



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106918622 B

(45)授权公告日 2019.07.16

(21)申请号 201710168093.2

US 7293604 B2,2007.11.13,

(22)申请日 2017.03.21

CN 205665188 U,2016.10.26,

(65)同一申请的已公布的文献号

CN 102081060 A,2011.06.01,

申请公布号 CN 106918622 A

CN 103033532 A,2013.04.10,

(43)申请公布日 2017.07.04

审查员 董娟

(73)专利权人 哈尔滨工程大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区南  
通大街145号哈尔滨工程大学科技处  
知识产权办公室

(72)发明人 谷海峰 孙中宁 徐慧强 周艳民

孟兆明 阎昌琪

(51)Int.Cl.

G01N 25/20(2006.01)

(56)对比文件

CN 103424423 A,2013.12.04,

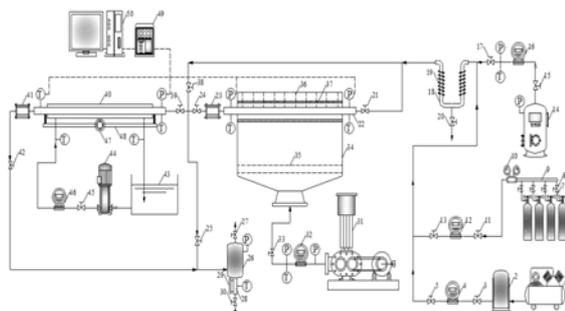
权利要求书2页 说明书7页 附图1页

(54)发明名称

一种宽过冷度含多元气体的水平管内蒸汽  
冷凝换热实验系统

(57)摘要

本发明涉及反应堆安全技术设施领域,尤其涉及一种用于研究核电站安全壳过滤排放系统内冷凝换热器性能的宽过冷度含多元气体的水平管内蒸汽冷凝换热实验系统,该系统同样适用于其它领域含多元不凝性气体的水平管内蒸汽流动冷凝换热特性研究。包括蒸汽供应系统、管内空气供应系统、氦气供应系统、水冷子系统、空冷子系统、汽水分离系统和数据采集系统,其特征在于:水冷子系统包括套管换热器和冷却水系统。本发明实现了在较宽泛的壁面过冷度范围内,进行水平和倾斜条件下管内含多组分不凝性气体的蒸汽流动冷凝换热特性的实验研究,以此更深入地了解冷凝换热机理,为冷凝器设计、强化换热元件开发和换热器运行技术提供科学依据。



1. 一种宽过冷度含多元气体的水平管内蒸汽冷凝换热实验系统,包括蒸汽供应系统、管内空气供应系统、氦气供应系统、水冷子系统、空冷子系统、汽水分离系统和数据采集系统,其特征在于:水冷子系统包括套管换热器和冷却水系统;空冷子系统包括换热管、空气风道和冷却空气系统,空冷子系统内水平换热管置于空气风道内组成空冷实验体,空气风道底端与冷却空气系统相连,换热管入口与蒸汽供应系统、管内空气供应系统和氦气供应系统相连,从而实现多元气体混合的管内冷凝换热实验需求;换热管出口经过可视化观察段与汽水分离系统相连,蒸汽在换热管内被管外侧空气冷却发生凝结后,汽水混合物进入汽水分离系统,分离出的气体从汽水分离器顶部管道排放到大气中,凝液从底部管道进入凝液罐后经排水阀排出;水冷子系统内实验体为由换热管与外套管同轴布置而成的套管换热器,换热器环腔空间与冷却水系统相连,换热管入口通过高压软管与蒸汽供应系统、空气供应系统和氦气供应系统相连,换热管出口通过可视化观察段和高压软管与汽水分离系统相连,与空冷子系统相同,发生凝结后的汽水混合物进入汽水分离系统进行气体与凝液的分离后排出;两套系统间通过四通管道以及阀门组与蒸汽供应系统、空气供应系统和氦气供应系统相互连接,通过一定的操作可以实现两套系统的独立工作和耦合工作。

2. 根据权利要求1所述的一种宽过冷度含多元气体的水平管内蒸汽冷凝换热实验系统,其特征在于:所述蒸汽供应系统包括锅炉,由锅炉产生的饱和蒸汽经过蒸汽输送管道与换热管入口主管道相连,蒸汽输送管道采用多组不同直径管道并联的方式,在每组管道上设置蒸汽流量计,多组不同量程的流量计能满足在宽泛的蒸汽流量范围内进行实验的需求;在流量计前后稳定长度外设置截止阀与温度、压力测点。

3. 根据权利要求1所述的一种宽过冷度含多元气体的水平管内蒸汽冷凝换热实验系统,其特征在于:所述管内空气供应系统包括空气压缩机和储气罐;空气压缩机产生一定压力的压缩空气注入储气罐内,压缩空气经过储气罐出口管道上的减压阀与换热管入口主管道相连;空气输送管道采用多组不同直径管道并联的方式,在每组管道上设置管内空气质量流量计,流量计后设置流量调节阀。

4. 根据权利要求1所述的一种宽过冷度含多元气体的水平管内蒸汽冷凝换热实验系统,其特征在于:所述氦气供应系统由高压储气瓶、汇流排和减压阀组成;若干高压氦气瓶通过金属软管及阀门并联接入汇流排主气管道后,经过减压阀和氦气输送管道与换热管入口相连;氦气输送管道上设置管内氦气流量计,流量计后设置流量调节阀。

5. 根据权利要求1所述的一种宽过冷度含多元气体的水平管内蒸汽冷凝换热实验系统,其特征在于:所述空冷子系统的冷却空气系统包括罗茨鼓风机、空气流量计以及相应管道与阀门;由罗茨鼓风机提供的空气通过空气输送管道与实验体的空气风道相连接,在风道中横掠换热管吸收热量,最后排放至大气环境中。

6. 根据权利要求1所述的一种宽过冷度含多元气体的水平管内蒸汽冷凝换热实验系统,其特征在于:所述空冷子系统的空气风道入口处设置存在一定间隔的双层孔板;由冷却空气系统提供的空气经过双层孔板均流后进入空气风道之中,确保空气风道内截面风速均匀。

7. 根据权利要求1所述的一种宽过冷度含多元气体的水平管内蒸汽冷凝换热实验系统,其特征在于:所述空冷子系统内的空气风道的内壁上设置一定数目的槽道,安装对应数目的水平贴管。

8. 根据权利要求1所述的一种宽过冷度含多元气体的水平管内蒸汽冷凝换热实验系统,其特征在于:所述空冷子系统内换热管上部的空气风道由若干等间距布置的隔板分成若干独立空间,隔板由导热能力较低的材料制成;每个隔板内分别设置温度测点测量空气温度。

9. 根据权利要求1所述的一种宽过冷度含多元气体的水平管内蒸汽冷凝换热实验系统,其特征在于:所述水冷子系统的冷却水系统由冷却水池、离心泵、冷却水流量计和相应的管道与阀门组成;冷却水经由离心泵从水池中抽出,经过冷却水流量调节阀和流量计进入实验段环腔中,与换热管内蒸汽形成逆向流动;吸收热量后重新回到冷却水箱之中。

10. 根据权利要求1所述的一种宽过冷度含多元气体的水平管内蒸汽冷凝换热实验系统,其特征在于:所述水冷子系统的实验段安装在可调角度的支撑平台之上;通过改变支撑平台的水平角度,实现不同倾斜条件下的冷凝换热实验。

## 一种宽过冷度含多元气体的水平管内蒸汽冷凝换热实验系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及反应堆安全技术设施领域,尤其涉及一种用于研究核电站安全壳过滤排放系统内冷凝换热器性能的宽过冷度含多元气体的水平管内蒸汽冷凝换热实验系统,该系统同样适用于其它领域含多元不凝性气体的水平管内蒸汽流动冷凝换热特性研究。

### 背景技术

[0002] 水平管内冷凝换热过程具有独特的液膜不均分布的特点,从而局部具有极高的换热系数。基于这种冷凝形式而设计的冷凝器拥有更强的换热能力,较高的抗震与耐压效果,因此被广泛地应用于核能、化工、航天以及能源领域。在核电站安全壳过滤排放系统中,通过采用水平管冷凝换热器回收部分凝液的方式,延长了文丘里水洗器的高效过滤时间,从而可以在严重事故发生后的72小时甚至更长时间内,保证安全壳压力不超出其承压极限,避免放射性物质的大量外泄,减少对人员及环境的伤害。当发生一回路冷却剂丧失、主蒸汽管道破裂叠加堆芯融化的严重事故时,大量蒸汽将被排放到安全壳内,同时熔融堆芯与混凝土反应产生的不凝性气体(包含氢气)也将进入到安全壳内,从而使安全壳内积聚大量由蒸汽、空气和氢气组成的多元混合气体。在安全壳过滤排放系统工作过程中,这些气体进入到水平管冷凝换热器时,会出现含多元不凝性气体的管内冷凝换热过程。在冷凝器的实际应用之中,不凝性气体是影响其工作特性的重要因素之一。当蒸汽中含有不凝性气体时,换热器内的冷凝换热能力会受到很大程度的削弱。根据国外学者的实验分析可知:当水蒸汽中含有质量份额0.5%的空气时,冷凝换热系数会骤降50%。目前海水淡化、化学材料制取和核电站安全系统设计领域都在寻找方法降低不凝性气体对冷凝换热抑制效果的方法。由此可知,研究含有多组分不凝性气体的蒸汽冷凝换热特性对于各领域内的冷凝器工程应用具有重要意义。此外,由于核电站非能动安全的需求,在水平管换热器的管外采用空气自然对流冷却的方式,从而使得冷凝换热在较低的壁面过冷度下进行。因此,为保证在核电站发生严重事故的特殊情况下水平管冷凝器可靠运行,需要通过实验对低过冷度的多元气体冷凝换热特性进行研究,为此也就需要一套能模拟事故条件的实验系统。然而国内外还未有公开发表的文献提及能用于该实验的相关实验系统。

[0003] 由于冷凝换热过程中始终有气液两相共存,换热与流动过程较为复杂,影响因素众多,这使得对应的理论分析尤为困难。因此目前对于冷凝换热的研究多使用实验的方法。通常,研究者根据所要研究的对象和研究目标来设计搭建相应的实验系统,通过测量一定的热工参数来分析不同条件下的冷凝换热特性。由于不凝性气体是影响冷凝换热的关键因素,因此目前国内外学者已经针对该方向进行了大量的实验研究,但主要集中于竖直管内与水平管外的冷凝换热研究,因此所用的实验系统也都是针对竖直管内冷凝及水平管外冷凝实验设计的,并不能满足复杂的水平管内流动冷凝的研究需求。这是由于:与管外冷凝相比,在管内流动冷凝过程中,凝液无法及时排走,会随气体一起流动,因此冷凝过程中会发生流型的演变,不同的流型对应的冷凝换热特性也有较大的差异。此外,在水平管内由于重力效应的影响,气液两相在管内的分布结构呈现出明显的非对称性特点,流型结构更加复

杂。因此,对水平管内冷凝换热特性的研究需要采用具有流型识别功能的实验系统。为得到更为精确且可信的实验数据,设计一套适用于研究水平管内含多元不凝性气体的蒸汽流动冷凝换热的实验系统,并能控制管内流型,研究分析不同流型下的冷凝换热特性显得尤为重要。

[0004] 在已公开的冷凝实验系统之中,专利申请号为201420108048.X的专利文件中公开的“一种冷凝实验组合装置”只能进行冷凝水的收集,通过冷凝量来评价换热器的性能,并不能用于冷凝换热特性的研究与分析;专利申请号为201521078337.0的专利文件中公开的“套管式换热器管内沸腾/冷凝换热性能测试平台”能够对换热器的冷凝功率进行测试,但不能进行含不凝性气体的蒸汽冷凝换热研究,也不能得到管内的局部换热能力;专利申请号为201210540382.8的专利文件中公开的“含有多组分不凝性气体的蒸汽冷凝换热实验装置”虽然能够对竖直管外的蒸汽自然流动冷凝换热特性进行较为详细的分析,但是由于水平管内与竖直管外的冷凝换热机理差距较大,因此在该实验装置中没有考虑流型对换热性能影响的研究,同时实验台的布置形式、冷却方式的设置也存在差异,使得该实验装置并不能应用于水平管内蒸汽流动冷凝实验研究;专利申请号为201510848946.8的专利文件中公开的“一种采用空化效应强化含不凝气体的蒸汽冷凝实验装置”采用文丘里管对冷却水进行碎化,进行蒸汽直接接触式冷凝,与本实验装置所研究的领域和换热问题截然不同,同样不能应用于管内的流动冷凝换热分析。罗马大学的Gianfranco Caruso采用管外空气冷却的方式研究水平管内含空气条件下的冷凝过程,虽然获得了管内局部冷凝换热系数的分布,但该系统仍存在一定的不足与缺陷:(1)不能进行含多组分不凝性气体的实验分析;(2)由于管外侧采用空气冷却,换热功率较低,不能进行波状流和分层流条件下的冷凝实验;(3)缺少可视化观察段,无法对管内气液两相流型进行直接观察,从而无法研究流型对冷凝换热特性的影响。为解决现有技术中存在的主要问题,能够更为全面和准确的研究含多元不凝性气体条件下,各项热工参数对局部冷凝换热能力的影响,从而为安全壳过滤排放系统内水平管冷凝器的设计提供技术支持,设计了本套综合实验系统。

## 发明内容

[0005] 本发明的目的在于提出一种能够在较宽泛的壁面过冷度变化范围、较大的水平管倾斜角度条件下进行多元气体的冷凝换热特性研究,同时提供能用于验证流型对冷凝换热性能影响的宽过冷度含多元气体的水平管内蒸汽冷凝换热实验系统。

[0006] 本发明的目的是这样实现的:

[0007] 本发明包括蒸汽供应系统、管内空气供应系统、氦气供应系统、水冷子系统、空冷子系统、汽水分离系统和数据采集系统。其中水冷子系统包括套管换热器和冷却水系统;空冷子系统包括换热管、空气风道和冷却空气系统。系统的特征是:空冷子系统内水平换热管置于空气风道内组成空冷实验体,空气风道底端与冷却空气系统相连,换热管入口与蒸汽供应系统、管内空气供应系统和氦气供应系统相连,从而实现多元气体混合的管内冷凝换热实验需求。换热管出口经过可视化观察段与汽水分离系统相连,蒸汽在换热管内被管外侧空气冷却发生凝结后,汽水混合物进入汽水分离系统,分离出的气体从汽水分离器顶部管道排放到大气中,凝液从底部管道进入凝液罐后经排水阀排出。水冷子系统内实验体为由换热管与外套管同轴布置而成的套管换热器,换热器环腔空间与冷却水系统相连,换热

管入口通过高压软管与蒸汽、空气和氦气供应系统相连,换热管出口通过可视化段和高压软管与汽水分离系统相连,与空冷系统相同,发生凝结后的汽水混合物进入汽水分离系统进行气体与凝液的分离后排出。两套系统间通过四通管道以及阀门组与蒸汽、空气和氦气供应系统相互连接,通过一定的操作可以实现两套系统的独立工作和耦合工作。

[0008] 本发明还包括:

[0009] 1、所述蒸汽供应系统包括锅炉,由锅炉产生的饱和蒸汽经过蒸汽输送管道与换热管入口主管道相连,蒸汽输送管道采用多组不同直径管道并联的方式,在每组管道上设置蒸汽流量计,多组不同量程的流量计能满足在宽泛的蒸汽流量范围内进行实验的需求。在流量计前后稳定长度外设置截止阀与温度、压力测点。

[0010] 2、所述管内空气供应系统包括空气压缩机和储气罐等。空气压缩机产生一定压力的压缩空气注入储气罐内,压缩空气经过储气罐出口管道上的减压阀与换热管入口主管道相连。空气输送管道同样采用并联管组的布置方式,在每组管道上设置管内空气质量流量计,流量计后设置流量调节阀。

[0011] 3、所述氦气供应系统由高压储气瓶、汇流排和减压阀组成。若干高压氦气瓶通过金属软管及阀门并联接入汇流排主气管道后,经过减压阀与换热管入口相连。氦气输送管道上设置管内氦气流量计,流量计后设置流量调节阀。

[0012] 4、所述空冷子系统的冷却空气系统包括罗茨鼓风机、空气流量计以及相应管道与阀门。由罗茨鼓风机提供的空气通过空气输送管道与实验体的空气风道相连接,在风道中横掠换热管吸收热量,最后排放至大气环境中。

[0013] 5、所述空冷子系统的空气风道入口处设置存在一定间隔的双层孔板。由冷却空气系统提供的空气经过双层孔板均流后进入空气风道之中,确保空气风道内截面风速均匀。

[0014] 6、所述空冷子系统内的空气风道的内壁上设置一定数目的槽道,可以安装对应数目的水平贴管。

[0015] 7、所述空冷子系统内换热管上部的空气风道由若干等间距布置的隔板分成若干独立空间,隔板由导热能力较低的材料制成。每个隔板内分别设置温度测点测量空气温度。

[0016] 8、所述水冷子系统的冷却水系统由冷却水池、离心泵、冷却水流量计和相应的管道与阀门组成。冷却水经由离心泵从水池中抽出,经过冷却水流量调节阀和流量计进入实验段环腔中,与换热管内蒸汽形成逆向流动。吸收热量后重新回到冷却水箱之中。

[0017] 9、所述水冷子系统的实验段安装在可调角度的支撑平台之上。通过改变支撑平台的水平角度,可以实现不同倾斜条件下的冷凝换热实验。

[0018] 10、所述空冷子系统和水冷子系统的入口主管道上设置U型水弯结构与蒸汽、空气和氦气系统相连,出口设置石英玻璃可视化观察段与汽水分离系统相连。其中U型水弯主体为U形管道,管道最下端安装疏水阀,两竖直段外缠有加热带,其功率由独立的温控装置调节。

[0019] 11、水冷与空冷子系统之间设置四通机构与阀门组,四通机构分别与空冷子系统、水冷子系统和蒸汽、管内空气、氦气供应系统以及汽水分离器相连接。

[0020] 12、所有的测量装置均通过信号线路与数据采集系统和计算机相连。

[0021] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:通过将水冷与空冷两种管外侧冷却方式进行组合和独立,实现了在较宽泛的壁面过冷度范围内,进行水平和倾斜条件下管内含多

组分不凝性气体的蒸汽流动冷凝换热特性的实验研究,以此更深入地了解冷凝换热机理,为冷凝器设计、强化换热元件开发和换热器运行技术提供科学依据。该套实验系统能够实现:(1)进行水平和倾斜条件下管内纯蒸汽、含单组分不凝性气体和多组分不凝性气体的蒸汽流动冷凝换热特性的实验研究;(2)通过改变换热管外侧冷却方式,在宽泛的壁面过冷度变化范围内研究该因素对局部换热能力的影响;(3)利用可视化技术对管内的气-液两相流型进行直接观察,结合流型判断结果,可以分析流型变化对冷凝换热机理的作用;(4)采用贴管技术来模拟不同管束布置条件下管外空气流动特征,从而满足不同管束布置条件下的冷凝换热实验需求;(5)系统中所采用的U型水弯附加伴热带的设计可以有效的消除蒸汽过热及过冷度,保证实验所用蒸汽始终处于饱和状态;(6)实时可调压力的氦气供应系统能够维持实验过程中的氦气流量恒定,减小流量波动对实验结果分析的干扰,确保了多元不凝性气体冷凝换热实验的稳定性。

## 附图说明

[0022] 图1是本发明的系统流程示意图。

## 具体实施方式

[0023] 下面结合附图与具体实施方式对本发明作进一步详细描述。

[0024] 如图1所示,本发明主要由蒸汽供应系统、管内空气供应系统、氦气供应系统、空冷子系统、水冷子系统、汽水分离系统和数据采集系统所组成。蒸汽供应系统、管内空气供应系统与氦气供应系统并联,提供一定比例的多元混合气体,来自各系统的蒸汽、空气与氦气在换热管入口主管道的U型水弯内进行充分混合。然后根据实验工况设定选择进入空冷或水冷子系统。在空冷系统中,换热管内蒸汽被管外风道中的空气冷却发生凝结;在水冷系统中,管内蒸汽受到管外环腔内冷却水的冷却而凝结成水。进行冷凝换热后的汽水混合物经由石英玻璃可视化观察段,再进入汽水分离系统内进行汽水分离,分离后气体经排气阀排入大气,凝液回收到凝液测量器内进行凝液流量测量。

[0025] 其中蒸汽供应系统主要由饱和蒸汽锅炉14,截止阀15,涡街流量计16和调节阀17以及压力、温度测量仪表等组成,用来提供冷凝换热实验所需的一定温度、一定压力的蒸汽。由蒸汽锅炉14产生的饱和蒸汽经过涡街流量计16测量流量后,进入实验段入口前的主管道中。为了满足在宽泛的蒸汽流量范围内进行实验的需求,设置多组不同直径的蒸汽输送管道并联,每根管道上采用相应口径的流量计,从而保证在较宽泛的范围内流量的准确测量。为研究多组分条件下的管内冷凝换热特性,将管内空气供应系统、氦气供应系统与蒸汽供给系统并联,然后将并联后管道通过法兰与实验段入口的主管道相连,实验中将不同比例的蒸汽、空气和氦气相混合后,输送到实验段内。空气采用管内空气供应系统来提供,该系统由空气压缩机1,储气罐2,截止阀3,质量流量计4和调节阀5组成。空气压缩机1产生一定压力的压缩空气注入储气罐2内,压缩空气经过储气罐2出口管道上的截止阀3,并经质量流量计4测量流量后进入到主管道中。空气输送管道同样采用并联管组的布置方式,在每组管道上设置不同量程的质量流量计,利用调节阀5进行流量的精确调节以确保不凝性气体的含量。氦气供应系统由高压氦气储气瓶6、金属软管7、阀门8,11,13、汇流排9、减压阀10和流量计12组成。若干高压氦气瓶通过金属软管7及阀门8并联接入汇流排9中,再经过减压

阀10降压后通过管道接入主管道。蒸汽供应系统、管内空气供应系统和氦气供应系统并联后与实验段入口主管道相连。饱和蒸汽、空气和氦气在换热管入口主管道上汇流混合,根据道尔顿分压定律可知,混合气体的总压力等于各组分的分压力之和,因此混合气体内水蒸汽的分压力小于系统的总压力。然而,根据系统流动条件可知,锅炉产生的是系统总压力下的饱和蒸汽,对应的蒸汽温度是系统总压力下的饱和温度,此温度要高于蒸汽分压力对应的饱和温度。也就是说,在三种气体混合后,蒸汽将处于过热状态。为防止实验段入口蒸汽过热而影响冷凝换热实验结果的准确性,在换热管入口主管道上设置U型水弯结构18,在U型水弯的底端设置疏水阀20,通过调节阀门开度,时刻保持U型水弯18内存有适量的饱和水以吸收蒸汽降低蒸汽的过热和过冷度。此外,U型水弯竖管外表面缠有带温控功能的加热带。实验过程中,设定加热温度为实验工况下的蒸汽饱和温度,以保证蒸汽始终处于饱和状态,避免换热管入口处可能发生的单相换热段对冷凝换热分析的影响。

[0026] 蒸汽、空气与氦气在换热管入口主管道的U型水弯内进行充分混合后,根据实验工况设定选择进入空冷或水冷子系统。空冷子系统主要由换热管22、空气风道34和冷却空气系统等组成。水冷子系统主要由套管换热器40和冷却水系统组成。U型水弯18的出口经三通分流后,其中一个支路与水冷子系统的套管换热器40的管程相连,另一个支路与空冷子系统的换热管22相连。在水冷子系统与空冷子系统前后布置四通阀组,通过控制四通阀组内阀门24,38和39的开关组合,可以根据实验所需壁面过冷度的参数范围进行两子系统的独立与耦合工作,从而保证在较宽泛的过冷度范围及可控的管内流型条件下进行冷凝换热实验。

[0027] 空冷子系统的冷却空气系统包括罗茨鼓风机31,涡街流量计32和阀门33。罗茨鼓风机提供的空气流入实验体的空气风道34内,在风道中横掠换热管吸收热量,最后从风道出口排放至大气中。在空气风道34入口设置扩张段和双层孔板,对管外侧来流空气进行均化处理。在双层孔板与换热管之间要留出一定的直段长度,确保管外气流到达换热管前分配均匀,流场稳定。换热管上方设置若干隔板36将风道空间分成若干独立单元,分别测量各单元内的换热功率用于计算管内局部冷凝换热系数。为防止各个单元发生热交换,隔板选择导热能力较弱的材料制造而成。

[0028] 在空冷子系统内,管外空气横掠换热管对管内蒸汽进行冷凝。为研究管排效应和排管方式对换热的影响,在空冷子系统的空气风道34内壁上设有槽道37,用于安装管束实验所需贴管。通过安装不同尺寸的贴管,可以进行不同管束布置条件下的冷凝换热实验,用于分析管排效应和排管方式对换热过程的影响。

[0029] 水冷子系统的冷却水系统由冷却水池43、离心泵44、阀门45和冷却水流量计46组成。冷却水经由离心泵44从水池43中抽出,经过冷却水流量调节阀45和流量计46进入实验段环腔中,与换热管外壁面进行对流换热,吸收凝结释放的热量后回到冷却水池43之中。

[0030] 水冷子系统的套管换热器40固定在可旋转的活动平台48上,活动平台通过轴承47与下端的固定平台相连。通过调整旋转平台的角度,改变旋转平台48与水平位置的夹角,从而可以进行倾斜条件下的管内冷凝换热实验。旋转平台的角度通过布置在固定平台上的量角器进行测量,固定平台的上方安装有限位器,可以使旋转平台的角度在0-45度之间进行调节并固定,从而可以研究不同倾角对冷凝换热特性的影响。水冷子系统内换热管进、出口采用可弯曲的高压橡胶软管进行连接,从而可以为平台的旋转提供自由空间,以方便进行

倾斜条件的冷凝换热实验。

[0031] 水平管内由于重力的影响,流型呈现出非对称的特点。相比于竖直管内的冷凝,水平管内复杂的流型演变对冷凝换热影响较大,不同流型间的冷凝换热系数差别也较大。因此,为研究流型对冷凝换热的影响,在水冷子系统和空冷子系统的换热管出口均安装了耐高温耐压的石英玻璃管作为可视化观察段,用于对换热管出口处的气液两相流型进行直接观察。结合流型判断结果,分析流型变迁对冷凝换热的影响;同时也可以结合流型的可视化观察,通过改变冷却方式或调节冷却介质流量的方法,来控制管内流型至预设工况要求的范围,进行单一流型下的管内冷凝换热特性研究。

[0032] 汽水分离系统内的凝液罐用于提供液封,防止实验过程中换热管压力下降,同时也用于测量单位时间内的凝液流量。通过调节凝液罐出口阀门30的开度,保持液位计29内液位始终处于1/2量程左右,以保证罐内时刻处于液封状态。在测量液位过程中,关闭凝液罐出口阀门30,测量规定时间内的液位上升高度,即可获得凝液流量,用于计算冷凝过程的换热功率。

[0033] 由于进行含多组分不凝性气体冷凝实验过程中所需氦气量较大,若采用固定容量的氦气储存容器作为气源,会出现由于储存气量降低而出现的供气压力下降问题,进而导致氦气流量变化,无法保证实验精度。为此,该系统中的氦气供应系统采用基于汇流排设计的多罐并联技术。每一个高压氦气储气瓶通过金属软管与阀门接入汇流排,通过调节阀门开关选择气瓶的投入与否,改变所投入的氦气瓶数,以此维持实验过程中氦气流量保持稳定。

[0034] 实验过程中所需蒸汽、空气、氦气和冷却水流量均由具有较高精度的流量计进行测量,各流量由对应管道上安装的阀门进行调节;温度和压力分别由热电偶与压力传感器进行测量。实验过程中所获得的所有数据均通过数据采集系统进行收集,最后输送到计算机中进行储存和整理。

[0035] 本发明的具体工作流程如下:本发明中管内空气供应系统由空气压缩机1、储气罐2、流量计4以及阀门3和5组成。由空气压缩机1产生的压缩空气先进入储气罐2,随后经过流量计4进入换热管入口主管道,管内空气流量由阀门5进行调节。氦气供应系统由高压氦气储气瓶6、金属软管7、阀门8,11,13、汇流排9、减压阀10和流量计12组成。当选择某一气瓶投入时,打开连接该气瓶支路的阀门,关闭其它未投入气瓶支路的阀门。氦气由气瓶进入汇流排9,经过减压阀10降压后流经流量计12后进入主管道。蒸汽供应系统由锅炉14、阀门15,17和流量计16组成。锅炉产生的蒸汽由流量计16测量流量后,与管内空气供应系统和氦气供应系统提供的空气与氦气混合后一同进入U型水弯18中。U型水弯管道外壁缠有加热带19,水弯底部安装有疏水阀门20。实验过程中小幅开启疏水阀20,维持U型水弯内存有少量的饱和水以吸收蒸汽过热度。与此同时,使用温控系统设定加热带19的电加热温度为当前蒸汽分压力所对应的饱和温度,从而更好地保证进入换热管的蒸汽始终处于饱和状态。

[0036] 根据实验工况不同,通过U型水弯后的混合气体进入不同子系统之中。当进行空冷实验时,阀门38,39和42关闭,将水冷子系统进行隔离。混合气经过阀门21进入空冷子系统的换热管22内进行冷凝换热。凝结后的汽水混合气通过可视化观察段23和阀门24,25进入汽水分离器26内。分离后的气体由汽水分离器26的上部阀门27排放到大气之中,凝液向下进入凝液罐28中。使用液位计29测量液位上升速度后,凝液经由阀门30排出实验系统。在空

冷子系统中,冷却空气系统由鼓风机31、流量计32、阀门33和空气风道34组成。由鼓风机提供的空气流经流量计32后进入空气风道34中。在风道中,空气首先通过双层孔板35,随后横掠换热管吸收热量,最后通过由隔板36分割形成的小空间排放至环境。空气风道的内壁上设有贴管槽道37,进行管束实验时,将换热管插入槽道之中,形成管束排布结构,从而模拟真实换热器应用时的管束条件。

[0037] 当进行水冷实验时,阀门21,24和25关闭,空冷子系统与主管道隔离。混合气通过U型水弯、阀门38和39进入套管换热器40的内管之中。混合气体向环腔内冷却水释放热量后发生冷凝,然后混合气与凝液一同经过可视化观察段41与阀门42进入汽水分离器26中,完成汽水分离与凝液流量测量的过程。环腔内冷却水储存在冷却水箱43,在离心泵44的驱动下,通过阀门45与流量计46进入套管换热器40的环腔通道之中,吸收冷凝过程释放的热量后流回到冷却水箱43之中。水冷子系统的套管换热器固定在可旋转平台48上。旋转平台48与轴承47相连。进行倾斜条件下的冷凝换热实验时,通过记录轴承47上显示的角度,即可知道当前实验工况下换热管与水平位置的夹角。

[0038] 实验过程中,换热管外的冷却空气和水流量,换热管内的蒸汽、空气和氦气流量均由流量计进行测量;混合气、冷却水与冷却空气的温度均由热电偶进行测量;混合气压力由压力传感器进行测量。所有测量仪表的数据均由数据采集系统49收集,最后输入到计算机50中进行储存。

[0039] 本发明提供一种能够实现水与空气耦合和独立冷却条件下,研究水平与倾斜管内含多组分不凝性气体的蒸汽流动冷凝换热特性的实验系统,可进行较大壁面过冷度变化范围、不同倾斜角度、不同混合气流速、压力和不凝性气体含量工况下的管内冷凝换热实验,研究各项因素对局部冷凝换热特性的影响,结合可视化技术探索气液两相流型对冷凝换热能力的作用效果,以此更深入地了解冷凝换热机理,为工程应用中的冷凝器设计与运行提供技术支持。

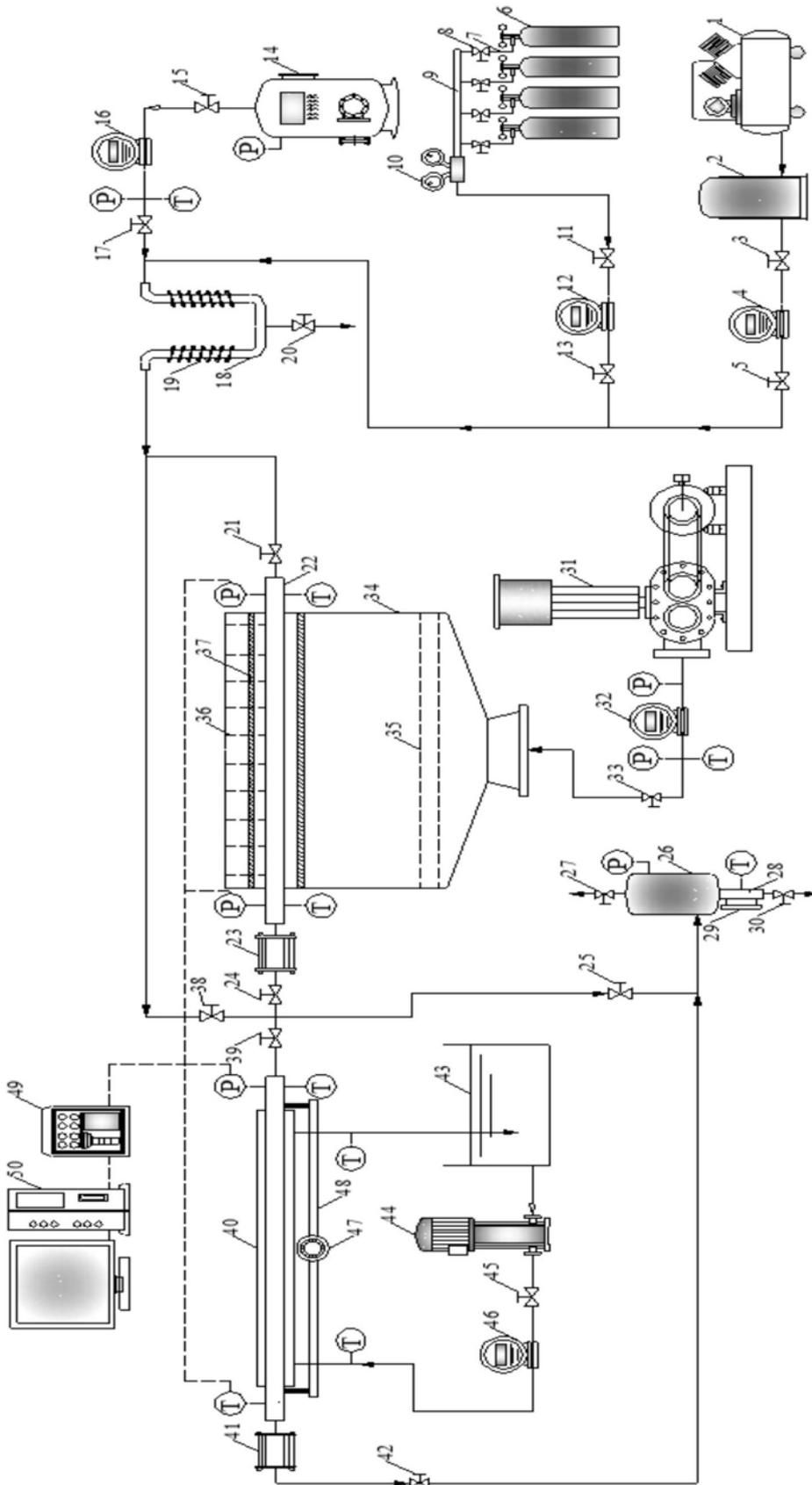


图1