DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.02.013

镁还原罐电磁感应加热装置的能量损耗分析

禹 健,张亚彬,贺成杰

(山西大学自动化系,山西太原030013)

摘要:针对镁还原罐电磁感应加热装置中的能量损耗问题,对炼镁还原系统的能量传输、热损耗和激励线圈电阻损耗的影响因素及 相互关系进行了研究,提出了一种高温激励线圈镁还原罐电磁感应加热装置的设计方法,利用 CST 软件中的电磁工作室模块建立 了电磁系统与传热系统的耦合模型,并通过该模型对炼镁还原系统的热损耗和激励线圈自身铜损进行了数值模拟。研究结果表 明:炼镁还原系统的总损耗在激励线圈允许工作最大温度 900 ℃时最小,该方法减小了炼镁还原系统的总损耗,提高了能量利用效 率,可以为镁还原罐电磁感应加热装置的设计提供新思路。

关键词:电磁感应加热;炼镁还原罐;高温激励线圈;能效分析 中图分类号:TM402;TF133 文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)02-0175-06

Energy loss analysis of electromagnetic induction heating device for magnesium reduction tank

YU Jian, ZHANG Ya-bin, HE Cheng-jie

(Department of Automation, Shanxi University, Taiyuan 030013, China)

Abstract: Aiming at the problem of energy loss in the electromagnetic induction heating device of magnesium reduction tank, the influence factors and the relationship between the energy transfer, the heat loss and the resistance loss of the excitation coil were studied. A new design method of electromagnetic induction heating device for high temperature excitation coil magnesium reduction tank was put forward. The coupling model of electromagnetic system and heat transfer system was established by using electromagnetic working module in CST software. And the heat loss of the reduction system and the resistance loss of the excitation coil were simulated by this model. The results indicate that the total loss of the magnesium reduction system is minimal when the excitation coil allows a maximum working temperature of 900 $^{\circ}$ C. The method reduces the total loss of the magnesium reduction system and improves the energy efficiency. It can provide a new idea for the design of the electromagnetic induction heating device for the magnesium reduction tank.

Key words: electromagnetic induction heating; magnesium reduction tank; high temperature excitation coil; energy efficiency analysis

0 引 言

当前硅热法工艺是我国金属镁冶炼的主要方法。 硅热法镁还原生产过程中效率最低、能耗最大的是镁 还原过程,能量利用效率仅为25%左右^[1],大部分热 量从炉体和烟气中散失^[2]。在电热镁还原工艺探索 上,彭建平等^[3]设计安装了一台小型内电阻硅热法还 原炉,通过使内电阻发热的方式对反应物料加热还原。 王晓刚等^[4]提出了一种多热源-电热法冶炼镁装置,根 据单炉产量和冶炼周期确定内部发热体的数量来提高 传热效率。朱广东等^[5]针对传统还原罐外向罐内传 热,传热速率低等问题,通过在还原罐中心加装可以装

收稿日期:2017-05-10

作者简介:禹 健(1971-),男,山西太原人,讲师,硕士生导师,主要从事电力电子电路拓扑及特种变压器方面的研究。E-mail:yujian71@hot-mail.com

现阶段仍然有众多使用罐式还原技术炼镁的企业 在运行,在罐式还原体系上进行电加热的改造,工艺变 化小,企业容易接受,所以针对罐式还原技术的加热方 法研究具有重要的价值意义。电磁感应加热在环境保 护、使用寿命、安全性能等方面都具有独特优势,其能 效比传统炉的能效高出两倍多^[6]。蒋黎民等^[7]针对 电磁感应加热炼镁还原罐提出了一种设计方案,在还 原罐外壁上绕设有感应线圈,通过感应线圈与感应电 源相连进行对物料电磁感应加热。然而传统的电磁感 应加热炼镁装置将感应线圈置于保温层最外侧,总损 耗不是最优。

本研究通过理论分析镁还原罐电磁感应加热 装置总损耗的变化规律,提出将激励线圈置于高温 中的设计方法,基于三维有限元仿真工具建立电磁 系统与传热系统的耦合模型,并对该模型进行数值 模拟,寻找能量传递效率最大化的结构和设计 参数。

1 系统建模

1.1 还原罐感应加热模型

炼镁还原系统剖面图如图1所示。



炼镁还原系统包括还原罐,罐外有包围着还原罐 的激励线圈和保温层。在该模型中,为不失一般性,激励线圈可置于保温层中或保温层外。其中,还原罐外 径D为0.33 m,罐壁厚度b为0.03 m,还原罐的长度 h为2.6 m,还原罐温度为1 200 °C,保温层最外侧通 过冷却装置将其稳定在 60 °C。

1.2 耦合功率分析

镁还原罐电磁感应加热装置,其终端是一个电磁 耦合系统。接于电源输出端的激励线圈加热绕组为一 次侧,被加热还原罐为二次侧,构成一个无磁芯的空心 变压器,接在一次侧的激励线圈绕组为N匝,而二次侧 相当于一匝。

等效电路模型如图2所示。



由图2可知,激励线圈激励电流 I1 为:

$$I_{1} = \sqrt{\left(\frac{I_{2}}{N}\right)^{2} + (I_{m})^{2}}$$
(1)

式中: I_2 —通过还原罐电流; I_m — 励磁电流;N— 激励 线圈匝数。

磁化电感产生的磁场强度 H、还原罐内磁通密度 有效值 B 分别为:

$$H = \frac{F_m}{kh} = \frac{NI_m}{kh} = \frac{B}{\mu}$$
(2)

$$B = \frac{B_p}{\sqrt{2}} \tag{3}$$

式中: F_m — 励磁磁动势;kh— 有效磁路长度;h— 激励 线圈长度;k— 比例系数,随着线圈半径与线圈长度的 比值的变化而不同; B_p — 磁通密度峰值。

将式(2,3)代入式(1)可得:

$$NI_1 = \sqrt{\left(I_2\right)^2 + \left(\frac{B_p kh}{\sqrt{2}\mu}\right)^2} \tag{4}$$

还原罐有效趋肤深度 ξ 、有效电阻 R_2 、耦合功率 P分别为:

$$R_2 = \frac{\pi D\rho}{h\xi} \tag{5}$$

$$\xi = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \tag{6}$$

$$P = I_2^2 R_2 \tag{7}$$

式中: *ρ*— 还原罐电阻率; *ξ*— 趋肤深度; *f*— 激励源频 率; *D*— 还原罐外直径。

由式(5~7)得:

$$I_2 = \sqrt{\frac{Ph}{D}} \sqrt{\frac{1}{\pi^3 f \mu \rho}} \tag{8}$$

磁通密度峰值 B_p 可近似得^[8]:

$$B_p = \sqrt{\frac{8\rho P}{\pi^3 h D^3 f^2 \xi}} \tag{9}$$

将式(8,9)代入式(4)可得耦合功率 P:

$$P = \frac{(NI_1)^2 \sqrt{\pi^5 D^6 \mu^3 f^3 \rho}}{\pi D^2 f \mu h + 4k^2 \rho h}$$
(10)

由式(10)可知,耦合功率 P 与(NI₁)² 成正比,与 频率 f 成正比例关系。激励线圈距还原罐之间的距离 直接影响着还原罐与激励线圈的耦合效应,对耦合效 率的影响极大。距离大,耦合效率较低,能量转换效率 低;相反,耦合效率较高,能量转换效率高^[9]。故当激 励线圈半径 r 减小时,耦合功率 P 增大,在保持恒定负 载功率时,NI₁ 值可取得更小。

1.3 热传导损耗分析

在真空条件下,炼镁还原系统的热损耗主要为高 温(还原罐外壁)向低温(最外侧保温层)的热传导损 耗,当保温层材料的导热系数λ为常数,其模型如图3 所示。



图 3 热传导模型

保温层中的温度 *T* 分布和热传导损耗 *P_r* 分别为^[10]:

$$T = T_1 - (T_1 - T_2) \frac{\ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$
(11)

$$P_{T} = 2\pi\lambda \, \frac{(T_{1} - T_{2})}{\ln \frac{r_{2}}{r_{1}}}$$
(12)

式中: T_1 — 还原罐外壁温度; T_2 — 保温层最外侧温度; r_1 — 还原罐外壁半径; r_2 — 保温层最外侧半径;r— 保 温层内任一截面半径。

保温层内任一截面半径所对应温度可由式(11)得:

$$= r_1 e^{\frac{T_1 - T}{T_1 - T_2} \cdot \ln_{r_1}^{r_2}}$$
(13)

1.4 激励线圈电阻损耗分析

激励线圈电阻率随温度变化的公式:

$$\rho_{\rm Cu} = \rho_0 (1 + \alpha_1 \Delta T) \tag{14}$$

式中: ρ_{Cu} — 线圈电阻率; ρ_0 — 常温(20 ℃) 线圈电 阻率; α_1 — 线圈电阻温度系数; ΔT — 线圈温度变 化值。

本研究激励线圈材料采用铜线,铜线绕组的温度 系数 $\alpha_1 = 0.003 93,20$ ℃ 时线圈电阻率为 $\rho_0 = 1.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot m,$ 则式(14) 可表示为:

$$\rho_{Cu} = 1.75 \times 10^{-8} \times [1 + 0.003 \ 93 \times (T - 20)]$$
(15)

铜损 *P*_{Cu} 为激励线圈绕组自身的电阻损耗,其计算公式为:

$$P_{\rm Cu} = I_1^2 R_1 \tag{16}$$

$$M = N \cdot w \cdot l \cdot S \tag{17}$$

$$R_1 = N \cdot \rho_{C_u} \cdot \frac{l}{S} \tag{18}$$

式中: I_1 —通过激励线圈铜线绕组电流;M—激励 线圈用铜质量; R_1 —激励线圈铜线绕组电阻;N— 激励线圈匝数;w—激励线圈铜线密度,取值为 8 900 kg/m³;l—激励线圈平均匝长;S—激励线 圈截面积。

由式(16~18)得:

$$P_{\rm Cu} = I_1^2 \cdot \frac{w}{M} \cdot \rho_{\rm Cu} \cdot N^2 \cdot l^2 \tag{19}$$

把式(10,13,15)代入式(19)得:

$$P_{Cu} = \frac{w}{M} \times (2\pi r_1)^2 \times \left(\frac{Ph}{D} \sqrt{\frac{1}{\pi^3 f \mu \rho}} + \frac{4Phk^2}{D^3} \sqrt{\frac{\rho}{\pi^5 \mu^3 f^3}}\right) \times (0.\ 003\ 93T + 0.\ 921\ 4) \times e^{\frac{2(T_1-T)}{T_1-T_2} \cdot \ln\frac{r_1}{r_1}}$$
(20)

其中,r₁ = 0.165 m, 当 r₂ 变化时, 对式(20) 进行

 $P_{Cu} - T$ 曲线拟合,结果如图4所示。



该图是通过归一化方法将铜损值以 $y = (z - z_{Min})/(z_{Max} - z_{Min})$ 进行转换(其中 $z_{y} - 转换前、后的值, z_{Max}, z_{Min} - 样本的最大值和最小值)。可见,当<math>r_2$ 一定时,即相同的热损耗 P_r 下,随着线圈平均匝长减小,温度增加,激励线圈电阻损耗 P_{Cu} 单调减小,即在高温下总损耗最小。

2 仿真分析

2.1 约束条件

本研究约束条件:一个是设计线圈中所占铜的 质量;另一个约束是最小的工作效率,它取决于还原 系统能够被允许的最大功率损失;还有一个约束是 当线圈被用于一个特定的温度环境时,线圈所允许 工作的最大温度;最主要的一个约束是输出功率。总 体来说,在保证耦合功率一定的情况下,减小总损 耗,提高能量传递效率,从而达到节约成本,使效益 最大化。铜的熔点为1083 ℃,本研究所允许激励线 圈工作的最大温度为900 ℃,激励线圈用铜量 M =200 kg。

2.1.1 加热功率的选择

硅热法炼镁还原过程包括升温传热、反应过程, 存在化学相变,具有较强的非线性,如要精确分析, 需借助 *CAE* 仿真工具。硅热法炼镁热还原过程中,生 成每吨镁所需热量^[11]: $Q = 4.05 \times 10^3$ kW·h,单罐 装料180 kg,出镁 28 kg,若反应周期为 T = 10 h,则 单罐反应理论所需平均加热功率 $P = 4.05 \times 10^3 \div$ 1 000 × 28 ÷ 10 = 11.36 kW。考虑到还原罐系统的热 传导损耗,实际还原罐的平均加热功率应大于理论 值,又还原罐系统的热传导损耗太大将会导致能量 效率降低,故本研究折中选取估算值 15 kW 作为平 均加热功率。

2.1.2 还原罐及保温层材料的选择

在硅热法炼镁过程中,镁还原罐是其工艺中的关键部 件,属于易耗部件,炼镁还原罐材质通常使用耐热钢 ZC40Cr25Ni16、ZG35Cr25Ni20Si 和 ZG30Cr24Ni7NRE^[12-15], 其热强度大,抗氧化性强。此类耐热钢的各种物理特性 参数不易得到,本研究在设计中使用了与上述材料性 能和成分相近的 310 合金不锈钢,其相对磁导率 $\mu_r =$ 1.02,在20 ℃ 时电阻率为78×10⁻⁸ Ω·m,648 ℃ 时电 阻率为 114.8×10⁻⁸ Ω·m,通过线性拟合可得在高温 1 200 ℃ 时电阻率为 143.6×10⁻⁸ Ω·m。

通常把导热系数较低的材料称为保温材料。氧化

铝陶瓷纤维具有较低的导热率、良好的隔热性能、高温 收缩小和良好的化学稳定性等特点^[16];硬质碳毡是新 型高温隔热材料^[17],广泛应用于各种真空电阻炉、感 应炉、烧结炉内,隔热效果优良。

两种保温材料在不同温度下的导热系数如图 5 所示。



图 5 两种保温材料在不同温度下的导热系数

温度不高于500 ℃ 时,氧化铝陶瓷纤维导热系数 较低,采用氧化铝陶瓷纤维材料作为保温层;温度高于 500 ℃ 时,硬质碳毡导热系数较低,采用硬质碳毡作为 保温层。仿真分析中所用保温层导热系数数据如图中 实线所示。

2.2 仿真验证

笔者运用 CST 电磁工作室中的稳态热场求解器,建立空心圆柱体稳态热传导模型,将保温层材料设定为图 5 实线所示的非线性导热系数,设定内外表面为恒温面,且温度分别为1 200 % 和 60 %,设定空心圆柱体内径为还原罐外径,以保温层厚度 x 为可变量进行参数扫描得到热损耗与保温层厚度 的变化关系,通过仿真工具中内置优化器,以保温层厚度 x 为优化参数、热损耗为优化目标,可得具体 热损耗下所对应的保温层厚度 x 的值,结果如表 1 所示。

表1 不同热损耗下保温层厚度 x 的值

P_T/kW	x/mm
5	108. 1
4	142. 9
3	212. 5
2	396. 7
1	1 727.1

当热损耗一定时,通过 CST 仿真工具中内置优化 器可得保温层中不同位置所对应的温度值。不同热传 导损耗下线圈在保温层的温度分布如图 6 所示。



图 6 线圈在保温层的温度分布

由此可见,随着保温层厚度的增加,热损耗减小。 在热损耗一定时,随着激励线圈距还原罐的距离 d 增 大,温度降低,保温层导热系数 λ 非线性减小,故线圈 在保温层内的温度分布随着 d 的增大而降低。

考虑实际情况,本研究给定激励源的频率f = 20 kHz,运用CST电磁工作室中的低频频域求解器,建 立空心圆柱电磁模型,设定还原罐材料物理特性参数 为上述 310 合金不锈钢高温 1 200 ℃ 下的值。在特定 热损耗下,将不同温度下对应的 d 值代入电磁模型中, 线圈电阻率设为具体温度下所对应的数值,以 NI₁ 为 可变量进行参数扫描得到耦合功率与 NI₁ 的变化关 系,通过仿真工具中内置优化器,以 NI₁ 为优化参数、 耦合功率为优化目标,可得具体耦合功率下所对应的 NI₁ 值,在该值下进行低频频域仿真分析可得出此时 的激励线圈电阻损耗值。此时的铜损值与对应的热损 耗值之和即为该温度下的总损耗值。

保持耦合功率*P* = 15 kW 时,不同热损耗下的炼 镁还原系统总损耗(标幺值) 随激励线圈所处温度的 变化关系如图 7 所示。



由图 7 可见,热损耗一定时,激励线圈在保温层所 处的温度越高,炼镁还原系统总损耗越小,与图 4 中所 得结论一致。即在不同热损耗下时,总有激励线圈允许 工作的最大温度 900 ℃ 时,总损耗最小,能量传递效 率达到最大。

2.3 计算结果及分析

激励线圈处在保温层 900 ℃ 时,总损耗随热损耗 的变化关系如 8 所示。



可见在该温度下,存在总损耗最小值,通过函数拟 合,得出经验公式:

 $P_{z} = -0.032 \times (P_{T})^{5} + 0.54 \times (P_{T})^{4} - 3.541 \times (P_{T})^{3} + 11.38 \times (P_{T})^{2} - 17.24 \times (P_{T}) + 12.71$ (21)

当热传导损耗在1 kW~5 kW 变化时,由式(21) 可求出总损耗最小值,即当热损耗为1.688 kW 时,总 损耗最小值为2.949 kW,在该条件下能量利用效率达 到81.87%。可见,合适的选择保温层厚度,把激励线 圈置于允许工作的最大温度下,可以最大程度的降低 总损耗,使能量传递效率达到最大。系统模型从内到 外依次分布为还原罐、第一保温层、激励线圈、第二保 温层。

具体尺寸及电气参数如表2所示。

参数	数值
用铜量 M/kg	200
还原罐直径 D/mm	330
第一保温层的厚度/mm	93.9
激励线圈的直径/mm	5.313
第二保温层的厚度/mm	283.849
耦合功率 P/kW	15
激励源频率 f/kHz	20
NI_1 /At	12 188
原边等效电感/mH	19.4
激励线圈截面积 S/mm ²	22.66
激励线圈电阻 R_1/Ω	3.412
还原罐有效电阻 $R_2/m\Omega$	0.136
通过还原罐的电流 I2/kA	10.52

3 结束语

本研究对镁还原电磁感应加热装置总损耗的变化 规律进行分析,提出了将激励线圈置于高温的设计方 法。仿真结果表明:激励线圈在保温层中所处温度越 高,炼镁还原系统总损耗越小。因而将激励线圈置于 保温层高温中,可以最大程度的减小炼镁还原系统的 总损耗。在激励线圈允许工作最大温度 900 ℃时,总 损耗随着热损耗的增加先减小后增大,故线圈处在保 温层 900 ℃时存在总损耗最小值,使得能量传递效率 达到最大。

该研究下一步将结合生产实际,对高温铜质线圈 镁还原电磁感应加热装置进行探讨。

参考文献(References):

- [1] 毕信鹏,赵俊学,李红伟,等.从金属镁厂热平衡来看硅热
 法炼镁节能方向[J].甘肃冶金,2012,34(2):22-24,33.
- [2] 肖友军,王灵锋,徐祥斌,等.新型硅热法炼镁还原炉的设 计开发[J].中国有色冶金,2010,39(2):45-47,76.
- [3] 彭建平,冯乃祥,王紫千,等. 硅热法炼镁节能还原炉研究 [J]. 节能,2008,27(8):13-14.
- [4] 王晓刚,梁 磊,杨建森.多热源-电热法冶炼镁装置及工 艺[P].中国:CN200610104550.3,2007-3-14.
- [5] 朱广东,刘英杰,张郝琨.一种内外加热的金属镁还原加 热方法[P].中国:CN201510513874.1,2015-12-23.
- [6] CHOI J, KIM S K, KIM K, et al. Design and performance evaluation of a multipurpose HTS DC induction heating ma-

chine for industrial applications[J]. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**,2015,25(3):1-5.

- [7] 蒋黎民,石金全. 感应加热还原炼镁装置[P]. 中国: CN96247592.0,1997-10-22.
- [8] IQBAL M B, MASUD N, AQIL M. Design of induction coil of a coreless induction furnace to melt Aluminum[J]. Multtopic Conference, 2014, 78(12):523-528.
- [9] 韩逸冰.高频感应加热设备感应器的设计[D].郑州:郑 州大学电子与通信工程学院,2013.
- [10] 章熙民,任泽霈,梅飞鸣,等.传热学[M].北京:中国建 筑工业出版社,2007.
- [11] 毕信鹏. 硅热法炼镁流程节能工艺研究[D]. 西安:西安 建筑科技大学冶金物理化学学院,2012.
- [12] 董鹏敏,管争荣.用于镁还原罐的新型耐热合金及制作 工艺[J].热加工工艺,2013,42(11):63-65.
- [13] 李德臣.制镁还原罐的研制[J],铸造技术,2002,23 (2):124-128.
- [14] 夏兰廷,王录才,王凤英,等.炼镁还原罐的高温破坏形式及其防护对策[J].铸造设备研究,2002(5):40-42,52.
- [15] 徐凤莲,杨洪业,李国瑞,等. Fe-Cr 基耐热钢 1250℃的 抗氧化性能研究[J]. 热加工工艺,2009,38(4):42-45.
- [16] 孔 嵩.基于动物纤维(蚕丝)模板的隔热陶瓷纤维的 研究[D].南京:南京理工大学材料工程学院,2013.
- [17] 李聪新,任 成,杨星团,等.高温气冷堆用碳毡材料导 热系数测量及反问题计算[J].原子能科学技术,2014, 48(11):1976-1984.

[编辑:张 豪]

YU Jian, ZHANG Ya-bin, HE Cheng-jie. Energy loss analysis of electromagnetic induction heating device for magnesium reduction tank[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,35(2):175-180. 《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn

禹 健,张亚彬,贺成杰.镁还原罐电磁感应加热装置的能量损耗分析[J].机电工程,2017,35(2):175-180.