

球团预制-硅热还原炼镁还原罐内传热

傅大学^{1,2}, 张延安^{1,2}, 豆志河^{1,2}, 关录奎^{1,2}

(1. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 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)

摘 要: 为了解决皮江法还原罐内传热慢的问题, 提出将白云石粉、硅铁、萤石混合, 加入黏结剂先造球再煅烧, 煅烧后的热球团直接用于还原的炼镁新技术. 采用数值方法研究预制球团在还原罐内的传热规律. 结果表明: 提高硅铁添加量、增加球团直径、减小床层密度均有利于热量向还原罐内部传递; 将边界温度由 1 473 K 提高至 1 498 K, 还原罐中心区域达到 1 473 K 的时间由 300 min 缩短至 178 min; 当还原罐直径为 300 mm 时, 对于直径为 25 mm 的预制球团, 还原罐中心点加热至 1 473 K 的时间为 90 min, 而对于皮江法球团则需要 288 min.

关 键 词: 还原罐内传热; 预制球团; 皮江法; 镁冶金

中图分类号: TF 822

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2018)05-0643-06

Heat Transfer in a Retort for Mg-Extraction by Pre-prepared Pellet Silicothermic Process

FU Da-xue^{1,2}, ZHANG Ting-an^{1,2}, DOU Zhi-he^{1,2}, GUAN Lu-kui^{1,2}

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory for Ecological Utilization of Multimetallic Mineral(Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: ZHANG Ting-an, professor, E-mail: zta2000@163.net)

Abstract: A novel method of feed preparation for silicothermic process was proposed in order to solve low efficiency of heat transfer in Pidgeon process. In this method, dolomite and ferrosilicon were mixed to produce pellets and then were calcined. The pre-prepared pellets were charged into the retorts for Mg extraction at once after calcinations. Heat transfer in a retort for the novel process was investigated by a numerical method. The results show that a better heat transfer can be obtained by increasing the amount of Si-Fe addition, pellet diameter or decreasing the packed bed density. The time for heating the center of the retort into 1 473 K decreases from 300 min to 178 min, after increasing the boundary temperature from 1 473 K to 1 498 K. In a retort of 300 mm diameter, the heating time is 90 min for the center of the retort charged by pre-prepared pellets of 25 mm diameter reaching 1 473 K, compared with that of 288 min in Pidgeon process.

Key words: heat transfer in a retort; pre-prepared pellets; Pidgeon process; magnesium production

金属镁是常用的最轻的结构金属, 世界需求量大, 它被广泛应用在冶金、化工和机械等领域^[1]. 皮江法是目下炼镁的主要方法, 其发展至今, 经过不断改进, 使其在能耗和污染方面已有很大改善, 但其仍然属于高能耗高污染的炼镁方法^[2].

根据文献[3], 球团在还原罐内的传热能力是影响还原反应的重要因素. Li 等^[4]采用数值模拟的方法研究了还原罐内热量传递规律和温度分布规律. 结果表明: 皮江法炼镁还原阶段升温较慢, 中心区域需要长时间加热后才能达到反应温度; 曹韩学等^[5]提出加强还原罐内的对流换热可

收稿日期: 2017-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1508217, 51504058, 51404054); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N162504003, N140204013); 辽宁省博士启动基金资助项目(201601003); 辽宁省教育厅项目(LZ2014021).

作者简介: 傅大学(1986-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学讲师, 博士; 张延安(1960-), 男, 河南周口人, 东北大学教授, 博士生导师; 豆志河(1978-), 男, 河南周口人, 东北大学教授, 博士生导师.

强化球团填充层的传热,显著缩短加热时间;Yu 等^[6]发明了一种竖式还原罐,可改善罐内传热.

为了解决皮江法传热慢的问题,东北大学张延安教授提出“球团预制-硅热还原炼镁”新技术^[7],新工艺球团由煅烧温度(1 000~1 050 ℃)加热至还原温度(1 200~1 250 ℃),而皮江法是由环境温度加热至还原温度,因此新工艺可极大地缩短球团在还原罐内的加热时间,降低了能耗,提高了生产效率.除此之外,新工艺与皮江法相比具有以下优点:①新工艺能够避免皮江法白云石在煅烧过程中产生 5% 左右的细粉料无法利用而造成资源浪费的问题;②新工艺煅烧后热球团直接用于还原,能够完全利用煅白携带的热量,球团中煅白活性高.Wen 等^[8],Fu 等^[9-10]已对该工艺球团的制备方法以及球团中白云石的分解规律、球团强度等进行了研究.

“球团预制-硅热还原炼镁”新技术的预制球团先造球再煅烧,且热球团直接加热还原,与皮江法压制球团的传热特性完全不同.因此,本文采用数值方法,借助 ANSYS 软件研究新技术的预制球团在还原罐内的传热规律.

1 模型的建立及计算方法

1.1 建立几何模型

实际生产过程中还原罐长度与直径比一般为 10:1.还原罐在还原炉中加热,由于长径比较大,因此可粗略地认为热量仅沿还原罐径向传递.另

一方面,由于钢铁的导热系数远大于本实验使用的球团的导热系数,因此,计算过程中忽略还原罐壁厚,即将温度载荷直接加载到球团边界.由于还原罐截面为圆形,根据上述假设,选择计算模型为平面 1/4 圆,半径 R 为还原罐内径.

1.2 控制方程及边界条件

对于非稳态热传递,在笛卡尔坐标系下,表示热平衡的微分方程:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t}=\nabla(\lambda \nabla T)+S_r.$$

(1)

式中: S_r 为单位体积产生的热量, W/m^3 ,本研究暂不考虑化学反应,即无内热源, $S_r=0$; c_p 为球团定压比热容, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; λ 为球团填充层的有效导热系数, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; ρ 为球团床层密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

对于还原罐内传热,边界条件为

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=0}=0;\left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{y=0}=0.$$

当 $x^2+y^2=R^2$ ($x>0,y>0$) 时, $T=T_1$, T_1 为常数; $x,y\in[0,R]$; 球团初始温度为常数 T_0 .

2 结果与讨论

2.1 床层有效传热系数对还原罐内传热的影响

选择还原罐半径 $R=150\text{ mm}$,初始温度 $T_0=293\text{ K}$,边界温度 $T_1=1\,473\text{ K}$.选择 4 种不同的球团作为原料,球团的性质见表 1.

表 1 预制球团的热性质
Table 1 Effective thermophysical properties of the prefabrication pellets

参数	球团 1	球团 2	球团 3	球团 4
球团直径/m	0.015	0.015	0.015	0.025
硅铁添加系数	1.0	1.0	1.2	1.0
球团密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 100	1 300	1 100	1 100
床层密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	665.5	786.5	665.5	665.5
比热容/ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.17+955.02	0.17+955.02	0.17+948.02	0.17+955.02
有效导热系数 ^[11] $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0.206 3-4.25×10 ⁻⁴ T +5.68×10 ⁻⁷ T^2	0.214 8-4.58×10 ⁻⁴ T +5.72×10 ⁻⁷ T^2	0.216-4.56×10 ⁻⁴ T +5.63×10 ⁻⁷ T^2	0.380 3-9.74×10 ⁻⁴ T +1.12×10 ⁻⁶ T^2

图 1 为分别以球团 1~4 为原料的还原罐温度沿径向分布对比.由图可见,加热初期,还原罐半径中点至外表面区域温差较大;加热中后期,还原罐中心区域温差较大.以球团 4 为原料的还原罐传热最好,球团 1 的还原罐次之,球团 2 的还原罐最差.由此推测,球团填充层密度越大、比热容越大越不利于热量传递,有效导热系数越大,越有

利于热量向还原罐内部传递.由表 1 可见,提高硅铁添加量、增加球团直径、减小床层密度均有利于热量向还原罐内部传递.

图 2 为以球团 1~4 为原料的还原罐中心温度随时间的变化.在加热过程中,还原罐中心温度变化分为 3 个阶段.在加热初期和末期,还原罐中心温度增加缓慢,在加热中期,还原罐中心温度迅

速增加. 球团 4 床层的有效导热系数最高,其加热 60 min 后中心温度开始迅速增加,加热 180 min 后温度开始缓慢增加,加热 240 min,还原罐中心温度达到 1 445 K. 降低有效导热系数或提高床层密度,第一阶段时间延长,第二阶段温度升高速率降低,不利于床层中心温度提高.

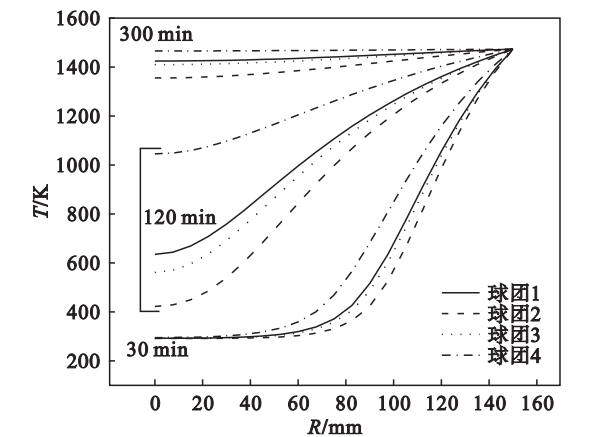


图 1 以球团 1~4 为原料的还原罐温度沿径向分布
Fig. 1 Radial temperature distributions of a retort with charged pellets 1~4

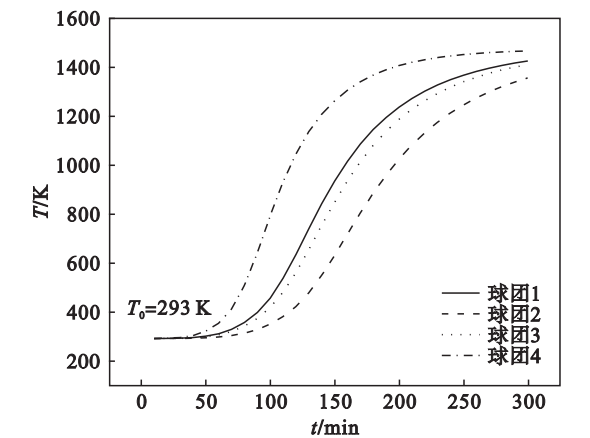


图 2 以球团 1~4 为原料的还原罐中心温度随时间的变化
Fig. 2 Changes of temperature with time in the center of a retort with charged pellets 1~4

2.2 还原罐直径对还原罐内传热的影响

以表 1 中球团 1 和球团 4 为例,考察还原罐直径对球团传热过程的影响. 选择还原罐半径 R 分别为 150, 175, 200, 225 和 250 mm, 初始温度 $T_0 = 293$ K, 边界温度 $T_1 = 1\,473$ K.

图 3 为以球团 1 为原料不同半径的还原罐中心温度随时间的变化. 由图可知,随着还原罐半径增加,第一阶段时间延长. 当还原罐半径为 150 mm 时,第一阶段结束需要加热 1 h,当还原罐半径提高至 250 mm 时,第一阶段需要加热 4 h. 另外,增加还原罐半径,第二阶段温度增加速率显

著降低. 当还原罐半径为 150 mm 时,还原罐中心温度达到 1 423 K 需要 5 h,当还原罐半径提高至 200 mm 时,还原罐中心温度达到 1 423 K 需要 8.7 h. 可见,增加还原罐直径将严重影响还原罐中心的温度.

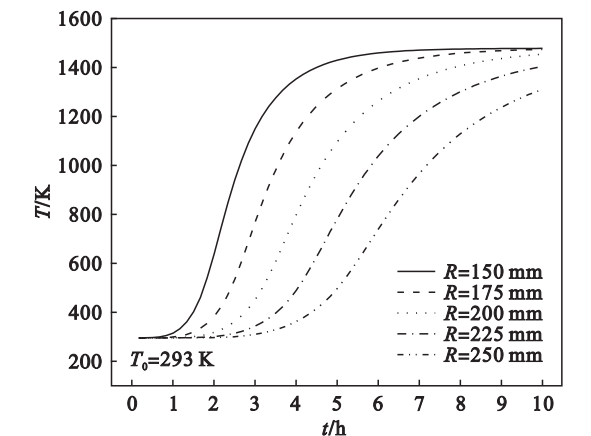


图 3 以球团 1 为原料不同半径的还原罐中心温度随时间的变化
Fig. 3 Changes of temperature with time in the center of different retorts with charged pellet 1

图 4 为以球团 4 为原料不同半径的还原罐中心温度随时间的变化. 与球团 1 相比,以球团 4 为原料的还原罐有效导热系数显著提高. 当还原罐半径为 150 mm 时,还原罐中心温度达到 1 423 K 需要 3.6 h;当还原罐半径提高至 200 mm 时,还原罐中心温度达到 1 423 K 需要 6.2 h. 可见,提高床层的有效导热系数,还原罐中心升温速度提高,可减弱由于增加还原罐半径对中心温度的影响.

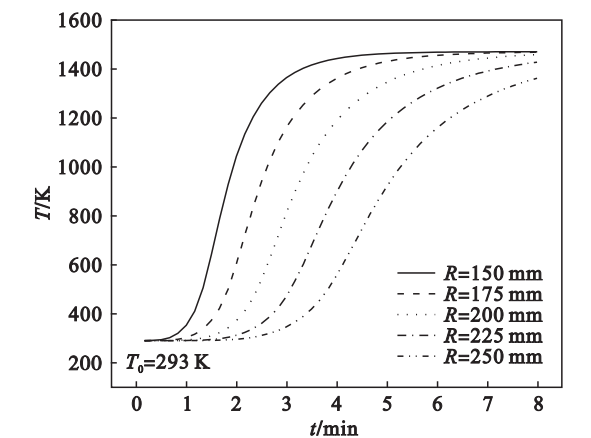


图 4 以球团 4 为原料不同半径的还原罐中心温度随时间的变化
Fig. 4 Changes of temperature with time in the center of different retorts with charged pellet 4

2.3 球团初始温度对还原罐内传热的影响

由于预制球团－硅热还原炼镁工艺的球团煅烧后直接用于还原,球团具有一定初始温度,一般为 1 273 K. 为了便于比较初始温度对传热的影

响,分别计算了球团 1 和球团 4 初始温度为 293, 873, 1 073 和 1 273 K 时还原罐中心温度随时间的变化,结果如图 5 所示. 计算过程选择还原罐半径 $R = 150\text{ mm}$, 边界温度 $T_1 = 1\,473\text{ K}$.

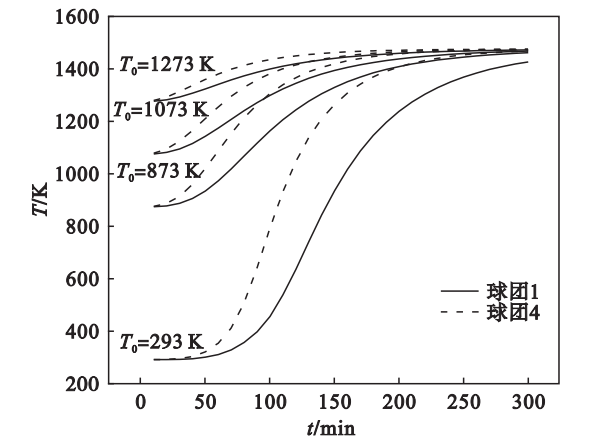


图 5 以球团 1 或球团 4 为原料的还原罐在不同初始温度下中心温度随时间的变化
Fig. 5 Changes of temperature in the center of a retort at different initial temperatures of charged pellets 1 or 4

由图 5 可见,提高球团的初始温度可显著缩短还原罐达到热平衡的时间. 对于球团 1,当球团 4 初始温度为 293 K 时,加热 300 min,还原罐中心温度为 1 423 K;当球团 4 初始温度提高到 1 273 K 时,还原罐中心达到 1 423 K 仅需 130 min,与初始温度为 293 K 相比,显著缩短了加热时间. 采用球团 4 为原料可提高床层有效导热系数,能够进一步缩短还原罐的加热时间. 当球团 4 初始温度为 293 K 时,还原罐中心达到 1 423 K 需要 215 min,与采用球团 1 初始温度为 873 K 时还原罐中心温度相当. 当球团 4 初始温度为 1 273 K 时,还原罐中心达到 1 423 K 需要 90 min. 由此可见,提高床层有效导热系数或者提高床层的初始温度均可显著缩短球团在还原罐内的加热时间.

2. 4 加热温度对还原罐内传热的影响

当还原罐中心温度接近目标温度时,传热驱动力将逐渐降低. 因此,还原罐中心温度越接近目标温度,每升高 1 K 需要的时间越长. 在图 2 中,对于球团 1,还原罐中心温度由 400 K 提高到 500 K 仅需 15 min,而由 1 300 K 提高至 1 400 K 则需要 60 min. 针对上述现象,可通过适当提高边界温度,加大传热驱动力,以使还原罐中心区域的球团更快地达到还原温度(1 473 K).

选择初始温度 $T_0 = 1\,273\text{ K}$, 还原罐半径 $R = 150\text{ mm}$, 计算了以球团 1 或球团 4 为原料的还原罐在不同边界温度下中心温度随时间的变化,结

果如图 6 所示.

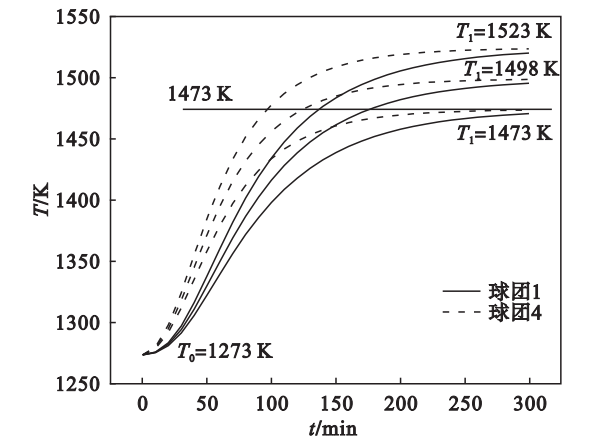


图 6 以球团 1 或球团 4 为原料的还原罐在不同边界温度下中心温度随时间的变化
Fig. 6 Changes of temperature in the center of a retort with charged pellets 1 or 4 at different boundary temperatures

当边界温度 T_1 为 1 473 K 时,以球团 1 为原料的还原罐在加热 300 min 后中心温度达到 1 470 K,以球团 4 为原料的还原罐在加热 300 min 后中心温度达到 1 472.5 K. 当边界温度 T_1 为 1 498 K,以球团 1 为原料的还原罐中心温度达到 1 473 K 需要 178 min,以球团 4 为原料的还原罐中心温度达到 1 473 K 需要 125 min. 球团 1 的还原罐中心温度达到 1 473 K 所需的时间缩短了 122 min,为 $T_1 = 1\,473\text{ K}$ 时的 60%;球团 4 的还原罐中心温度达到 1 473 K 所需的时间缩短了 175 min,为 $T_1 = 1\,473\text{ K}$ 的 40%. 可见,虽然边界温度仅提高 25 K,但显著缩短了还原罐中心温度达到 1 473 K 的时间. 继续提高边界温度至 1 523 K,与边界温度为 1 498 K 相比,以球团 1 为原料的还原罐中心温度达到 1 473 K 所需的时间缩短至 135 min,缩短了 24%;以球团 4 为原料的还原罐中心温度达到 1 473 K 所需的时间缩短至 98 min,缩短了 22%. 可见,提高边界温度,可缩短还原罐中心温度达到 1 473 K 所需的时间,但随着边界温度逐渐提高,这种缩短的效果逐渐降低. 因此,将边界温度适当提高(25 ~ 50 K 为宜),可有效缩短球团在还原罐内的加热时间.

2. 5 预制球团与皮江法球团在还原罐内传热比较

以表 1 中球团 1 和球团 4 为例,对比研究了预制球团与皮江法球团还原罐中心温度随时间的变化规律. 由于预制球团煅烧后直接用于还原,因此取初始温度 $T_0 = 1\,273\text{ K}$,而皮江法球团在室温下开始加热,选择 $T'_0 = 293\text{ K}$. 边界温度 $T_1 = 1\,523\text{ K}$,还

原罐半径 $R = 150\text{ mm}$. 皮江法球团的热性质见表 2.

表 2 皮江法球团的热性质	
Table 2 Effective thermophysical properties of Pidgeon pellets	
球团直径/m	0.022 3
硅铁添加系数	1.0
球团密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 100
床层密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 100
比热容/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	$0.1T+955.02$
有效导热系数 ^[11] $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$0.261\ 6\sim5.01\times10^{-4}T$ $+8.32\times10^{-7}T^2$

图 7 是以球团 1 和皮江法球团为原料的还原罐中心温度随时间的变化关系. 当还原罐半径均为 150 mm 时, 随着加热时间延长, 预制球团还原罐中心温度一直高于皮江法还原罐中心温度. 皮江法还原罐中心温度达到 $1\ 473\text{ K}$ 需要加热 4.8 h , 而预制球团还原罐中心温度达到 $1\ 473\text{ K}$ 仅需 2.3 h , 比皮江法缩短 2.5 h . 根据前文的研究结果, 增加还原罐半径, 将降低还原罐中心温度的增加速度. 将预制球团的还原罐半径增加至 225 mm , 还原罐中心温度达到 $1\ 473\text{ K}$ 所需要的时间与皮江法基本相同. 由于还原罐中心温度是整个还原罐内温度最低点, 因此当中心温度达到 $1\ 473\text{ K}$ 时, 还原罐其他部分温度均高于 $1\ 473\text{ K}$. 如果使预制球团工艺和皮江法还原罐中心温度在相同时间内达到 $1\ 473\text{ K}$, 可将预制球团炼镁工艺的还原罐半径提高至 225 mm . 因此, 从传热角度分析, 预制球团工艺可采用更大直径的还原罐.

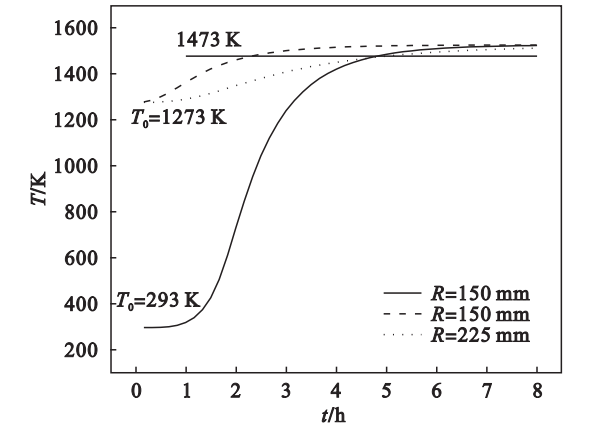


图 7 以球团 1 或皮江法球团为原料的还原罐中心温度随时间的变化
Fig. 7 Changes of temperature with time in the center of a retort with charged pellet 1 or Pidgeon pellets

图 8 是以球团 4 和皮江法球团为原料的还原罐中心温度随时间的变化关系. 球团 4 的直径大于球团 1, 使得球团 4 床层的有效导热显著提高.

当还原罐半径为 150 mm 时, 预制球团还原罐中心温度达到 $1\ 473\text{ K}$ 仅需 1.5 h , 比皮江法缩短 3.3 h . 将预制球团的还原罐半径增加至 275 mm , 还原罐中心温度达到 $1\ 473\text{ K}$ 所需要的时间与皮江法基本相同.

对于预制球团炼镁工艺, 虽然球团 4 的床层传热优于球团 1, 但球团 4 直径较大, 将增加镁的溢出阻力, 进而降低镁的还原速率, 因此最优的球团直径和还原罐直径应结合镁还原速率的实验结果进行优选.

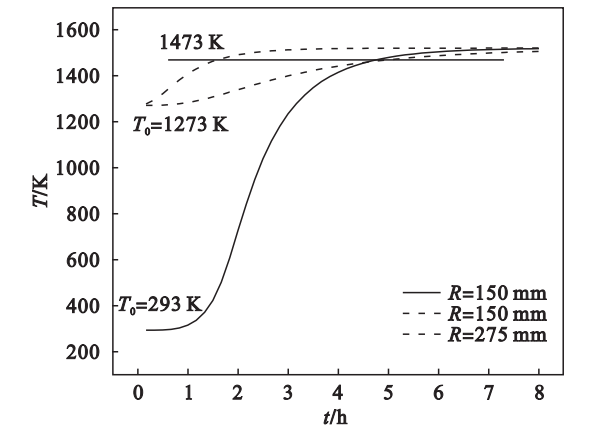


图 8 以球团 4 或皮江法球团为原料的还原罐中心温度随时间的变化
Fig. 8 Changes of temperature with time in the center of a retort with charged pellet 4 or Pidgeon pellets

3 结 论

- 1) 提高硅铁添加量、增加球团直径、减小床层密度均有利于热量向还原罐内部传递.
- 2) 提高床层的边界温度可显著缩短球团在还原罐内的加热时间; 将边界温度由 $1\ 473\text{ K}$ 提高至 $1\ 498\text{ K}$, 还原罐中心区域达到 $1\ 473\text{ K}$ 的时间由 300 min 缩短至 178 min .
- 3) 当还原罐直径相同时, 预制球团加热至 $1\ 473\text{ K}$ 的时间显著低于皮江法球团. 为与皮江法 (还原罐半径 150 mm) 达到相似的传热效果, 采用直径为 15 mm 的预制球团作为原料的还原罐半径可提高至 225 mm , 采用直径为 25 mm 的预制球团作为原料的还原罐半径可提高至 275 mm .

参考文献:

[1] Hanko G, Antrekowitsch H, Ebner P. Recycling automotive magnesium scrap[J]. JOM, 2002, 54(2): 51–54.
[2] Gao F, Nie Z R, Wang Z H, et al. Assessing environmental impact of magnesium production using Pidgeon process in China[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(3): 749–754.

[3] 徐日瑶. 硅热法炼镁生产工艺学 [M]. 1 版. 长沙: 中南大学出版社, 2003: 114 – 148.
(Xu Ri-yao. Magnesium production by silicothermic process [M]. 1st ed. Changsha: Central South University Press, 2003: 114 – 148.)

[4] 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.

[5] 曹韩学, 姜浩, 贾从波, 等. 通 N_2 对炼镁还原罐内料球填充层传热的影响 [J]. 轻金属, 2015 (9) : 43 – 46.
(Cao Han-xue, Jiang Hao, Jia Cong-bo, et al. Influence of inletting N_2 on heat transfer of ball material filled layer of the reduction tank for smelting magnesium [J]. *Light Metal*, 2015 (9) : 43 – 46.)

[6] 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.

[7] 张延安, 豆志河, 张子木, 等. 一种预制球团真空热还原炼镁的方法: 中国, CN102965524 A [P]. 2014.
(Zhang Ting-an, Dou Zhi-he, Zhang Zi-mu, et al. Magnesium produced from pre-prepared pellets by silicothermic process in vacuum: China, CN102965524 A [P]. 2014.)

[8] Wen M, Zhang T A, Dou Z H, et al. Research on new type materials preparation for magnesium production by silicothermic process [C] // *Magnesium Technology of TMS*. Hoboken: Wiley, 2013: 75 – 78.

[9] Fu D X, Zhang T T, Guan L K, et al. Magnesium production by silicothermic reduction of dolime in pre-prepared dolomite pellets [J]. *JOM*, 2016, 68 (12) : 3208 – 3213.

[10] Fu D X, Guan L K, Wen M, et al. Study on compressive strength of pellets for novel silicothermic process [C] // *Magnesium Technology of TMS*. Hoboken: Wiley, 2015: 49 – 53.

[11] 傅大学, 张延安, 豆志河, 等. 炼镁用预制球团填充层的有效导热系数研究 [J]. 材料与冶金学报, 2016, 15 (4) : 260 – 266.
(Fu Da-xue, Zhang Ting-an, Dou Zhi-he, et al. Effective thermal conductivity of pre-prepared pellet packed bed for magnesium extraction by silicothermic process [J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2016, 15 (4) : 260 – 266.)



(上接第 632 页)

始组织有利于晶界特征分布的优化, 特殊晶界比例得到明显提高. 高比例的 $\Sigma 3$ 晶界是晶界优化的基础, 同时可以产生较多的 $\Sigma 9$ 晶界和 $\Sigma 27$ 晶界, 有助于阻断大角度晶界的连通性, 形成较大尺寸的晶粒团簇组织.

2) 二次退火工艺可以明显提高材料的特殊晶界比例, 产生更多 $\Sigma 9$ 和 $\Sigma 27$ 晶界, 从而可以有效地阻断大角度晶界的连通性, 实现晶界特征分布优化的结果. 对比一次退火组织可以看出, 非共格孪晶的产生, 是阻断晶界连通性的关键因素.

参考文献:

[1] 朱智, 张立文, 顾森东. Hastelloy C – 276 合金应力松弛试验及蠕变本构方程 [J]. 中国有色金属学报, 2012, 22 (4) : 1063 – 1067.
(Zhu Zhi, Zhang Li-wen, Gu Sen-dong. Stress relaxation test of Hastelloy C – 276 alloy and its creep constitutive equation [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22 (4) : 1063 – 1067.)

[2] Zhang Q, Tang R, Yin K, et al. Corrosion behavior of Hastelloy C – 276 in supercritical water [J]. *Corrosion Science*, 2009, 51 (9) : 2092 – 2097.

[3] Watanabe T. An approach to grain boundary design of strong and ductile polycrystals [J]. *Res Mechanica*, 1984, 11 (1) : 47 – 84.

[4] Hu C, Xia S, Li H, et al. Improving the intergranular corrosion resistance of 304 stainless steel by grain boundary network control [J]. *Corrosion Science*, 2011, 53 (5) : 1880 – 1886.

[5] Gao Y, Kumar M, Nalla R K, et al. High-cycle fatigue of nickel-based superalloy ME3 at ambient and elevated temperatures: role of grain-boundary engineering [J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2005, 36 (12) : 3325 – 3333.

[6] Was G S, Thaveerungsripor V, Crawford D C. Grain boundary misorientation effects on creep and cracking in Ni-based alloys [J]. *Journal of the Minerals Metals & Materials Society*, 1998, 50 (2) : 44 – 49.

[7] Kobayashi S, Hirata M, Tsurekawa S, et al. Grain boundary engineering for control of fatigue crack propagation in austenitic stainless steel [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 10 (1) : 112 – 117.

[8] Lin P, Palumbo G, Erb U, et al. Influence of grain boundary character distribution on sensitization and intergranular corrosion of alloy 600 [J]. *Scripta Metallurgica Et Materialia*, 1995, 33 (9) : 1387 – 1392.

[9] Randle V, Coleman M. A study of low-strain and medium-strain grain boundary engineering [J]. *Acta Materialia*, 2009, 57 (11) : 3410 – 3421.

[10] Brandon D G. The structure of high-angle grain boundaries [J]. *Acta Metallurgica*, 1966, 14 (11) : 1479 – 1484.

[11] Shimada M, Kokawa H, Wang Z J, et al. Optimization of grain boundary character distribution for intergranular corrosion resistant 304 stainless steel by twin-induced grain boundary engineering [J]. *Acta Materialia*, 2002, 50 (9) : 2331 – 2341.