



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114077271 B

(45) 授权公告日 2023. 03. 10

(21) 申请号 202111372371.9

(22) 申请日 2021.11.18

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 114077271 A

(43) 申请公布日 2022.02.22

(73) 专利权人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市咸宁西路28号

(72) 发明人 程泽东 冷亚坤 杨思远 何雅玲

蒋睿 张杰

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任

公司 61200

专利代理师 安彦彦

(51) Int. Cl.

G05D 27/02 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 103292485 A, 2013.09.11

CN 105424740 A, 2016.03.23

CN 105605956 A, 2016.05.25

CN 113357954 A, 2021.09.07

FR 2977661 A1, 2013.01.11

审查员 房元锋

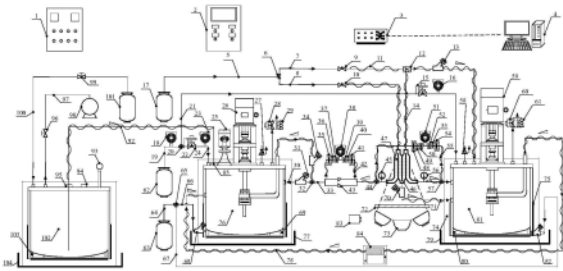
权利要求书3页 说明书21页 附图2页

(54) 发明名称

一种高温氯化盐光热与储能循环模拟实验平台及实验方法

(57) 摘要

一种高温氯化盐光热与储能循环模拟实验平台,包括高温氯化盐试验系统、储能系统、电加热系统、保温系统、太阳光模拟系统、注盐系统、排盐系统、储罐空气隔离系统和数据采集及控制系统。本发明的目的是验证工作温度为565~700℃时实验平台运行的可靠性,开展不同光照强度、运行工况下吸热器的光热力耦合机理以及氯化盐对不同金属腐蚀性能的研究。设计了储罐空气隔离系统,降低系统运行时氯化盐的腐蚀性;设计了储能系统,研究氯化盐在高温下的储能效果;设计了排盐系统,避免实验结束后氯化盐堵塞管道。本实验平台能够评估下一代太阳能热发电技术所面临的高温氯化盐腐蚀问题,筛选获得不同材质、不同结构的实验设备在下一代太阳能热发电技术中的适用性。



1. 一种高温氯化盐光热与储能循环模拟实验平台,其特征在于,包括高温氯化盐试验系统、储能系统、电加热系统和太阳光模拟系统;

所述高温氯化盐试验系统包括第一储盐罐(76)、第一熔盐泵(26)和氯化盐输入通道(33),所述第一储盐罐(76)上安装有第一熔盐泵(26),所述第一熔盐泵(26)的输入端伸入第一储盐罐(76)中,输出端与氯化盐输入通道(33)第一端连接,氯化盐输入通道(33)第二端与第二储盐罐(81)连接,氯化盐输入通道(33)上安装有吸热器(46);

所述储能系统包括第二储盐罐(81)第二熔盐泵59和氯化盐输回通道78,所述氯化盐输回通道(78)上安装有中间换热器(84),用于将来自第二储盐罐(81)的高温氯化盐与超临界二氧化碳进行热交换;所述第二储盐罐(81)上安装有第二熔盐泵(59),所述第二熔盐泵(59)的输入端伸入第二储盐罐(81)中,输出端与氯化盐输回通道(78)第一端连接,氯化盐输回通道(78)第二端与第一储盐罐(76)的入口端连接;

所述氯化盐输入通道(33)上安装有节流件(43)和第一差压传感器(38),第一差压传感器(38)通过第一差压检测通道(42)与节流件(43)的出入口两端相连,用于测量节流件(43)两端的差压;

所述电加热系统包括布置在第一储盐罐(76)、第二储盐罐(81)外的加热元件(75),以及设置于氯化盐输入通道(33)、氯化盐输回通道(78)外的伴热设备(11);

所述太阳光模拟系统包括太阳能模拟器(73)、能流计(86)、摄像机(89)和Lambertian靶(72),所述能流计(86)位于Lambertian靶(72)的中心位置,太阳能模拟器正对Lambertian靶(72),摄像机(89)置于太阳能模拟器一侧并朝向Lambertian靶(72);所述Lambertian靶(72)和太阳能模拟器(73)均设置在吸热器(46)正面,所述摄像机(89)用于拍摄Lambertian靶(72)上的光照强度分布照片;

所述第一差压检测通道(42)上依次设置有第一高温隔膜法兰(35)、第一降温翅片(36)、第一中低温隔膜法兰(37)、第一差压传感器(38)、第二中低温隔膜法兰(39)、第二降温翅片(40)和第二高温隔膜法兰(41);

所述第一储盐罐(76)上安装有雷达料位计(25),所述雷达料位计(25)用于测量固态/液态氯化盐的高度;所述雷达料位计(25)的雷达探头下方安装可透过微波的耐高温石英玻璃。

2. 根据权利要求1所述的一种高温氯化盐光热与储能循环模拟实验平台,其特征在于,所述第一储盐罐(76)与氯化盐回流通道(30)第一端连接,所述氯化盐回流通道(30)第二端与氯化盐输入通道(33)第一端连接,所述吸热器(46)上部设置有吸热器压力释放段(14),所述吸热器压力释放段(14)通过第一氩气吹扫通道一支路(7)和第一氩气吹扫通道二支路(8)与第一氩气吹扫通道(5)的出气口连接,第一氩气吹扫通道(5)的进气口与第一氩气瓶(17)连接;吸热器(46)下端通过氯化盐排出通道(71)与第二储盐罐(81)连接。

3. 根据权利要求2所述的一种高温氯化盐光热与储能循环模拟实验平台,其特征在于,所述第一储盐罐(76)和第二储盐罐(81)外周包覆有保温材料(74),所述氯化盐输入通道(33)、氯化盐输回通道(78)、氯化盐回流通道(30)、氯化盐排出通道(71)外设置有硅酸铝管。

4. 根据权利要求2所述的一种高温氯化盐光热与储能循环模拟实验平台,其特征在于,第一储盐罐(76)、第二储盐罐(81)、氯化盐输入通道(33)、氯化盐输回通道(78)、氯化盐回

流通道(30)和氯化盐排出通道(71)由Haynes230合金材料制成。

5. 根据权利要求1所述的一种高温氯化盐光热与储能循环模拟实验平台,其特征在于,还包括储罐空气隔离系统,所述储罐空气隔离系统包括第二氩气瓶(62)和第三氩气瓶(63);

所述第二氩气瓶(62)出口端与第二氩气吹扫通道(19)第一端连接,第二氩气吹扫通道(19)第二端通过第二三通接头(20)与第二氩气吹扫通道一支路(24)、第二氩气吹扫通道二支路(21)的首端相连;第二氩气吹扫通道一支路(24)的末端与第一储盐罐(76)的入口端相连;

所述第三氩气瓶(63)的出口端与第三氩气吹扫通道(64)第一端直接相连,第三氩气吹扫通道(64)第二端通过第三三通接头(65)与第三氩气吹扫通道一支路(66)、第三氩气吹扫通道二支路(67)相连。

6. 根据权利要求1所述的一种高温氯化盐光热与储能循环模拟实验平台,其特征在于,所述第一储盐罐(76)上开设有注盐口(85),所述注盐口(85)通过注盐通道(92)与注盐罐(102)连通,所述注盐罐(102)通过第四氩气吹扫通道(100)与第四氩气瓶(101)连通,所述注盐罐(102)与稳压通道(97)第一端连接,所述稳压通道(97)第二端与真空泵(98)的出口连接;所述注盐罐(102)顶部盖板上开设有进盐口(94)。

7. 基于权利要求1所述的实验平台的高温氯化盐光热与储能循环实验方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1、将能流计(86)放置于太阳能模拟器(73)的焦点位置,并为Lambertian靶(72)和能流计(86)降温;在Lambertian靶(72)上绘制测试点的位置坐标,开启并调试太阳能模拟器(73),使得在Lambertian靶(72)上形成的聚焦能流光斑,聚焦能流的中心位于能流计(86)处;拍摄Lambertian靶(72)光照强度分布的照片,并记录能流计(86)测得的能流值;

关闭太阳能模拟器(73),移动Lambertian靶(72),使能流计(86)依次位于各测试点空间坐标位置处,开启太阳能模拟器(73),拍摄Lambertian靶(72)光照强度分布的照片,并记录能流计(86)测得的能流值;

将各个测试点的能流值及灰度值带入两者之间的函数关系式,可求解得到函数关系式中的系数;

步骤2、移走Lambertian靶(72),将吸热器(46)置于太阳能模拟器(73)的焦点位置,将第一储盐罐(76)和第二储盐罐(81)内的空气排出,将三元氯化盐 $\text{MgCl}_2\text{-KCl-NaCl}$ 注入到第一储盐罐(76)中备用,保持第一储盐罐(76)和第二储盐罐(81)为充满氩气的状态,隔绝空气;

步骤3、采用逐级加热的方式将第一储盐罐(76)内的氯化盐加热到目标温度;同时将氯化盐循环管道加热至设定温度,所述设定温度大于三元氯化盐的熔点;待氯化盐及管道温度稳定后,启动太阳能模拟器(73),使吸热器(46)迎光面接受太阳能模拟器(73)的辐射;打开红外热像仪(83),监测吸热器(46)的表面温度分布;

当吸热器(46)的管道外壁面温度达到设定值时,开启第一熔盐泵(26)输送氯化盐,并实时监测氯化盐的流量值,根据流量值的大小调整第一熔盐泵(26)的电机频率,使氯化盐流量达到设定值;

步骤4、当整个实验平台处于热平衡状态时,开始每隔设定时间记录吸热器进、出口的

氯化盐温度、吸热器迎光面的光照强度信息、吸热器迎光面的温度分布、吸热器背光面的温度分布、氯化盐的体积流量、吸热器进口和出口的压差、第一储盐罐(76)内液位高度、第一储盐罐(76)内的氯化盐温度和第二储盐罐(81)内的氯化盐温度,记录时间为30~60分钟;

步骤5、断开第一熔盐泵(26)的电源,并开启伴热设备(11),使吸热器(46)中的氯化盐流回到第一储盐罐(76)和第二储盐罐(81)内;关闭太阳能模拟器(73)、伴热设备(11)、电阻丝加热元件(75);

步骤6、根据吸热器迎光面的光照强度信息,以及步骤1中获得的能流值与灰度值之间的函数关系式,计算太阳能模拟器(73)提供给吸热器(46)的入射辐射能;根据记录的吸热器进、出口氯化盐温度和氯化盐的体积流量,计算氯化盐在吸热器中流动时吸收的热量;结合入射辐射能,计算吸热器的热损失和热效率;根据第一储盐罐内的液位高度和氯化盐温度以及第二储盐罐内的氯化盐温度,计算实际塔式电站中超临界二氧化碳经中间换热器作用获得的热量;用吸热器迎光面温度分布、吸热器背光面温度分布进行吸热器的热应力分析。

8. 根据权利要求7所述的高温氯化盐光热与储能循环实验方法,其特征在于,所述步骤6中,计算吸热器热损失和热效率的方法,包括以下步骤:

S1、将吸热器迎光面各点的灰度值带入能流值与灰度值之间的函数关系式中,计算吸热器迎光面各点的能流值,获得整个吸热器迎光面的能流分布情况;

S2、计算入射辐射能 Q_t : $Q_t = \sum_{j=1}^N I_j \cdot A_j$, I_j 为单个测试点的能流值; A_j 为单个测试点所占的面积;

S3、基于步骤4获得的吸热器进口位置的温度 T_{in} 和出口位置的温度 T_{out} ,计算氯化盐在对应温度下的定压比热容 $c_{p,in}$ 和 $c_{p,out}$,根据取节流件和第一差压传感器的测量值,计算相应的氯化盐的质量流量 q_m ,然后计算氯化盐在流经吸热器时吸收的热量 Q_x ,计算公式为:

$$Q_x = q_m (c_{p,out} \cdot T_{out} - c_{p,in} \cdot T_{in});$$

S4、计算吸热器的热损失 Q_{loss} ,计算公式为: $Q_{loss} = Q_t - Q_x$;

S5、计算吸热器的热效率 η ,计算公式为: $\eta = Q_x / Q_t \times 100\%$ 。

一种高温氯化盐光热与储能循环模拟实验平台及实验方法

技术领域

[0001] 本发明属于太阳能热利用技术领域,具体涉及一种高温氯化盐光热与储能循环模拟实验平台及实验方法。

背景技术

[0002] 随着世界经济的快速发展,人们的生活水平和生活质量不断提高,对能源的需求也日益增大,传统化石能源的供应渐渐出现了危机。另一方面,传统化石能源的大量消耗,引起了严重环境污染问题,例如,在南极上空出现的臭氧层空洞以及全球变暖等,对人类的生存安全产生了不利影响。为了协调人类对美好生活的追求与传统能源供应不足以及环境污染之间的矛盾,加快推进二氧化碳排放量达到峰值,早日实现二氧化碳“零排放”,可再生能源的发展逐步走入了人类的视野。然而,可再生能源的发展现状并不能完全满足人类需求。为了实现人类社会的可持续发展,能源消耗的天平需要逐步向可再生能源偏移,可再生能源的发展正日益受到重视。

[0003] 可再生能源种类繁多,包括太阳能、风能、水能、潮汐能、生物质能、地热能等。其中,太阳能储量最为富足,以地球截获的太阳辐射能为例,每秒钟便有 $1.73 \times 10^{17} \text{W}$ 的能量,相当于燃烧 5.9×10^6 吨煤。太阳能在收集起来后,可用于供暖、供电等领域。随着太阳能利用技术的不断发展,太阳能在可再生能源体系中的优势也日益凸显。目前,在太阳能发电领域,主要有两种利用形式,即太阳能光伏发电和太阳能光热发电。两者的区别在于光伏发电可实现光能向电能的直接转换,而太阳能光热发电则是首先将太阳能转化为热能,再利用获得热量的高温工质推动透平做功发电。相对而言,光伏发电受天气变化影响大,并网较为困难,而光热发电由于含有储能系统,发电功率受天气变化的影响较小,可用于电网的调峰调谷,适用于集中式能源供应,具有很好的发展前景。

[0004] 太阳能光热发电技术经不断发展,目前主要可以分为线聚焦式和点聚焦式两种类型。其中,线聚焦式太阳能光热电站的聚焦能流密度较小,介质工作温度一般低于 500°C ,发电效率相对较低。点聚焦式太阳能光热电站主要可以分为塔式太阳能电站、碟式太阳能电站等类型。其中,塔式太阳能电站由于可以实现与储能系统的结合,可实现电能的稳定输出而更受青睐。储能系统作为塔式太阳能热发电技术的重要组成部分,实现了光热转化和热电转化的分离,发电过程不再受到太阳能间歇性和不稳定型的影响,使得塔式太阳能电站能够实现连续、稳定的发电,并可根据用户需求调节发电功率,具有发电成本低、调峰能力强的特点。

[0005] 为实现更低的电力成本和更高的热功转化效率,可以提高热工转化系统蒸发段温度,但是这对热功转化工作介质在高温下的稳定性提出了更高的要求。超临界二氧化碳布雷顿循环发电技术具有循环工质化学性质稳定、系统结构紧凑、高温下循环效率高等优点,可满足上述要求。为实现太阳能热发电技术与超临界二氧化碳布雷顿循环发电技术的结合,推进下一代太阳能热发电技术的发展,吸热器内的工质温度需要达到 $520 \sim 720^\circ\text{C}$ 甚至更高。塔式太阳能热发电系统,具有聚光比高、聚焦能流大等特点,可以与超临界二氧化碳

布雷顿循环发电技术实现良好的匹配。目前,市场上已经建成并投入商业运行的塔式熔盐电站一般采用太阳盐($60\%\text{NaNO}_3-40\%\text{KNO}_3$)作为工作介质,其熔点为 220°C ,工作温度一般为 $290\sim 565^\circ\text{C}$,当工作温度超过 600°C 时熔盐会发生分解,不适用于下一代太阳能热发电技术中对工作温度的要求,若与超临界二氧化碳布雷顿循环发电技术结合,并不能发挥超临界二氧化碳布雷顿循环发电技术的优势,发电效率低。熔融氯化盐(如 $\text{MgCl}_2-\text{KCl}-\text{NaCl}$)因具有出色的热物性、较高的热稳定性,且价格低廉等优势,在下一代太阳能热发电技术中的应用相当具有前景。然而,熔融氯化盐在高温下对合金等金属材料具有较强的腐蚀性,这对吸热器、泵、储盐罐等关键设备的材质的耐高温耐腐蚀性能以及氯盐腐蚀控制策略等提出了更高的要求,也对系统的安全运行提出了挑战。此外,更高的工作温度需要更大的能流密度,由此产生的热应力更大,可能会引起吸热器涂层烧毁、吸热管断裂等,对吸热器材质的选择和形式结构的设计提出了更加严峻的挑战。

[0006] 目前实验室级别的塔式太阳能光热转化系统多以工作温度低于 565°C 的硝酸盐为工作介质,加热方式多为电加热模拟,且较少考虑储能系统,对于下一代太阳能热发电技术,缺少与超临界二氧化碳耦合换热的储能系统以及使用氯化盐所带来的高温、腐蚀性问题、耐高温、耐腐蚀材料的选择、注盐系统设计、设备仪表设计和控制策略的研究,电加热方式不能很好的模拟太阳能聚焦非均匀能流的加热效果。为推进下一代太阳能热发电技术的发展,亟需开展基于氯化盐的塔式太阳能循环模拟及储能系统实验研究,探究工作温度高达 $565\sim 700^\circ\text{C}$ 时系统运行的可靠性,以及不同光照强度、不同运行工况下实验系统的光热力耦合机理,并在系统运行过程中检测分析高温氯化盐对不同金属腐蚀性能的影响。

发明内容

[0007] 本发明提供了一种高温氯化盐光热与储能循环模拟实验平台及实验方法,以在室内开展非均匀能流密度下,出口温度为 $565\sim 700^\circ\text{C}$ 时高温氯化盐吸热器的光热力耦合机理以及氯化盐对不同金属腐蚀性能的研究,研究熔盐种类、吸热器材质、吸热器涂层、吸热器结构、吸热管强化结构等对系统光热力耦合机理、储能系统性能的影响以及极端非均匀能流条件下吸热器的热应力失效机理,分析非定常非均匀能流对吸热器外壁面温度分布的影响,探究吸热器出口温度的动态性能预测方法,并结合吸热器运行可靠性的验证。

[0008] 一种高温氯化盐光热与储能循环模拟实验平台,包括高温氯化盐试验系统、储能系统、电加热系统和太阳光模拟系统;

[0009] 所述高温氯化盐试验系统包括第一储盐罐所述第一储盐罐上安装有第一熔盐泵,所述第一熔盐泵的输入端伸入第一储盐罐中,输出端与氯化盐输入通道第一端连接,氯化盐输入通道第二端与第二储盐罐连接,氯化盐输入通道上安装有吸热器;

[0010] 所述储能系统包括第二储盐罐,所述氯化盐输回通道上安装有中间换热器,用于将来自第二储盐罐的高温氯化盐与超临界二氧化碳进行热交换;所述第二储盐罐上安装有第二熔盐泵,所述第二熔盐泵的输入端伸入第二储盐罐中,输出端与氯化盐输回通道第一端连接,氯化盐输回通道第二端与第一储盐罐的入口端连接;

[0011] 所述氯化盐输入通道上安装有节流件和第一差压传感器,第一差压传感器通过第一差压检测通道与节流件的出入口两端相连,用于测量节流件两端的差压;

[0012] 所述电加热系统包括布置在第一储盐罐、第二储盐罐外的加热元件,以及设置于

氯化盐输入通道、氯化盐输回通道外的伴热设备；

[0013] 所述太阳光模拟系统包括太阳能模拟器、能流计、摄像机和Lambertian靶,所述能流计位于Lambertian靶的中心位置,太阳能模拟器正对Lambertian靶,摄像机置于太阳能模拟器一侧并朝向Lambertian靶;所述Lambertian靶和太阳能模拟器均设置在吸热器正面,所述摄像机用于拍摄Lambertian靶上的光照强度分布照片。

[0014] 基于上述的实验平台的高温氯化盐光热与储能循环实验方法,包括以下步骤:

[0015] 步骤1、将能流计放置于太阳能模拟器的焦点位置,并为Lambertian靶和能流计降温;在Lambertian靶上绘制测试点的位置坐标,开启并调试太阳能模拟器,使得在Lambertian靶上形成的聚焦能流光斑,聚焦能流的中心位于能流计处;拍摄Lambertian靶光照强度分布的照片,并记录能流计测得的能流值;

[0016] 关闭太阳能模拟器,移动Lambertian靶,使能流计依次位于各测试点空间坐标位置处,开启太阳能模拟器,拍摄Lambertian靶光照强度分布的照片,并记录能流计测得的能流值;

[0017] 将各个测试点的能流值及灰度值带入两者之间的函数关系式,求解得到函数关系式中的系数;

[0018] 步骤2、移走Lambertian靶,将吸热器置于太阳能模拟器的焦点位置,将第一储盐罐和第二储盐罐内的空气排出,将三元氯化盐 $\text{MgCl}_2\text{-KCl-NaCl}$ 注入到第一储盐罐中备用,保持第一储盐罐和第二储盐罐为充满氩气的状态,隔绝空气;

[0019] 步骤3、采用逐级加热的方式将第一储盐罐内的氯化盐加热到目标温度;同时将氯化盐循环管道加热至设定温度,所述设定温度大于三元氯化盐的熔点;待氯化盐及管道温度稳定后,启动太阳能模拟器,使吸热器迎光面接受太阳能模拟器的辐射;打开红外热像仪,监测吸热器的表面温度分布;

[0020] 当吸热器的管道外壁面温度达到设定值时,开启第一熔盐泵输送氯化盐,并实时监测氯化盐的流量值,根据流量值的大小调整第一熔盐泵的电机频率,使氯化盐流量达到设定值;

[0021] 步骤4、当整个实验平台处于热平衡状态时,开始每隔设定时间记录吸热器进、出口的氯化盐温度、吸热器迎光面的光照强度信息、吸热器迎光面的温度分布、吸热器背光面的温度分布、氯化盐的体积流量、吸热器进口和出口的压差、第一储盐罐内液位高度、第一储盐罐内的氯化盐温度和第二储盐罐内的氯化盐温度,记录时间为30~60分钟;

[0022] 步骤5、断开第一熔盐泵的电,并开启伴热设备,使吸热器中的氯化盐流回到第一储盐罐和第二储盐罐内;关闭太阳能模拟器、伴热设备、电阻丝加热元件;

[0023] 步骤6、根据吸热器迎光面的光照强度信息,以及步骤1中获得的能流值与灰度值之间的函数关系式,计算太阳能模拟器提供给吸热器的入射辐射能;根据记录的吸热器进、出口氯化盐温度和氯化盐的体积流量,计算氯化盐在吸热器中流动时吸收的热量;结合入射辐射能,计算吸热器的热损失和热效率;根据第一储盐罐内的液位高度和氯化盐温度以及第二储盐罐内的氯化盐温度,计算实际塔式电站中超临界二氧化碳经中间换热器作用获得的热量;用吸热器迎光面温度分布、吸热器背光面温度分布进行吸热器的热应力分析。

[0024] 与现有技术相比,本发明至少具有以下有益的技术效果:

[0025] 1、本发明所述的实验平台能够在实验室内开展太阳能模拟器作用下非均匀能流

高温氯化盐吸热器光热耦合实验,相比现有的采用电加热模拟非均匀能流条件的实验平台更贴合实际情况。在完成实验的基础上,能够进一步在多种温度条件下结合其他熔盐种类开展模拟塔式太阳能聚光集热系统的实验,以及不同吸热器结构下塔式太阳能聚光集热系统光热耦合性能实验,还能用于开展高温氯化盐环境下对不同材质金属的腐蚀性能测试的实验。本实验平台应用范围广泛,适应性好。

[0026] 2、本发明提供的一种高温氯化盐光热与储能循环模拟实验平台,采用第二储盐罐作为高温储能罐,实现了对高温氯化盐热能的有效存储。与传统的硝酸盐相比,氯化盐的工作温度更高、储能密度更大、热稳定性更好,储热性能更加优异。针对氯化盐腐蚀性较强的问题,储能系统中的第二储盐罐材质选择Haynes 230,并在第二储盐罐上设计储罐空气隔离系统,降低氯化盐的腐蚀性。在实验过程中,采用第二储盐罐作为高温储能罐,将经辐照作用后的高温氯化盐存储起来,在下次实验前通过第二熔盐泵将第二储盐罐内的高温氯化盐输送到第一储盐罐内,降低了加热氯化盐所需的电能消耗;

[0027] 3、本发明提供的一种高温氯化盐光热与储能循环模拟实验平台中,循环工质选用三元氯化盐 $\text{MgCl}_2\text{-KCl-NaCl}$ (mole:68.2-17.8-14%)。相对目前已建成的塔式太阳能电站中使用的二元硝酸盐 $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$,氯化盐具有更高的融化和分解温度,价格更低,但是腐蚀性更强。基于此,选用热稳定性和抗腐蚀性能优异的Haynes 230作为第一储盐罐、第二储盐罐及氯化盐输入通道、氯化盐输回通道、氯化盐排出通道、第一差压检测通道、第二差压检测通道等的材质。

[0028] 目前已建成的塔式太阳能电站通常采用浸入式电加热器对二元硝酸盐 $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$ (mole:60-40%)进行加热,然而使用浸入式电加热器加热氯化盐则会受到高温和强腐蚀的双重挑战,若采用常规的310s、800合金等材质的浸入式电加热器很难长时间运行,若电加热器采用Haynes 230等镍基合金则价格较为昂贵,本实验平台采用电阻炉,利用电阻炉的电阻丝加热元件将第一储盐罐、第二储盐罐内的氯化盐预热到设定温度,避免了电加热器与氯化盐的直接接触,同时采用伴热设备对管道进行预热,防止氯化盐在流经管道时遇冷凝固,堵塞管道。

[0029] 4、本发明提供的一种高温氯化盐光热与储能循环模拟实验平台中,设计了注盐罐用于将经过净化处理的氯化盐向第一储盐罐输送。在运输时,注盐罐内的氯化盐处于0.01MPa左右的氩气密封环境中,防止外界空气渗入注盐罐;在由注盐罐向第一储盐罐注盐时,通过增大注盐罐内的氩气压力实现氯化盐的传输过程。避免了运输和注盐时空气对氯化盐的污染。

[0030] 5、本发明在吸热器底部设计了氯化盐排出通道,避免了实验结束后进行排盐时,氯化盐积聚在吸热器底部。实验平台所有管道均设有 $3\sim 5^\circ$ 的倾角,并通过氩气辅助排盐,有效地降低了氯化盐在管道上残留的可能性。实验平台的第一储盐罐包裹有保温材料,维持实验过程中氯化盐温度的稳定,且在实验结束后作为储热罐,降低氯化盐热量的散失,以使得下次实验时提供更少的热量将氯化盐加热到设定温度,降低耗电水平。

[0031] 6、本发明采用太阳光模拟系统作为吸热器的辐射能量源,实现了对具有聚光非均匀特性的真实太阳光的模拟。此外,真实太阳光照受气象条件等的影响较大,采用太阳光模拟系统消除了室外天气变化和环境因素等对实验平台的不利影响,实现了在实验室内开展不同光照强度、运行工况、熔盐种类、吸热器材质、吸热器涂层、吸热器结构和吸热管强化结

构等对吸热器光热力耦合机理、储能系统性能的影响以及不同运行工况下氯化盐的腐蚀性能、极端非均匀热流条件下吸热器的热应力失效机理的研究,分析非定常非均匀能流对吸热器外壁面温度分布的影响,探究吸热器出口温度的动态性能预测方法。

[0032] 7、本发明采用数据采集及控制系统实现整个实验系统的数据采集和对电阻丝加热元件、第一熔盐泵、第一Y型电动截止阀等的远程控制,并通过实验用配电柜为太阳能模拟器、第一熔盐泵、第二熔盐泵、电阻丝加热元件、6个Y型电动截止阀、2个差压传感器、2个压力传感器、节流件、雷达料位计等提供电能。所述数据采集及控制系统中的实验用计算机通过LabVIEW软件自编程,将数据采集柜传递的第一N型热电偶采集到的吸热器入口温度、电阻丝加热元件功率、6个Y型电动截止阀的开闭等信息可视化,实验人员在实验用计算机上通过PLC发出操作命令后实现对整个系统的远程控制,比如控制6个Y型电动截止阀的开闭等。所述数据采集及控制系统中的实验用控制柜设有电源启停模块、太阳能模拟器功率调节模块、加热系统功率调节模块、熔盐泵变频调节模块等,可实现对太阳能模拟器、第一熔盐泵、第二熔盐泵、电阻丝加热元件、伴热设备等的开关控制以及对氯化盐流量、温度等的调节。实验用控制柜可实现对各个设备的手动控制,降低了远程控制系统突然失效等紧急情况发生所带来的风险,保证了实验系统的安全运行。

[0033] 进一步的,高温氯化盐试验系统中的第一储盐罐顶部盖板的中心到罐体内壁面位置设置一定数量的热电偶,以确保在各加热阶段结束时储罐内氯化盐温度分布均匀且稳定,并将温度信号反馈至数据采集及控制系统,实现对电阻丝加热元件功率和第一熔盐泵开关的控制。热电偶探头由第一储盐罐的顶部盖板插入到距离底部封头50~100mm处,防止在实验过程中氯化盐液面降低导致热电偶探头裸露在液面外侧;通过设置第一熔盐泵电机变频器的频率对泵送流量大小加以调节;第一储盐罐顶部设置有雷达料位计,用于监测第一储盐罐内的料位值。

[0034] 进一步的,储能系统中的第二储盐罐顶部盖板的中心到罐体内壁面位置设置一定数量的热电偶,以实时监测第二储盐罐内的氯化盐温度分布情况,并将温度信号反馈至数据采集及控制系统,实现对电阻丝加热元件和第二熔盐泵的控制。其中,第二熔盐泵的泵送流量大小通过设置电机变频器频率加以调节。热电偶探头由第二储盐罐的顶部盖板插入到距离底部封头50~100mm处。

[0035] 此外,根据第一储盐罐内液位值和管道内的熔盐量,计算第二储盐罐的液位值。雷达料位计可防止实验过程中第一储盐罐、第二储盐罐内氯化盐液位过低,引起第一熔盐泵、第二熔盐泵空转而发生损坏;第一储盐罐和吸热器入口之间的氯化盐输入通道上安装有节流件,节流件和与之相连的第一差压传感器共同组成差压式流量计,差压式流量计测得的流量值作为反馈信号调节第一熔盐泵的频率,也作为反馈信号控制第一熔盐泵、第二Y型电动截止阀、第三Y型电动截止阀、第五Y型电动截止阀、伴热设备的通断。当差压式流量计测得的流量值异常减小时,则节流件很可能发生了堵塞,此时启动排盐系统,即关闭第一熔盐泵、第三Y型电动截止阀,打开伴热设备、第二Y型电动截止阀、第三Y型电动截止阀、第五Y型电动截止阀、第一两通球阀、第二两通球阀,并调节第一三通球阀,使其指向第一两通球阀,开启第一氩气瓶进行排盐;第二差压检测通道设置有第三高温隔膜法兰、第三降温翅片、第三中低温隔膜法兰、第二差压传感器、第四中低温隔膜法兰、第四降温翅片、第四高温隔膜法兰,并通过第四三通接头和第五三通接头与吸热器进出口相连,用于测量吸热器进出口

差压值,根据差压值判断吸热器是否发生堵塞或泄漏,并作为反馈信号控制第二Y型电动截止阀、第三Y型电动截止阀、第五Y型电动截止阀以及伴热设备的通断。若第二差压段测量的差压值异常增大或减小,判断吸热器可能发生堵塞或泄漏,启动排盐系统;吸热器入口和出口位置分别设置有第一N型热电偶和第二N型热电偶,测量的吸热器进出口温度用于计算吸热器热效率;吸热器迎光面受到太阳能模拟器的直接辐射作用,温度较高,通过红外热像仪测得温度分布;吸热器背光面设置有若干N型热电偶,用于测量并获得吸热器背光面的温度分布。根据吸热器表面的温度分布情况,计算分析吸热器表面的热应力。

[0036] 进一步的,电加热系统中的电阻丝加热元件用于将氯化盐预热到设定温度,电阻丝加热元件上设置有一定数量的N型热电偶,防止在工作过程中电阻丝加热元件超温。为保证良好的加热效果,采用“变功调节,逐级加热”的方式。比如氯化盐升温100℃作为一个阶段,在某一阶段加热时,电阻丝加热元件根据电阻丝加热元件温度和氯化盐的温度自动调节功率,当氯化盐温度达到稳定后,进入下一个阶段的温度调节,一直到氯化盐温度达到设定温度为止,此时维持第一储盐罐内氯化盐温度稳定。当氯化盐凝固时,由于固态氯化盐的导热性能相对较差,加热功率不可过大,以免电阻丝加热元件超温。所述电加热系统中的伴热设备采用变功调节,将管道加热到设定温度后,管道上布置的若干热电偶将温度信号反馈给实验用计算机,实验用计算机发出命令自动调整伴热带功率,维持管道温度的稳定。

[0037] 进一步的,通过控制系统对给水泵、太阳能模拟器的开关控制以及给水泵频率、太阳能模拟器功率的调节,并采集电磁流量计的流量值。打开给水泵,使得冷却水在水循环管道中流动,实现对Lambertian靶的冷却降温作用;太阳能模拟器开启后,通过控制系统调节太阳能模拟器功率,获得不同的光照强度分布。

[0038] 进一步的,当实验结束或熔盐发生泄漏时,排盐系统启动。通过控制系统关闭第一熔盐泵、第三Y型电动截止阀,氯化盐失去熔盐泵提供的动力作用,流速逐渐减缓;打开伴热设备,防止熔盐在管道内凝固;打开第二Y型电动截止阀、第三Y型电动截止阀、第五Y型电动截止阀,利用设置的3~5°的管道倾角,使得吸热器及管道内的熔盐流入第一储盐罐和第二储盐罐中。为避免氯化盐流通不畅,开启第一两通球阀、第二两通球阀,并调节第一三通球阀,使其指向第一两通球阀,开启第一氩气瓶,利用氩气吹扫管道辅助排盐。

[0039] 进一步的,所述储罐空气隔离系统的工作过程为:开启第三氩气瓶、第一电动球阀、第二电动球阀,排出第一储盐罐和第二储盐罐内的空气,关闭第三氩气瓶、第一电动球阀、第二电动球阀;开启第二氩气瓶,第一压力传感器用于测量第二自力式氩气进入阀和第一自力式氩气进入阀的阀前压力,第二压力传感器测量第一储盐罐内的压力,第三压力传感器测量第二储盐罐内的压力。当第二压力传感器的示数低于设定值时,说明第一储盐罐内压力较低,此时第二自力式氩气进入阀开启,氩气进入第一储盐罐;当第二压力传感器的示数高于设定值时,第一自力式氩气排出阀开启,多余的氩气排出到第一储盐罐外;当第三压力传感器的示数低于设定值时,说明第二储盐罐内压力较低,此时第一自力式氩气进入阀开启,氩气进入第二储盐罐;当第三压力传感器的示数高于设定值时,第二自力式氩气排出阀开启,多余的氩气排出到第二储盐罐外。

[0040] 进一步的,所述数据采集及控制系统分为数据模块和控制模块两个部分,数据采集模块采用数据采集柜采集雷达料位计、差压式流量计、第二差压传感器、压力变送器、第一N型热电偶、第二N型热电偶、吸热器上的若干N型热电偶丝等的模拟量信号,同时采集6个

Y型电动截止阀、2个熔盐泵、电阻丝加热元件、伴热设备等的数字量信号,模拟量信号和数字量信号的区别在于,模拟量信号在时间和数值上都是连续的信号,数字量信号在时间和数值上是离散的信号。控制模块以PLC控制单元为基础,PLC控制单元接收数据通过采集模块输入的数字量及模拟量信号,并通过RS485通讯实现与实验用控制柜之间的信息传递,实验人员在实验用计算机上发出指令,通过PLC控制单元实现对整个系统的控制。

[0041] 本发明所述的试验方法,通过太阳光模拟系统将聚焦非均匀能流施加到吸热器上,与大多数实验台采用的电加热模拟系统相比,更贴合实际的聚光太阳辐射;采用储罐空气隔离系统降低了氯化盐的腐蚀性,有利于实验设备的长期安全运行;排盐系统降低了排盐时氯化盐堵塞通道的可能性;数据采集及控制系统实现了实验人员与实验设备的分离,保障了实验人员的安全。

附图说明

[0042] 图1为本发明的主体结构示意图。

[0043] 图2为本发明的太阳光源模拟系统示意图。

[0044] 图3为本发明的储罐空气隔离系统示意图。

[0045] 图4为实验平台中吸热器结构和背光面N型热电偶丝布置示意图。

[0046] 图中:1—实验用配电柜;2—实验用控制柜;3—数据采集柜;4—实验用计算机;5—第一氩气吹扫通道;6—第一三通接头;7—第一氩气吹扫通道一支路;8—第一氩气吹扫通道二支路;9—第一两通球阀;10—第二两通球阀;11—伴热设备;12—第一三通球阀;13—第一Y型电动截止阀;14—压力释放通道/第一氩气吹扫通道二支路共用段;15—第二自力式氩气进入阀;16—第二压力传感器;17—第一氩气瓶;18—第一压力传感器;19—第二氩气吹扫通道;20—第二三通接头;21—第二氩气吹扫通道二支路;22—第一自力式氩气进入阀;23—第三压力传感器;24—第二氩气吹扫通道一支路;25—雷达料位计;26—第一熔盐泵;27—第一安全阀;28—第一自力式氩气排出阀;29—第一电动球阀;30—氯化盐回流通道;31—第二Y型电动截止阀;32—第三三通接头;33—氯化盐输入通道;34—第三Y型电动截止阀;35—第一高温隔膜法兰;36—第一降温翅片;37—第一中低温隔膜法兰;38—第一差压传感器;39—第二中低温隔膜法兰;40—第二降温翅片;41—第二高温隔膜法兰;42—第一差压检测通道;43—节流件;44—第四三通接头;45—第一N型热电偶;46—吸热器;47—N型热电偶丝;48—第三高温隔膜法兰;49—第三降温翅片;50—第三中低温隔膜法兰;51—第二差压传感器;52—第四中低温隔膜法兰;53—第四降温翅片;54—第四高温隔膜法兰;55—第二差压检测通道;56—第二N型热电偶;57—第五三通接头;58—第二安全阀;59—第二熔盐泵;60—第二自力式氩气排出阀;61—第二电动球阀;62—第二氩气瓶;63—第三氩气瓶;64—第三氩气吹扫通道;65—第六三通接头;66—第三氩气吹扫通道一支路;67—第三氩气吹扫通道二支路;68—第四Y型电动截止阀;69—第一熔盐罐支撑架;70—第五Y型电动截止阀;71—氯化盐排出通道;72—Lambertian靶;73—太阳能模拟器;74—保温材料;75—电阻丝加热元件;76—第一储盐罐;77—第一熔盐槽;78—氯化盐输回通道;79—第二熔盐槽;80—第二熔盐罐支撑架;81—第二储盐罐;82—第六Y型电动截止阀;83—红外热像仪;84—中间换热器;85—注盐口;86—能流计;87—给水泵;88—冷却水箱;89—电磁流量计;90—摄像机;91—水循环管道;92—注盐通道;93—压力变送器;94—进盐口;

95—出盐口;96—第一闸阀;97—稳压通道;98—真空泵;99—第二闸阀;100—第四氩气吹扫通道;101—第四氩气瓶;102—注盐罐;103—注盐罐支撑架;104—第三熔盐槽。

具体实施方式

[0047] 为了使本发明的目的和技术方案更加清晰和便于理解。以下结合附图和实施例,对本发明进行进一步的详细说明,此处所描述的具体实施例仅用于解释本发明,并非用于限定本发明。

[0048] 本发明提供一种高温氯化盐光热与储能循环模拟实验平台,这里的高温氯化盐指的是565~700℃的三元氯化盐 $\text{MgCl}_2\text{-KCl-NaCl}$ (mole:68.2-17.8-14%),其熔点是380℃,考虑到本实验平台的目的是研究出口温度在565~700℃的高温熔盐吸热器运行可靠性,揭示非均匀能流密度下的光热耦合换热机理和热力耦合及失效机理,需要解决如下主要难点:

[0049] 1、如何应对氯化盐较强的腐蚀性对实验系统的影响。实验系统所采用的三元氯化盐 $\text{MgCl}_2\text{-KCl-NaCl}$ (mole:68.2-17.8-14%) 在高温下稳定性好、比热容大、黏度小,满足高温传热蓄热的要求。然而,三元氯化盐 $\text{MgCl}_2\text{-KCl-NaCl}$ (mole:68.2-17.8-14%) 具有较强的腐蚀性,而且随着温度的升高,腐蚀性逐渐增强。在三元氯化盐 $\text{MgCl}_2\text{-KCl-NaCl}$ (mole:68.2-17.8-14%) 的腐蚀过程中,氧化剂通常是空气中的 O_2 、 H_2O 等。以 O_2 为例,在大气环境下,三元氯化盐 $\text{MgCl}_2\text{-KCl-NaCl}$ (mole:68.2-17.8-14%) 中的 Cl^{-1} 会被氧化为 Cl_2 , Cl_2 与Fe等金属基体反应生成 FeCl_2 等金属氯化物, FeCl_2 等金属氯化物与 O_2 反应生成 Fe_2O_3 等金属氧化物。为应对氯化盐的强腐蚀性,一方面对于和氯化盐直接接触的部件,如第一储盐罐、第二储盐罐、氯化盐输入通道、氯化盐输回通道、氯化盐排出通道等,选择Haynes 230合金,该合金中Ni、Cr含量较高,因而具有优异的耐腐蚀性能。另一方面,采用储罐空气隔离系统来隔绝空气,降低第一储盐罐、第二储盐罐和管道中 O_2 、 H_2O 等的含量,从而降低氯化盐的腐蚀性。所述储罐空气隔离系统,需要在注入氯化盐之前打开第三氩气瓶,通过第四Y型电动截止阀、第六Y型电动截止阀向第一储盐罐、第二储盐罐内注入氩气,并通过第一电动球阀、第二电动球阀将第一储盐罐、第二储盐罐内的空气排出到外界环境中,罐体内留存的氩气保证了第一储盐罐和第二储盐罐内的氩气保护环境;在实验过程中,通过第二自力式氩气进入阀、第一自力式氩气排出阀、第一自力式氩气进入阀、第二自力式氩气排出阀进行氩气的补充及排放,维持第一储盐罐和第二储盐罐内压力的稳定。通过上述两个措施,能够最大程度的降低三元氯化盐 $\text{MgCl}_2\text{-KCl-NaCl}$ (mole:68.2-17.8-14%) 的腐蚀性对实验平台的不利影响,确保实验的安全进行。

[0050] 2、本实验平台的氯化盐温度最高达到了700℃,而多数测量仪表的耐温范围低于500℃,如何处理这一矛盾以保证测量仪表的正常使用。对于安装在第一氯化盐罐体顶部盖板上的雷达料位计,其最高仅能耐受200℃,而第一储盐罐内的氯化盐温度可能高达700℃,因此在雷达料位计中安装隔温装置。具体的,在雷达料位计的雷达探头下方安装可透过微波的耐高温石英玻璃;对于安装在节流件和吸热器两端的第一差压传感器和第二差压传感器,其最高耐受温度仅为150℃,远远低于氯化盐的工作温度。差压传感器与氯化盐之间是通过导热油传递压差,再将测得的压差信号转化为电信号输出。若是可以降低与差压传感器相接触的导热油温度,便可提高压差传感器的使用范围。为降低导热油温度,采取了两个

措施。首先,在第一差压检测通道上,设置第一高温隔膜法兰,第一中低温隔膜法兰,第二高温隔膜法兰,第二中低温隔膜法兰。其中,第一高温隔膜法兰、第二高温隔膜法兰与氯化盐接触。隔膜法兰两侧的流体压力正常传导,但存在较大的热量损失。为进一步降低导热油温度,在第一高温隔膜法兰与第一中低温隔膜法兰之间设置有第一降温翅片,在第二高温隔膜法兰与第二中低温隔膜法兰之间设置有第二降温翅片,从而增加导热油的热损失,降低与传感器相连的导热油温度。第二差压检测通道上的处理方法与第一差压检测通道相同。

[0051] 3、如何将经过净化处理的氯化盐输送到第一储盐罐内,并在输送过程中防止空气污染氯化盐。这里的输送过程包含两个环节,第一个环节是将经过净化处理的氯化盐输送到实验平台附近。该环节采用注盐罐实现。注盐罐内注入氯化盐之前,通过真空泵和第四氩气瓶配合使用排出注盐罐内的空气,保证注盐罐内的氩气环境,之后向注盐罐内注入氯化盐;在输送过程中,注盐罐内的氯化盐处于0.01MPa左右的氩气密闭环境中;第二个环节是将氯化盐由注盐罐输送到第一储盐罐内。该环节通过连接注盐罐和第一储盐罐的注盐通道实现。在注盐通道连接完成后,通过第四氩气瓶向注盐罐内注入0.03~0.05MPa的氩气,氩气的压力作用下实现氯化盐的输送。

[0052] 4、如何防止氯化盐在管道内流动过程中凝固,堵塞管道。这里的氯化盐指的是三元氯化盐 $\text{MgCl}_2\text{-KCl-NaCl}$ (mole:68.2-17.8-14%),其熔点为380℃,远高于环境温度,在流动过程中存在凝固的可能性。若氯化盐凝固,则整个系统需要停止运行,并对该位置处的氯化盐进行化盐处理,对实验进展造成不好的影响。为降低氯化盐凝固的可能性,本实验平台采取三个方面的措施。一是在氯化盐通过的管道外壁面铺设保温材料,如氯化盐输入通道、氯化盐输回通道、氯化盐回流通道的氯化盐排出通道、第一差压检测通道、第二差压检测通道等,并保证保温材料外壁面的温度在50℃以下;二是在上述氯化盐通过的通道外壁面铺设伴热设备,保温材料在伴热设备的外侧铺设。在氯化盐通入管道之前,通过伴热设备将管道外壁面温度加热到三元氯化盐 $\text{MgCl}_2\text{-KCl-NaCl}$ (mole:68.2-17.8-14%) 熔点温度以上50℃,并维持温度稳定。待氯化盐通入管道时,再关闭伴热设备,避免对实验结果造成影响;三是对于上述氯化盐通过的管道,设置3~5°的倾角,同时通过第一氩气吹扫支路、第一氩气吹扫通道一支路、第一氩气吹扫通道二支路等向吸热器内通入氩气,在重力和氩气辅助吹扫的双重作用下进行排盐,避免在排盐时发生堵塞。

[0053] 5、塔式熔盐电站的工作温度一般在290~565℃,本实验平台的氯化盐工作温度最高达到了700℃,且具有较强的腐蚀性,确保实验平台的安全性至关重要。本实验平台采用数据采集及控制系统对实验平台进行远程操作,并在实验室内设置监控设备随时监测实验室内的情况,避免了实验人员与设备的近距离接触产生的危险。若第一储盐罐发生泄漏,则通过数据采集及控制系统开启置于第一储盐罐底部的第四Y型电动截止阀,使第一储盐罐内的氯化盐流入第一熔盐槽中。若第二储盐罐发生泄漏,则通过数据采集及控制系统开启置于第二储盐罐底部的第六Y型电动截止阀,使第二储盐罐内的氯化盐流入第二熔盐槽中。第一熔盐泵、第二熔盐泵、电阻丝加热元件等均设置有超温保护模块,若节流件流量异常减小、第二差压变送器监测到的压力异常升高或降低,则立即报警并停止实验系统的运行。

[0054] 6、如何将第一储盐罐内的熔盐加热到设计温度并保持均匀稳定。采用电阻丝加热元件为实验系统提供热量,电阻丝加热元件及第一储盐罐外壁面上设置有N型热电偶,第一储盐罐内设置有若干热电偶,布置在第一储盐罐的中心到罐体内壁面的不同位置,热电偶

探头由第一储盐罐的顶部盖板插入到距离底部封头50~100mm处。在加热氯化盐时,采用“变功调节,逐级加热”的方式。比如设定加热温度为600℃,将加热过程分为5级,第一级为380℃(熔点温度),第二级为500℃,第三级为560℃,第四级为580℃,第五级为600℃。对于第一级调节,设定第一储盐罐外壁面温度为380℃,启动电阻丝加热元件,当第一储盐罐外壁面温度接近380℃时,数据采集及控制系统发出指令,自动调节电阻丝加热元件功率,维持第一储盐罐外壁面温度稳定在380℃左右,同时观察第一储盐罐内氯化盐温度。当第一储盐罐内各热电偶的温度稳定时,进入下一级调节。第二级调节、第三级调节、第四级调节与第一级调节方式相同。对于第五级调节,设定第一储盐罐外壁面温度为600℃,数据采集及控制系统发出指令,自动调节电阻丝加热元件功率,使得第一储盐罐外壁面温度稳定在600℃左右,同时观察第一储盐罐内氯化盐温度。当第一储盐罐内各热电偶的温度稳定时,设定布置在第一储盐罐中心的热电偶温度为600℃,当第一储盐罐内各热电偶温度再次达到稳定时,启动第一熔盐泵,使得熔盐流动。需要注意的是,在设定各级别的温度等级时,温度越高,各级别的温差越小。这是因为随着设定温度的升高,电阻丝加热元件在大功率下运行时能够达到的温度越高,越有可能出现超温的风险。减小各级别的温差有利于使电加热器元件更多地在小功率下运行,有效的避免电阻丝加热元件温度过高。

[0055] 7、如何获得吸热器迎光面温度分布。在实验过程中测量吸热器迎光面的温度,一是为了防止吸热器管壁超温;二是为了计算热应力。获得吸热器迎光面温度分布有两种方式。一是直接测量,即在吸热器迎光面上布置一定数目的热电偶丝;二是间接测量,此时采用红外热像仪。若是采用直接测量,其测量精度更加准确,但是较多的热电偶丝布置在吸热器迎光面上,可能会对吸热器接收太阳辐照作用造成遮挡。此外,太阳能模拟器的聚焦能流也可能造成热电偶丝的烧毁;若是采用间接测量,实验所用红外热像仪的测量精度在2℃范围内,能够满足实验需求。因此采用红外热像仪进行吸热器迎光面温度测量。

[0056] 8、如何为整个循环系统提供动力。推动氯化盐在系统中流动的方式有两种,一种是采用惰性气体推送,一种是采用熔盐泵。若是采用惰性气体推送,一方面氯化盐流动过程中流量波动较大,不易在某些设定工况下开展研究;另一方面,储盐罐内压力较高,增加了熔盐储罐加工成本和运行风险。因此本循环系统采用熔盐泵提供动力。

[0057] 9、如何实现氯化盐流量的精确调节。在实验系统中流量的调节能够通过两种方式实现。一是调节阀门开度,二是采用变频式熔盐泵。两种方式均需在阀门后安装流量计,通过流量计提供的反馈信号调节控制。若是采用调节阀门开度的方式,则由于氯化盐熔点高达380℃,若阀门开度较小,极易在阀门中发生凝固,不利于系统的安全运行。因此采用变频式熔盐泵。

[0058] 参见图1和图2,一种高温氯化盐光热与储能循环模拟实验平台,包括高温氯化盐试验系统、储能系统、电加热系统、保温系统、太阳光模拟系统、注盐系统、排盐系统、储罐空气隔离系统和数据采集及控制系统。

[0059] 其中,高温氯化盐试验系统用于实现实验过程中氯化盐的流动,包括第一熔盐泵26、第一储盐罐76、氯化盐输入通道33、第一差压检测通道42、吸热器46和第二差压检测通道55。本实验平台采用三元氯化盐 $\text{MgCl}_2\text{-KCl-NaCl}$ (mole:68.2-17.8-14%),当温度低于380℃时,氯化盐为固态;当温度高于380℃时,氯化盐为液态;第一储盐罐76上安装有雷达料位计25用于测量固态/液态氯化盐的高度。第一储盐罐76的底部安装有第一储盐罐支撑

架69,用于保持罐体平衡。在第一储盐罐支撑架69的下方布置有电阻丝加热元件75和保温材料74,以免加热过程中氯化盐的热损失过大;第一储盐罐76的最下方安装有第一熔盐槽77,以应对熔盐泄漏等紧急情况。第一熔盐泵26安装固定于第一储盐罐76的顶部法兰上,且第一熔盐泵26输送氯化盐的部分深入到第一储盐罐76的内部,为氯化盐由第一储盐罐76输送到氯化盐输入通道33提供动力。通过调节第一熔盐泵26的电机频率,以控制氯化盐在氯化盐输入通道33中的流量大小。第一熔盐泵26的输出端与氯化盐输入通道33相连,氯化盐输入通道33将吸热器46与第一储盐罐76连通,为吸热器46的运行输送氯化盐。吸热器46的迎光面布置有太阳能模拟器73进行照射,背光面设置有若干N型热电偶丝47,吸热器46的进口和出口位置安装有用于测温的第一N型热电偶45和第二N型热电偶56。氯化盐输入通道33与第一差压检测通道42通过节流件43相连,第一差压检测通道42与节流件43相结合,测量氯化盐在氯化盐输入通道33中的流量大小,提供反馈信号用于第一熔盐泵26电机频率的调节。氯化盐输入通道33与第二差压检测通道55通过吸热器46进出口位置的第四三通接头44、第五三通接头57相连,第二差压检测通道55可测量获得吸热器进出口位置的压差大小,用于检测吸热器中的氯化盐是否存在堵塞或泄漏。

[0060] 储能系统用于存储流经太阳能模拟器73作用下的吸热器46后的高温熔盐,可作为高温储能罐,并在下一次实验时将高温氯化盐输回到第一储盐罐中,减少将氯化盐加热到设定温度的时间。包括第二储盐罐81、第二熔盐泵59、中间换热器84和氯化盐输回通道78。第二储盐罐81的输入端与氯化盐输入通道33的输出端相连,将经太阳能模拟器73作用后的高温熔盐传输到第二储盐罐81内。第二储盐罐81的底部安装有第二储盐罐支撑架80,用于保持罐体平衡。在第二储盐罐支撑架80的下方布置有保温材料74和电阻丝加热元件75,以降低保温过程中氯化盐的热损失,并应对输送第二储盐罐81内熔盐时氯化盐温度低于熔点的情况;第二储盐罐81的最下方安装有第二熔盐槽79,以应对熔盐泄漏等紧急情况。第二熔盐泵59安装固定于第二储盐罐81的顶部法兰上,且第二熔盐泵59输送氯化盐的部分深入到第二储盐罐81的内部,为氯化盐由第二储盐罐81输送到氯化盐输回通道78提供动力。第二熔盐泵59的输出端与氯化盐输回通道78相连,通过调节第二熔盐泵59的电机频率,控制氯化盐在氯化盐输回通道78中的流量大小,从而调节中间换热器84的进出口温度以及经中间换热器84的换热量大小。

[0061] 电加热系统用于第一储盐罐76、第二储盐罐81、注盐罐102内氯化盐的预热和保温以及高温氯化盐试验系统、储能系统、注盐系统和排盐系统的管道伴热。具体的,包括布置在第一储盐罐76、第二储盐罐81、注盐罐102周边和底部的电阻丝加热元件75,以及缠绕于氯化盐输入通道33、氯化盐输回通道78、第一差压检测通道42、第二差压检测通道55、氯化盐回流通道30、氯化盐排出通道71、注盐通道92、第一氩气吹扫通道一支路7、第一氩气吹扫通道二支路8、吸热器压力释放段14的伴热设备11。电阻丝加热元件75镶嵌在第一储盐罐76和第二储盐罐81、注盐罐102四周的保温材料74中,并与第一储盐罐76、第二储盐罐81、注盐罐102的外壁面保持50mm的距离,避免在加热过程发生短路。在实验开始前,通过数据采集及控制系统控制电阻丝加热元件和伴热设备功率,将第一储盐罐76内的氯化盐加热到设定温度并保持稳定,并将管道加热到三元氯化盐 $\text{MgCl}_2\text{-KCl-NaCl}$ (mole:68.2-17.8-14%)的熔点温度以上50℃,避免氯化盐在管道中流通时凝固。在正式实验时,关闭伴热设备,避免伴热设备的加热效果对实验结果的可靠性产生影响。实验结束后,开启排盐系统的同时启

动伴热设备,避免排盐过程中氯化盐发生凝固,堵塞管道。

[0062] 保温系统用于氯化盐在储存和管道输送过程中的保温,包括布置在第一储盐罐76、第二储盐罐81顶部和周向的保温材料74,布置在第一储盐罐76、第二储盐罐81底部的莫来石,布置在氯化盐输入通道33、氯化盐输回通道78、第一差压检测通道42、第二差压检测通道55、氯化盐回流通道30、氯化盐排出通道71、注盐通道92、第一氩气吹扫通道一支路7、第一氩气吹扫通道二支路8、吸热器压力释放段14外侧的硅酸铝管。保温材料74为氧化铝陶瓷纤维,在实验时,布置在第一储盐罐76、第二储盐罐81四周的保温材料74用于减少罐体内熔盐的散热,配合电阻丝加热元件75维持第一储盐罐76内熔盐温度的稳定,也可发挥第二储盐罐81高温储能的作用,使得高温氯化盐在第二储盐罐81内较长时间保持高温,缩短下次加热氯化盐所需的时间并降低电能消耗;布置在管道上的保温材料,减少管道内氯化盐的热损失,避免氯化盐在管道内流动过程中发生凝固。

[0063] 太阳光模拟系统用于模拟太阳光源,为吸热器46提供非均匀辐射能流,包括太阳能模拟器73、能流计86、摄像机90、水循环管道91,以及通过水循环管道91相连的冷却水箱88、电磁流量计89、给水泵87和Lambertian靶72。Lambertian靶72的入口端通过水循环管道91与给水泵87的出口端相连,给水泵87的入口端通过水循环管道91与冷却水箱88的出口端相连,冷却水箱88的入口端通过水循环管道91与电磁流量计89的出口端相连,电磁流量计89的入口端通过水循环管道91与Lambertian靶72的出口端相连,由此在太阳光模拟系统中形成了冷却水循环。能流计86位于Lambertian靶72的中心位置,太阳能模拟器正对Lambertian靶72,摄像机90置于太阳能模拟器一侧并朝向Lambertian靶72。在实验开始前,对太阳能模拟器进行聚光特性测试,以获得较好的聚光光斑。将Lambertian靶72中心的能流计86置于太阳能模拟器的焦点位置,开启给水泵87,使得冷却水在水循环管道91和Lambertian靶72中流通,避免Lambertian靶72在受到太阳能模拟器73的辐射作用时温度过高而烧毁。电磁流量计89安装于冷却水箱88与Lambertian靶72之间的水循环管道91上,用于监测冷却水流量,确定冷却水是否流通。进一步的,开启并调试太阳能模拟器73,使得在Lambertian靶72上形成较小的聚焦能流光斑,且聚焦能流的中心位于能流计86处。使用摄像机90拍摄Lambertian靶72上的光照强度分布,移动Lambertian靶72,使得能流计86先后位于若干测试点位置。结合摄像机90拍摄获得的光照强度分布以及若干测试点位置的能流值,便可获得Lambertian靶72上的能流密度分布情况及总能流值。在完成上述操作后,撤去Lambertian靶72,并将吸热器46置于Lambertian靶72中心位置处,从而使得太阳能模拟器作用于高温氯化盐试验系统的吸热器46上,根据设计太阳能模拟器73提供0~42kW的辐射能量供给。在实验过程中,通过数据采集及控制系统调节太阳能模拟器的功率,进而模拟不同光照强度、不同天气状况下的光热力耦合特性。

[0064] 注盐系统用于将经过净化处理的氯化盐输送到第一储盐罐76内,包括注盐口85、注盐通道92、进盐口94、出盐口95、第一闸阀96、稳压通道97、真空泵98、第二闸阀99、第四氩气吹扫通道100、第四氩气瓶101、注盐罐102、注盐罐支撑架103、第三熔盐槽104。第四氩气瓶101与第二闸阀99第一端通过第四氩气吹扫通道100相连,第二闸阀99第二端与注盐罐102顶部盖板通过第四氩气吹扫通道100相连,注盐罐102的底部安装有注盐罐支撑架103,用于保持罐体平衡。在注盐罐支撑架103的下方布置有电阻丝加热元件75和保温材料74,用于注盐前加热氯化盐,并降低加热过程中氯化盐的热损失;注盐罐102的最下方安装有第三

熔盐槽104,以应对熔盐泄漏等紧急情况。真空泵98通过稳压通道97与注盐罐102连通,稳压通道97上设置有第一闸阀96。真空泵98与第四氩气瓶101配合可保证氯化盐输送过程中注盐罐内的氩气环境。进盐口94开设在注盐罐102的顶部盖板上,用于向注盐罐内输入经过净化处理的氯化盐;注盐通道92的第一端通过固定在注盐罐102顶部盖板上的出盐口95深入到罐体内部距离底部封头50mm的位置,使得注盐罐102内的氯化盐尽可能多的输送到第一储盐罐76内;注盐通道92的第二端与固定在第一储盐罐76顶部盖板上开设的注盐口85相连,为氯化盐由注盐罐102输送到第一储盐罐76提供通道。根据设计,在氯化盐由注盐罐102输送到第一储盐罐76的过程中,第四氩气瓶101向注盐罐内输送0.03~0.05MPa的氩气作为动力。

[0065] 排盐系统用于实验结束之后排出管道及吸热器内残余的氯化盐,并在发生熔盐泄漏时紧急排盐。具体的,包括第一氩气瓶17、第一氩气吹扫通道5、第一三通接头6、第一氩气吹扫通道一支路7、第一氩气吹扫通道二支路8、第一两通球阀9、第二两通球阀10、第一三通球阀12、吸热器压力释放段14、氯化盐回流通道30、第三三通球阀32和氯化盐排出通道71。第一氩气瓶17与第一氩气吹扫通道5第一端连接,第一氩气吹扫通道5第二端通过第一三通接头6与第一氩气吹扫通道一支路7、第一氩气吹扫通道二支路8的第一端相连,第一氩气吹扫通道一支路7第二端通过第一三通球阀12与吸热器压力释放段14第一端相连,其中吸热器压力释放段14位于吸热器46的上部。在实验时,氯化盐流动过程中可能会有部分气体积聚在吸热器46的弯头处,导致局部压力过高,影响实验平台的安全运行。吸热器压力释放段14第二端与吸热器46的上部连通,可将这部分气体引入到第二储盐罐81中,降低实验的风险。第一两通球阀9安装于第一氩气吹扫通道7上,第二两通球阀10安装于第二氩气吹扫通道8上,用于防止实验过程中氯化盐由吸热器46顶部反向流动到第一储盐罐17位置,发生危险。氯化盐回流通道30第一端与第一储盐罐76连接,氯化盐回流通道30第二端通过第三三通接头32与氯化盐输入通道33相连,便于实验结束后吸热器46左侧的氯化盐全部流回到第一储盐罐76内。氯化盐排出通道71与吸热器46下端相连,便于实验结束后吸热器46下端的氯化盐全部流回到第二储盐罐81内。实验平台的所有氯化盐流通的管道均设有3~5°的倾角,保证实验结束后氯化盐能够在重力作用下流回到第一储盐罐76和第二储盐罐81内。为保证排盐效果,第一氩气瓶17会通过第一氩气吹扫通道5、第一氩气吹扫通道一支路7、第一氩气吹扫通道二支路8、吸热器压力释放段14等向吸热器46内通入氩气;同时,为避免排盐过程中氯化盐发生冷凝,在排盐时开启伴热设备11辅助排盐。若管道内氯化盐发生泄露,则按照实验结束时的排盐操作,将氯化盐排出到第一储盐罐76和第二储盐罐81内;若第一储盐罐76、第二储盐罐81内氯化盐发生泄露,则开启第四Y型电动截止阀68、第六Y型电动截止阀82,将氯化盐排出到第一熔盐槽77、第二熔盐槽79内。

[0066] 储罐空气隔离系统用于排出实验平台中的空气,以减小氯化盐对实验设备的腐蚀性。具体的,包括第二氩气瓶62、第二氩气吹扫通道19、第二三通接头20、第二氩气吹扫通道二支路21、第一自力式氩气进入阀22、第二氩气吹扫通道一支路24、第二自力式氩气进入阀15、第一电动球阀29、第一自力式氩气排出阀28、第一安全阀27、第二安全阀58、第二自力式氩气排出阀60、第二电动球阀61、第三氩气瓶63、第三氩气吹扫通道64、第六三通接头65、第三氩气吹扫通道一支路66和第三氩气吹扫通道二支路67。

[0067] 第二氩气瓶62出口端与第二氩气吹扫通道19第一端直接连接,第二氩气吹扫通道

19上安装有第一压力传感器18,用于测量第一自力式氩气进入阀22的阀前压力。第二氩气吹扫通道19第二端通过第二三通接头20与第二氩气吹扫通道一支路24、第二氩气吹扫通道二支路21的首端相连,第二氩气吹扫通道一支路24上从首端至末端依次布置有第二自力式氩气进入阀22和第二压力传感器23,其中第二压力传感器23用于测量第一自力式氩气进入阀22的阀后压力,即第一储盐罐76内的压力;第二氩气吹扫通道一支路24的末端与第一储盐罐76的入口端相连。第二氩气吹扫通道二支路21从首端至末端依次布置有第二自力式氩气进入阀15和第二压力传感器16,其中第二压力传感器16用于测量第一自力式氩气进入阀15的阀后压力,即第二储盐罐81内的压力,第二氩气吹扫通道二支路21的末端与第二储盐罐81的入口端相连。第三氩气瓶63的出口端与第三氩气吹扫通道64第一端直接相连,第三氩气吹扫通道64第二端通过第六三通接头65与第二氩气吹扫通道一支路66、第三氩气吹扫通道二支路67相连;第一电动球阀29安装在与第一储盐罐顶部盖板相连管道的一个支路上,第一自力式氩气排出阀28安装在与第一储盐罐顶部盖板相连管道的另一个支路上,第一安全阀27安装在第一储盐罐顶部盖板上,第二自力式氩气排出阀60安装在与第二储盐罐顶部盖板相连管道的一个支路上,第二电动球阀61安装在与第二储盐罐顶部盖板相连管道的另一个支路上,其中第二氩气吹扫通道一支路66的末端与第一储盐罐76底部的第四Y型电动截止阀68相连,第二氩气吹扫通道二支路67的末端与第二储盐罐81底部的第六Y型电动截止阀82相连。

[0068] 在实验前,开启第三氩气瓶63,第四Y型电动截止阀68、第六Y型电动截止阀82、第一电动球阀29、第二电动球阀61,向第一储盐罐76、第二储盐罐81中注入氩气,排出罐体内的空气;待5~6分钟后关闭第三氩气瓶63、第四Y型电动截止阀68、第六Y型电动截止阀82、第一电动球阀29、第二电动球阀61,保持储盐罐内的氩气环境。拆除第三氩气吹扫通道一支路66、第三氩气吹扫通道二支路67,避免实验发生熔盐泄漏时,开启第四Y型电动截止阀68、第六Y型电动截止阀82向第一熔盐槽77、第二熔盐槽79内排盐受到影响。

[0069] 在实验时,开启第二氩气瓶62,第一自力式氩气进入阀22、第一自力式氩气排出阀29会根据第一储盐罐76内的压力大小自动调整是否开启,若第一储盐罐76内的压力小于1kPa,则第一自力式氩气进入阀22自动开启,第一自力式氩气排出阀29自动关闭,氩气进入第一储盐罐76;若第一储盐罐76内的压力大于1kPa,则第一自力式氩气进入阀22自动关闭,第一自力式氩气排出阀29自动开启,氩气由第一储盐罐76中排出。第二储盐罐81内第二自力式氩气进入阀15、第二自力式氩气排出阀60的操作与第一储盐罐76的相同。上述操作可在实验时维持第一储盐罐76、第二储盐罐81内压力的稳定。若第一自力式氩气进入阀22、第一自力式氩气排出阀29、第二自力式氩气进入阀15或第二自力式氩气排出阀60损坏,导致第一储盐罐76、第二储盐罐81内压力高于100kPa或低于-100kPa,则第一安全阀27、第二安全阀58开启,防止第一储盐罐76、第二储盐罐81内压力过高或过低发生危险。

[0070] 数据采集及控制系统用于实验数据的采集、反馈控制信息在实验用计算机4上显示以及设备仪器的控制。具体的,包括实验用配电柜1、实验用控制柜2、数据采集柜3、实验用计算机4、雷达料位计25、第一Y型电动截止阀13、第二Y型电动截止阀31、第三Y型电动截止阀34、第四Y型电动截止阀68、第五Y型电动截止阀70、第六Y型电动截止阀82、节流件43、第一差压传感器38、第二差压传感器51、第一压力传感器18、第二压力传感器16、第三压力传感器23、压力变送器93、第一N型热电偶45、第二N型热电偶56、吸热器上的若干N型热电偶

丝47和红外热像仪83。

[0071] 第一Y型电动截止阀13安装在吸热器压力释放段14上,第二Y型电动截止阀31安装在氯化盐回流通道30上,第三Y型电动截止阀34安装在氯化盐输入通道33上,第四Y型电动截止阀68安装在第一熔盐罐76上,第五Y型电动截止阀70安装在氯化盐排出通道71上,第六Y型电动截止阀82安装在第二熔盐罐81上;其中,数据采集柜2与雷达料位计25、第一差压传感器38、第二差压传感器51、第一压力传感器18、第二压力传感器16、第三压力传感器23、电阻丝加热元件、伴热设备、第一N型热电偶45、第二N型热电偶56和红外热像仪83连接,用于实时采集实验运行时的温度、流量、压降、功率、第一熔盐泵电机频率、第二熔盐泵电机频率等数据,并将数据传输到实验用计算机4上,由实验用计算机4发出控制指令,对第一Y型电动截止阀13、第二Y型电动截止阀31、第三Y型电动截止阀34、第四Y型电动截止阀68、第五Y型电动截止阀70、第六Y型电动截止阀82、电阻丝加热元件75、第一熔盐泵26、第二熔盐泵59、太阳能模拟器73等设备进行控制。雷达料位计25位于第一储盐罐76顶部盖板上,实时监测第一储盐罐76内的液位高度,判断液位高度是否过低,如是否低于第一熔盐泵26最下端的高度;实验用计算机4发出指令控制第一Y型电动截止阀13、第二Y型电动截止阀31、第三Y型电动截止阀34、第四Y型电动截止阀68、第五Y型电动截止阀70、第六Y型电动截止阀82的开闭。在实验时,开启第一Y型电动截止阀13、第三Y型电动截止阀34,关闭第二Y型电动截止阀31、第四Y型电动截止阀68、第五Y型电动截止阀70、第六Y型电动截止阀82;排盐时,开启第二Y型电动截止阀31、第五Y型电动截止阀70,关闭第一Y型电动截止阀13、第三Y型电动截止阀34、第四Y型电动截止阀68、第六Y型电动截止阀82;若氯化盐发生泄漏,则开启第二Y型电动截止阀31、第四Y型电动截止阀68、第五Y型电动截止阀70、第六Y型电动截止阀82,将氯化盐排出到第一熔盐槽77、第二熔盐槽79内;节流件43位于氯化盐输入通道33上,第一差压传感器38通过第一差压检测通道42与节流件43的出入口两端相连,用于测量节流件43两端的差压,结合三元氯化盐 $\text{MgCl}_2\text{-KCl-NaCl}$ (mole:68.2-17.8-14%) 的密度等参数,经过转化获得氯化盐的体积流量,结合体积流量,通过实验用计算机4调节位于第一储盐罐76顶部的第一熔盐泵46的电机频率,从而调整体积流量的大小;第二差压传感器51通过第二差压检测通道55与吸热器46的入口端和出口端相连,用于实时监测吸热器46进出口的差压值。其中,第二差压检测通道55上还设有第三高温隔膜法兰48、第三降温翅片49、第三中低温隔膜法兰50、第四中低温隔膜法兰52、第四降温翅片53、第四高温隔膜法兰54,用于降低与第二差压传感器51接触的介质温度,防止高温氯化盐对第二差压传感器51造成损害;第一压力传感器18位于第一自力式氩气22进入阀的前端,用于实时监测第一自力式氩气22的阀前压力,防止第二氩气瓶62内的压力不足,提醒及时更换氩气瓶;第三压力传感器23位于第一自力式氩气进入阀22的后端,用于实时监测第一自力式氩气进入阀22的阀后压力,即第一储盐罐76内的压力。当测得的第一储盐罐76内压力低于1kPa时,向罐体内注入氩气;第二压力传感器16位于第二自力式氩气进入阀15的后端,用于实时监测第二自力式氩气进入阀22的阀后压力,即第二储盐罐81内的压力。当测得的第二储盐罐81内压力低于1kPa时,向第二储盐罐81内注入氩气;压力变送器93位于注盐罐102顶部的盖板上,用于实时监测注盐罐内的压力值;第一N型热电偶45和第二N型热电偶56分别位于吸热器46的进口侧和出口侧,实时获得相应位置的温度值。该结果与三元氯化盐 $\text{MgCl}_2\text{-KCl-NaCl}$ (mole:68.2-17.8-14%) 的比热、密度等热物性参数相结合,便可获得氯化盐在流经吸热器46时的吸热量,进而结合总

能流值计算热效率;吸热器46上的若干N型热电偶丝47位于吸热器46的背光面,用于获得吸热器46背光面的实时温度分布;红外热像仪83在太阳能模拟器73的一侧,且朝向吸热器46的迎光面,用于获得吸热器46迎光面的实时温度分布。结合吸热器迎光面和背光面的实时温度分布情况计算吸热器46的热应力,或进一步研究吸热器46的热力耦合及失效机理。

[0072] 本实验采用太阳能模拟器模拟聚焦的非均匀能流分布,为三元氯化盐 $\text{MgCl}_2\text{-KCl-NaCl}$ (mole:68.2-17.8-14%) 在吸热器中的吸热过程提供能量,通过调节工况条件在最大程度上提高吸热器出口处的氯化盐温度。下面给出本实验平台的操作方法,具体步骤如下:

[0073] 步骤1、在进入实验室之前,穿戴好工作服、安全帽、手套、防毒面具等防护用具;在进入实验室之后,首先打开门窗,并启动实验室排风系统,确保实验室内通风良好;检查实验平台周围是否存在易燃易爆品,若发现则立即清理;查看灭火器是否放置在正确位置,并检查其性能。上述均确认无误后,开启实验用配电柜1的电源;

[0074] 步骤2、将Lambertian靶72中心的能流计86放置于太阳能模拟器73的焦点位置;开启冷却水箱88和给水泵87,使得冷却水在水循环管道91中流动,并通过冷却水为Lambertian靶72和能流计86降温。在Lambertian靶72上绘制需测试点的位置坐标。打开太阳能模拟器控制箱的风机,开启并调试太阳能模拟器73,使得在Lambertian靶72上形成较小的聚焦能流光斑,光斑大小在吸热器46的高度和吸热器46的长度之间,且聚焦能流的中心位于能流计86处。使用摄像机90拍摄Lambertian靶72光照强度分布的照片,并记录能流计86测得的能流值。关闭太阳能模拟器73,移动Lambertian靶72,使能流计86依次位于各测试点空间坐标位置处。开启太阳能模拟器73,使用摄像机90拍摄Lambertian靶72光照强度分布的照片,并记录能流计86测得的能流值。将光照强度分布的照片导入实验用计算机4的Adobe Photoshop中处理得到各个测试点位置的光照强度信息(即灰度值),将各个测试点的能流值及灰度值带入两者之间的函数关系式,求解得到函数关系式中的系数。再将Lambertian靶72不同位置处的光照强度带入能流值与灰度值之间的函数关系式,求得Lambertian靶72不同位置处的能流值,即可获得太阳能模拟器的聚光特性。

[0075] 其中,能流值与灰度值之间的函数关系式为: $I_x = I_b + k \cdot G_x$, I_x 为辐射能流值,单位为 kW/m^2 ,通过能流计测量获得; I_b 为辐射能流常数,单位为 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$; k 为转换系数,单位为 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$; G_x 为灰度值;

[0076] 关闭太阳能模拟器73,2min之后关闭太阳能模拟器控制箱的风机、冷却水箱88和给水泵87;

[0077] 步骤3、移走Lambertian靶72,将吸热器46置于太阳能模拟器73的焦点位置。关闭第一Y型电动截止阀13、第二Y型电动截止阀31、第三Y型电动截止阀34、第五Y型电动截止阀70、第一两通球阀9、第二两通球阀10,打开第一电动球阀29、第二电动球阀61、第四Y型电动截止阀68、第六Y型电动截止阀82,调节第一三通球阀12,使其指向第一两通球阀9,注盐口85使用盲板法兰密封,保持第一氩气瓶17、第二氩气瓶62处于关闭状态,使得第一储盐罐76和第二储盐罐81中形成相对密封的环境。打开第三氩气瓶63,氩气分别通过第一储盐罐76和第二储盐罐81底部的第四Y型电动截止阀68和第六Y型电动截止阀82进入第一储盐罐76和第二储盐罐81,对第一储盐罐76和第二储盐罐81内的空气进行吹扫,由于氩气的密度远大于空气,氩气将会沉积在罐体底部。随着通入的氩气逐渐增加,空气将会由第一电动球阀29、第二电动球阀61排出到罐体外。上述操作持续5~6分钟后,第一储盐罐76和第二储盐罐

81内的空气已经完全排出。关闭第三氩气瓶63、第一电动球阀29、第二电动球阀61、第四Y型电动截止阀68、第六Y型电动截止阀82,移除第三氩气吹扫通道一支路66、第三氩气吹扫通道二支路67。

[0078] 步骤4、将进盐口94和注盐通道92的第二端使用盲板法兰密封,打开第一闸阀96、第二闸阀99。开启真空泵98,将注盐罐102抽真空,关闭真空泵98;打开第四氩气瓶101,向注盐罐102内冲入氩气,使得注盐罐内压力为1个大气压,关闭第四氩气瓶101;在此打开真空泵98,将注盐罐102抽真空,关闭真空泵98;打开第四氩气瓶101,向注盐罐102内冲入氩气,使得注盐罐内压力为1个大气压,关闭第四氩气瓶101。如此反复5~8次,认为注盐罐102内的空气已经完全排出;打开进盐口94的法兰盲板,将经过净化处理的氯化盐由进盐口94注入到注盐罐102内,关闭进盐口94处的法兰盲板;打开注盐口85和注盐通道92的第二端的法兰盲板,并将注盐通道92的第二端与注盐口85相连,打开第四氩气瓶101,向注盐罐内注入0.03~0.05MPa的氩气,将氯化盐注入到第一储盐罐76中,关闭注盐口85和注盐通道92的第二端的法兰盲板,打开第二氩气瓶62,保持第一储盐罐76和第二储盐罐81充满氩气的状态,隔绝空气;

[0079] 步骤5、打开第一Y型电动截止阀13、第三Y型电动截止阀34,调节第一三通球阀12,使其指向第一Y型电动截止阀13。启动电阻丝加热元件75,为第一储盐罐76内的氯化盐提供热量。在加热过程中采用“变功调节,逐级加热”的方式,将氯化盐加热到目标温度;同时启动伴热设备,将管道加热温度设定为430℃(高于三元氯化盐 MgCl_2 -KCl-NaCl (mole:68.2-17.8-14%)的熔点50℃)。待氯化盐及管道温度均达到设定温度并维持稳定10~15分钟后,启动太阳能模拟器73,吸热器46迎光面会接受太阳能模拟器73的辐射作用。打开红外热像仪83,监测吸热器46的表面温度分布。当吸热器46的管道外壁面温度达到设定值时,开启第一熔盐泵26输送氯化盐,并通过实验用计算机4实时监测氯化盐的流量值,根据流量值的大小自动调整第一熔盐泵26的电机频率,使得氯化盐流量达到设定值。在实验时,实时监测雷达料位计25测得的液位值,防止氯化盐液位降低到低于第一熔盐泵26的下端,造成第一熔盐泵26空转,影响设备性能。

[0080] 步骤6、试验平台运行一段时间后,观察第一N型热电偶45、第二N型热电偶56、红外热像仪83、吸热器背光面的若干N型热电偶丝47、第一差压传感器38、第二差压传感器51、雷达料位计25、第一储盐罐内N型热电偶、第二储盐罐内的N型热电偶的示数,在上述示数稳定后等待5~10分钟,若均不发生变化,则认为整个实验平台已经处于热平衡状态。开始记录吸热器进出口的氯化盐温度、吸热器迎光面的温度分布、吸热器背光面的温度分布、氯化盐的体积流量、吸热器进口和出口的压差、第一储盐罐内液位高度、第一储盐罐76内的氯化盐温度和第二储盐罐81内的氯化盐温度、摄像机90拍摄的吸热器迎光面光照强度信息(灰度值),上述数据每隔5秒记录一次,整个记录数据的时间控制在30~60分钟。在实验时,特别关注第一差压传感器38测得的差压值转化得到的体积流量、第二差压传感器51测得的吸热器两端差压值,若测得的体积流量值异常减小或吸热器两端差压值异常增大,则代表管道或吸热器46中发生了堵塞;若吸热器两端的差压值异常减小,则代表吸热器46中发生了泄漏。若上述情况发生,在实验用计算机4上会有报警信号提醒。此时通过实验用计算机4断开第一熔盐泵26的电源、开启伴热设备11,关闭第三Y型电动截止阀34,打开第二Y型电动截止阀31、第五Y型电动截止阀70,使氯化盐分别沿氯化盐回流通道的氯化盐输入通道、氯化盐排

出通道流回到第一储盐罐76和第二储盐罐81内。手动调节第一三通球阀12,使其指向第一两通球阀9,手动开启第一两通球阀9、第二两通球阀10,手动打开第一氩气瓶辅助排盐;

[0081] 步骤7、待吸热器进出口的氯化盐温度、吸热器迎光面的温度分布、吸热器背光面的温度分布、氯化盐的体积流量、吸热器进口和出口的压差数据全部采集完成后,通过实验用计算机4断开第一熔盐泵26的电源,并开启伴热设备11,关闭第三Y型电动截止阀34,打开第二Y型电动截止阀31、第五Y型电动截止阀70,使吸热器46中的氯化盐分别沿氯化盐回流通道、氯化盐输入通道、氯化盐排出通道流回到第一储盐罐76和第二储盐罐81内。手动调节第一三通球阀12,使其指向第一两通球阀9,手动开启第一两通球阀9、第二两通球阀10,手动打开第一氩气瓶向管道内吹扫氩气辅助排盐。观察安装于第一储盐罐76顶部的雷达料位计25的示数,当液位值不再变化后,等待5~10分钟,认为排盐过程已基本完成。通过实验用计算机4关闭太阳能模拟器73、伴热设备11、电阻丝加热元件75的电源,手动关闭第一氩气瓶17、第一两通球阀9、第二两通球阀10,调节第一三通球阀12,使其指向第一Y型电动截止阀13,通过实验用计算机4关闭第一Y型电动截止阀13、第二Y型电动截止阀31、第五Y型电动截止阀70;

[0082] 步骤8、对实验场地进行通风降温,断开实验用配电柜的电源;

[0083] 步骤9、在下次实验前,监测第一储盐罐76和第二储盐罐81内的氯化盐温度,若第一储盐罐76内的氯化盐温度在熔点以上且第二储盐罐81内的氯化盐温度高于熔点50℃以上,开启第二熔盐泵59,将第二储盐罐81内的高温氯化盐输送到第一储盐罐76内;否则开启电阻丝加热元件,将第一储盐罐内76的氯化盐温度加热到熔点以上,并将第二储盐罐81内的氯化盐温度加热到高于熔点50℃以上时,开启第二熔盐泵59,将第二储盐罐81内的氯化盐输送到第一储盐罐76内。需要注意的是,在熔盐运输过程中,需实时监测位于第一储盐罐76顶部的雷达料位计25的示数,并根据第一储盐罐76的液位高度和总氯化盐使用量,计算第二储盐罐内的液位高度。防止第二储盐罐内的氯化盐高度降低到低于第二熔盐泵59的下端;在实际塔式电站的运行过程中,则根据用电需求确定何时将第二储盐罐内的高温氯化盐输出第一储盐罐,在输出氯化盐的过程中会经中间换热器作用实现高温氯化盐与超临界二氧化碳的换热,记录中间换热器84的进出口温度,并根据记录的第一储盐罐76的液位高度,计算超临界二氧化碳经中间换热器获得的热量;记录第二储盐罐76的氯化盐温度,计算第二储盐罐76的热损失;

[0084] 步骤10、根据记录的吸热器迎光面光照强度信息(灰度值),以及步骤2中获得的能流值与灰度值之间的函数关系式,获得吸热器迎光面的能流分布。根据吸热器迎光面的能流分布计算太阳能模拟器73提供给吸热器46的入射辐射能;根据记录的吸热器进、出口氯化盐温度和氯化盐的体积流量,计算氯化盐在吸热器中流动时吸收的热量。结合入射辐射能,计算获得吸热器的热损失和热效率;根据步骤6记录的第一储盐罐内的液位高度和第二储盐罐81的氯化盐温度,计算第二储盐罐储存的能量;将记录的吸热器迎光面温度分布、吸热器背光面温度分布导入商业软件ANSYS Mechanical,即可进行吸热器的热应力分析;

[0085] 步骤11、若分析非定常非均匀热流对吸热器外壁面温度分布的影响,则首先基于步骤1~步骤10,获得吸热器出口温度保持不变时,不同光照强度下氯化盐的流量值。在此基础上,规定实验时间,并将太阳能模拟器的功率进行分组。例如,将太阳能模拟器的功率分为7组,每一组的功率分别为0、7kW、14kW、21kW、28kW、35kW、42kW,实验时间设定为20分

钟,前8分钟太阳能模拟器的功率设定为42kW,流经吸热器的流量设定为稳态计算时42kW对应的流量值。第9~20分钟太阳能模拟器的功率逐级递减,流量设定为稳态计算时各功率对应的流量值,各个功率下太阳能模拟器的工作时间为2分钟。红外热像仪每隔5秒记录一次吸热器迎光面的温度分布情况,吸热器背光面的N型热电偶丝每隔5秒记录一次吸热器背光面的温度分布情况。对整个实验过程中吸热器迎光面和背光面的温度分布情况进行分析,即可获得非定常非均匀热流对吸热器外壁面温度分布的影响;

[0086] 若要探究吸热器出口温度的动态性能预测方法,则首先基于步骤1~步骤10,获得吸热器出口温度保持不变时不同光照强度下氯化盐的流量值。之后依据步骤1~步骤6,获得在某一太阳能模拟器功率条件下实验系统稳定运行时吸热器出口温度,改变太阳能模拟器的功率,并将氯化盐的流量调整到稳态计算时该功率对应的流量值,记录从改变太阳能模拟器功率到吸热器出口温度稳定所需的时间,并将该时间与数值模型的计算结果进行比较,验证所提出的预测吸热器出口温度动态性能的数值模型的可靠性。

[0087] 步骤9中,计算超临界二氧化碳经中间换热器获得的热量,包括以下步骤:

[0088] SA1、基于步骤6获得的第一储盐罐内的液位高度 h_1 ,结合第一储盐罐内的初始氯化盐体积 V_0 、第一储盐罐的半径 R_1 ,以及管道内的氯化盐体积 V_1 ,计算第二储盐罐内的氯化盐体积,表示为: $V_2 = V_0 - V_1 - \pi \cdot R_1^2 \cdot h_1$;

[0089] SA2、基于步骤9获得的中间换热器进口和出口的温度 T_1 和 T_2 ,计算氯化盐在相应温度下的定容比热容 c_1 和 c_2 。进而求得超临界二氧化碳可获得的热量,表示为: $Q_0 = \rho V_2 (c_2 \cdot T_2 - c_1 \cdot T_1)$ 。

[0090] 步骤9中,计算第二储盐罐的热损失,包括以下步骤:

[0091] SB1、基于步骤6获得的第二储盐罐的氯化盐温度 T_3 ,结合基于步骤9获得的第二储盐罐的氯化盐温度 T_4 、步骤SA1获得的第二储盐罐内的氯化盐体积 V_2 ,计算氯化盐在相应温度下的定容比热容 c_3 和 c_4 。求得第二储盐罐的热损失,表示为: $Q_1 = \rho V_2 (c_3 \cdot T_3 - c_4 \cdot T_4)$ 。

[0092] 步骤10中,计算吸热器热损失和热效率的整体过程,包括以下步骤:

[0093] SC1、将吸热器迎光面各点的灰度值,带入步骤2中求解得到的能流值与灰度值之间的函数关系式中,计算吸热器迎光面各点的能流值,获得整个吸热器迎光面的能流分布情况;

[0094] SC2、计算入射辐射能:吸热器迎光面总能流值的计算公式: $Q_t = \sum_{j=1}^N I_j \cdot A_j$, Q_t 即为太阳能模拟器投射到吸热器迎光面的总能流值,也即入射辐射能; I_j 为单个测试点的能流值; A_j 为单个测试点所占的面积;

[0095] SC3、基于步骤6获得的吸热器进出口的氯化盐温度 T_{in} 和 T_{out} ,计算获得氯化盐在相应温度下的定压比热容 $c_{p,in}$ 和 $c_{p,out}$ 。读取节流件和第一差压传感器的测量值,经过转化获得氯化盐的体积流量,换算后得到氯化盐相应的质量流量 q_m ,进而求得氯化盐在流经吸热器时吸收的热量 Q_x ,计算公式为: $Q_x = q_m (c_{p,out} \cdot T_{out} - c_{p,in} \cdot T_{in})$;

[0096] SC4、计算吸热器的热损失 Q_{loss} ,计算公式为: $Q_{loss} = Q_t - Q_x$;

[0097] SC5、计算吸热器的热效率 η ,计算公式为: $\eta = Q_x / Q_t \times 100\%$ 。

[0098] 步骤9中,计算第二储盐罐储存的能量,包括以下步骤:

[0099] SD1、基于步骤6获得的第二储盐罐81内的氯化盐温度 T_5 ,计算氯化盐在 T_5 和常温 T_6

下的定容比热容 c_5 和 c_6 ,结合基于步骤SA1获得的第二储盐罐内的氯化盐体积 V_2 ,求得第二储盐罐储存的能量,表示为: $Q_0 = \rho V_2 (c_5 \cdot T_5 - c_6 \cdot T_6)$ 。

[0100] 图4展示了实验平台中吸热器46的结构和吸热器背光面若干N型热电偶丝47的示意图。吸热器结构设计为迂回形盘管,在每段垂直的吸热管上,沿水平方向布置不少于3个N型热电偶,沿竖直方向布置不少于9个N型热电偶。考虑到实验室内通过太阳能模拟器73只能对吸热器46进行单面加热,本设计在节省空间的同时增加了受热面积。

[0101] 本实验平台采用太阳能模拟器施加作用于吸热器的非均匀能流,验证氯化盐工作温度为565~700℃时实验系统运行的可靠性,开展不同光照强度、运行工况下吸热器的光热力耦合机理以及氯化盐对不同金属的腐蚀性能,研究熔盐种类、吸热器材质、吸热器涂层、吸热器结构、吸热管强化结构等对系统光热力耦合机理、储能系统性能的影响以及极端非均匀能流条件下吸热器的热应力失效机理,分析非定常非均匀能流对吸热器外壁面温度分布的影响,探究吸热器出口温度的动态性能预测方法。使用本实验平台可以开展聚焦非均匀能流条件下塔式吸热器循环模拟实验。

[0102] 与现有的太阳能模拟实验平台相比,本发明的特点在于:(1)开展吸热器出口温度高达565~700℃的太阳能循环模拟实验,现有太阳能电站中使用的工作介质和金属材质均受到了严峻的挑战,但可实现更高的光热效率,降低成本。在工作介质方面,选择热稳定型更好的氯化盐,但其在高温下具有腐蚀性强的特点。结合氯化盐的腐蚀机理,设计了储罐空气隔离系统,降低了氯化盐的腐蚀性能;在金属材质方面,对于和氯化盐直接接触的第一储盐罐、第二储盐罐、氯化盐输入通道、氯化盐输回通道、氯化盐排出通道、第一差压检测通道、第二差压检测通道等部件,选择具有优异的耐高温、耐腐蚀性能的Haynes 230,保证了实验平台的安全运行;(2)本实验平台的高温工作环境对液位、流量和差压测量设备的使用提出了挑战。为此,在雷达料位计的雷达探头下方安装可透过微波的耐高温石英玻璃作为隔温装置;在第一差压传感器和第二差压传感器的两端安装高温隔膜法兰、中低温隔膜法兰、降温翅片等,降低与差压传感器直接接触的工作介质的温度;(3)为避免氯化盐在管道中流动时凝固、堵塞管道,设计了伴热设备、管道保温材料、管道坡度、氩气吹扫辅助排盐等,并在排盐时设计了氯化盐回流通道的、氯化盐排出通道等,尽最大可能的降低氯化盐凝固的可能性;(4)设计了第二储盐罐作为高温储能罐,用于储存经太阳能模拟器辐射作用后的高温氯化盐,并在第二次实验前将高温氯化盐输送到第一储盐罐内,减少第一储盐罐内氯化盐的加热时间并减少电能消耗。在实际塔式电站的运行过程中,通过中间换热器和超临界二氧化碳交换热量,加热到特定参数的超临界二氧化碳会推动透平做功,带动发电机发电;(5)采用电阻炉作为储盐罐的加热系统,并采用“变功调节,逐级加热”的方式,在保证加热效果的基础上,避免了电阻丝加热元件与高温氯化盐的直接接触,减小了氯化盐腐蚀性的影响;(6)采用第一熔盐泵与差压式流量计结合控制氯化盐流量的方法,保证了实验的稳定高效运行;(7)设计了红外热像仪间接测量吸热器迎光面温度的方法,避免了采用N型热电偶丝测量对太阳能模拟器辐射光照的遮挡作用以及可能面临的烧毁风险;(8)设计了数据采集及控制系统,可实现实验平台的远程操作,在保证实验效果的基础上保障了实验过程的安全;(9)采用太阳光模拟系统更贴合实际的聚光太阳辐射,且不受天气变化等环境因素的影响,可以在室内稳定的开展不同光照强度、不同工况下吸热器光热力耦合机理等的实验研究。

[0103] 以上给出的实施方法是实现本发明的基本思路,本发明实施细节不限于上述过程。本领域的技术人员根据本发明的技术特征所做出的任何非本质的添加、替换,均属于本发明的保护范围。

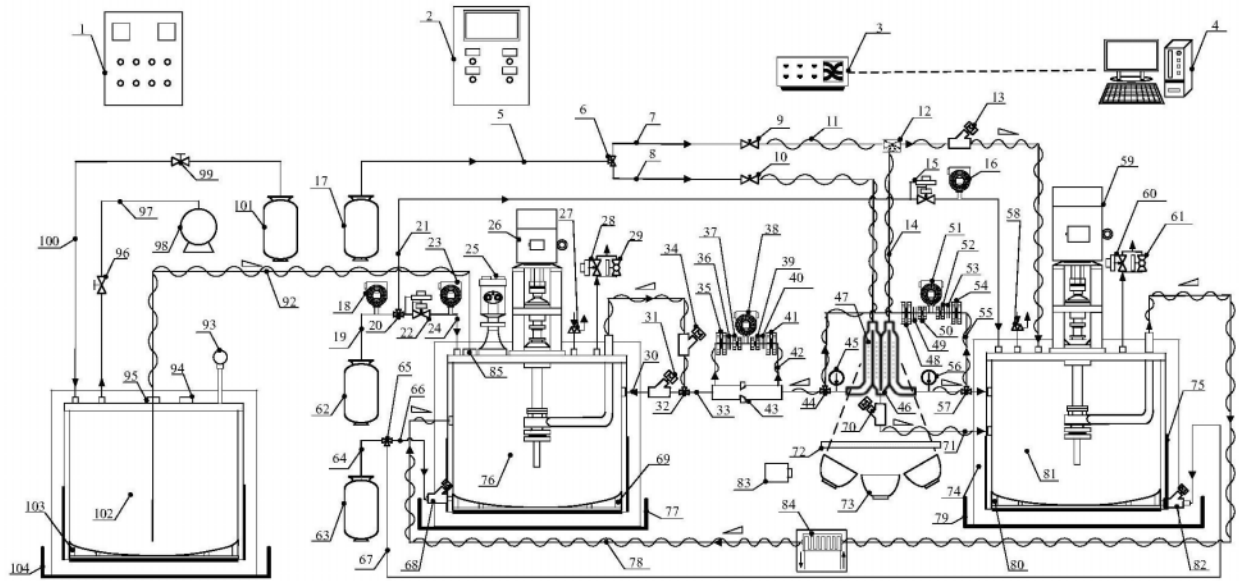


图1

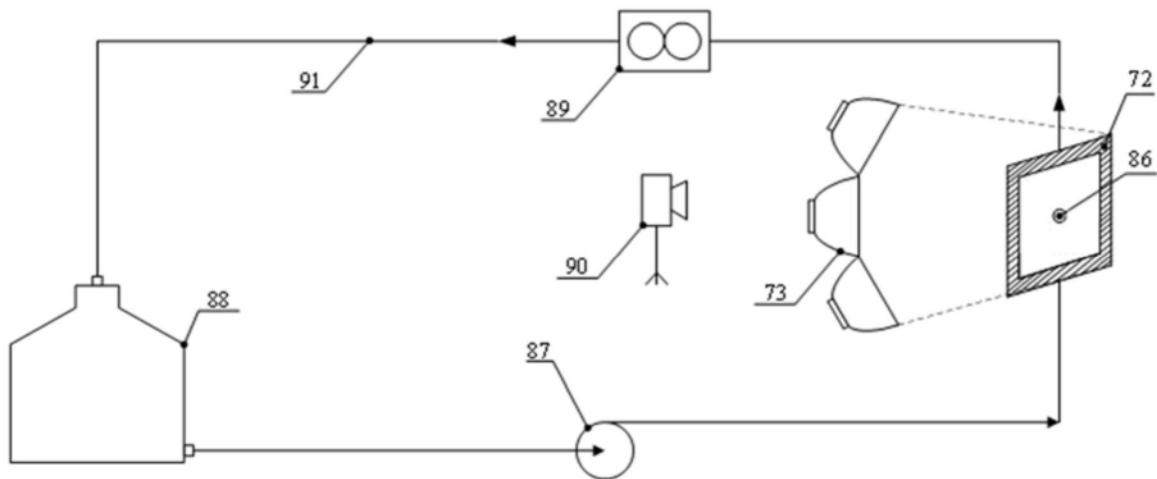


图2

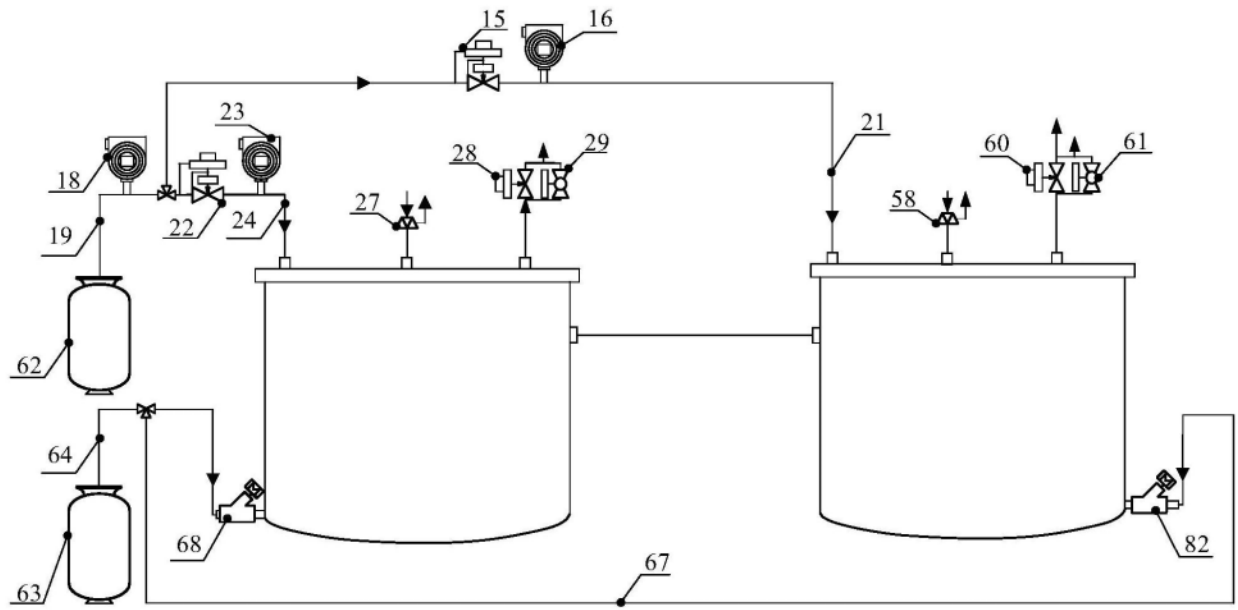


图3

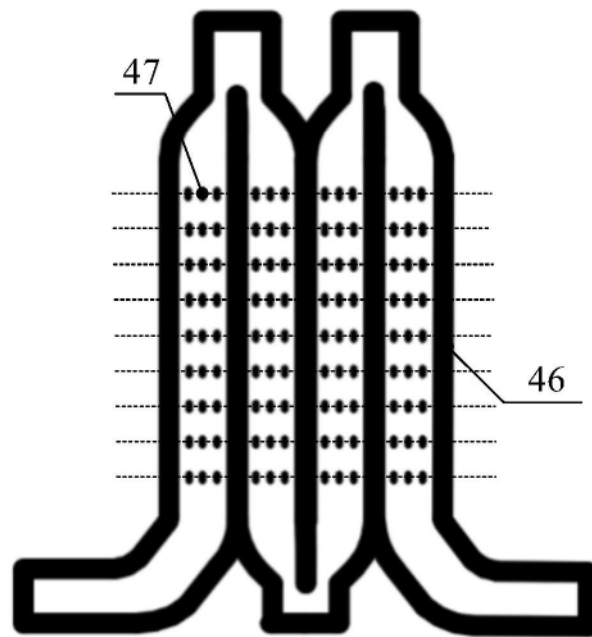


图4