



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 112309593 A

(43)申请公布日 2021.02.02

(21)申请号 201910707287.4

(22)申请日 2019.08.01

(71)申请人 北京化工大学

地址 100029 北京市朝阳区北三环东路15号

(72)发明人 卢涛 陈学 罗彦

(74)专利代理机构 北京元中知识产权代理有限公司 11223

代理人 张则武

(51)Int.Cl.

G21C 15/18(2006.01)

F28D 15/02(2006.01)

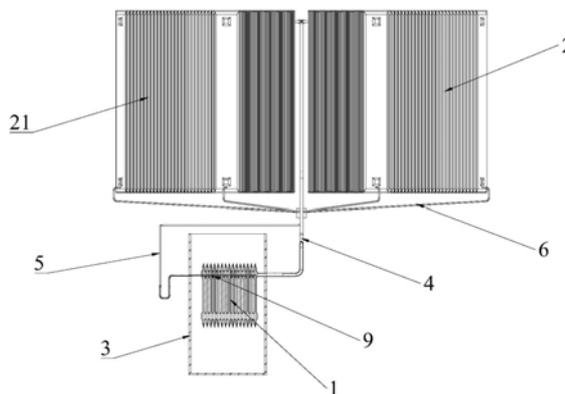
权利要求书2页 说明书7页 附图6页

(54)发明名称

一种乏燃料水池非能动余热导出热管换热系统

(57)摘要

本发明公开了一种乏燃料水池非能动余热导出热管换热系统,该系统包括蒸发器,所述蒸发器浸入乏燃料水池的水中;冷凝器,所述冷凝器设置在乏燃料水池外,所述冷凝器包括若干冷凝单元,若干冷凝单元并联布置;所述蒸发器与所述冷凝器之间通过蒸汽总管和冷凝液总管连通,形成封闭的循环热管换热回路;所述蒸汽总管和所述冷凝液总管均与所述蒸发器的上部连通。本发明的乏燃料水池非能动余热导出热管换热系统采用降膜蒸发的方法,可避免蒸发器干烧,冷凝器采用辐射状布置,增大换热效率。



1. 一种乏燃料水池非能动余热导出热管换热系统,其特征在于,包括:  
蒸发器,所述蒸发器浸入乏燃料水池的水中;  
冷凝器,所述冷凝器设置在乏燃料水池外;  
所述蒸发器与所述冷凝器之间通过蒸汽总管和冷凝液总管连通,形成封闭的循环热管换热回路;  
所述蒸汽总管和所述冷凝液总管均与所述蒸发器的上部连通。
2. 根据权利要求1所述的一种乏燃料水池非能动余热导出热管换热系统,其特征在于,所述蒸发器包括多个依次连通的蒸发片,所述蒸发片具有蒸发腔,每个所述蒸发片上端的侧壁上设有蒸汽连通口,蒸发腔通过蒸汽连通口形成蒸汽收集通道,所述蒸汽收集通道内设有与所述冷凝液总管连通的喷淋管,所述喷淋管的管壁上设有布液孔;  
优选的,所述喷淋管自所述蒸汽收集通道的一端水平贯穿至所述蒸汽收集通道的另一端。
3. 根据权利要求2所述的一种乏燃料水池非能动余热导出热管换热系统,其特征在于,每个所述蒸发片的侧壁至少在蒸汽收集通道处向外凸出形成凸包,所述布液孔设于所述喷淋管位于所述凸包处,所述凸包与所述侧壁形成使冷凝液沿所述蒸发片侧壁降膜蒸发的围堰结构。
4. 根据权利要求3所述的一种乏燃料水池非能动余热导出热管换热系统,其特征在于,所述蒸汽收集通道与所述蒸汽总管连通。
5. 根据权利要求4所述的一种乏燃料水池非能动余热导出热管换热系统,其特征在于,所述冷凝液总管与所述喷淋管的连通端设有防止蒸汽反串的下弯弯头。
6. 根据权利要求1至5任一所述的一种乏燃料水池非能动余热导出热管换热系统,其特征在于,  
所述冷凝器包括若干冷凝单元,每个所述冷凝单元包括多个依次连通的冷凝片,所述冷凝片具有冷凝腔,每个所述冷凝片上、下两端的侧壁上分别设有蒸汽连通口和冷凝液连通口,冷凝腔通过蒸汽连通口和冷凝液连通口形成蒸汽分散通道和冷凝液收集通道,所述蒸汽分散通道与所述蒸汽总管连通,所述冷凝液收集通道与所述冷凝液总管连通;  
优选的,所述蒸汽分散通道与所述蒸汽总管之间设有蒸汽分布管;  
优选的,所述冷凝液收集通道与所述冷凝液总管之间设有冷凝液收集管;  
优选的,所述冷凝液收集管设置在所述冷凝单元下端;  
优选的,所述换热片的侧壁至少在所述蒸汽分散通道和冷凝液收集通道处向外凸出形成凸包。
7. 根据权利要求6所述的一种乏燃料水池非能动余热导出热管换热系统,其特征在于,若干冷凝单元呈辐射状分散并联布置。
8. 根据权利要求7所述的一种乏燃料水池非能动余热导出热管换热系统,其特征在于,所述冷凝液收集管在冷凝液流动方向与水平面之间具有向下的坡度,若干冷凝液收集管呈圆锥面辐射状分散分布;  
优选的,所述坡度不小于 $10^{\circ}$ ;  
优选的,所述冷凝器收集管与所述冷凝液总管通过冷凝液集合管连通;  
优选的,若干蒸汽分布管呈辐射状分散分布,在一水平面上或同一圆锥曲面上。

9. 根据权利要求6所述的一种乏燃料水池非能动余热导出热管换热系统,其特征在于,若干冷凝单元平行并联布置;

优选的,所述冷凝器收集管竖直布置,依次汇集与所述冷凝液总管连通;

优选的,所述蒸汽分布管平行设置。

10. 根据权利要求1所述的一种乏燃料水池非能动余热导出热管换热系统,其特征在于,

所述蒸汽总管在蒸汽的流动方向上与水平面具有向上的坡度,所述冷凝液总管在冷凝液的流动方向上与水平面具有向下的坡度;

优选的,所述坡度不小于 $10^{\circ}$ 。

## 一种乏燃料水池非能动余热导出热管换热系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于核电厂乏燃料水池冷却技术领域,具体地说,涉及一种乏燃料水池非能动余热导出热管换热系统。

### 背景技术

[0002] 目前,在先进压水堆核电厂中,乏燃料自核反应堆芯卸出后仍然具有较大的剩余衰变功率,被暂时贮存在乏燃料贮存水池中冷却,利用外部冷却系统将乏燃料的剩余衰变热导出,并通过水对放射性进行隔离。

[0003] 核电站乏燃料池冷却系统均为能动冷却系统,通过电动泵抽出乏燃料池内的高温水流,经过热交换器的冷却后输送回乏池内实现换热。水泵由厂外电源提供动力,在丧失厂外电源的情况下,则依靠应急柴油发电机提供电力。

[0004] 然而,在一些换热条件极端恶劣、特殊事故、不可抗力等场合,如炎热天气、地震灾害、核电站应急电源切断等情况下,而核电乏燃料水池仍然需要持续冷却,否则,乏燃料池内水温将持续上升,以致沸腾蒸发,乏燃料棒有可能裸露,暴露在空气中的乏燃料组件温度会逐步升高,威胁乏燃料安全。尤其是在日本福岛核泄漏事件后,乏燃料的安全贮存受到更加广泛的关注。因此,就需要一种非能动乏燃料水池余热导出换热方式,亦即在环境温度不高于 $31^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度不高于81%的条件下,如何将乏燃料衰变功率为 $3.2\text{MW}-12.5\text{MW}$ ,亦即水池衰变热体积功率 $1-10\text{kW}/\text{m}^3$ 功率的热量通过非能动换热方式将热量导出至环境中,并确保乏燃料水池水温控制在 $45-81^{\circ}\text{C}$ 范围之内。

[0005] 因此,如何设计出一种能够具有增强热管换热器与乏燃料组件间的换热性能,保证热管换热工艺可行性,采用热管非能动冷却性能,提高乏燃料池的安全性等有益效果的换热系统成为亟待解决的问题。

[0006] 申请号为CN201520881510.4的中国专利公开了一种核电厂乏燃料水池非能动热管冷却系统,其包括蒸发器、气体上升管、冷凝器、液体下降管和冷却介质;所述蒸发器浸入乏燃料水池的水中,冷凝器设于乏燃料水池所在厂房外部,蒸发器、气体上升管、冷凝器、液体下降管依次连接而形成闭式冷却回路;冷却介质收容在闭式冷却回路中并存在气液两种状态,其由液态和气态的密度差驱动而在闭式冷却回路中进行非能动循环,通过蒸发和冷凝对乏燃料水池进行持续冷却。但是,在该专利中,蒸发器上部联箱的顶部与气体上升管相连,下部联箱的侧下部与液体下降管相连,由于液柱静压对蒸发温度的影响,使得自由液面以上蒸发管的壁面发生干烧的不利局面。

[0007] 有鉴于此,特提出本发明。

### 发明内容

[0008] 本发明要解决的技术问题在于克服现有技术的不足,提供一种避免干烧、降膜蒸发、增大换热效率的乏燃料水池非能动余热导出热管换热系统。

[0009] 为解决上述技术问题,本发明采用技术方案的基本构思是:

- [0010] 一种乏燃料水池非能动余热导出热管换热系统,包括:
- [0011] 蒸发器,所述蒸发器浸入乏燃料水池的水中;
- [0012] 冷凝器,所述冷凝器设置在乏燃料水池外;
- [0013] 所述蒸发器与所述冷凝器之间通过蒸汽总管和冷凝液总管连通,形成封闭的循环热管换热回路;
- [0014] 所述蒸汽总管和所述冷凝液总管均与所述蒸发器的上部连通。
- [0015] 上述方案中,蒸发器和冷凝器组成的封闭的循环热管换热回路,具有增强热管换热器与乏燃料组件间的换热性能,保证热管换热工艺可行性,采用热管非能动冷却性能,提高乏燃料池的安全性的优点。
- [0016] 进一步的,
- [0017] 所述蒸发器包括多个依次连通的蒸发片,所述蒸发片具有蒸发腔,每个所述蒸发片上端的侧壁上设有蒸汽连通口,蒸发腔通过蒸汽连通口形成蒸汽收集通道,所述蒸汽收集通道内设有与所述冷凝液总管连通的喷淋管,所述喷淋管的管壁上设有布液孔;
- [0018] 优选的,所述喷淋管自所述蒸汽收集通道的一端水平贯穿至所述蒸汽收集通道的另一端。
- [0019] 进一步的,
- [0020] 每个所述蒸发片的侧壁至少在蒸汽收集通道处向外凸出形成凸包,所述布液孔设于所述喷淋管位于所述凸包处,所述凸包与所述侧壁形成使冷凝液沿所述蒸发片侧壁降膜蒸发的围堰结构。
- [0021] 进一步的,
- [0022] 所述蒸汽收集通道与所述蒸汽总管连通。
- [0023] 上述方案中,蒸发器采用上部进液、顶管喷淋、降膜蒸发的相变换热方式,在蒸发器内部上端设置一根水平喷淋管,管壁下端开若干布液孔,并采用围堰溢流方式将冷凝液均匀分布于换热器内壁面,形成极薄液膜,液膜受热蒸发,其蒸汽在蒸发器上部收集从而进入蒸汽总管,保证汽液迅速分离;该设计既保证了降膜蒸发高效换热,也可以有效克服由于蒸发器底部液体有较大的静压差导致饱和温度提升,防止蒸发器底部不沸腾,而蒸发器顶部干烧的不利局面发生。
- [0024] 进一步的,
- [0025] 在所述冷凝液总管与所述蒸发器的连通处设有防止蒸汽反串的下弯弯头。
- [0026] 上述方案中,在所述冷凝液总管与所述蒸发器的连通处设置下弯弯头,防止蒸发器内的蒸汽反串进入冷凝液总管,在冷凝液总管中形成汽包,影响装置正常运行。
- [0027] 进一步的,
- [0028] 所述冷凝器包括若干冷凝单元,每个所述冷凝单元包括多个依次连通的冷凝片,所述冷凝片具有冷凝腔,每个所述冷凝片上、下两端的侧壁上分别设有蒸汽连通口和冷凝液连通口,冷凝腔通过蒸汽连通口和冷凝液连通口形成蒸汽分散通道和冷凝液收集通道,所述蒸汽分散通道与所述蒸汽总管连通,所述冷凝液收集通道与所述冷凝液总管连通;
- [0029] 优选的,所述蒸汽分散通道与所述蒸汽总管之间设有蒸汽分布管;
- [0030] 优选的,所述冷凝液收集通道与所述冷凝液总管之间设有冷凝液收集管;
- [0031] 优选的,所述冷凝液收集管设置在所述冷凝单元下端;

[0032] 优选的,所述换热片的侧壁至少在所述蒸汽分散通道和冷凝液收集通道处向外凸出形成凸包。

[0033] 上述方案中,冷凝单元包括多个冷凝单元,冷凝单元包括多个冷凝片,使蒸汽在冷凝片内竖壁上凝结成液态水,在重力的驱动下,下降至冷凝液收集管,增大了冷凝器的非能动热量导出量。

[0034] 进一步的,

[0035] 若干冷凝单元呈辐射状分散并联布置;

[0036] 进一步的,所述冷凝液收集管在冷凝液流动方向与水平面之间具有向下的坡度,若干冷凝液收集管呈圆锥面辐射状分散分布;

[0037] 优选的,所述坡度不小于 $10^{\circ}$ ;

[0038] 优选的,所述冷凝器收集管与所述冷凝液总管通过冷凝液集合管连通;

[0039] 优选的,若干蒸汽分布管呈辐射状分散分布,在一水平面上或同一圆锥曲面上。

[0040] 上述方案中,冷凝单元的一端指向中心,呈辐射状并联布置,使得蒸汽和冷凝液管路阻力均等,有利于蒸汽流量均布。

[0041] 进一步的,

[0042] 若干冷凝单元平行并联布置;

[0043] 优选的,所述冷凝器收集管竖直布置,依次汇集与所述冷凝液总管连通;

[0044] 优选的,所述蒸汽分布管平行设置。

[0045] 上述方案中,冷凝单元也可采用平行并联布置,解决了冷凝器布置空间受限的问题。

[0046] 进一步的,

[0047] 所述蒸汽总管在蒸汽的流动方向上与水平面具有向上的坡度,所述冷凝液总管在冷凝液的流动方向上与水平面具有向下的坡度;

[0048] 优选的,所述坡度不小于 $10^{\circ}$ 。

[0049] 述方案中,冷凝液收集管和蒸汽总管在冷凝液和蒸汽流动方向上与水平面之间具有一定的坡度,有利于冷凝液和蒸汽的流动。

[0050] 采用上述技术方案后,本发明与现有技术相比具有以下有益效果。

[0051] 1、本发明蒸发器采用上部进液、顶管喷淋、降膜蒸发的相变换热方式,在蒸发器内部上端设置一根水平喷淋管,管壁下端开若干布液孔,并采用围堰溢流方式将冷凝液均匀分布于换热器内壁面,形成极薄液膜,液膜受热蒸发,其蒸汽在蒸发器上部收集从而进入蒸汽总管,保证汽液迅速分离;该设计既保证了降膜蒸发高效换热,也可以有效克服由于蒸发器底部液体有较大的静压差导致饱和温度提升,防止蒸发器底部不沸腾,而蒸发器顶部干烧的不利局面发生;

[0052] 2、本发明冷凝单元的一端指向中心,呈辐射状并联布置,使得蒸汽和冷凝液管路阻力均等,有利于蒸汽流量均布;

[0053] 3、本发明冷凝单元立式设置,使蒸汽在冷凝器内竖壁上凝结成液态水,在重力的驱动下,下降至冷凝液收集管;

[0054] 4、本发明蒸发器和冷凝器采用冲片焊接成型工艺,冲片之间合理的间隙结构给予沸腾或凝结相变充足的空间,使得换热与流动高效进行;

- [0055] 5、本发明冷凝单元也可采用平行并联布置,解决了冷凝器布置空间受限的问题;
- [0056] 6、本发明冷凝液收集管和蒸汽总管在冷凝液和蒸汽流动方向上与水平面之间具有一定的坡度,有利于冷凝液和蒸汽的流动;
- [0057] 7、本发明在所述冷凝液总管与所述蒸发器的连通处设有下弯弯头,防止蒸发器中的蒸汽反串进入到冷凝液总管中。
- [0058] 下面结合附图对本发明的具体实施方式作进一步详细的描述。

### 附图说明

[0059] 附图作为本发明的一部分,用来提供对本发明的进一步的理解,本发明的示意性实施例及其说明用于解释本发明,但不构成对本发明的不当限定。显然,下面描述中的附图仅仅是一些实施例,对于本领域普通技术人员来说,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他附图。在附图中:

- [0060] 图1是本发明热管换热系统主视图;
- [0061] 图2是本发明热管换热系统俯视图;
- [0062] 图3是本发明图2中A-A向剖视图;
- [0063] 图4是本发明蒸发器示意图;
- [0064] 图5是本发明图4中B处放大图;
- [0065] 图6是本发明冷凝单元主视图;
- [0066] 图7是本发明冷凝单元俯视图;
- [0067] 图8是本发明图6中C处放大图;
- [0068] 图9是本发明图7中D处放大图;
- [0069] 图10是本发明热管换热系统另一示意图。
- [0070] 图中:1、蒸发器;11、蒸发片;12、蒸发腔;13、喷淋管;14、布液孔;15、蒸汽收集通道;16、冷凝液分散通道;17、隔板;18、溢流口;2、冷凝器;21、冷凝单元;211、冷凝片;212、冷凝腔;213、蒸汽分散通道;214、冷凝液收集通道;3、乏燃料水池;4、蒸汽总管;5、冷凝液总管;6、冷凝液收集管;7、下弯弯头;8、蒸汽分布管;9、凸包。
- [0071] 需要说明的是,这些附图和文字描述并不旨在以任何方式限制本发明的构思范围,而是通过参考特定实施例为本领域技术人员说明本发明的概念。

### 具体实施方式

[0072] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合本发明实施例中的附图,对实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,以下实施例用于说明本发明,但不用来限制本发明的范围。

[0073] 在本发明的描述中,需要说明的是,术语“上”、“下”、“前”、“后”、“左”、“右”、“竖直”、“内”、“外”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系,仅是为了便于描述本发明和简化描述,而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作,因此不能理解为对本发明的限制。

[0074] 在本发明的描述中,需要说明的是,除非另有明确的规定和限定,术语“安装”、“相连”、“连接”应做广义理解,例如,可以是固定连接,也可以是可拆卸连接,或一体地连接;可

以是机械连接,也可以是电连接;可以是直接相连,也可以通过中间媒介间接相连。对于本领域的普通技术人员而言,可以具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。

[0075] 如图1至图10所示,本发明提供一种乏燃料水池非能动余热导出热管换热系统,该系统包括蒸发器1和冷凝器2,蒸发器1浸入乏燃料水池3的水中;冷凝器2设置在乏燃料水池3外,冷凝器2包括若干冷凝单元21,若干冷凝单元21并联布置;蒸发器1与冷凝器2之间通过蒸汽总管4和冷凝液总管5连通,形成封闭的循环热管换热回路;蒸汽总管4和冷凝液总管5均与蒸发器1的上部连通。将蒸发器1置于乏燃料水池3中,蒸发器1内部的冷却介质优选为去离子水,还可以是其他各种可用的中温热管用介质,如氨、甲醇、正戊烷等,只要冷却介质的工作温度范围能涵盖 $48.9^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ ,并且冷却介质本身与不锈钢相容即可。根据乏燃料水池3所需温度并考虑自然对流传热温差确定蒸发温度;蒸发器1内的去离子水受热蒸发沸腾,吸收蒸发潜热,产生水蒸气,水蒸气沿蒸汽总管4至各个冷凝单元21;在外部环境冷却作用下,冷凝单元21中蒸汽冷凝成液态水,将凝结潜热释放到大气环境中;冷凝液经冷凝液总管5,在重力的作用下回流至蒸发器1,在蒸发器1的壁面形成降膜蒸发,冷凝液再次成为蒸汽,利用液态和气态的密度差驱动而在封闭的循环热管换热回路中进行非能动循环,实现对乏燃料水池3的持续冷却如此循环,将乏燃料的衰变热通过非能动方式导出至环境。充分考虑到液柱静压对蒸发温度的影响,将冷凝液回流从传统的下部回液改到蒸发器1上部回液,冷凝液均匀分布于蒸发器1内壁表面,形成降膜蒸发,增加蒸发面积,可防止自由液面上壁面干烧。

[0076] 实施例一

[0077] 如图1至图10所示,本实施例提供了一种乏燃料水池非能动余热导出热管换热系统,该系统包括蒸发器1和冷凝器2,蒸发器1浸入乏燃料水池3的水中;冷凝器2设置在乏燃料水池3外,冷凝器2包括若干冷凝单元21,若干冷凝单元21并联布置;蒸发器1与冷凝器2之间通过蒸汽总管4和冷凝液总管5连通,形成封闭的循环热管换热回路;蒸汽总管4和冷凝液总管5均与蒸发器1的上部连通。

[0078] 具体的,如图4和图5所示,蒸发器1包括多个依次连接的蒸发片11,蒸发片11由1mm厚的不锈钢板冲压成型,然后逐次熔焊内外边缘,形成具有一定蒸发腔12的密封容器。由于蒸发腔12内为负压,必要时可以冲出凹陷支撑点,以满足结构强度需要。该冲压焊接结构的蒸发片11不仅具有较大的换热面积,而且具有较大的沸腾气泡输运空间,有利于沸腾换热,使得换热与流动高效进行。蒸发片11上、下两端的侧壁上分别设有蒸汽连通口和冷凝液连通口,蒸发腔12通过蒸汽连通口和冷凝液连通口形成蒸汽收集通道15和冷凝液分散通道16,蒸汽收集通道15与蒸汽总管4连通,将蒸发器1内蒸发产生的蒸汽循环进入冷凝器2。蒸发片11的侧壁至少在蒸汽收集通道15和冷凝液分散通道16处向外凸出形成凸包9,位于蒸汽收集通道15处的侧壁与凸包9的连接处设有隔板17,隔板17的上部设有溢流口18,凸包9与侧壁之间形成使冷凝液沿蒸发片11侧壁降膜蒸发的围堰结构。蒸汽收集通道15内水平贯穿设置喷淋管13,喷淋管13的管壁位于凸包9处设有布液孔14,优选的,喷淋管13的下管壁设有布液孔14。如图3所示,冷凝液总管5与蒸发器1的连通处设有防止蒸汽反串的下弯弯头7。

[0079] 详细的,冷凝液通过冷凝液总管5回流至蒸发器1上部,冷凝液经喷淋管13的布液孔14注入由凸包9和隔板17形成的位于蒸发器1顶部的围堰结构中,以围堰溢流方式通过溢

流口18将冷凝液均匀分布于蒸发器1内壁表面,形成极薄液膜,液膜受热蒸发,其蒸汽在蒸发器1上部收集从而进入蒸汽总管4,保证汽液迅速分离。上述技术方案既保证了降膜蒸发高效换热,也可以有效克服由于蒸发器1底部液体有较大的静压差导致饱和温度提升,防止蒸发器1底部不沸腾,而蒸发器1顶部干烧的不利局面发生。进一步的,为了防止蒸发器1中产生的蒸汽反窜进入冷凝液总管5中,在冷凝液总管5与蒸发器1的连通处设有防止蒸汽反串的下弯弯头7,优选的,下弯弯头7为U型反水弯头。

[0080] 进一步的,如图6至图8所示,冷凝单元21竖直放置,冷凝单元21包括多个依次连接的冷凝片211,冷凝片211具有冷凝腔212,冷凝片211上、下两端的侧壁上分别设有蒸汽连通口和冷凝液连通口,冷凝腔212通过蒸汽连通口和冷凝液连通口形成蒸汽分散通道213和冷凝液收集通道214,换热片的侧壁至少在蒸汽分散通道213和冷凝液收集通道214处向外凸出形成凸包9。每个蒸汽分散通道213与蒸汽总管4连通,每个冷凝液收集通道214与冷凝液总管5连通;优选的,蒸汽分散通道213与蒸汽总管4通过蒸汽分布管8连通;优选的,冷凝液收集通道214与冷凝液总管5通过冷凝液收集管6连通;优选的,冷凝液收集管6设置在冷凝单元21下端。

[0081] 详细的,如图8和图9所示,蒸汽在冷凝腔212内沿冷凝片211的竖壁凝结成液态水,在重力的驱动下,下降至冷凝液收集通道214后由冷凝液收集管6收集后汇入冷凝液总管5循环进入蒸发器1,冷凝液在蒸发器1内蒸发后形成蒸汽,由于蒸汽密度较小,蒸汽上升至蒸汽分散通道213后由蒸汽总管4循环进入冷凝器2。优选的,蒸汽由蒸汽总管4收集后经蒸汽分布管8将蒸汽分配至各个冷凝单元21。

[0082] 蒸汽总管4在蒸汽的流动方向上与水平面具有向上的坡度,以便于密度较低的蒸汽向上流动。冷凝液总管5在冷凝液的流动方向上与水平面具有向下的坡度;以便于密度较大的冷凝液向下流动。

[0083] 优选的,坡度不小于 $10^{\circ}$ 。

[0084] 实施例二

[0085] 如图1和图2所示,本实施例是对实施例一的进一步补充,若干冷凝单元21呈辐射状分散并联布置;上述技术方案的优势在于各并联结构的流动阻力均等,有利于蒸汽流量均匀分布,充分发挥每一个冷端冷凝器2传热性能。

[0086] 优选的,冷凝液收集管6在冷凝液流动方向与水平面之间具有向下的坡度,若干冷凝液收集管6呈圆锥面辐射状分散分布;有利于冷凝液的收集,作为本实施例的最优选择,坡度不小于 $10^{\circ}$ ;冷凝器2收集管与冷凝液总管5通过冷凝液集合管连通;

[0087] 进一步的,若干蒸汽分布管8呈辐射状分散分布,在一水平面上或同一圆锥曲面上。由于蒸汽分布管8位于辐射状的中心,温度较高,因此辐射状的中心区域压力较小,而辐射状的边缘区域温度较低,因此辐射状的边缘区域压力较小,在冷凝器2所在区域形成烟囱效应,提高冷凝器2外部空气的气流速度,从而强化冷凝器2的换热能力,优选的,还可在冷凝器2外部加设垂直外罩,进一步提高冷凝器2的换热性能。

[0088] 实施例三

[0089] 如图10所示,本实施例与实施例二的区别在于,若干冷凝单元21平行并联布置;

[0090] 优选的,冷凝液收集管6平行竖直布置,依次汇集与冷凝液总管5连通;

[0091] 优选的,蒸汽分布管8平行设置。

[0092] 具体的,若冷凝器2布置空间受限,冷凝单元21也可采用平行并联布置,即冷凝单元21以一定间隔相互平行排列,各蒸汽分布管8与蒸汽总管4垂直,蒸汽从总管依次进入各蒸汽分布管8。冷凝单元21平行并联布置,该布置方式空间紧凑、规则,适用于布置空间受限条件,该布置方式汽液流经路程一致,流量分布趋于均匀。

[0093] 根据冗余设计思想和单一故障原则,本发明可以根据需要关闭其中某些冷凝单元21,其他工作的冷凝单元21的蒸汽流量的均匀性不受影响;该换热系统也可以看成一个独立的换热系统,可以与其他相同的独立换热系统,通过管道分别实现蒸发器1和冷凝器2的并联,确保某一蒸发器1或者某一冷凝单元21出现故障时,乏燃料水池3衰变热也能非能动安全导出。

[0094] 以上所述仅是本发明的较佳实施例而已,并非对本发明作任何形式上的限制,虽然本发明已以较佳实施例揭露如上,然而并非用以限定本发明,任何熟悉本专利的技术人员在不脱离本发明技术方案范围内,当可利用上述提示的技术内容作出些许更动或修饰为等同变化的等效实施例,但凡是未脱离本发明技术方案的内容,依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化与修饰,均仍属于本发明方案的范围内。

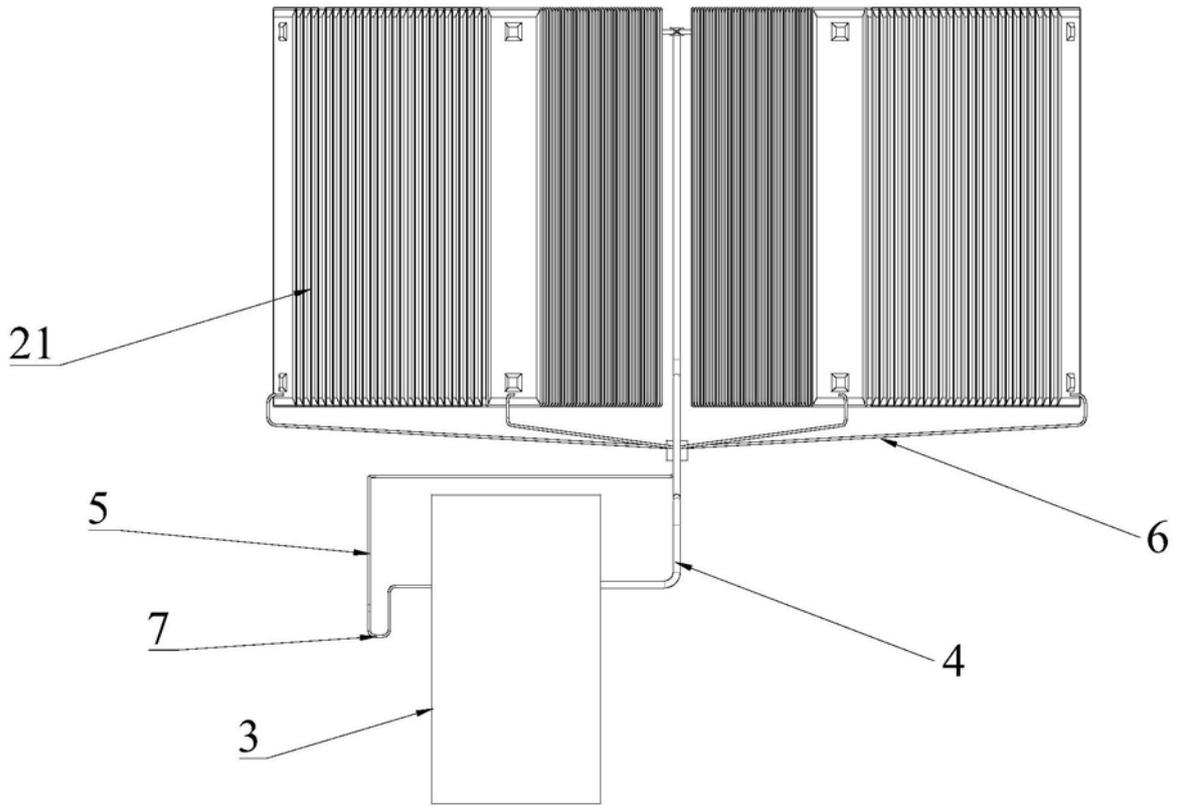


图1

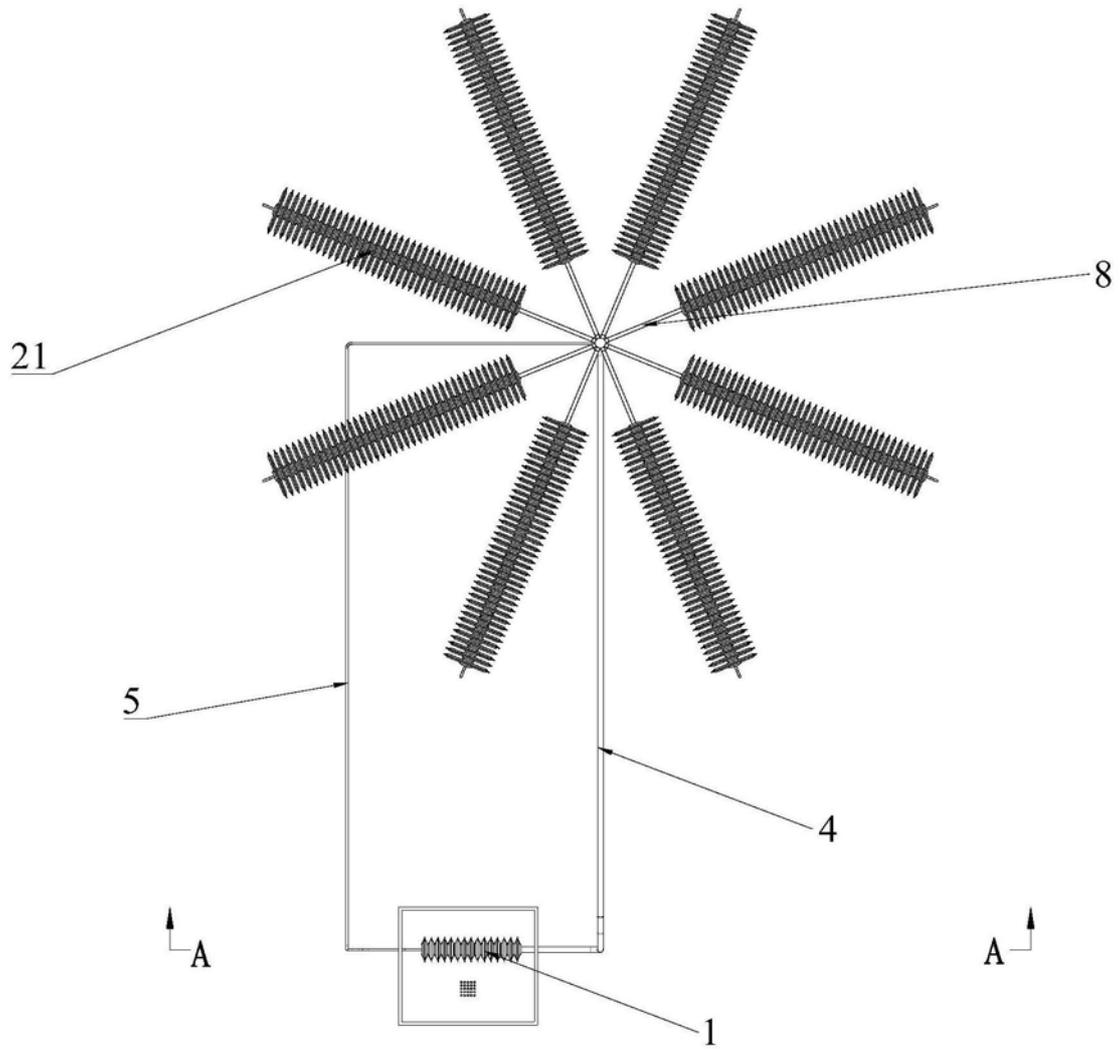


图2

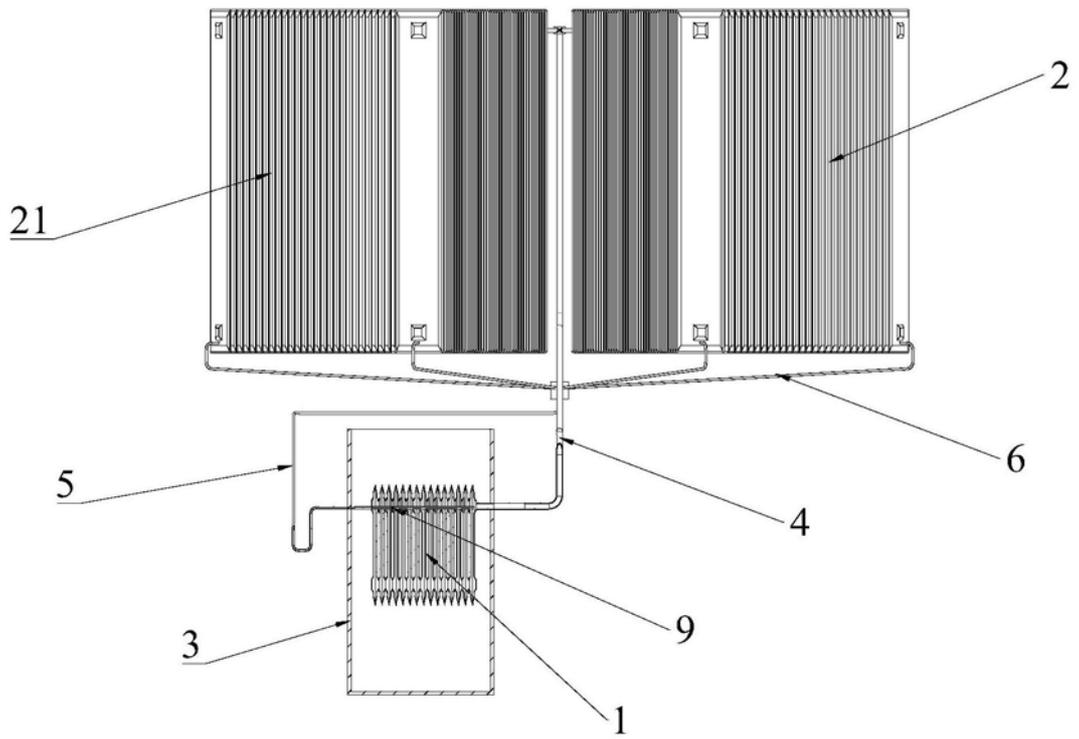


图3

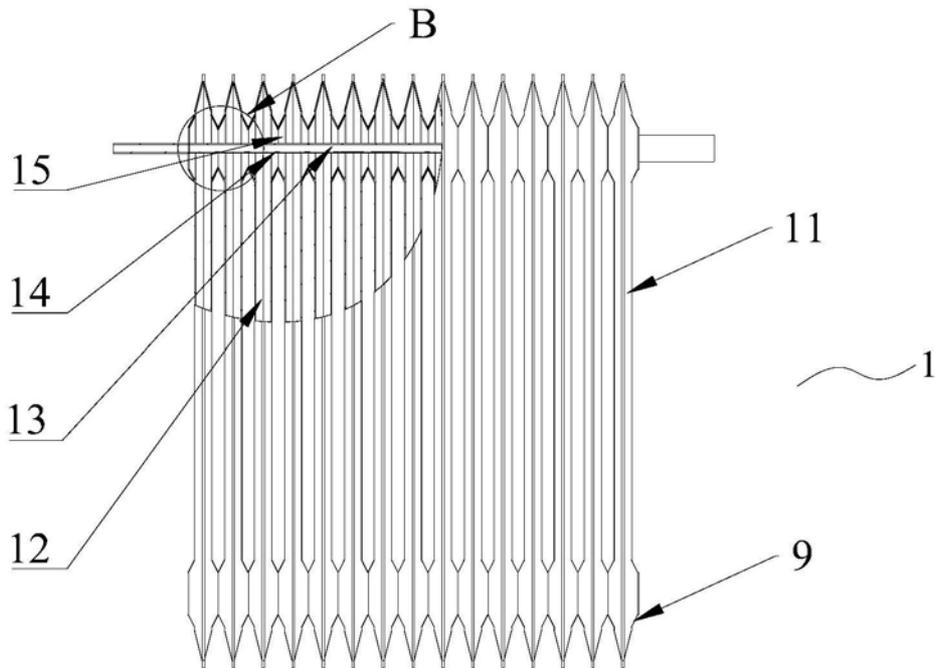


图4

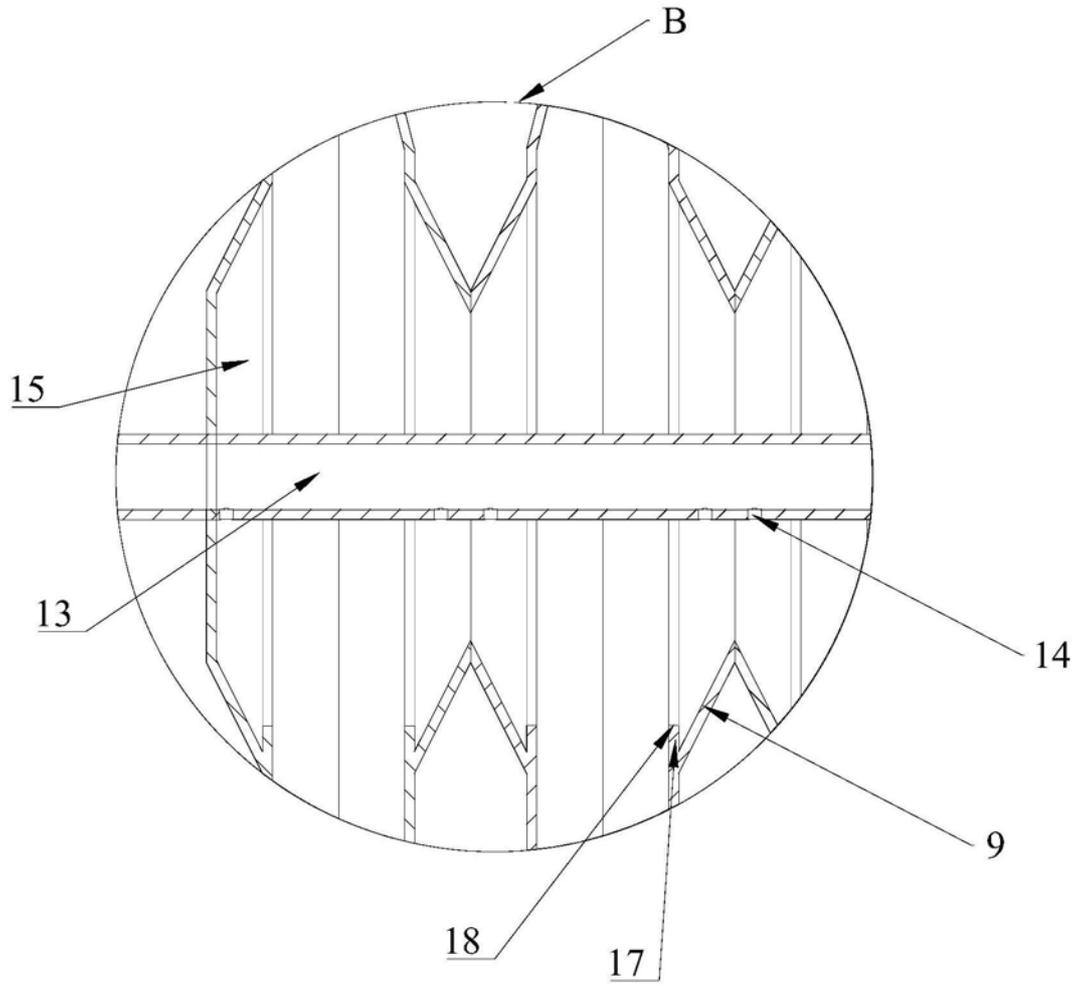


图5

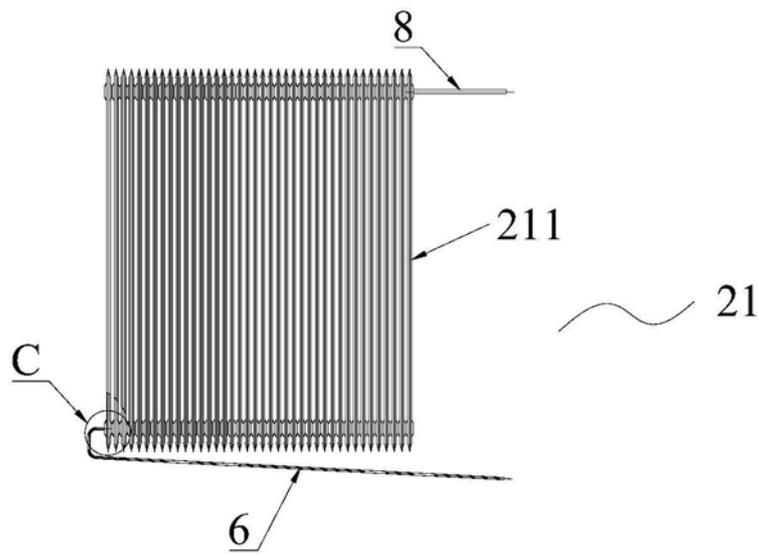


图6

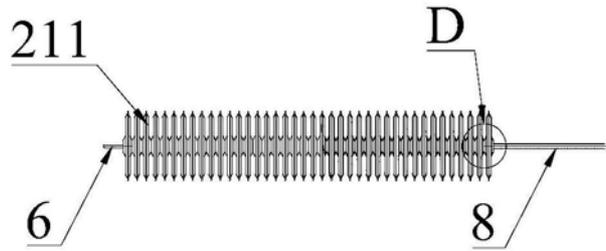


图7

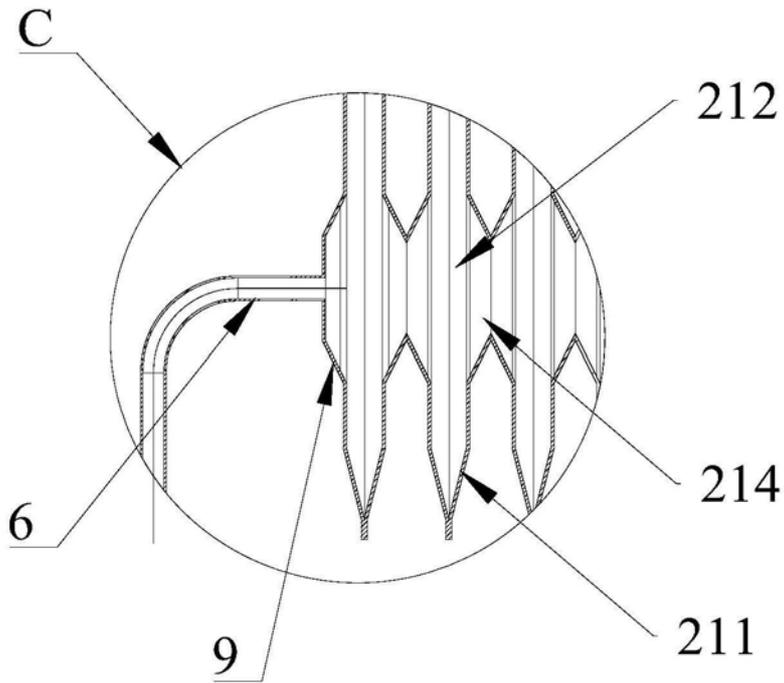


图8

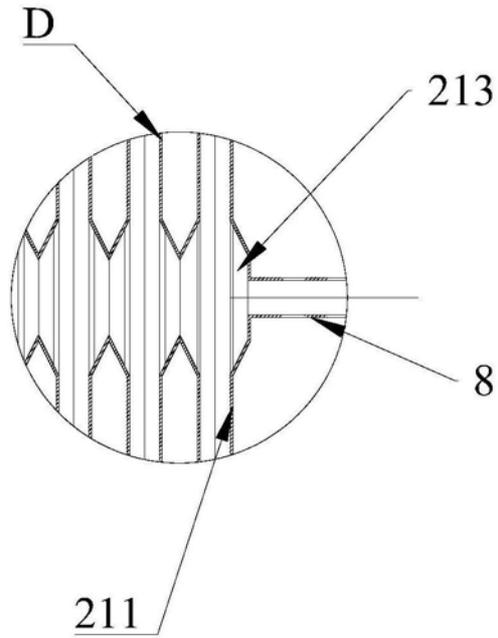


图9

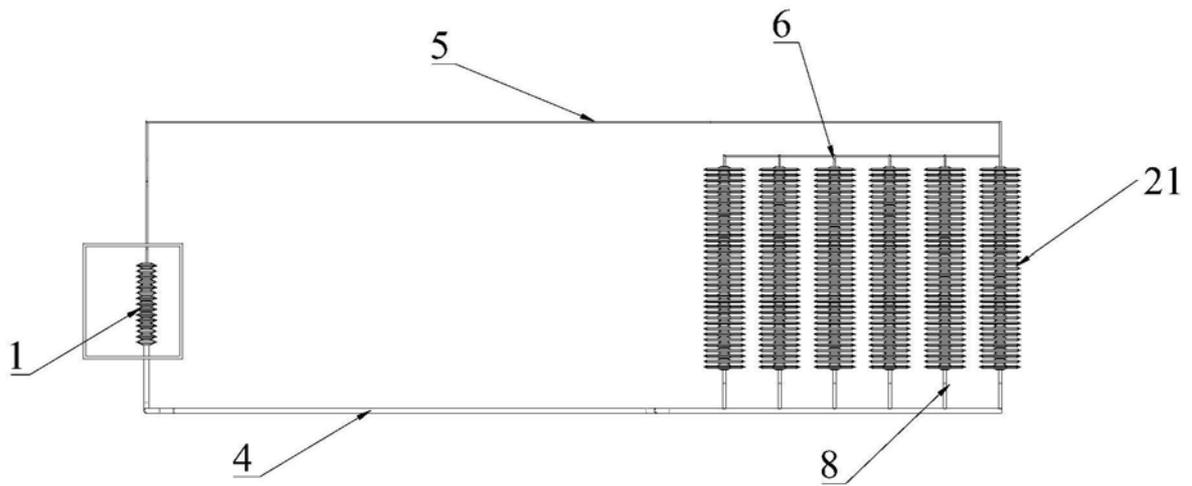


图10