



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115041692 B

(45) 授权公告日 2023. 02. 07

(21) 申请号 202210691778.6

(22) 申请日 2022.06.17

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 115041692 A

(43) 申请公布日 2022.09.13

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所  
地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 彭磊 李龙 赵伟 王吉南

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理  
事务所(普通合伙) 11390  
专利代理师 胡剑辉

(51) Int. Cl.

B22F 9/10 (2006.01)

G06F 30/28 (2020.01)

G06F 111/10 (2020.01)

G06F 113/08 (2020.01)

G06F 113/14 (2020.01)

G06F 119/14 (2020.01)

(56) 对比文件

JP 2019108581 A, 2019.07.04

CN 113059171 A, 2021.07.02

CN 113095004 A, 2021.07.09

CN 113059169 A, 2021.07.02

CN 106029267 A, 2016.10.12

US 2021187611 A1, 2021.06.24

Vishnu Teja Mantripragada1 等  
.Modeling of Powder Production During  
Centrifugal Atomization.《Journal of  
Sustainable Metallurgy 》.2021,第7卷620-  
629.

耿江江等.组合雾化过程中熔滴的飞行动力学与热历史的数值模拟.《粉末冶金材料科学与工程》.2017,第22卷(第1期),1-8.

李会平.旋转盘离心雾化熔滴飞行动力学与凝固进程.《中国有色金属学报》.2006,第16卷(第5期),793-799.

审查员 宋卫华

权利要求书2页 说明书11页 附图3页

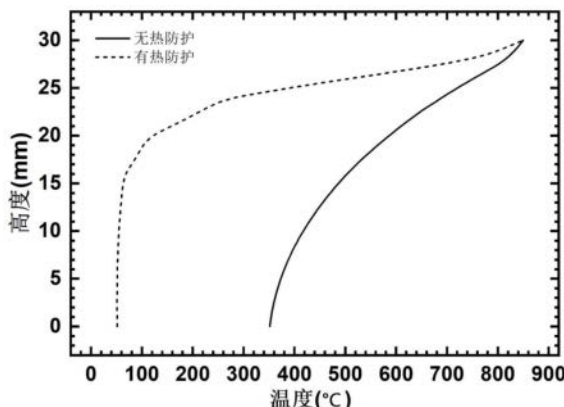
(54) 发明名称

一种高温金属离心雾化制粉装置的冷却模型验证方法

(57) 摘要

本发明公开了一种高温金属离心雾化制粉装置的冷却模型验证方法,步骤如下:将转盘固体域和对流冷却喷气组件作为转盘固体域,在转盘固体域的周向建立环境流体域,并创建关于转盘固体域和环境流体域的三维立体模型;采用数值传热学方式对三维立体模型进行网格划分;采用压力速度耦合的SIMPLE算法确定转盘固体域的控制方程;确定转盘固体域上的高温金属流的初始温度,以及转盘固体域与环境流体域的边界温度;利用计算机对控制方程、初始温度和边界温度进行迭代求解计算直至计算结果收敛,计算转盘中轴面上的温度分布以及转轴中心线的温度分布;本发明采用流体力学与传热学的数值计

算方法进行空间推动时间的迭代计算,以精确确定热防护的散热效率。



1. 一种高温金属离心雾化制粉装置的冷却模型验证方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤100、采用三维建模建立转盘、转盘转轴以及用于对转盘转轴对轴冲击冷却的对流冷却喷气组件三者对应的转盘固体域,在所述转盘固体域的周向建立环境流体域,并创建关于所述转盘固体域和所述环境流体域的三维立体模型;

步骤200、对所述三维立体模型进行网格划分,并在所述转盘固体域与环境流体域的接触面处对所述环境流体域进行边界层划分;

步骤300、采用数值传热学方法得到推断所述转盘固体域冷却的物理模型,并采用稳态计算的方法,湍流模型采用RNG  $k-\epsilon$ 模型,得到所述转盘固体域的传热过程中的控制方程;

步骤400、设定所述环境流体域的三维立体模型在动参考系下的大气气压出口,且确定转盘上表面热边界的恒温边界,且在有恒定通风冷却条件下确定所述转盘固体域和所述环境流体域的边界温度;

步骤500、基于恒温温度和边界温度代入控制方程内,对控制方程进行迭代求解计算直至计算结果收敛,得到转盘中轴面上的温度分布以及转轴中心线的温度分布。

2. 根据权利要求1所述的一种高温金属离心雾化制粉装置的冷却模型验证方法,其特征在于,

在步骤100中,所述转盘固体域还包括设置在所述转盘转轴上层叠分布或呈辐射状均匀分布在所述转盘转轴侧曲面上的散热片,所述散热片的两侧设有处于同一直线上确出风方向恰好相反的至少一组对流冷却喷气组件,所述对流冷却喷气组件内循环输出用于对所述转盘转轴降温冷却的惰性气体。

3. 根据权利要求2所述的一种高温金属离心雾化制粉装置的冷却模型验证方法,其特征在于,

所述散热片和所述对流冷却喷气组件组成热防护系统,所述散热片通过热传导方式对所述转盘转轴进行降温防护,所述对流冷却喷气组件通过强迫热对流方式对所述转盘转轴进行降温防护。

4. 根据权利要求1所述的一种高温金属离心雾化制粉装置的冷却模型验证方法,其特征在于,

在步骤200中,以所述转盘固体域与环境流体域的接触面对所述环境流体域进行边界划分,采用数值传热学的分析方法得到所述三维立体模型的物理温度分布模型,且以网格划分密度表示温度大小分布,所述网格划分密度从所述转盘固体域到所述环境流体域的延伸方向上依次降低,所述转盘固体域到所述环境流体域的传热呈现稳态。

5. 根据权利要求4所述的一种高温金属离心雾化制粉装置的冷却模型验证方法,其特征在于,

所述环境流体域为以所述转盘固体域为中心的立体流体域,所述环境流体域为四棱柱。

6. 根据权利要求1所述的一种高温金属离心雾化制粉装置的冷却模型验证方法,其特征在于,

在步骤300中,所述控制方程包括连续性方程、动量方程、能量方程、湍动能 $k$ 方程以及湍动能耗散率 $\epsilon$ 方程,且所述动量方程、能量方程、湍动能 $k$ 方程以及湍动能耗散率 $\epsilon$ 方程均采用二阶迎风格式离散,其中计算所述湍动能 $k$ 方程以及湍动能耗散率 $\epsilon$ 方程的湍流模型采

用RNG  $k-\epsilon$ 模型。

7. 根据权利要求2所述的一种高温金属离心雾化制粉装置的冷却模型验证方法,其特征在于,

在步骤400中,所述转盘上表面的热边界为高温的恒温边界,所述转盘的其他表面均为与环境流体域的耦合边界,所述转盘旋转采用动参考系,且所述环境流体域的边界为大气压力出口,

所述转盘上表面的恒温温度为:

$$T_{up} = 850^{\circ}\text{C}$$

所述环境流体域的边界气压为:

$$P_{out} = 0 \text{ Pa}.$$

8. 根据权利要求7所述的一种高温金属离心雾化制粉装置的冷却模型验证方法,其特征在于,

所述对流冷却喷气组件排出的气流温度和速度恒定,且所述环境流体域的边界采用恒定速度进口边界,且所述环境流体域的进口气流温度设为恒定温度。

9. 根据权利要求8所述的一种高温金属离心雾化制粉装置的冷却模型验证方法,其特征在于,

在步骤500中,基于恒温温度和边界温度代入控制方程内,利用计算机对连续性方程、动量方程、能量方程、湍动能方程和湍动能耗散率方程迭代求解计算,在连续性方程、动量方程、湍动能方程和湍动能耗散率方程的残差到 $10^{-3}$ ,能量方程的计算残差到达 $10^{-6}$ 时认为计算结果收敛。

## 一种高温金属离心雾化制粉装置的冷却模型验证方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及高温金属雾化制粉技术领域,具体涉及一种高温金属离心雾化制粉装置的冷却模型验证方法。

### 背景技术

[0002] 目前应用于高温金属粉末的雾化技术主要有气体雾化法(AA法)、真空感应气雾化法(VIGA法)、无坩埚电极感应熔化气体雾化法(EIGA法)、等离子火炬法(PA法)、等离子旋转雾化法(PREP法)以及转盘离心雾化法等。

[0003] 转盘离心雾化法通过将金属液体流向高速旋转的转盘面中心,在离心力的作用下,细小的液滴从转盘边缘甩出并且凝固成粉末颗粒,转盘雾化具有成本低、粒径集中度高等优点

[0004] 但是采用转盘雾化制备高温金属粉末时,高温金属液体流到转盘上后会立即加热转盘表面,热量通过转轴直接传递到电机主轴,从而会造成电机高温烧坏,无法安全工作,且目前转盘离心雾化过程中,对转盘进行强迫对流冷却,这属于一个流-固-热耦合的传热问题,非常复杂,无法找到精确的理论解析。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种高温金属离心雾化制粉装置的冷却模型验证方法,以解决现有技术中对转盘进行强迫对流冷却属于一个流-固-热耦合的传热问题,非常复杂,目前无法找到精确的理论解析的技术问题。

[0006] 为解决上述技术问题,本发明具体提供下述技术方案:

[0007] 一种高温金属离心雾化制粉装置的冷却模型验证方法,包括以下步骤:

[0008] 步骤100、采用三维建模建立转盘、转盘转轴以及用于对转盘转轴对轴冲击冷却的对流冷却喷气组件三者对应的转盘固体域,在所述转盘固体域的周向建立环境流体域,并创建关于所述转盘固体域和所述环境流体域的三维立体模型;

[0009] 步骤200、对所述三维立体模型进行网格划分,并在所述转盘固体域与环境流体域的接触面处对所述环境流体域进行边界层划分;

[0010] 步骤300、采用数值传热学方法得到推断所述转盘固体域冷却的物理模型,并采用稳态计算的方法,湍流模型采用RNG  $k-\varepsilon$ 模型,得到所述转盘固体域的传热过程中的控制方程;

[0011] 步骤400、设定所述环境流体域的三维立体模型在动参考系下的大气气压出口,且确定转盘上表面热边界的恒温边界,且在有恒定通风冷却条件下确定所述所述转盘固体域和所述环境流体域的边界温度;

[0012] 步骤500、基于恒温温度和边界温度代入控制方程内,对控制方程进行迭代求解计算直至计算结果收敛,得到转盘中轴面上的温度分布以及转轴中心线的温度分布。

[0013] 作为本发明的一种优选方案,在步骤100中,所述转盘固体域还包括设置在所述转

盘转轴上层叠分布或呈辐射状均匀分布在所述转盘转轴侧表面上的散热片,所述散热片的两侧设有处于同一直线上确出风方向恰好相反的至少一组对流冷却喷气组件,所述对流冷却喷气组件内循环输出用于对所述转盘转轴降温冷却的惰性气体。

[0014] 作为本发明的一种优选方案,所述散热片和所述对流冷却喷气组件组成热防护系统,所述散热片通过热传导方式对所述转盘转轴进行降温防护,所述对流冷却喷气组件通过强迫热对流方式对所述转盘转轴进行降温防护。

[0015] 作为本发明的一种优选方案,在步骤200中,以所述转盘固体域与环境流体域的接触面对所述环境流体域进行边界划分,采用数值传热学的分析方法得到所述三维立体模型的物理温度分布模型,且以网格划分密度表示温度大小分布,所述网格划分密度从所述转盘固体域到所述环境流体域的延伸方向上依次降低,所述转盘固体域到所述环境流体域的传热呈现稳态。

[0016] 作为本发明的一种优选方案,所述环境流体域为以所述转盘固体域为中心的立体流体域,所述环境流体域为四棱柱。

[0017] 作为本发明的一种优选方案,在步骤300中,所述控制方程包括连续性方程、动量方程、能量方程、湍动能 $k$ 方程以及湍动能耗散率 $\epsilon$ 方程,且所述动量方程、能量方程、湍动能 $k$ 方程以及湍动能耗散率 $\epsilon$ 方程均采用二阶迎风格式离散,其中计算所述湍动能 $k$ 方程以及湍动能耗散率 $\epsilon$ 方程的湍流模型采用RNG  $k-\epsilon$ 模型。

[0018] 作为本发明的一种优选方案,在步骤400中,所述转盘上表面的热边界为高温的恒温边界,所述转盘的其他表面均为与环境流体域的耦合边界,所述转盘旋转采用动参考系,且所述环境流体域的边界为大气压力出口,所述转盘上表面的恒温温度为:

$$[0019] \quad T_{up} = 850^{\circ}\text{C}$$

[0020] 所述环境流体域的边界气压为:

$$[0021] \quad P_{out} = 0\text{Pa}。$$

[0022] 作为本发明的一种优选方案,所述对流冷却喷气组件排出的气流温度和速度恒定,且所述环境流体域的边界采用恒定速度进口边界,且所述环境流体域的进口气流温度设为恒定温度。

[0023] 作为本发明的一种优选方案,在步骤500中,根据控制方程、恒温温度以及所述对流冷却喷气组件排出的气流温度和速度,利用计算机对所述连续性方程、动量方程、湍动能方程和湍动能耗散率方程迭代求解计算,在连续性方程、动量方程、湍动能方程和湍动能耗散率方程的残差到 $10^{-3}$ ,能量方程的计算残差到达 $10^{-6}$ 时认为计算结果收敛。

[0024] 本发明与现有技术相比较具有如下有益效果:

[0025] 本发明对整个雾化的转盘传热过程采用数值的计算方法进行仿真计算,采用流体力学与传热学的数值计算方法,在计算模型中施加流动边界条件以及热边界条件,从而进行空间推动时间的迭代计算,精确确定金属离心雾化过程中金属液流在转盘表面铺展流动过程中对转轴的热传递以及对转轴底端高速电机的加热现象,从而精确计算热防护工作的散热效率。

## 附图说明

[0026] 为了更清楚地说明本发明的实施方式或现有技术中的技术方案,下面将对实施方

式或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍。显而易见地,下面描述中的附图仅仅是示例性的,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据提供的附图引伸获得其它的实施附图。

[0027] 图1为本发明实施例1提供的安装环形散热肋片的高温金属离心雾化制粉装置的结构示意图;

[0028] 图2为本发明实施例1提供的安装竖直散热肋片的高温金属离心雾化制粉装置的结构示意图;

[0029] 图3为本发明实施例2提供的环形散热肋片的三维立体模型结构示意图;

[0030] 图4为本发明实施例2提供的三维立体模型的网格划分的结构示意图;

[0031] 图5为本发明实施例2提供的有无热防护系统的温度分布示意图;

[0032] 图6为本发明实施例2提供的转盘中心轴线温度随高度变化图。

[0033] 图中:

[0034] 1-转盘盘片,2-转轴,3-环形散热肋片,11-金属液滴,12-气粉混合流,13-转轴温度测量计,14-联轴器,15-联轴器温度测量计,17-雾化室,21-蓄水池,22-增压动力组件,23-雾化室循环冷却水,24-循环冷却水供给管道,30-循环热水排出管道,31-冷却塔,32-进风口,33-出风口,35-换热冷却水供给管道,40-换热器,48-低温循环惰性气流喷嘴。

### 具体实施方式

[0035] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0036] 实施例1

[0037] 本发明提供了一种高温金属离心雾化制粉装置的冷却模型验证方法,本实施方式采用数值分析的方法进行传热过程分析,即整个雾化的转盘传热过程采用数值的计算方法进行仿真计算,研究金属离心雾化过程中金属液流在转盘表面铺展流动过程中对转轴的热传递以及对转轴底端高速电机的加热现象。采用流体力学与传热学的数值计算方法,在计算模型中施加流动边界条件以及热边界条件,从而进行空间推动时间的迭代计算。

[0038] 其中如图1和图2所示,本实施方式应用于高温金属离心雾化制粉装置的转盘散热处理,高温金属离心雾化制粉装置的物理结构具体如下:

[0039] 高温金属离心雾化制粉装置包括雾化室17,其壁内具有用于通过冷却水的夹层通道;

[0040] 雾化离心转盘机构,设置在雾化室17内,雾化离心转盘机构用于将高温金属液流高速离心形成金属液滴;

[0041] 循环冷却系统,用于向雾化室17内循环提供低温保护气,以及向夹层通道内循环提供冷却水,以对雾化离心转盘机构的传动轴进行冷却降温,并使得雾化室17内部形成低温环境且金属液滴预凝固成金属粉末。

[0042] 循环冷却系统包括冷却水循环系统、保护气循环系统以及强制对流喷射组件,冷却水循环系统与夹层通道连通以向夹层通道内循环提供冷却水,保护气循环系统的输出端

连通强制对流喷射组件的进口端以向强制对流喷射组件内循环提供低温保护气,强制对流喷射组件用于从不同方向正对传动轴喷射低温保护气以降温传动轴,并形成高温保护气,至少部分高温保护气在雾化室内接触金属液滴形成共同形成气粉混合流。

[0043] 冷却水循环系统通过换热冷却的方式将自夹层通道的出水口内循环流出的高温水流降温至低温水流,并分别供应至夹层通道的出水口和保护气循环系统;

[0044] 保护气循环系统利用低温水流通过热交换的方式形成低温保护气,并将热交换后形成的高温水流再次输入冷却水循环系统的进口端。

[0045] 其中,雾化离心转盘机构包括:转盘盘片1、转轴2、环形散热肋片3和加热融化装置。

[0046] 其中,转盘盘片1用于接收融化后的金属液体,具体的,转盘盘片1为一个薄圆柱形,直径范围在30-200mm,厚度在0.5-10mm,材质可采用金属或者非金属等硬质材料,并且要求能够耐受金属液体的高温,为了保证平衡度,转盘盘片1的表面光滑平整,边缘圆跳动误差要低。

[0047] 转轴2设置在转盘盘片1的下表面,用于连接驱动机构并带动转盘盘片1转动,驱动机构选用高速电机,用于产生动力,带动转盘盘片1、转轴2和环形散热肋片3高速转动,转速要求在10000rpm以上。为了调节转速,高速电机采用变频器驱动,电机内部通水冷却以及保证良好的润滑。为了进行充分的热防护,还需要在电机的外围包裹一层耐高温的隔热层。

[0048] 转轴2为一根与驱动电机的输出轴例如联轴器连接的轴,转轴2可以与转盘盘片1可以为一体化加工而成,也可以单独加工,例如通过焊接或者粘接而成,转轴2的直径和长度根据安装零件例如联轴器的需求来设计加工,为了保证动平衡精度,需要转轴2和转盘盘片1有良好的同轴度。

[0049] 环形散热肋片3均匀设置在转轴2的侧曲面上,可以同转轴2一体化加工,也可单独加工后与转轴2焊接,通常直径为10-30mm,厚度为0.5-3mm,数量为1-5个,若与转轴2一体化加工材质时,则环形散热肋片3可以采用和转轴2相同的材料,若是与转轴2焊接材质时,则环形散热肋片3可以采用散热性能好、质量轻的材料。为了保证整个转盘动平衡性能好,需要环形肋片3与转轴2具有良好的同轴度。

[0050] 即转轴2的中心轴线与转盘盘片1的圆心同轴设置,环形散热肋片3的质点与转轴2的中心轴线重合,环形散热肋片3的质点以及转盘盘片1的圆心处于转轴2的中心轴线上。

[0051] 作为本实施方式的另一个实施例,转轴2上还可以安装竖直散热肋片,其起到的散热作用几乎与环形散热肋片相同,即转轴2的侧曲面上设置有多个均匀分布的竖直散热肋片,竖直散热肋片呈辐射状对称分布在转轴2的侧曲面上,所有竖直散热肋片的棱边连接形成正多边形结构。

[0052] 加热融化装置设置在转盘盘片1的上方,用于将加热融化的金属液定量释放在转盘盘片1的上表面,熔融状态的金属液在转盘盘片1的离心作用下形成金属粉末。

[0053] 在本实施方式中,离心雾化制粉的原料的金属锭,金属锭被加热熔化后形成金属液,本实施方式可选择熔点在500℃以上的金属,例如铝锭、铜锭、不锈钢锭、高温合金锭等。金属锭的杂质含量要求在1%以下,尤其是氧含量要更低于1%。高纯度的金属锭不需要冶炼可直接熔化为金属液用于雾化制粉。

[0054] 加热融化装置包括坩埚,以及包裹在坩埚外侧的加热炉,坩埚用于盛放金属锭,且

加热炉用于金属锭原材料的加热熔化,坩埚位于加热炉内部,选用耐温性能好的金属或者非金属,例如不锈钢、石墨、陶瓷等。为了产生稳定纤细的液流,坩埚底部设计成收缩口并且有一个开关阀门,便于金属锭熔化成液态后稳定流下。

[0055] 加热炉可选择电阻式加热炉或者电感式加热炉,加热炉外壁应包裹一层非常厚的耐高温保温层,防止热量损失金属液凝固,加热炉的下方敞口,用于金属液流下,顶部有盖子,方便加入金属锭,加热炉应该选择带有温控器附件,能够自动加热并控温保持,减少人员操作。

[0056] 阀门安装在坩埚的下方,用于控制金属液的通断,阀门应当选用耐高温材料,例如石墨、陶瓷等,金属锭在坩埚内加热融化后流经阀门流出形成熔融状态的金属液流,金属液流在转盘盘面铺展形成熔融状态的,金属液膜在转盘边缘由于转盘高速旋转产生的离心力作用撕裂破碎形成雾化金属液滴11。

[0057] 转轴底端设有转轴温度测量计13,一般利用连接线路与外界显示面板连接,对转轴底部温度进行实时监控。

[0058] 联轴器14用于连接高速电机的转轴与转轴2,传递电机的扭矩与转速,带动转盘盘片1、转轴2和环形散热肋片3高速转动。

[0059] 联轴器14上还安装有联轴器温度测量计15,通常利用连接线路与外界显示面板连接,对联轴器14温度进行实时监控,保证转轴冷却效果良好和电机的平稳运行。

[0060] 而在转盘盘片1的外侧包围设有雾化室17,且雾化室17的上端将转盘盘片1和加热融化装置分隔,雾化室17的壁面内通过热交换管路对金属粉末降温并收集金属粉末,且热交换管路通过热交换方式进行自降温以实现雾化室17的循环降温处理。

[0061] 冷却水循环系统包括与雾化室17的夹层通道的输入端连接的循环冷却水供给管道24,以及与夹层通道的输出端连接的循环热水排出管道30连接。

[0062] 循环热水排出管道30内的热水通过冷却塔31进行冷却,且冷却塔31与蓄水池21的入水口连接,以将冷却水汇聚到蓄水池21作为冷却水源,循环冷却水供给管道24与蓄水池21的出水口连接。

[0063] 雾化室17为离心雾化制粉过程的容器,材质可选用碳钢或者不锈钢。雾化室17的形状为一段圆柱加一段圆锥段焊接而成,雾化室17的直径应该大于雾化液滴凝固成粉的轨迹长度,直径太小则会导致液滴粘附在雾化室壁面上。雾化室17下方做成圆锥状,用于汇集制成的粉末。雾化室17壁面内部加工了冷却槽道,用于冷却水流动,带走高温金属粉末传递的热量。

[0064] 金属液滴11在雾化室17内的热交换管路降温作用下凝固形成的金属粉末,金属粉末与雾化室17内的惰性气体混合形成气粉混合流12,最终在重力作用下,金属粉末沉降到雾化室底部,并通过管道接口法兰处流入到下一个设备,例如收集罐或者分级器。

[0065] 具体的实现原理为:雾化室17的夹层通道与热交换管路的循环冷却水供给管道24以及循环热水排出管道30连接,循环冷却水供给管道24内的冷水与雾化室17的壁面进行热交换后形成高温热水,且高温热水通过循环热水排出管道30排出。

[0066] 热交换管路还包括与循环冷却水供给管道24以及循环热水排出管道30连接的蓄水池21,循环冷却水供给管道24上设有增压动力组件22,且循环热水排出管道30上设有用于通过热交换对热水降温的风冷机构。



[0067] 风冷机构包括与循环热水排出管道30连接的冷却塔31,冷却塔31上设有至少一个进风口32以及至少一个出风口33,进风口32与出风口33的连接方向与循环热水排出管道30相交或平行,进风口32和出风口33之间通过空气对流方式对循环热水排出管道30内的热水进行降温处理。

[0068] 循环冷却水供给管道24主要作用在雾化室17的壁面冷却槽道内,作为冷却介质带走雾化室壁面的高温热量,雾化室循环冷却水23通过水泵增压从蓄水池21中经过循环冷却水供给管道24进入冷却槽道,充分吸热后流出冷却槽道,经循环热水排出管道30运送到冷却塔31处与空气进行换热冷却处理,最后流回蓄水池21中进行储蓄换热,然后重新经过水泵增压,从而实现循环冷却。

[0069] 需要特别说明的是,在循环冷却水供给管道24上设有循环冷却水进口流量计、循环冷却水进口压力计以及循环冷却水进口温度计。分别用于实时测量循环冷却水供给管道24的进口流量,防止流量过大或过小影响雾化室冷却效率;用于实时测量循环冷却水供给管道24的压力,防止压力过大或过小影响设备正常工作;以及用于实时测量循环冷却水供给管道24的温度,由此选取合适的冷却水温对雾化室进行冷却。

[0070] 而循环热水排出管道30上设有循环出水压力计以及循环出水温度计,循环热水排出管道30输送雾化室17内冷却槽道内排出的循环水,将其运输到冷却塔31内进行换热冷却。

[0071] 冷却塔31用于冷却雾化室槽道内排出的循环水,采用空气对流冷却,气体从冷却塔的进风口32进入,对被加热的雾化室循环水进行对流换热,从而使循环水快速冷却并从循环热水排出管道30排出,而被加热的空气从冷却塔的出风口33排出。

[0072] 上述过程为循环冷却水对雾化室17的内壁降温的实现方式,利用上述循环降温 and 出水的方式,雾化室17的表面始终保持为低温状态,因此金属液滴11在雾化室17内降温凝固形成的金属粉末。

[0073] 而由于高温金属液体流到转盘上后会立即加热转盘表面,热量通过转轴2快速传递给高速电机,长时间雾化制粉会导致热量在高速电机上累积而造成电机过热烧坏,无法工作,为了解决上述技术问题,本实施方式通过采用冷却的循环惰性气体对装有环形散热肋片3的转轴2进行强制对流冷却,从而降低转轴2温度,有效阻止大量热量向电机传递,使得电机温度一直保持在其工作范围内,达到长时间雾化制粉的目的。

[0074] 为了实现上述目的,本实施方式利用循环的低温惰性气流对流的方式,实现对环形散热肋片3的强制对流换热,阻止转盘盘面的热量向下传递,烧坏电机,具体的实现方式为:保护气循环系统包括与雾化室17连通的换热器40,换热器40用于冷却从雾化室17内部输出的高温循环惰性气流;

[0075] 换热器40内设有与蓄水池连接的循环冷却水排出管道41,循环冷却水排出管道41的另一端连接在冷却塔31与蓄水池21之间的连接管道上,循环冷却水排出管道41内的冷却水流与高温循环惰性气流进行热交换,以得到用于冷却雾化离心转盘机构的传动轴的低温循环惰性气流。

[0076] 强制对流喷射组件包括设置在换热器40的输出端的风机,以及与换热器40的输出端连接的至少两个低温循环惰性气流喷嘴48,低温循环惰性气流喷嘴48对称分布在雾化离心转盘机构的传动轴两侧,且两个对立分布的低温循环惰性气流喷嘴48的出气方向恰好相

反。

[0077] 换热器40内部设有换热冷却水供给管道35,换热冷却水供给管道35连接在循环冷却水供给管道24和循环热水排出管道30之间,雾化室17内部的高温惰性气体经过冷却介质气流通路45进入换热器40内,且换热冷却水供给管道35内的冷水与冷却介质气流通路45内的高温惰性气体进行热交换,以形成被降温的低温惰性气体,冷却介质气流通路45内的低温惰性气体在出风机的抽动下形成低温循环惰性气流,且低温循环惰性气流相对喷向转轴2和环形散热肋片3形成强迫对流,以阻止转盘盘片1的高温热量向转轴2传递。

[0078] 低温循环惰性气流经与转轴2和环形散热肋片3换热形成高温惰性气流,且高温惰性气流在出风机作用下重新与换热冷却水供给管道35换热形成低温循环惰性气流。

[0079] 冷却介质气流通路45的排气端设有成对均匀分布的组合出气管道,每对组合出气管道的出气口相对分布,且每对组合出气管道的出气方向恰好相反。

[0080] 换热冷却水供给管道35内的换热循环冷却水36流动至冷却介质气流通路45内时,作为冷却介质进行换热操作,带走升温后的循环惰性气流的高温热量,换热循环冷却水36通过水泵增压从蓄水池21中经过换热冷却水供给管道35进入换热器40内,充分吸热后流出换热器40,经输运管道与经冷却塔31冷却后的雾化室循环水流汇合后流回蓄水池21中进行储蓄换热,然后重新经过水泵22增压,从而实现循环冷却。

[0081] 优选的是,在换热冷却水供给管道35上设有换热冷却水进口流量计、换热冷却水进口压力计以及换热进口温度计,换热冷却水进口流量计用于实时测量换热冷却水供给管道35循环冷却水进口流量,防止流量不匹配且对设备运行造成影响,换热冷却水进口压力计用于实时测量换热器40循环冷却水进口压力,防止压力过大或过小影响换热器40正常工作,换热进口温度计用于实时测量换热器40循环冷却水进口温度,由此选取合适的冷却水温对高温循环惰性气流进行冷却。

[0082] 另外,换热冷却水供给管道35与循环热水排出管道30连接的输送段上设有换热循环冷却水出口压力计以及换热循环冷却水出口温度计,换热循环冷却水出口压力计用于实时测量换热器循环冷却水出口压力,且换热器循环冷却水出口温度计用于实时测量换热器循环冷却水出口温度。

[0083] 换热器40用于冷却高温循环惰性气流,冷却水流从蓄水池21中经泵增压后经换热冷却水供给管道35流入换热器40内,通过冷却水流与高温循环惰性气流44进行热交换,从而对高温循环惰性气流进行快速冷却,得到用于冷却转轴2和环形散热肋片3的低温循环惰性气流。

[0084] 高温循环惰性气流是由出风机作用,将其从雾化室17内抽取出至冷却介质气流通路45内,并将其运输至换热器40内经过换热器40循环冷却水换热冷却后,最终形成低温循环惰性气流,低温循环惰性气流在排风机的作用下沿着组合出气管道输出至转轴2和环形散热肋片3上。即本实施方式的低温循环惰性气流是高温循环惰性气流经换热器40冷却后形成的,用于冷却转轴2和环形散热肋片3。

[0085] 在组合出气管道的出气口设置低温循环惰性气流喷嘴48,低温循环惰性气流喷嘴48将冷却过后的低温循环惰性气流以一定速度喷射到转轴2和环形散热肋片3上,实现对转轴2和环形散热肋片3的强制对流换热,阻止转盘盘面的热量向下传递,烧坏电机。保证整个雾化制粉装置长时间平稳运行。

[0086] 因此本实施方式的转轴-电机热防护装置将在转轴周围一体化加工或者焊接1-5片环形散热肋片,由此增加转轴散热面积,并在环形散热肋片两侧均安装低温循环惰性气流喷嘴47,用于将经过换热器40冷却后的低温循环惰性气流以一定速度喷出,从而对转轴2和环形散热肋片3进行强迫对流冷却。在低温循环惰性气流强迫对流冷却作用下,转盘表面传递下来的热量大部分被低温循环惰性气流吸收,从而使得转轴2温度会迅速降低,可以将联轴器处温度降低在80℃以下,达到了阻止大量热量向高速电机传递的效果,为高速电机长时间工作提供了保障。

[0087] 实施例2

[0088] 而对于上述高温金属离心雾化制粉装置安装环形散热肋片的冷却模型,本实施方式还提供了验证上述冷却模型的验证方法,具体包括以下步骤:

[0089] 步骤100、采用三维建模建立转盘、转盘转轴以及用于对转盘转轴对轴冲击冷却的对流冷却喷气组件三者对应的转盘固体域,在所述转盘固体域的周向建立环境流体域,并创建关于所述转盘固体域和所述环境流体域的三维立体模型。

[0090] 如图3所示,所述转盘固体域包括转盘,设置在所述转盘下表面中心位置的转盘转轴,以及设置在所述转盘转轴上的散热片,所述散热片的两侧设有处于同一直线上的对流冷却喷气组件,在所述三维立体模型中,所述对流冷却喷气组件与所述散热片之间设有吹气间距,所述环境流体域内充有从所述对流冷却喷气组件内排出的惰性气体。

[0091] 所述散热片和所述对流冷却喷气组件组成热防护系统,所述散热片用于通过热传导对所述转盘转轴进行降温防护,所述对流冷却喷气组件用于通过强迫热对流对所述转盘转轴进行降温防护。

[0092] 散热片包括设置在所述转盘转轴上层叠分布的环形散热肋片,或呈辐射状均匀分布在所述转盘转轴侧曲面上的竖直散热片,对带有环形散热肋片或竖直散热片结构的转盘采用三维建模,其中,带有环形散热肋片的模型尺寸如图3所示。

[0093] 在实际生产过程中,转盘材质一般采用钢基底上表面喷涂耐热材料,而雾化室内基本采用氮气保护,冷却风气出口与转轴肋片相距10mm,计算过程中为了更好的模拟鼓风对轴冲击冷却和转盘与周围环境对流换热的效果,将转盘附近区域区域设置为环境流体域,所述环境流体域为以所述转盘固体域为中心的立体流体域。

[0094] 步骤200、对所述三维立体模型进行网格划分,并在所述转盘固体域与环境流体域的接触面处对所述环境流体域进行边界层划分。

[0095] 如图4所示,以所述转盘固体域与环境流体域的接触面对所述环境流体域进行边界划分,采用数值传热学的分析方法得到所述三维立体模型的物理温度分布模型,且以网格划分密度表示温度大小分布,所述网格划分密度从所述转盘固体域到所述环境流体域的延伸方向上依次降低,所述转盘固体域到所述环境流体域的传热呈现稳态。

[0096] 步骤300、采用数值传热学方法得到推断所述转盘固体域冷却的物理模型,并采用稳态计算的方法,湍流模型采用RNG  $k-\epsilon$ 模型,得到所述转盘固体域的传热过程中的控制方程。

[0097] 所述控制方程包括动量方程、能量方程、湍动能 $k$ 方程以及湍动能耗散率 $\epsilon$ 方程,且动量方程、能量方程、湍动能 $k$ 方程以及湍动能耗散率 $\epsilon$ 方程均采用二阶迎风格式离散,其中计算所述湍动能 $k$ 方程以及湍动能耗散率 $\epsilon$ 方程的湍流模型采用RNG  $k-\epsilon$ 模型。

[0098] 流体工质氮气连续不可压且各向同性,同时整个传热过程经过一段时间后是一个稳态结果,所以数值计算采取稳态计算的方法,湍流模型采用RNG k- $\epsilon$ 模型,数值计算的控制方程如下所示:

[0099] 连续性方程:

$$[0100] \quad \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

[0101] 动量方程:

$$[0102] \quad \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (2);$$

[0103] 能量方程:

$$[0104] \quad \frac{\partial(u_i T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{k_{eff}}{\rho C_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3);$$

[0105] 湍动能k方程:

$$[0106] \quad \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j})}{\partial x_j} + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (4);$$

[0107] 湍动能耗散率 $\epsilon$ 方程:

$$[0108] \quad \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j})}{\partial x_j} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon \quad (5);$$

[0109] 其中,式(4)、(5)中 $C_{1\epsilon}=1.42$ , $C_{2\epsilon}=1.68$ , $C_{3\epsilon}=0.09$ ,为固定值;

[0110]  $G_k$ 和 $G_b$ 代表由平均速度梯度产生的湍动能和浮力带来的湍动能,其计算式如下:

$$[0111] \quad G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (6);$$

$$[0112] \quad G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (7);$$

[0113] 式(4)、(5)中的 $\alpha_k$ 和 $\alpha_\epsilon$ 分别为k和 $\epsilon$ 逆有效普朗特数,根据RNG理论推导得出 $\alpha_k$ 和 $\alpha_\epsilon$ 的计算公式如下:

$$[0114] \quad \left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \quad (8);$$

[0115] 上式中 $\alpha_0=1.0$ ,在高雷诺数极限下 $\mu_{mol}/\mu_{eff} \ll 1$ , $\alpha_k=\alpha_\epsilon=1$ 。

[0116] 且式(5)中的RNG k- $\epsilon$ 模型中特有的使其精度提升项 $R_\epsilon$ 计算公式如下:

$$[0117] \quad R_\epsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \epsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (9);$$

[0118] 式(9)中 $\eta=S_k/\varepsilon$ ,  $\eta_0=4.38$ ,  $\beta=0.012$ ,  $C_\mu=0.0845$ 。

[0119] 将上述计算的数据值分别代入到式(1)、式(2)、式(3)、式(4)和式(5)中,将连续性方程、动量方程、能量方程、湍动能k方程以及湍动能耗散率 $\varepsilon$ 进行进一步的细化确认。

[0120] 需要补充说明的是,动量方程、能量方程、湍动能k方程以及湍动能耗散率 $\varepsilon$ 方程均采用二阶迎风格式离散。

[0121] 迎风格式主要是利用流动上游信息构造差分方程,以求一维速度微分 $\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_j$ 二阶迎风格式为例,采用了j, j-1, j-2三个网格点进行构建,首先将其写成待定系数形式:

$$[0122] \quad \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_j = a_1 u_{j-2} + a_2 u_{j-1} + a_3 u_j + O(\Delta x^n) \quad (10);$$

[0123] 上式中 $u_{j-2}$ 和 $u_{j-1}$ 利用Taylor展开可得:

$$[0123] \quad u_{j-2} = u_j + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_j (-2\Delta x) + \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_j (-2\Delta x)^2 + \frac{1}{3!} \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\right)_j (-2\Delta x)^3 + O(\Delta x^n) \quad (11);$$

[0124]

$$u_{j-1} = u_j + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_j (-\Delta x) + \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_j (-\Delta x)^2 + \frac{1}{3!} \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\right)_j (-\Delta x)^3 + O(\Delta x^n)$$

[0125] 联立公式(10)和(11)可以得到:

$$[0126] \quad \begin{aligned} & \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_j = a_1 u_{j-2} + a_2 u_{j-1} + a_3 u_j + O(\Delta x^n) \\ & = (a_1 + a_2 + a_3)u_j + ((-2)a_1 + (-1)a_2)\Delta x \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_j \\ & \quad + \frac{1}{2!}((-2)^2 a_1 + (-1)^2 a_2)\Delta x^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_j + O(\Delta x^n) \end{aligned} \quad (12);$$

[0127] 从而得到如下线性方程组:

$$[0128] \quad a_1 + a_2 + a_3 = 0$$

$$[0129] \quad (-2)a_1 + (-1)a_2 = \frac{1}{\Delta x}$$

$$[0130] \quad (-2)^2 a_1 + (-1)^2 a_2 = 0 \quad (13);$$

[0131] 解得相应系数为: $a_1 = \frac{1}{2\Delta x}$ ,  $a_2 = -\frac{4}{2\Delta x}$ ,  $a_3 = \frac{3}{2\Delta x}$ ,从而得到动量方程、能量方程、湍动能方程以及湍动能耗散率方程的二阶迎风格式表达式为:

$$[0132] \quad \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_j = \frac{1}{2\Delta x} (u_{j-2} - 4u_{j-1} + 3u_j) \quad (14)。$$

[0133] 步骤400、设定所述环境流体域的三维立体模型在动参考系下的大气气压出口,且

确定转盘上表面热边界的恒温边界,且在恒定通风冷却条件下确定所述所述转盘固体域和所述环境流体域的边界温度。

[0134] 在无热防护系统的条件下,转盘上表面热边界为高温的恒温边界,转盘其他表面均设置为与流体域耦合边界,此时金属液的初始温度为 $T_{up}=850^{\circ}\text{C}$ 。

[0135] 所述转盘上表面的热边界为高温的恒温边界,所述转盘的其他表面均为与环境流体域的耦合边界,且所述环境流体域的边界为大气压力出口,所述环境流体域的边界气压为:

[0136]  $P_{out}=0\text{Pa}$ 。

[0137] 在有热防护系统的条件下,转盘上表面与其他表面热边界与无冷却情况一致,管道鼓风冷却进口边界采用恒定速度进口边界,进口气流温度为恒定温度,转盘外部流体域边界与无冷却一样设置为大气压力出口边界,其中恒定速度和恒定温度具体如下:

[0138]  $v_{wind}=30\text{m/s}$

[0139]  $T_{wind}=40^{\circ}\text{C}$

[0140] 即在本实施方式中,冷却风气流出口的鼓风温度为 $40^{\circ}\text{C}$ ,速度为 $30\text{m/s}$ ,环境流体域的环境温度均为 $60^{\circ}\text{C}$ ,设置两者转盘上表面均为 $850^{\circ}\text{C}$ 恒温壁面。

[0141] 步骤500、基于恒温温度和边界温度代入控制方程内,对控制方程进行迭代求解计算直至计算结果收敛,得到转盘中轴面上的温度分布以及转轴中心线的温度分布,直至计算结果收敛,计算转盘中轴面上的温度分布以及转轴中心线的温度分布。

[0142] 在步骤500中,根据控制方程和边界条件,利用计算机进行迭代求解计算,在连续性方程、动量方程、湍动能方程和湍动能耗散率方程的残差到 $10^{-3}$ ,能量方程的计算残差到达 $10^{-6}$ 时认为计算结果收敛。

[0143] 结合迭代求解结果,将安装有转轴、电机热防护装置的转盘系统与原始的无热防护的转盘系统在同等高温转盘上表面边界条件下进行对比:设置两者转盘上表面均为 $850^{\circ}\text{C}$ 恒温壁面,周围环境温度均为 $60^{\circ}\text{C}$ ,具有热防护装置的两侧鼓风温度为 $40^{\circ}\text{C}$ ,速度为 $30\text{m/s}$ 。如图5所示,得到有无热防护系统的转盘中轴面上温度分布以及转轴中心线温度分布。

[0144] 且转盘中心轴线温度随转盘转轴的高度变化如图6所示,其中转盘转轴与驱动电机连接,在图5中,以转盘转轴与驱动电机的连接点为原点,此时转盘中心轴线的高度为0,且转盘中心轴线的高度从转盘转轴与驱动电机的连接点到转盘转轴与转盘的连接点依次增大。

[0145] 从上图对比可以看出转轴肋片散热以及鼓风冷却对转轴散热效果十分显著,未采用该冷却方法时,转盘转轴的底面温度为 $351^{\circ}\text{C}$ 。在该冷却方法的作用下,转盘转轴的底面温度降到 $51^{\circ}\text{C}$ ,二者相差 $300^{\circ}\text{C}$ 。通常,电机的工作温度在 $80^{\circ}\text{C}$ 以内,采用该冷却方法的转盘底面温度低于 $80^{\circ}\text{C}$ ,散热片和鼓风冷却的方法从根本上阻断了转盘对高速电机的热传递,有效的保证电机与转盘工作在安全温度范围内,为长时间雾化制粉提供了保障。

[0146] 以上实施例仅为本申请的示例性实施例,不用于限制本申请,本申请的保护范围由权利要求书限定。本领域技术人员可以在本申请的实质和保护范围内,对本申请做出各种修改或等同替换,这种修改或等同替换也应视为落在本申请的保护范围内。

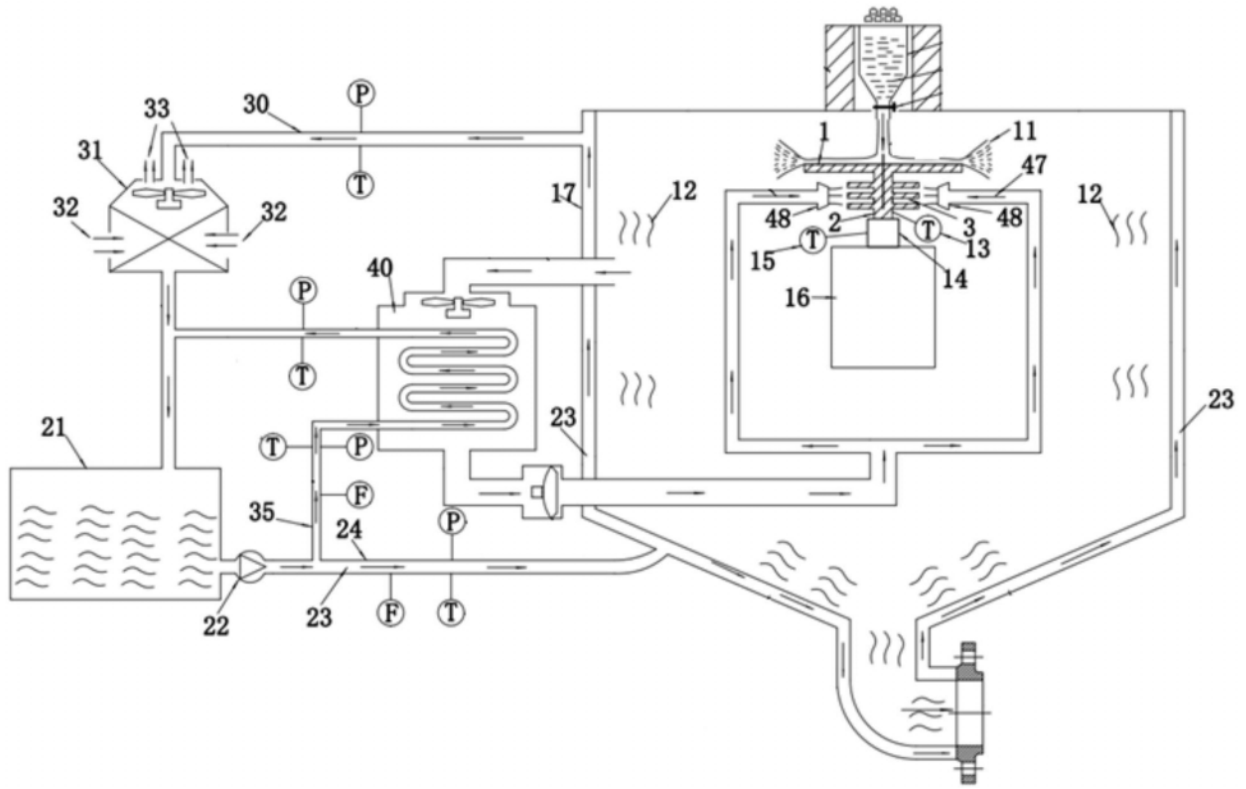


图1

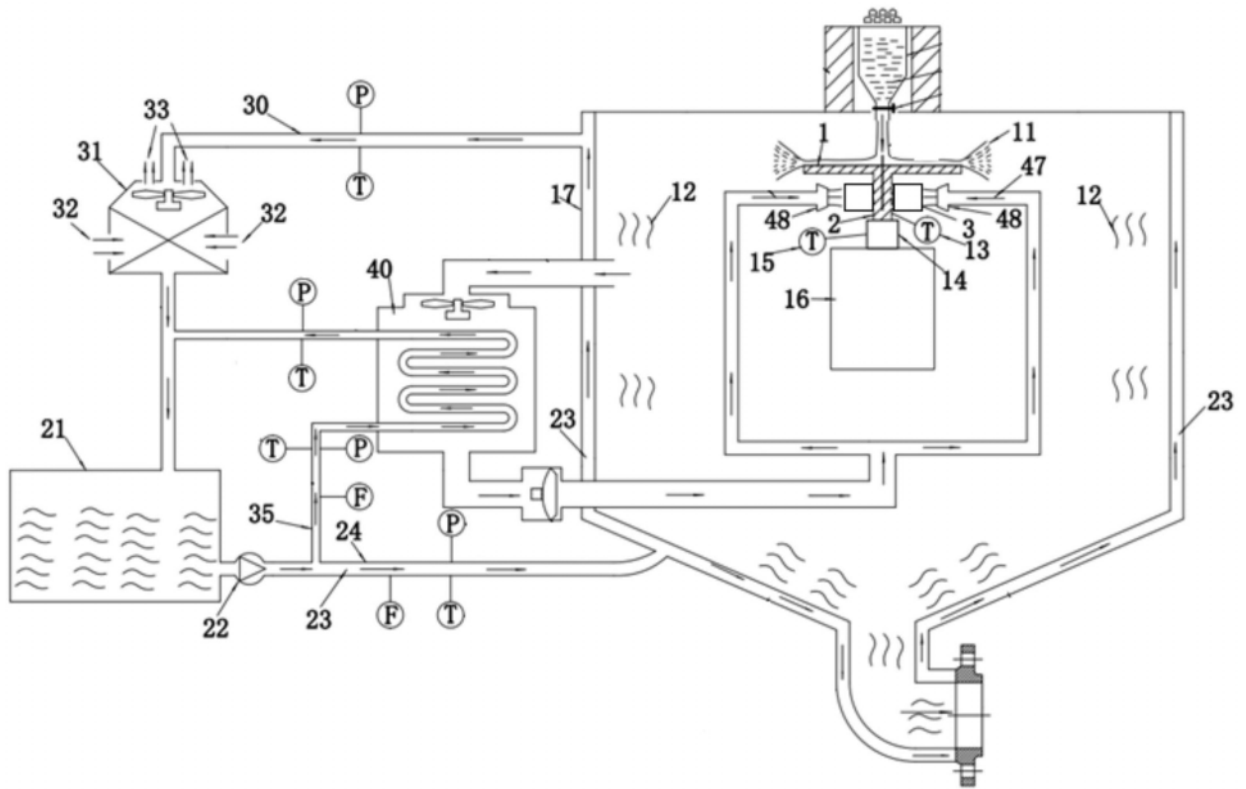


图2

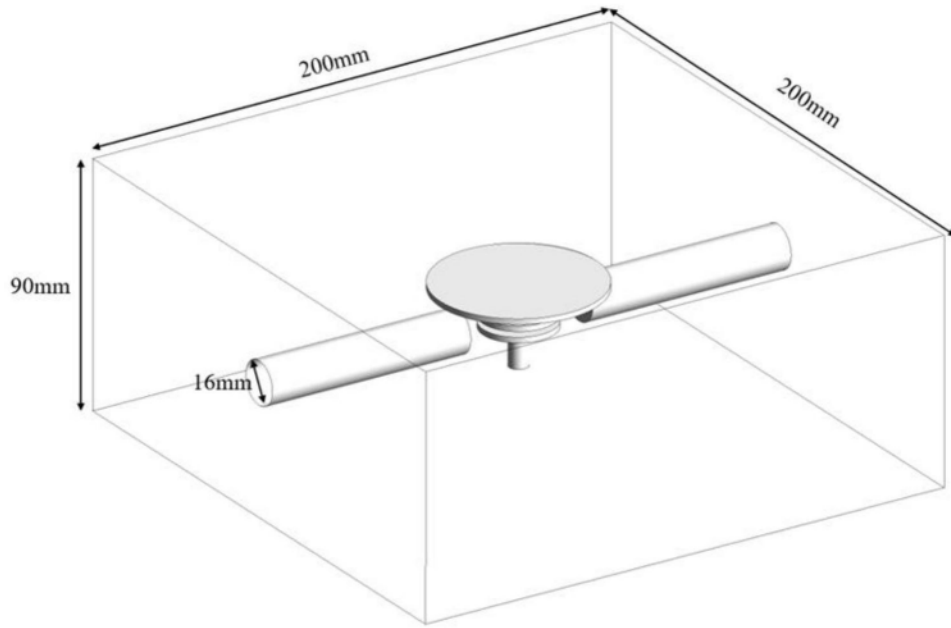


图3

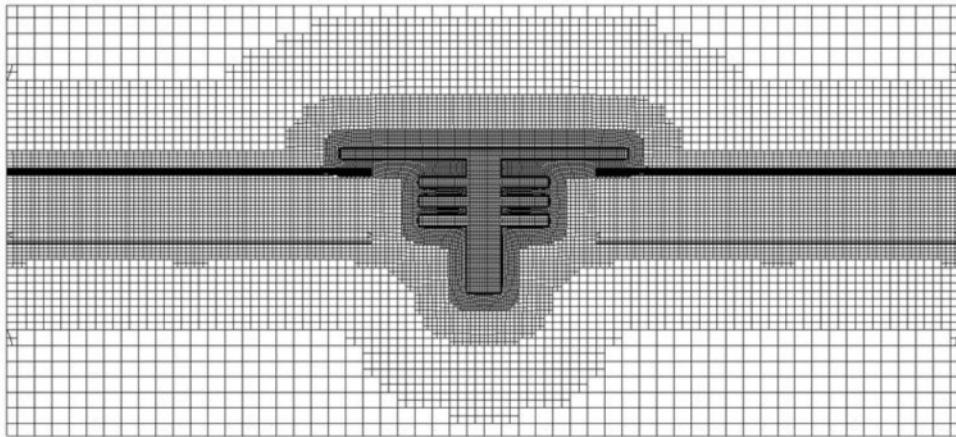


图4



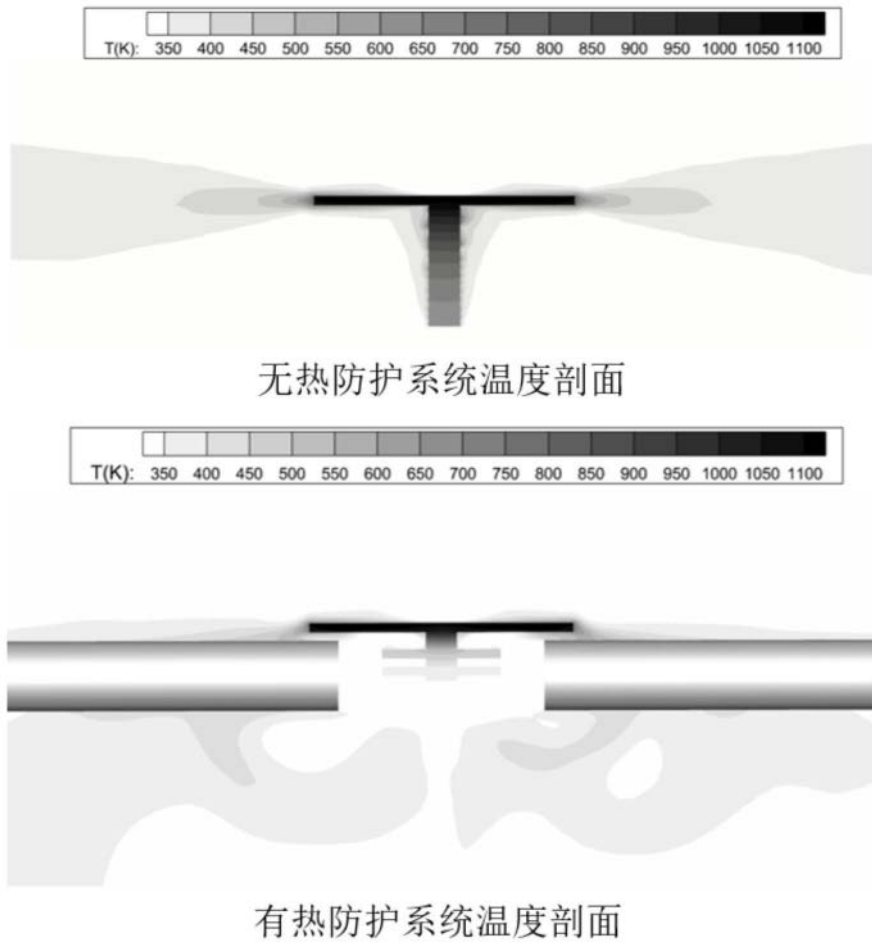


图5

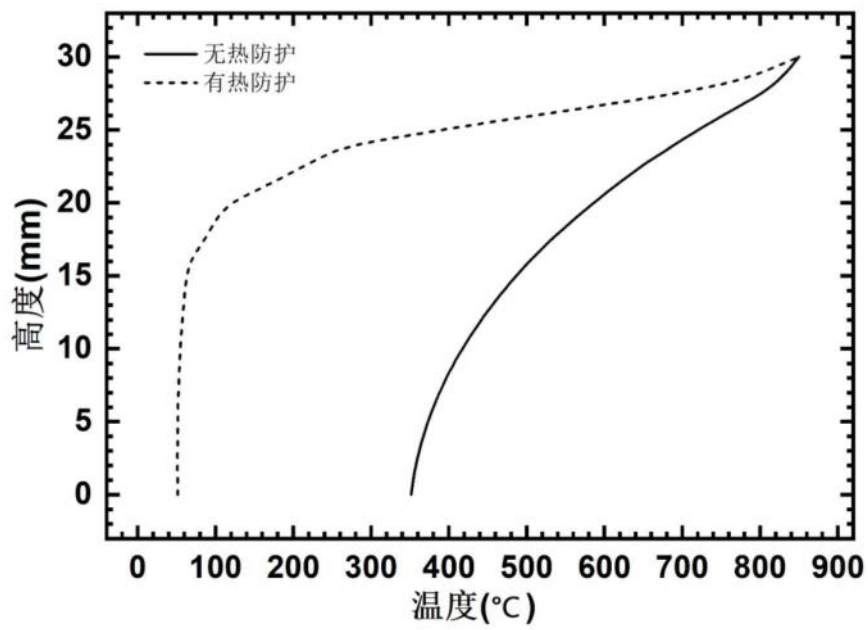


图6