



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107221370 A

(43)申请公布日 2017.09.29

(21)申请号 201710434137.1

(22)申请日 2017.06.09

(71)申请人 南京航空航天大学

地址 210016 江苏省南京市秦淮区御道街
29号

(72)发明人 鹿鹏 郑星文 黄护林

(74)专利代理机构 江苏圣典律师事务所 32237

代理人 贺翔

(51)Int.Cl.

G21D 7/02(2006.01)

G21D 9/00(2006.01)

H02K 44/08(2006.01)

F01K 25/12(2006.01)

G25B 1/04(2006.01)

G25B 9/04(2006.01)

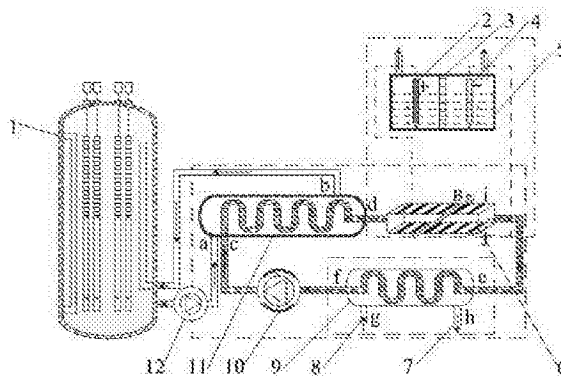
权利要求书1页 说明书5页 附图1页

(54)发明名称

基于液态金属自蒸发磁流体发电的核梯级
利用系统及方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于液态金属自蒸发磁流体发电的核能梯级利用系统及方法,属于核能综合利用领域。该系统主要由磁流体泵、磁流体发电通道、风机、核反应堆热源、电解水制氢装置及相关换热器组成。液态金属被核反应堆热源加热发生部分汽化,产生气泡体积膨胀推动液态金属流经发电通道,切割磁感线产生感应电动势,之后经冷凝器冷凝,由磁流体泵打入液态金属受热蒸发器完成循环;产生的电能可直接部分或全部用于制氢,通过相关的换热器和流程设置,产生的热水可用作生活热水。本发明系统简单紧凑,成本低,稳定性高,并且提供了一种可同时实现发电、制氢、制热的先进核能梯级利用方法。



1. 一种基于液态金属自蒸发磁流体发电的核能梯级利用系统,其特征在于:由惰性气体载热循环加热子系统、自蒸发液态金属磁流体发电子系统、电解水制氢子系统和热水子系统组成;

所述惰性气体载热循环加热子系统由核反应堆热源(1)、风机(12)、液态金属受热蒸发器(11)及循环管路组成,其中所述核反应堆热源(1)的氦气出口和风机(12)氦气入口连接,风机(12)氦气出口和液态金属受热蒸发器(11)氦气入口(a)连接,液态金属受热蒸发器(11)氦气出口(b)和核反应堆热源(1)氦气入口连接;

所述自蒸发液态金属磁流体发电子系统由上述惰性气体载热循环加热系统中的液态金属受热蒸发器(11),以及磁流体发电通道(6)、冷凝器(9)、磁流体泵(10)及循环管路组成,其中所述液态金属受热蒸发器(11)的金属气液两相流出口(d)和磁流体发电通道(6)金属气液两相流入口连接,磁流体发电通道(6)金属气液两相流出口和冷凝器(9)金属气液两相流入口(e)连接,冷凝器(9)液态金属出口(f)和磁流体泵(10)液态金属入口连接,磁流体泵(10)液态金属出口和液态金属受热蒸发器(11)液态金属入口(c)连接;

所述电解水制氢子系统由上述自蒸发液态金属磁流体发电系统中的磁流体发电通道(6),以及石墨棒(2)、隔膜(3)、铜棒(4)、电解槽(5)组成;隔膜(3)将电解槽(5)分成两部分,石墨棒(2)和铜棒(4)分别浸入电解槽(5)两侧的电解液中;其中所述磁流体发电通道(6)电势高的一侧(i)和石墨棒(2)导线连接,磁流体发电通道(6)电势低的一侧(j)和铜棒(4)导线连接;

所述热水子系统由上述自蒸发液态金属磁流体发电系统中的冷凝器(9),以及冷却水输入管道(8)、热水输出管道(7)组成,其中所述冷却水输入管道(8)和冷凝器(9)入口(g)连接,冷凝器(9)出口(h)与热水输出管道(7)连接。

2. 如权利要求书1所述的基于液态金属自蒸发磁流体发电的核能梯级利用系统的工作方法,其包括如下步骤:

步骤一:氦气作为核反应堆热源(1)的冷却剂,吸收核反应堆热源(1)释放的热量,经风机(12)加压驱动至液态金属受热蒸发器(11),在液态金属受热蒸发器(11)中释放热量,使液态金属受热蒸发器(11)维持在某一高温,释放热量后重新进入核反应堆热源(1)吸热;

步骤二:液态金属在流经液态金属受热蒸发器(11)时,吸热温度升高,达到金属沸点后发生部分汽化,体积迅速膨胀推动金属气液两相流体快速进入磁流体发电通道(6),通道内流动的液态金属在磁场作用下产生阻力,使流体压力沿通道下降,气体在压降下继续膨胀,进一步推动液态金属切割磁感线发电,之后金属气液两相流进入冷凝器(9)被冷却水冷凝成液态金属,经磁流体泵(10)加压进入液态金属受热蒸发器(11)再次被加热汽化;

步骤三:液态金属流经磁流体发电通道(6)时,在发电通道(6)的上下两侧产生电动势,电动势高的一侧(i)和石墨棒(2)导线相连,电势低的一侧(j)和铜棒(4)导线相连,石墨棒(2)和铜棒(4)分别浸入由隔膜(3)分隔的电解槽(5)两侧的电解液中,石墨棒(2)产生氧气,铜棒(4)产生氢气;

步骤四:冷却水从冷却水输入管道(8)进入冷凝器(9)与高温金属气液两相流体热交换后温度升高成为热水,经热水输出管道(7)输出,提供的冷却水可以是自来水,加热温度升高后可作为副产品——生活热水。

基于液态金属自蒸发磁流体发电的核梯级利用系统及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种利用核反应堆热源发电、制氢、制热(热水)联合循环系统及方法,尤其涉及一种基于液态金属自蒸发磁流体发电的核能梯级利用系统及方法,其属于核能综合利用领域。

背景技术

[0002] 常规液态金属磁流体(Liquid Metal MagnetoHydroDynamics,简称LMMHD)发电系统采用低沸点工质与高温液态金属接触混合,受热汽化推动液态金属流动的方式进入发电通道发电,这种混合方式在流体经过发电通道后要对液态金属和低沸点工质进行两相分离,分离后再经各自的回路重新进入混合器进行混合,增加了系统的复杂性。

[0003] 核能是一种清洁的能源,利用核能既不产生烟尘、二氧化硫和氮的氧化物,又不产生二氧化碳。就是考虑从采矿到生产燃料、使用燃料的整个燃料链来进行比较,核能产生的有害气体也比化石燃料少得多。核电站只需消耗很少的核燃料,就可以产生大量的电能,每千瓦时电能的成本比火电站要低20%以上,此外核电站可以大大减少燃料的运输量。

[0004] 超高温反应堆(Very High Temperature Reactor,简称VHTR)是以石墨作慢化剂、氦气作冷却剂、铀作核燃料的反应堆,与高温气冷堆相比,其堆芯温度更高,氦气出口温度达1000℃,VHTR可用于氢能的生产,也可为石油化工或其他工业供热。由于一些液态金属(如钠、钾等)沸点只有800℃左右,冷却剂氦气的出口温度足以将这些金属汽化,生成的气态金属推动液态金属进入发电通道发电,将VHTR的排热作为自蒸发液态金属磁流体发电子系统的热源在理论上是可行的。此外,氦气对中子吸收少,对中子慢化几乎没有影响,也不会被中子活化,而且氦气是惰性气体,不会发生相变而引入正反应性。

[0005] 电解水制氢是成熟的制氢方法,工艺简单,操作方便,氢气产品纯度高,一般可达99%—99.9%,并且由于其主要杂质是水和氧气,无污染。目前电解水制氢的成本主要部分是电能的消耗,本发明发电系统液态金属单方向切割磁感线,发出的电流不需要整流,可直接用于电解水制氢的电源,这在很大程度上降低了制氢能耗。

发明内容

[0006] 本发明提供一种基于液态金属自蒸发磁流体发电的核能梯级利用系统及方法,该系统可以将核反应堆热转化为高品位电能、氢能和热能。该系统采用氦气作为核反应堆热源冷却剂,排热温度可达1000℃,足以将一些液态金属汽化,而且氦气对中子吸收少,对中子慢化几乎没有影响,也不会被中子活化,循环过程中不会发生相变而引入正反应性;该系统采用液态金属自身受热汽化这样一种产生气泡的方式来代替低沸点工质产生气泡,推动液态金属流动进入发电通道发电,改进后的系统不再需要对两相流进行气液分离,整个系统只有一条回路,简化了系统的复杂性,省去了混合器、分离器等装备,成本低,更可靠,而且由于没有低沸点工质的掺杂,两相流体的电导率不会明显降低,发电功率和效率均得到保证;该系统产生的直流电可直接用于电解水制氢的电源,避免了将交流电整流成直流电

的能量损耗,多余的电能可并入电网作生活用电,满足用户用电需求;该系统使用的核能既不产生烟尘、二氧化硫和氮的氧化物,又不产生二氧化碳,是一种清洁的能源;此外,通过相关的换热器和流程设置,产生的热水可用作生活热水,在很大程度上减少生活热水对能源的消耗。

[0007] 本发明采用如下技术方案:一种基于液态金属自蒸发磁流体发电的核能梯级利用系统,其特征在于:由惰性气体载热循环加热子系统、自蒸发液态金属磁流体发电子系统、电解水制氢子系统和热水子系统组成;

所述惰性气体载热循环加热子系统由核反应堆热源、风机、液态金属受热蒸发器及循环管路组成,其中所述核反应堆热源的氦气出口和风机氦气入口连接,风机氦气出口和液态金属受热蒸发器氦气入口连接,液态金属受热蒸发器氦气出口和核反应堆热源氦气入口连接;

所述自蒸发液态金属磁流体发电子系统由上述惰性气体载热循环加热系统中的液态金属受热蒸发器,以及磁流体发电通道、冷凝器、磁流体泵及循环管路组成,其中所述液态金属受热蒸发器的金属气液两相流出口和磁流体发电通道金属气液两相流入口连接,磁流体发电通道金属气液两相流出口和冷凝器金属气液两相流入口连接,冷凝器液态金属出口和磁流体泵液态金属入口连接,磁流体泵液态金属出口和液态金属受热蒸发器液态金属入口连接;

所述电解水制氢子系统由上述自蒸发液态金属磁流体发电系统中的磁流体发电通道,以及石墨棒、隔膜、铜棒、电解槽组成;隔膜将电解槽分成两部分,石墨棒和铜棒分别浸入电解槽两侧的电解液中;其中所述磁流体发电通道电势高的一侧和石墨棒导线连接,磁流体发电通道电势低的一侧和铜棒导线连接;

所述热水子系统由上述自蒸发液态金属磁流体发电系统中的冷凝器,以及冷却水输入管道、热水输出管道组成,其中所述冷却水输入管道和冷凝器入口连接,冷凝器出口与热水输出管道连接。

[0008] 本发明还采用如下技术方案:一种基于液态金属自蒸发磁流体发电的核能梯级利用系统的工作方法,其包括如下步骤:

步骤一:氦气作为核反应堆热源的冷却剂,吸收核反应堆热源释放的热量,经风机加压驱动至液态金属受热蒸发器,在液态金属受热蒸发器中释放热量,使液态金属受热蒸发器维持在某一高温,释放热量后重新进入核反应堆热源吸热;

步骤二:液态金属在流经液态金属受热蒸发器时,吸热温度升高,达到金属沸点后发生部分汽化,体积迅速膨胀推动金属气液两相流体快速进入磁流体发电通道,通道内流动的液态金属在磁场作用下产生阻力,使流体压力沿通道下降,气体在压降下继续膨胀,进一步推动液态金属切割磁感线发电,之后金属气液两相流进入冷凝器被冷却水冷凝成液态金属,经磁流体泵加压进入液态金属受热蒸发器再次被加热汽化;

步骤三:液态金属流经磁流体发电通道时,在发电通道的上下两侧产生电动势,电动势高的一侧和石墨棒导线相连,电势低的一侧和铜棒导线相连,石墨棒和铜棒分别浸入由隔膜分隔的电解槽两侧的电解液中,石墨棒产生氧气,铜棒产生氢气;

步骤四:冷却水从冷却水输入管道进入冷凝器与高温金属气液两相流体热交换后温度升高成为热水,经热水输出管道输出,提供的冷却水可以是自来水,加热温度升高后可作为

副产品——生活热水。

[0009] 本发明具有如下有益效果：

(1) 基于液态金属自身受热汽化产生气泡推动液态金属流动方式下的液态金属磁流体发电系统不仅结构简单紧凑，系统成本低，稳定性高，而且推动效果显著，经数值模拟计算，液态金属吸热汽化推动金属流动的速度提升效果可达3倍以上，比如，当液钠进口速度为2.4m/s，温度为882℃，流经温度为1100℃的液态金属受热蒸发器时，其出口速度可达7.7m/s；此外两相流导电率不会因为低沸点工质的掺杂而过多降低，发电功率和效率均得到保证；

(2) 该发电系统发出的直流电可直接用作电解水制氢电源，避免了整流操作对电能的损耗，电能利用率更高；多余的电能可并入电网作生活用电，满足用户用电需求；

(3) 通过相关的换热器和流程设置，产生的热水可用作生活热水，在很大程度上减少生活热水对能源的消耗；

(4) 系统热源采用核反应堆排热，既不产生烟尘、二氧化硫和氮的氧化物，又不产生二氧化碳，是一种清洁的能源；

(5) 系统采用氦气作为核反应堆热源的冷却剂，不仅能保证系统有较高的排热温度，而且氦气对中子吸收少，对中子慢化几乎没有影响，也不会被中子活化，此外氦气是惰性气体，不会发生相变而引入正反应性；

(6) 本发明将核能转化为高品位电能，绿色能源氢能和日常生活所必需的生活热水，实现了结构紧凑、经济性好、工作稳定的发电-制氢-产热联合能源系统技术路线，有利于能源的高效利用、梯级利用。

附图说明

[0010] 图1为本发明基于液态金属自蒸发磁流体发电的核能梯级利用系统的结构示意图。

[0011] 其中：1-核反应堆热源；2-石墨棒；3-隔膜；4-铜棒；5-电解槽；6-磁流体发电通道；7-热水输出管道；8-冷却水输入管道；9-冷凝器；10-磁流体泵；11-液态金属受热蒸发器；12-风机；a-液态金属受热蒸发器氦气入口；b-液态金属受热蒸发器氦气出口；c-液态金属受热蒸发器液态金属入口；d-液态金属受热蒸发器金属气液两相流出口；e-冷凝器金属气液两相流入口；f-冷凝器液态金属出口；g-冷凝器冷却水输入管道入口；h-冷凝器热水输出管道出口；i-磁流体发电通道电势高的一侧；j-磁流体发电通道电势低的一侧。

具体实施方式

[0012] 请参照图1所示，本发明基于液态金属自蒸发磁流体发电的核能梯级利用系统由惰性气体载热循环加热子系统，自蒸发液态金属磁流体发电子系统、电解水制氢子系统和热水子系统组成。上述惰性气体载热循环加热子系统由核反应堆热源1、风机12、液态金属受热蒸发器11及循环管路组成，其中所述核反应堆热源1的氦气出口和风机12氦气入口连接，风机12氦气出口和液态金属受热蒸发器11氦气入口a连接，液态金属受热蒸发器11氦气出口b和核反应堆热源1氦气入口连接；

上述自蒸发液态金属磁流体发电子系统由上述惰性气体载热循环加热系统中的液

态金属受热蒸发器11,以及磁流体发电通道6、冷凝器9、磁流体泵10及循环管路组成,其中所述液态金属受热蒸发器11的金属气液两相流出口d和磁流体发电通道6金属气液两相流入口连接,磁流体发电通道6金属气液两相流出口和冷凝器9金属气液两相流入口e连接,冷凝器9液态金属出口f和磁流体泵10液态金属入口连接,磁流体泵10液态金属出口和液态金属受热蒸发器11液态金属入口c连接;

上述电解水制氢子系统由上述自蒸发液态金属磁流体发电系统中的磁流体发电通道6,以及石墨棒2、隔膜3、铜棒4、电解槽5组成;隔膜3将电解槽5分成两部分,石墨棒2和铜棒4分别浸入电解槽5两侧的电解液中;其中所述磁流体发电通道6电势高的一侧i和石墨棒2导线连接,磁流体发电通道6电势低的一侧j和铜棒4导线连接;

上述热水子系统由上述自蒸发液态金属磁流体发电系统中的冷凝器9,以及冷却水输入管道8、热水输出管道7组成,其中所述冷却水输入管道8和冷凝器9入口g连接,冷凝器9出口h与热水输出管道7连接。

[0013] 请参照图1所示,本发明基于液态金属自蒸发磁流体发电的核能梯级利用系统的工作方法包括如下过程:

步骤一:氦气作为核反应堆热源1的冷却剂,吸收核反应堆热源1释放的热量,经风机12加压驱动至液态金属受热蒸发器11,在液态金属受热蒸发器11中释放热量,使液态金属受热蒸发器11维持在某一高温,释放热量后重新进入核反应堆热源1吸热;

步骤二:液态金属在流经液态金属受热蒸发器11时,吸热温度升高,达到金属沸点后发生部分汽化,体积迅速膨胀推动金属气液两相流体快速进入磁流体发电通道6,通道内流动的液态金属在磁场作用下产生阻力,使流体压力沿通道下降,气体在压降下继续膨胀,进一步推动液态金属切割磁感线发电,之后金属气液两相流进入冷凝器9被冷却水冷凝成液态金属,经磁流体泵10加压进入液态金属受热蒸发器11再次被加热汽化;

步骤三:液态金属流经磁流体发电通道6时,在发电通道6的上下两侧产生电动势,电动势高的一侧i和石墨棒2导线相连,电势低的一侧j和铜棒4导线相连,石墨棒2和铜棒4分别浸入由隔膜3分隔的电解槽5两侧的电解液中,石墨棒2产生氧气,铜棒4产生氢气;

步骤四:冷却水从冷却水输入管道8进入冷凝器9与高温金属气液两相流体热交换后温度升高成为热水,经热水输出管道7输出,提供的冷却水可以是自来水,加热温度升高后可作为副产品——生活热水。

[0014] 氦气作为超高温气冷堆——核反应堆热源1的冷却剂,排热温度可达1000℃以上,高温氦气在液态金属受热蒸发器11中释放热量,使液态金属受热蒸发器11维持在某一高温,为减少热量损失,液态金属受热蒸发器11外敷保温层以减少热量散失,液态金属在流经液态金属受热蒸发器11时,吸热温度升高,达到金属沸点后发生部分汽化,体积膨胀推动金属气液两相流体进入磁流体发电通道6,通道内流动的液态金属在磁场作用下产生阻力,使流体压力沿通道下降,气体在压降下继续膨胀,进一步推动液态金属流动切割磁感线发电。

[0015] 电解水制氢子系统中磁流体发电通道6电势高的一侧i和石墨棒2导线连接,磁流体发电通道6电势低的一侧j和铜棒4导线连接,隔膜3将电解槽5分成两部分,石墨棒2和铜棒4分别浸入电解槽5两侧的电解液中,石墨棒2周围将产生氧气,铜棒4周围将产生氢气。

[0016] 冷却水从冷却水输入管道8进入冷凝器9与高温金属气液两相流体热交换后温度升高成为热水,经热水输出管道7输出,提供的冷却水可以是自来水,加热温度升高后可作

为副产品——生活热水。

[0017] 本发明基于液态金属自蒸发磁流体发电的核能梯级利用系统的原理：目前第四代核反应堆之一的超高温气冷堆采用石墨慢化、氦气冷却、铀燃料一次通过的循环方式，氦气冷却剂出口温度可达1000℃以上，一些液态金属(如钠、钾等)沸点只有800℃左右，冷却剂出口温度足以将这些金属汽化，高温氦气将液态金属受热蒸发器温度维持在1000℃左右，液态金属在流经液态金属受热蒸发器时，吸热温度升高，达到金属沸点后发生部分汽化，体积膨胀推动金属气液两相流体进入磁流体发电通道，通道内流动的液态金属在磁场作用下产生阻力，使流体压力沿通道下降，气体在压降下继续膨胀，进一步推动液态金属流动切割磁感线发电。由于液态金属单方向切割磁感线，发出的电流不需要整流，可直接用于电解水制氢的电源，这在一定程度上降低了制氢能耗，多余的电能可并入电网作生活用电，满足用户用电需求；此外，流经冷凝器的自来水被加热后可作为生活热水，可降低生活热水对能源的消耗。

[0018] 本发明基于液态金属自蒸发磁流体发电的核能梯级利用系统对核能综合利用提出一种新的可行性思路，该发电系统没有运动的机械部件，在此基础上对推动液态金属的流动方式作出了改进，可以使设计更加简单紧凑，系统成本低，稳定性高；此外，该发电系统发出的直流电可直接用作电解水制氢电源，避免了整流操作对电能的损耗，电能利用率更高；本发明将核能转化为高品位电能，绿色能源氢能和日常生活所必需的热热水，实现了结构紧凑、经济性好、工作稳定的发电-制氢-产热联合能源系统技术路线，有利于能源的高效利用，梯级利用。

[0019] 以上所诉仅是本发明的优选实施方式，应当指出，对于本技术领域的普通技术人员来说，在不脱离本发明原理的前提下还可以作出若干改进，这些改进也应视为本发明的保护范围。

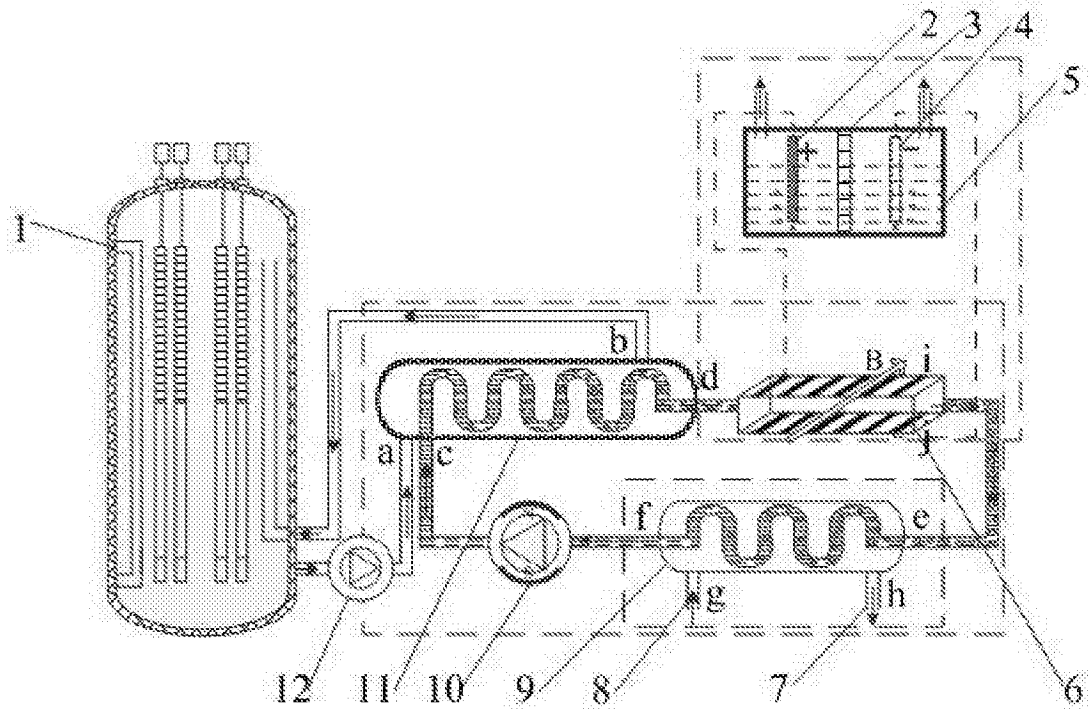


图1