

20 K氢液化冷箱可靠性设计

文/马小红
上海燃料电池汽车动力系统有限公司

摘要：介绍了20 K氢液化冷箱的结构和技术参数，重点介绍了20 K高真空冷箱、板翅式换热器、氢透平膨胀机、管道、仪表和控制系统等方面的结构设计，并针对性地提出了安全防范措施。20 K氢液化冷箱的研发是保证液氢储运得以发展的重要前提，其可靠性设计，可为减少氢液化工厂安全事故提供保障。

关键词：氢液化；20K高真空绝热冷箱；氢透平膨胀机；板翅式换热器；正仲氢转化

氢液化冷箱是保证液氢实现大范围储运的基本前提。20 K氢液化冷箱（以下简称20 K冷箱）是目前国内首台民用氢液化冷箱，主要包括高真空壳体、铝制钎焊换热器、嵌入式膨胀机、超低温阀门、管道、安保控制系统和动态真空系统等几大部分。该设备优点是：外壳采用可拆卸设计，便于维护；正仲氢转化器与原料气通道有机结合，实现了连续等温转换，效率高、能耗低；20 K冷箱同时配备动态抽真空和真空在线检测系统，确保冷箱持续维持高真空度。因此开展20 K冷箱的可靠性设计研究，对于预防安全事故发生具有重要意义。

20 K冷箱危险分析

氢气作为易燃介质，具有可燃范围宽（4%~75%）、点火能量小的特点，其在压缩、液化和存储过程中存在比较大的安全隐患，一旦泄漏，将可能引发火灾、爆炸事故。其危险性主要包括：①液氢为低温液体，泄漏以后会造成材料冷脆，导致严重事故；②在液化过程中，由于正仲氢转换不彻底，造成正氢继续向仲氢转化而产生转换热，液氢大量气化，造成超压；当压力达到一定值时，会造成设备损坏，氢气泄漏；③氢气着火能量小，但一旦达到爆炸下限，极容易发生爆燃和爆炸气体；④液化工厂由于高度集成化的特点，一旦其中一个设备发生

事故，则损坏程度深，损坏面广。可见，20 K冷箱安全问题至关重要，本次设计过程中，充分应用可靠性分析工具，以安全为首要前提，识别风险源，使之达到较高的安全水平。

20 K冷箱可靠性设计

20 K冷箱是一种液化及正仲氢转化为一体的高真空绝热冷箱，包括用于维持高真空腔体的壳体、制冷液化系统和安保控制系统等。20 K冷箱技术参数见表1。

表1 20 K冷箱技术参数表

项目	管道系统参数	壳体参数
设计压力/MPa	3.5/0.45	-0.1
设计温度/K	433~20	-40
绝热方式	高真空多层绝热	
漏率/(Pa·m ³ /s)	1×10^{-9}	
封结真空度/Pa	1×10^{-4}	
外形尺寸/(mm)	10 300×3 600×4 500	
设备总重/kg	28	

1. 壳体设计

20 K冷箱的壳体采用卧式、圆筒型和双鞍座结构；端盖采用可拆卸设计，法兰连接，便于运行过程中设备的检修；壳体法兰面采用双密封结构，密封圈之间设计有高真空腔体，可有效延长密封圈的使用寿命。壳体内出厂真空度达 1×10^{-4} Pa，为保

持稳定的高真空运行环境，冷箱运行过程中设置有两套真空泵系统，一备一用，用以实现动态抽真空和真空在线监测。

2. 氢液化&制冷循环系统设计

20 K冷箱包含氢液化系统和氢制冷循环系统两部分，经过上级系统压缩纯化并多级预冷后的氢气进入20 K冷箱，经过一系列的换热装置及正仲氢转化装置，最终被冷凝为仲氢大于95%的液氢。

(1) 铝制钎焊换热器

换热器选用铝制板翅式钎焊换热器，即来自纯化预冷段的氢气，通过与氢制冷循环系统进行热交换，最终被冷凝为液氢。同时，换热器自带正仲态的转化装置，可在氢液化的同时完成氢气/液氢的正仲态转化，从而减少液氢的挥发损失，延长无损贮存时间。该项目换热器具有效率高、适应性强和汽化量稳定等优点。换热器技术参数示例见表2。

表2 换热器技术参数

名称	参数1	参数2	参数3	参数4
设计压力/MPa	3.5	3.5	3.5	0.45
通道容积/L	65	21	9	235
换热面积/m ²	39	25	17	35

(2) 氢透平膨胀机设计

本项目氢透平膨胀机是利用油制动，使氢气在高速旋转的叶轮内膨胀，从而达到给氢气降温降压的目的。膨胀机包括一级氢透平膨胀机、二级氢透平膨胀机及三级氢透平膨胀机，每级膨胀机包括至少一组涡轮机，涡轮机通过主轴固定于安装台架上，其低温部分嵌入在20 K高真空冷箱内。该膨胀机为氢液化提供冷量需求的同时，可有效提高氢的液化效率。

(3) 阀门仪表等附件

20 K冷箱用阀门、仪表、安全附件、装卸附件、密封垫片及紧固件等必须满足液氢使用要求，与液氢相接触的部位采用带内外环的不锈钢金属缠绕垫片，且与介质相容。截止阀和紧急切断阀设置有波纹管密封型式，可有效防止阀门内漏。

(4) 管道设计

20 K冷箱管道需综合考虑整个液化工厂的工艺流程进行设计，管道满足最大流量的同时，留有足够的收缩空间。管道材料采用S31603奥氏体不锈钢和5052铝；仪表、接头及相关附件布置于冷箱顶部

的操作平台内，可实现集中管理和操作。管道膨胀技术参数见表3。

表3 管道膨胀技术参数

名称	参数
设计压力/MPa	3.5
设计温度/℃	-253
公称直径/mm	DN200
公称直径/mm	DN200

3. 安保控制系统

项目设置有独立的分布式控制系统（Distributed Control System, DCS）和安全仪表系统（Safety Interlocking System, SIS），冷箱运行过程中的温度、压力、液位和机泵状态可进行自动检测、控制和报警。包括：①20 K冷箱关键部位设置有报警点及互锁装置，系统可通过通信模块在DCS实现显示和远程控制；②设置UPS不间断供电，可保证装置停电时仪表正常运转；③对有可能存在氢气泄漏的地方，设置固定式气体报警仪；④设置仪表蒸汽伴热系统和冲洗系统，防止仪表管道冻塞；⑤采用TÜV安全认证的可编程序控制器完成冷箱的紧急停车，可同步实现与DCS的实时数据通信。

结束语

随着氢液化技术的日益成熟，液氢在氢能产业中的存储、运输优势明显；大力研发氢液化装置已是大势所趋。而20 K冷箱作为氢液化的核心设备，随着国家各项政策的出台，必将迅速发展。

考虑到氢介质的易燃易爆特性，本文充分分析其危险性，做好基于风险预防的可靠性设计。为今后氢液化设备研究及促进氢液化设备安全运行提供重要技术参考。EA

参考文献

[1] 曾伟平, 陈杰, 鹿来运. 含氧煤层气低温脱氧液化工艺及安全分析[J]. 石油与天然气化工, 2015(6): 50-54.

[2] 冯文, 王淑娟, 倪维斗, 等. 氢能的安全性和燃料电池汽车的氢安全问题[J]. 太阳能学报, 2003(5): 677-682.