

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2024年2月29日 (29.02.2024)



(10) 国际公布号
WO 2024/041147 A1

- (51) 国际专利分类号:
F17D 1/00 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2023/101631
- (22) 国际申请日: 2023年6月21日 (21.06.2023)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202211029401.0 2022年8月25日 (25.08.2022) CN
- (71) 申请人: 北京航天试验技术研究所 (BEIJING INSTITUTE OF AEROSPACE TESTING TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国北京市丰台区云岗田城中里1号院, Beijing 100077 (CN)。
- (72) 发明人: 张春伟 (ZHANG, Chunwei); 中国北京市丰台区云岗田城中里1号院, Beijing 100077 (CN)。

柴栋栋 (CHAI, Dongdong); 中国北京市丰台区云岗田城中里1号院, Beijing 100077 (CN)。尹奇志 (YIN, Qizhi); 中国北京市丰台区云岗田城中里1号院, Beijing 100077 (CN)。马军强 (MA, Junqiang); 中国北京市丰台区云岗田城中里1号院, Beijing 100077 (CN)。李玮 (LI, Wei); 中国北京市丰台区云岗田城中里1号院, Beijing 100077 (CN)。魏金莹 (WEI, Jinying); 中国北京市丰台区云岗田城中里1号院, Beijing 100077 (CN)。周博文 (ZHOU, Bowen); 中国北京市丰台区云岗田城中里1号院, Beijing 100077 (CN)。崔皓玉 (CUI, Haoyu); 中国北京市丰台区云岗田城中里1号院, Beijing 100077 (CN)。

(74) 代理人: 杭州求是专利事务所有限公司 (HANGZHOU QIUSHI PATENT OFFICE CO., LTD.);

(54) Title: HIGH-PRESSURE LIQUID HYDROGEN CONVEYING SYSTEM FOR LIQUID HYDROGEN ENGINE TESTING AND METHOD THEREOF

(54) 发明名称: 一种用于液氢发动机测试的高压液氢输送系统及其方法

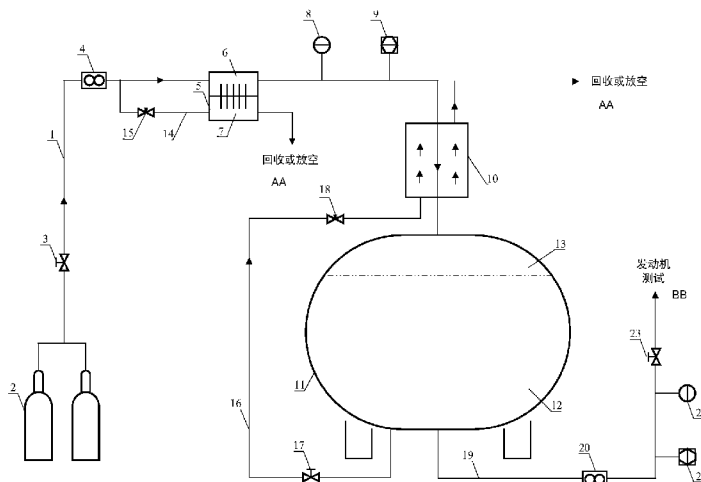


图 1

AA Recycling or emptying
BB Engine testing

(57) Abstract: A high-pressure liquid hydrogen conveying system for liquid hydrogen engine testing and a method thereof. According to the high-pressure liquid hydrogen conveying system, pressurized hydrogen is pre-cooled for the first time by using cooling capacity generated by throttling of high-pressure hydrogen, and then the pressurized hydrogen is pre-cooled for the second time by using the cooling capacity generated by throttling of high-pressure liquid hydrogen, thereby reducing a temperature driving potential difference of supercritical transition of the liquid hydrogen, and ensuring that the liquid hydrogen conveying system can output conventional liquid hydrogen within a set time. The high-pressure hydrogen and the high-pressure liquid hydrogen can be self-driven during throttling



WO 2024/041147 A1

中国浙江省杭州市西湖区古墩路701号紫金广场C座1506室, Zhejiang 310058 (CN)。

- (81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。
- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

refrigeration, an additional driving device such as a compressor or a booster pump is not required, and the system has a simple structure and reliable performance.

(57) 摘要: 一种用于液氢发动机测试的高压液氢输送系统及其方法。该高压液氢输送系统, 利用高压氢气节流产生的冷量第一次预冷增压氢气, 随后利用高压液氢节流产生的冷量第二次预冷增压氢气, 减小液氢发生超临界转变的温度驱动势差, 保证液氢输送系统在规定时间内均可输出常规液氢。高压氢气和高压液氢节流制冷时可进行自驱动, 无需压缩机或增压泵等额外的动设备, 系统结构简单、性能可靠。

一种用于液氢发动机测试的高压液氢输送系统及其方法

技术领域

本发明涉及氢能技术领域，特指一种用于液氢发动机测试的高压液氢输送系统及其方法。

背景技术

随着液氢的应用领域不断增加，以液氢作为发动机燃料的航天、航海和航空载具不断涌现。在以液氢为燃料的发动机测试过程中，需要将地面液氢储罐中的液氢在较短时间内输送至发动机测试端。而实际工程中，往往通过增压输送的方式将液氢储罐中的液氢输入至发动机测试端。在增压输送方式中，液氢预先被加注在液氢储罐中，然后向液氢储罐的顶空中注入高压氢气，从而增大管内压力，将液氢储罐中存储的液氢从出口压出，进入发动机测试端。但这种做法在实际应用中发现从液氢储罐中输出的液氢中存在大量的超临界氢，而超临界氢密度小于液氢，所以若输送至发动机测试端为超临界氢，则会导致氢燃料的供给量下降，影响正常的发动机测试。所以，在发动机测试时间段内防止向其输送超临界氢至关重要。但受限于液氢实验的特殊性和安全性，目前暂未发现抑制液氢增压输送过程超临界转变的相关技术。

发明内容

本发明的目的是解决现有技术中通过增压输送液氢过程中容易出现液氢超临界转变的问题，并提供一种用于液氢发动机测试的高压液氢输送系统及其方法。在本发明中，首先利用高压氢气节流产生的冷量第一次预冷增压氢气，随后利用高压液氢节流产量的冷量第二次预冷增压氢气，减小液氢发生超临界转变的温度驱动势差，保证液氢输送系统在规定时间内均可输出常规液氢。

本发明拟用如下技术方案实现本发明的目的：

第一方面，本发明提供了一种用于液氢发动机测试的高压液氢输送系统，其包括增压氢气管路、氢气节流管路、液氢节流管路、液氢加注管路、氢气节流冷

却器和液氢节流冷却器；

所述氢气节流冷却器内设有构成换热接触的第一氢气通路和第二氢气通路；

所述增压氢气管路的入口端连接高压氢气源，出口端连接液氢储罐的内腔顶空；增压氢气管路从入口端到出口端之间依次连接氢气阀、氢气流量计、氢气节流冷却器的第一氢气通路、氢气温度传感器、氢气压力传感器和液氢节流冷却器的管侧通道；

所述氢气节流管路的入口端连接氢气流量计和氢气节流冷却器之间的增压氢气管路，出口端外排；氢气节流管路从入口端到出口端之间依次连接氢气节流阀和氢气节流冷却器的第二氢气通路；

所述液氢节流管路的入口端连接液氢储罐的内腔底部，出口端外排；液氢节流管路从入口端到出口端之间依次连接第一液氢截止阀、液氢节流阀、液氢节流冷却器的壳侧通道；

所述液氢加注管路的入口端连接液氢储罐的内腔底部，出口端连接待测试的液氢发动机；液氢加注管路从入口端到出口端之间依次连接液氢流量计、液氢压力传感器、液氢温度传感器和第二液氢截止阀。

作为上述第一方面的优选，所述高压氢气源采用由压缩机提供的高压氢气或高压氢气瓶组。

作为上述第一方面的优选，所述液氢节流冷却器为管壳式换热结构，内部管侧通道用于流通待冷却的高压氢气，外部壳侧通道用于流通高压液氢节流产生的气液两相混合物。

作为上述第一方面的优选，所述液氢节流冷却器的换热管结构上设有增加换热面积的翅片。

作为上述第一方面的优选，所述氢气节流冷却器为气-气换热器，内部设有增加换热效率的热管。

作为上述第一方面的优选，所述氢气节流管路的出口端连接氢气回收设备或者直接放空。

作为上述第一方面的优选，所述液氢节流管路的出口端连接氢气回收设备或者直接放空。

作为上述第一方面的优选，所述氢气回收设备为用于发电的氢燃料电池。

第二方面,本发明提供了一种利用如上述第一方面任一所述系统的液氢发动机测试高压液氢输送方法,其包括:

S1、向液氢储罐内加注满足液氢发动机测试用量的液氢;

S2、打开氢气阀,将来自高压氢气源的常温高压氢气分别通过增压氢气管路和氢气节流管路导入氢气节流冷却器的第一氢气通路和第二氢气通路中,第二氢气通路中的高压氢气预先被氢气节流阀进行节流并降温,从而通过换热使第一氢气通路中的高压氢气初步降温;

S3、通过氢气温度传感器对初步降温后的高压氢气温度进行实时测量,并根据高压氢气实时温度进行如下控制:

若初步降温后的高压氢气温度未超过能够抑制液氢储罐内液氢超临界转变的目标温度,则保持第一液氢截止阀关闭,使初步降温后的高压氢气继续通过增压氢气管路直接穿过液氢节流冷却器的管侧通道后注入液氢储罐的液氢储罐气相区中,提升液氢储罐内部的压力;

若初步降温后的高压氢气温度仍然高于能够抑制液氢储罐内液氢超临界转变的目标温度,则打开第一液氢截止阀和液氢节流阀,使初步降温后的高压氢气继续通过增压氢气管路进入液氢节流冷却器的管侧通道中,而液氢储罐内的高压液氢则通过液氢节流管路进入液氢节流阀中进行节流降温,降温后的高压液氢进入液氢节流冷却器的壳侧通道进而对管侧通道内的高压氢气进行二次降温,使其不超过能够抑制液氢储罐内液氢超临界转变的目标温度;二次降温后的高压氢气注入液氢储罐的液氢储罐气相区中,以提升液氢储罐内部的压力;

S4、通过氢气压力传感器实时检测压力,当其压力达到目标压力值后打开第二液氢截止阀,使液氢储罐液相区底部的液氢在液氢储罐气相区的增压氢气作用下进入液氢加注管路,并依次流经液氢流量计、液氢压力传感器、液氢温度传感器和第二液氢截止阀后,最终输送至液氢发动机测试端。

作为上述第二方面的优选,在液氢发动机测试端需要持续输送恒压液氢时,需根据系统中的各传感器所检测的数据联动控制系统中的各阀门开度,保证注入液氢储罐气相区中的高压氢气温度恒定,且液氢储罐气相区的压力恒定。

本发明相比现有技术突出且有益的技术效果是:

1) 本发明利用高压氢气节流产生的冷量对增压氢气进行初步预冷,利用高

压液氢节流及汽化产生的冷量对增压氢气进行二次预冷，具有形式多样、冷量可调、适应性广的优点。

2) 本发明的高压氢气和高压液氢节流制冷时可进行自驱动，无需压缩机或增压泵等额外的动设备，系统结构简单、性能可靠。

3) 本发明通过双节流产生的氢气纯度较高，可直接进行回收再利用，最大限度地降低液氢增压超临界转变抑制所消耗的资源量。

以下将结合附图对本发明的构思、具体结构及产生的技术效果做进一步说明，以充分的了解本发明的目的、特征和效果。

附图说明

图 1 是本发明一种用于液氢发动机测试的高压液氢输送系统的结构示意图。

图中：增压氢气管路 1、高压氢气源 2、氢气阀 3、氢气流量计 4、氢气节流冷却器 5、第一氢气通路 6、第二氢气通路 7、氢气温度传感器 8、氢气压力传感器 9、液氢节流冷却器 10、液氢储罐 11、液氢储罐液相区 12、液氢储罐气相区 13、氢气节流管路 14、氢气节流阀 15、液氢节流管路 16、第一液氢截止阀 17、液氢节流阀 18、液氢加注管路 19、液氢流量计 20、液氢压力传感器 21、液氢温度传感器 22、第二液氢截止阀 23。

具体实施方式

为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂，下面结合附图对本发明的具体实施方式做详细的说明。在下面的描述中阐述了很多具体细节以便于充分理解本发明。但是本发明能够以很多不同于在此描述的其它方式来实施，本领域技术人员可以在不违背本发明内涵的情况下做类似改进，因此本发明不受下面公开的具体实施例的限制。本发明各个实施例中的技术特征在没有相互冲突的前提下，均可进行相应组合。

在本发明的描述中，需要理解的是，当一个元件被认为是“连接”另一个元件，可以是直接连接到另一个元件或者是间接连接即存在中间元件。相反，当元件为称作“直接”与另一元件连接时，不存在中间元件。

在本发明的描述中，需要理解的是，术语“第一”、“第二”仅用于区分描述目的，而不能理解为指示或暗示相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此，限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括至少一个该特征。

如图 1 所示, 在本发明的一个较佳实施例中, 提供了一种用于液氢发动机测试的高压液氢输送系统, 其组成元件包括增压氢气管路 1、高压氢气源 2、氢气阀 3、氢气流量计 4、氢气节流冷却器 5、第一氢气通路 6、第二氢气通路 7、氢气温度传感器 8、氢气压力传感器 9、液氢节流冷却器 10、液氢储罐 11、氢气节流管路 14、氢气节流阀 15、液氢节流管路 16、第一液氢截止阀 17、液氢节流阀 18、液氢加注管路 19、液氢流量计 20、液氢压力传感器 21、液氢温度传感器 22 和第二液氢截止阀 23。

液氢储罐 11 是一个外部包裹绝热材料的密闭罐体, 管体上设置液氢加注口。液氢储罐 11 的罐体内腔用于存储待加注至液氢发动机中的液氢。在实际应用中, 液氢储罐 11 的内腔以液氢液面为界分为液氢储罐液相区 12 和液氢储罐气相区 13, 当增压氢气管路 1 将增压氢气注入液氢储罐气相区 13 时, 液氢储罐气相区 13 的压力会逐渐增大, 进而将液氢储罐液相区 12 中的液氢通过液氢加注管路 19 注入液氢发动机测试端, 该过程可称为液氢增压输送过程。

通过该液氢增压输送过程的研究发现, 导致该过程中液氢向超临界氢转变的原因主要在于液氢储罐液相区 12 和液氢储罐气相区 13 两者的气液两相交界面处的升温。由于液氢的三相点温度和压力分别为 33.145 K 和 1.296 MPa, 而液氢输送的动力通常为高压氢气源 2 提供的压力高达十几兆帕的室温氢气。所以当增压氢气进入液氢储罐 11 中进行增压时, 除液氢储罐正常为发动机测试端输送液氢外, 气液两相交界面位置存在气相高液相低的温度差, 液氢储罐 11 中与增压氢气接触的液氢会逐渐转变为超临界氢。由于液氢向超临界氢转变时无相变潜热, 且超临界氢的导热系数大于液氢, 所以增压氢气的热量会迅速向液氢储罐的下部传输, 使更多的液氢转变为超临界氢。因此, 控制气液两相交界面处的液氢升温, 减小交界处液氢发生超临界转变的温度驱动势差, 是抑制液氢增压输送过程中液氢向超临界氢转变的关键。

基于上述原理, 本发明设计了对高压氢气进行降温的处理措施, 首先利用高压氢气节流产生的冷量第一次预冷增压氢气, 随后利用高压液氢节流的冷量第二次预冷增压氢气, 从而使高压氢气进入液氢储罐 11 之前预先被降温至能够抑制液氢储罐 11 内液氢超临界转变的目标温度。

需要说明的是, 能够抑制液氢储罐 11 内液氢超临界转变的目标温度, 理论

上越接近液氢储罐液相区 12 中存储的液氢的温度越佳。但实际应用时，无需将高压氢气降温至液氢温度，可根据实际的液氢超临界转变抑制效果设置一个高于液氢温度的目标温度。当高压氢气满足该目标温度时，能够总体上抑制液氢向超临界氢的转变即可，有极少量液氢发生超临界氢转变也是允许的。

下面对用于液氢发动机测试的高压液氢输送系统中各组成元件的具体连接方式和工作原理进行详细描述，以便于理解本发明的实质。

需要说明的是，高压氢气源 2 是指高于常压的氢气源，其具体的压力需要根据实际测试需要选定，并不限定具体的压力值，因此亦可称为增压氢气。该高压氢气源 2 可采用由压缩机提供的高压氢气或高压氢气瓶组，本实施例中选择用高压氢气瓶组来作为高压氢气源 2 提供增压氢气。

另外，为了实现对高压氢气的降温冷却，氢气节流冷却器 5 内设有构成换热接触的第一氢气通路 6 和第二氢气通路 7。在本实施例中，氢气节流冷却器 5 优选采用为气-气换热器，内部可以设置增加换热效率的热管。

由于在高压氢气流量较大时，单纯依靠高压氢气的节流不一定能够达到充分的降温效果，因此还需要设置液氢节流冷却器 10 进行辅助二次降温。液氢节流冷却器 10 内分为管侧通道和壳侧通道，两者构成换热接触。

继续参见图 1 所示，增压氢气管路 1 的入口端连接高压氢气源 2，出口端连接液氢储罐 11 的内腔顶空，其作用是将冷却后的高压氢气输送至液氢储罐，完成增压。增压氢气管路 1 从入口端到出口端之间依次连接氢气阀 3、氢气流量计 4、氢气节流冷却器 5 的第一氢气通路 6、氢气温度传感器 8、氢气压力传感器 9 和液氢节流冷却器 10 的管侧通道。

氢气阀 3 的作用是控制整条增压氢气管路 1 的启闭，氢气流量计 4 的作用是对增压氢气管路 1 中的氢气流量进行检测，氢气温度传感器 8 的作用是对增压氢气管路 1 中的氢气温度进行检测，氢气压力传感器 9 的作用是对增压氢气管路 1 中的氢气压力进行检测。在本实施例中，液氢节流冷却器 10 可采用管壳式换热结构，内部管侧通道用于流通待冷却的高压氢气，外部壳侧通道用于流通高压液氢节流产生的气液两相混合物，由此利用液氢的冷量对高压氢气进行二次降温。同样的，液氢节流冷却器 10 的换热管结构上也可以设有增加换热面积的翅片。

氢气节流管路 14 的作用是利用部分高压氢气节流产生的冷量完成增压氢气

的初步预冷。氢气节流管路 14 的入口端连接氢气流量计 4 和氢气节流冷却器 5 之间的增压氢气管路 1，出口端外排。氢气节流管路 14 从入口端到出口端之间依次连接氢气节流阀 15 和氢气节流冷却器 5 的第二氢气通路 7。其中氢气节流阀 15 的作用是对高压氢气进行节流，节流后的高压氢气压力减小且温度降低，随后进入氢气节流冷却器 5 的第二氢气通路 7，为进入液氢储罐 11 的高压氢气提供冷量。

液氢节流管路 16 的作用是利用部分高压液氢节流及汽化产生的冷量完成增压氢气的再次预冷。液氢节流管路 16 的入口端连接液氢储罐 11 的内腔底部，出口端外排。液氢节流管路 16 从入口端到出口端之间依次连接第一液氢截止阀 17、液氢节流阀 18、液氢节流冷却器 10 的壳侧通道。第一液氢截止阀 17 的作用是控制液氢节流管路 16 的通断，从而控制液氢节流冷却器 10 是否启用。液氢节流阀 18 的作用是在液氢节流冷却器 10 启用时，对进入液氢节流冷却器 10 的壳侧通道的高压液氢进行节流，从而产生低温的气液两相混合物，气液两相混合物进入液氢节流冷却器 10 的壳侧通道后与管侧通道中的高压氢气进行换热，从而对高压氢气进行二次降温，使其满足目标温度要求。

液氢加注管路 19 的作用是将液氢储罐 11 中的液氢输送至待测试的液氢发动机中。因此，液氢加注管路 19 的入口端连接液氢储罐 11 的内腔底部，出口端连接待测试的液氢发动机的液氢加注口。液氢加注管路 19 从入口端到出口端之间依次连接液氢流量计 20、液氢压力传感器 21、液氢温度传感器 22 和第二液氢截止阀 23。其中，第二液氢截止阀 23 的作用是控制整条液氢加注管路 19 的启闭，液氢温度传感器 225 的作用是对液氢加注管路 19 中的液氢温度进行检测，液氢压力传感器 21 的作用是对液氢加注管路 19 中的液氢压力进行检测，液氢流量计 20 的作用是对液氢加注管路 19 中的液氢流量进行检测，从而使加注至液氢发动机中的液氢的理化参数满足要求。

上述用于液氢发动机测试的高压液氢输送系统的运行方式如下：

- (1) 高压氢气源 2 可供应所需的增压氢气，液氢储罐 9 内已加注适量的液氢。
- (2) 打开氢气阀 3，来自高压氢气源 2 的常温高压氢气进入增压氢气管路 1，在经过氢气阀 3 和氢气流量计 4 后进入氢气节流冷却器 5 的氢气节流冷却器第一通路 6，吸收高压氢气节流产生的冷量进行初步降温，随后在流经氢气温度传感

器 8 和氢气压力传感器 9 后进入液氢节流冷却器 10，吸收高压液氢节流和汽化产生的冷量进行二次降温，达到设定温度后进入液氢储罐 11，与液氢储罐气相区 13 的低温氢气混合，提升液氢储罐 11 内部的压力。

(3) 增压氢气管路 1 中的高压氢气同时进入氢气节流管路 14，首先经过氢气节流阀 15 进行节流，节流后的高压氢气压力减小且温度降低，随后进入氢气节流冷却器 5 的氢气节流冷却器第二通路 7，为进入液氢储罐 11 的增压氢气提供冷量。

(4) 打开第一液氢截止阀 17，在液氢储罐气相区 13 中的高压氢气驱动下，液氢储罐 11 中的高压液氢进入液氢节流管路 16，流经第一液氢截止阀 17 后进入液氢节流阀 18 进行节流，节流后的高压液氢变成低温低压的气液两相混合物，随后进入液氢节流冷却器 10，为进入液氢储罐 11 的增压氢气提供冷量，冷量包括气液两相混合物的显冷以及液氢的汽化冷量。

(5) 打开第二液氢截止阀 23，在增压氢气的作用下，液氢储罐液相区 12 底部的液氢进入液氢加注管路 19，依次流经液氢流量计 20、液氢压力传感器 21、液氢温度传感器 22、第二液氢截止阀 23，最终输送至液氢发动机测试端；

由此，本发明通过利用高压氢气和高压液氢节流产生的冷量对增压氢气进行预冷，进而抑制液氢储罐液相区的液氢超临界转变，最终可使液氢储罐输出的均为常规液氢，保证后续液氢发动机的正常测试。

当然，需要注意的是，上述流程为增压氢气流量较大时的运行方式，当增压氢气流量较小时，也可仅采用单一高压氢气节流或高压液氢节流的方式。

另外，需要注意的是，在本发明中，氢气节流管路 14 和液氢节流管路 16 的出口端外排氢气或液氢时，既可以连接氢气回收设备进行回收利用，也可以直接放空。作为本发明实施例的一种较佳实现方式，节流后的高压氢气和高压液氢可进行回收利用，如直接通入氢燃料电池发电，并利用产生的电能驱动制冷机组冷却增压氢气。

在本发明的另一实施例中，还基于上述高压液氢输送系统，提供了一种液氢发动机测试高压液氢输送方法，其具体包括 S1~S4 步骤：

S1、向液氢储罐 9 内加注满足液氢发动机测试用量的液氢；

S2、打开氢气阀 3，将来自高压氢气源 2 的常温高压氢气分别通过增压氢气

管路 1 和氢气节流管路 14 导入氢气节流冷却器 5 的第一氢气通路 6 和第二氢气通路 7 中,第二氢气通路 7 中的高压氢气预先被氢气节流阀 15 进行节流并降温,从而通过换热使第一氢气通路 6 中的高压氢气初步降温;

S3、通过氢气温度传感器 8 对初步降温后的高压氢气温度进行实时测量,并根据高压氢气实时温度进行如下控制:

若初步降温后的高压氢气温度未超过能够抑制液氢储罐 11 内液氢超临界转变的目标温度,则保持第一液氢截止阀 17 关闭,使初步降温后的高压氢气继续通过增压氢气管路 1 直接穿过液氢节流冷却器 10 的管侧通道后注入液氢储罐 11 的液氢储罐气相区 13 中,提升液氢储罐 11 内部的压力;

若初步降温后的高压氢气温度仍然高于能够抑制液氢储罐 11 内液氢超临界转变的目标温度,则打开第一液氢截止阀 17 和液氢节流阀 18,使初步降温后的高压氢气继续通过增压氢气管路 1 进入液氢节流冷却器 10 的管侧通道中,而液氢储罐 11 内的高压液氢则通过液氢节流管路 16 进入液氢节流阀 18 中进行节流降温,降温后的高压液氢进入液氢节流冷却器 10 的壳侧通道进而对管侧通道内的高压氢气进行二次降温,使其不超过能够抑制液氢储罐 11 内液氢超临界转变的目标温度;二次降温后的高压氢气注入液氢储罐 11 的液氢储罐气相区 13 中,以提升液氢储罐 11 内部的压力;

S4、通过氢气压力传感器 9 实时检测压力,当其压力达到目标压力值后打开第二液氢截止阀 23,使液氢储罐液相区 12 底部的液氢在液氢储罐气相区 13 的增压氢气作用下进入液氢加注管路 19,并依次流经液氢流量计 20、液氢压力传感器 21、液氢温度传感器 22 和第二液氢截止阀 23 后,最终输送至液氢发动机测试端。

另外,在液氢发动机测试端需要持续输送恒压液氢时,需根据系统中的各传感器所检测的数据联动控制系统中的各阀门开度,调节不同管路中的工质流量,从而保证注入液氢储罐气相区 13 中的高压氢气温度恒定,且液氢储罐气相区 13 的压力恒定。因此,作为本发明实施例的一种较佳实现方式,该系统中的各阀门和传感器都可以连接至自控设备中,由自控设备统一进行自动化控制。

以上所述的实施例只是本发明的一种较佳的方案,然其并非用以限制本发明。有关技术领域的普通技术人员,在不脱离本发明的精神和范围的情况下,还可以

做出各种变化和变型。因此凡采取等同替换或等效变换的方式所获得的技术方案，均落在本发明的保护范围内。

权利要求书

1. 一种用于液氢发动机测试的高压液氢输送系统，其特征在于，包括增压氢气管路（1）、氢气节流管路（14）、液氢节流管路（16）、液氢加注管路（19）、氢气节流冷却器（5）和液氢节流冷却器（10）；

所述氢气节流冷却器（5）内设有构成换热接触的第一氢气通路（6）和第二氢气通路（7）；

所述增压氢气管路（1）的入口端连接高压氢气源（2），出口端连接液氢储罐（11）的内腔顶空；增压氢气管路（1）从入口端到出口端之间依次连接氢气阀（3）、氢气流量计（4）、氢气节流冷却器（5）的第一氢气通路（6）、氢气温度传感器（8）、氢气压力传感器（9）和液氢节流冷却器（10）的管侧通道；

所述氢气节流管路（14）的入口端连接氢气流量计（4）和氢气节流冷却器（5）之间的增压氢气管路（1），出口端外排；氢气节流管路（14）从入口端到出口端之间依次连接氢气节流阀（15）和氢气节流冷却器（5）的第二氢气通路（7）；

所述液氢节流管路（16）的入口端连接液氢储罐（11）的内腔底部，出口端外排；液氢节流管路（16）从入口端到出口端之间依次连接第一液氢截止阀（17）、液氢节流阀（18）、液氢节流冷却器（10）的壳侧通道；

所述液氢加注管路（19）的入口端连接液氢储罐（11）的内腔底部，出口端连接待测试的液氢发动机；液氢加注管路（19）从入口端到出口端之间依次连接液氢流量计（20）、液氢压力传感器（21）、液氢温度传感器（22）和第二液氢截止阀（23）。

2. 如权利要求 1 所述的用于液氢发动机测试的高压液氢输送系统，其特征在于，所述高压氢气源（2）采用由压缩机提供的高压氢气或高压氢气瓶组。

3. 如权利要求 1 所述的用于液氢发动机测试的高压液氢输送系统，其特征在于，所述液氢节流冷却器（10）为管壳式换热结构，内部管侧通道用于流通待冷却的高压氢气，外部壳侧通道用于流通高压液氢节流产生的气液两相混合物。

4. 如权利要求 1 所述的用于液氢发动机测试的高压液氢输送系统，其特征在于，所述液氢节流冷却器（10）的换热管结构上设有增加换热面积的翅片。

5. 如权利要求 1 所述的用于液氢发动机测试的高压液氢输送系统，其特征

在于，所述氢气节流冷却器（5）为气-气换热器，内部设有增加换热效率的热管。

6. 如权利要求 1 所述的用于液氢发动机测试的高压液氢输送系统，其特征在于，所述氢气节流管路（14）的出口端连接氢气回收设备或者直接放空。

7. 如权利要求 1 所述的用于液氢发动机测试的高压液氢输送系统，其特征在于，所述液氢节流管路（16）的出口端连接氢气回收设备或者直接放空。

8. 如权利要求 1 所述的用于液氢发动机测试的高压液氢输送系统，其特征在于，所述氢气回收设备为用于发电的氢燃料电池。

9. 一种如权利要求 1~8 任一所述系统的液氢发动机测试高压液氢输送方法，其特征在于，包括：

S1、向液氢储罐（9）内加注满足液氢发动机测试用量的液氢；

S2、打开氢气阀（3），将来自高压氢气源（2）的常温高压氢气分别通过增压氢气管路（1）和氢气节流管路（14）导入氢气节流冷却器（5）的第一氢气通路（6）和第二氢气通路（7）中，第二氢气通路（7）中的高压氢气预先被氢气节流阀（15）进行节流并降温，从而通过换热使第一氢气通路（6）中的高压氢气初步降温；

S3、通过氢气温度传感器（8）对初步降温后的高压氢气温度进行实时测量，并根据高压氢气实时温度进行如下控制：

若初步降温后的高压氢气温度未超过能够抑制液氢储罐（11）内液氢超临界转变的目标温度，则保持第一液氢截止阀（17）关闭，使初步降温后的高压氢气继续通过增压氢气管路（1）直接穿过液氢节流冷却器（10）的管侧通道后注入液氢储罐（11）的液氢储罐气相区（13）中，提升液氢储罐（11）内部的压力；

若初步降温后的高压氢气温度仍然高于能够抑制液氢储罐（11）内液氢超临界转变的目标温度，则打开第一液氢截止阀（17）和液氢节流阀（18），使初步降温后的高压氢气继续通过增压氢气管路（1）进入液氢节流冷却器（10）的管侧通道中，而液氢储罐（11）内的高压液氢则通过液氢节流管路（16）进入液氢节流阀（18）中进行节流降温，降温后的高压液氢进入液氢节流冷却器（10）的壳侧通道进而对管侧通道内的高压氢气进行二次降温，使其不超过能够抑制液氢储罐（11）内液氢超临界转变的目标温度；二次降温后的高压氢气注入液氢储罐（11）的液氢储罐气相区（13）中，以提升液氢储罐（11）内部的压力；

S4、通过氢气压力传感器（9）实时检测压力，当其压力达到目标压力值后打开第二液氢截止阀（23），使液氢储罐液相区（12）底部的液氢在液氢储罐气相区（13）的增压氢气作用下进入液氢加注管路（19），并依次流经液氢流量计（20）、液氢压力传感器（21）、液氢温度传感器（22）和第二液氢截止阀（23）后，最终输送至液氢发动机测试端。

10. 如权利要求 9 所述的液氢发动机测试高压液氢输送方法，其特征在于，在液氢发动机测试端需要持续输送恒压液氢时，需根据系统中的各传感器所检测的数据联动控制系统中的各阀门开度，保证注入液氢储罐气相区（13）中的高压氢气温度恒定，且液氢储罐气相区（13）的压力恒定。

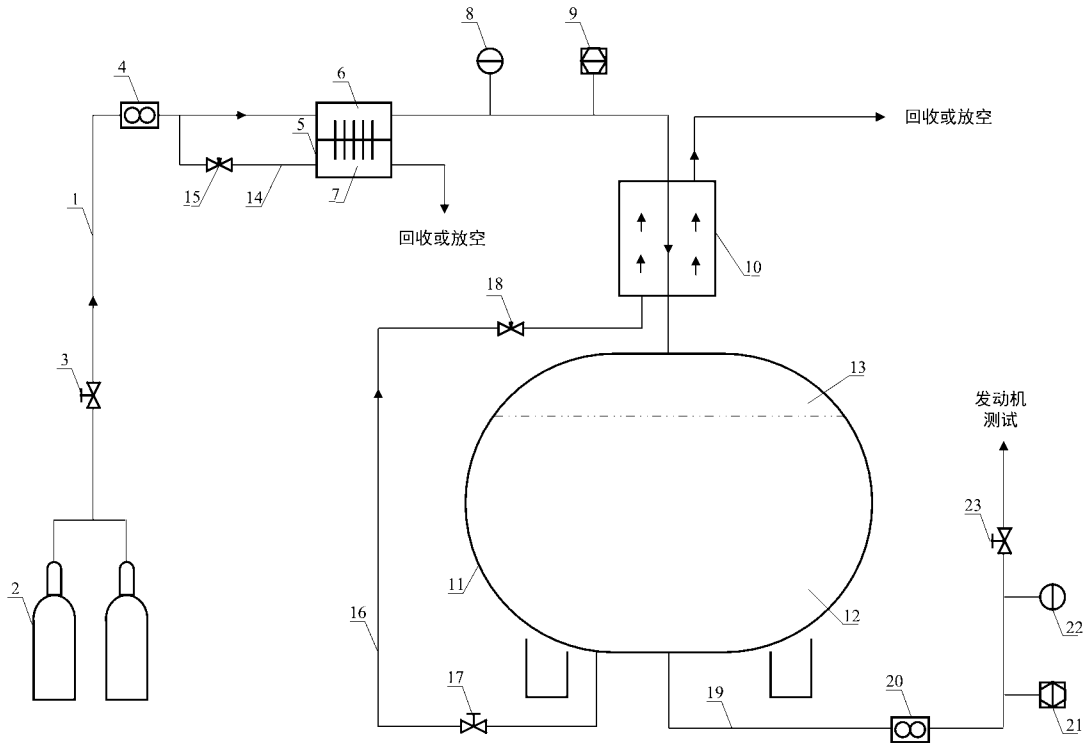


图 1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2023/101631

| A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER | | |
|--|---|--|
| F17D1/00(2006.01)i | | |
| According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC | | |
| B. FIELDS SEARCHED | | |
| Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) | | |
| IPC:F17D | | |
| Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched | | |
| Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) | | |
| CNTXT, ENTXTC, VEN: 超临界, 亚临界, 防止, 抑制, 避免, 降温, 节流降温, 节流冷却, 节流冷效应, 节流膨胀降温, 节流膨胀冷却, 节流膨胀制冷, 节流效应制冷, 节流制冷, 冷, 冷量, 冷能, 冷却, 膨胀, 氢, coolant, hydrogen, supercritical, throttle, hypercritical, cool+, overcritical, above-critical | | |
| C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT | | |
| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
| A | CN 110360441 A (ZHEJIANG UNIVERSITY et al.) 22 October 2019 (2019-10-22) description, paragraphs 27-44, and figure 1 | 1-10 |
| A | US 2012317995 A1 (MAGNA STEYR FAHRZEUGTECHNIK AG & CO KG) 20 December 2012 (2012-12-20) entire document | 1-10 |
| A | CN 111070994 A (GENG MINGZE) 28 April 2020 (2020-04-28) entire document | 1-10 |
| PX | CN 115199951 A (BEIJING INSTITUTE OF AEROSPACE TESTING TECHNOLOGY) 18 October 2022 (2022-10-18) entire document | 1-10 |
| PX | CN 115419829 A (BEIJING INSTITUTE OF AEROSPACE TESTING TECHNOLOGY) 02 December 2022 (2022-12-02) entire document | 1-10 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex. | | |
| * Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "D" document cited by the applicant in the international application "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family | | |
| Date of the actual completion of the international search | | Date of mailing of the international search report |
| 15 September 2023 | | 07 October 2023 |
| Name and mailing address of the ISA/CN | | Authorized officer |
| China National Intellectual Property Administration (ISA/CN) China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088 | | Telephone No. |

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2023/101631

| C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT | | |
|---|---|-----------------------|
| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
| A | DE 102012210067 A1 (BAYERISCHE MOTOREN WERKE AG) 19 December 2013 (2013-12-19) entire document | 1-10 |
| A | JP 2007250589 A (TOKYO ELECTRON LTD. et al) 27 September 2007 (2007-09-27) entire document | 1-10 |

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2023/101631

| Patent document cited in search report | | | Publication date (day/month/year) | Patent family member(s) | | | Publication date (day/month/year) |
|--|--------------|----|-----------------------------------|-------------------------|--------------|----|-----------------------------------|
| CN | 110360441 | A | 22 October 2019 | CN | 110360441 | B | 23 June 2020 |
| US | 2012317995 | A1 | 20 December 2012 | EP | 2535585 | A1 | 19 December 2012 |
| | | | | RU | 2012125151 | A | 27 December 2013 |
| | | | | RU | 2509229 | C1 | 10 March 2014 |
| | | | | DE | 102011104546 | A1 | 20 December 2012 |
| | | | | DE | 102011104546 | B4 | 29 May 2013 |
| | | | | CN | 102852759 | A1 | 02 January 2013 |
| | | | | CN | 102852759 | B | 24 June 2015 |
| CN | 111070994 | A | 28 April 2020 | None | | | |
| CN | 115199951 | A | 18 October 2022 | None | | | |
| CN | 115419829 | A | 02 December 2022 | CN | 115419829 | B | 23 May 2023 |
| DE | 102012210067 | A1 | 19 December 2013 | None | | | |
| JP | 2007250589 | A | 27 September 2007 | JP | 4787636 | B2 | 05 October 2011 |

| <p>A. 主题的分类</p> <p>F17D1/00(2006.01) i</p> <p>按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|-----|-------------------|---------|---|---|------|---|--|------|---|--|------|----|---|------|----|--|------|---|---|------|
| <p>B. 检索领域</p> <p>检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)</p> <p>IPC:F17D</p> <p>包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献</p> <p>在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))</p> <p>CNXTX, ENTXTC, VEN: 超临界, 亚临界, 防止, 抑制, 避免, 降温, 节流降温, 节流冷却, 节流冷效应, 节流膨胀降温, 节流膨胀冷却, 节流膨胀制冷, 节流效应制冷, 节流制冷, 冷, 冷量, 冷能, 冷却, 膨胀, 氢, coolant, hydrogen, supercritical, throttle, hypercritical, cool+, overcritical, above-critical</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>C. 相关文件</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>类型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>CN 110360441 A (浙江大学 等) 2019年10月22日 (2019 - 10 - 22) 说明书第27-44段, 附图1</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2012317995 A1 (MAGNA STEYR FAHRZEUGTECHNIK AG & CO KG) 2012年12月20日 (2012 - 12 - 20) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 111070994 A (耿铭泽) 2020年4月28日 (2020 - 04 - 28) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>CN 115199951 A (北京航天试验技术研究所) 2022年10月18日 (2022 - 10 - 18) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>CN 115419829 A (北京航天试验技术研究所) 2022年12月2日 (2022 - 12 - 02) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>DE 102012210067 A1 (BAYERISCHE MOTOREN WERKE AG) 2013年12月19日 (2013 - 12 - 19) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> </tbody> </table> | | | 类型* | 引用文件, 必要时, 指明相关段落 | 相关的权利要求 | A | CN 110360441 A (浙江大学 等) 2019年10月22日 (2019 - 10 - 22) 说明书第27-44段, 附图1 | 1-10 | A | US 2012317995 A1 (MAGNA STEYR FAHRZEUGTECHNIK AG & CO KG) 2012年12月20日 (2012 - 12 - 20) 全文 | 1-10 | A | CN 111070994 A (耿铭泽) 2020年4月28日 (2020 - 04 - 28) 全文 | 1-10 | PX | CN 115199951 A (北京航天试验技术研究所) 2022年10月18日 (2022 - 10 - 18) 全文 | 1-10 | PX | CN 115419829 A (北京航天试验技术研究所) 2022年12月2日 (2022 - 12 - 02) 全文 | 1-10 | A | DE 102012210067 A1 (BAYERISCHE MOTOREN WERKE AG) 2013年12月19日 (2013 - 12 - 19) 全文 | 1-10 |
| 类型* | 引用文件, 必要时, 指明相关段落 | 相关的权利要求 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A | CN 110360441 A (浙江大学 等) 2019年10月22日 (2019 - 10 - 22) 说明书第27-44段, 附图1 | 1-10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A | US 2012317995 A1 (MAGNA STEYR FAHRZEUGTECHNIK AG & CO KG) 2012年12月20日 (2012 - 12 - 20) 全文 | 1-10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A | CN 111070994 A (耿铭泽) 2020年4月28日 (2020 - 04 - 28) 全文 | 1-10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PX | CN 115199951 A (北京航天试验技术研究所) 2022年10月18日 (2022 - 10 - 18) 全文 | 1-10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PX | CN 115419829 A (北京航天试验技术研究所) 2022年12月2日 (2022 - 12 - 02) 全文 | 1-10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A | DE 102012210067 A1 (BAYERISCHE MOTOREN WERKE AG) 2013年12月19日 (2013 - 12 - 19) 全文 | 1-10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p><input checked="" type="checkbox"/> 其余文件在C栏的续页中列出。</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p><input checked="" type="checkbox"/> 见同族专利附件。</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>* 引用文件的具体类型:</p> <p>“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件</p> <p>“D” 申请人在国际申请中引证的文件</p> <p>“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利</p> <p>“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)</p> <p>“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件</p> <p>“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件</p> <p>“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件</p> <p>“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性</p> <p>“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性</p> <p>“&” 同族专利的文件</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>国际检索实际完成的日期</p> <p>2023年9月15日</p> | | <p>国际检索报告邮寄日期</p> <p>2023年10月7日</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>ISA/CN的名称和邮寄地址</p> <p>中国国家知识产权局 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088</p> | | <p>授权官员</p> <p>张欢</p> <p>电话号码 (+86) 027-59182100</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| C. 相关文件 | | |
|---------|--|---------|
| 类型* | 引用文件, 必要时, 指明相关段落 | 相关的权利要求 |
| A | JP 2007250589 A (TOKYO ELECTRON LTD et al) 2007年9月27日 (2007 - 09 - 27) 全文 | 1-10 |

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2023/101631

| 检索报告引用的专利文件 | | | 公布日 (年/月/日) | 同族专利 | | | 公布日 (年/月/日) |
|-------------|--------------|----|----------------|------|--------------|----|----------------|
| CN | 110360441 | A | 2019年10月22日 | CN | 110360441 | B | 2020年6月23日 |
| US | 2012317995 | A1 | 2012年12月20日 | EP | 2535585 | A1 | 2012年12月19日 |
| | | | | RU | 2012125151 | A | 2013年12月27日 |
| | | | | RU | 2509229 | C1 | 2014年3月10日 |
| | | | | DE | 102011104546 | A1 | 2012年12月20日 |
| | | | | DE | 102011104546 | B4 | 2013年5月29日 |
| | | | | CN | 102852759 | A1 | 2013年1月2日 |
| | | | | CN | 102852759 | B | 2015年6月24日 |
| CN | 111070994 | A | 2020年4月28日 | 无 | | | |
| CN | 115199951 | A | 2022年10月18日 | 无 | | | |
| CN | 115419829 | A | 2022年12月2日 | CN | 115419829 | B | 2023年5月23日 |
| DE | 102012210067 | A1 | 2013年12月19日 | 无 | | | |
| JP | 2007250589 | A | 2007年9月27日 | JP | 4787636 | B2 | 2011年10月5日 |