

闭式循环制冷机制丸的弹丸发射器的设计

肖正贵, 李波, 李立

(核工业西南物理研究院, 四川成都 610041)

摘要: 国内第一套用 G-M 循环制冷机制氢(氘)冰丸的多管弹丸发射器主体设计业已完成。该发射器采用原位冷凝法同时冷凝 25 支枪管生成 25 粒氢或氘丸。G-M 循环制冷机的选用大大方便了发射器的运行, 增加了设备的可靠性, 降低了运行成本, 并保证运行的灵活性。介绍发射器设计的主要原则、目标、工程结构布局和参数的选择以及可能的扩展方向。

关键词: 弹丸发射器; 闭式循环制冷机; 热沉

中图分类号: TL631.2⁺4; TL503.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-7086(2003)03-0167-04

THE DESIGN OF A PELLET INJECTOR WITH CYCLE REFRIGERATOR

XIAO Zhen-gui, LI Bo, LI Li

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: The design of the first set multi-barrels hydrogen pellet injector with G-M cycle refrigerator has been designed. The in situ condensation is employed in this injector for making 25 pellets in 25 gun barrels simultaneously. The using of G-M refrigerator has the advantages in following field: ease for operation, high reliability and the flexibility are guaranteed and reduction the operation cost. The prime principle, goals of the design, construction, layout of the components, choice of engineering parameters and the possible extended direction are introduced.

Key words: pellet injector; cycle refrigerator; heat sink

1 引言

第一个具有偏滤器位形的受控核聚变实验研究装置 HL-2A 托卡马克已经建成, 它标志着我国受控核聚变研究事业步入了大规模装置实验研究阶段, 目前该装置已投入初步实验运行。高等离子体参数条件下改善约束和稳定性的研究以及接近堆芯条件下偏滤器物理和工程问题的研究是该装置的物理研究目标。燃料消融过程、粒子输运和密度控制是受控核聚变研究的基本课题, 它与加料的方式密切相关。先进的加料手段可以获得很高的效率、扩展装置的运行区域、控制等离子体的密度分布, 并进一步改善约束特性。传统的加料手段因其加料效率随等离子体辅助加热功率的增加而下降, 所以使得弹丸加料变得越来越重要。现代的核聚变研究中更强调需要高可靠性和高重复性的稳定的弹丸发射器来实现峰化密度分布和改善约束的放电, 以便进行等离子体各种特性的深入研究。HL-2A 装置的放电参数更高, 要求相应的弹丸注入速度更高, 数量更多, 并且应进行当前国际领先的从装置内部(强场侧)注入。尽管在 HL-1M 装置上实现了八粒弹丸加料实验^[1], 但该发射器的弹丸尺寸对于 HL-2A 装置太小。该发射器采用液氮冷凝制丸, 每次运行时液氮消耗使成本增加, 不利于灵活安排实验。为此, 我们提出设计闭式循环制冷机的弹丸发射器, 拟选用 G-M 循环制冷机制造弹丸。该机的二级冷头在 4.4 K 时有 1.5 W 制冷功率; 在 8.0 K 时有 10.0 W 功率。通过初步设计和估算, 该功率用于制造数十粒氢丸(三相点 13.9 K) 或氘丸(18.7 K) 已绰绰有余。本文描述弹丸发射器主体结

收稿日期: 2002-12-09.

作者简介: 肖正贵(1943-), 男, 四川省宜宾市人, 研究员, 从事热核真空技术和核聚变加料工程与实验研究工作。

构设计和制冷机热负荷计算结果。

2 弹丸恒温器设计

2.1 系统设计的基础

系统设计为气动发射原位冷凝多管枪弹丸发射器。制丸恒温器采用 G-M 循环制冷机是因为该设备制冷功率高,具有精确的温度控制和灵活开机运行,以便于随时安排加料实验的优点^[2]。根据 HL-2A 放电参数和实验的需要,枪管数初步定为 20~30 管,弹丸的生成与发射均由程序逻辑控制仪控制。制造弹丸时制丸恒温器的热负荷的大小至关重要,先设定枪管参数,推算恒温器运行时的热负荷,根据热负荷大小再反之修正枪管参数,得到最终结果。另一点是发射弹丸时,推进剂带来的热容量引起恒温器的温升将会影响后续弹丸的发射,要在恒温器真空室空间尺寸允许的条件下,采用增加恒温器(热沉)铜块质量的方法来解决。

2.2 基本工程参数

为加料实验的灵活性,本弹丸尺寸设定为 $\phi 3$ mm 和 $\phi 4$ mm 2 种,标称弹丸长度 L 在 1.3~1.6 mm 之间。每粒弹丸粒子含量控制范围是 $N_p = 8.7 \times 10^{19} \sim 1.4 \times 10^{20}$ 原子,一粒弹丸进入 HL-2A 等离子体引起的密度变化 ΔN_E 是 $1.6 \sim 2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 。HL-2A 装置等离子体的大小半径分别是 $R = 1.64 \text{ m}$, $a = 0.4 \text{ m}$,脉冲放电持续时间 $\tau = 3 \sim 5 \text{ s}$ 。每粒弹丸注入间隙设定为 40~60 ms,放电平均时间按 2 s 计,如果不产生放电破裂,则 HL-2A 装置一次放电允许吸收 30~50 粒弹丸。弹丸速度 $v_p = 800 \sim 1500 \text{ m/s}$ (弱场侧水平注入)和 $v_p = 200 \sim 400 \text{ m/s}$ (强场侧倾斜注入)。

2.3 G-M 循环制冷机恒温器元件结构

G-M 循环制冷机选用 RDK-415D 型。该机额定制冷功率:一级冷头 50 K, 35 W 及 70 K, 75 W;二级冷头 4.2 K, 1.5 W 及 8.0 K, ~10.0 W 和 10.0 K, ~15.0 W。一级冷头连接热屏蔽罩,吸收来自真空室壁室温热辐射。必要时,该辐射屏还作为弹丸冷却池两侧建立温度梯度的控制元件,以控制弹丸的长度。HL-2A 装置的加料设备拟采用原位冷凝多管弹丸发射器,弹丸长度 L 由冷池片厚度 δ 及冷池两侧温度梯度决定;弹丸直径 ϕ 由枪管内径 D_N 限定。设计所采用的制造弹丸原理如图 1 所示。

制冷机的制冷功率通过二级冷头→热沉→冷池片传递。将冷池预冷到 8 K,丸料气由枪管引入,在冷池部位凝固生成弹丸。

生产和发射弹丸的枪管用银铜钎焊连接在高导无氧铜冷池片上,再用螺栓法兰通过钢丝垫圈与无氧铜热沉连接组成弹丸枪管组件,其结构示意图如图 2 所示。

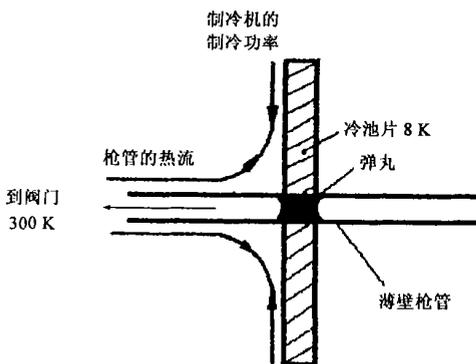


图1 原位冷凝法制造弹丸原理图

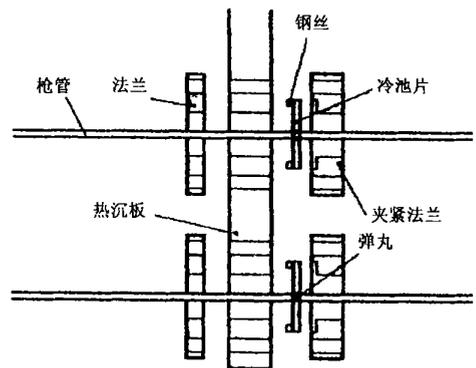


图2 弹丸枪管组件结构示意图

这种枪管组件结构的优点是枪管结构简单可靠,安装方便,枪管便于更换,以利于加料实验的灵活性。G-M 制冷机冷却的 25 管弹丸发射器结构如图 3 所示。

制冷机 1 的一级冷头 2 和二级冷头 4 及制丸的枪管组件、热辐射屏均置于配有 F-150 涡轮分子泵抽气的高真空室中。

生产和发射弹丸的 25 支枪管 6(暂定总长 $L = 450 \text{ mm}$, $D_N = 1.3 \sim 1.4 \text{ mm}$, $\delta = 0.20 \sim 0.25 \text{ mm}$) 用银

铜钎焊在高导无氧铜冷池片 5 上,冷池片用螺栓通过钢丝与同样是高导无氧铜制的热沉连接,保证恒温。热流通过钢箔靠螺栓紧密连接在二级冷头 4 上。以实现与其等温。发射弹丸的快阀 9 安装在真空室的背部法兰上,快阀出口距离冷池片约 15 cm,则枪膛长度为 30 cm。为屏蔽来自室温真空室的热辐射并减小枪管的热传导,一级冷头 2 上连接有热辐射屏 3,屏温 77 K。每支枪管在位于冷池片两侧 7~10 cm 处均焊接有无氧铜丝,枪管通过该无氧铜丝连接到热辐射屏上,这使枪管两端室温固体热传导的大部分通过热辐射屏由一级冷头带走。如要按连接点的温度 (77 K) 计算,枪管对于二级冷头的固体漏热减少了许多。估算了 25 管枪的制丸恒温器的制冷机二级冷头上的总热损 Q_1 约为 1 W,主要是:① 25 支枪管来源于室温的固体热传导: $Q_1 = 320 \text{ mW}$; ② 来源于温度计测量引线和加热电流的热损: $Q_2 = 150 \text{ mW}$; ③ 来源于低温辐射屏的辐射的漏热: $Q_3 < 2 \text{ mW}$ 。

源于高真空室残余气体的热传导忽略不计。制冷机无负荷时额定制冷功率:一级冷头为 80 W, 77 K; 二级冷头为 4.2 K, 1.5 W 及 8.0 K, 10.0 W。除去上述热损 Q_1 外,用于制丸的有效功率为 9 W。制造 25 粒弹丸所需氢气约 6 mg, 丸料从室温 (300 K) 气相降到固相 (温度 8 K) 所放热能约 25 J, 氢气直接固化放出固化热低于 4.18 J, 总计放热小于 30.00 J。对弹丸生成时间由于无严格要求 (通常在 2~3 min 内生成), 则其所需功率仅 1 W 以下。初步估算表明: RDK-415D 型 G-M 闭式循环制冷机用于 25 管枪低温制丸器, 其制冷功率足够。安装在一级冷头上的热辐射屏 (屏温 77 K), 对屏蔽来自室温真空室的热辐射和减小枪管的热传导起了关键作用, 设计和安装过程中应认真对待。

2.4 热沉质量与发射时的温升

仅从上述估算及结构简单、降温快来看, 高导无氧铜制的热沉质量 M 可控制在 0.5 kg 以下, 这对于缩短恒温器降温时间很有益处。但对于多管弹丸发射而言, 室温高压推进剂带来的热量不容忽视。前几粒弹丸发射时产生的温升通过热沉传递积累, 使后续冷池片的温度上升, 并使弹丸外壁与冷池内壁的黏着力下降。温升过高时, 后续弹丸会自动滑出造成发射失败。此温升的影响应认真考虑, 加大热沉的质量 M 即增加其热容量, 是必然的选择。弹丸发射一粒引入室温高压推进 He 气体约 $8 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3$ (约 14 mg)^[3], 该室温 He 气与枪管瞬时接触传递的热量 $Q \approx 1.7 \text{ J}$ 。根据热量传递公式

$$Q = C_v \times \Delta t \times M, \quad M = Q / C_v \times \Delta t$$

式中 Q 为 He 气带来 (即热沉吸收) 的热量; C_v 为热沉块的比热容; M 为热沉块的质量; Δt 为热沉块的温升。冻丸温度下 (8~10 K) 无氧铜的比热容非常低 $C_v \approx 9.0 \times 10^{-4} \text{ J/g} \cdot \text{K}$, 要控制每粒弹丸发射引起热沉的温升 Δt 小于 0.1 K, 则计算得到热沉的质量 M 大于 17.0 kg。该值远大于原预算值 (0.5 kg), 17.0 kg 重的热沉如制成板状时, 在真空室内不便安放。为此, 将其制成如图 4 所示的两头圆柱、中间平板的形状, 以便于与二级冷头连接和多管枪组件的安装。热沉质量增加的直接后果, 首先是弹丸恒温器从室温降到运行温度所需时间大大增加, 其次是真空室和相应的热辐射屏尺寸加大, 枪管总尺寸加长。根据估算, 由这些尺寸增大而产生的热损变化较小而不会影响弹丸的制造。

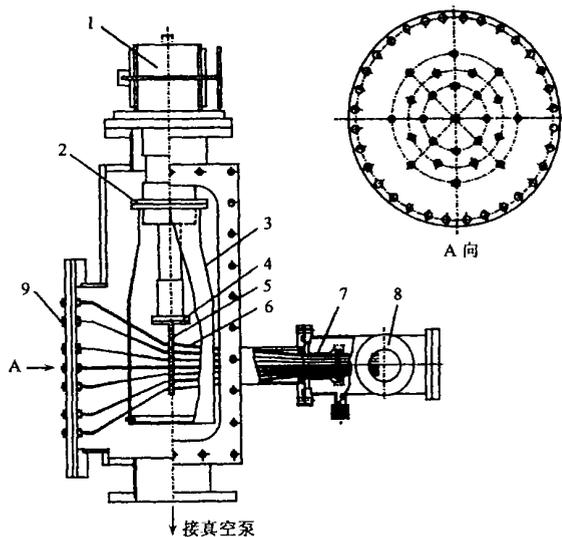


图 3 弹丸发射器结构示意图

1. G-M 制冷机; 2. 一级冷头; 3. 热辐射屏; 4. 二级冷头;
5. 冷池片及热沉块组件; 6. 枪管; 7. 汇接接头; 8. 诊断窗口;
9. 快阀接口。

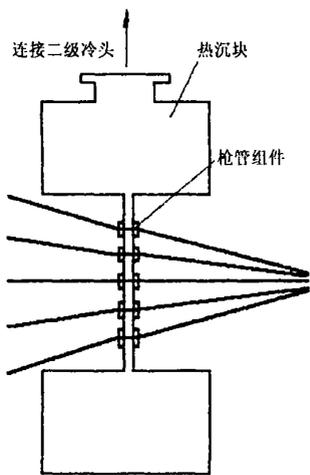


图 4 大质量热沉结构示意图

3 结 论

通过主体结构设计和制冷机热负荷的计算表明:RDK-415D型G-M闭式循环制冷机制造多粒氢同位素弹丸是可行而现实的。

HL-2A装置的多粒弹丸加料发射器的设计参数是:25粒弹丸是在25支薄壁不锈钢管(其 $L=0.55\text{ m}$, $d_N=1.3\sim 1.4\text{ mm}$, $\delta\sim 0.25\text{ mm}$)中用原位冷凝法同时生成,弹丸原位按设定程序气动发射。

RDK-415D型G-M闭式循环制冷机用于制造25粒氢弹丸其制冷功率绰绰有余。为了克服先期弹丸发射时热沉温升而影响后续弹丸的发射,采用大质量($M>17.0\text{ kg}$)的热沉是必不可少的措施,弹丸恒温器的复杂结构和安装在发射器背部法兰上的25只推进剂阀的布局,以及安装时各组件之间的相互干涉是要认真对待的技术问题。

致 谢:在本工作完成中,与本院牛风杰高级工程师进行了有益的讨论,在此深表谢意。

参考文献:

- [1] 肖正贵,刘德权,李波,等.HL-1M装置八发弹发射系统的研制及特性[J].真空与低温,1997,3(1):12.
- [2] YAMADA H, SAKAMOTO R, ODA Y, *et al.* Development of pellet injector system for large helical device[J]. Fusion Engineering and Design, 2000, 49-50:915~920.
- [3] 肖正贵,李波,李立.30管气动弹丸发射系统真空负荷及多级扩散[J].真空与低温,2002,8(1):51.

新版《真空设计手册》出版预告

由兰州物理研究所达道安研究员任主编、邱家稳所长任副主编,崔遂先、谈治信为技术编辑的新版《真空设计手册》(第三版)全部稿件已送北京国防工业出版社。明年2月份出版,供广大读者使用。该书反映了国内外真空科学技术的最新发展水平。全书内容丰富、结构清晰、图文并茂,比较完整地汇编了从低真空、高真空、超高真空到极高真空领域内的真空技术和真空工程各方面的资料。主要特点:(1)删除了第二版(1991年修订版)中不适时的章节,补充了相应的新内容,按国家科技标准的规定,更正了文字、图表、公式、数据、符号等,规范了图表、数据,使手册提供的数据更加新颖、可靠;(2)增添了新的内容。例如:无油立式节能往复真空泵、各种干式真空泵、水蒸气喷射泵技术特性和设计要点、油扩散喷射泵、油扩散泵设计计算、磁流体密封、磁传动技术、离子束刻蚀技术、真空预冷处理技术、真空保鲜工艺、纳米材料制备、真空装置自动化控制、航天器用材料质量损失、真空清洁工艺等;(3)增加了第十六章极高真空技术及应用。它概括了获得极高真空的方法、技术和实验装置及应用等内容,给出了大量的数据、图表,总结了国内外极高真空研究成果,为我国今后极高真空技术应用提供了数据、经验,展现了我国极高真空技术发展水平;(4)充实了四极质谱、真空计量、校准、真空容器设计计算、真空镀膜技术、真空冷冻升华干燥技术、真空包装技术。增加了真空常用设计所需的技术数据。

北京国防工业出版社将按精品科技大型工具书标准编印新版《真空设计手册》。预计全书约200余万字,2000幅图表,16开本,1500多页,每册暂定价138元。兰州物理研究所《真空设计手册》编委会下设发行组,负责销售手册。发行组陆续向国内广大读者和用书单位发出预购订单,凭预购订单和付款及时供书。发行组联系人:谈治信、闫鸿祥、曹艳秋。电话:(0931)8267121转5248或5323(办),电传:(0931)8265391。通信地址:兰州94号信箱(730000)。

兰州物理研究所新版《真空设计手册》编委会
联系人:谈治信