选矿与原料预处理

块矿带式机干燥过程数学模拟研究

赵 强[1]，黄明蓉[2]，魏进超[1]，狄瞻霞[2]，马钟琛[1]，春铁军[2]
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；2. 安徽工业大学 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243002）

摘要：本文以块矿带式机鼓风干燥为研究对象，借助 Fluent 软件建立多孔介质床层内质量、动量、能量双方程和以及水分迁移方程的耦合数学模型，研究不同工艺条件下台车去湿量的变化规律。研究结果表明：随着鼓风温度的增加，料层去湿量增大，料层前缘在干燥时间为 150 s 左右发生水汽冷凝；在鼓风速度为 1.43 m/s，鼓风温度为 300 ℃的条件下，料层的去湿量与初始含水量的关系不大；随着鼓风速度的增大，料层去湿量增大，在干燥时间为 360 s，鼓风速度分别为 1.08、1.43、1.79 m/s 时，料层最大去湿量分别为 31%、36%、40%，且速度增大，冷凝区减少，但是冷凝值增大。

关键词：带式机；块矿干燥；多孔介质；数值模拟
中图分类号：TF521；TF3 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)02－0061－06
doi：10.13403/j.sjqt.2022.02.025

Mathematical simulation research on drying process of lump ore in belt press

ZHAO Qiang[1], **HUANG Mingrong**[2], **WEI Jinchao**[1], **DI Zhanxia**[2], **MA Zhongchen**[1], **CHUN Tiejun**[2]
(1. *Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha* 410205, *Hunan*, *China*;
2. *School of Metallurgical Engineering*, *Anhui University of Technology*, *Ma'anshan* 243002, *Anhui*, *China*)

Abstract: The blast drying of lump ore in belt press is taken as the research object. With the help of Fluent software, a coupled mathematical model of mass, momentum, energy double-equation and water migration equations in the bed of porous media is established, and the variation law of the dehumidification amount of the trolley under different process conditions is studied. The results show that: with the increase of the blast temperature, the moisture removal amount of the material layer increases, and the water vapor condensation occurs at the leading edge of the material layer around 150 s; under the conditions of the blast speed of 1.43 m/s and the blast temperature of 300 ℃, the moisture removal amount of the material layer has little relationship with the initial moisture content; with the increase of the blast speed, the moisture removal amount of the material layer increases, and at 360 s, 1.08, 1.43, 1.79 m/s, the maximum moisture removal from the material layer is 31%, 36% and 40%, respectively, and the larger the speed, the less the condensation zone, but the higher the condensation value.

Key words: belt press; lump ore drying; porous media; numerical simulation

高炉使用的含铁原料主要由烧结矿、球团矿和块矿组成。块矿作为调节碱度的主要酸性炉料，其价格比球团矿低 200 元/吨左右，因此，适当提高含铁原料中块矿占比能够有效降低铁水成本[1-3]。部分块矿由于水分质量分数高，表面黏附着大量的粉料，其筛分效果不佳。该块矿如果直接进入高炉会导致上部料柱透气性急剧变差，同时对高炉煤气上升管道造成堵塞，使煤气上升阻力增加，导致高炉内部压差升高，对高炉顺行产生不利影响[4-6]。针对该问题，国内部分钢铁企业进行了块矿干燥的工业实践。带式机干燥虽然投资成本相对较高，

收稿日期：2021－08－02；**修回日期**：2021－09－07
基金项目：中国博士后科学基金面上项目(2019M662130)
作者简介：赵 强(1983—)，男，博士，高级工程师，从事固废资源综合利用方面的研究工作。
通讯作者：春铁军(1984—)，男，博士，教授，从事铁矿烧结球团新技术和理论方面的研究工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

但其干燥温度区间为250～450 ℃，低于块矿热爆温度，块矿回收率高，同时具有处理量大、干燥效率高等优点。随着块矿干燥被越来越多钢铁企业重视，块矿带式机干燥将具有广阔的应用前景。

已有部分研究人员针对球团的干燥进行了相关研究。LJUNG 等[7]通过研究液体毛细传输和内部蒸发的机理，建立了单个球形铁矿球团的干燥过程数学模型，结果表明：空气湿度的影响始于表面蒸发阶段，但随着表面蒸发阶段的延长，空气湿度对表面蒸发阶段的影响逐渐减小。TSUKERMAN 等[8-9]通过建立单球团的干燥速率模型来研究干燥动力学，并将该干燥速率模型用于研究料层的干燥过程。李洋等[10]利用计算流体动力学和多孔介质理论对球团干燥过程中冷凝与蒸发进行研究，依据局部非热力学平衡模型，建立了单个球团干燥过程的数学模型。郭建慧等[11]借助 Fluent 软件建立了球团干燥过程数学模型，该模型能够较为准确地反映出料层温度场分布。

本文以块矿带式机干燥过程为研究对象，借鉴已有球团干燥的研究基础，参照多孔介质和传热传质理论，建立块矿在带式机与气流进行热交换的水分蒸发干燥数学模型，研究不同工艺条件下块矿去湿量的变化，以期为块矿带式机干燥过程生产工艺参数的设计和优化提供理论支持。

1 数学模型

1.1 模型建立

1.1.1 模型假设

块矿干燥过程是一个不稳定过程，物料中的质量、动量和能量相互传递和耦合，包含气相和块矿的耦合传热、气相在块矿内的内传导、水分的蒸发与冷凝等现象。本文考虑计算可行性和真实性，对研究对象简化为二维模型进行研究，具体如下：

（1）块矿料层为多孔介质，且分布均匀。

（2）仅考虑垂直于台车底面的气相运动，忽略块矿与气相水平方向的相对流动。

（3）忽略块矿之间以及块矿与外界的辐射传热。

（4）假定料层宽度方向各项参数稳定，无波动变化。

1.1.2 控制方程

带式机内块矿干燥过程遵循动量、质量和能量守恒三大定律，其基本控制方程如下。

（1）气相连续性方程。

$$\frac{\partial \varepsilon \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \bar{u}) = S_g \tag{1}$$

式中：ε 为空隙率，即料层中空隙的体积比；ρ_g 为气相密度，kg/m^3；u 为气体流动的表观速度，m/s；t 为时间，s；S_g 为源项，用来描述水向气相的迁移，计算方法参考文献[12]。

（2）气相动量守恒方程。

$$\rho_g \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\rho_g \nabla \cdot \bar{u})\bar{u} = -\nabla p_g + \nabla \cdot (\mu \nabla \bar{u}) + S_i \tag{2}$$

式中：p_g 为气相压力，Pa；μ 为气相黏性系数，kg/(m·s)；S_i 是描述多孔介质阻力的源项，采用 Ergun 方程计算黏性和惯性阻力系数。

（3）水分迁移方程。

$$\frac{\partial (\varepsilon \rho_g w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \bar{u} w) = \nabla \cdot (\rho_g D_f \nabla w) + S_w \tag{3}$$

式中：w 为气体含湿量，kg/kg；D_f 为水蒸气的有效扩散系数，m^2/s；S_w 描述块矿的干燥速率，kg/(m^3·s)，计算方法参考文献[12]。

本文 S_w 采用下面的形式：

$$S_w = -(1-\varepsilon)\frac{\partial W_p}{\partial t} \tag{4}$$

式中：W_p 为块矿料层的含湿量，kg/m^3。

（4）能量守恒方程。块矿料层内固体骨架与气体温差明显，两相在同一位置热力学不平衡，需要考虑它们之间的内部传热。因此，采用双方程模式建立固体骨架和气相的能量方程。

固相能量方程：

$$(1-\varepsilon)(\rho_s c_s)\frac{\partial T_s}{\partial t} = (1-\varepsilon)\ \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T_s) + h_v (T_g - T_s) - h_s S_w \tag{5}$$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

气相能量方程：

$$\varepsilon(\rho_g c_p)\frac{\partial T_g}{\partial t}+(\rho_g c_p)\bar{u}\cdot\nabla T_g=\varepsilon\nabla\cdot(\lambda_g\nabla T_g)+h_v(T_g-T_s)+h_s S_w \quad (6)$$

式中：ρ_s 为块矿密度，kg/m^3；T_s、T_g 分别为块矿、气相温度，K；c_s、c_p 分别为块矿气相比热，J/(kg·K)；λ_s 和 λ_g 分别为块矿的导热系数，W/(m·K)；h_v 为气固两相间的单位体积传热系数，W/(m^3·K)；h_s 为水分的蒸发潜热，J/kg。

由于 Fluent 软件没有水分迁移方程和双能量方程模型，故本文在求解之前需要使用 UDS(用户自定义标量)来建立(3)、(5)、(6)三个方程。

1.1.3　模型参数条件及计算方案

本文以台车上的料层为研究对象，块矿料层为多孔介质，空隙度为 0.4，台车长度为 10 m，料层高度为 0.4 m，块矿初始温度为 25 ℃，台车运行速率为 1.67 m/min。数学模型模拟过程中，假定块矿填充满料床(10 m×0.4 m)，料床固定不动，气相从料层左侧开始以台车移动速度逐渐进入料层，即左侧料层一直处于加热状态。具体模型计算方案如表 1 所示。

表 1　块矿带式机干燥过程数学模型计算方案

Table 1　Calculation scheme of mathematical model of drying process of lump ores in the belt press

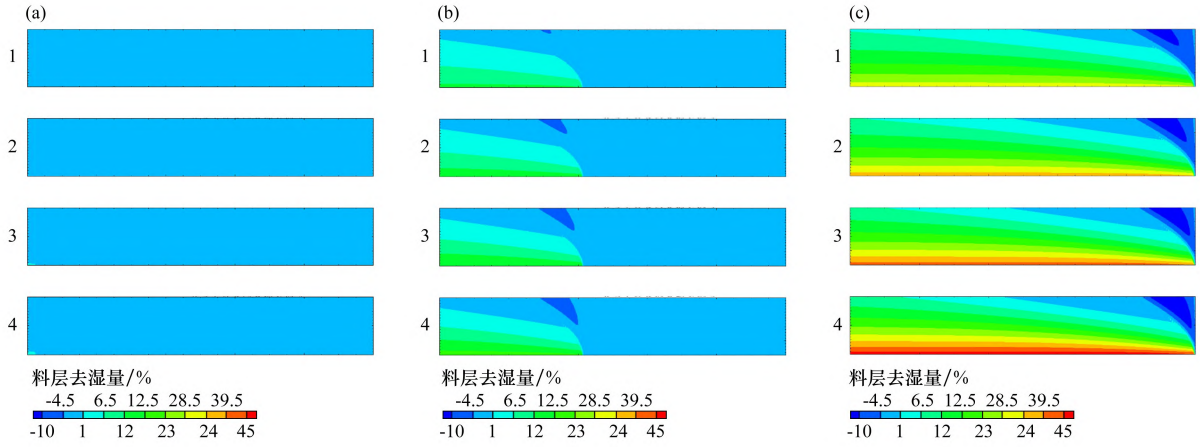
方案编号	温度/K	矿层初始含水量/%	鼓风速度/(m·s^{-1})
1	523.15	7	1.08
2	573.15	10	1.43
3	623.15	13	1.79
4	673.15	—	—

2　模拟结果与讨论

通过已建立的数学模型，保持台车速度为 1.67 m/min、料床长度为 10 m 不变，讨论不同鼓风温度、料层初始含湿量以及鼓风温度条件对料层去湿量变化的影响。

2.1　鼓风温度的影响

在鼓风速度为 1.43 m/s，料层初始含水量为 10%，不同鼓风温度条件下，干燥时间为 360 s 时内料层的去湿量随时间的变化如图 1 所示(图中料层高度为 0.4 m；台车长度为 10 m)。



时间/s：(a) 10；(b) 150；(c) 360

鼓风温度/℃：1—250；2—300；3—350；4—400。

图 1　鼓风温度对去湿量的影响

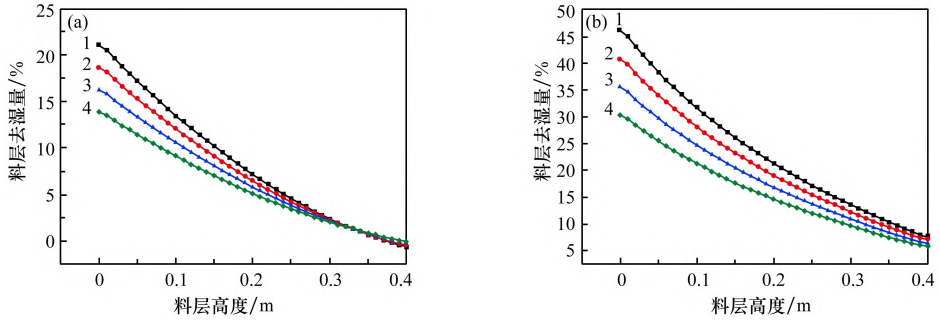
Fig. 1　The influence of blast temperature on the amount of dehumidification

从图 1 可看出，当干燥时间为 10 s，鼓风温度为 250～300 ℃时，料层去湿量基本没有变化，整体保持一致。当鼓风温度为 350～400 ℃时，左侧底层炉料开始出现去湿量变化；且随着时间的增加，不同鼓风温度下的左侧底层炉料均开始去湿，且炉料去湿的范围随时间增加而不断增大。当干燥时间为 150 s 时，各料层前缘上部的去湿量数值均开始出现负数，说明开始出现不同程度的水汽冷凝，且鼓风温度越高，料层前缘上部的去湿量负值越大，水汽冷凝程

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

度越大；且水汽冷凝程度随时间的增加而不断增大。同时料层左侧中下部的去湿量也随着时间的增加而升高。当干燥时间为 360 s 时，整个台车的炉料均处于鼓风去湿状态，在 250、300、350、400 ℃时，料层最大去湿量分别为 31%、36%、42%、47%。可以看出，鼓风时间一定时，随着温度的增加，料层去湿量升高。

料层左侧一直处于鼓风去湿状态，设置 x 为与料床最左侧的距离。得到在鼓风速度为 1.43 m/s，料层初始含水量为 10% 时，不同鼓风温度条件下，$x=0.001$ m 处料层的去湿量随料层高度变化分布如图 2 所示。



干燥时间/s：(a) 160；(b) 350

鼓风温度/℃：1—400；2—350；3—300；4—250。

图 2 不同鼓风温度条件下料层去湿量随料层高度变化分布($x=0.001$ m)

Fig. 2 Distribution of material layer dehumidification with the material layer height under different blast temperature conditions ($x=0.001$ m line)

从图 2 可看出，当干燥时间为 160 s 时，鼓风气体温度越高，料层去湿量越高，在 250、300、350、400 ℃底部炉料的去湿量分别为 13.7%、16.2%、18.8%、21.3%，两两之间相差 2.5% 左右；顶部的去湿量分别为 0、−0.2%、−0.5%、−0.9%，温度越高负值越大，这是因为下部料层被高温气体带走的水汽在料层上部发生冷凝，温度越高从料层下部带走的水汽越多，冷凝水越多。当干燥时间为 350 s 时，250、300、350、400 ℃底部炉料的去湿量分别为 30.5%、35.8%、41%、46.3%，两两之间相差 5.3% 左右，较干燥时间为 160 s 时的差值更大；顶部的去湿量分别为 5.6%、6.5%、7.0%、7.3%，较干燥时间为 160 s 时的去湿量增大，冷凝水全部被热气体带走。可以看出，料层去湿量随着料层高度的增加而降低，随着鼓风时间的增加而逐渐升高。

2.2 料层初始含湿量的影响

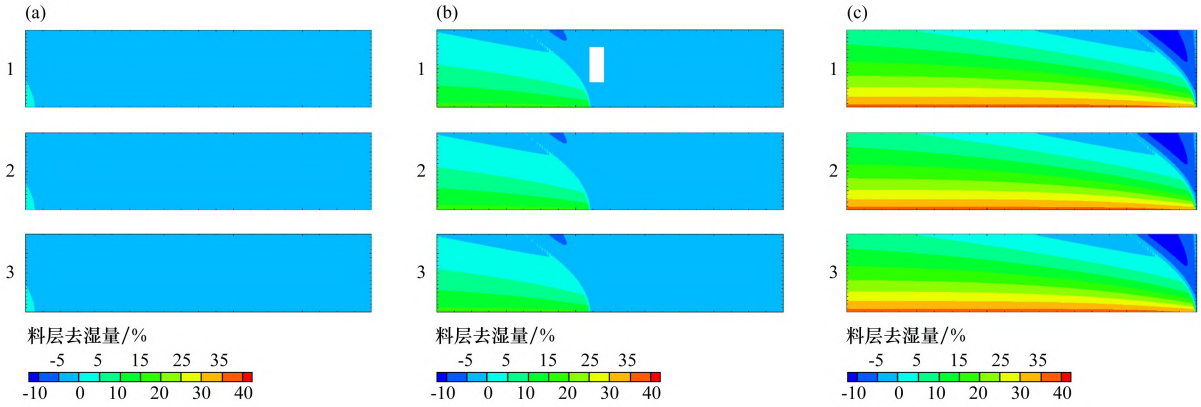
在鼓风速度为 1.43 m/s，鼓风温度为 300 ℃，不同料层初始含湿量条件下，当干燥时间为 360 s 时内料层的去湿量随时间的变化如图 3 所示。

从图 3 可看出：不同初始含湿量条件下，相同时刻的图形基本无变化，即去湿量变化和水汽冷凝程度基本相同。当干燥时间为 10 s 时，各温度下的底部料层均开始去湿，去湿量和去湿范围一致；当干燥时间为 160 s 时，各温度下的料层前缘上部的去湿量均开始出现负值，且去湿量和负值范围相同，说明已出现水汽冷凝现象；当干燥时间为 360 s 时，料层底部去湿量较干燥时间为 160 s 时增大，前缘的水汽冷凝范围也增大，即随着时间的增加，料层去湿量升高，前缘冷凝范围亦扩大。

鼓风速度为 1.43 m/s，鼓风温度为 300 ℃，不同料层初始含水量条件下，$x=0.001$ m 处料层的去湿量随料层高度的变化如图 4 所示。

图中 3 条曲线重合，料层初始含湿量不同，但同一时刻下的料层去湿量基本相同。从图 4 可看出，当干燥时间为 160 s 时，料层底部去湿量为 16.2%，上部去湿量为 −0.2%（水汽冷凝），料层去湿量随着料层高度的增加而降低；当干燥时间为 360 s 时，料层底部去湿量为 36.3%，上部去湿量为 7.0%，料层去湿量随时间的增加而升高。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

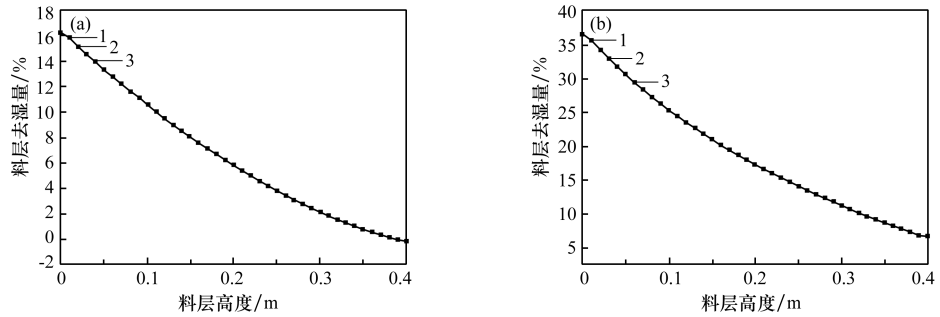


干燥时间/s：（a）10；（b）160；（c）360

料层初始含湿量/%：1—7；2—10；3—13。

图 3　料层初始含湿量对去湿量的影响

Fig. 3　Effect of initial layer moisture content on dehumidification



干燥时间/s：（a）160；（b）360

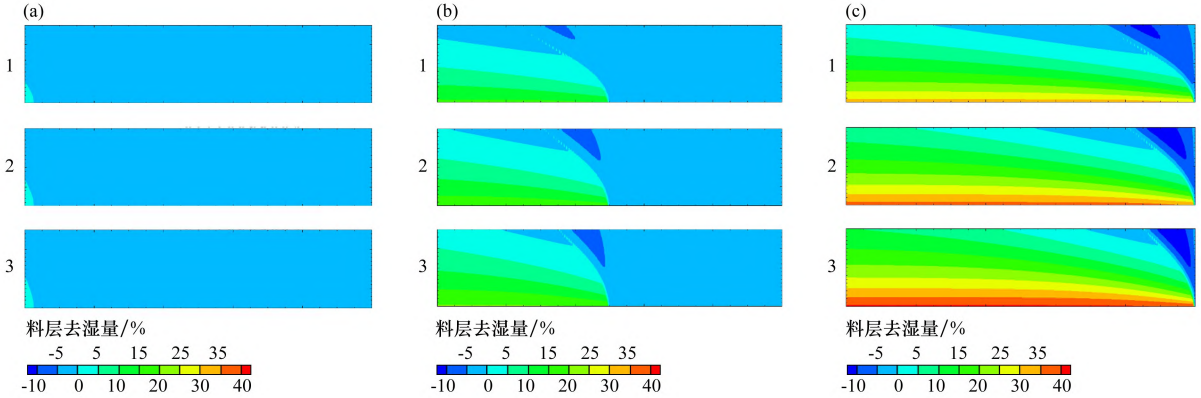
料层初始含湿量/%：1—7；2—10；3—15。

图 4　不同料层初始含湿量条件下料层含湿量随料层高度变化分布（$x=0.001$ m）

Fig. 4 Distribution of material layer dehumidification with the height of material layer under different initial moisture content（$x=0.001$ m）

2.3　鼓风速度的影响

鼓风温度为 300 ℃，料层初始含水量为 10%，不同鼓风速度条件下，干燥时间为 360 s 内料层的去湿量随时间的变化如图 5 所示。



干燥时间/s：（a）10；（b）180；（c）360

鼓风速度/（$m\cdot s^{-1}$）：1—1.08；2—1.43；3—1.79。

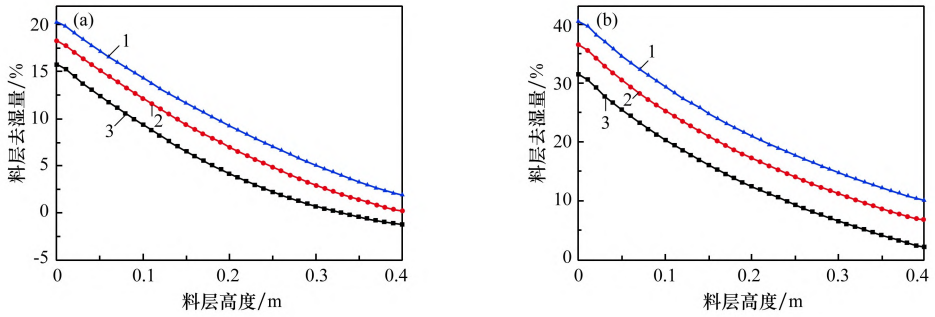
图 5　鼓风速度对去湿量的影响

Fig. 5　Effect of blast speed on dehumidification

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

从图 5 可看出：干燥时间为 10 s 时，1.08、1.43、1.79 m/s 鼓风速度的去湿范围高度分别为 0.11、0.14、0.16 m；干燥时间为 180 s 时，不同鼓风速度条件下，炉料前缘上部去湿量均为负值，即均出现水汽冷凝，底层炉料的去湿范围不断扩大，速度为 1.79 m/s 的去湿量范围较速度为 1.43 m/s 和 1.08 m/s 的大；干燥时间为 360 s 时，速度为 1.79 m/s 的炉料前缘上部去湿量负值较 1.43 m/s 和 1.08 m/s 的大，水汽冷凝量较其他速度的大，但冷凝区域减小，同时，料层其他区域的去湿量较其他速度的多。

在鼓风温度为 300 ℃，料层初始含水量为 10%，不同鼓风速度条件下，$x=0.001$ m 处料层的去湿量随料层高度变化分布如图 6 所示。



干燥时间/s：(a) 180；(b) 360

气体速度/(m·s^{-1})：1—1.08；2—1.43；3—1.79。

图 6 不同鼓风速度条件下料层去湿量随料层高度变化分布（$x=0.001$ m）

Fig. 6 Distribution of material layer dehumidification with the height of material layer under different blast speeds ($x=0.001$ m)

从图 6 可以看出：干燥时间为 180 s 时，1.08、1.43、1.79 m/s 的底部炉料去湿量分别为 15.8%、18.3%、20.1%，顶部去湿量分别为 -1.2%、0.1%、2.0%；干燥时间为 360 s 时，1.08、1.43、1.79 m/s 的底部炉料去湿量分别为 30.8%、38.2%、41.0%，顶部去湿量分别为 2.5%、7.0%、10.1%。料层去湿量随料层高度的增加而下降，随气体速度、时间的增加均升高。

3 结 论

（1）料层去湿量随着鼓风温度的增加而升高。在 250、300、350、400 ℃时，下部料层在干燥时间为 360 s 的最大去湿量分别为 31%、36%、42%、47%。由于料层前缘在干燥时间为 150 s 左右发生水汽冷凝，料层去湿量随着料层高度的增加而降低。

（2）在鼓风速度为 1.43 m/s，鼓风温度为 300 ℃，不同初始含湿量的条件下，料层去湿量和水汽冷凝程度基本相同；且随着时间的增加，料层去湿量增大，前缘冷凝范围亦扩大。

（3）料层去湿量随着鼓风速度的增加而升高。1.08、1.43、1.79 m/s 时，下部料层在干燥时间为 360 s 的最大去湿量分别为 30.8%、38.2%、41.0%；随着气体速度、时间的增加，料层去湿量均升高。

参考文献：

[1] 陆亚男，霍红艳，高远，等. 邯钢高炉低烧比炉料结构的优化[J]. 中国冶金，2020，30(11)：66－71.
LU Yanan，HUO Hongyan，GAO Yuan，et al. Optimization for BF burden with low－proportion sinter of Hansteel[J]. China Metallurgy，2020，30(11)：66－71.

[2] 李胜，何志军，李云飞，等. 不同球团矿和块矿配加条件下炉料冶金性能[J]. 钢铁，2020，55(1)：6－11.
LI Sheng，HE Zhijun，LI Yunfei，et al. Metallurgical properties of furnace charge under different conditions of pellet ore and block ore addition[J]. Iron & Steel，2020，55(1)：6－11.

[3] 焦玉书. 国外铁矿业发展的新态势[J]. 矿业工程，2003，2(1)：22－27.
JIAO Yushu. New trend of development of iron ore mining industry in foreign countries[J]. Mining Engineering，2003，2(1)：22－27.

（下转第 80 页）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

on iron separation from red mud by bayer process[J]. Metal Mine,2009(9):176 – 178.

[10] RAI S, NIMJE M. J, CHADDHA M J, et al. Recovery of iron from bauxite residue using advanced separation techniques[J]. Minerals Engineering,2019,134:222 – 231.

[11] 张淑敏,袁帅,韩跃新,等. 气基还原焙烧—弱磁选回收赤泥中铁矿物试验[J]. 金属矿山,2018(6):179 – 182.
ZHANG Shumin, YUAN Shuai, HAN Yuexin, et al. Experimental study on recovery of iron from red mud by gas-based reduction roasting-low intensity magnetic separation[J]. Metal Mine,2018(6):179 – 182.

[12] LI P, LIU Z, YAN H, et al. Recover iron from bauxite residue (red mud)[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2019,252:042037.

[13] 邵国强,谢朝晖,闫冬,等. 强磁选和流态化磁化焙烧联合工艺回收赤泥中的铁[J]. 中国粉体技术,2019,25(6):1 – 6.
SHAO Guoqiang, XIE Zhaohui, YAN Dong, et al. Recovery of iron from red mud by combined high intensity magnetic separation and fluidized magnetization roasting[J]. China powder technology,2019,25(6):1 – 6.

[14] 李光辉,刘牡丹,姜涛,等. 高铝铁矿石工艺矿物学特征及铝铁分离技术[J]. 中南大学学报(自然科学版),2009,40(5):1165 – 1171.
LI Guanghui, LIU Mulan, JIANG Tao, et al. Process mineralogy of high alumina iron ore and its Separation technology[J]. Journal of central south university (science and technology),2009,40(5):1165 – 1171.

[15] 王健月,崔卫华,张以河,等. 拜耳法赤泥中铁的强磁选预富集—深度还原—弱磁选试验[J]. 金属矿山,2016(1):60 – 64.
WANG Jianyue, CUI Weihua, ZHANG Yihe, et al. Experimental study on preconcentration, deep reduction and low intensity magnetic separation of iron in bayer process red mud[J]. Metal Mine,2016(1):60 – 64.

[16] 曾超,何维. 赤泥物相的X射线粉末衍射Rietveld法定量分析研究[J]. 冶金分析,2014,34(8):1 – 6.
ZENG Chao, HE Wei. Quantitative analysis of red mud phase by X-ray powder diffraction rietveld method[J]. Metallurgical analysis,2014,34(8):1 – 6.

[17] 刘世丰,刘世鸿,曾建民. 热处理赤泥的物相及粒径和比表面积[J]. 矿产综合利用,2020(5):169 – 178.
LIU Shifeng, LIU Shihong, ZENG Jianmin. Phase, particle size and specific surface area of heat-treated red mud[J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2020 (5): 169 – 178.

(上接第66页)

[4] 刘立广,陈生利. 韶钢6号高炉提高块矿比攻关实践[J]. 南方金属,2019,230(5):37 – 39.
LIU Liguang, CHEN Shengli. The practice of improving ratio of lump ore for BF 6# at SGIS[J]. Southern Metals, 2019, 230(5):37 – 39.

[5] 孟德尚,王佳兴. 华西北钢热球团矿烘干块矿生产实践[C]//2008年河北冶金学会炼铁技术暨学术年会. 石家庄:河北省冶金学会,2008,223 – 224.
MENG Deshang, WANG Jiaxing. Production practice of drying lump ore in hot pellet mine of West North Steel[C]//Iron making technology and academic annual meeting of Hebei Metallurgical Society in 2008. Shijiazhuang: Hebei Metallurgical Society,2008,223 – 224.

[6] CLIXBY G. Influence of softening and melting properties of burden properties of burden materials on blast furnace operation[J]. Ironmaking and Steelmaking,1986(13):169.

[7] LJUNG A L, STAFFANLUNDSTR M T, DANIEL B, et al. Influence of air humidity on drying of individual iron ore pellets[J]. Drying Technology: An International Journal, 2011, 29(9 – 12):1101 – 1111.

[8] TSUKERMAN T, DUCHESNE C, HODOUIN D. On the drying rates of individual iron oxide pellets[J]. International Journal of Mineral Processing,2007,83(3 – 4):99 – 115.

[9] 潘姝静,宋彦坡,彭小奇,等. 链箅机球团矿干燥过程多场耦合数值模拟[J]. 钢铁研究,2012(6):11 – 15.
PAN Shujing, SONG Yanpo, PENG Xiaoqi, et al. Numerical simulation for coupled multi – field transfer on pellet drying process in travelling grate[J]. Research on Iron and Steel, 2012(6):11 – 15.

[10] 李洋,李伯全,张西良,等. 球团干燥过程的数学建模与数值模拟研究[J]. 烧结球团,2018,43(4):36 – 42.
LI Yang, LI Boquan, ZHANG Xiliang, et al. Mathematical modeling and numerical simulation of pellet drying process[J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(4):36 – 42.

[11] 郭建慧,李伯全,谢鸥. 基于Fluent的球团干燥过程仿真分析[J]. 信息技术,2015(2):22 – 25.
GUO Jianhui, LI Boquan, XIE Ou. Analysis of the pellet layer the process of drying based on Fluent[J]. Information Technology,2015(2):22 – 25.

[12] 潘姝静. 链箅机球团矿干燥过程多场耦合数值模拟与优化[D]. 长沙:中南大学,2012.
PAN Shujing. Numerical simulation and optimization for coupled multi – field transfer on the iron ore pellets drying process in the grate[D]. Changsha: Central South University,2012.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net