

(12) 实用新型专利

(10) 授权公告号 CN 203132192 U

(45) 授权公告日 2013. 08. 14

(21) 申请号 201320033469. 6

F25B 9/00 (2006. 01)

(22) 申请日 2013. 01. 21

F25B 41/00 (2006. 01)

F25B 41/06 (2006. 01)

(73) 专利权人 浙江大学

地址 310027 浙江省杭州市西湖区浙大路
38 号

(ESM) 同样的发明创造已同日申请发明专利

(72) 发明人 刘东立 王博 王龙一 甘智华
褚建琛 张小斌 张学军 汪伟伟
吴镁 刘雨梦 赵胜颖

(74) 专利代理机构 杭州天勤知识产权代理有限
公司 33224

代理人 胡红娟

(51) Int. Cl.

F25B 1/00 (2006. 01)

F25B 1/10 (2006. 01)

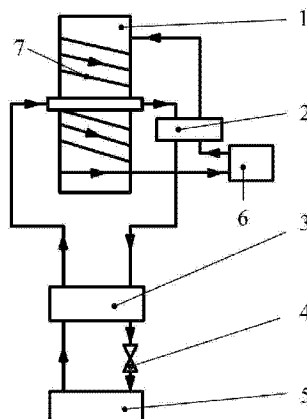
权利要求书1页 说明书6页 附图3页

(54) 实用新型名称

低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统

(57) 摘要

本实用新型公开了一种低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统,包括制冷单元和预冷单元,制冷单元包括一级低温线性压缩机、节流前换热器、节流阀和蒸发器;预冷单元包括一级预冷换热器和预冷机构;一级低温线性压缩机出口通过管路依次与一级预冷换热器的高温侧管路、节流前换热器的高温侧管路、节流阀、节流前换热器的低温侧管路和压缩机入口连通形成循环回路;预冷机构出口通过管路依次与一级预冷换热器的低温侧管路、一级低温线性压缩机的表面盘管和预冷机构入口连通形成循环预冷回路。本实用新型的制冷循环系统采用低温下工作的压缩机,减少了制冷剂因逆流式换热器而产生的压力损失,增加了节流阀两端压比,提高了 J-T 节流制冷性能。



1. 一种低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统,包括制冷单元和预冷单元,其特征在于,所述制冷单元包括一级低温线性压缩机(1)、节流前换热器(3)、节流阀(4)和蒸发器(5);所述的预冷单元包括一级预冷换热器(2)和预冷机构(6);按照制冷剂流向,所述一级低温线性压缩机(1)出口通过管路依次与一级预冷换热器(2)的高温侧管路、节流前换热器(3)的高温侧管路、节流阀(4)和蒸发器(5)入口连通,蒸发器(5)出口通过管路依次与节流前换热器(3)的低温侧管路和压缩机(1)入口连通形成循环回路;按照预冷剂流向,所述预冷机构(6)出口通过管路依次与一级预冷换热器(2)的低温侧管路、一级低温线性压缩机(1)的表面盘管(7)和预冷机构(6)入口连通形成循环预冷回路。

2. 根据权利要求 1 所述的低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统,其特征在于,所述一级低温线性压缩机(1)为超导线性压缩机。

3. 根据权利要求 1 所述的低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统,其特征在于,所述一级预冷换热器(2)高温侧管路出口与节流前换热器(3)高温侧管路入口之间的管路上还设有二级低温线性压缩机(12)和二级预冷换热器(14);所述二级低温线性压缩机(12)入口与一级预冷换热器(2)的高温侧管路连通,二级低温线性压缩机(12)出口通过二级预冷换热器(14)的高温侧管路与节流前换热器(3)高温侧管路入口连通;所述二级预冷换热器(14)的低温侧管路入口通过管路同时与预冷机构(6)出口连通,出口与二级低温线性压缩机(12)的表面盘管(13)入口连通;二级低温线性压缩机(12)的表面盘管(13)出口通过管路同时与预冷机构(6)的入口连通。

4. 根据权利要求 3 所述的低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统,其特征在于,所述二级低温线性压缩机(12)为超导线性压缩机。

5. 根据权利要求 1 所述的低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统,其特征在于,所述节流前换热器(3)的低温侧管路出口和一级低温线性压缩机(1)入口之间的管路上还设有线性压缩机(8)、一级换热器(9)、高温预冷换热器(10)、二级换热器(11);按照制冷剂流向,所述节流前换热器(3)的低温侧管路出口通过管路依次与二级换热器(11)的低温侧管路、一级换热器(9)的低温侧管路与所述线性压缩机(8)入口连通,线性压缩机(8)出口通过管路依次与一级换热器(9)的高温侧管路、高温预冷换热器(10)以及二级换热器(11)的高温侧管路与所述一级低温线性压缩机(1)入口连通。

6. 根据权利要求 1-5 任一权利要求所述的低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统,其特征在于,所述预冷机构(6)为氢吸附式制冷机构、以氢为工质的 J-T 节流制冷机构、以氦为工质的 J-T 节流制冷机构、或者以氦为工质的回热式制冷机构。

7. 根据权利要求 2 所述低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统,其特征在于,所述的制冷剂为氦气,所述的预冷机构(6)为能够提供 20K 以下温度冷源的预冷机构;所述的超导线性压缩机的线圈为临界温度高于 20K 的超导材料;所述预冷换热器(2)制冷剂出口的制冷剂需预冷至 20K 及以下温度。

低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统

技术领域

[0001] 本实用新型涉及制冷技术领域,具体是涉及一种低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统。

背景技术

[0002] 随着空间探测技术的发展,有越来越多的探测器工作在 4K 及 mK 级温区,而且 mK 级温区必需 4K 温区提供预冷,所以 4K 温区是空间探测中一个极其重要的温区,一直是科学研究的重点和难点。

[0003] 空间液氮温区的制冷方式主要有液氮(或超流氮)杜瓦技术和机械式制冷技术。其中液氮杜瓦制冷技术利用储存在高真空多层绝热储罐里的液氮或者超流氮的蒸发吸热来实现制冷效应,这种方式可以获得较稳定的温度,在早期的航天探测领域具有广泛的应用,技术相对成熟,但是它存在体积大、重量重、绝热系统复杂,发射成本高以及使用寿命受工质存储量限制等缺点。随着机械式制冷技术的进步和发展,特别是板弹簧和间隙密封等技术的应用,彻底解决了杜瓦技术始终无法克服的长寿命问题,使得机械式制冷技术如斯特林制冷机和脉管制冷机近 20 年来在航天领域快速发展并占有相当的份额。而在 15K 以下温区,氮严重偏离理想气体性质、回热材料体积比热容急剧下降等原因造成已在空间大量运用的斯特林制冷机和斯特林型脉管制冷机在液氮温区制冷效率较低。实际空间应用中经常希望压缩机单元能够尽可能靠近散热单元便于热量的耗散,尽可能远离被冷却的探测器装置以减小压缩机带来的热耗散、机械振动和电磁干扰。而回热式低温制冷机的冷端与热端距离比较近,难以实现压缩机和冷头分置的要求,从而限制了其在空间任务中的应用。

[0004] 焦耳-汤普逊节流制冷机(Joule-Thomson Cooler,以下简称 J-T 节流制冷机)利用温度低于 15K 时,氮气的非理想特性显著这一特点引起的 Joule-Thomson 节流效应来获得制冷,效率较高。而且 J-T 制冷机没有冷端运动部件,工质直流流动,冷头可根据所需冷却的结构进行自由设计等特点所带来的一系列优点使 J-T 制冷机成为空间液氮温区任务的主流。

[0005] J-T 制冷机压缩机单元可分为非机械压缩机和机械压缩机两类。前者主要采用吸附压缩机,是目前 J-T 制冷机研究的热点之一,具有无运动部件、机械振动和电磁干扰小等特点,但是吸附压缩机的效率普遍偏低,压缩机系统的结构也比较复杂;后者则工作在室温下,尽管压缩机单元无可避免的存在一定的机械振动和电磁干扰,但是机械压缩机技术相对成熟,系统结构简单,效率比较高。而对于空间液氮温区的长寿命,低振动,无油的要求,机械压缩机中目前唯有线性压缩机能够满足。因此线性压缩机是目前 J-T 制冷机实际空间应用的主要驱动类型。目前存在的 J-T 制冷机大多存在制冷性能不高的技术问题。

实用新型内容

[0006] 本实用新型提供了一种低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统,该制冷循环系统采用低温下工作的压缩机,减少了制冷剂因逆流式换热器而产生的压力损失,在压

压缩机进出口压比相同的情况下,增加了节流阀两端压比,提高了 J-T 节流制冷性能。

[0007] 一种低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统,包括制冷单元和预冷单元,所述制冷单元包括一级低温线性压缩机、节流前换热器、节流阀和蒸发器;所述的预冷单元包括一级预冷换热器和预冷机构;按照制冷剂流向,所述一级低温线性压缩机出口通过管路依次与一级预冷换热器的高温侧管路、节流前换热器的高温侧管路、节流阀和蒸发器入口连通,蒸发器出口通过管路依次与节流前换热器的低温侧管路和压缩机入口连通形成循环回路;按照预冷剂流向,所述预冷机构出口通过管路依次与一级预冷换热器的低温侧管路、一级低温线性压缩机的表面盘管和预冷机构入口连通形成循环预冷回路。

[0008] 压缩机如果工作在低温下,其线圈电阻会大大减小,本身产生的焦耳热也会随之减小,其维持低温环境的热负荷为焦耳热与工质压缩热之和,也会大大减小。对于常温下压缩的深冷温区的 J-T 节流制冷机往往需要多级逆流式换热器回收冷量,若压缩机直接在低温下压缩,则可以减少逆流式换热器个数,因而可以减少多个换热器带来的压降,使得节流前压力更加接近压缩机排气压力,节流后压力更接近压缩机吸气压力,节流导致的温降更大,可获得更低的制冷温度或者更大的制冷量(更好的制冷性能)。其工质可以是氦,氢,氖(稀有气体很贵,一般不用),氮等,其压缩机所处低温环境视其工质和制冷温度要求而定。

[0009] 为进一步提高制冷性能,作为优选,所述一级低温线性压缩机为超导线性压缩机。超导线性压缩机是工作在低温下的采用超导线圈的线性压缩机,它既有普通线性压缩机的优点,而且在低温下表现出更好的性能。采用超导电机的线性压缩机在低于其线圈材料温度以下时,其电阻几乎为零,因而消除了超导线性压缩机的铜损,从而消除了相应的线圈产生的焦耳热。因此在超导线性压缩机在其线圈材料临界温度以下工作时,其自身产生的热负荷仅为压缩工质所产生的压缩热,也就是说为其维持低温环境所需的制冷量较小。所以采用超导线性压缩机的液氮温区 J-T 节流制冷循环便可以更高效地获得液氮温区制冷性能,同时具有结构紧凑、寿命长、可靠性高等优点。

[0010] 实际使用过程中,作为优选,压缩机可采用多级压缩,例如采用两级压缩时,所述一级预冷换热器高温侧管路出口与节流前换热器高温侧管路入口之间的管路上还设有二级低温线性压缩机和二级预冷换热器;所述二级低温线性压缩机入口与一级预冷换热器的高温侧管路连通,二级低温线性压缩机出口通过二级预冷换热器的高温侧管路与节流前换热器高温侧管路入口连通;所述二级预冷换热器的低温侧管路入口通过管路同时与预冷机构出口连通,出口与二级低温线性压缩机的表面盘管入口连通;二级低温线性压缩机的表面盘管出口通过管路同时与预冷机构的入口连通。采用两级压缩时,在第一级低温线性压缩机出口将工质冷却至第一级低温线性压缩机吸气温度的,然后再进入第二级低温线性压缩机,可减少第二级压缩的发热量,也可减小总的输入功,提高循环效率。作为进一步优选,所述二级低温线性压缩机为超导线性压缩机。

[0011] 在制冷单元中也可根据实际需要增加线性压缩机,作为优选,所述节流前换热器的低温侧管路出口和一级低温线性压缩机入口之间的管路上还设有线性压缩机、一级换热器、高温预冷换热器、二级换热器;按照制冷剂流向,所述节流前换热器的低温侧管路出口通过管路依次与二级换热器的低温侧管路、一级换热器的低温侧管路与所述线性压缩机入口连通,线性压缩机出口通过管路依次与一级换热器的高温侧管路、高温预冷换热器以及二级换热器的高温侧管路与所述一级低温线性压缩机入口连通。

[0012] 所述预冷机构可根据低温线性压缩机需要工作的温度不同,选用不同制冷剂的制冷机构,例如:若压缩机需工作在 20K,那么一般用液氢作为冷却压缩机的低温流体,也可以是氦气,相应的制冷机构可选用氢吸附式制冷机构或以氢为工质的 J-T 节流制冷机构,或者以氦为工质的回热式制冷机构(GM 制冷机,斯特林制冷机,GM 脉管制冷机,斯特林脉管制冷机或斯特林/脉管复合型制冷机)。若压缩机工作在 80K 左右温区,所述制冷机构可采用以氦为工质的 J-T 节流制冷机构,或以氦为工质的回热式制冷机构。

[0013] 为得到 4K 的制冷温区,作为优选,所述的制冷剂为氦气,所述的预冷机构为能够提供 20K 以下温度冷源的预冷机构;所述的超导线性压缩机的线圈为临界温度高于 20K 的超导材料;所述预冷换热器制冷剂出口的制冷剂需预冷至 20K 及以下温度。

[0014] 与现有技术相比,本实用新型的有益效果体现在:

[0015] (1) 本实用新型的低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统可调性较强,即可采用单级或多级超导线性压缩机在线圈材料临界温度以下压缩的形式,也可采用线性压缩机在常温下一级压缩,超导线性压缩机在线圈材料临界温度以下一级或二级压缩的形式,前者结构更加紧凑, J-T 循环自身的理论能效比(卡诺 COP) 高,后者有利于实现更大的压比并降低压缩机成本,可根据实际需要选择。

[0016] (2) 本实用新型采用超导线性压缩机工作在 20K 左右的低温环境中,对液氦温区 J-T 节流制冷循环的工质进行压缩,有利于增大节流前后实际压比,提升该循环制冷性能。同时由于超导线性压缩机采用了超导线圈,消除了超导线性压缩机线性电机中由电阻引起的铜损,有效地提高了压缩机的效率。因此由超导线性压缩机驱动的液氦温区 J-T 节流制冷循环将具有较高的效率,也具有寿命长、可靠性高等优点。

附图说明

[0017] 图 1 为本实用新型的低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统的第一种实施方式示意图。

[0018] 图 2 为本实用新型的低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统的第二种实施方式示意图。

[0019] 图 3 为本实用新型的低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统的第三种实施方式示意图。

[0020] 图 4 为图 1 所示循环系统的 T-s 示意图。

[0021] 图 5 为图 2 所示循环系统的 T-s 示意图。

[0022] 其中:1:一级低温线性压缩机、2:一级预冷换热器、3:节流前换热器、4:节流阀、5:蒸发器、6:预冷机构、7:一级低温线性压缩机表面盘管、8:线性压缩机、9:一级换热器、10:高温预冷换热器、11:二级换热器、12:二级低温线性压缩机、13:二级低温线性压缩机表面盘管、14:二级预冷换热器。

具体实施方式

[0023] 实施例 1

[0024] 如图 1 所示,一种低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统,包括制冷单元和预冷单元,制冷单元包括一级低温线性压缩机 1、节流前换热器 3、节流阀 4 和蒸发器 5;预

冷单元包括一级预冷换热器 2 和预冷机构 6,其中一级低温线性压缩机 1 为超导线性压缩机。

[0025] 制冷单元和预冷单元各部件之间的连接关系为:

[0026] 按照制冷剂流向,一级低温线性压缩机 1 出口通过管路依次与一级预冷换热器 2 的高温侧管路、节流前换热器 3 的高温侧管路、节流阀 4 和蒸发器 5 入口连通,蒸发器 5 出口通过管路依次与节流前换热器 3 的低温侧管路和压缩机 1 入口连通形成循环回路;

[0027] 按照预冷剂流向,预冷机构 6 出口通过管路依次与一级预冷换热器 2 的低温侧管路、一级低温线性压缩机 1 的表面盘管 7 和预冷机构 6 入口连通形成循环预冷回路。

[0028] 制冷单元和预冷单元内工质的工作过程分别为:

[0029] 制冷单元内制冷剂的工作过程为:制冷剂由一级低温线性压缩机 1 压缩至高压并排出,流经一级预冷换热器 2、节流前换热器 3 的高温侧管路和节流阀 4,在节流阀 4 处节流至低压并达到液氦温区后流入蒸发器 5,经蒸发器 5 蒸发气体后进入节流前换热器 3 的低温侧管路,最终返回一级低温线性压缩机 1。

[0030] 预冷单元内预冷剂的工作过程为:预冷剂由预冷机构 6 出发,流经一级预冷换热器 2 和一级低温线性压缩机表面盘管 7,冷却一级低温线性压缩机 1 出口工质及一级低温线性压缩机 1 后返回预冷机构 6。

[0031] 预冷机构 6 需提供 20K 以下温度的冷源及输送预冷剂的动力装置,预冷机构可选择以氦为工质的回热式制冷机构(GM 制冷机,斯特林制冷机,GM 脉管制冷机,斯特林脉管制冷机或斯特林/脉管复合型制冷机)。一级低温线性压缩机 1 线圈采用临界温度高于 20K 的超导材料。系统如上述流程及要求安装,安装完毕后,对系统内部抽真空至 10^{-2} Pa 左右,然后充入高纯氦气,保持 5 分钟左右再对系统内部抽真空至 10^{-2} Pa 左右。如此反复抽真空充气 3-4 次后,最终充入工作压力的高纯氦气,即可保证系统中氦气工质的纯度。开启预冷机构 6,使预冷机构 6 中预冷剂流经一级预冷换热器 2 将一级低温线性压缩机 1 出口工质预冷至 20K 及以下温度,之后流经一级低温线性压缩机表面盘管 7 将一级低温线性压缩机 1 冷却至一级低温线性压缩机 1 的线圈材料的临界温度以下,最终流回预冷机构 6。然后,调节一级低温线性压缩机 1 的运行频率至液氦温区 J-T 节流制冷循环最佳工作频率。在系统稳定前,同时调节预冷机构 6 以保证一级低温线性压缩机 1 线圈材料的临界温度以下稳定运行,且一级预冷换热器 2 工质出口温度稳定在 20K 及以下温度。系统稳定后即可在蒸发器 5 处获得液氦温度及相应的制冷量。图 4 为本实施方式的低温线性压缩机驱动 J-T 节流制冷循环系统的 T-s 示意图。图 4 中各编号曲线为工质在图 1 相应编号部件中的过程曲线。

[0032] 实施例 2

[0033] 如图 2 所示一种低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统,与实施例 1 区别在于:一级预冷换热器 2 高温侧管路出口与节流前换热器 3 高温侧管路入口之间的管路上还设有二级低温线性压缩机 12 和二级预冷换热器 14。其中二级低温线性压缩机 12 入口与一级预冷换热器 2 的高温侧管路连通,二级低温线性压缩机 12 出口通过二级预冷换热器 14 的高温侧管路与节流前换热器 3 高温侧管路入口连通;二级预冷换热器 14 的低温侧管路入口通过管路同时与预冷机构 6 出口连通,二级预冷换热器 14 的低温侧管路出口与二级低温线性压缩机 12 的表面盘管 13 入口连通;二级低温线性压缩机 12 的表面盘管 13 出口通过管路同时与预冷机构 6 的入口连通。

[0034] 预冷机构 6 需提供 20K 以下温度的冷源及输送预冷剂的动力装置,预冷机构可选择以氦为工质的回热式制冷机构(GM 制冷机,斯特林制冷机,GM 脉管制冷机,斯特林脉管制冷机或斯特林 / 脉管复合型制冷机)。一级低温线性压缩机 1 线圈采用临界温度高于 20K 的超导材料。系统如上述流程及要求安装,安装完毕后,对系统内部抽真空至 10^{-2} Pa 左右,然后充入高纯氦气,保持 5 分钟左右再对系统内部抽真空至 10^{-2} Pa 左右。如此反复抽真空充气 3-4 次后,最终充入工作压力的高纯氦气,即可保证系统中氦气工质的纯度。开启预冷机构 6,使预冷机构 6 中预冷剂分别流经一级预冷换热器 2 和二级预冷换热器 14,将一级低温线性压缩机 1 和二级低温线性压缩机 12 出口温度冷却至 20K 及以下温度,之后分别流经一级低温线性压缩机表面盘管 7 和二级低温压缩及表面盘管 13,并将一级低温线性压缩机 1 和二级低温线性压缩机 12 冷却至一级低温线性压缩机 1 和二级低温线性压缩机 12 的线圈材料的临界温度以下,最终流回预冷机构 6。然后,调节一级低温线性压缩机 1 的运行频率至液氦温区 J-T 节流制冷循环最佳工作频率。在系统稳定前,同时调节预冷机构 6 以保证一级低温线性压缩机 1 线圈材料的临界温度以下稳定运行,且一级预冷换热器 2 工质出口温度稳定在 20K 及以下温度。系统稳定后即可在蒸发器 5 处获得液氦温度及相应的制冷量。

[0035] 实施例 3

[0036] 如图 3 所示,一种低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统,包括制冷单元和预冷单元,制冷单元包括一级低温线性压缩机 1、节流前换热器 3、节流阀 4、蒸发器 5、线性压缩机 8、一级换热器 9、高温预冷换热器 10 和二级换热器 11;预冷单元包括一级预冷换热器 2 和预冷机构 6,其中一级低温线性压缩机 1 为超导线性压缩机。

[0037] 制冷单元和预冷单元内工质的工作过程分别为:

[0038] 制冷单元内制冷剂的工作过程为:制冷剂由线性压缩机 8 压缩至高压并排出,流经一级换热器 9、高温预冷换热器 10 和二级换热器 11 后进入一级低温线性压缩机 1,再次被压缩至更高压力并排出,流经一级预冷换热器 2、节流前换热器 3 高温侧管路和节流阀 4,在节流阀 4 处节流至低压并达到液氦温度后流入蒸发器 5,经蒸发器 5 蒸发气体后流经节流前换热器 3 低温侧管路、二级换热器 11 的低温侧管路和一级换热器 9 的低温侧管路,最终返回线性压缩机 8。同时,高温预冷换热器 10 中引入冷量直接冷却一级换热器 9 高温侧管路出口工质。而预冷剂由预冷机构 6 出发,流经一级预冷换热器 2 和一级低温线性压缩机表面盘管 7,冷却一级低温线性压缩机 1 出口工质及一级低温线性压缩机 1 后返回预冷机构 6。预冷机构 6 需提供 20K 以下温度的冷源及输送预冷剂的动力装置。

[0039] 一级低温线性压缩机 1 线圈采用临界温度高于 20K 的超导材料。系统如上述流程及要求安装,安装完毕后,对系统内部抽真空至 10^{-2} Pa 左右,然后充入高纯氦气,保持 5 分钟左右再对系统内部抽真空至 10^{-2} Pa 左右。如此反复抽真空充气 3-4 次后,最终充入工作压力的高纯氦气,即可保证系统中氦气工质的纯度。在高温预冷换热器 10 中引入冷量冷却液氦 J-T 节流循环内工质,开启预冷机构 6,使预冷机构 6 中预冷剂流经一级低温线性压缩机表面盘管 7 将一级低温线性压缩机 1 冷却至一级低温线性压缩机 1 线圈材料的临界温度以下。然后,分别调节线性压缩机 8,一级低温线性压缩机 1 的运行频率至液氦温区 J-T 节流制冷循环最佳工作频率。在系统稳定前,分别调节高温预冷换热器 10 引入的冷量和预冷机构 6 以保证一级低温线性压缩机 1 在线圈材料的临界温度以下稳定运行,且一级预冷换热

器 2 工质出口温度稳定在 20K 及以下温度。系统稳定后即可在蒸发器 9 处获得液氦温度及相应的制冷量。

[0040] 图 5 为实施方式的低温线性压缩机驱动的 J-T 节流制冷循环系统的 T-S 示意图。图 5 中各编号曲线为工质在图 3 相应编号部件中的过程曲线。

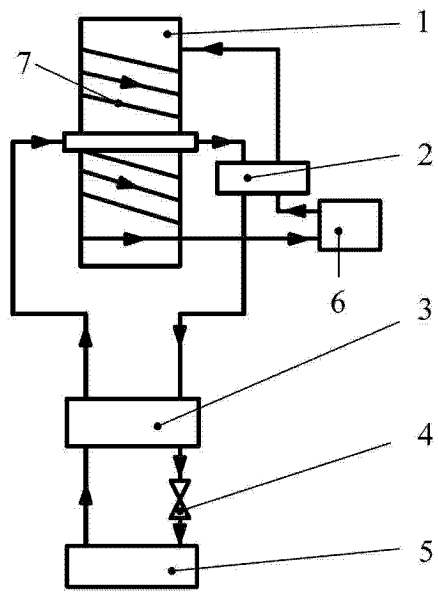


图 1

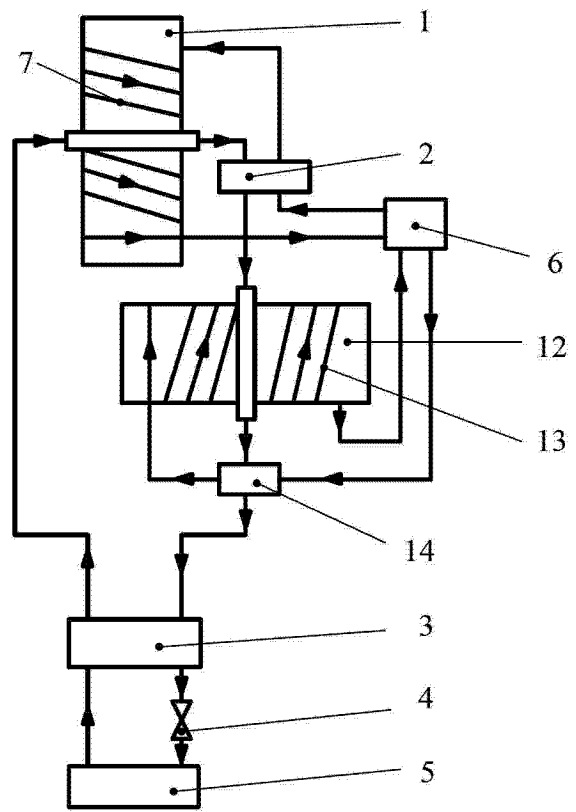


图 2

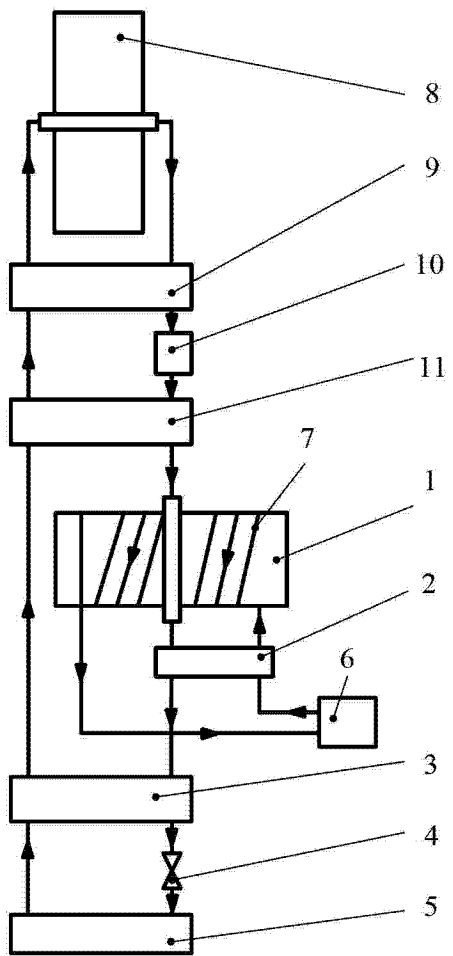


图 3

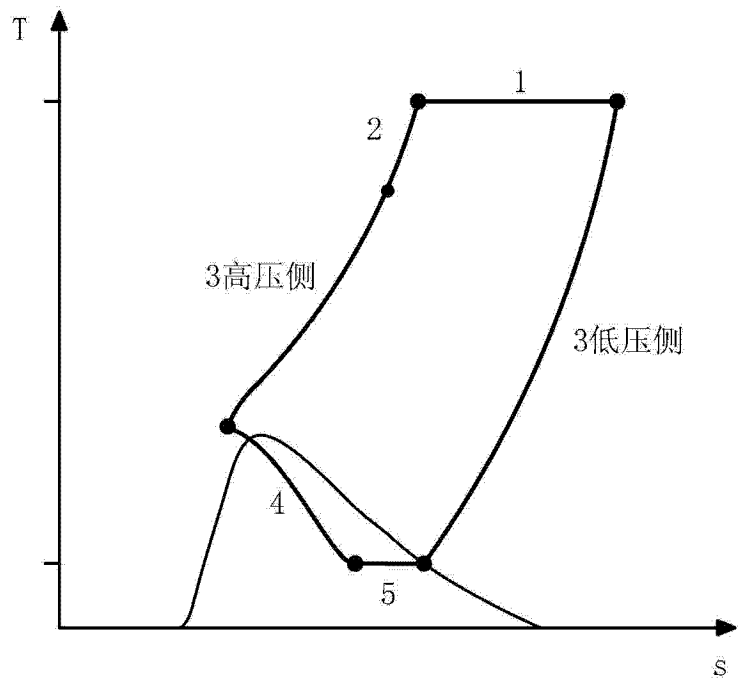


图 4

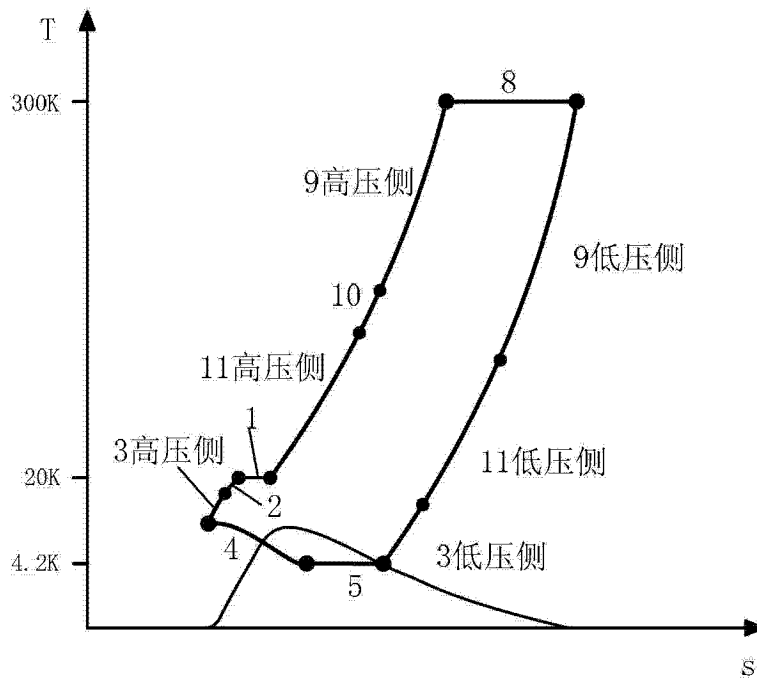


图 5