

doi : 10.3969/j. issn. 1005 - 3026. 2016. 05. 012

# 颗粒绕流圆管传热的数值模拟研究

于庆波,彭家燕,任慧来,刘军祥  
( 东北大学 冶金学院,辽宁 沈阳 110819 )

**摘 要:**干法粒化后的高炉渣颗粒余热回收工艺主要以空气为冷却介质,由于空气的比热容小从而导致热效率低,因此,提出用自流床余热锅炉来回收高温炉渣颗粒的余热.基于 CFD 软件,将流动的颗粒当作连续的黏性流体,建立了一个三维数学模型,对颗粒绕流圆管传热的过程进行数值模拟,并验证了模型的正确性,研究了颗粒入口速度、水入口速度以及水入口温度对余热锅炉换热效果的影响规律.数值模拟结果表明:增大颗粒和水入口速度,可提高换热效果;增大水入口温度,传热系数没有变化,但热回收率减小.

**关 键 词:**颗粒流;圆管;传热;自流床余热锅炉;数值模拟

中图分类号:TF 09      文献标志码:A      文章编号:1005 - 3026( 2016 )05 - 0663 - 05

## Numerical Simulation Research on Heat Transfer in Particle Flow Round Tubes

YU Qing-bo , PENG Jia-yan , REN Hui-lai , LIU Jun-xiang  
( School of Metallurgy , Northeastern University , Shenyang 110819 , China. Corresponding author : YU Qing-bo , professor , E-mail : yuqb@smm. neu. edu. cn )

**Abstract :** At present , air is a commonly-used heat transfer medium to recover waste heat of slag particles in blast furnace ( BF ) after dry granulation , which has a low thermal efficiency owing to its low specific heat capacity. Therefore , using gravity bed waste heat boiler to recover waste heat in the high temperature BF slag particles was proposed. Considering the particles as continuous viscous flow , a three dimensional numerical model was built to simulate the heat transfer of BF slag particles flowing around tubes based on the CFD software of Fluent. The effects of the inlet velocity of particles and water , and the inlet temperature of water on the efficiency of heat exchanging in waste heat boiler were investigated. The simulation results show that the efficiency of heat transfer improves with increasing the inlet velocity of particles and water , and the heat recovery rate of the former drops. However , when the inlet temperature of water increases , the heat transfer coefficient keeps invariant and the heat recovery rate reduces.

**Key words :** particle flow ; round tube ; heat transfer ; gravity bed waste heat boiler ; numerical simulation

工业生产中存在大量具有丰富余热资源的固体颗粒,如干法粒化后的高炉渣颗粒,其温度在1 000 ℃以上<sup>[1]</sup>.目前,回收高炉渣颗粒余热的换热介质主要为空气<sup>[2]</sup>,然而该余热回收方式存在着诸多弊端.比如空气和颗粒直接接触换热后,排出的热风中含有大量杂质,不适于直接利用;空气的比热小,而颗粒的余热高,故空气的需求量大,导致鼓风机电量的消耗增加,最后可能导致投入成本高于回收余热的价值.基于以上原因,刘军祥等提出了用自流床余热锅炉直接回收高温颗粒的余热<sup>[3]</sup>.

自流床余热锅炉回收高温炉渣颗粒余热的过程实质上是一个颗粒绕流圆管流动与传热的过程.颗粒流动是指颗粒材料在外力作用和内部应力状况变化时发生的类似于流体的运动状态<sup>[4]</sup>.Chen 等<sup>[5]</sup>提出了黏性流模型,把受重力作用而流

动的颗粒看作连续的黏性流体 ,并引入颗粒黏度的概念来描述颗粒间的摩擦 ,获得了颗粒的流场. Natarajan 和武锦涛等都研究了移动床中颗粒的运动速度与传热系数之间的关系<sup>[6-7]</sup> ,并得到了一致的结论 .颗粒与加热面之间的有效传热系数开始时随颗粒流速的增加而提高 ,当颗粒流速进一步增加时 ,有效传热系数开始下降. Hiromi<sup>[8]</sup>研究了移动床中有埋管时 ,颗粒流速、管间距、排列方式等对颗粒流场的影响. Yusuf 等采用双欧拉法模拟了二维的气固流化床有埋管时 ,埋管及其周围颗粒的传热与流动情况 ,并研究了固体导热系数本构方程对传热的影响规律<sup>[9]</sup>. Dan 等采用内嵌边界法( immersed boundary method ,IBM )直接模拟了在填充床和流化床中稠密气固两相流的传热情况<sup>[10-11]</sup> .然而 ,针对高温颗粒绕流圆管传热过程的数值模拟研究较少.

本文采用 Fluent 软件 ,建立三维数学模型 ,对高温炉渣颗粒绕流圆管传热的过程进行数值模拟 ,并研究颗粒入口速度、水入口速度以及水入口温度对自流床余热锅炉换热效果的影响规律 ,为自流床余热锅炉回收高温颗粒技术的应用与推广奠定理论基础.

1 模型的建立

1.1 几何模型的建立

图 1 为自流床余热锅炉换热实验装置的结构简图. 本文所采用的颗粒为干法粒化后的高炉渣颗粒 ,换热管的排列方式为顺排 ,颗粒流动与水的流动是总趋势为逆流的交叉流动. 在换热装置内 ,高温颗粒受重力作用 ,自上向下流动 ,横掠过换热管管束 ,热量通过管壁传给换热管内的水 ,被冷却的颗粒从换热装置的下部出口排出 ,管内产生的热水或蒸气可用于供暖或者发电.

本文对换热装置内颗粒的流动和传热进行数值模拟 ,采用 1:1 的比例 ,将保温耐火砖的内壁面设为边界壁面 ,将换热装置简化为一个几何尺寸为 150 mm × 100 mm × 260 mm 的内部横插 4 × 10 根换热管的长方体的三维物理模型. 换热管的尺寸为 φ10 mm × 2 mm ,管的排列方式为顺排 ,换热管中心间距为 20 mm. 由于模型的对称性 ,研究时只取一半进行数值模拟 ,可减少数值模拟的计算量.

基于以上分析 ,对自流床余热锅炉的物理模型做以下假设 :①常物性 稳态过程 ;②颗粒流模型采用黏性流模型 ,将颗粒流当作流体来考虑 ,引

入颗粒黏度 ,用 N - S 方程来描述其流动 ;③颗粒密实堆积 ,忽略热辐射 ;④属于流 - 固耦合的对流换热问题 ,假设颗粒和水的流动均为无内热源 ,不可压缩的定常流动.

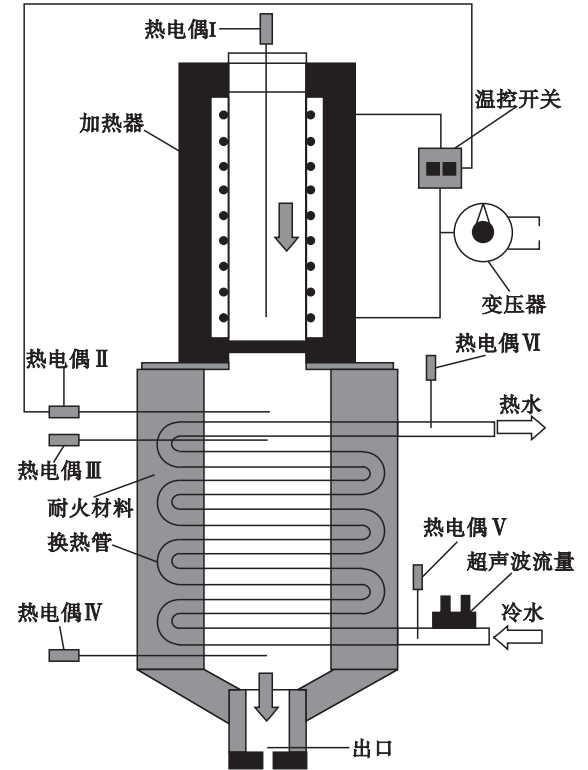


图 1 实验装置结构简图  
Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

1.2 数学模型的建立

1.2.1 控制方程

基于本文的假设 ,控制方程<sup>[12]</sup>如下 :  
不可压缩流体 ,则其质量守恒方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

根据上述的假设 ,动量守恒方程可简化为 N - S 方程 ,即

$$\text{div}(uU) = \text{div}(v\text{grad}u) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$\text{div}(vU) = \text{div}(v\text{grad}v) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

$$\text{div}(wU) = \text{div}(v\text{grad}w) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

对于稳态情况 ,且无内热源 ,则其能量守恒方程简化为

$$\text{div}(\rho UT) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad}T\right) \quad (5)$$

式中  $u, v, w$  分别为流体  $x, y, z$  三个方向的速度分量  $\text{m/s}$  ;  $\rho$  为流体的密度  $\text{kg/m}^3$  ;  $U$  为流体的速度矢量  $\text{m/s}$  ;  $\nu$  为流体的运动黏度  $\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$  ;  $T$  为流体的温度 ,K ;  $\lambda$  为流体的导热系数 ,

$W/(m \cdot K)$   $\rho_p$  为定压比热容  $J/(kg \cdot K)$ 。

1.2.2 边界条件

①中心面处的热流密度值为零；②黏土砖的内壁面为绝热边界；③颗粒流与换热管的接触面，即管外壁，以及水与换热管内壁为第三类边界条件；④颗粒与水的入口温度和速度是给定的。

1.3 网格划分及求解参数的设置

本文采用商业软件 Gambit 对几何模型进行网格划分，均采用六面体结构化网格。模型的网格单元数约为 38 万，图 2 为模型的网格示意图。

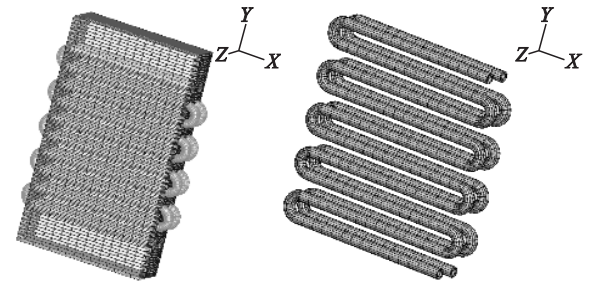


图 2 网格示意图  
Fig. 2 Schematic of mesh

高炉渣颗粒的物性参数如下：颗粒直径为 1.715 mm，空隙率为 0.459，真密度为 2 848  $kg/m^3$ ，对应的堆积密度为 1 615  $kg/m^3$ ，比热容为 1 210  $J/(kg \cdot K)$ ，导热系数为 0.55  $W/(m \cdot K)$ ，黏度为 0.07  $kg/(m \cdot s)$ 。而水的物性参数采用系统默认值。

换热管两侧流体同时流动，且均为不可压缩流体，有两组进出口。定义两组进口均为速度入口（velocity-inlet）边界条件，两组出口均为压力出口（pressure-outlet）边界条件。由于模型的对称性，将中心面设置为对称（symmetry）边界条件，黏土砖的内壁面采用绝热边界条件，换热管的外管壁为固体—流体接触面（wall-wall shadow），将其设置为流体—固体耦合边界条件，管外为高温的颗粒流，管内为低温的水流。换热管外的颗粒流动为层流流动，而换热管内的水流为湍流流动，故选用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型，并采用 SIMPLE 算法和一阶迎风格式。

2 结果与讨论

2.1 模型的验证

在上述求解参数的基础上，保持其他参数不变，改变颗粒入口速度，获得颗粒出口温度的数值模拟值，并将其与自行搭建的实验平台（如图 1 所示）所测得的实验值进行对比，如图 3 所示。由

图可知，模拟值与实验值吻合较好，其相对误差均在 8% 以内，从而验证了本模型的可靠性。

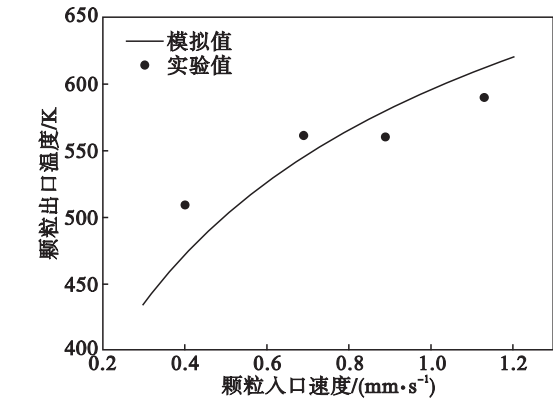


图 3 模型的验证  
Fig. 3 Validation of the model

2.2 颗粒入口速度对换热效果的影响

在研究颗粒入口速度对换热效果的影响规律时，模拟条件：颗粒入口温度为 973 K，水入口温度为 287 K，水入口速度为 0.8 m/s。图 4 为颗粒入口速度  $v_s$  与颗粒侧传热系数  $h_s$  之间的关系曲线图，图 5 为颗粒入口速度  $v_s$  与水侧传热系数  $h_w$  以及换热装置热回收率  $\eta$  之间的关系曲线图。从图 4 和图 5 中可以看出：颗粒侧传热系数  $h_s$  随着换热管的排列位置的变化而变化，从第 1 排管到第 9 排管，相应的  $h_s$  逐渐减小，而在第 10 排换热管处  $h_s$  却增大，这是因为换热管为顺排布置，第 10 排管为最后一排管，换热装置两侧的未与换热管换热的高温颗粒逐渐往中部区域运动，从而使换热效果增强，故  $h_s$  增大；此外，随着颗粒入口速度  $v_s$  的增大，颗粒侧传热系数  $h_s$  也逐渐增大，以第一排管为例，由原来的 370.8  $W/(m^2 \cdot K)$  逐渐增大到 4 466.7  $W/(m^2 \cdot K)$ ；而水侧传热系数  $h_w$  先降低后保持不变，这是因为管内的水被加热为水蒸气，其物性发生改变；而热回收率  $\eta$  由原

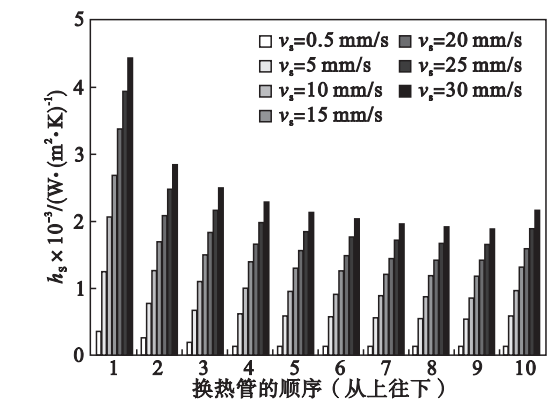


图 4 颗粒侧传热系数与颗粒入口速度的关系  
Fig. 4 Relationship between heat transfer coefficient of particles and inlet velocity of particles

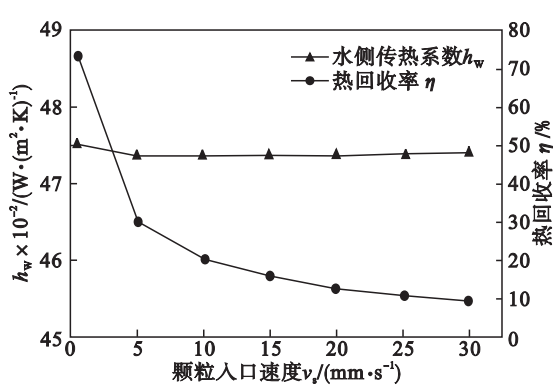


图 5 水侧传热系数、热回收率与颗粒入口速度的关系  
Fig. 5 Relationship among overall heat transfer coefficient of water , heat recovery rate and inlet velocity of particle

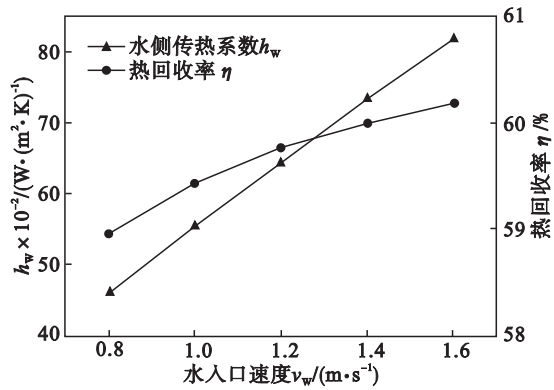


图 7 水侧传热系数、热回收率与水入口速度的关系  
Fig. 7 Relationship among overall heat transfer coefficient of water , heat recovery rate and inlet velocity of water

来的 73.9% 逐渐减小到 9.4% . 模拟研究发现增大颗粒入口速度有利于加强传热 , 提高水的出口温度 , 但其热回收率会降低 , 即降低其热经济效益 .

2.3 水入口速度对换热效果的影响

在研究水入口速度对换热装置换热效果的影响时 , 模拟条件为 : 颗粒入口速度为 1.1 mm/s , 颗粒入口温度为 973 K , 水入口温度为 287 K . 图 6 为水入口速度  $v_w$  与颗粒侧传热系数  $h_s$  之间的关系曲线图 , 图 7 为水入口速度  $v_w$  与水侧传热系数  $h_w$  以及换热装置热回收率  $\eta$  之间的关系曲线图 . 从图 6 和图 7 中可以看出 , 随着水入口速度  $v_w$  的增大 , 颗粒侧传热系数基本保持不变 , 水侧传热系数基本线性增大 , 由原来的 4 608.2 W/( m<sup>2</sup> · K ) 增大到 8 198.5 W/( m<sup>2</sup> · K ) ; 而热回收率  $\eta$  逐渐由 58.9% 增大到 60.2% . 模拟研究发现 , 增大水入口速度  $v_w$  可提高换热装置的换热效果 , 但水出口温度降低 , 故工程实际应用中 , 应合理地考虑水入口速度的选定 .

2.4 水入口温度对换热效果的影响

在研究水入口温度对换热装置换热效果的影响规律时 , 模拟条件为 : 颗粒入口速度为 1.1 mm/s , 颗粒入口温度为 973 K , 水的入口速度为 0.8 m/s . 图 8 为水入口温度  $T_w$  与颗粒侧传热系数  $h_s$  之间的关系曲线图 , 图 9 为颗粒入口温度与水侧传热系数  $h_w$  以及换热装置热回收率  $\eta$  之间的关系曲线图 . 由图 8 和图 9 可以看出 , 随着水

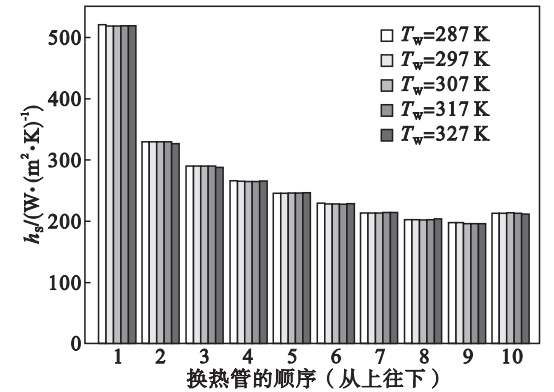


图 8 颗粒侧传热系数与水入口温度的关系  
Fig. 8 Relationship between heat transfer coefficient of particles and inlet temperature of water

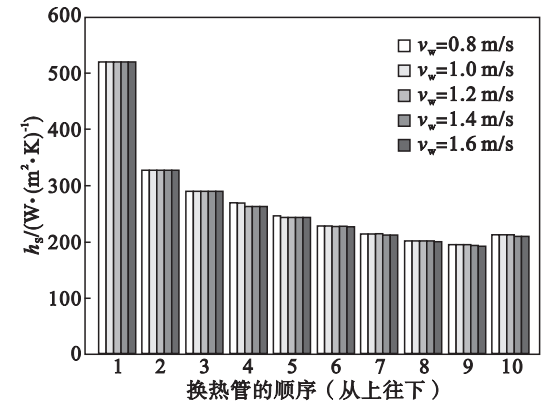


图 6 颗粒侧传热系数与水入口速度的关系  
Fig. 6 Relationship between heat transfer coefficient of particles and inlet velocity of water

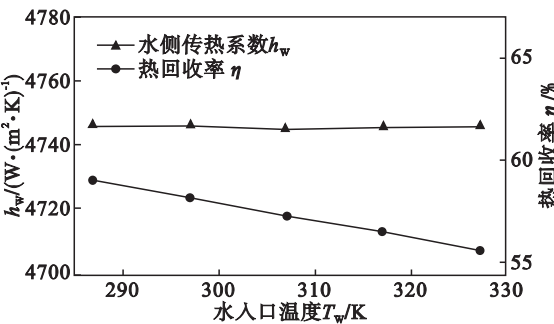


图 9 水侧传热系数、热回收率与水入口温度的关系  
Fig. 9 Relationship among overall heat transfer coefficient of water , heat recovery rate and inlet temperature of water

入口温度  $T_w$  的升高,颗粒侧传热系数  $h_s$  以及水侧传热系数  $h_w$  均保持不变,而换热装置热回收率  $\eta$  逐渐减小,由原来的 59.0% 减小到 55.6%。模拟研究发现水入口温度的改变并不影响换热装置的换热效果,但导致热回收率  $\eta$  降低,从而降低其热经济效益。

### 3 结 论

- 1) 增大颗粒入口速度有利于强化自流床余热锅炉的换热效果,能提高水出口温度,但热回收率降低,由原来的 73.9% 减小到 9.4%。
- 2) 增大水入口速度可提高换热装置的换热效果,但水出口温度会降低。
- 3) 水入口温度的改变对换热装置的传热系数没有影响,但其热效率会随着水入口温度的升高而减小,由原来的 59.0% 减小到 55.6%。

#### 参考文献：

[ 1 ] Barati M ,Esfahani S ,Utigard T A. Energy recovery from high temperature slags[ J ]. *General Information* ,2011 ,36 ( 9 ) 5440 – 5449.

[ 2 ] Liu J ,Yu Q ,Duan W ,et al. Experimental investigation on ligament formation for molten slag granulation[ J ]. *Applied Thermal Engineering* 2014 ,73 888 – 893.

[ 3 ] 刘军祥 ,于庆波 ,谢华清 ,等. 冶金渣颗粒余热回收的实验研究[ J ]. 东北大学学报( 自然科学版 ) ,2014 ,35( 2 ) :

245 – 248.

( Liu Jun-xiang ,Yu Qing-bo ,Xie Hua-qing ,et al. Experimental study on waste heat recovery for metallurgical slag particles [ J ]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science )* , 2014 ,35( 2 ) 245 – 248. )

[ 4 ] Campbell C S. Rapid granular flows[ J ]. *Annual Review of Fluid Mechanics* 2003 ,22( 2 ) 57 – 90.

[ 5 ] Chen J ,Akiyama T ,Nogami H ,et al. Modeling of solid flow in moving beds [ J ]. *ISIJ International* ,1993 ,33 ( 6 ) 664 – 671.

[ 6 ] Natarajan V V R ,Hunt M L. Heat transfer in vertical granular flows [ J ]. *Experimental Heat Transfer* ,1997 ,10( 2 ) 89 – 107.

[ 7 ] 武锦涛 ,陈纪忠 ,阳永荣. 移动床中颗粒接触传热的数学模型[ J ]. 化工学报 2006 ,57( 4 ) 719 – 725.

( Wu Jin-tao ,Chen Ji-zhong ,Yang Yong-rong. Model of contact heat transfer in granular moving bed [ J ]. *Journal of Chemical Industry and Engineering* 2006 ,57( 4 ) 719 – 725. )

[ 8 ] Hiromi T. Particles flow pattern around tube and local in moving heat transfer bed [ J ]. *AIChE Journal* ,1996 ,42( 6 ) : 1621 – 1626.

[ 9 ] Yusuf R ,Halvorsen B ,Melaen M C. Eulerian-Eulerian simulation of heat transfer between a gas - solid fluidized bed and an immersed tube-bank with horizontal tubes [ J ]. *Chemical Engineering Science* 2011 ,66( 8 ) :1550 – 1564.

[ 10 ] Dan C ,Wachs A. Direct numerical simulation of particulate flow with heat transfer[ J ]. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 2010 ,31( 6 ) :1050 – 1057.

[ 11 ] Uhlmann M. An immersed boundary method with direct forcing for the simulation of particulate flows[ J ]. *Journal of Computational Physics* 2005 ,209( 2 ) 448 – 476.

[ 12 ] 陶文铨. 数值传热学[ M ]. 西安 :西安交通大学出版社 , 2001 :1 – 5.

( Tao Wen-quan. Numerical heat transfer [ M ]. Xi'an :Xi'an Jiaotong University Press 2001 :1 – 5. )

( 上接第 641 页 )

#### 参考文献：

[ 1 ] Jonas J J ,Quelenec X ,Jiang L ,et al. The Avrami kinetics of dynamic recrystallization [ J ]. *Acta Materialia* ,2009 ,57 ( 9 ) 2748 – 2756.

[ 2 ] Quelenec X ,Bozzolo N ,Jonas J J ,et al. A new approach to modeling the flow curve of hot deformed austenite [ J ]. *ISIJ International* 2011 ,51( 6 ) 945 – 950.

[ 3 ] Quelenec X ,Jonas J J. Simulation of austenite flow curves under industrial rolling conditions using a physical dynamic recrystallization model[ J ]. *ISIJ International* 2012 ,52( 6 ) : 1155 – 1162.

[ 4 ] 周晓光 ,刘振宇 ,吴迪 ,等. FTSR 热轧含 Nb 钢动态再结晶数学模型中参数的确定[ J ]. 金属学报 ,2008 ,44( 10 ) : 1188 – 1192.

( Zhou Xiao-guang ,Liu Zhen-yu ,Wu Di ,et al. Determination of model parameters of dynamic recrystallization for Nb bearing steels during flexible thin slab-rolling slab rolling [ J ]. *Acta Metallurgica Sinica* 2008 ,44( 10 ) :1188 – 1192. )

[ 5 ] Ma L Q ,Liu Z Y ,Jiao S H ,et al. Effect of Niobium and Titanium on dynamic recrystallization behavior of low carbon steels [ J ]. *Journal of Iron and Steel Research International* , 2008 ,15( 3 ) 31 – 36.

[ 6 ] Fernández A I ,Urraga P ,López B , et al. Dynamic

recrystallization behavior covering a wide austenite grain size range in Nb and Nb-Ti microalloyed steels [ J ]. *Materials Science and Engineering* 2003 ,361( 1/2 ) 367 – 376.

[ 7 ] 陈礼清 ,赵阳 ,徐香秋 ,等. 一种低碳钒微合金钢的动态再结晶与析出行行为[ J ]. 金属学报 2010 ,46( 10 ) 1215 – 1222.

( Chen Li-qing ,Zhao Yang ,Xu Xiang-qiu ,et al. Dynamic recrystallization and precipitation behaviors of a kind of low carbon V-microalloyed steel [ J ]. *Acta Metallurgica Sinica* , 2010 ,46( 10 ) :1215 – 1222. )

[ 8 ] Elwazri A M ,Wanjara P ,Yue S. Dynamic recrystallization of austenite in microalloyed high carbon steels [ J ]. *Materials Science and Engineering* 2003 ,339( 1/2 ) 209 – 215.

[ 9 ] Ghosh G ,Olson G B. The isotropic shear modulus of multicomponent Fe-based solid solutions [ J ]. *Acta Materialia* 2002 ,50( 10 ) 2655 – 2675.

[ 10 ] Seki I ,Nagata K. Lattice constant of iron and austenite including its supersaturation phase of carbon [ J ]. *ISIJ International* 2005 ,45( 12 ) :1789 – 1794.

[ 11 ] Akben M G ,Chandra T ,Plassiard P , et al. Dynamic precipitation and solute hardening in a titanium microalloyed steel containing three levels of manganese [ J ]. *Acta Metallurgica* ,1984 ,32( 4 ) 591 – 601.

[ 12 ] Poliak E I ,Jonas J J. A one-parameter approach to determining the critical conditions for the initiation of dynamic recrystallization [ J ]. *Acta Metallurgica* ,1996 ,44 ( 1 ) 127 – 136.