

29-31

●实用节能技术

电炉感应圈的异型设计

杜锦才¹ 王晓华² 丁大庆³

(1,3 浙江大学电力电子技术应用国家工程研究中心, 浙江 杭州 310027)

(2 浙江大学后勤服务总公司, 浙江 杭州 310027)

张红梁⁴

(兰溪第二职业学校, 浙江 兰溪 321100)

周一飞

(浙江工业大学高等建材职业技术学院, 浙江 杭州 310032)

TM924.502

摘 要 介绍了电炉感应圈电流分布特性, 提出了感应圈导体截面的异型设计, 分析了优化设计后的经济性。图 2 参 5。

关键词 感应圈 异型 设计 优化

电炉 感应加热

A Special Coil Design for Induction Furnaces

Du Jincan, Wang Xiaohua, Ding Daqing

(Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Zhang Hongliang

(Lanxi 2nd Technical School, Lanxi, Zhejiang 321100)

Zhou Yifei

(Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032)

Abstract: This article introduces the disperse characteristics of electric current in the coil of induction furnaces, puts forward a special cross section design of the coil and analyses its effect on reducing electricity consumption.

Keywords: Induction coil, Special Design, Electricity Saving

1 前言

感应加热是指利用交变电流产生的交变磁场非接触地对感应圈(或感应炉)内的金属工件实现涡流加热的过程, 如图 1 所示。

为了达到感应加热工件的目的, 感应圈内流过的电流必须具备以下两个条件: (1) 电流值足够大; (2) 频率适当。电流的大小取决于加热工件的生产率和感应圈两端的电压等级, 而频率的高低取决于工件的径向几何尺寸和工件加热所要求的透入深度^[1]。对于感应加热而言, 除了少数工频加热外, 大量使用的是中频感应加热(频率范围一般为 $400 \sim 1 \times 10^4 \text{ Hz}$) 和高频感应加热(频率范围一般为 $3 \times 10^4 \text{ Hz}$ 以上)。根据电磁场理论, 交流

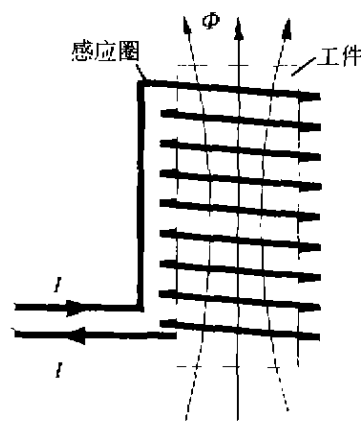


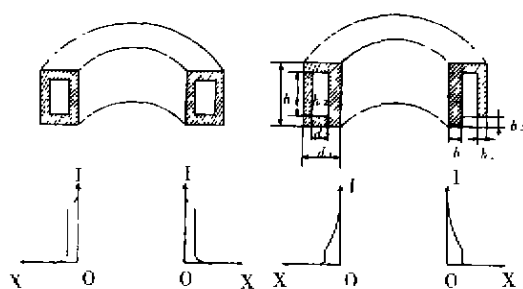
图 1 感应加热示意图

电流流过导体时会产生“集肤效应”。电流的频率越高, 其集肤的程度就越严重, 导体的有效截面就

· 杜锦才 男, 1964 年 3 月出生, 1985 年毕业于浙江大学电机工程系。现为浙江大学电力电子技术国家工程研究中心工程师。长期从事感应加热线路的研究、开发和设计工作。

越小。又因为感应圈一般都呈环形结构,电流的分布还存在“圆环效应”,即电流趋于环形导体的内侧。频率越高,导体环的直径越小,其“圆环效应”就越严重^[2]。由于以上两个效应的存在,对于频率较高的中频和高频感应加热,感应圈内的电流主要是沿其内侧集中分布,其有效导电截面也就主要取决于感应圈内侧的截面,如图2中阴影部分所示。

实际应用中,感应圈铜管截面的设计、选取,要兼顾电流的大小和密度分布、材料成本以及加工工艺等各种因素。在应用较广泛的500~4000Hz频段,很少有各种因素均比较符合要求的理想设计。根据电磁场理论分析,在该频段的感应圈的理想壁厚为3~9cm^[3]。但这样的壁厚对于材料成本和工艺制作都是不可取的。故在实际的设计过程中,不得不牺牲电流密度的合理选取以满足材料成本和工艺制作的合理要求。感应圈有效截面的缩小,将影响感应圈内电流的密度和合理分布,必然导致感应器的电效率下降和整个加热装置系统电、热效率的下降。为此,我们设计了感应圈铜管的四壁不均匀的异型导电管,使其内侧壁厚能充分满足电流密度和电流合理分布的要求,而其余三壁厚度又能满足材料成本和工艺制作的合理要求,从而解决了上述难以调和的矛盾,使各种因素均能得到良好的满足^[4]。



(a)通用方铜管

(b)异型方铜管

图2 感应圈电流沿截面分布示意图

2 异型截面的设计

作为感应加热用的感应圈,其电流非常大,通常达到几千安甚至上万安;又由于感应圈电流的频率较高,“集肤效应”和“圆环效应”均比较严重,在实际设计过程中,电流密度的大小与分布是我们必须首先要考虑和重视的环节。其次,我们也

必须充分考虑材料的成本和工艺制作的简单可行。

2.1 导电管内的电流分布情况

根据电磁场原理,导电管内电流沿横截面的分布如图2所示。图中,阴影部分为导体内电流的实际分布区。

从图2可以看出,电流沿截面的分布是不均匀的,电流密度在靠近感应圈内侧表面处为最大,并由内向外呈自然指数函数的趋势下降。电流的频率越高,集肤效应现象就越明显。我们常用透入深度 Δ_0 (cm)来表示电流的集肤程度:

$$\Delta_0 = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}$$

式中, ρ 为感应圈导体的电阻率($\Omega \cdot \text{cm}$); μ_r 为感应圈导体的相对导磁率; f 为流过感应圈电流的频率(Hz)。

对于一定频率的电流,它在铜质导体内的透入深度是确定的。从图2(a)可以看出,以往通用的方铜管,由于其四侧壁厚均等,内侧壁厚度 b_1 相对较薄,使得导体在有效的电流分布区内,截面积相对较小而电流密度较大;又从图2(b)可以看出,经特殊设计的异型铜管,根据导体内的电流分布特性,对内侧壁 b_1 进行加厚设计,使得导体的有效截面得以增加而电流密度得以下降。

2.2 导体截面参数的合理设计

2.2.1 导体截面的高度

导体截面的高度 h_1 主要取决于感应圈的整体设计,即取决于感应圈的总体长度(或叫炉体的高度)、圈数,以及圈间绝缘材料的厚度等。我们的设计原则是在保证圈间绝缘的前提下,导体截面的高度越高越好。一则有利于被加热工件的热均匀性,二则也有利于提高感应圈的电效率。

2.2.2 导体的壁厚

由于我们采用了壁厚不均等的特殊设计,有效地解决了电流密度的选取和材料成本、工艺制作之间的矛盾。这也就是我们所谓的“异型”之处。

导体内侧壁厚的选取:导体内侧是电流密度的集中区。它的厚度应根据电流的透入深度来选取,一般取 $b_1 = 2\Delta_0$ 为宜。选小了,会影响电流密度的大小与分布,进而影响感应圈的电效率和装置的系统效率^[5];选大了会浪费材料,而对电流密度的大小和分布影响不大。

在以往的设计中,由于采用等壁厚铜管,其内壁的厚度并不能完全按照电流的透入深度来选取,而必须兼顾到材料成本和工艺制作。这样的选取结果,对于合理的电流密度和节能的要求而言,显然不合理。尤其是对电流频率在 500~4000Hz 的感应圈,集肤效应明显而透入深度又相对较大,这种不合理性则表现得更为突出。假如完全按照电流的透入深度来选取壁厚,一则受高度 h_1 的限制;二则受制作工艺的限制;三则材料成本大为增加。故这样的选取,几乎不可能。而恰恰在这一频段,感应加热的使用是大量的。

其余三侧壁厚的选取:该三侧壁厚的选取并不依赖于电流密度的大小和分布,而是取决于铜管的机械强度、冷却水压的大小、制作工艺的可行性以及省材的原则等。根据实际经验,一般取 $b_2 = 2\text{mm}$ 左右是比较合理的。

2.2.3 导体的冷却内空尺寸

冷却内空高度 $h_2 = h_1 - 2b_2$;

冷却内空宽度 $d_2 = S_2/h_2$: 式中, S_2 为冷却水所要求的导体内空截面积(计算从略)。

特别注意, d_2 不能太小,否则在制作时铜管容易变形而阻断水路。

2.2.4 导体的宽度

铜管的宽度 $d_1 = d_2 + b_1 + b_2$ 。

3 实际效果

这种专门设计的异型导电管,由于其内侧壁的厚度比通用规格的方铜管有所增加,使铜管的有效截面得以增加,电流密度得以下降。

以常用的 250kW/1000Hz 的金属熔炼炉为例。通常采用 25mm×25mm×2mm 的紫铜管,导电率 $\rho = 1.79 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$; 相对导磁率为 $\mu_r = 1$; 感应圈直径 $D = 60\text{cm}$; 匝数 $n = 18$ 匝; 电流频率 $f = 1000\text{Hz}$ 。则其电流的透入深度 $\Delta_0 = 0.21\text{cm}$; 导体的有效截面约为 $S = h_1 \times b_1 = 2.5 \times 0.2 = 0.5\text{cm}^2$; 导体的总长度 $L = D \times \pi \times n =$

3393cm; 感应圈的等效电阻 $R = \rho \cdot L \div S = 0.012\Omega$ 。

我们经过专门设计,适当增加感应圈方铜管的内侧壁厚度 b_1 ; 并在保持感应圈匝间间距不变和绝缘强度许可的前提下,适当增加方铜管的高度 h_1 , 使感应圈的有效导电截面得以增加,而电流密度得以下降。例如,我们采用的异型铜管内侧壁厚 $b_1 = 2\Delta_0 = 0.40\text{cm}$, 其余三侧管壁厚度 $b_2 = 0.2\text{cm}$, 高度 $h_1 = 2.8\text{cm}$ 。则导体的有效截面约为 $S' = 1.12\text{cm}^2$; 感应圈的等效电阻 $R' = \rho \cdot L/S' = 0.0054\Omega$ 。

流过感应圈的谐振电流值约为 2600A, 则仅感应圈铜管的损耗就减少 $\Delta P = I^2(R - R') = 44.6\text{kW}$, 占装置总功率的 17.8%。

异型导电管的采用不仅可降低感应圈本身的损耗,而且可提高装置的系统电效率和热效率^[5], 节能效果显而易见。

4 结束语

该种异型导电管是根据电磁场原理中的“集肤效应”和“圆环效应”设计的。对于具有明显集肤效应和圆环效应的其它场合也具有一定的指导意义,如大电机的线圈设计等。尤其是电流频率在 500~4000Hz 的感应加热装置中,节能效果尤为显著。但它也有一个缺点,那就是异型铜管为非通用规格的方铜管,必须定制,在批量较小时,成本比通用规格的方铜管略高些。

参 考 文 献

- 1 林渭勳. 可控硅中频电源. 北京: 机械工业出版社, 1989
- 2 黄礼镇. 电磁场原理. 北京: 人民教育出版社, 1980
- 3 杨思俊, 朱伯年. 晶闸管中频电源基本知识. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1989
- 4 杜锦才. 一种异型导电管. 中国专利, ZL98214388.5.
- 5 杜锦才. 关于中频电源系统效率的探讨. 节能, 1998(7)

收稿日期: 1999-08-13

欢迎订阅《科技情报开发与经济》

本刊是公开发行的综合性科技期刊(双月刊, 刊号 ISSN 1005-6033, CN 14-1121/N)。主管单位: 山西省科学技术委员会; 主办单位: 山西省科技情报研究所、山西省科技情报学会

本刊为大 16 开, 彩印四封, 2000 年将增为 80 个页码。

本刊自办发行, 每期定价 5.00 元, 全年定价 30.00 元。

地址: 山西省太原市迎泽大街 366 号

邮编: 030001 联系人: 曹明顺

银行开户名称: 山西省科学技术情报研究所

汇款开户行: 太原市工商银行新建南路分理处

帐号: 04126405218