



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108221001 A

(43)申请公布日 2018.06.29

(21)申请号 201810051481.7

(22)申请日 2018.01.19

(71)申请人 东北大学

地址 110169 辽宁省沈阳市浑南区创新路  
195号

(72)发明人 张颖伟 鹿雪文 刘建昌

(74)专利代理机构 沈阳东大知识产权代理有限  
公司 21109

代理人 胡晓男

(51) Int. Cl.

G25C 3/04(2006.01)

G25C 7/02(2006.01)

G25C 7/00(2006.01)

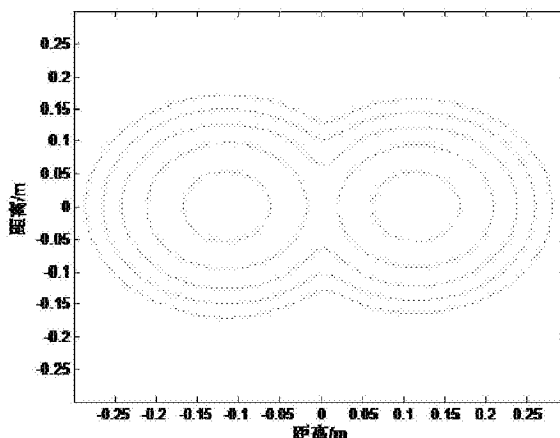
权利要求书2页 说明书7页 附图4页

(54)发明名称

一种用于两相直流电熔镁炉的极心距与炉壳外形设计方法

(57)摘要

本发明提供一种用于两相直流电熔镁炉的极心距与炉壳外形设计方法,包括:设计两相直流电熔镁炉系统的结构;求得熔池表面在阴极与阳极共同影响下的电弧功率分布;确定两相直流电熔镁炉系统的物理参数,包括:求极心距;根据熔池表面在阴极与阳极共同影响下的电弧功率分布以及求得的极心距确定炉壳外形。本发明通过对两相直流电熔镁炉的运行状态与电气构成进行分析,能够有效地计算出满足两相直流电熔镁炉最佳运行状态的极心距与炉壳外形,能够在工业生产过程中有效地减小物料与电能的损耗。



1. 一种用于两相直流电熔镁炉的极心距与炉壳外形设计方法,其特征在于,包括:  
设计两相直流电熔镁炉系统的结构;  
求得熔池表面在阴极与阳极共同影响下的电弧功率分布;  
确定两相直流电熔镁炉系统的物理参数,包括:  
求极心距;  
根据熔池表面在阴极与阳极共同影响下的电弧功率分布以及求得的极心距确定炉壳外形。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述求得熔池表面在阴极与阳极共同影响下的电弧功率分布的具体方法包括:

根据阴极区电子热能的等值压降和阳极区的电子热能等值压降,计算阴极截止电压和阳极截止电压;

求电弧功率及电弧两端电压;

根据电弧两端电压、阴极截止电压、阳极截止电压,求出阴极电弧长度和阳极电弧长度;

确定阴极影响下熔池表面的电弧功率分布以及阳极影响下熔池表面的电弧功率分布,进而求出熔池表面在阴极与阳极共同影响下的电弧功率分布。

3. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于,所述计算阴极截止电压和阳极截止电压的方法如下:

根据电极的加热斑点处温度计算阴极区电子热能的等值压降和阳极区的电子热能等值压降;

根据阴极区电子热能的等值压降和阳极区的电子热能等值压降,计算阴极截止电压和阳极截止电压。

4. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于,所述电弧功率的求解方法如下:

根据电极尺寸及电阻率计算两根电极的电阻,同时测量短网电阻,计算出两根电极的电阻与短网电阻之和R;

根据熔池大小和熔池电阻率估算熔池电阻 $r_3$ ;

在已知整流器输出电压 $U_d$ 时求得使电弧功率 $P_1$ 最大时的直流电流 $I_d'$ ;

求得电弧功率 $P_1 = (U_d - RI_d' - r_3 I_d' - U_{jz1} - U_{jz2}) I_d'$ ,  $U_{jz1}$ 为阴极截止电压 $U_{jz2}$ 为阳极截止电压。

5. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于,所述电弧两端电压采用如下公式求解:

$$U_c = 0.5 \times (U_d - RI_d' - r_3 I_d' - U_{jz1} - U_{jz2})$$

其中, $U_d$ 为整流器输出电压, $I_d'$ 为已知整流器输出电压时使电弧功率 $P_1$ 最大时的直流电流,R为两根电极的电阻与短网电阻之和, $r_3$ 为熔池电阻, $U_{jz1}$ 为阴极截止电压, $U_{jz2}$ 为阳极截止电压。

6. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于,所述阴极电弧长度和阳极电弧长度的计算公式分别如下:

$$l_1 = \frac{U_c - U_{jz1}}{b}$$

$$l_2 = \frac{U_c - U_{jz2}}{b}$$

其中,  $l_1$ 为阴极电弧长度,  $l_2$ 为阳极电弧长度,  $U_{jz1}$ 为阴极截止电压,  $U_{jz2}$ 为阳极截止电压,  $U_c$ 为电弧两端电压,  $b$ 为弧压系数。

7. 根据权利要求2所述的方法, 其特征在于, 所述确定阴极影响下熔池表面的电弧功率分布以及阳极影响下熔池表面的电弧功率分布的方法如下:

将电弧在熔池表面的加热热流分布视为正态分布, 则加热热流分布表示为  $q(r) = q_{\max} \times e^{-\alpha r^2}$ , 其中,  $q_{\max}$ 为加热斑点中心的最大热流,  $r$ 为熔池表面任意一点到加热斑点中心的距离,  $\alpha$ 为热能集中系数;

求加热斑点中心的最大热流  $q_{\max} = \frac{\alpha Q}{\pi}$ ; 其中  $Q$ 为实际单极电弧功率在熔池表面的分布, 由加热热流分布公式  $q(r) = q_{\max} \times e^{-\alpha r^2}$  在加热斑点面积上进行积分得到,  $P_1$ 为电弧功率; 热能集中系数  $\alpha = \frac{3}{(0.5D + 2l)^2}$ ,  $D$ 为电极直径,  $l$ 为电弧长度, 指代阴极电弧长度或阳极电弧长度;

求单电极的电弧功率在熔池表面的分布;

以两个电极的中心连接线所在直线为坐标轴的横轴, 以两个电极的中心连接线的中垂线所在直线为坐标轴的纵轴, 以阳极中心所在轴为横轴正方向, 根据单电极的电弧功率在熔池表面的分布, 表示出阴极影响下熔池表面的电弧功率分布以及阳极影响下熔池表面的电弧功率分布。

8. 根据权利要求2所述的方法, 其特征在于, 所述熔池表面在阴极与阳极共同影响下的电弧功率分布为阴极影响下熔池表面的电弧功率分布与阳极影响下熔池表面的电弧功率分布之和。

9. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在于, 所述极心距的计算公式如下:

$$d = \sqrt{\frac{6000P_1(1-\eta_1)(1-\eta_2)}{(8\pi + 3\sqrt{3})q\rho h}}$$

其中,  $\eta_1$ 为散热效率,  $\eta_2$ 为保温热能所占比例,  $q$ 为菱镁矿作原料时的产品单位能耗,  $\rho$ 为电熔镁砂的密度,  $h$ 为结晶高度,  $P_1$ 为电弧功率。

10. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在于, 所述炉壳外形的确定方法包括:

根据熔池表面在阴极与阳极共同影响下的电弧功率分布以及求得的极心距, 画出熔池表面的等功率线; 根据熔池表面外围的等功率线, 确定炉壳外形。

## 一种用于两相直流电熔镁炉的极心距与炉壳外形设计方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于工业电解熔融氧化镁提取氧化镁晶体技术领域,具体涉及一种用于两相直流电熔镁炉的极心距与炉壳外形设计方法。

### 技术背景

[0002] 辽宁省现有的三相交流电熔镁炉容量一般在10吨上下,炉型以细长圆柱形为主变压器容量一般在1000kVA上下,年产不超过2000吨。按熔坨质量占总料的40%计算,现有的电炉变压器需要全功率工作10小时左右才能完成加热任务。电炉变压器常常工作在过载状态,据统计平均过载到达1.62倍。变压器长期超载运行,缩短了变压器的使用寿命,降低了系统的电效率。而受到变压器输出容量的限制,电弧的有效加热空间小,必须配合以细长圆柱形炉体。这种结构的电弧炉的最高加热温度有限,造成原料的纯化过程无法充分进行,产品的纯度和密度低。由于加热时间长,电弧造成的碳污染也较为严重。

[0003] 现已认识到,为系统配备高容量的电炉变压器是提高产量和质量的前提。提高熔炼系统的单位功率能够显著缩短熔炼时间,大幅度提高生产率。另外,提高功率密度还可以提高电弧的熔炼温度和能量效率。

[0004] 现有的三相交流电熔镁炉在容量扩大时会使交流电弧加热技术本身的问题扩大化,主要问题如下:

[0005] (1) 交流电弧每秒过零点100次到120次,在零点附近电弧熄灭,然后在下半周重新点火,因而交流电弧的稳定性差。

[0006] (2) 交流系统功率因数低,无功功率频繁波动,引起电网电压闪变,需要配备昂贵的动态补偿装置。

[0007] (3) 三相电弧的弧长和功率的变化在时间上不一致,三相负载不对称,三项电弧功率不均衡,同时产生了炉壁热点。

[0008] (4) 三相交流电熔镁炉是一种典型的非线性、时变和分布参数的多输入多输出的三相耦合系统,它具有以下特点:阶数高,即使用比较简化的数学模型描述,系统结束也可以达到二十多阶;强非线性,交流电弧电阻具有很强的非线性;扰动复杂,大范围的扰动及随机性并存,并且这种扰动是存在于系统内部的,是非加和性的;强耦合性,三相电熔镁炉主电路具有很强的耦合性,使得任意相弧长的变化可以同时引起三相电弧交流有效值的变化;调节过程的快速性,某一相电极短路时,电极调节器必须及时将电极调至合适的位置,这一过程通常为零点几秒至几秒。对这样复杂的系统,常规的控制效果不太理想,必须寻找新的控制策略。

### 发明内容

[0009] 针对到传统三相交流电熔镁炉的诸多缺点,以及现有的两相直流电熔镁炉由于极心距与炉型设计不合理,导致的电能与物料的浪费问题,本发明提供了一种用于两相直流电熔镁炉的极心距与炉壳外形设计方法。

[0010] 本发明技术方案如下：

[0011] 一种用于两相直流电熔镁炉的极心距与炉壳外形设计方法，包括：

[0012] 设计两相直流电熔镁炉系统的结构；

[0013] 求得熔池表面在阴极与阳极共同影响下的电弧功率分布；

[0014] 确定两相直流电熔镁炉系统的物理参数，包括：

[0015] 求极心距；

[0016] 根据熔池表面在阴极与阳极共同影响下的电弧功率分布以及求得的极心距确定炉壳外形。

[0017] 所述求得熔池表面在阴极与阳极共同影响下的电弧功率分布的具体方法包括：

[0018] 根据阴极区电子热能的等值压降和阳极区的电子热能等值压降，计算阴极截止电压和阳极截止电压；

[0019] 求电弧功率及电弧两端电压；

[0020] 根据电弧两端电压、阴极截止电压、阳极截止电压，求出阴极电弧长度和阳极电弧长度；

[0021] 确定阴极影响下熔池表面的电弧功率分布以及阳极影响下熔池表面的电弧功率分布，进而求出熔池表面在阴极与阳极共同影响下的电弧功率分布。

[0022] 所述计算阴极截止电压和阳极截止电压的方法如下：

[0023] 根据电极的加热斑点处温度计算阴极区电子热能的等值压降和阳极区的电子热能等值压降；

[0024] 根据阴极区电子热能的等值压降和阳极区的电子热能等值压降，计算阴极截止电压和阳极截止电压。

[0025] 所述电弧功率的求解方法如下：

[0026] 根据电极尺寸及电阻率计算两根电极的电阻，同时测量短网电阻，计算出两根电极的电阻与短网电阻之和R；

[0027] 根据熔池大小和熔池电阻率估算熔池电阻 $r_3$ ；

[0028] 在已知整流器输出电压 $U_d$ 时求得使电弧功率 $P_1$ 最大时的直流电流 $I_d'$ ；

[0029] 求得电弧功率 $P_1 = (U_d - RI_d' - r_3 I_d' - U_{jz1} - U_{jz2}) I_d'$ ， $U_{jz1}$ 为阴极截止电压 $U_{jz2}$ 为阳极截止电压。

[0030] 所述电弧两端电压采用如下公式求解：

[0031]  $U_c = 0.5 \times (U_d - RI_d' - r_3 I_d' - U_{jz1} - U_{jz2})$

[0032] 其中， $U_d$ 为整流器输出电压， $I_d'$ 为已知整流器输出电压时使电弧功率 $P_1$ 最大时的直流电流，R为两根电极的电阻与短网电阻之和， $r_3$ 为熔池电阻， $U_{jz1}$ 为阴极截止电压， $U_{jz2}$ 为阳极截止电压。

[0033] 所述阴极电弧长度和阳极电弧长度的计算公式分别如下：

[0034] 
$$l_1 = \frac{U_c - U_{jz1}}{b}$$

[0035] 
$$l_2 = \frac{U_c - U_{jz2}}{b}$$

[0036] 其中， $l_1$ 为阴极电弧长度， $l_2$ 为阳极电弧长度， $U_{jz1}$ 为阴极截止电压， $U_{jz2}$ 为阳极截止

电压,  $U_c$  为电弧两端电压,  $b$  为弧压系数。

[0037] 所述确定阴极影响下熔池表面的电弧功率分布以及阳极影响下熔池表面的电弧功率分布的方法如下:

[0038] 将电弧在熔池表面的加热热流分布视为正态分布, 则加热热流分布表示为  $q(r) = q_{\max} \times e^{-\alpha r^2}$ , 其中,  $q_{\max}$  为加热斑点中心的最大热流,  $r$  为熔池表面任意一点到加热斑点中心的距离,  $\alpha$  为热能集中系数;

[0039] 求加热斑点中心的最大热流  $q_{\max} = \frac{\alpha Q}{\pi}$ ; 其中  $Q$  为实际单极电弧功率在熔池表面的分布, 由加热热流分布公式  $q(r) = q_{\max} \times e^{-\alpha r^2}$  在加热斑点面积上进行积分得到,  $P_1$  为电弧功率; 热能集中系数  $\alpha = \frac{3}{(0.5D + 2l)^2}$ ,  $D$  为电极直径,  $l$  为电弧长度, 指代阴极电弧长度或阳极电弧长度;

[0040] 求单电极的电弧功率在熔池表面的分布;

[0041] 以两个电极的中心连接线所在直线为坐标轴的横轴, 以两个电极的中心连接线的中垂线所在直线为坐标轴的纵轴, 以阳极中心所在轴为横轴正方向, 根据单电极的电弧功率在熔池表面的分布, 表示出阴极影响下熔池表面的电弧功率分布以及阳极影响下熔池表面的电弧功率分布。

[0042] 所述熔池表面在阴极与阳极共同影响下的电弧功率分布为阴极影响下熔池表面的电弧功率分布与阳极影响下熔池表面的电弧功率分布之和。

[0043] 所述极心距的计算公式如下:

$$[0044] \quad d = \sqrt{\frac{6000P_1(1-\eta_1)(1-\eta_2)}{(8\pi + 3\sqrt{3})q\rho h}}$$

[0045] 其中,  $\eta_1$  为散热效率,  $\eta_2$  为保温热能所占比例,  $q$  为菱镁矿作原料时的产品单位能耗,  $\rho$  为电熔镁砂的密度,  $h$  为结晶高度,  $P_1$  为电弧功率。

[0046] 所述炉壳外形的确定方法包括:

[0047] 根据熔池表面在阴极与阳极共同影响下的电弧功率分布以及求得的极心距, 画出熔池表面的等功率线; 根据熔池表面外围的等功率线, 确定炉壳外形。

[0048] 有益效果:

[0049] 本发明通过对两相直流电熔镁炉的运行状态与电气构成进行分析, 能够有效地计算出满足两相直流电熔镁炉最佳运行状态的极心距与炉壳外形, 能够在工业生产过程中有效地减小物料与电能的损耗。

## 附图说明

[0050] 图1为本发明具体实施方式中的两相直流电熔镁炉系统的结构示意图; 其中1-变压器、2-短网、3-整流器、4-电极、5-炉壳、6-小车、7-电极夹、8-电弧、9-熔池;

[0051] 图2为直流电弧的静态伏安特性, 其中横坐标为电流, 纵坐标为电压, 当电流在0~A区间时, 电压随电流的增大而减小, 为下降区, 当电流在A~B区间时, 电压基本不随电流的增大而变化, 为水平区, 当电流大于B时, 电压随电流的增大而增大, 为上升区;

[0052] 图3为电弧电热在熔池表面的热源分布示意图,其中横坐标表示熔池表面,纵坐标表示电极;

[0053] 图4为两相直流电熔镁炉的等效电路图,其中 $U_d$ 为整流器输出的直流电压, $R$ 为两根电极的电阻与短网电阻之和, $U_{jz1}$ 、 $U_{jz2}$ 分别为电弧阴极与阳极截止电压, $r_1$ 、 $r_2$ 分别为阴极与阳极电弧电阻, $r_3$ 为熔池电阻;

[0054] 图5为电弧功率与整流器输出电流的关系图;

[0055] 图6为熔池表面近似图;

[0056] 图7为熔池表面电弧功率分布图。

### 具体实施方式

[0057] 下面结合附图对本发明具体实施方式加以详细的说明。

[0058] 一种用于两相直流电熔镁炉的极心距与炉壳外形设计方法,包括:

[0059] 步骤1、设计两相直流电熔镁炉系统的结构;

[0060] 本实施方式中的两相直流电熔镁炉系统的结构如图1所示,变压器1、短网2、整流器3依次连接,整流器3分别连接两根电极4,电极4由电极夹7夹持,两根电极4插入由小车6承载的两相直流电熔镁炉的炉壳5内熔池9中,产生电弧8。该两相直流电熔镁炉系统的控制系统,包括:电源模块、电压电流检测装置、中央控制器、放大执行机构、脉冲触发器。其中电源模块主要包括:变压器1、整流器3、隔离开关、断路器。

[0061] 步骤2、求得熔池表面在阴极与阳极共同影响下的电弧功率分布;

[0062] 所述求得熔池表面在阴极与阳极共同影响下的电弧功率分布的具体方法包括:

[0063] 步骤2.1、根据阴极区电子热能的等值压降和阳极区的电子热能等值压降,计算阴极截止电压和阳极截止电压;

[0064] 所述计算阴极截止电压和阳极截止电压的方法如下:

[0065] 步骤2.1.1、根据电极的加热斑点处温度计算阴极区电子热能的等值压降和阳极区的电子热能等值压降;

[0066] 本实施方式中,阴极区电子热能的等值压降和阳极区的电子热能等值压降的计算公式均采用 $U_T = \frac{3kT}{2e}$ ,其中 $U_T$ 为等值压降, $e$ 为电子电量 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ 库仑; $k$ 为常数, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ , $T$ 为加热斑点处温度,阴极的加热电极斑点处温度约为4000K,阳极的电极加热斑点处温度约为6000K。因此,可求得阴极区电子热能的等值压降 $U_{T1} = 0.52V$ ,阳极区的电子热能等值压降 $U_{T2} = 0.78V$ 。

[0067] 步骤2.1.2、根据阴极区电子热能的等值压降和阳极区的电子热能等值压降,计算阴极截止电压和阳极截止电压。

[0068] 两相直流电熔镁炉系统工作过程中,电流处于图2所示 $I_c > B$ 段,点B处所对应的电压称为截止电压。阴极截止电压 $U_{jz1} = U_1 - U_{T1}$ ,阳极截止电压 $U_{jz2} = U_2 + U_{T2}$ ;其中, $U_1$ 、 $U_2$ 分别为阴极区压降和阳极区压降,均10V。因此,求得 $U_{jz1} = 9.48V$ , $U_{jz2} = 10.78V$ 。

[0069] 步骤2.2、求电弧功率及电弧两端电压;

[0070] 所述电弧功率的求解方法如下:

[0071] (a) 根据电极尺寸及电阻率计算两根电极的电阻,同时测量短网电阻,计算出两根

电极的电阻与短网电阻之和R:本实施方式中两根电极均为长1m、直径100mm的圆柱体石墨电极,由于石墨电阻率为 $1 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ ,因此求得单根电极的电阻为 $1.27\text{m} \Omega$ ,测量得到的短网电阻约为 $0.55\text{m} \Omega$ ,因此,两根电极的电阻与短网电阻之和 $R=3.09\text{m} \Omega$ 。

[0072] (b) 根据熔池大小和熔池电阻率估算熔池电阻 $r_3$ :

[0073] 设熔池大小为长宽高均为200mm的立方体,熔池电阻率约为 $1.2 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ ,则熔池电阻 $r_3=6\text{m} \Omega$ 。

[0074] (c) 在已知整流器输出电压 $U_d$ 时求得使电弧功率 $P_1$ 最大时的直流电流 $I_d'$ ;

[0075] 根据图4所示的两相直流电熔镁炉的等效电路,得出电弧功率 $P_1$ 的表达式: $P_1 = (U_d - RI_d - r_3 I_d - U_{jz1} - U_{jz2}) I_d$ ,其中, $U_d$ 为整流器输出电压, $I_d$ 为电路电流。

[0076] 根据电弧功率 $P_1$ 的表达式,在整流器输出电压 $U_d$ 不同(分别为80V、100V、120V)的情况下画出如图5所示的电弧功率与整流器输出电流的关系图,在已知整流器输出电压 $U_d=$

120V时求得使电弧功率 $P_1$ 最大时的直流电流 $I_d' = \frac{U_d - U_{jz1} - U_{jz2}}{2(R + r_3)} \approx 7124\text{A}$ ,由图5可以看出,

两相直流电熔镁炉恒流运行时达到此电流 $I_d'$ 时,电弧功率 $P_1$ 最大。

[0077] (d) 根据电弧功率 $P_1$ 的表达式,以及使电弧功率 $P_1$ 最大时的直流电流 $I_d'$ ,求得电弧功率 $P_1 = (U_d - RI_d' - r_3 I_d' - U_{jz1} - U_{jz2}) I_d' = 355288\text{W}$ 。

[0078] 所述电弧两端电压采用如下公式求解:

[0079]  $U_c = 0.5 \times (U_d - RI_d' - r_3 I_d' - U_{jz1} - U_{jz2}) \approx 24.9\text{V}$

[0080] 其中, $U_d$ 为整流器输出电压, $I_d'$ 为已知整流器输出电压时使电弧功率 $P_1$ 最大时的直流电流, $R$ 为两根电极的电阻与短网电阻之和, $r_3$ 为熔池电阻, $U_{jz1}$ 为阴极截止电压, $U_{jz2}$ 为阳极截止电压。

[0081] 步骤2.3、根据电弧两端电压、阴极截止电压、阳极截止电压,求出阴极电弧长度和阳极电弧长度:

[0082] 电弧长度计算公式为: $l = \frac{U_c - U_{jz}}{b}$ ,其中 $b$ 为弧压系数,弧压系数由实验确定,由文献查得 $b=0.75\text{V/mm}$ ,其中的 $U_{jz}$ 为 $U_{jz1}$ 或 $U_{jz2}$ ,因此所述阴极电弧长度和阳极电弧长度的计算公式分别如下:

[0083]  $l_1 = \frac{U_c - U_{jz1}}{b}$

[0084]  $l_2 = \frac{U_c - U_{jz2}}{b}$

[0085] 其中, $l_1$ 为阴极电弧长度, $l_2$ 为阳极电弧长度, $U_c$ 为电弧两端电压, $l_1=20.56\text{mm}$ , $l_2=18.83\text{mm}$ 。

[0086] 步骤2.4、确定阴极影响下熔池表面的电弧功率分布以及阳极影响下熔池表面的电弧功率分布,进而求出熔池表面在阴极与阳极共同影响下的电弧功率分布。

[0087] 所述确定阴极影响下熔池表面的电弧功率分布以及阳极影响下熔池表面的电弧功率分布的方法如下:

[0088] 将电弧在熔池表面的加热热流分布视为如图3所示的正态分布,则加热热流分布



表示为 $q(r) = q_{\max} \times e^{-\alpha r^2}$ ,其中, $q_{\max}$ 为加热斑点中心的最大热流, $r$ 为熔池表面任意一点到加热斑点中心的距离, $\alpha$ 为热能集中系数。

[0089] 对加热热流分布公式 $q(r) = q_{\max} \times e^{-\alpha r^2}$ 在加热斑点面积上进行积分,求得实际单极电弧功率在熔池表面的分布 $Q = \int_0^{\infty} q(r) d2\pi r^2 = \pi / \alpha \cdot q_{\max}$ 。由于功率损耗,经验上 $Q = (0.65 \sim 0.7) P_1'$ ,本实施方式取0.68, $P_1'$ 为单电极的电弧功率,即 $P_1' = 0.5P_1$ ,求得加热斑点中心的

最大热流 $q_{\max} = \frac{\alpha Q}{\pi} = \frac{0.68\alpha \times 0.5P_1}{\pi}$ ;其中 $Q$ 为实际单极电弧功率在熔池表面的分布,由加热

热流分布公式 $q(r) = q_{\max} \times e^{-\alpha r^2}$ 在加热斑点面积上进行积分得到, $P_1$ 为电弧功率;根据加热斑点边界半径 $r_m = 0.5D + 2l$ 、边界热流 $q(r_m) = 0.05q_{\max}$ ,以及加热热流分布表达式 $q(r)$ ,求得热能集中系数 $\alpha = \frac{3}{(0.5D + 2l)^2}$ , $D$ 为电极直径, $l$ 为电弧长度,指代阴极电弧长度或阳极电弧长度。

[0090] 求单电极的电弧功率在熔池表面的分布:根据已求得的加热斑点中心的最大热流 $q_{\max}$ 、热能集中系数 $\alpha$ 和加热热流分布表达式 $q(r)$ ,求出单电极的电弧功率在熔池表面的分布表达式:

$p(r) = \frac{3 \times 0.68 \times 0.5P_1}{\pi(0.5D + 2l)^2} \exp(-3(\frac{r}{0.5D + 2l})^2)$ ,其中 $r$ 为熔池表面某点到加热斑点中心的距离。

[0091] 以两个电极的中心连接线所在直线为坐标轴的横轴,以两个电极的中心连接线的中垂线所在直线为坐标轴的纵轴,以阳极中心所在轴为横轴正方向,根据单电极的电弧功率在熔池表面的分布 $p(r)$ ,表示出阴极影响下熔池表面的电弧功率分布 $p_1(x, y)$ 以及阳极影响下熔池表面的电弧功率分布 $p_2(x, y)$ 。

[0092] 对于两相直流电熔镁炉,由于两方向相反的电弧间存在互斥的电磁力,导致两电弧分别向远离对方的方向上偏离,则斑点中心向电极外侧移动约20~30mm,此处取中间值25mm。因此:

[0093]  $p_1(x, y) = \frac{3 \times 0.68 \times 0.5 \times P_1}{\pi(0.5D + 2 \times l_1)^2} \exp(-3(\frac{\sqrt{(x + 0.025 + d)^2 + y^2}}{0.5D + 2 \times l_1})^2)$

[0094]  $p_2(x, y) = \frac{3 \times 0.68 \times 0.5 \times P_1}{\pi(0.5D + 2 \times l_2)^2} \exp(-3(\frac{\sqrt{(x - 0.025 - d)^2 + y^2}}{0.5D + 2 \times l_2})^2)$

[0095] 其中, $(x, y)$ 为熔池表面某点的坐标, $d$ 为极心距。

[0096] 所述熔池表面在阴极与阳极共同影响下的电弧功率分布为阴极影响下熔池表面的电弧功率分布与阳极影响下熔池表面的电弧功率分布之和,即 $p(x, y) = p_1(x, y) + p_2(x, y)$ 。

[0097] 步骤3、确定两相直流电熔镁炉系统的物理参数,包括:

[0098] (1) 求极心距;

[0099] 根据能量守恒定律,确定熔池表面积的表达式:在两相直流电熔镁炉的工作过程中,电弧功率 $P_1$ 主要起熔化物料的作用,而熔池电阻功率主要起保温作用。电弧热中用于熔

化物料的那部分热能称为有效电弧热 $W$ 。熔炼过程中,物料最上层与空气接触的部分会向外散热,散热效率为 $\eta_1$ 。少部分电弧热也会用于对熔池的保温,这部分热能称为保温热能,其所占比例为 $\eta_2$ 。由能量守恒定律得熔池表面积为:

$$[0100] \quad S = \frac{W(1-\eta_1)(1-\eta_2)}{q\rho h} \times 1000$$

[0101] 其中, $q$ 为菱镁矿作原料时的产品单位能耗, $\rho$ 为电熔镁砂的密度, $h$ 为结晶高度。由文献可查得 $q=2611\text{kWh/t}$ , $\rho=3580\text{kg/m}^3$ , $\eta_1=0.03$ , $\eta_2=0.16$ ,结晶高度 $h$ 为 $0.2\text{m}$ 。

[0102] 根据熔池表面的形状,确定熔池面积的表达式:在熔炼过程中,若极心距过大,使两电极间的最高温度较低,导致中间存在未熔死区;若极心距过小,则会使两电极间的最高温度过高,温度梯度大,熔池面积小。由此可知,当极心距长度恰好为电极的熔化半径时,熔炼效果最好。此时,熔池表面的近似图6所示,至此得到熔池面积表达式:

$$[0103] \quad S = 2\pi d^2 - 2\left(\frac{\pi d^2}{3} - \frac{\sqrt{3}}{4}d^2\right) \\ = \frac{8\pi + 3\sqrt{3}}{6}d^2$$

[0104] 联立两个熔池面积表达式,得到所述极心距的计算公式如下:

$$[0105] \quad d = \sqrt{\frac{6000P_1(1-\eta_1)(1-\eta_2)}{(8\pi + 3\sqrt{3})q\rho h}}$$

[0106] 代入数值得 $d \approx 0.175\text{m}$ 。

[0107] (2) 根据熔池表面在阴极与阳极共同影响下的电弧功率分布以及求得的极心距确定炉壳外形。

[0108] 所述炉壳外形的确定方法包括:

[0109] 根据熔池表面在阴极与阳极共同影响下的电弧功率分布 $p(x,y)$ 以及求得的极心距 $d$ ,画出熔池表面的等功率线,如图7所示;根据熔池表面外围的等功率线,确定炉壳外形为“花生”型。

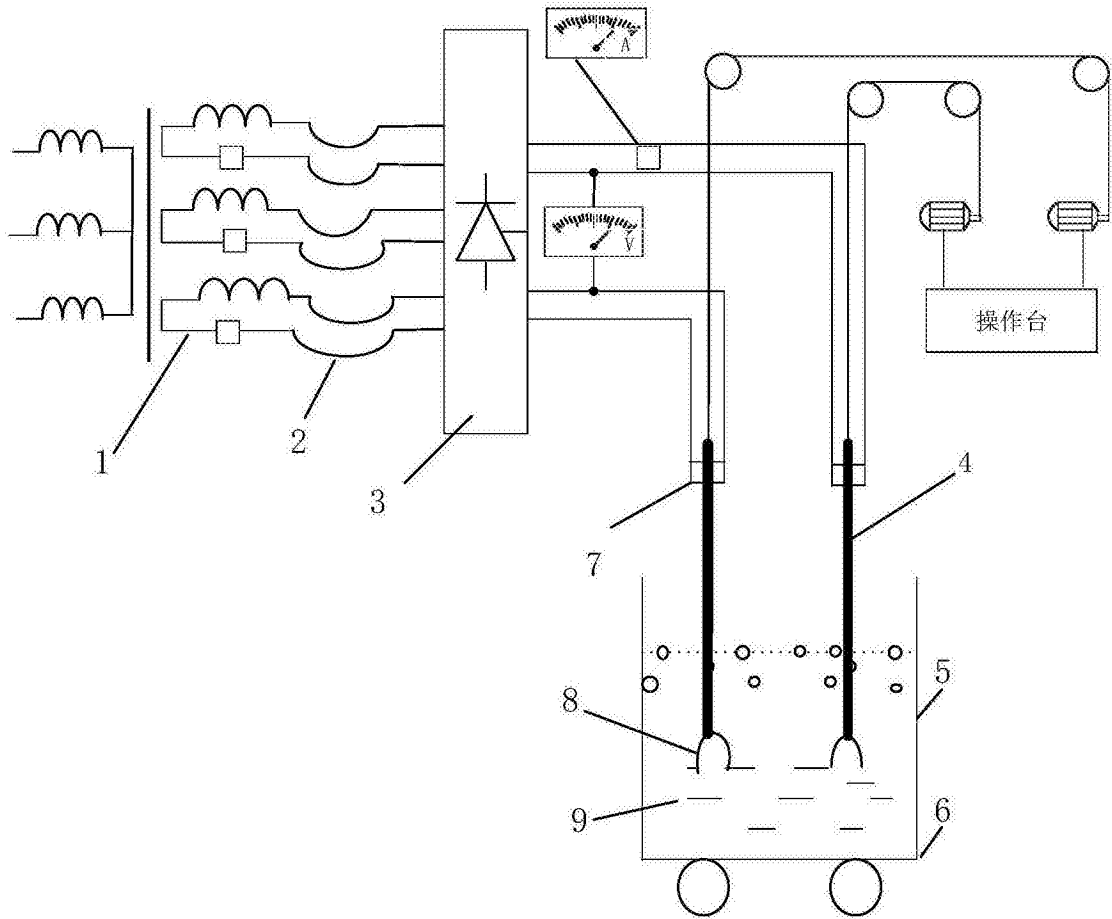


图1

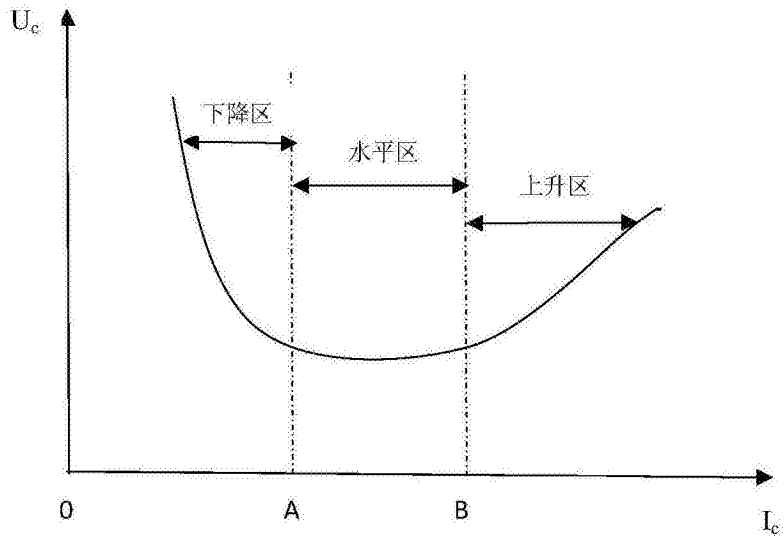


图2

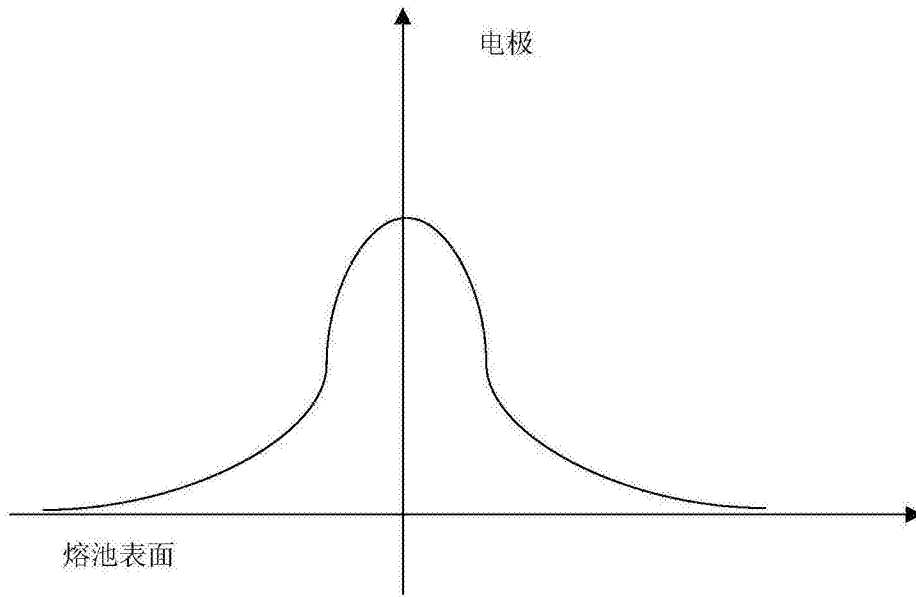


图3

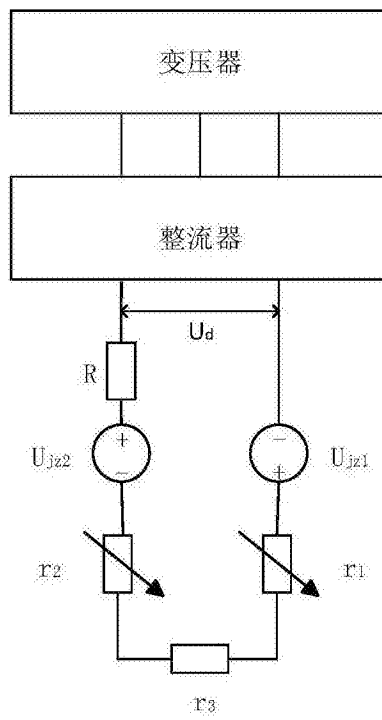


图4

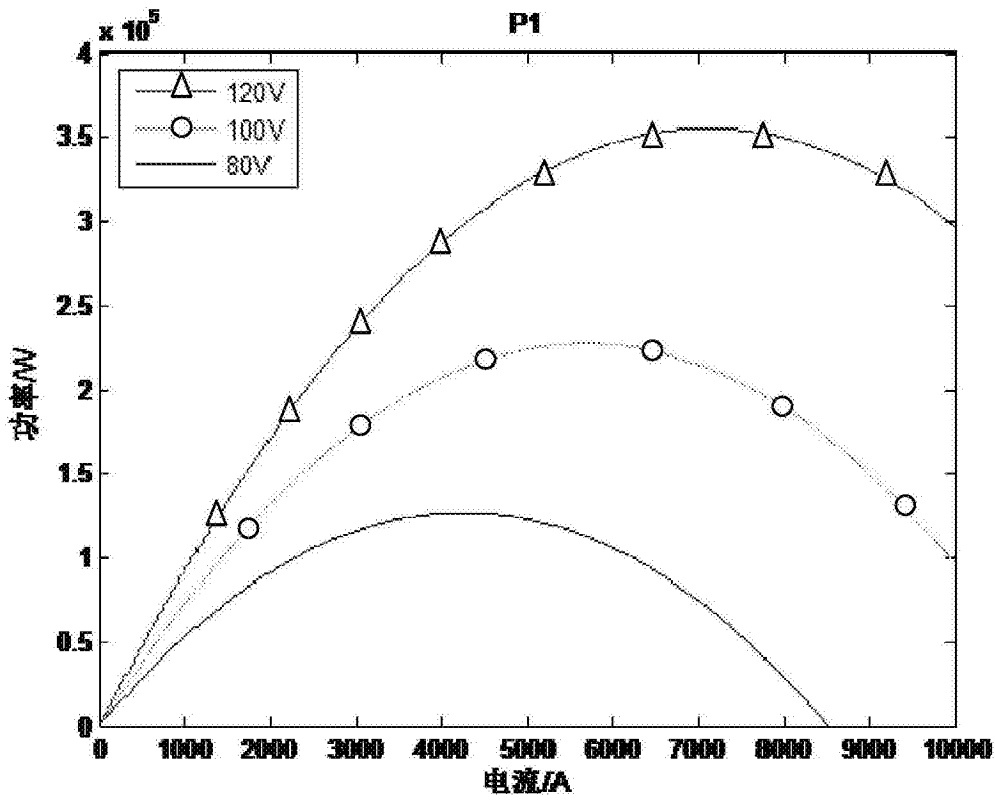


图5

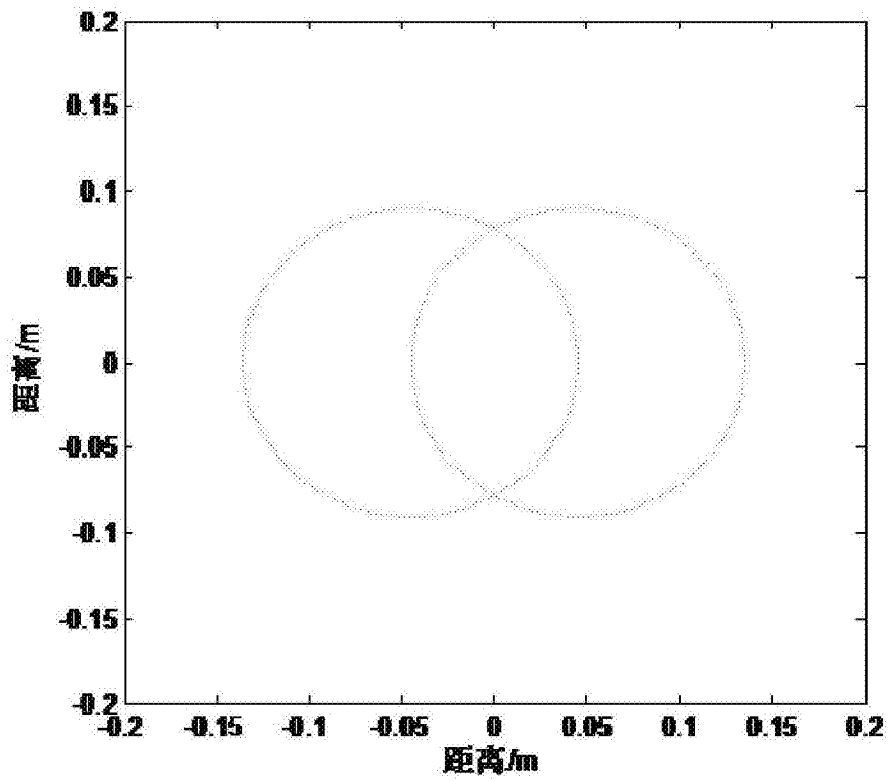


图6

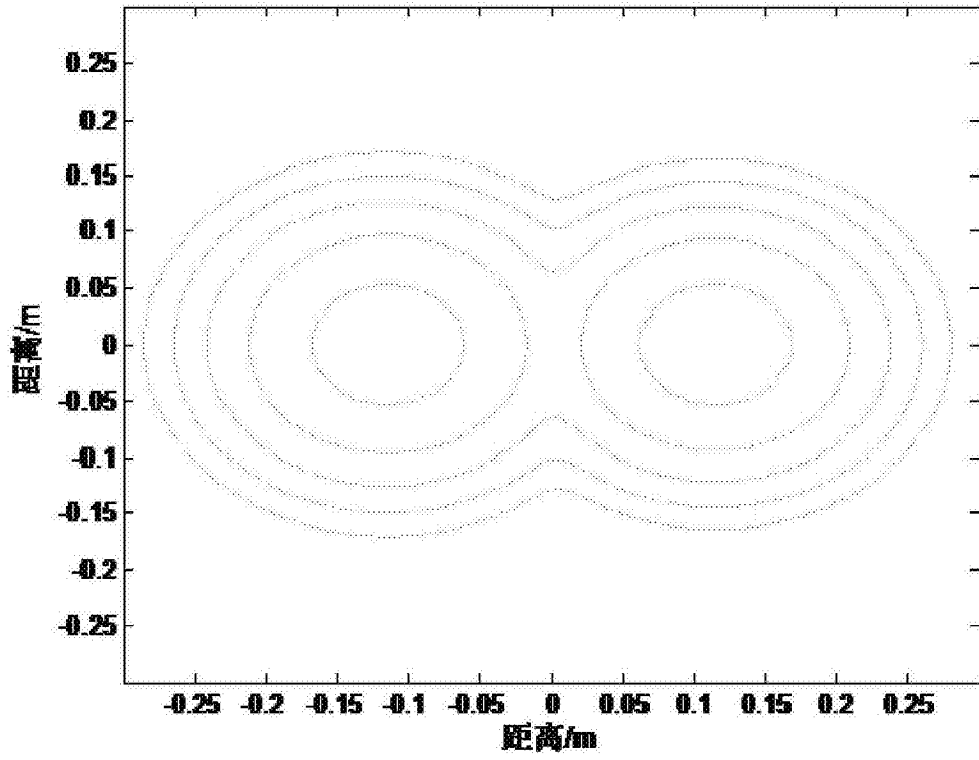


图7