

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2024.04.009

基于床层传热的皮江法炼镁过程优化

傅大学^{1,2,3}, 狄跃忠^{1,2}, 王耀武^{1,2}

(1. 东北大学 多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 3. 福建省长汀金龙稀土有限公司, 福建 龙岩 366300)

摘要: 球团在还原罐内传热导致的温度梯度是限制皮江法还原反应的关键因素. 本文采用数值方法研究了球团尺寸、装料方式、还原罐外壁温度等因素对床层温度分布、还原率分布的影响. 结果表明: 在球团直径为 22.3 mm、还原时间相同时能够获得最大的还原率; 生产过程中应尽量提高还原罐外壁温度; 床层中心区域温度低, 还原反应速率慢, 反应滞后; 通过中心留空的方法能够有效缩短还原周期, 提高原料利用率; 以单位体积、单位时间镁的产量为依据, 对于内径为 270 mm 的还原罐, 当中心留空区域的直径小于 27 mm 时, 可获得最大生产效率.

关键词: 镁; 皮江法; 真空硅热还原; 数值仿真; 传热

中图分类号: TF 822 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)04-0523-07

Optimization of Mg Production by Pidgeon Process Based on Heat Transfer in the Bed

FU Da-xue^{1,2,3}, DI Yue-zhong^{1,2}, WANG Yao-wu^{1,2}

(1. Key Laboratory for Ecological Utilization of Multimetallic Mineral (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Fujian Changting Golden Dragon Rare-Earth Co., Ltd., Longyan 366300, China. Corresponding author: FU Da-xue, E-mail: lllow@126.com)

Abstract: The temperature gradient in pellets bed caused by heat transfer is a key factor which limits the reduction reaction in the Pidgeon process. In this paper, the effects of some factors, such as pellet size, charging pattern, temperature of the outer wall of the retort on the temperature distribution and reduction ratio distribution in the bed are studied with numerical method. The results show that the maximum reduction rate can be obtained when the pellet diameter is 22.3 mm and the reduction time is the same. The temperature of the outer wall of the retort should be increased as much as possible in the production process. The closer to the central area of the bed, the lower is the temperature, and the lower is the reduction ratio, and reduction reaction lags. The method by making an empty central region can effectively shorten the reduction cycle and improve the utilization ratio of raw materials. The optimal size of the empty central region is less than 27 mm diameter based on Mg yield per unit volume and unit time by taking operation time and reduction time into consideration for the retort with inner diameter 270 mm.

Key words: Mg; Pidgeon process; vacuum silicothermic reduction; numerical simulation; heat transfer

金属镁性能优良, 广泛应用于汽车、航空航天、医疗等领域^[1-3]. 然而, 镁的生产过程属于高能耗、高排放的冶金工艺^[4], 不能满足可持续发展的

要求. 目前, 世界总产量 85% 以上的金属镁是利用皮江法生产, 其生成流程如图 1 所示. 首先将白云石 ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) 煅烧获得煅白 ($\text{CaO} \cdot$

收稿日期: 2022-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21878045); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2225019); 辽宁省自然科学基金资助项目(2022-MS-106); 中国博士后科学基金资助项目(2022M710701).

作者简介: 傅大学(1986-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学副教授.

MgO); 然后与还原剂硅铁、矿化剂萤石按比例混合、细磨、压块, 将团块放入真空还原罐中, 在 $1\ 100 \sim 1\ 300\ ^\circ\text{C}$ 进行真空热还原, 生成的镁蒸气在结晶器中冷凝, 反应如式(1)所示; 还原结束后, 破除真空, 取出结晶镁, 经精炼、铸锭后获得商品镁. 皮江法发展至今, 经过不断改进, 如自动化控制程度的提高^[5]、蓄热燃烧技术的应用等, 在能耗和污染方面已有很大改善, 但仍存在能耗高、生产效率低的问题. 在所有工序中, 还原工序的能耗最高, 生产 $1\ \text{t}$ 镁在还原过程的能耗占总能耗的 50% 以上^[4].

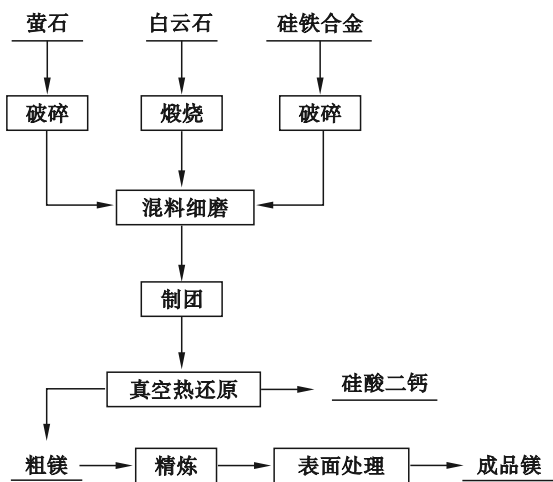
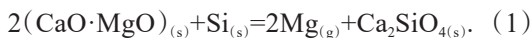


图 1 皮江法的工艺流程

Fig. 1 Flow chart of Pidgeon process



球团在还原罐中传热差导致皮江法还原周期长, 这是还原过程能耗高的主要原因之一^[6-11]. Wynnyckyj 等^[7]研究发现工业还原罐中, 温度梯度的存在使得镁蒸气从较热的区域转移至较冷的区域, 并与硅酸钙反应, 导致局部 MgO 过剩, 是限制还原的关键因素. Toguri 等^[8]认为温度对还原过程影响较大, 单一球团在 $1\ 165\ ^\circ\text{C}$ 还原 $1\ \text{h}$, 还原率仅为 48%, 而在 $1\ 280\ ^\circ\text{C}$ 还原 $1\ \text{h}$, 还原率达到 80%. 一些研究者^[9-11]采用数值方法分析了皮江法炼镁过程球团在还原罐内的升温规律, 根据 Li 等^[10-11]的研究结果, 热量由还原罐外部向内层传递, 化学反应主要发生在 $1 \sim 2$ 层内, 传热是限制化学反应的主要因素, 加热 $6 \sim 8\ \text{h}$ 后, 处在还原罐中心区域(半径小于 $50\ \text{mm}$)的球团温度仅能达到 $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ (仍未能达到理想反应温度).

一些研究者提出通过改变还原罐的形状来改善还原罐内球团床层的传热. 吴永^[12]研究了用蜂窝煤式盘料代替核桃状球团, 并应用端面积相当的圆板缩芯模型和体积相当的虚拟圆筒柱缩芯模型合成法导出其宏观动力学模型, 证明较传

统团料, 蜂窝煤式盘料可缩短还原时间; 冯俊小等^[13]通过改进布料方式缩短硅热法炼镁还原周期, 提出一种新型的带孔和槽的球团, 并采用数值方法给出了优化的球团参数. 夏德宏等^[14]发明了一种还原罐径向传热强化器, 借助数值方法证明这种装置可缩短镁还原周期近 30%, 且可实现金属镁还原炉的机械化装出料. Yu 等^[15]提出了一种具有中心悬挂的竖罐装置, 装满球团后, 热量可以通过一些预留的狭缝辐射进入还原罐中心区域, 并利用数值方法研究了球团在该装置内的温度分布. 虽然通过设计新型的团块形状或还原罐结构在一定程度上有助于强化传热, 但这些结构相对复杂, 增加了工业应用的难度.

综上所述, 改善球团在还原罐内的传热有助于缩短还原周期、提高生产效率. 目前, 优化床层传热相关的研究总体较少, 仍需开展大量的研究工作. 数值方法已经广泛地应用于研究炼镁过程的传热传质^[9-11, 16-18], 本文利用数值方法研究球团尺寸及装料方式, 改善球团在床层内的还原过程, 主要研究球团尺寸、装料方式、还原罐外壁温度等因素对床层温度分布、还原率分布的影响.

1 模型的建立及计算方法

1.1 建立几何模型

图 2 为工业还原罐及几何模型示意图.

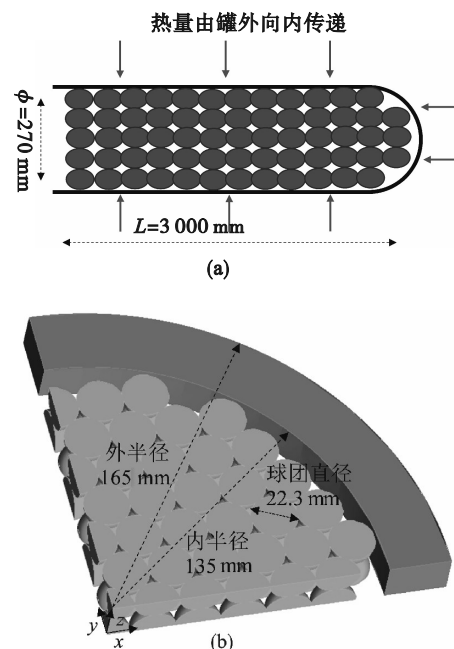


图 2 工业还原罐及几何模型示意图

Fig. 2 Industrial retort and schematic diagram of geometric model

(a) 工业还原罐; (b) 几何模型.

目前工业中应用的还原罐外径330 mm,内径270 mm,还原罐内的装料长度2 700~3 000 mm.还原罐在还原炉中整体受热,装料长度与直径比为10:1,如图2a所示.由于还原罐的长度比较大,可近似忽略还原罐内轴向温度梯度,仅考虑径向温度梯度.皮江法炼镁过程采用核桃状团块,平均直径22.3 mm,本文为简化数学模型,采用直径为22.3 mm的球团团块代替核桃状球团.实际生产过程中,球团在还原罐内自由堆积,床层孔隙率约为0.39.本文采用斜方堆积,床层孔隙率0.395.另外,根据坩埚的周期特征,在床层内选取1/4圆周,高度选取一个球团直径的高度作为本文的计算模型,如图2b所示.

1.2 控制方程及其边界条件

笛卡尔坐标下镁还原过程的控制方程如式(2)和式(3)所示.由于反应在真空下进行,忽略气体导热,孔隙间的辐射传热采用S2S(surface to surface)模型.

1) 对于球团传热:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \times (\lambda_s T) + \left(-c\Delta H \frac{d\alpha(t, T)}{dt} \right); \quad (2)$$

2) 对于还原罐传热:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \times (\lambda_r T). \quad (3)$$

式中: $\rho, c_p, T, \lambda_s, \lambda_r, c, \Delta H, \alpha, d\alpha(t, T)/dt$ 分别为密度、比定压热容、温度、团块的导热系数、坩埚的导热系数、团块中镁的初始浓度、反应(1)的焓变、镁的还原率、还原反应速率.相关物理性质参数见表1.

表1 物理性质参数
Table 1 Physical parameters

相关参数	数值
球团密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 100-420 α
球团比定压热容 $c_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	955.02+0.17T
球团导热系数 $\lambda_s/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.14+0.000 288T
反应(1)焓变 $\Delta H/(\text{J}\cdot\text{mol}^{-1})$	249 023.4-21.2T
球团中镁的初始浓度 $c/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-3})$	17 500

式(2)中最后一项为热源项,表示化学反应的吸放热,与化学反应速率直接相关,本文计算过程利用文献[19]中报道的相关动力学参数,如表2所示.

表2 反应速率方程及相关动力学参数^[19]

Table 2 Reaction rate equations and related kinetic parameters

参数	时间/min							
	≤15	≤12	≤10	≤8	>15	>12	>10	>8
温度/°C	1 050	1 100	1 150	1 200	1 050	1 100	1 150	1 200
动力学常数 k/min^{-1}	0.025 13	0.051 74	0.079 42	0.110 55	9.98×10^{-4}	3.03×10^{-3}	5.32×10^{-3}	9.65×10^{-3}
还原反应速率/ min^{-1}	$\frac{d\alpha(t, T)}{dt} = k(1 - \alpha)$				$\frac{d\alpha(t, T)}{dt} = \frac{3k(1 - \alpha)^{2/3}}{2[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]}$			

边界条件如下:

还原罐中心, $\frac{\partial(T)}{\partial t} = \frac{\partial(T)}{\partial y} + \frac{\partial(T)}{\partial z} = 0;$

还原罐外壁温度, $T = T_{\text{cons}};$

初始条件, $T = 298.15 \text{ K}.$

1.3 网格划分及模型验证

采用四面体网格划分方法,网格数量30万.利用建立的模型,计算了1 473 K时还原罐内的平均还原率,并与工业数据进行比较,如图3所示.计算的还原率数据与工业数据存在一定差异,但差异不大(约5%),且整体趋势符合度较好,能够利用本文建立的模型进行相关研究.

2 结果与讨论

皮江法炼镁过程在真空条件下进行,除球团

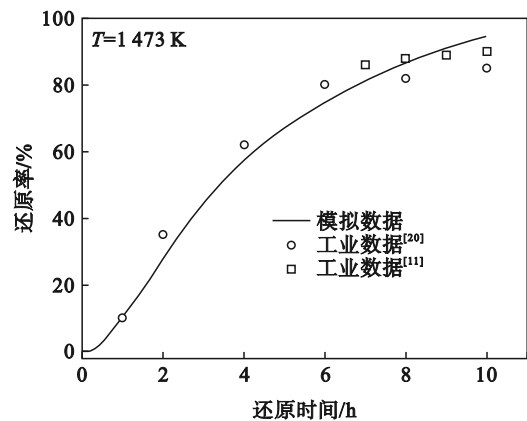


图3 计算结果与工业数据比较

Fig. 3 Comparison between numerical results and industrial data

内的传导传热外,球团间的辐射传热对提高床层温度也具有重要作用^[20].球团的尺寸影响床层孔隙

的大小及数量.床层的孔隙特征影响辐射传热,进而影响床层的升温及还原反应速率.图4为球团直径对球团床层平均还原率的影响.在相同的还原时间下,直径为22.3 mm的球团能够获得最大的还原率.减小球团直径,还原率降低,且降低的趋势逐渐减小.当球团直径从22.3 mm减小至16 mm,还原8 h时,还原率降低约9%.较小的球团直径,减小了孔隙尺寸,减弱了辐射传热,且增加了镁蒸气外溢的阻力,不利于还原过程.然而,较大的球团直径也不利于还原过程,将使得单一球团内部的传导传热成为还原过程的限制环节,导致还原率降低.

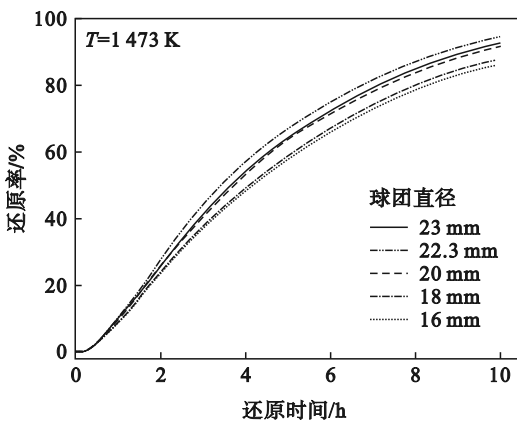


图4 球团直径对球团床层平均还原率的影响

Fig. 4 Effect of pellet diameter on average reduction ratio in the pellets bed

图5为还原罐外壁温度对球团床层平均还原率的影响.在实际生产过程中,还原罐直接在还原炉内加热,还原罐外壁温度在一定范围内波动.一方面,为保证还原罐使用寿命,还原罐外壁温度不宜长时间高于1473 K;另一方面,较低的还原罐外壁温度将延长生产周期.还原时间相同时,还原率随还原罐外壁温度的降低而降低.当

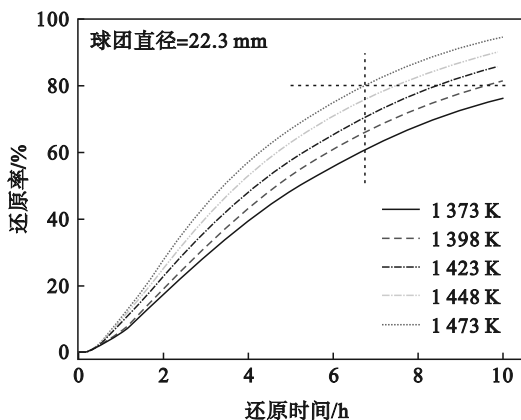


图5 还原罐外壁温度对球团床层平均还原率的影响

Fig. 5 Effect of retort outer wall temperature on average reduction ratio in the pellets bed

还原罐外壁温度为1473 K时,还原6.75 h,还原率达到80%.在这个还原时间条件下,还原罐外壁温度每降低25 °C,还原率将降低约5%.降低还原罐加热温度则需要较长时间才能达到80%的还原率,当还原罐外壁温度为1448,1423,1398 K时,达到80%的还原率分别需要7.53,8.47,9.61 h.因此,生产过程必须保证较高的还原罐外壁温度.

还原罐在较高温度条件下加热,当室温的球团加入还原罐后,有助于提高温差,增加传热驱动力,使得还原罐内的球团迅速升温.图6为还原罐在不同加热温度下其内半径中点和还原罐中心点的温度随加热时间的变化规律.还原罐内半径中点的温度在前2个小时迅速提高(图6a),较高的还原罐外壁温度,能够使球团获得更高的温度.然而,在加热2 h后,本文选择的还原罐外壁温度条件下球团的温度均小于1200 K,此时球团未能获得足够的反应速率,仍处于几乎未反应的状态.在加热4 h后,球团的温度再一次呈现迅速提高的趋势(见图6a中虚线框).这一趋势随着还原罐外壁温度的降低而需要更长的加热时间才能出现.一般而言,球团的温度需要大于1273 K才能够获得一定的还原反应速率.当还原罐外壁温度为1473 K时,还原罐内半径中点的温度达到1273 K需要5 h,当还原罐外壁温度降低为1373 K时,则需要9 h才能达到1273 K.图6b为还原罐中心点的温度随加热时间的变化.与还原罐内半径中点处的升温规律相似,还原罐中心点温度在前2 h迅速提高,但此时球团未能达到起始反应温度.之后出现温度平台,这是由于大量的外层球团快速反应,需要吸收大量反应热,致使内层球团热量不足,中心处的球团升温缓慢.还原罐中心点温度至少需要加热6 h才能实现第二次迅速提高(见图6b中虚线框).当还原罐外壁温度为1473 K时,加热10 h后,还原罐中心点的温度仅为1348 K,此时仍未能获得理想的反应速率,而当还原罐外壁温度低于1398 K时,加热10 h后,还原罐中心点的温度才能达到1273 K.对于10 h的加热时间,这部分球团几乎处于未反应状态或还原率极低,即还原罐中心存在未反应的球团区,提高这部分球团的还原率将有助于提高单罐生产效率,降低料镁比.

图7和图8分别为还原罐截面的温度分布和球团还原率分布随加热时间的变化.外层球团经过2 h后即可达到或接近还原罐外壁温度,亦可获得较快的反应速率;而内层球团升温较慢,加

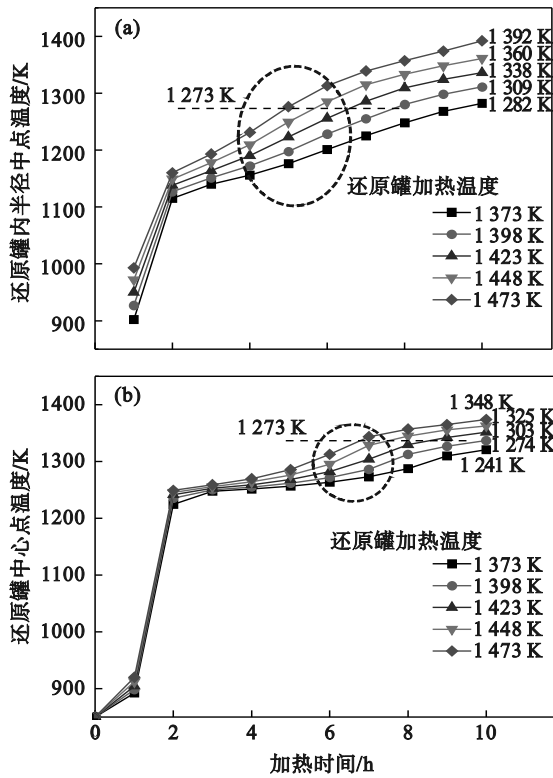


图 6 还原罐在不同加热温度下内半径中点和还原罐中心点的温度与加热时间的关系
 Fig. 6 Relationship between temperature and heating time at inner radius midpoint and center point of the retort at different heating temperatures
 (a)—内半径中点; (b)—还原罐中心点.

之外层球团的还原反应吸热,将进一步降低内层球团的升温速率,导致内层球团长时间加热仍然无法达到还原罐外壁温度.如图 7 所示,加热 8 h 后,中心区域的温度仅为 1 373 K.在此温度下,球团反应速率慢(见图 5),导致中心区域的球团还原率较低,如图 8 所示.外层球团首先达到反应温度,还原时间长,还原率高;内层球团还原时间短,还原率较低.

随着还原时间延长,外层球团的还原率超过 90%,且所占面积不断增加,而内层球团的还原率在还原 8 h 后,仅达到 60%~70%.对于真空硅热还原炼镁过程,热量由还原罐外部向内层传递,球团床层形成了较大的温度梯度,这与文献[11,20]的研究结果一致.

根据前文的研究,内层球团还原率低,不仅降低了床层的平均还原率,而且降低了原料利用率.为了比较不同区域球团还原率对床层平均还原率的影响,将床层沿半径方向 10 等分,形成 V1 至 V10 体积不等的 10 个区域.不同床层体积内还原率随时间的变化如图 9 所示.图中, V1+ 为 V1 至 V10 的体积和, V2+ 为 V2 至 V10 的体积和,其他依此类推.由于中心区域的球团还原率较低,减少中心区域球团,有助于提高床层的还原率,缩短还原周期.球团体积由 V1+ 至 V10+ 变化,还原率达到 80% 的时间不断缩短,由 6.75 h 缩短至 2.4 h,且

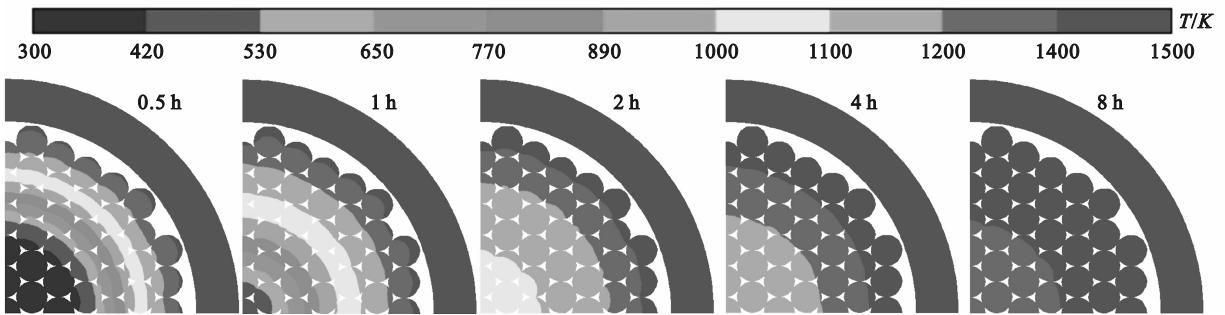


图 7 球团床层的温度分布(球团直径 22.3 mm,还原罐加热温度 $T=1\ 473\ K$)
 Fig. 7 Temperature distribution in the pellets bed (pellet diameter 22.3 mm, heating temperature of retort $T=1\ 473\ K$)

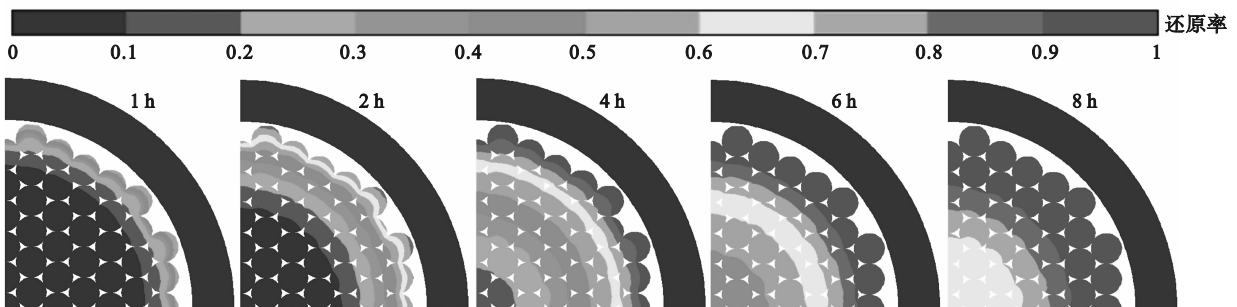


图 8 球团床层的还原率分布(球团直径 22.3 mm,还原罐加热温度 $T=1\ 473\ K$)
 Fig. 8 Reduction ratio distribution in the pellets bed (pellet diameter 22.3 mm, heating temperature of retort $T=1\ 473\ K$)

越往外层还原时间缩短的程度越大.实际操作过程中,可通过中心留空的方式调整床层的体积.然而,随着中心留空区域增加,每个生产周期的装料量不断减少,镁的产量也将减少.留空的面积与每周期镁的产量是一对固有矛盾.

为了确定最优的留空体积,研究了不同床层体积内镁的生产效率随时间的变化.镁的生产效率定义为单位时间、单位体积床层内镁的产量,如式(4)所示:

$$\eta = \frac{\rho V x w_0 \alpha}{V_0 t_{PC}} \quad (4)$$

式中: η 为镁的生产效率, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$; ρ 为团块密度,等于 $2\ 100\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; w_0 为镁在原料中的质量分数,等于 0.2; α 为还原率; $V_x(x=1, 2, \dots, 10)$ 为选择区域内球团的体积, m^3 ; V_0 为还原罐内总体积, m^3 ; t_{PC} 为生产周期, h, 生产周期 t_{PC} 包含操作时间和还原时间.对于皮江法炼镁过程,操作时间包括装卸料、抽真空等时间,一般约为 2 h.

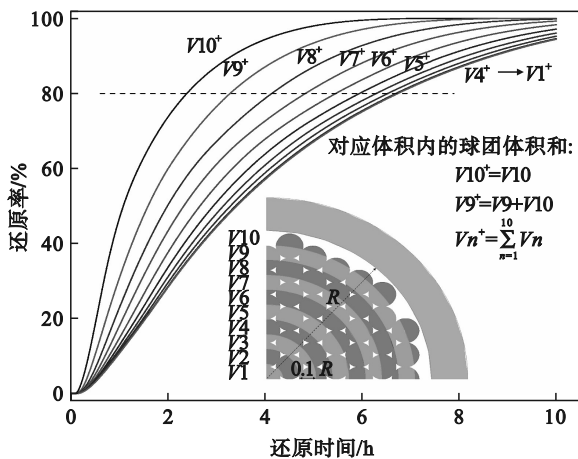


图 9 不同床层体积内还原率随还原时间的变化
Fig. 9 Variation of reduction ratio with time in different bed volumes

图 10 为不同床层体积内镁的生产效率随还原时间的变化.对于不同的床层体积,生产效率均先增加后减小,即延长还原时间,虽然可以提高还原率,但将降低生产效率,最大的生产效率对应的还原率介于 65%~75%之间.采用 $V1^+$ 或 $V2^+$ 两种装料方式能够获得最大的生产效率,即对于目前模型使用的还原罐尺寸(内径 270 mm),中心区域留空的直径为 0~27 mm 可获得最大的生产效率.

对于实际生产过程,原料的投入是生产成本的重要组成部分.较高的生产效率和较高的原料利用率均有助于降低生产成本.如图 10 和表 3 所示,在最高的生产效率时,球团的平均还原率相对较低,生产实践过程还原率一般介于 80%~90%之间.图 11 为不同床层体积内镁的还原率为 80%

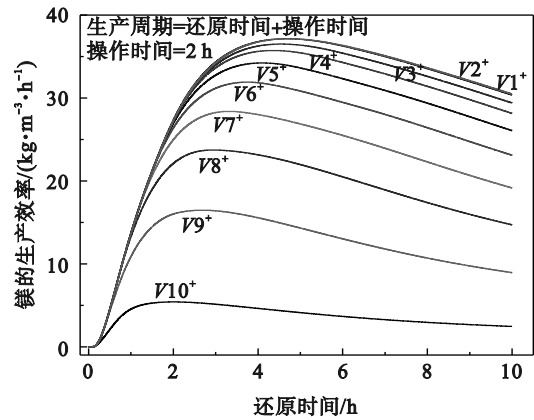


图 10 不同床层体积内镁的生产效率随还原时间的变化
Fig. 10 Variation of Mg productivity with reduction time in different bed volumes

和 90% 时的生产效率.仍然是采用 $V1^+$ 或 $V2^+$ 两种装料方式能够获得最大的生产效率,且生产效率随还原率提高而减小.因此,实际生产过程,不能单纯追求高还原率,而忽视生产效率.

表 3 不同床层体积的最大生产效率
Table 3 Maximum production efficiency of different bed volumes

体积	还原时间/h	还原率/%	最大生产效率 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$
$V10^+$	2	73.53	5.42
$V9^+$	2.69	71.88	16.47
$V8^+$	2.94	66.29	23.72
$V7^+$	3.32	65.23	28.39
$V6^+$	3.74	65.00	31.91
$V5^+$	4.09	64.74	34.23
$V4^+$	4.36	64.61	35.73
$V3^+$	4.55	64.59	36.51
$V2^+$	4.68	64.45	37.15
$V1^+$	4.72	64.45	37.14

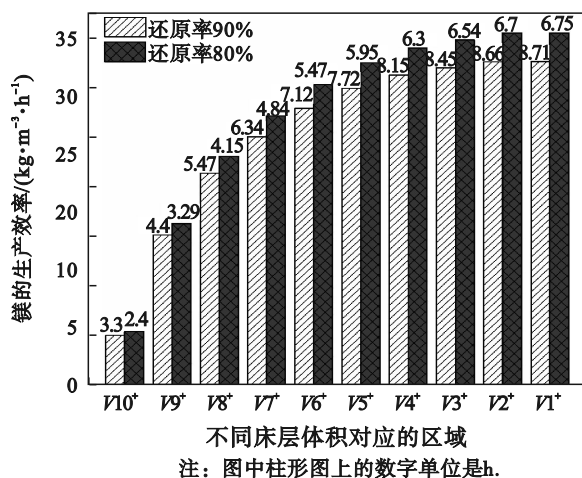


图 11 不同床层体积内镁的还原率与生产效率的关系
Fig. 11 Relationship between Mg productivity and reduction ratio in different bed volumes

3 结 论

1) 本文建立的数值模型能够较好地解释工业生产的数据,能够用于分析温度及还原率的时间分布和空间分布。

2) 当球团直径为22.3 mm时,相同还原时间能够获得最大的还原率.增加或减少球团直径,将影响床层的传热,进而降低还原率。

3) 还原罐外壁温度对床层的还原率影响较大,生产过程在考虑还原罐寿命的同时应尽量提高还原罐外壁温度。

4) 床层中心区域温度低,还原反应速率慢,反应滞后.加热8 h后,中心区域的温度仅为1 100 °C,还原率为60%~70%;通过中心留空的方法能够有效缩短还原周期,提高原料利用率。

5) 以单位体积、单位时间镁的产量为依据,对于内径为270 mm的还原罐,中心区域留空的直径为0~27 mm可获得最大生产效率。

参考文献:

- [1] Jayasathyakawin S, Ravichandran M, Baskar N, et al. Magnesium matrix composite for biomedical applications through powder metallurgy - review [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 27: 736-741.
- [2] Hornberger H, Virtanen S, Boccaccini A R. Biomedical coatings on magnesium alloys: a review [J]. *Acta Biomaterialia*, 2012, 8(7): 2442-2455.
- [3] Xiong N, Tian Y, Yang B, et al. Results of recent investigations of magnesia carbothermal reduction in vacuum [J]. *Vacuum*, 2019, 160: 213-225.
- [4] Tian Y, Wang L P, Yang B, et al. Comparative evaluation of energy and resource consumption for vacuum carbothermal reduction and Pidgeon process used in magnesium production [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, 10(3): 697-706.
- [5] Hua J, He L L, Yan K D, et al. Robotic slag offloading and process improvement of magnesium smelting in Pidgeon process with faster region-based convolutional neural network [J]. *International Journal of Heat and Technology*, 2019, 37(1): 345-350.
- [6] Fu D X, Ji Z H, Guo J H, et al. Diffusion and phase transformations during the reaction between ferrosilicon and CaO·MgO under vacuum [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(3): 4379-4385.
- [7] Wynnycky J R, Tackie E, Chen G. The problem of limited recoveries in the Pidgeon process for magnesium production [J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1991, 30(3): 139-143.
- [8] Toguri J M, Pidgeon L M. High - temperature studies of metallurgical processes. part II: the thermal reduction of calcined dolomite with silicon [J]. *Canadian Journal of Chemistry*, 1962, 40(9): 1769-1776.
- [9] Zhang C, Wang C, Zhang S J, et al. The effects of hydration activity of calcined dolomite (HCD) on the silicothermic reduction process [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2015, 142: 154-160.
- [10] Li R B, Zhang S J, Guo L J, et al. Numerical study of magnesium (Mg) production by the Pidgeon process: impact of heat transfer on Mg reduction process [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 59: 328-337.
- [11] Li R B, Zhang C, Zhang S J, et al. Experimental and numerical modeling studies on production of Mg by vacuum silicothermic reduction of CaO·MgO [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2014, 45: 236-250.
- [12] 吴永. 皮江法炼镁工艺的一种改良技术及其宏观动力学模型分析 [J]. *轻金属*, 2016(7): 39-47.
(Wu Yong. An improved shrinking core model synthesis method of Pidgeon magnesium smelting process and its macro kinetic model analysis [J]. *Light Metals*, 2016(7): 39-47.)
- [13] 冯俊小, 张志远. 镁还原罐内强化换热研究 [J]. *北京科技大学学报*, 2012, 34(7): 830-835.
(Feng Jun-xiao, Zhang Zhi-yuan. Enhancement of heat transfer in a magnesium reduction retort [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2012, 34(7): 830-835.)
- [14] 夏德宏, 张刚, 郭梁. 金属镁还原罐径向传热强化器的研究 [J]. *工业加热*, 2005, 34(6): 39-42.
(Xia De-hong, Zhang Gang, Guo Liang. Study of the radial conductive intensifier for magnesium reduction jar [J]. *Industrial Heating*, 2005, 34(6): 39-42.)
- [15] Yu A, Hu H, Li N Y. Mathematical modelling of magnesium reduction in a novel vertical Pidgeon process [J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2002, 10(4): 413-423.
- [16] 傅大学, 张延安, 豆志河, 等. 球团预制-硅热还原炼镁还原罐内传热 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(5): 643-648.
(Fu Da-xue, Zhang Ting-an, Dou Zhi-he, et al. Heat transfer in a retort for Mg-extraction by pre-prepared pellet silicothermic process [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2018, 39(5): 643-648.)
- [17] 傅大学, 关录奎, 豆志河, 等. 球团预制-硅热还原炼镁的球团传热性研究 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(9): 1274-1279.
(Fu Da-xue, Guan Lu-kui, Dou Zhi-he, et al. Study on heat transfer of pre-prepared pellets for Mg extraction by silicothermic process [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2017, 38(9): 1274-1279.)
- [18] Fu D X, Zhang T A, Dou Z H, et al. Numerical study of magnesium production by Pidgeon process and pre-prepared pellets silicothermic process: comparison of heat transfer [C]//TMS 2017 Magnesium Technology. San Diego, 2017: 107-111.
- [19] 张超, 付瑾. 硅热法炼镁动力学的数学模型分析及数值模拟 [J]. *化工进展*, 2019, 38(9): 4155-4163.
(Zhang Chao, Fu Jin. Analysis of the kinetic models of the silicothermic reduction process and their numerical simulation [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(9): 4155-4163.)
- [20] Zhang C, Chu H Q, Gu M Y, et al. Experimental and numerical investigation of silicothermic reduction process with detailed chemical kinetics and thermal radiation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 135: 454-462.