

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.02.002

# COREX 熔化气化炉物料运动的物理模拟

韩立浩<sup>1</sup>, 罗志国<sup>1</sup>, 邹宗树<sup>1</sup>, 张玉柱<sup>1,2</sup>

(1.东北大学材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2.华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063009)

**摘要:**以 COREX 熔化气化炉实际尺寸和操作参数为基础, 根据相似准则建立了 COREX 熔化气化炉模型, 用以研究气化炉内物料运动过程。实验采用聚乙烯粒子作为模型的填充物料, 并选用绿豆作为示踪颗粒, 分析研究了气化炉内鼓风流量和排料速度对物料运动流型和运动轨迹的影响。结果表明: 随着排料速度的增加, 停留时间减小, 死料柱顶点位置降低, 物料下降运动变得不均匀; 随着鼓风流量的增加, 上部料层的下降更加均匀; 非正常排料时, 熔化气化炉内物料的运动将很不均匀, 气化炉一侧物料的运动并不受另一侧物料的影响; 位于死料柱正上方的颗粒下降速度最慢并向排料口弯曲; 位于风口回旋区正上方的颗粒下降速度最快, 鼓风导致风口回旋区上方的颗粒停留时间减小; 靠近炉墙处的颗粒, 其下降过程一直沿炉墙下降, 直至靠近排料口时发生弯曲。

**关键词:** COREX 熔化气化炉; 物料运动; 流型; 轨迹; 物理模拟

**中图分类号:** TF557

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2015)02-0011-06

## Physical simulation on burden movement in COREX melter gasifier

HAN Lihao<sup>1</sup>, LUO Zhiguo<sup>1</sup>, ZOU Zongshu<sup>1</sup>, ZHANG Yuzhu<sup>1,2</sup>

(1.School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, P.R.China;  
2.College of Metallurgy & Energy, North China University of Science and Technology,  
Tangshan 063009, Hebei, P.R.China)

**Abstract:** Based on the actual size and operation parameters of COREX melter gasifier and the similarity theory, as caled COREX melter gasifier model is established to study the burden movement. The polyethylene particles and mung bean are used as the packed burden and traceparticles, respectively. The effects of blast volume and discharging rate on flow pattern and trajectory are studied in detail. The results reveal that with the increase of discharging rate, the residence time decreases, the top position of deadman reduces, and the descending of burden movement becomes uneven. With the increase of the blast volume, the upper burden descends more even. Under abnormally discharging condition, the burden movement in meltergasifier would become uneven, which would cause uneven gas distribution in the furnace. The flow behavior in one half of the model appears to be independent of the other half. Particles under deadman descending at the slowest velocity tend to bend to the outlet. Particles above the raceway descend at the fastest velocity, and the blast causes the residence time to be reduced. Particles being close to the furnace wall descend along the wall until they get close to the outlet and then bend.

**Key words:** COREX melter gasifier; burden movement; flow pattern; trajectory; physical simulation

**收稿日期:** 2014-11-04

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51174037)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51174037).

**作者简介:** 韩立浩(1985-), 男, 东北大学博士研究生, 主要从事冶金传输原理及反应工程方面的研究, (E-mail)hanlihao\_2004@163.com。

COREX 熔化气化炉是 COREX 炼铁过程中的关键设备,主要用于进行煤的气化、DRI 终还原等,与高炉一样,都是典型的气固逆流反应器。矿石(DRI)和煤(焦炭)等由熔化气化炉上部加入,产生的渣铁由下部排出,纯氧由风口吹入,完成燃烧过程,提供热量及还原性气体。在燃烧过程中伴随有炉料的软化和熔融及运动过程中连续提供空间使炉料重新排列,并在重力作用下不断下降。熔化气化炉的稳定操作与炉料的平稳顺利下降密切相关,一旦某一局部炉料的正常下降条件遭到破坏,会出现管道、难行,甚至悬料等恶性现象,掌握和理解气化炉内的炉料运动对提高气化炉生产率和操作有很重要的意义。因此,很有必要对熔化气化炉内固体炉料的运动行为进行研究。

目前,关于 COREX 熔化气化炉内固体炉料运动行为的研究较少,因此,重点参考对高炉内固体炉料运动行为的文献研究。高炉中对气-固流动的物理模拟研究主要通过缩放的二维扁平或者三维半周物理模型进行<sup>[1-8]</sup>。这些研究得到的结果总结如下:首先,高炉中的固体流动可被分成 4 个区域<sup>[9]</sup>;其次,固体和气体流速影响炉内流动行为<sup>[10-13]</sup>;第三,颗粒尺寸、布料模式、炉型等都会影响炉内炉料运动<sup>[14-16]</sup>。国内外关于气化炉内炉料运动的研究鲜见报道,笔者首次采用物理模拟手段对不同鼓风流量、排料速度对气化炉内固体炉料运动流型及运动轨迹的影响进行了研究。

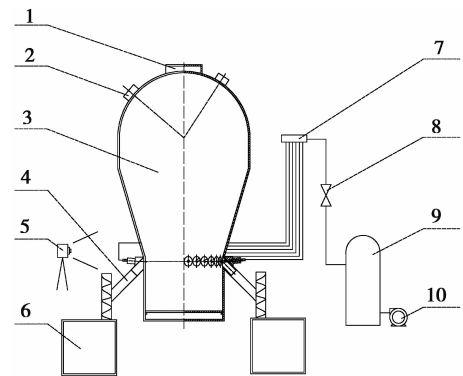
## 1 熔化气化炉物理实验

### 1.1 实验装置

物理实验模型为一个三维半周的熔化气化炉,与原型比例为 1:20,为便于实验观察,模型整体采用有机玻璃制作,14 个风口由侧壁向下 4°的倾角插入,深入炉内 2 mm,压缩空气通过流量控制阀进入风口,采用转子流量计测量气体流量,固体物料排出管与风口同心,实验装置如图 1 所示。

### 1.2 实验方案

为模拟回旋区内焦炭的燃烧消耗,物料由风口附近的螺旋排料机排出,为避免气体泄露,将炉料排到封闭的回收箱中,为便于实验观察,填充颗粒采用聚乙烯颗粒,示踪颗粒选择绿豆,物料性质见表 1。根据因次分析法及方程分析法推导及文献[11-12]的研究,采用的相似准数为弗劳德数  $Fr$ 。利用相似准数可以计算气体流速,同时考虑了由于化学反应产生的气体而导致气体量的变化,空气经空气压缩机压缩后,通过分配器和流量控制装置供应到各个风口,进入物理模型。物理实验参数见表 2 所示。



1—上料口;2—排气口;3—熔化气化炉模型;  
4—螺旋排料机;5—照相机;6—回收料仓;  
7—气体分配器;8—转子流量计;  
9—储气罐;10—空压机

图 1 实验装置

Fig.1 Experimental apparatus

表 1 物料性质

Table 1 Material properties

填充料	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粒径/mm	安息角/(°)
绿豆	1 327.5	3.2~3.6	33.7
聚乙烯粒子	903.3	3.7	38.0

表 2 物理实验参数

Table 2 Physical experiment parameters

因素	鼓风流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	排料速度/( $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ )	床层高度/mm
水平	0,106,138	0.247,0.493,0.740	400

笔者对气化炉内物料运动的研究主要从运动流型和示踪轨迹进行。对颗粒物料流型的研究,考察在吹气和 不吹气两种条件下示踪料的运动情况:在一定填充高度的料面铺上一层示踪颗粒层,设置螺旋排料器的频率,启动螺旋排料器,同时开始计时,每隔指定时间,停止螺旋排料,记录指定径向位置处示踪颗粒的坐标,

并拍照,待示踪颗粒层接近出料口时,停止计时,关闭螺旋排料器;对示踪轨迹的研究,可在气化炉内填充一定高度物料后,在气化炉水平方向从左至右放置有一定间隔的示踪颗粒,每隔一定时间对示踪颗粒进行拍照,记录示踪颗粒的位置,直至有示踪颗粒排出完成实验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 物料运动流型的研究

#### 2.1.1 鼓风流量对物料运动流型的影响

图 2 所示为连续加料、排料速度 0.493 L/h 时,不同鼓风流量下示踪料层的运动流型。从图 2 中可以看出,当鼓风流量为 0,即不吹气时,示踪料层的运动流型在实验初期阶段即出现弯曲现象,随着排料的进行,弯曲程度增大,这是由于示踪颗粒逐渐接近排料口的缘故。相比之下,在鼓风后,即鼓风流量  $106 \text{ m}^3/\text{h}$  和  $138 \text{ m}^3/\text{h}$  时,在实验的初期阶段料层下降较均匀,分析原因是鼓风的存在使得炉内气体对物料下降产生一个方向向上的曳力,使得其下降较均匀,只有当物料运动至模型下方即接近排料口时,料层才有一定程度的弯曲发生,这异于不吹气条件下的结果。图 2(c)是在物料运动至模型下方时,料层发生断裂现象,造成该现象的原因主要是部分示踪颗粒被排出炉外或进入回旋区进行回旋运动。

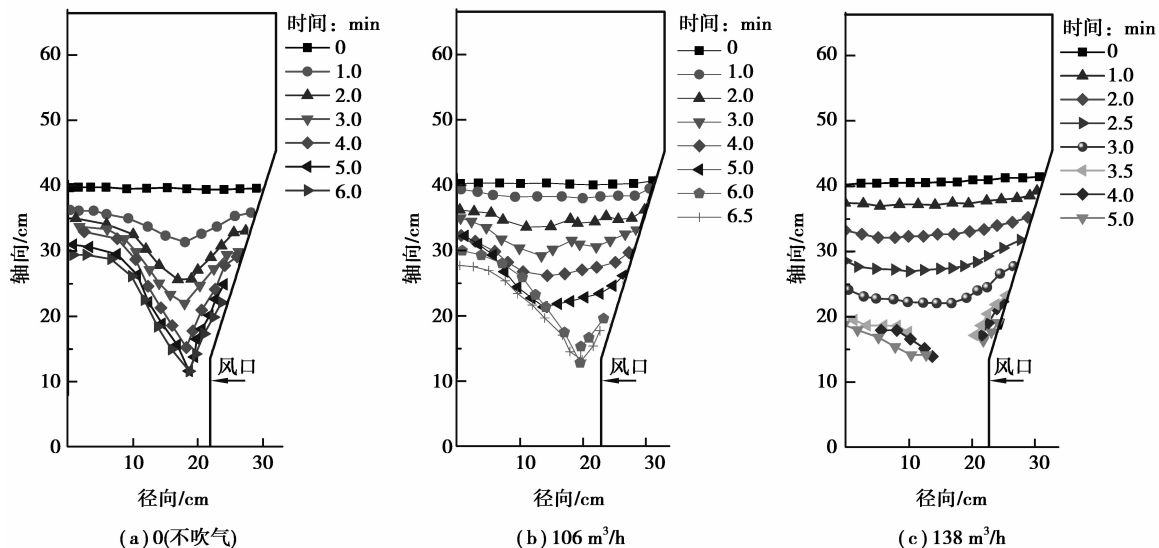


图 2 排料速度 0.493 L/h 时,不同鼓风流量下示踪料层的运动流型

Fig.2 Flow pattern of tracer particles at discharging rate 0.493 L/h under different blowing rates

#### 2.1.2 排料速度对物料运动流型的影响

对示踪料层每隔一定时间进行记录以及拍照,得到示踪料层随时间的变化规律。利用 Image-Pro-Plus 图像处理软件提取示踪颗粒的位置信息,并利用 Origin 制图软件做出曲线图。

利用风口处的螺旋排料来模拟实际中焦炭的消耗,图 3 所示为连续加料、鼓风流量  $106 \text{ m}^3/\text{h}$  时,不同排料速度下,示踪料层的运动流型。由图 3 可知,实验的初始阶段,示踪料层在 3 种排料速度情况下,下降速度都比较缓慢,基本呈直线型向下运动,从侧面说明了位于熔化气化炉上部的物料运动较均匀。随着排料的进行,示踪料层开始发生弯曲,这是物料开始靠近排料口和风口回旋区的缘故。从图 3 中还可看出,随着排料速度的增加,示踪料层的弯曲位置到炉墙的距离减小,物料的停留时间减小,死料柱顶点位置降低。当排料速度为  $0.740 \text{ L/h}$  时,可以看出最后时刻靠近炉墙部分曲线不连续现象说明了此时示踪颗粒已进入回旋区或者已排出炉外,已较难观测到。

排料速度的增加,在一定程度上使得物料运动不均匀,从而会影响煤气流分布。对于实际生产 COREX 熔化气化炉,排料速度的增加反映了焦炭燃烧速度的增加,可以加快死料柱的更新,若排料速度即焦炭燃烧速度控制在适合的范围内,就会保证炉内物料的均匀下降,使炉内 DRI 与煤气流进行充分接触,提高生产率,对炉况顺行起到一定作用。

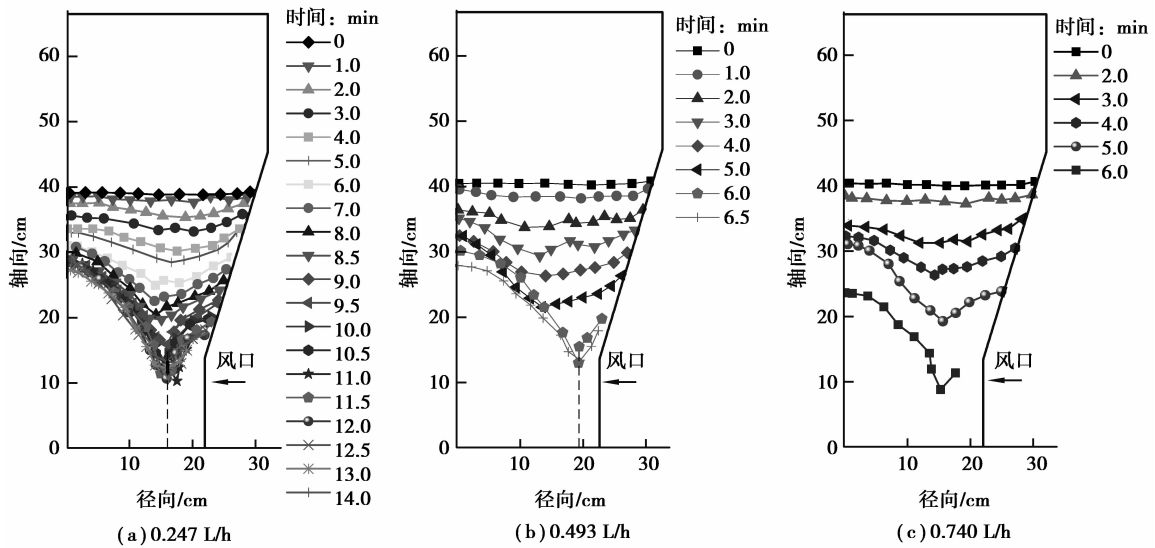


图 3 鼓风流量  $106 \text{ m}^3/\text{h}$  时,不同排料速度下示踪料层的运动流型

Fig.3 Flow pattern of tracer particles at blowing rate  $106 \text{ m}^3/\text{h}$  under different discharging rates

2.1.3 螺旋排料器非正常运转对物料运动流型的影响

图 4 为连续加料时,非正常排料下的物料运动流型。从图 4 中可以看出,初始阶段,示踪料层位置变化不明显,几近呈直线型向下运动,数分钟后,示踪料层开始发生变化,靠近炉墙处即靠近螺旋排料器处的示踪颗粒层发生弯曲。随着排料的进行,物料整体向右侧运动。同一时刻物料下降速度最快的位置几乎全部位于距炉墙 5 cm 处,如图 4 中虚线所示。并且随着时间的推移,其下降速度逐渐增加,而后运动至风口回旋区内,示踪料层出现断层,在实验过程中发现部分示踪颗粒在回旋区内做回旋运动,如图 5 所示。这从侧面进一步说明了在熔化气化炉内螺旋端部和回旋区上方的整个圆周上物料的下落速度是最快的,物料都向其端部和回旋区内运动。从图中还可以看出,气化炉螺旋排料异常时,一侧物料的运动并不受另一侧物料的影响。

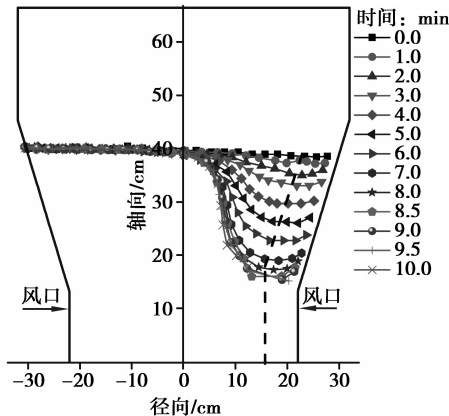


图 4 连续加料时,非正常排料下的物料运动流型

Fig.4 Burden flow pattern under continuous charging and abnormal discharging

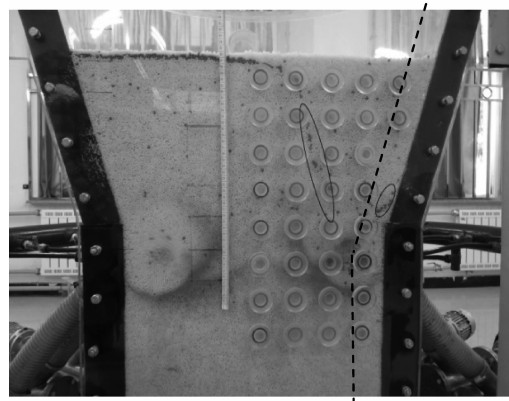


图 5 部分示踪颗粒进入回旋区运动

Fig.5 Some tracer particles moving into raceway

非正常排料时,熔化气化炉内物料的运动将很不均匀,将会导致气化炉内还原煤气分布不均匀,使得熔化气化炉局部煤气流过于发展以至于会形成高温区,影响炉况顺行,从而影响熔化气化炉的连续生产。因此,针对熔化气化炉生产应尽量避免非正常排料情况的发生。

2.2 物料运动轨迹的研究

2.2.1 排料速度对颗粒运动轨迹的影响

为了对气化炉内的物料运动作进一步的研究,并为方便捕捉某一颗粒轨迹,可通过在炉内径向每隔 10 cm 添加一小堆示踪颗粒群(因单一示踪颗粒运动轨迹难捕捉),每隔一定时间记录颗粒群的瞬时位置来进

行描述。对示踪颗粒群进行编号,位于炉中心的示踪颗粒群命名为①号,从左至右依次为②、③、④号,如图 6 所示,由于实验所用熔化气化炉模型的对称性,仅考虑气化炉右半侧区域。

图 7 为不吹气时,不同排料速度下示踪颗粒的运动轨迹。从图 7 中可以看出,排料的初期,物料均匀下降,这是物料远离排料口的缘故。随着排料的进行,可以看出位于炉中心的①号示踪颗粒群下降速度较慢,并且基本呈直线下降,因其位于死料柱正上方;随着排料速度的增加,颗粒向下运动一段距离后略微发生弯曲,但当排料速度为 0.740 L/h 时,弯曲现象较明显,这是因为排料速度的增加使得炉内物料填充比较松散,空隙度较大,导致颗粒受到轻微挤压即改变运动方向;靠近炉墙处的④号颗粒,其下降过程一直沿炉墙下降,直到靠近排料口时发生弯曲;②、③号颗粒的运动轨迹几近相似,但明显的可以看出③号颗粒运动速度较其他位置颗粒快。

### 2.2.2 鼓风流量对颗粒运动轨迹的影响

对比图 7 和图 8 可知,相似之处是①号和④号示踪颗粒运动轨迹相似,但由于鼓风的存在,使得④号示踪颗粒的部分颗粒被吹离炉墙,很快又被卷入风口回旋区消失。对于②、③号颗粒来说,吹气的缘故使得其很快被卷入回旋区,导致其停留时间缩短。

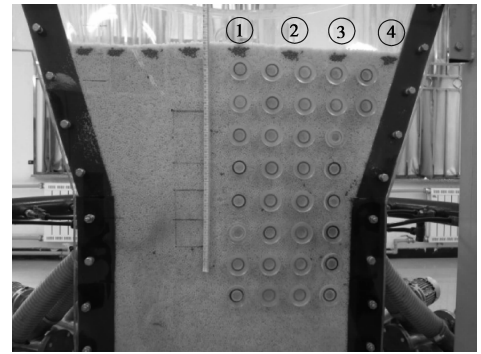


图 6 示踪颗粒群的初始填充位置

Fig.6 Initial packing position of tracer particles

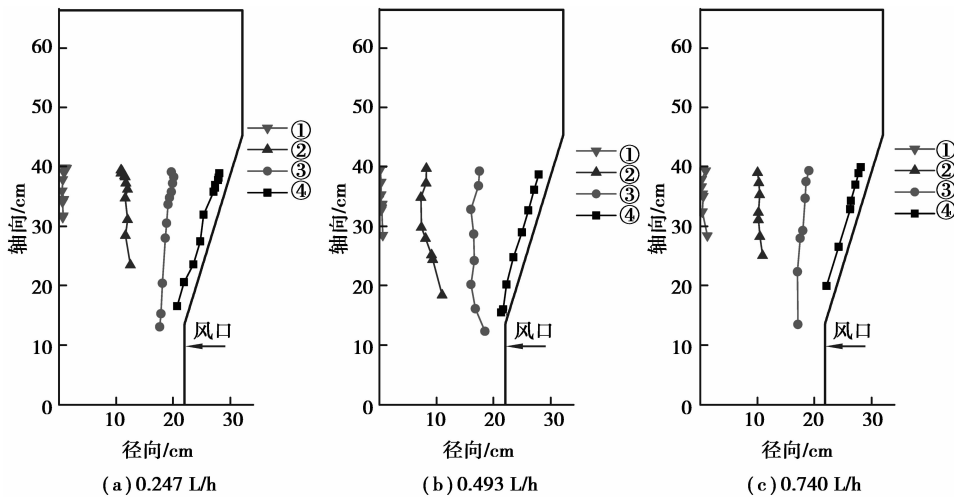


图 7 不吹气时,不同排料速度下示踪颗粒的运动轨迹

Fig.7 Trajectories of tracer particles under no blowing and different discharging rates

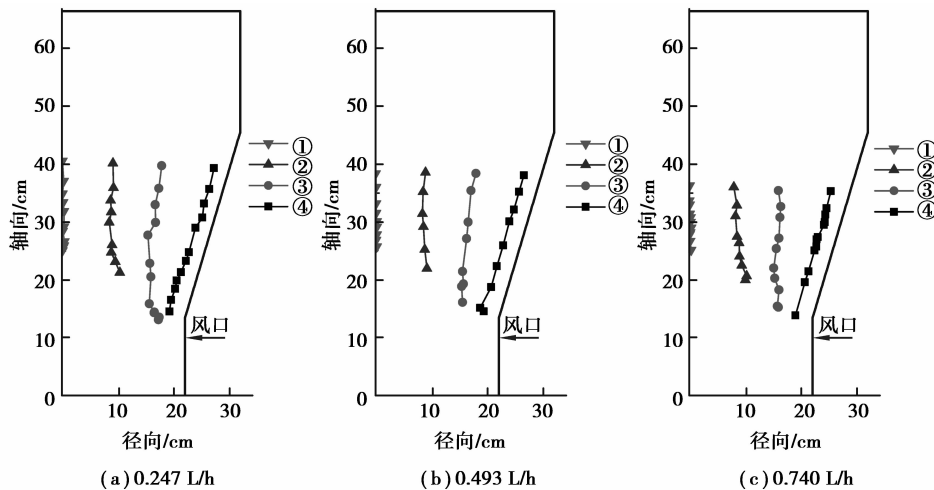


图 8 鼓风流量 106 m<sup>3</sup>/h 时,不同排料速度下示踪颗粒的运动轨迹

Fig.8 Trajectories of tracer particles at blowing rate 106 m<sup>3</sup>/h and different discharging rates

### 3 结 论

1) 随着鼓风流量的增加,上部料层的下降更加均匀,这是由于鼓风的存在使得炉内气体对物料下降产生一个方向向上的曳力的缘故。

2) 随着排料速度的增加,停留时间减小,死料柱顶点位置降低,物料下降运动变得不均匀。

3) 非正常排料时,熔化气化炉内物料的运动将很不均匀,导致炉内还原煤气分布不均匀,使得熔化气化炉局部煤气流过于发展以至于形成高温区,影响炉况顺行,从而影响熔化气化炉的连续生产。因此,针对熔化气化炉生产应尽量避免非正常排料情况的发生。

4) 位于死料柱正上方的颗粒下降速度最慢并向排料口弯曲;位于风口回旋区正上方的颗粒下降速度最快,鼓风导致风口回旋区上方的颗粒停留时间减小;靠近炉墙处的颗粒,其下降过程一直沿炉墙下降,直到靠近排料口时发生弯曲。

#### 参考文献:

- [1] Shimizu M, Kimura Y O, Isobe M, et al. Solids flow in a blast furnace under circumferential imbalance conditions[J]. Tetsu-to-Hagane, 1987, 73(15): 1996-2003.
- [2] Ho C K, Chen Y M, Lin C, et al. On the flow of granular material in a model blast furnace[J]. Powder technology, 1990, 63(1): 13-21.
- [3] Ichida M, Nishihara K, Tamura K, et al. Influence of Inner Wall Profile on Descending and Melting Behavior of Burden in Blast Furnace[J]. ISIJ International, 1991, 31(5): 515-523.
- [4] Takahashi H. Renewal of deadman and solid descending behaviour in a two-dimensional model of a blast furnace[J]. CAMP-ISIJ, 1995, 8(1): 18-21.
- [5] Shinohara K, Saitoh J. Mechanism of solids segregation over a two-dimensional deadman in a blast furnace[J]. ISIJ International, 1993, 33(6): 672-680.
- [6] Yang K, Choi S, Chung J, et al. Numerical modelling of reaction and flow characteristics in a blast furnace with consideration of layered burden[J]. ISIJ International, 2010, 50(7): 972-980.
- [7] Matsui Y, Tanaka M, Sawayama M, et al. Analyses on dynamic solid flow in blast furnace lower part by deadman shape and raceway depth measurement[J]. ISIJ International, 2005, 45(10): 1445-1451.
- [8] Takahashi H, Kawai H, Kobayashi M, et al. Two dimensional cold model study on unstable solid descending motion and control in blast furnace operation with low reducing agent rate[J]. ISIJ International, 2005, 45(10): 1386-1395.
- [9] Wright B, Zulli P, ZhouZY, et al. Gas-solid flow in an ironmaking blast furnace-I: Physical modelling[J]. Powder Technology, 2011, 208(1): 86-97.
- [10] Tamura K, Ichida M, Enokido T, et al. Effect of blast velocity on the behaviour of materials filling and descending in the lower part of the blast furnace[C]. AIME Ironmaking Conference, 1984.
- [11] Takahashi H, Komatsu N. Cold model study on burden behaviour in the lower part of blast furnace[J]. ISIJ International, 1993, 33(6): 655-663.
- [12] Takahashi H, Tanno M, J. Katayama. Burden descending behaviour with renewal of deadman in a two dimensional cold model of blast furnace[J]. ISIJ International 1996, 36(11): 1354-1359.
- [13] Takahashi H, Kawai H, Fukui T, et al. Effects of tuyere gas flow rate and deadman properties on discontinuous behavior of descending solid and gas static pressure in blast furnace-experimental analysis by a three-dimensional cold model[J]. Tetsu to Hagane, 2007, 93(10): 1-10.
- [14] Shimizu M. Dynamics of burden materials and gas flow in the blast furnace[J]. Tetsu to Hagane, 1982, 68(8): 42-51.
- [15] Ichida M, Nishihara K, Tamura K, et al. Influence of ore/coke distribution on descending and melting behaviour of burden in blast furnace[J]. ISIJ International 1991, 31(5): 505-514.
- [16] Guili M, Pinti M, Federico G, et al. Investigation on burden descent in the blast furnace[C] // Proceedings of the Sixth International Iron and Steel Congress, Nagoya, Japan, 1990, 2: 521-526.