

高压液氢容器的研制

路兰卿 于 洋

(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)



摘要: 针对设计温度为 -253°C 、设计压力为 17.7 MPa 高压液氢贮存容器的设计、方案确定、加工制造等方面进行了详细介绍。容器承压结构为单层厚壁板卷, 其绝热方式采用液氮夹套预冷屏和外堆积绝热的形式, 目前该容器已成功完成了多次发动机的试验任务。

关键词: 高压液氢容器; 容器结构; 焊接

Development of High Pressure and Liquid Hydrogen Vessel

Lu Lanqing Yu Yang

(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074)

Abstract: This text introduces a high pressure liquid hydrogen vessel's design, plan, manufacture etc which the design temperature is -253°C and design pressure is 17.7 MPa . The pressure bearing structure is one layer, insulation is LN_2 precooling screen and the outer packing insulation. This vessel is successfully designed and applied in china.

Key words: high pressure liquid hydrogen vessel; vessel's structure; welding

1 引言

新一代运载火箭发动机推进剂普遍采用液氧、液氢、液态甲烷和丙烷等。同时受技术原因以及环境保护要求所限, 能大量用做推进剂的只有液氧和液氢两种, 其中液氢的两个突出优点: 一是高比冲; 二是清洁能源, 使得液氢作为发动机的推进剂有着很大的优越性。但是这类介质工作温度都很低(液氧: -183°C , 液氮: -196°C , 液氢: -253°C), 在这些介质的低温获得、低温保持、气体液化和分离、低温液体的贮运等工艺中, 其中每一种都必将会有低温容器的应用, 目前, 中、低压低温容器在设计、制造加工中已经是很成熟的技术, 而高压低温容器却没有研制过, 为了配合航天事业发展的要求, 高压低温容器的研制也就迫在眉睫。所以在新一代运载火箭的研制中, 我们研制了一种设计压力为 17.7 MPa 的高压液氢容器。

2 方案确定

目前, 贮存低温液体采用的绝热方式有堆积绝热、高真空绝热、真空粉末绝热和真空多层绝热等几种类型^[1]。其中高真空多层绝热的绝热效果最明显, 但是考虑到作为氢氧发动机试验用的这两台高压容器有着至关重要的作用, 同时它们的设计加工进程将会严重影响氢氧发动机的试车进程。根据试车台试车的现实情况, 容器只是短时贮存液氢用, 为了缩短设计及加工周期, 决定采用液氮屏预冷的外堆积绝热方式。针对内容器的具体结构提出了两种不同的方案: 一种是绕带式多层结构; 一种是锻造结构。绕带式结构一般应用在高温高压的环境, 而在液氢温度下没有使用的先例。如果将该容器设计成绕带式结构, 必须先设计一台小型高压低温容器, 经过液氢充装试验成功后才能进行 $1:1$ 设计。考虑到当向容器加注液体后, 由于内外壁温度的不同, 存在收缩不一致的可能性, 绕带的层与层之间就会出现间隙, 造成容器运行不安定。所以最终采用了单一厚板卷焊成形外加液氮夹套的结构(见图1), 并确定了容器的主要参数(见表1)。之所以外加液氮屏, 一方面是考虑到采用液氮

作者简介: 路兰卿(1973-), 高级工程师, 化工设备与机械专业; 研究方向: 阀门、压力容器、压力管道等产品的设计研究。

收稿日期: 2012-10-18

预冷放空液氮，再加注液氢以后，夹套预冷屏中剩余的氮气也会液化凝固，使得夹套预冷屏中处于真空状态，可以降低漏热，减少液氢的损耗，另一方面也是考虑到用液氮将容器预冷到液氮温度再冷至液氢温度比采用液氢直接预冷更经济。

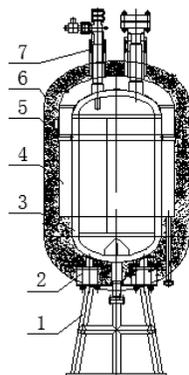


图1 容器结构图

1—支架 2—支腿 3—内容器 4—夹套 5—调整螺杆 6—保温层
7—波纹膨胀节

表1 容器基本技术数据

	内容器	夹套(液氮夹套)
工作介质	液氢	液氮
设计压力/MPa	17.7	0.3
设计温度/℃	-253	-196
绝热形式	真空、堆积绝热	堆积绝热
材料	304(0Cr18Ni9)	

3 工作原理

由于设备工作温度低，所以试车前需要先对内容器预冷，但是考虑到液氢的成本高，为了降低成本，选用液氮作为预冷剂。先向夹套(液氮夹套)内加注液氮，初步预冷内容器，使内容器器壁温度先达到液氮温度，然后排净液氮，再向内容器加注液氢，此时由于液氢温度低于液氮温度，残留在夹套内的氮气被冷凝。所以夹套内就形成了真空，有效地降低了冷损，保障了液氢的贮存和使用。

4 设计

4.1 容器结构

由图1知，该高压低温容器由内容器和夹套组成，其中内、外容器之间由于温度不同造成的收缩位移由波纹膨胀节来补偿。容器由外到内依次是保温层、夹

套(液氮夹套)和内容器。为了在组装时调整内容器与夹套的间隙，在内容器的筒体上距离上封头200mm的位置沿着筒体的圆周均布焊接了6个垫块，夹套上的相应位置焊接了6个螺纹管安装调节螺杆。这些调节螺杆在容器加工后运输时又可以作为内容器的支撑结构，而当容器加注工作介质时，由于内、外容器温度存在差异，螺杆即脱离内容器的外壁，切断了由螺杆向内传热的通道，降低了冷损。由于各个部件结构、尺寸大小、温度均存在差异，所以内外容器的收缩变形是由安装在内、外容器接管法兰之间焊接的波纹膨胀节补偿的(见图2)。由于低温介质价格一般比较昂贵，所以为进一步降低内容器的冷损，容器支腿与支架之间安装了环氧玻璃钢，切断了容器与外界传热的直接途径。

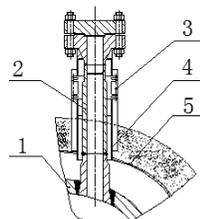


图2 接管与波纹管的连接图

1—内容器 2—接管 3—保护罩 4—波纹膨胀节 5—保温层

4.2 材料选用

对于低温容器的选材，考虑到过去很多容器在低应力下就发生了脆性断裂，所以材料的低温韧性就成为选材时首要考虑的问题。众所周知，具有面心立方结构的金属材料一般都不存在低温脆断，低温的冲击功比较高，如铜、铝、镍和奥氏体类钢等一般都没有脆性转变温度。对于高压低温容器来讲，应该采用高强度钢，能够减轻设备的重量，即可减少预冷液体的消耗量，而奥氏体不锈钢与其他钢种相比具有相对高的强度和韧性。

考虑以上原因，选用了从美国进口的304钢材，且为固溶状态，材料和焊接产品试板在LN₂、LH₂温度下的冲击功不小于31J^[3]，侧向膨胀量不小于0.53mm^[4]。考虑到目前国内只能做到LN₂温度，无法做到LH₂温度下的冲击试验，决定LH₂温度下的冲击试验暂时不做，待条件具备后由加工厂负责补做(根据俄罗斯提供的资料和《深冷手册》中提供的数据知道，304钢材在液氢温度和液氮温度下冲击值差别不大^[5])。

4.3 结构设计

高压容器的壁相对较厚,对各个受压元件之间焊接连接的圆滑过渡有着较高的要求;而低温压力容器结构设计总的指导思想是受压元件要有足够的柔性,尽可能地限制峰值应力及各种可能引起的局部应力。因此结构设计时应尽可能简单,减少焊接件的约束;结构形状不用突然变化,接管端部应根据壳体厚度及接管厚度的大小打磨成圆角,接管与壳体之间的焊接应圆滑过渡;焊接时尽量不要使用不连续焊或点焊;容器的支座、吊耳等的焊接需设置垫板,不得直接焊在壳体上;尽量使得结构在外载荷作用下可以自由变形、不受约束。

4.4 焊接结构设计

低温压力容器焊接结构设计的关键在于焊接接头的全焊透,防止因焊接接头中存在裂纹、气孔等人为缺陷,导致容器发生低应力脆断。所有内容器接管与封头的连接均采用对接接头形式,氩弧焊打底保证全焊透,使焊缝有足够的强度和气密性。封头与筒体由于存在着较大的厚度差异,在焊接时进行了削薄处理,使得外形比较圆滑过渡从而减少边缘应力。应用在真空多层容器的夹套焊接时,为了有利于抽真空一般将焊接死角背离真空一侧,虽然该容器不是真空多层,但是考虑加工的方便性,同样采用了里侧焊接的方法。

由于内容器的壳体较厚,为了尽量降低焊缝两侧的焊接热影响区,其A、B类对接接头采用了厂方有施工经验的超窄形焊缝结构,所有元件的焊接接头均圆滑过渡。容器的补强采用了整体的补强方式,即厚壁管补强。

5 加工

5.1 材料复验

在加工前,根据《容规》要求进行材料及焊条的复验,并对每张钢板进行超声波探伤,达到JB/T 4730.2—2005《压力容器无损检测》的I级要求。从复验结果看均满足设计要求。筒体加工采用了中温卷制成形,板材加热温度800~850℃,保温1h后出炉,终卷温度约550℃,卷制成形后快速空冷。为了检测筒体纵向焊缝的性能和金相组织,并使材料的金相组织处于耐低温的奥氏体状态。筒体在纵向焊接接头经无损探伤检查合格后作固溶处理,同时带一块母材成形试板和一对纵向焊接接头试板同炉加热及同炉固

溶处理,热处理后再对所有的对接焊缝进行了射线检测。

5.2 封头加工及热处理

封头采用了热压成形,板材加热温度1000~1050℃保温1.5h,终卷温度约800℃,成形后快速空冷。为了检测封头的金相组织组成,热压成形后的封头进行固溶处理,同时带一块母材成形试板同炉加热及同炉热处理。拼焊的封头板焊后打磨余高并抛光处理,焊接接头进行打底焊接。

在各零部件加工完成后,容器封闭以前对内容器和夹套的内外壁均进行了抛光处理,组装前用丙酮和酒精清洗表面,去除油污杂质。

6 焊接方法与工艺

6.1 零部件的焊接方法

内容器筒体的纵焊缝,开双U形坡口,采用手工电弧焊,并保证全焊透。由于容器没有设计人孔,最后一道焊缝不能双面焊,不能贴胶片也就不能进行射线检测,所以封头与筒体的环向焊缝设计上采用了一端单面焊,另一端为双面焊的方式。但是在实际生产加工时为了进一步验证单面焊的可靠性,两条环缝最后均采用了单面焊的形式。经无损检测证明焊接质量达到了JB/T 4730中I级焊缝的要求。夹套焊接时采用了钨极氩弧焊打底、手工电弧焊盖面的焊接方式。

6.2 焊接工艺要求

该容器为低温容器,材料为奥氏体不锈钢,所以容器的所有焊缝不准有任何程度的咬边、气孔、裂纹等缺陷,角焊缝圆滑过渡,且要求除垫板焊缝外所有焊缝均要求全焊透结构。焊接前按JB/T 4708《钢制压力容器焊接工艺评定》进行了工艺评定,制作了工艺试板。焊接时根据JB/T 4709《钢制压力容器焊接规程》进行。并根据以下要求焊接:焊接时通过对焊接参数的调整控制每道焊缝的焊接线能量不得过大;采用了短弧焊接;焊接操作时焊丝或焊条尽量不做横向运条摆动;并控制焊接层间温度不大于60℃,在每焊完一道后对焊接区浇水加速冷却,浇水后再次施焊前水分应蒸发去除;每当焊完一道焊缝后用对焊缝表面进行清理,露出金属光泽后再进行下一道焊接,焊接后打磨余高,不得有任何缺陷。

7 深冷处理

(下转第64页)