

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.06.008

感应加热瓦楞辊的磁路模型研究

杜善东^{1,2}, 王允建¹, 王国东¹, 谢贝贝¹

(1. 河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003; 2. 菏泽学院 鄄城分校, 山东 鄄城 274700)

摘 要:针对电磁感应加热瓦楞辊的结构尺寸与加热功率关系不明,结构设计和电磁热耦合仿真时,其材料、结构尺寸的选取缺乏直观依据的问题,提出了基于磁路原理的瓦楞辊结构的磁路模型,在忽略漏磁和磁饱和前提下,导出了感应加热的理论功率与瓦楞辊的结构尺寸、材料性质和所通感应电流的关系,给出了具体的解析表达式,并且仿真分析了磁导率对加热功率的影响,为瓦楞辊的设计提供了一种思路,减少了有限元结构仿真时材质和结构尺寸选取的盲目性。

关 键 词:包装机械;瓦楞辊;感应加热;磁路模型;加热功率

中图分类号:TM924.01

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2015)06-0033-04

Magnetic Circuit Model of Induction Heating Corrugated Roller

DU Shandong^{1,2}, WANG Yunjian¹, WANG Guodong¹, XIE Beibei¹

(1. School of Electrical Engineering & Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China;

2. Yuncheng Campus, Heze University, Yuncheng, Shandong 274700, China)

Abstract: It is lack of intuitive basis how to select materials and sizes when design the structure or do electromagnetic thermal coupling simulation of corrugating roller, because the relationships are unknown between the structure size and the heating power of electromagnetic induction heating corrugating roller. To solve the problem, this paper put forward the magnetic circuit model of corrugated roller based on the principle of magnetic circuit. Then under the premise that ignored magnetic flux leakage and magnetic saturation, the relationship was induced between the theory power and the size of structure, material properties and conduction currents in induction rollers. And more, the analytical expression was given, the simulating results show how the permeability of material affects the heating power, which provides a new way for the design of corrugated roller, and reduces the blindness in selecting material and structure size with the finite element software.

Key words: packing machinery; corrugated roller; induction heating; magnetic circuit model; heating power

我国瓦楞包装行业是一个规模大、高能耗、高污染的行业。在国内节能环保和国际上降低大气污染物排放的双重压力下,瓦楞纸生产设备的升级换代迫在眉睫。采用高效清洁的电磁感应加热替代锅炉蒸气加热是一种良好的选择。电磁感应加热因清洁、节能,容易实现自动控制等优点,倍受关注。文献[1]采用有限元模型,对比分析了3种结构和2种材料的感应加热蒸气发生器的加热组件,结果表明加热结构和材质对磁场均匀分布和加热效率有较大影响。文献[2]采用有限元模型,研究了感应加热参数对钢板退火变形的影响。文献[3]研究工件加热区高度和感应线圈长度

对温度均匀性的影响。文献[4]采用二维有限元模型,分析了电磁热耦合的磁场分布规律和温度分布规律,并指出感应器加装导磁体可提高加热效率。文献[5]提出了感应加热淬火感应器的设计原则。文献[6]研究了感应加热功率模块的驱动技术。电磁感应加热在造纸行业也有应用^[7-8]。文献[9]提出了瓦楞辊的分段分区加热,对表面温度分布均匀性做了分析。文献[10]对比分析了行波加热和横向加热对温度场的影响。

要使瓦楞辊表面温度分布均匀,需使瓦楞辊的每个工作区获得相同的净能量,即需对每个感应线圈的

收稿日期:2015-03-08;修回日期:2015-07-07

作者简介:杜善东(1975),男,山东鄄城人,硕士研究生,高级讲师,主要从事电磁感应加热的研究。通信作者:王允建, E-mail: yunjian_wang@163.com

功率和感应加热区作分析,通过调控感应线圈的功率实现温度均匀分布的目的。本文在文献[9]的基础上,采用磁路原理分析了感应加热瓦楞辊的理论功率,为瓦楞辊感应加热提供了技术支持。

1 瓦楞辊结构

由于瓦楞辊外周具有齿结构,若在瓦楞辊外布置感应加热装置,在设备运转时,因感应加热装置与瓦楞辊外周间距不同,造成加热系统不能稳定工作,从而无法保证加热效果,影响产品质量。为了保证加热效果,并且产生均匀表面温度,文中提出将感应加热装置放置在瓦楞辊内部,并采用分段分区的多单元加热方式^[9],瓦楞辊的结构示意简图如图1所示。

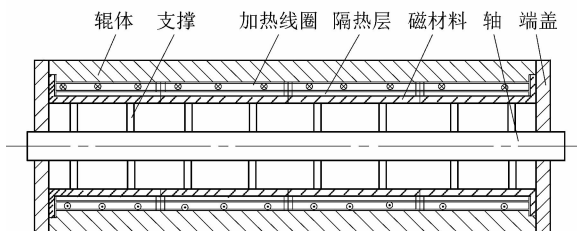


图1 瓦楞辊结构示意图

Figure 1 Structure schematic diagram of corrugated roller

在图1中的感应线圈通电后,辊体内壁产生感应电流,该电流通过辊体电阻产生热,其热通过辊体的传导作用,作用于辊体外表面,形成表面温度分布。为了简便,采用类似图1结构的一个加热区两段感应加热圆辊进行分析。

假设:主磁路之外的漏磁忽略不计;每个磁路的磁通不饱和。在此假设条件下,2段加热的每个感应加热区的结构和磁通如图2所示。图中相关参数含义如下: r_1 为磁材料内径, r_2 为磁材料外径, δ_1 为端部磁材料厚度, r_3 为瓦楞辊体内径, r_4 为瓦楞辊体外径, t 为感应加热的透入深度, L_1 为相应磁路有效长度。

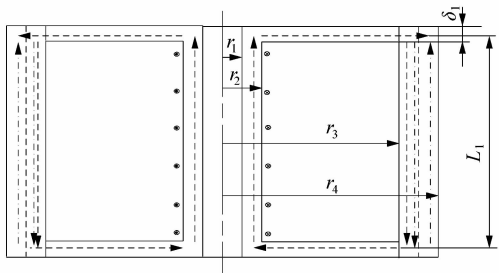


图2 一段加热区直径剖面磁路

Figure 2 Diameter profile magnetic circuit of a heating structure

根据图2可估算磁阻如下:

$$R'_1 = \frac{L_1}{\mu_{r1} \pi (r_2^2 - r_1^2)}; R''_1 = \frac{L_1}{\mu_0 \pi r_1^2}; R_1 = \frac{R'_1 R''_1}{R'_1 + R''_1};$$

$$R_2 = \int_{r_1}^{r_3} \frac{L_1 dr}{2 \pi \mu_{r1} r \delta_1} = \frac{L_1}{2 \pi \mu_{r1} \delta_1} \int_{r_1}^{r_3} \frac{dr}{r} = \frac{L_1}{2 \pi \mu_{r1} \delta_1} \ln \frac{r_3}{r_1};$$

$$R_3 = L_1 / [\pi \mu_{r2} ((r_3 + 3t)^2 - r_3^2)]; R_4 = L_1 / [\pi \mu_{r2} ((r_4^2 - (r_3 + 3t)^2))].$$

式中: R_1 为磁材料的轴向磁阻; R_2 为磁材料的横向磁阻; R_3 为辊体感应区磁阻; R_4 为辊体非感应区磁阻; μ_0 为空气的磁导率; μ_{r1} 为磁材料的磁导率; μ_{r2} 为瓦楞辊体的磁导率。

2 磁路模型及功率分析

根据感应加热原理,可认为感应电流只分布在辊体内表面深入 $3t$ 区域。由图2可知,在辊体外表面浅层区域内磁场强度近似为零,它是感应线圈的磁场与感应涡流的磁场所共同作用的结果。感应线圈的磁路由磁材料和辊体区构成,感应涡流的磁路分布在辊体中。根据上述分析可单独建立感应线圈的磁路和感应涡流的磁路,分别如图3和图4所示。图中 i_1 和 i_2 为该加热区由感应线圈的电流, n 为感应线圈的匝数, i_{o1} 和 i_{o2} 为感应涡流。

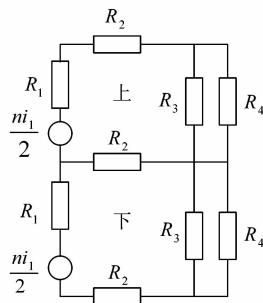


图3 感应结构的等效磁路

Figure 3 Equivalent magnetic circuit of induction zone

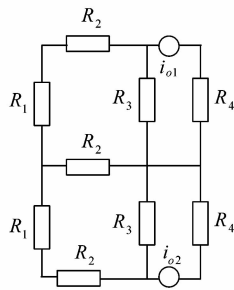


图4 涡流的等效磁路

Figure 4 Equivalent magnetic circuit of eddy zone

根据图3和磁路定律可知,当电流 i_1 单独作用时,通过上半边的磁阻 R_1 的磁通为

$$\varphi'_1 = \frac{ni_1}{R + R_a} \quad (1)$$

式中, $R_b = R_3 R_4 / (R_3 + R_4)$, $R = R_1 + R_2 + R_b$, $R_a = R R_2 / (R + R_2)$ 。

通过上半边的磁阻 R_4 的磁通为

$$\varphi'_4 = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \varphi'_1 \quad (2)$$

当电流 i_2 单独作用时,通过上半边的磁阻 R_1 的磁通为

$$\varphi''_1 = \frac{R_2}{R} \times \frac{ni_2}{R + R_a} \quad (3)$$

通过上半边的磁阻 R_4 的磁通为

$$\varphi''_4 = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \varphi''_1 \quad (4)$$

所以当电流 i_1 和 i_2 同时作用时,通过上半边的磁阻 R_4 的磁通为

$$\varphi_4 = \varphi'_4 + \varphi''_4 \quad (5)$$

根据图4,忽略下半边漏磁可得通过上半边的磁阻 R_4 感应涡流产生的磁通为

$$\varphi_{o1} = \frac{i_{o1}}{R_c} \quad (6)$$

式中: $R_c = (R_1 + 2R_2) R_3 / (R_1 + 2R_2 + R_3) + R_4$ 。

该磁通大小等于驱动电流在该磁阻上产生的磁通 φ_4 ,且方向相反,即

$$\varphi_{o1} = -\varphi_4 \quad (7)$$

整理式(1)~(7)可得涡流 i_{o1} 的表达式为

$$i_{o1} = \frac{-nR_2 R_3}{R + R_a} \frac{R_c}{R_3 + R_4} \left(i_1 + \frac{i_2}{R + R_2} \right) \quad (8)$$

则加热功率为

$$P_s = R_d \int_0^T i_{o1}^2 dt = \frac{(nR_2 R_3 R_c)^2 R_d f}{(R + R_a)^2 (R_3 + R_4)^2} \times \left(\int_0^T i_1^2 dt + \frac{2}{R + R_2} \int_0^T i_1 i_2 dt + \frac{1}{(R + R_2)^2} \int_0^T i_2^2 dt \right) \quad (9)$$

$$R_d = \rho \frac{2\pi \frac{2r_3 + t}{2}}{3L_1 t} \approx \rho \frac{2\pi r_3}{3L_1 t} = \frac{4r_3}{3L_1} \sqrt{\rho \mu_r f} = k \sqrt{\rho \mu_r f} \quad (10)$$

式中: R_d 为该感应加热区的导体电阻, ρ 为辊体材料的电阻率, $k = 4r_3 / 3L_1$, f 为频率。

结合式(9)和(10)可得

$$P_s = \frac{k(R_2 R_3 R_c)^2 n^2 \sqrt{\mu_r \rho f^3}}{(R + R_a)^2 (R_3 + R_4)^2} \left[\int_0^T i_1^2 dt + \frac{2}{R + R_2} \int_0^T i_1 i_2 dt + \frac{1}{(R + R_2)^2} \int_0^T i_2^2 dt \right] \quad (11)$$

当电流 i_1 和 i_2 同频同相时,加热功率 P_{st} 为

$$P_{st} = \frac{k(R_2 R_3 R_c)^2 n^2 \sqrt{\mu_r \rho f}}{(R + R_a)^2 (R_3 + R_4)^2} \left(\frac{I_{1m}^2}{2} + \frac{I_{1m} I_{2m}}{R + R_2} + \frac{I_{2m}^2}{2(R + R_2)^2} \right) \quad (12)$$

当电流 i_1 和 i_2 同频反相时,加热功率 P_{sf} 为

$$P_{sf} = \frac{k(R_2 R_3 R_c)^2 n^2 \sqrt{\mu_r \rho f}}{(R + R_a)^2 (R_3 + R_4)^2} \left(\frac{I_{1m}^2}{2} - \frac{I_{1m} I_{2m}}{R + R_2} + \frac{I_{2m}^2}{2(R + R_2)^2} \right) \quad (13)$$

当电流 i_1 和 i_2 同频相位互差 90° 时,加热功率 P_{sc} 为

$$P_{sc} = \frac{k(R_2 R_3 R_c)^2 n^2 \sqrt{\mu_r \rho f}}{(R + R_a)^2 (R_3 + R_4)^2} \left(\frac{I_{1m}^2}{2} + \frac{I_{2m}^2}{2(R + R_2)^2} \right) \quad (14)$$

式(12)~(14)中, I_{1m} 和 I_{2m} 为同相位电流幅值。

对比式(12)~(14)可知

$$P_{st} > P_{sc} > P_{sf} \quad (15)$$

且电流 i_1 和 i_2 同频反相时,电流 i_2 对 i_1 感应区下的加热功率影响最小。

同理可得另半边的感应加热功率为

$$P_d = \frac{k(R_2 R_3 R_c)^2 n^2 \sqrt{\mu_r \rho f^3}}{(R + R_a)^2 (R_3 + R_4)^2} \left[\int_0^T i_2^2 dt + \frac{2}{R + R_2} \int_0^T i_1 i_2 dt + \frac{1}{(R + R_2)^2} \int_0^T i_1^2 dt \right] \quad (16)$$

针对式(16)的分析,具有与式(15)相同的结论。

通过上述分析,在需快速加热时,应采用电流 i_1 和 i_2 同相的控制;在需要温度均匀调控时,应采用电流 i_1 和 i_2 反相的控制。在电流反相时单独调控电流 i_1 或 i_2 的幅值,可使对应加热区的感应加热功率变化,其他区的感应加热功率变化较小,从而更容易获得均匀温度分布。

3 仿真分析

假设每个加热区长为 $L_1 = 400$ mm, $r_1 = 200$ mm, $r_2 = 320$ mm, $r_3 = 350$ mm, $r_4 = 400$ mm, $d_1 = 3$ mm, 瓦楞辊材质 48CrMoA 合金钢,其电阻率按铁计, $\rho = 9.78 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 。真空磁导率为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m。在此条件下,分别考察不同磁材料的磁导率、不同瓦楞辊材质的磁导率、不同供电频率等因素对加热功率的影响。

仿真设置:瓦楞辊材质的磁导率为 10 H/m, $n = 40$, 同相位电流幅值 $I_{1m} = I_{2m} = 10$ A, 频率 $f = 500$ Hz 时的仿真结果如图5所示。

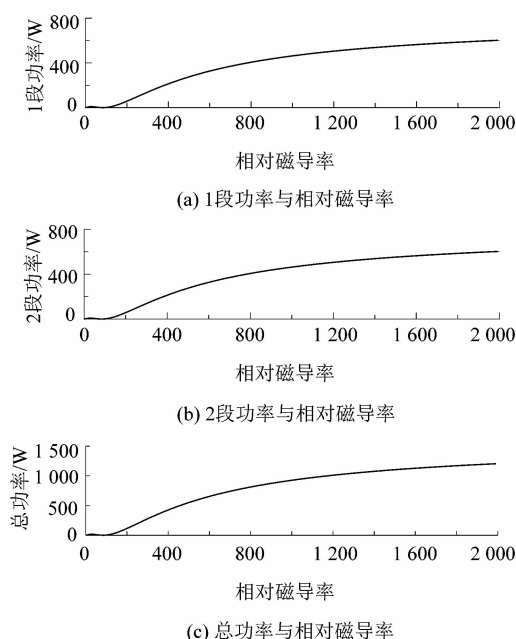


图5 加热功率随导磁材料的相对磁导率变化曲线图

Figure 5 Change curve of heating power with relative permeability of magnetic material

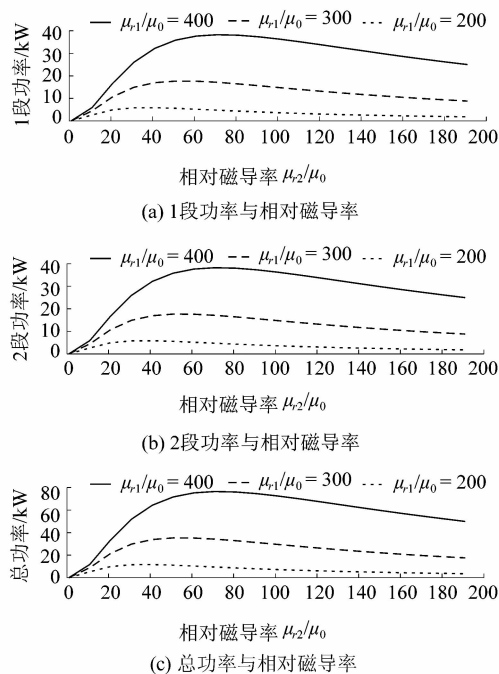


图6 加热功率随辊体的相对磁导率的变化曲线

Figure 6 Change curve of heating power with relative permeability of corrugated roller body

由图5中可以看出,在频率不变、电流幅值固定时,加热功率随选用磁材料的相对磁导率增加而增加,当相对磁导率比较小时,如 $\mu_r/\mu_0 \leq 400$,加热功率增加迅速,当相对磁导率比较大时,加热功率增加缓慢。

考虑到相对磁导率比较大时,容易出现磁饱和现象,故建议磁材料的相对磁导率比不易过大。

不同 μ_{r1} 时,辊体材料的相对磁导率对加热功率的影响如图6所示。由图6可看出,随着 μ_{r1} 的增加,加热功率在增大,且对于不同的 μ_{r1} ,最大功率点的位置不同。例如当 $\mu_{r1} = 200\mu_0$ 时,最大功率位于 $\mu_{r2} = 40\mu_0$ 附近;当 $\mu_{r1} = 300\mu_0$ 时,最大总功率位于 $\mu_{r2} = 51\mu_0$ 附近;当 $\mu_{r1} = 400\mu_0$ 时,最大总功率位于 $\mu_{r2} = 71\mu_0$ 附近。由此可见,为了提高加热功率,磁材料的相对磁导率应选得大些,比如取 $\mu_{r1} = 400\mu_0$ 。考虑到随着温度的升高,磁导率将降低,故在常温时可取 $\mu_{r2} = 100\mu_0$ 左右的材料。该仿真结果还表明在 μ_{r1} 很小,或者 $\mu_{r1} = \mu_0$ 时,在低频供电条件下,所获得的加热功率很小。

4 结语

本文通过磁路模型建立了感应加热功率与瓦楞辊的结构尺寸、材质的磁导率、电源频率、工作电流等因素的关系,该关系对瓦楞辊的尺寸、材质选择和电气参数设计具有参考意义。仿真说明了导磁材料的磁导率和辊体材质的磁导率对加热功率的影响,该影响与有限元仿真的规律基本相符,这表明了磁路模型的有效性。多段感应加热的磁路模型类似于两端加热模型,都是多输入多输出强耦合模型,这为多段加热时获得表明温度均匀分布地调控提供了基础。

参考文献:

- [1] 张化福,张秋翔,李双喜,等.电磁感应加热组件内磁场分布的数值分析[J].机电工程技术,2013,42(9):77-81.
- [2] 孙凤胜,刘玉君,邓燕萍.钢板局部感应加热的有限元分析[J].造船技术,2009(6):36-38.
- [3] TAVAKOLI M H, KARBASCHI H, SAMAVAT F. Influence of workpiece height on the induction heating process[J]. Mathematical and Computer Modelling,2011,54(1/2):50-58.
- [4] 张雪彪,杨玉龙,刘玉君.钢板高频感应加热过程电磁-热耦合场分析[J].大连理工大学学报,2012,52(2):676-682.
- [5] 李芝明.感应加热淬火感应器的设计原则[J].金属加工(热加工),2012(17):46-47.
- [6] 吴建华.电磁感应加热系统及IGBT功率模块驱动[D].济南:山东大学,2010:18-32.
- [7] 张锋,李运来.造纸机电磁感应加热烘缸的研究与设计[J].黑龙江造纸,2006,34(4):34-35.
- [8] 张伟,麻红昭,张华.基于IGBT中频感应加热造纸烘缸系统的设计与实现[J].轻工机械,2006,24(4):11-14.
- [9] 谢贝贝,王允建,王国东,等.瓦楞辊的分区分段电磁感应加热仿真研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2013,32(4):467-471.
- [10] 王军华,汪友华,李建贵.行波感应加热与横向磁通感应加热涡流场均匀度比较[J].电工技术学报,2007,22(2):199-202.