

# 双中频感应加热在雾化金属制粉设备中的应用

周美霞, 陈 平, 卢其云

(广州有色金属研究院, 广东 广州 510650)

**摘 要:**通过对感应电流方向、感应加热频率、感应圈距离等影响因素的分析,以及测量距感应圈不同位置的铁圈温度的模拟方法,来判断感应圈之间的相互影响。研究表明:当两个感应圈相距12 cm以上以及采用不同中频感应电源频率时,两中频电源相互间影响可忽略。在雾化制粉设备中采用中频感应加热的方法加热熔炼炉和中间包的设计是可行的。

**关键词:**双中频; 中间包; 雾化

**中图分类号:** TE927.907

**文献标识码:** A

中频感应加热具有加热速度快、温度高等优点,被广泛应用于金属、合金的熔炼及热处理等工艺<sup>[1-2]</sup>。在雾化金属制粉技术中,通常采用中频加热的方法将金属或合金原料熔化为熔液,然后倒入一个下方带有漏孔的中间包中,从中间包漏孔漏下的熔液经过喷嘴时被喷嘴喷出的高速气流喷吹为液滴冷凝成粉末,或流到高速旋转的金属单辊或双辊上被打击成粉末或小片,并经进一步处理成为所需产品。在这一制粉技术中,中间包通常需要加热保温,一般设计的加热温度低于被加热炉料熔化后形成的合金熔点约200 K,以保障雾化过程的顺利进行。在真空或保护气氛熔炼设备中,常用电阻炉加热中间包,但电阻炉加热速度慢、温度低,加热温度通常低于1173 K,应用受到限制。因此,考虑采用中频感应加热炉加热中间漏包,以保证加热速度和加热温度。但是,采用双中频感应加热方式,存在两个中频相互干扰的问题。目前,应用双工频<sup>[2]</sup>、双高频加热<sup>[1]</sup>的研究已有报道,关于双中频加热方式在雾化制备金属粉末设备中的应用研究尚未见报道<sup>[2-3]</sup>,因此有必要进行双中频感应加热方式的探讨。

## 1 实验方法及设备

采用锦州三特公司制造的100 kW、2.5 kHz中频感应加热炉为主加热设备熔炼合金原料,感应圈内径23 cm,七圈,内置15号石墨坩埚(上口直径17 cm,高27 cm);中间漏包也用15号坩埚,并用80 kW、4 kHz中频电源加热,感应圈尺寸与主加热中频电源的感应圈相同。设备抽真空充氮气。

在模拟实验中,将一个直径23 cm、宽3 cm、厚0.3 cm的铁圈放置在离主加热电源感应圈底平面不同位置。对铁圈每一确定位置,主加热电源均以相同功率加热30 min,测量铁圈的温度,以此来判断主加热感应圈和保温炉感应圈在不同位置的电磁感应强度。

## 2 结果及分析

### 2.1 两个中频电源加热感应圈磁力线方向的影响

图1为两个中频加热感应圈重叠放置的示意图。当两个中频电源频率相同且完全同步时,如果磁力线方向相同,两感应圈的磁感应强度将互相加强;

收稿日期:2010-05-12

作者简介:周美霞(1956—),女,广东开平人,工程师,学士。

如果磁力线方向相反,两感应圈磁感应强度将产生互相对消作用。

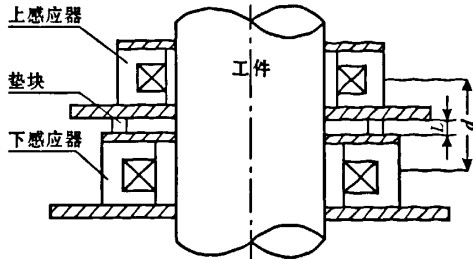


图1 两个感应圈位置的示意图  
Fig.1 Schamatic diagram of position of two induction coils

图2为两个感应圈并列放置的示意图。若两个相邻感应圈间的磁力线方向相同,则通过导体(铁圈)的磁感应强度增强;若两个相邻感应圈磁力线方向相反,则通过导体(铁圈)的磁感应强度减弱。当两个通有交流电的感应圈进一步靠近时,如果在某一瞬间两并列感应圈中的电流方向相反,那么在相互靠近的两线圈之间所建立的磁场方向相同,两感应圈内的总磁场强度增大;反之亦然。这将导致两感应圈中的电流作重新分布,此现象称为邻近效应<sup>[3]</sup>。

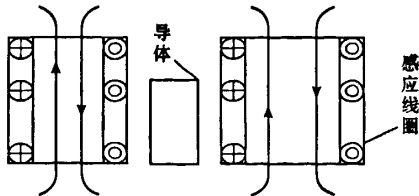


图2 感应线圈邻近效应示意图  
Fig.2 Schamatic diagram of two induction coils close to effect

2.2 中频电源频率的影响

考虑磁感应强度对消最严重的情况,即两个感应圈上下重叠放置时的情形(图1)。当两个感应圈通入不同频率的电源时,相互干扰作用会有一定程度的减少。目前,国内外轧辊普遍采用双频加热热处理工艺,最典型的是比利时 OSB 公司的轧辊采用中频和工频加热的双频热处理工艺。

热透深度  $\delta$  计算式<sup>[4]</sup>如下:

$$\delta=50.3\left[\rho/(\mu f)\right]^{1 / 2} \quad(1)$$

式(1)中: $\rho$ 为金属炉料的电阻率, $\Omega \cdot \mathrm{cm}$ ;  $\mu$ 为

金属炉料的相对导磁率(非磁体的  $\mu$  为 1);  $f$  为电源频率, Hz。

由式(1)可知,工频加热对被加热工件的热透深度较深,中频加热对被加热工件的热透深度则较浅。

工艺不同,用于感应加热的电源有不同的频率与功率相匹配。常见的中频电源频率为 1, 2.5, 4, 8 kHz, 采用的中频电源频率为 1, 2.5 kHz, 功率为几万瓦到几百万瓦。用于热透的中频电源常用频率为 1, 2.5 kHz, 功率为几十万瓦到上百万瓦。用于淬火的中频电源频率为 2.5, 8 kHz, 功率为几万瓦到几十万瓦。中频电源常规配用的功率与频率详见表 1<sup>[3,5]</sup>。

表1 中频电源常规配用的功率与频率  
Table 1 Frequncys and powers applied in the middle-frequency induction equipment

频率/kHz	功率/kW
0.4	2000,1000,500
1	1000,500,250,100
2.5	500,250,100
4	250,100,50
8	250,100,50,25

经综合考虑设备要求,本实验中用于熔炼炉加热的中频电源的频率与功率选择 2.5 kHz 和 100 kW,用于中间漏包加热的中频电源的频率与功率选择 4 kHz 和 80 kW。

2.3 两个感应圈纵向距离的影响

感应圈之间的距离越小,双中频设备之间磁力线增强和干扰的交叉影响就越强。根据电磁场理论,上下放置的两个感应器之间的互感系数<sup>[1]</sup>为:

$$M=\Phi_H / I_H=\mu \pi R_1^2 R_2^2 / 2\left(R_1^2+d^2\right)^{3 / 2} \quad(2)$$

其中  $d=H_1 / 2+L+H_2 / 2$ 。式(2)中  $\Phi_H$  为尺寸较小的感应圈的磁通量, Wb;  $I_H$  为小感应圈内的电流, A;  $\mu$  为感应圈磁力线通过的加热物料的磁导率, H/m;  $R_1$  为上感应圈内半径, m;  $R_2$  为下感应圈内半径, m;  $L$  为上下感应圈间的纵向距离, m;  $d$  为两个感应圈的纵向高度中点距离, m。如图 1 所示。

从式(2)可以得出,两个感应圈的结构尺寸确定以后,随着两个感应圈的间距增大,感应圈的互感系

数  $M$  将以较快的速度减少. 设两个感应圈尺寸一样, 类似本实验的主感应圈尺寸:  $R_2 = R_1 = 23/2$  cm,  $H_1 = H_2 = 40$  cm. 将这些数据代入式(2), 可计算出每一确定的  $L$  所对应的  $M$  值, 结果列于表 2.

表 2 互感系数  $M$  与感应圈间纵向距离  $L$  的关系

Table 2 Relation between mutual induction coefficients and longitude distances of the induction coil

纵向距离 $L/\text{cm}$	0	5	10	20
$M/\mu\pi$	0.12	0.087	0.065	0.038

由表 2 可知, 当纵向相距为 10 cm 时, 互感系数  $M$  就达到“半衰”程度; 当纵向相距为 20 cm 时,  $M$  衰减到原来的 1/3.

2.4 模拟实验结果及实际设计应用

所研究的用于雾化制备金属粉末的双中频感应加热系统中, 设计主加热熔化炉感应圈在上面, 中间包保温炉安装在主加热熔化炉感应圈的侧下部, 其上平面与主加热熔化炉感应圈底平面处在同一水平面, 以减少炉子的尺寸改动, 目的是尽可能利用原有的设备结构. 设计的两中频电源间相互影响的模拟实验装置, 如图 3 所示.

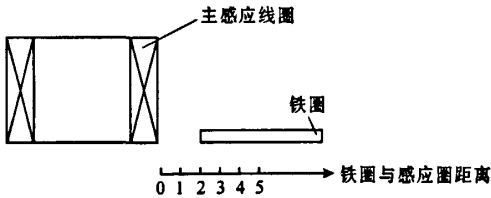


图 3 两个感应圈距离影响的主感应圈模拟试验图

Fig. 3 Schematic diagram of simulating experiment of iron ring

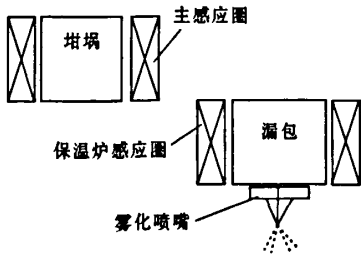


图 4 双中频感应圈的雾化制粉设备中实际应用示意图

Fig. 4 Schematic diagram of application of two induction heating set for atomization process

在与熔化炉加热感应圈的底平面处在同一水平面的不同位置放置铁圈, 启动中频电源到 50 kW, 在铁圈每一位置上加热 30 min, 测量铁圈上的温度, 结果列于表 3.

表 3 铁圈温度及其与主感应圈的距离

Table 3 Relation between distance of main induction bottom coil and temperatures of the iron coil

距离/cm	1	3	5	7	9	11
温度/℃	1020	710	467	230	140	70

由表 3 可知, 铁圈距主感应圈底面越远, 温度越低. 当距离达 11 cm 以上时, 影响较小. 以这个模拟实验结果为依据, 参考上述影响因素分析, 设计成如图 4 所示的感应加热系统. 保温炉中频感应圈顶部平面在主加热炉感应圈底平面上, 且相距 12 cm. 实验结果表明, 主感应圈将熔炼炉加热到 1500 ℃、保温炉感应圈将中间包加热到 1300 ℃, 相互间没有影响. 这说明在真空或惰性气体保护的雾化制粉设备中使用双中频电源加热的设计是可行的.

3 结 论

两个感应线圈的距离越远, 相互影响越小. 当感应圈相距 12 cm 以上以及采用不同中频感应电源频率时, 两中频电源相互间影响可忽略. 在雾化制粉设备中采用双中频电源加热的设计是可行的.

参考文献:

[1] 卢百平, 沈军, 刘林, 等. 耐热不锈钢真空双频电磁约束成型[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(6): 1103-1106.  
[2] 刘时雨, 王玉红, 徐才. 1000mm 以下的 45Cr4NiMoV 支承辊最终热处理工艺的选择[J]. 大型铸锻件, 2006, 111(1): 22-26.  
[3] 林渭勋. 可控硅中频电源[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989: 5-43.  
[4] 有色金属加工手册编写组. 重有色金属加工手册第二分册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1979: 75-76.  
[5] 王振东, 曹孔健, 何纪龙. 感应炉冶炼[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 58.

## Application of double middle-frequency inductive heating in atomization equipment for metal powder making

ZHOU Mei-xia, CHEN Ping, LU Qi-yun

(Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals, Guangzhou 510650, China)

**Abstract:** A method to estimate the impact of double middle-frequency induction coils was introduced by analysing the direction of induced electrical current, frequency and distance between the two middle-frequency induction coils and measuring temperatures of a small single coil which is put near the middle-frequency inducing coil at different position to simulating the interaction between the two coils. The experimental result showed that the double middle-frequency induction heating for atomization is practicable by applying different frequency and setting a suitable distance over 12cm between two induction heating coils.

**Key words:** double middle-frequency induction heating; tundish; atomization