

# 非机械氢气压缩机的技术与性能研究

张梦俭

(天津安派克氢能装备有限公司,天津 300400)

**摘要:**非机械氢气压缩机已被证明是机械压缩机的有效替代品,具有无运动部件且紧凑度高等优点,是提高氢能利用水平的重要研究方向。介绍低温压缩、金属氢化物、电化学和吸附等非机械氢气压缩机,分析每种压缩技术的基本工作原理和可实现的性能,描述其目前在氢气应用中的用途以及技术极限,为进一步提高氢气压缩性能提供了有力技术支持。

**关键词:**低温压缩机;金属氢化物压缩机;电化学压缩机

**中图分类号:**TH45 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)01-0069-03

## Research on Technology and Performance of Non – mechanical Hydrogen Compressor

ZHANG Mengjian

(Tianjin Anpaike Hydrogen Energy Equipment Co., Ltd., Tianjin 300400, China)

**Abstract:** Non-mechanical hydrogen compressors, having been proven to be effective substitutes for mechanical compressors and boasting the advantages of no moving parts and high compactness, are of important research direction to improve the level of hydrogen energy utilization. This paper introduces non-mechanical hydrogen compressors such as cryogenic compression, metal hydride, electrochemical and adsorption, analyzes the basic working principles and commercially available performance of each compression technology, describes their current use in hydrogen applications and their technical limits as well. The research provides favorable technical support for further improvement of hydrogen compression performance.

**Keywords:** cryogenic compressors; metal hydride compressors; electrochemical compressors

## 0 引言

全球能源需求的不断增长以及人们对环境污染的日益担忧,使得氢成为传统化石燃料的现实替代品,然而氢气在标准温度和压力下的体积能量密度远低于汽油。目前提高体积能量密度值几种方法:1)在气瓶中压缩;2)低温容器内液化;3)储存在金属氢化物合金中;4)吸附在大面积材料上;5)化学储存在共价和离子化合物中。其中,压缩氢气虽然不是最便宜的方法,却是储存氢气最普遍的方法<sup>[1]</sup>。

机械氢气压缩机虽已广泛应用,但在气态下压缩会消耗大量的能量,非机械式压缩机没有运动部件,不仅减少压缩机故障的可能性,节省成本,还可以提高设备的安全性。目前,非机械式氢气压缩机包括低温压缩机、吸附式压缩机、金属氢化物压缩机和电化学氢气压缩机。

## 1 低温压缩

低温压缩结合了氢液化和氢压缩两种技术,在极低温度下实现高压。低温泵压力高达 85 MPa、氢气流量 100 kg/h、氢气密度高达 80 g/L。低温压缩储氢容器具有以下几个优点:1)由于短时间的不活动或较短的驱动距离而减少蒸发损失;2)较小的蒸发空间(20%)可防止危

险。比常规常温压缩容器多储存 2~3 倍的燃料;在室温下 100 L 氢气需压缩至 75 MPa 才可储存 4.1 kg 氢气,当温度降至 77 K 时,只需要压缩至 15 MPa 的压力就可以得到同样的量。

低温压缩系统由低压储液氢罐、低温泵和低温压缩机依次排列组成。液氢通过真空绝热管道送入低温泵,然后低温泵将液氢加压至所需压力值。为了获得高压气态氢,可在低温泵下游使用汽化器,如图 1 所示。

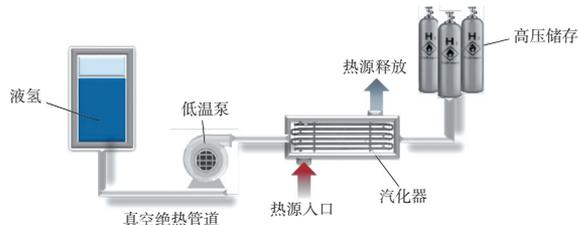
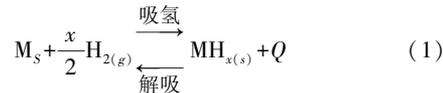


图 1 低温氢气压缩机系统方案

低温压缩系统的体积效率是机械压缩机效率的 2 倍以上,但是低温需要对系统的保温进行连续监测,目的是控制真空稳定性,系统更复杂、技术挑战性更高。低温系统的性能取决于压力容器的几何形状以及所用的材料。在近几年取得了几项改进,如整体系统明显压实或衬板厚度从 3 cm 减小至 1.5 cm;采用轻质合金作为壳层材料。

## 2 金属氢化物压缩机

金属氢化物压缩机利用氢化物形成金属、合金或金属间化合物的特性,通过反应系统中热反应来吸收和解吸氢气,不使用固体、液体活塞或者隔膜等移动部件压缩氢气,因此也被称为“热动力”压缩机,早在20世纪70年代作为氢制冷机开始使用,在过去的几十年里已用于压缩、存储、低温等不同领域。金属氢化物是氢与金属(元素金属、合金或金属间化合物)的二元组合,金属与氢进行可逆反应:



吸氢是一个放热过程,伴随着热量的释放(方程(1)中的 $Q$ ),而解吸是吸热的,只有当热量供给时才能释放出氢气。氢压缩是金属氢化物的连续冷却和加热的结果,由热传递控制。热交换可以通过外表面进行,也可以使用外径一般 $\leq 30$  mm的管式反应器,以便在径向进行高效传热。采用高温热源可实现的释放压力为供给压力的3~10倍,容积效率可达93%,采用多级氢化物压缩机也可以实现高压。图2为单级金属氢化物氢压缩机方案。

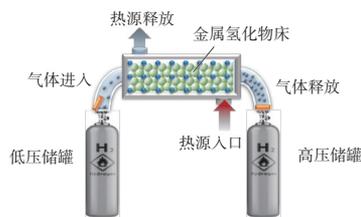


图2 单级金属氢化物氢压缩机方案

金属氢化物压缩机供能系统的热源可以来自废工业热或者是可再生能源,由于氢气可以穿过电化学的膜,与氧气发生反应降低系统的性能,所以电解制取高压氢气是比较困难的,可以在电解槽下游使用紧凑型金属氢化物压缩机使氢气达到更高压力。

为了使金属氢化物压缩机达到良好的性能,对反应器的厚度、尺寸以及与冷却系统的组合等设计参数进行优化。连续的吸收和解吸循环导致材料体积的反复膨胀和收缩,可能会使合金粉化成小颗粒,如果发生不可逆变形,氢化物的氢容量可能会减少导致整体效率下降。

## 3 电化学压缩机

电化学压缩机消耗的电力可以来自太阳能、风能或生物质能,低压氢气可以通过氢重整、水电分解或储氢提供;来自电化学压缩机的出口高压纯氢气可以直接输入到各种应用中,包括工业、存储和汽车应用;氢气循环系统可以减少吹扫操作和电压脉动的频率,提高效率<sup>[2-3]</sup>。电化学压缩机的项目已开发用于冷冻压缩机、航空航天应用中的红外探测器<sup>[4]</sup>、气体净化装置<sup>[5]</sup>等。

电化学压缩机和基于质子交换膜燃料电池(PEMFC)有相同的基本原理,低压氢气由电化学电池的阳极通入,

在此处分裂成质子和电子:



质子通过固体聚合物电解质进行电化学流动,而电子则遵循外部路径,即由供给系统的电位差控制的电路。当质子和电子到达阴极后,它们重新结合形成氢分子,从而使压力增大:



图3为电化学压缩机方案示意图。为了保证最佳的压缩性能,系统内部采用高效用水管理系统,从而保持膜的最佳水化程度<sup>[6-7]</sup>。

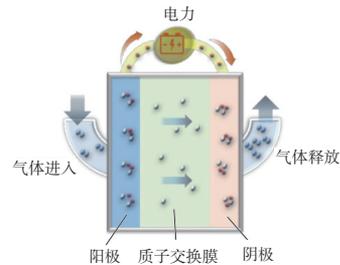


图3 电化学压缩机方案

电化学压缩机最重要的优点是保证无运动部件的无振动运转<sup>[8]</sup>。这种特性使得它非常适用于航天红外探测器的制冷机,因为常用的机械压缩机在航天器上产生明显的振动会造成大量的图像伪影。即使氢气与其他气体(如氦气或二氧化碳)混合,氢气压缩机也可作为净化装置工作,产生高纯氢气。

## 4 吸附压缩机

氢气吸附压缩机(图4)是通过压缩床与系统环境之间的传热来控制压缩的热力学发动机,低压氢气送入由高比表面积多孔材料构成的固体床所填充的密闭储氢罐中,具有很高的吸附势。吸附后向系统提供热量,产生氢气解吸的温度升高,氢气体相密度增加,得到高压氢气。这是由于当温度升高时,氢气从吸附相(密度更大)向密闭容器体积内的本体气相移动。因此,可能达到的压力水平严格取决于最终温度、罐内体积气相的可用体积以及吸附剂的质量。

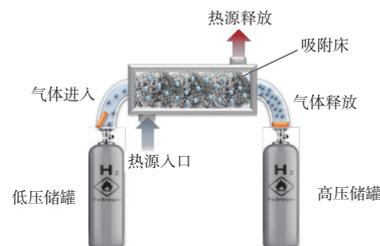


图4 吸附压缩机方案

吸附是一个放热过程,只有降温体系才能增大吸附力。为此,氢气的吸附一般是在低至 $-196$  °C的温度下进行,一般利用液氮作为制冷剂就可以对吸附式压缩机进行热管理。

储氢罐内氢气温度的显著升高会影响材料的力学性

能,故采用复合罐体(图5)。外层以碳纤维为基体,保证罐体的结构强度,内层通常被称为“衬套”,具有重要的密封性作用,可采用金属或塑料制造,因为金属壁面具有较高的导热系数,应优先选用金属壁面。

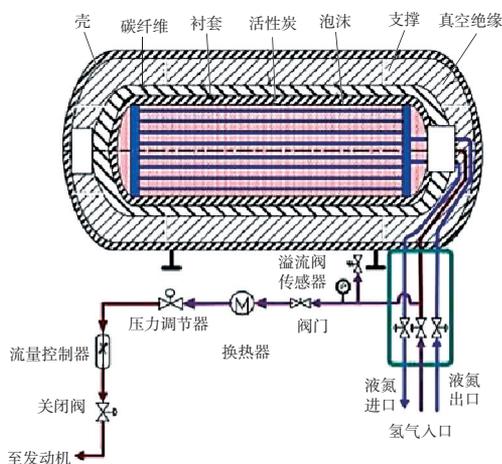


图5 吸附式氢气应用罐方案

## 5 氢气压缩机的成本和效率概述

低温泵将氢气压缩在液态下体积能量密度可达 $80\text{g/L}$ ,低温压缩成本的可用信息较少,低温压缩需要初步氢液化,氢液化的能耗 $10\sim 13\text{kWh/kg}$ 。而且液氢输送也是低温压缩的限制性因素。金属氢化物压缩机每年的维护费用大概是机械压缩机的 $1/9$ ,然而平均效率在 $10\%$ 左右。据估算,两级压缩机的比能耗约为 $6\sim 7\text{kWh/kg}$ ,加上热损失后能耗高达 $10\text{kWh/kg}$ 。电化学压缩机具有非常高的效率和较低的成本,对于低压应用( $\leq 10\text{MPa}$ ),效率一般高于 $60\%$ ,通过优化催化剂、加强热管理、改进水管理和使用低成本膜优化运营成本。氢气吸附压缩机的概念还不成熟,不必考虑机械单元磨损造成的维护费用,体积明显小于往复压缩机。由于运行在低温环境,吸附罐必须承受非常低的温度和较高的压力,因此需要周期性的维护。总成本预计略高于金属氢化物压缩机。

## 6 结语

本文通过阐述非机械式氢气压缩机的基本工作原理,分析了不同类型压缩机的优缺点以及每种非机械式压缩技术潜在可实现的性能;描述了它们目前在氢气应用中的用途以及技术极限,概述了为改善氢压缩性能的可能途径。非机械压缩技术的可获得性使开发创新和环境友好型的能源使用的解决方案成为可能,从而向化石燃料剥离过渡,并对可持续发展作出重要贡献。

### 参考文献:

- [1] 尹秀丽,韩艳,郭学敬. 两级活塞式超高压氢气压缩机[J]. 液压与气动,2019(6):112-115.
- [2] TOGHYANI S, BANIASADI E, AFSHARI E. Performance analysis and comparative study of an anodic recirculation system based on electrochemical pump in proton exchange membrane fuel cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(42):19691-19703.
- [3] TOGHYANI S, AFSHARI E, BANIASADI E. A parametric comparison of three fuel recirculation system in the closed loop fuel supply system of PEM fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(14):7518-7530.
- [4] CHEN W, CAMERON B H, ZAGAROLA M V, et al. A high pressure ratio DC compressor for tactical cryocoolers [C]. Conference on Tri - Technology Device Refrigeration, [S.I.;s.n.], 2016.
- [5] SCHORER L, SCHMITZ S, WEBER A. Membrane based purification of hydrogen system (MEMPHYS) [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(25):12708-12714.
- [6] RHANDI M, TRÉGARO M, DRUART F, et al. Electrochemical hydrogen compression and purification versus competing technologies; Part I. Pros and cons [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2020, 41(5):756-769.
- [7] TRÉGARO M, RHANDI M, DRUART F, et al. Electrochemical hydrogen compression and purification versus competing technologies; part II. challenges in electrocatalysis [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2020, 41(5):770-782.
- [8] 杨洋. 基于质子交换膜的电化学氢泵的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2012.

收稿日期:2021-10-11