

Study on Continuous Silicothermic Process for Magnesium Production to Deoxidize the Interior Temperature Field of Pot

Jiexing Liu, Yaxu Jin*, Xuye Zhou, Banshuan Ma

School of Materials Science and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan

Email: [*hbjyx@163.com](mailto:hbjyx@163.com)

Received: Dec. 3rd, 2013; revised: Dec. 23rd, 2013; accepted: Jan. 2nd, 2014

Copyright © 2014 Jiexing Liu et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Jiexing Liu et al. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: Based on the principle of the continuous smelting magnesium technology, the article analyses the physical parameters of the heat-transfer medium in the reduction pot in the continuous silicothermic process for magnesium production. Moreover, in this paper, the feature of heat-transfer process and the temperature field of reduction pot are studied by the computer simulation method. The results show that the intestine reduction temperature can reach 1250°C and that the reduction efficiency is high. After the end of the reaction, we can get the condensed magnesium in the magnesium crystallizer. The content of magnesium is 95.23%.

Keywords: Magnesium; Metallurgical Technology; Silicothermic Method

硅热法连续炼镁还原罐内温度场的研究

刘杰兴, 金亚旭*, 周旭业, 马半栓

太原科技大学, 材料与科学学院, 太原

Email: [*hbjyx@163.com](mailto:hbjyx@163.com)

收稿日期: 2013年12月3日; 修回日期: 2013年12月23日; 录用日期: 2014年1月2日

摘要: 在金属镁还原原理的基础上, 对立式节能型粗镁连续冶炼技术还原罐内传热介质进行物性参数分析、物料传热分析、温度场的计算机模拟, 研究了还原罐内热量传递规律和温度场分布规律。结果表明, 立式还原罐内温度可以达到 1250°C 以上, 还原效率高, 在结晶器上得到了冷凝镁须, 金属镁的含量为 95.23%。

关键词: 镁; 冶金技术; 硅热法

1. 引言

硅热法炼镁工艺属于热还原法, 其最具代表性、应用最广泛的是皮江法工艺, 也是我国金属镁冶炼的主要方法。皮江法具有投资省、建设周期短、产品质量好等优点, 但也存在单炉产量小、能耗高、自动化水平低、还原罐消耗量大、环境污染严重等问题^[1]。近年来, 镁冶炼科学研究工作不断深入, 对硅热法炼

*通讯作者。

镁工艺的改进有所发展。徐日瑶等对我热法炼镁工艺进行了详细的研究, 提出热法工艺的燃料不仅局限于煤, 还可以采用重油等加热, 指出降低能耗是硅热法的重大研究课题^[2]。夏德洪等人对硅热法冶炼过程的传热规律进行了研究, 指出制约镁还原反应速率的瓶颈是还原罐的传热问题^[3]。本文在前期实验室模拟和理论研究的基础上^[4], 对传统的皮江法横罐炼镁工艺进行改革, 提出了一种新型立式节能型粗镁连续冶炼

技术, 采用感应炉外部加热, 并研究了立式还原罐内温度场分布状况, 以期了解还原罐内部整体热反应状况, 为新型金属镁冶炼技术的发展提供理论依据, 并对金属镁冶炼新工艺的推广具有实际意义。

2. 立式节能型粗镁连续冶炼装置

本试验采用的冶炼装置示意图如图 1 所示, 该设备包括连续给排料装置、感应加热炉、还原反应罐、冷凝收集器。各部件置于机架上, 组成一套设备就能完成机械化粗镁连续冶炼的装置, 可实现环保、低成本、高热能利用率、连续给料、排渣的机械化生产。镁蒸气由还原罐经三通管进入冷凝器中; 冷凝装置由高温闸阀、冷凝筒、冷凝器构成, 冷凝筒为锥形筒, 置于冷凝器内部, 冷凝器留有冷却水管道与抽真空管道。

3. 传热介质的物性参数

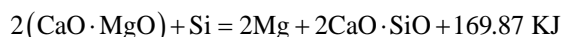
硅热法炼镁过程中, 还原罐内的原料球团受热时的传热过程相当复杂。外部环境对球团的传热与球团以及产物内部的热传导效率, 直接决定反应速率快慢。装在还原罐内核桃状的球团呈自然堆装, 其导热过程有如下几种形式: 1) 球团内的导热, 为球团内部微粒与微粒间的导热; 2) 接触面的导热, 为两个球团相互接触间的导热; 3) 球团与球团间的辐射热; 4) 接触面附近合金熔体薄膜的导热; 5) 固体-合金熔体-固体的传热^[5]。

工业生产中将球团的密度控制在 $1.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}\sim 1.50 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 之间, 比热容为 $1200 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。本实验采用 $\text{ZG}_{35}\text{Cr}_{24}\text{Ni}_7\text{SiN}$ 耐热不锈钢铸造的炼镁还原罐, 材质的化学组成如表 1 所示, 密度 $\rho = 7650 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-3}$, 比热容 $C_p = 460 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 还原罐的导热性能受温度影响较大, 温度升高, 则导热性能愈好。还原罐在

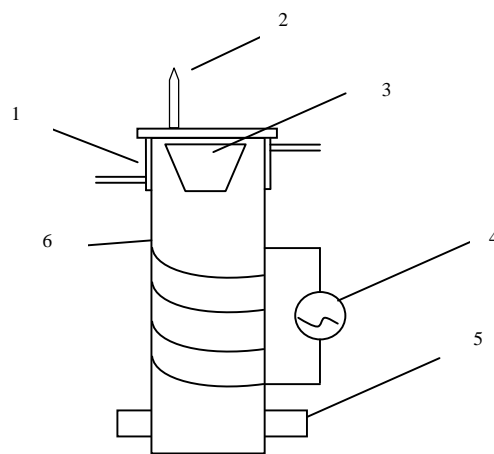
不同温度下的导热系数如表 2 所示。还原罐内的传热方式归纳起来有辐射传热和球团的传导传热, 真空条件下, 对流传热的贡献很小。

4. 还原罐的传热学模型

硅热法立式冶炼金属镁的反应炉内热量传递、温度分布以及化学反应等随时间和位置的不同差异很大。冶炼金属镁采用传统皮江法原料, 遵循下面化学反应方程式:



从计算和化学反应式可以看出, 这个反应是吸热反应。在反应炉内部形成一个具有内热源的温度场。感应加热随供电时间长短不同, 供入电量不同, 产生电热也不同, 致使炉内温度不同, 所以冶炼炉内具有瞬态温度场的特征。反应炉内保持真空状态, 所以在传导、辐射和对流三种基本传热方式中, 只有传导和



1、冷却水套; 2、真空管; 3、冷凝收集器; 4、感应加热炉; 5、排渣器; 6、还原反应罐

Figure 1. Schematic diagram of the continuous magnesium melting equipment

图 1. 粗镁连续冶炼装置示意图

Table 1. Chemical compositions of reduction pot

表 1. 还原罐的化学组成

组成	C	Si	S	Mn	Ni	Cr	P
含量/%	0.3~0.4	1.3~2	≤0.03	0.8~1.5	7~8.5	23~25.5	≤0.04

Table 2. Thermal conductivity of the reduction pot under different temperature

表 2. 还原罐在不同温度下的导热系数

温度/°C	0	100	200	400	600	800	1000
$\lambda/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$	22.6	238	25.5	27.2	28.5	31.8	38

辐射两种传热方式。辐射存在于发热体和反应料界面，由于反应料球对发热体辐射热量的反射很小，所以可根据边界上温度连续、热流连续的条件，将其认定为给定边界热流的边界条件，故对辐射传热可不予考虑。冶炼炉外部，金属外壳与空气直接接触，传热以对流为主。但当保温层设计合理，反应稳定进行时，炉体表面的温度变化不大，可用恒温来代替，故对对流传热可不予考虑。立式真空冶炼炉，从热量传递方式和温度分布规律可知，可将其横截面作为研究对象，符合圆柱坐标系的传热方程

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{1}{k} q_v = \frac{1}{k} \frac{\partial T}{\partial \tau}$$

$$k = \frac{\lambda}{\rho C_p}$$

式中： r ——球团半径， m ； T ——温度， $^{\circ}C$ ； λ -导热系数， $W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$ ； ρ -材料的密度， $kg \cdot m^{-3}$ ； C_p -材料的比热容， $J \cdot kg^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$ ； q_v -热源强度， $J \cdot m^{-2}$ 。

传热过程取决于物料的热物性质和内热源强度，还原速率由物料内的传热速率决定。在球团物料配比相同的情况下，球团周围环境的温度、升温速率和温度场的均匀性将决定罐内镁还原的时间和整个工艺过程的周期，并最终影响生产效率。因此，提高还原罐内热量传递速率和减小罐内温度梯度，将会大大缩短还原工段的时间，提高生产效率，降低能耗，进而减小由于燃料燃烧而产生的温室气体的排放量，降低污染程度。

5. 还原罐内不同时间的温度场模拟

利用工程模拟软件 ANSYS，模拟中还原罐的几

何尺寸定为 $\phi = 0.50 m$ ，罐壁厚 $10 mm$ ，球团初始温度定为 $25^{\circ}C$ ，加热起始温度为 $1200^{\circ}C$ ，反应温度区间按目前硅热法所使用的温度区间 $1100^{\circ}C \sim 1200^{\circ}C$ 计，在不同还原时间条件下，立式还原罐内的温度分布如图 2 所示。

从模拟结果可以看出，4 小时后靠近罐壁物料温度为 $1101^{\circ}C$ ，还原反应开始缓慢进行，罐内中心部位物料温度为 $812^{\circ}C$ 。加热 6 小时时，靠近罐壁的物料温度为 $1264^{\circ}C$ ，此时物料已开始反应，同时罐内中心部位物料的温度达到 $1101^{\circ}C$ ，该时间段，罐内热量传递速度较快。在加热 8 小时以后，还原罐内物料的温度全部达到 $1250^{\circ}C$ 以上，即所有物料均能到反应温度。10 小时时，还原罐内温度范围为 $1320^{\circ}C \sim 1360^{\circ}C$ ，温差为 $40^{\circ}C$ ，该温度差与传统外热法相比大幅度减小^[6]，罐内温度场的均匀程度提高。罐内的传热过程，受限于球团本身的传热速率。从模拟结果可以看出，同一时刻罐内不同位置的球团温度虽然不是完全一致，但是由于罐内温度场的温度差比较小，罐内温度场的均匀性增加，并且传热速率很快。因此，该方法能够提高生产效率。

在立式反应罐设计中，利用清洁能源——电能加热物料，避免了传统工艺中燃料燃烧带来的粉尘、气体等污染问题。反应物料本身的导热性质比较差，在自身吸热反应的同时，阻碍热量向外界散失，再设计合理的保温层，能够大幅度降低热量向外界的流失损耗，减少能量损耗，提高热利用率。从模拟结果可以看出，本试验设计的立式还原罐内温度可以提升到 $1250^{\circ}C$ 以上，温度升高，镁的平衡蒸气压升高，有利于镁蒸气向结晶筒的流动，使得反应向正方向移动，提高还原效率，并能提高镁的品质。

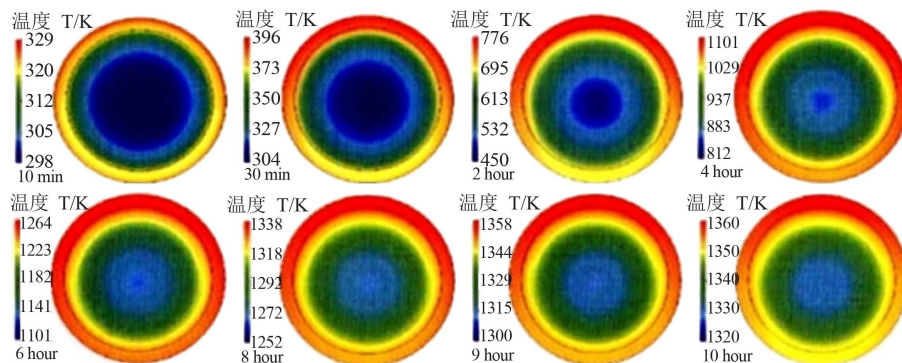


Figure 2. Temperature distributions in reduction pot
图 2. 还原罐内温度分布

6. 验证试验

试验采用的原料包括轻质氧化镁(MgO 含量 $\geq 95\%$)和少量的萤石粉以满足加速还原反应的需要, CaF₂ 含量 $\geq 98\%$ 。在制团机上将原料压制成直径为 30 mm, 厚为 10 mm 的圆柱型球团, 制团压力控制在 3 MPa 左右。对制好的球团在 250℃~300℃ 恒温脱水 1 h 后取出, 在空气中冷却 5 min 后放入干燥器中冷却至室温, 称量。当温度达到 900℃ 时对装置进行最后一次检验: 闭合所有闸门, 真空机组平稳工作, 还原罐内真空度稳定在 15 Pa 合格。反应时间 10 小时, 测量冷凝器外部温度为 550℃。反应结束后, 在结晶器上成功的得到了长的冷凝镁须如图 3 所示。化验结果表明冷凝物中金属镁的含量为 95.23%。计算得到镁的还原率达到 89.48%。X 射线衍射分析表明冷凝物的主要成分是金属镁, 同时也有少量的氧化镁存在, 这部分氧化镁可能是冷凝镁发生了逆反应生成的, 如图 4 所示。

7. 结论

立式粗镁连续冶炼还原罐内温度差小, 加热 8 小时后还原罐内温度可以达到 1250℃ 以上, 还原效率高, 在结晶器上成功获得冷凝镁须, 金属镁的含量为 95.23%。



Figure 3. Condensed magnesium from reduction pot
图 3. 立式镁还原罐产生的粗镁

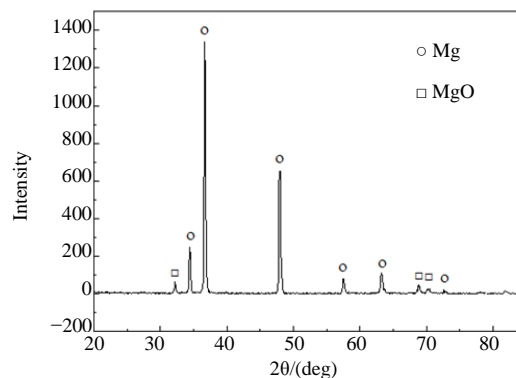


Figure 4. X ray diffraction patterns of condensate
图 4. 冷凝物的 X 射线衍射谱

项目基金

山西省高等学校大学生创新创业项目(2011238)。

参考文献 (References)

- [1] 熊呈辉, 周天瑜, 徐河等 (2005) 我国硅热法炼镁现状及发展趋势. *有色冶炼*, **4**, 25-27.
- [2] 徐日瑶, 刘宏专 (2006) 硅热法炼镁还原反应条件的梯度. *轻金属*, **5**, 44-47.
- [3] 夏德宏, 郭梁, 张刚等 (2005) 硅热炼镁还原炉的用能分析与节能措施探讨. *冶金能源*, **3**, 32-35.
- [4] 郭水华, 冯俊小, 邵鼎 (2008) 新型双蓄热镁还原炉自动控制系统开发. *轻金属*, **11**, 41-45.
- [5] 倪锦, 张敏刚, 蔡如峰等 (2011) 双蓄热式镁还原炉内温度及浓度场数值模拟. *机械工程与自动化*, **1**, 4-6.
- [6] 赵利华, 张开林, 张红军 (2008) 还原炉冷却模块流场与温度场耦合数值分析. *兰州理工大学学报*, **3**, 52-55.