭. 热传导及其数值分析[ M ]. 北京:清华大学出版社,1982;358.

( Yu Chang-ming. Heat transfer and its numerical analysis [ M ]. Beijing:Tsinghua University Press,1982;358. )

[ 4 ] Ben-Amoz M. The effective thermal properties of two phase solids [ J ]. *International Journal of Engineering Science*, 1970,8:39 – 47.

[ 5 ] Kazuhiro N, Masahiro S, Kazuhiro S G. Thermal conductivities of slags for ironmaking and steelmaking[ J ]. *Tetsu-to-Hagane*,1983,69( 11 ):1417 – 1424.

[ 6 ] Mathers W,Madden A,Edgar L. Simultaneous heat and mass

transfer in free convection [ J ]. *Industrial and Engineering Chemistry*,1957,49( 6 ):961 – 968.

[ 7 ] Navrotsky A, Ziegler D, Oestrike R, *et al.* Calorimetry of silicate melts at 1773 K;measurement of enthalpies of fusion and of mixing in the systems diopside anorthite albite and anorthite forsterite [ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*,1989,101( 1 ):122 – 130.

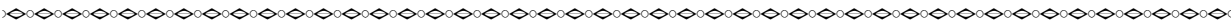
[ 8 ] Takahisa K,Takeshi O,Hisashi K. Viscosity, surface tension, and density of blast furnace slag and synthetic slags at manufacturing condition of hard granulated slag[ J ]. *Tetsu-to-Hagane*,1981,67( 9 ):1491 – 1497.

[ 9 ] Takashi S,Tomoyuki N,Hideharu S,*et al.* Analysis on liquid flow in the dripping zone of blast furnace [ J ]. *Tetsu-to-Hagane*,1987,73( 15 ):2044 – 2051.

[ 10 ] Rohsenow W M. Handbook of heat transfer[ M ]. New York: McGraw-Hill,1998.

[ 11 ] 何奕波. 氧化铁球团在熔渣中熔融过程的研究[ D ]. 沈阳: 东北大学,2011.

( He Yi-bo. Study on melting of iron oxide pellet in molten slag[ D ]. Shenyang:Northeastern University,2011. )



( 上接第 773 页 )

3 结 论

1) MC 算法可以更精确地模拟磨矿破裂过程中粒度分布的动态变化,但基于传统舍取法算法的 MC 仿真效率较低. 本文提出改进的舍取抽样方法,能够显著减少无效抽样次数.

2) 本文方法是通过改进 MC 抽样包络函数实现的,分析和仿真实验均验证了该方法在提高仿真效率的同时,不会影响 MC 仿真算法的精度.

参考文献:

[ 1 ] 柴天佑. 生产制造全流程优化控制对控制与优化理论方法的挑战[ J ]. 自动化学报,2009,35( 6 ):641 – 649.

( Chai Tian-you. Challenges of optimal control for plant-wide production processes in terms of control and optimization theories[ J ]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35 ( 6 ): 641 – 649. )

[ 2 ] Schug B W,Neas M R,Gamarano T V. Process simulation for improved plant design through p&id validation [ R ]. Richmond;Andritz Automation Inc,2012.

[ 3 ] Austin L G. A discussion of equations for the analysis of batch grinding data[ J ]. *Powder Technology*,1999,106( 1 ): 71 – 77.

[ 4 ] 苏军伟,顾兆林,Xu X Yun. 离散相系统群体平衡模型的求解算法[ J ]. 中国科学化学,2010,40( 2 ):144 – 160.

( Su Jun-wei,Gu Zhao-lin,Xu X Yun. Advances of solution methods of population balance equation for disperse phase system[ J ]. *Scientia Sinica Chimica*,2010,40 ( 2 ): 144 – 160. )

[ 5 ] Gillespie D T. Stochastic simulation of chemical kinetics[ J ]. *Annual Review of Physical Chemistry*,2007,58( 1 ):35 – 55.

[ 6 ] Chen Y. Another look at rejection sampling through importance sampling [ J ]. *Statistics & Probability Letters*, 2005,72( 4 ):277 – 283.

[ 7 ] Mishra B K. Monte Carlo method for the analysis of particle breakage[ M ]. London:Elsevier,2007:637 – 660.

[ 8 ] Li H,Petzold L. Efficient parallelization of the stochastic simulation algorithm for chemically reacting systems on the graphics processing unit[ J ]. *International Journal of High Performance Computing Applications*,2010,24 ( 2 ): 107 – 116.

[ 9 ] Sargent R G. Verification and validation of simulation models [ C ]//Proceedings of Winter Simulation Conference. Miami: WSC,2008:157 – 169.

[ 10 ] Rajamani K,Pate W T, Kinneberg D J. Time-driven and event-driven Monte Carlo simulations of liquid-liquid dispersions; a comparison [ J ]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*,1986,25( 4 ):746 – 752.

[ 11 ] King P R. Modeling and simulation of mineral processing systems[ M ]. Oxford: Butterworth-Heinemann,2001.