

文章编号: 1001-4322(2010)02-0357-04

## 超高压氦增压系统研制\*

尹 剑, 陈绍华, 张伟光, 李海容, 夏立东

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 主要介绍了超高压氦增压系统的工作原理、设计原则和加工方法,讨论了各功能部件的选择与高压密封设计,同时指出了在使用超高压氦增压系统时应当注意的问题。在系统建成后,通过手动、自动控制分步增压和保压实现了最高 300 MPa 的超高压氦气输出,相应的高压漏率达到  $(3.5 \sim 5.0) \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。对系统主要性能参数进行了考核,并将其与 3 种同类增压装置的相应参数进行了比较,结果表明该系统设计合理、性能优越并且安全可靠。该系统将主要应用于惯性约束微球靶充气系统的各项性能测试。

**关键词:** 惯性约束聚变; 氦增压系统; 超高压; 高压漏率

**中图分类号:** TQ023

**文献标志码:** A

**doi:**10.3788/HPLPB20102202.0357

在惯性约束聚变(ICF)研究中,靶球充气氦(DT)燃料是相当重要的环节。由于氦的放射性危害使得整个充气系统对漏率和承压能力有非常高的要求<sup>[1-2]</sup>,要使微球充 DT 系统整体漏率满足运行指标,就需要系统各功能部件及接口均具备低漏率和高承压能力,所以,在靶丸充气氦之前,对充气系统进行部分和整体承压能力与漏率考核非常重要。目前,同类型的气体增压装置的最高增压能力约为 200 MPa<sup>[5-7]</sup>,且漏率要求低,不能满足现阶段 ICF 靶丸氦燃料充气系统的考核要求,因此,研制一套具有多功能、高自动化、高安全性的超高压氦增压系统是非常有必要的,其不仅能为高压充 DT 燃料系统提供必要的安全性能测试,同时也为即将开展的 ICF 冷冻靶充气系统的设计与考核建立重要的试验平台。

### 1 超高压氦增压系统的设计

#### 1.1 系统设计原则

建立超高压氦增压系统的目的是对各高压功能部件、接口、焊缝及充 DT 燃料系统进行承压能力与高压漏率考核,主要设计要求包括<sup>[3]</sup>:(1)系统结构紧凑,能实现 300 MPa 的超高压输出并且安全可靠;(2)操作实现手动自动一体,尽量避免工作人员现场操作高压;(3)工作压力下自身漏率达到  $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  量级<sup>[3]</sup>,使其对充 DT 系统及高压部件测试没有影响;(4)增压系统阀门、管道和接头在高压工作环境下寿命长。

#### 1.2 系统组成及工作方式

根据系统设计原则,该增压系统设计原理如图 1 所示,系统主要由两大部分组成,一是增压装置,二是监控系统。

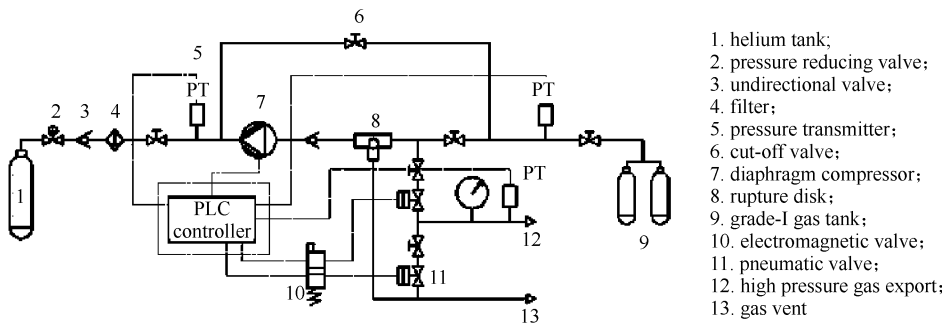


Fig. 1 Design principle of ultra-high pressure He booster system

图 1 超高压氦增压系统设计原理

增压装置主要由高压金属管道、手动截止阀、气动截止阀、单向阀、压力变送器、隔膜泵、爆破片等组成。设计工作方式:首先将氦气瓶内的气体通过隔膜泵一级增压到一级储气瓶,可以实现封装在一级储气瓶内的氦

\* 收稿日期:2009-03-27; 修订日期:2009-10-15

基金项目:国家高技术发展计划项目

作者简介:尹 剑(1982—)男,学士,研究方向为 ICF 微球靶充 DT 工艺;yj198215@126.com。

气压力为 15~30 MPa;然后将一级储气瓶做为气源再通过隔膜泵进行二级增压,从高压气出口输出,最终实现氦气压力 300 MPa 的超高压输出。

监控系统主要由电视监控器和计算机测控两大部分组成,具体配置包括计算机,摄像机,传感器、数据采集板等,结合可编程的逻辑控制器(PLC)技术实现的主要功能有自动分步增压、保压,电视监控,数据采集与保存。

### 1.3 关键材料和元器件设计与选型

隔膜压缩机为该增压系统的核心部件,其性能的优劣直接影响到该系统的增高压能力,设计采用双膜片隔膜压缩机,压缩机膜头采用 316L 不锈钢材质,膜片采用 301 不锈钢,使其达到更高的密封性能和安全性。其工作原理是曲柄带动活塞向下运动过程中,低压气体通过输入单向阀进入气体容腔内,膜片底部油被挤出泵体;曲柄带动活塞向上运动过程中,油被吸入,容腔内的气体被压缩,当压力超过输出压力时,被压缩气体输出,如图 2 所示。

通过对整套系统的性能指标进行研究及理论计算,确定了系统主要部件的性能参数<sup>[4]</sup>,所有金属阀门均选用 316ss 不锈钢材质,其中包括各类金属阀门、高压管道、三通等,如表 1 所示。

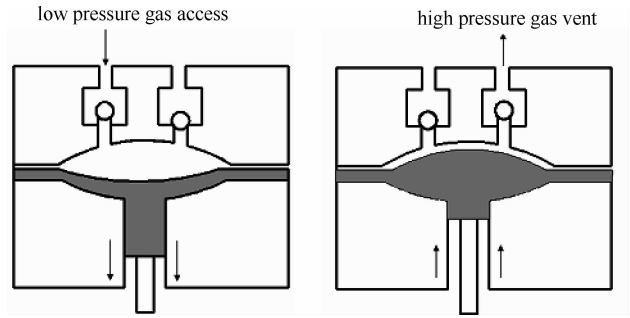


Fig. 2 Diaphragm compressor working principle

图 2 隔膜压缩机工作原理

表 1 超高压氦增压系统主要部件性能参数及功能

Table 1 Function parameters of main parts in ultrahigh pressure helium booster system

parts	maximum pressure/MPa	type	inside volume/ml	working life/time
hand/pneumatic valve	420	60-11HF4(HIP)	<0.2	>10 000
filter	50	6A-F6L-5-SS(Parker)	<0.2	>5 000
rupture disk	310	60-63HF4(HIP)	<0.5	>5 000

在对系统气路的设计过程中,根据系统压力的需求参考了不锈钢管(钢号:0Cr18Ni9Ti)在不同温度下的屈服极限  $\delta_{s,t}$ ,如表 2 所示。

根据系统工作压力的要求,计算出了所需不锈钢管的壁厚  $\delta$ 。计算方法如下:

$$\delta = \frac{D_i P_i}{2.3[\delta]_t \varphi - P_i} \quad (1)$$

式中: $D_i$ 为内径,单位 cm; $P_i$ 为设计压力,单位 MPa; $[\delta]_t = \delta_{s,t}/n_s$ 为许用应力,单位 MPa,其中, $n_s$ 为屈服极限的安全系数; $\varphi$ 为焊缝系数。

通过计算,选择外径为 6.4 mm、内径为 1.8 mm 的高压 316L 不锈钢金属管道是比较理想的。

系统要实现 300 MPa 的超高压输出,采用一般的焊接方式难以达到整个系统的承压能力和安全要求。通过设计对系统高压部件和管件采用锥面螺纹方式进行密封,密封原理如图 3 所示。

## 2 研制结果

### 2.1 装配与调试

增压系统的安装与调试主要包括两大部分:一是增压泵的安装与管道的连接,二是增压装置与控制系统的耦合。

增压泵的安装与管道的连接要解决的最重要的问题就是提高泵体以及各功能部件接头的密封性能,首先要注意的是对系统各部件的清洁,尤其是管道与阀门的清洁,通过采用图 3 设计的密封方式,实现了增压装置 280 MPa 的分步自动增压、保压,在该压力条件下使用 INFICON UL5000 型氦质谱检漏仪对系统进行漏率

表 2 不锈钢管(0Cr18Ni9Ti)在不同温度下的屈服极限<sup>[5]</sup>

Table 2 Yield limit of stainless steel pipes(0Cr18Ni9Ti) under different temperature

temperature/°C	$\delta_{s,t}$ /MPa	temperature/°C	$\delta_{s,t}$ /MPa
20	206	350	122
100	170	400	119
150	155	450	117
200	142	500	115
250	133	550	113
300	127		

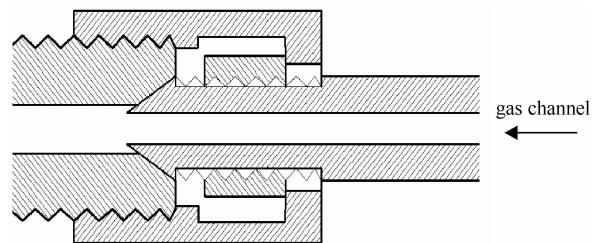


Fig. 3 High pressure joint seal mode

图 3 高压接头密封方式

测试, 高压漏率达到  $4.0 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ , 并通过设计采用 PLC 控制程序实现了对增压装置的自动控制与实时监控, 结果如图 4 和图 5 所示。

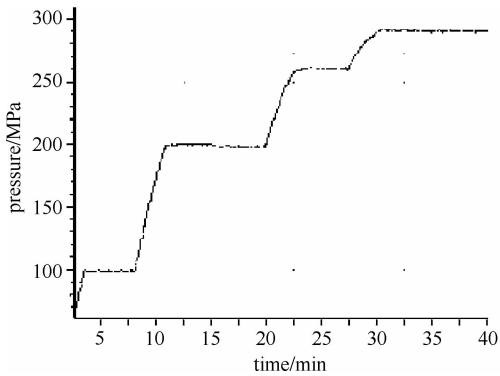


Fig. 4 280 MPa high pressure boosted by steps

图 4 280 MPa 分步增高高压曲线图

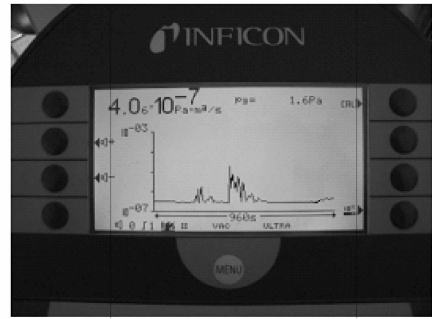


Fig. 5 Leakage rate test under 280 MPa

图 5 280 MPa 系统漏率检测

### 2.2 系统应用

超高压氦增压系统经试运行后, 使用该增压系统对微球充 DT 系统使用的高压气动阀门进行承压能力和高压漏率考核, 结果如表 3 所示。

超高压氦增压系统在使用过程中, 检测间本底一直保持在  $2.5 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ , 温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。检漏仪对高压阀门随压力不断升高后引起的微小漏率变化反应非常灵敏, 从而减小了因氦增压系统自身外漏引起的测试数据的不准确度。测试结果表明该系统操作简便, 实验数据真实可靠。

使用过程中很有必要将增压间、检测间以及自动控制系统用防弹玻璃进行隔离, 这样既能起到有效的防护作用, 又能确保对系统运转的实时监控; 增压间和检测间必须要有良好的通风设备, 以减小房间本底对检测实验的影响。

### 2.3 主要性能对比

系统建造完成后, 对其主要的性能参数进行了严格的考核与测试, 并将测试结果与目前几种同类型气体增压装置进行了对比, 如表 4 所示。

表 4 超高压氦增压系统与同类气体增压装置主要性能参数对比

Table 4 Main function parameter contrast between ultra-high pressure He booster system and congeneric system

type	maximum pressure/MPa	high pressure leak rate/ $(\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	testing valve leak rate/ $(\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$		
			gas access	valve rod	gas vent
He booster system	300	$(3.5 \sim 5.0) \times 10^{-7}$	$2.5 \times 10^{-7}$	$2.5 \times 10^{-7}$	$2.5 \times 10^{-7}$
IVS <sup>[6]</sup>	210	—	$2.6 \times 10^{-7}$	$2.6 \times 10^{-7}$	$2.6 \times 10^{-7}$
PPI <sup>[7]</sup>	200	$< 1.0 \times 10^{-7}$	$2.7 \times 10^{-7}$	$2.7 \times 10^{-7}$	$2.7 \times 10^{-7}$
MAXIMATOR <sup>[8]</sup>	150	—	$2.8 \times 10^{-7}$	$2.8 \times 10^{-7}$	$2.8 \times 10^{-7}$

### 3 结 论

超高压氦增压系统结构紧凑(800 mm×420 mm×1 200 mm)、占地小、噪音小, 实现了 300 MPa 的超高压氦气增压能力和理想的使用漏率, 满足了现阶段及以后对微球充气氦系统考核的需求, 并且为 ICF 冷冻 DT 靶充气系统的设计与建立积累了相当的经验与技术条件。由于该系统只适用于常温下氦气等惰性气体的增压, 对微球充 DT 系统中材料在高压下出现的氢脆问题尚不能进行有效考核, 故设计并建立研究材料在极端条件下的各项临氦性能的装置势在必行。

## 参考文献:

- [1] 唐永建, 蒋伟阳. ICF 低温冷冻靶制备技术进展[J]. 强激光与粒子束, 1998, **10**(1):155-160. (Tang Yongjian, Jiang Weiyang. Cryogenic targets fabrication methods for inertial confinement fusion. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(1):155-160)
- [2] 尹剑, 陈绍华, 张小安, 等. 微球充气工艺实验系统安全性能研究[C]//第九届中国核靶技术学术交流会论文集. 2007. (Yin Jian, Chen Shaohua, Zhang Xiaohan, et al. Safe function study of experimental system for filling gas in microsphere//Proceeding of the 9th National Nuclear Target Symposium. 2007)
- [3] 姚书久, 李海容, 张小安, 等. 高压充氘氚气体金属系统[J]. 原子能科学技术, 2002, **36**(4/5):413-415. (Yao Shujiu, Li Hairong, Zhang Xiaohan, et al. Study of metal system for filling D-T gas under the high pressure. *Atomic Energy Science and Technology*, 2002, **36**(4/5):413-415)
- [4] 陈绍华, 龙兴贵, 彭述明, 等. 微球充气工艺实验系统研制[J]. 原子能科学技术, 2008, **42**(9):861-864. (Chen Shaohua, Long Xinggui, Peng Shuming, et al. Development of experiment system for filling gas in microsphere. *Atomic Energy Science and Technology*, 2008, **42**(9):861-864)
- [5] 薛杨声, 赵纪兰. 高压装置及其设计原理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992:118-120. (Xue Yangsheng, Zhao Jilan. High pressure equipment and design principle. Beijing: Weapon Industry Press, 1992:118-120)
- [6] 中国亿威仕流体控制有限公司. IVS 气体增压系统[OL]. [2009-10-15]. <http://www.szivs.cn/index.html>. (China IVS Tester Corporation. IVS gas booster system. [2009-10-15]. <http://www.szivs.cn/index.html>)
- [7] 美国皮皮艾北京有限公司. PPI 气体压缩机系统[OL]. [2009-10-15]. <http://www.ppichinabj.com>. (America PPI Beijing Limited Company. Pressure products industries gas compressor system. [2009-10-15]. <http://www.ppichinabj.com>)
- [8] 麦格思维特(上海)流体工程有限公司. MAXIMATOR 气体增压器[OL]. [2009-10-15]. <http://www.maximator.cn>. (MAXIMATOR (Shanghai) Hydro-engineering Limited Company. MAXIMATOR gas booster equipment. [2009-10-15]. <http://www.maximator.cn>)

## Development of ultrahigh pressure helium booster system

Yin Jian, Chen Shaohua, Zhang Weiguang, Li Hairong, Xia Lidong

(*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, P. O. Box 919-220, Mianyang 621900, China*)

**Abstract:** Operation principle, design principle, fabrication and cautions in operation of ultrahigh pressure He booster system are introduced, and main parts selection method and high pressure seal design of the booster system are discussed. The as-developed system can output 300 MPa helium gas with  $(3.5 \sim 5.0) \times 10^{-7}$  Pa  $\cdot$  m<sup>3</sup>/s leak rate through manual or automatic pressure boosting and keeping. Main function parameters of the system are accessed and compared with those of three congeneric systems. The result shows that the system was rationally designed with superior performance and safety, and the system would be used to test ICF microsphere filling DT system.

**Key words:** ICF; He booster system; ultrahigh pressure; high pressure leak rate