

一种用于冲击压缩实验并设有 10 K 气冷屏的液氦温度低温靶

罗宝军^{①②}, 洪国同^①, 梁惊涛^①

① 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049

E-mail: bj-luo@hotmail.com

2009-09-17 收稿, 2010-01-27 接受

摘要 液氦的冲击压缩实验是一种获取样品氦在高温高密度下性质的可行途径. 介绍了一种自研制的应用于 100 Pa 环境中的液氦温度低温靶, 该低温靶具有独立真空夹层和气冷屏的结构设计, 获得了 3.63 K 的最低温度和 3.7 K 的稳定温度, 降温过程和温度稳定性都完全满足冲击压缩实验的要求. 为了研究低温靶的绝热性能, 利用 Fluent 对低温靶热分析, 计算结果与实验结果吻合较好, 计算方法可以有效用于低温靶的优化设计.

关键词

数值计算
低温靶
气冷屏
氦液化
冲击压缩

在模拟研究星体特性和惯性约束核聚变中通常需要知道氢、氦及其同位素高温高压状态方程, 因此氢、氦及其同位素在极端条件下的物理性质一直是基础研究中非常关注的前沿课题之一^[1-3]. 氢、氦高温高压物态方程的主要实验途径是利用冲击压缩技术对样品进行加载完成冲击压缩实验^[4], 从而获得样品高温高密度物态方程. 1984 年 Nellis 等利用轻气炮加载技术第一次实验测量了液氦高温高压状态方程, 冲击压力达 56 GPa^[2]. 国内虽然在初始温度 293 K 和初始压力 1.2 MPa 下对氦气的物态方程进行了研究^[5], 但是较高的初始温度导致较低的初始密度, 从而导致冲击压强较低. 根据 Rankine-Hugoniot 关系^[4], 提高初始密度可获得更高的冲击压强, 因此冲击压缩实验通常利用低温靶增大被冲击样品的初始密度来增大高速碰撞后产生的冲击压力, 从而获得高温高密度下液态氢、氦、氘等的状态方程.

根据冲击压缩实验的要求, 低温靶液氦贮存空间必须较小且靶板与弹片之间不能有任何障碍物. 虽然美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室研制出了液氦低温靶系统, 然而该低温靶应用真空大约为 5×10^{-3} Pa^[6].

由于二级轻气炮实验技术接口的特殊原因, 本课题所研制的低温靶应用环境为 100 Pa 真空, 而较差的真空环境将使液氦池和样品室的热负荷较大, 从而可能导致液氦池无法实现液氦的贮存和样品的液化, 或者使靠近靶板侧的液态样品气化. 虽然已经研制了针对该真空环境的应用于 N₂, CO 和 CO₂ 等冲击压缩实验的低温靶^[7,8], 然而鉴于每单位体积液氦的蒸发潜热比液氮小两个量级^[2,9], 因此这些低温靶的结构设计不适合于液氦温度低温靶. 液氦温度低温靶必须具有更良好的绝热性能, 尤其是液氦池和样品室的绝热设计必须较大地减少靶室的漏热.

本文将介绍一种自研制的应用于 100 Pa 靶室真空环境的液氦温度低温靶, 该低温靶具有独立真空夹层与气冷屏结构, 通过利用氦蒸气冷却气冷屏的设计, 较大地减少低温靶液氦的贮存量, 同时实现液氦池具有较好的绝热性能. 而且, 通过加热计设计该低温靶还可以应用于 3.6~80 K 温区其他样品的液化. 此外, 为了评估低温靶的绝热性能, 本文对液氦温度低温靶进行了降温实验并利用 Fluent 对低温靶进行了热分析, 计算结果与实验结果吻合较好.

英文版见: Luo B J, Hong G T, Liang J T. A liquid helium temperature target with a 10 K vapor shield for shock compression experiment in the environment condition of 100 Pa. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-0136-0

1 低温靶

根据冲击压缩实验的要求,用于冲击压缩实验的液氮温度低温靶必须满足以下技术要求:(1)能够直接实现样品气体氮的液化,并保持样品密度在几分钟内均匀稳定。(2)降温时间必须较短。(3)低温靶靶体的结构要尽可能得小;样品室与弹片相撞击侧的靶板材料必须采用铝,且弹片与靶板之间不存在任何障碍物;靶体内不能贮存太多的低温液体,以避免冲击压缩实验时产生大量气体,形成瞬时高压,影响轻气炮腔体的安全性和冲击压缩实验结果的准确性。鉴于冲击压缩实验过程较短以及液氮池容积较小,液氮温度低温靶的设计基于持续流减压降温原理^[10,11]。

图1为本文研制的低温靶结构示意图,低温靶外壳直径为99 mm,长度为146.5 mm。液氮通过进液管持续不断地输入80 mL的液氮池,吸收系统热量后蒸发,然后蒸气经过螺旋盘管流入气冷屏,利用蒸气显热对气冷屏进行冷却,为了进一步利用蒸气显热,蒸气从气冷屏流出后继续冷却低温靶支撑件、真空夹层外筒等部件。

为了减少外界对样品室和液氮池的漏热,在样品室和液氮池前面和后面分别设置了一个0.5 mm厚度的不锈钢颈管和一个厚度为0.15 mm的波纹管,同时为了减少气冷屏与液氮池间的导热,气冷屏与液氮池之间设计了一个真空夹层,该夹层真空利用一台分子泵抽取至 10^{-3} Pa左右。此外,为了减少辐射漏热,对液氮池、颈管和波纹管等包扎了多层。

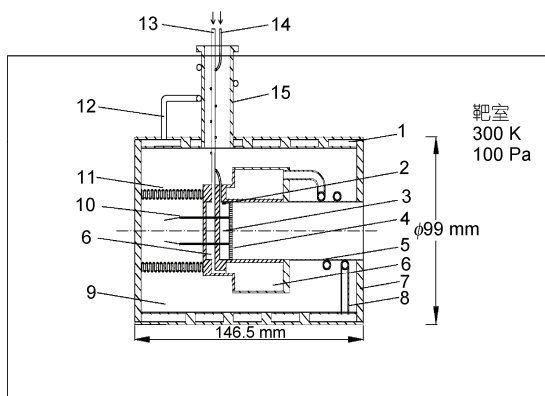


图1 低温靶结构示意图

- 1, 气冷屏; 2, 硅二极管温度计; 3, 样品室; 4, 靶板; 5, 颈管; 6, 液氮池; 7, 挡板; 8, 螺旋盘管; 9, 真空夹层; 10, 探针; 11, 波纹管; 12, 氮蒸气出口管; 13, 液氮进口管; 14, 样品气进口管; 15, 支撑套

2 数值计算

热量的传递有三种途径:导热、对流和辐射。热传导的计算可以按照方程(1)计算 \dot{Q}_c :

$$\dot{Q}_c = \sum \kappa(T)A \frac{dT}{dx}, \quad (1)$$

其中 κ 为热导率, T 为温度, A 为面积。

热辐射的计算可以按照方程(2)计算 \dot{Q}_r :

$$\dot{Q}_r = \sigma \bar{\epsilon} A (T_2^4 - T_1^4), \quad (2)$$

其中 σ 为Stefan-Boltzmann常数, $\bar{\epsilon}$ 为平均发射率。

残余气体热导率可以按照方程(3)计算

$$\kappa_g = C \cdot \eta \cdot C_v, \quad (3)$$

其中 $C=1.5\sim 2.5$, η 为黏滞系数, C_v 为定容比热。

为了定量描述低温靶的热负荷从而研究液氮池和样品室的绝热性能,本文利用Fluent对低温靶进行了稳态传热数值模拟^[12],图2为2-D轴对称计算模型。

边界条件和边界处理:

(1)假设挡板与气冷屏外壳接触面绝热、靶室壁面温度为300 K和气冷屏内壳温度为10 K。

(2)液氮池中液氮与壁面的换热系数根据Cooper公式计算并通过Fluent中UDF加载该换热系数:

$$h = 55 p_r^{0.12 - 0.4343 \ln R_p} (-0.4343 \ln p_r)^{-0.55} M^{-0.5} q^{0.67}, \quad (4)$$

M 为氮分子量, p_r 为对比压力($p_r = p/p_c$), p_c 为临界压力, R_p 表面平均粗糙度(μm), q 为热流密度。

(3)由于温度变化较大,固体的热导率根据温度插值处理,表1为低温靶中应用到材料的热导率和辐射率,多层和靶室的发射率分别为0.011和0.21。

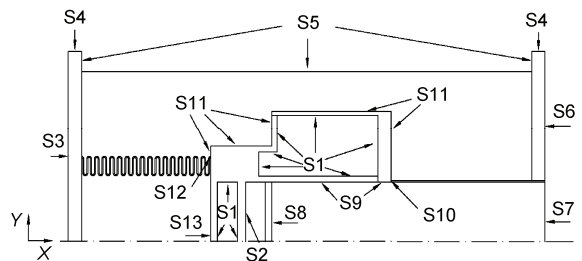


图2 低温靶的计算模型

- S1, 液氮接触面; S2, 样品室表面; S3, 后挡板表面; S4, 绝热面; S5, 气冷屏表面; S6, 前挡板表面; S7, 入口; S8, 靶板表面; S9, 液氮池内圆筒表面; S10, 颈管与液氮池接触面; S11, 液氮池暴露在真空夹层中的面; S12, 波纹管与液氮池接触面; S13, 液氮池体后端盖面

表 1 几种材料热导率和热辐射率

材料	热导率/W·m ⁻² ·K ⁻¹						发射率
	4 K	10 K	40 K	80 K	150 K	300 K	
铜	1960	4600	1850	590	450	—	0.018
钢	0.3	0.7	5	8	11	15	0.048
铝	0.261	1.4	77.5	357	634	902	0.011

(4) 由于波纹管的长度被压缩到实际长度的 1/3, 波纹管的热导率按照不锈钢的 1/3 处理, 温度计引线的热导被加入到波纹管中处理.

图 3 为样品室(S2)、后挡板(S3)和液氦池后壁(S3)沿 Y 轴方向的计算温度分布. 表 2 为液氦池的热负荷, 从表 2 可以看出整个液氦池上的热负荷为 29.14 mW, 主要来自 S10 和 S11.

表 3 为低温靶热负荷, 表中 S_{shell} 为气冷屏外壳的热负荷, 其值是基于外壳温度为 13 K 手算获得, 从表 3 可以获得, 低温靶的整体热负荷为 2.0926 W, 其中 1.193 W 被液氦潜热吸收, 其余 0.8996 W 被蒸气显热吸收.

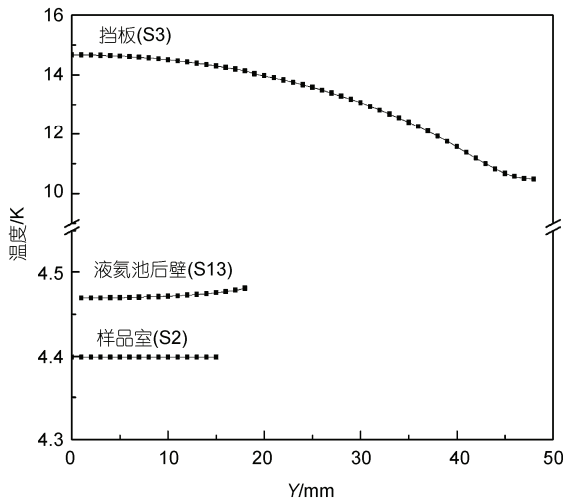


图 3 S2, S3 和 S13 沿 Y 轴方向的计算温度分布

表 2 液氦池壁面热负荷(mW)

面	S8	S9	S10	S11	S12	S13	总计
热负荷/mW	0.3	1.75	13.58	10.89	1.6	1.02	29.14

表 3 低温靶热负荷(W)

面	S3	S6	S7	S _{shell}	总计
热负荷/W	0.2653	0.2393	0.0710	1.5170	2.0926

方程(5)可用来计算吸收显热后蒸气的温升:

$$\Delta T = \dot{Q}_s / (\dot{m} \cdot C_p), \quad (5)$$

C_p 为蒸气定压比热, \dot{Q}_s 为显热, \dot{m} 蒸发气体的质量流量.

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_l}{L}, \quad (6)$$

\dot{Q}_l 为潜热, L 为蒸发比潜热. 根据计算结果可推, 蒸发气体吸收 0.8996 W 显热后温升大约为 5.51 K, 因此 10 K 左右的气冷屏是能够达到的.

图 4 为样品室(S2)和靶板(S8)沿 Y 轴的计算温度分布, 较小的温差对于保持液体密度均匀稳定且没有气化是非常重要的, 因此可以认为样品室的绝热设计是可行的.

3 实验结果

为了实验研究低温靶系统的工作性能如最低温度、温度稳定性、样品液化和降温耗时等, 搭建了图 5 所示的低温靶实验系统. 实验系统由液氦杜瓦、低温靶和靶室模拟器、样品气瓶和样品气控制罐、温度控制仪和真空泵等组成. 靶室模拟器被用来模拟冲

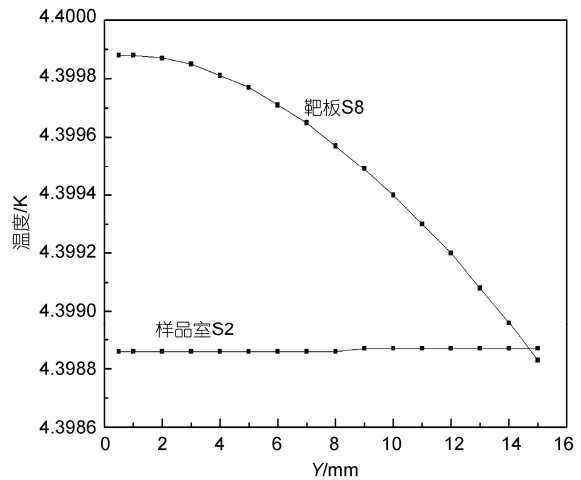


图 4 S2 和 S8 沿 Y 轴方向的计算温度分布

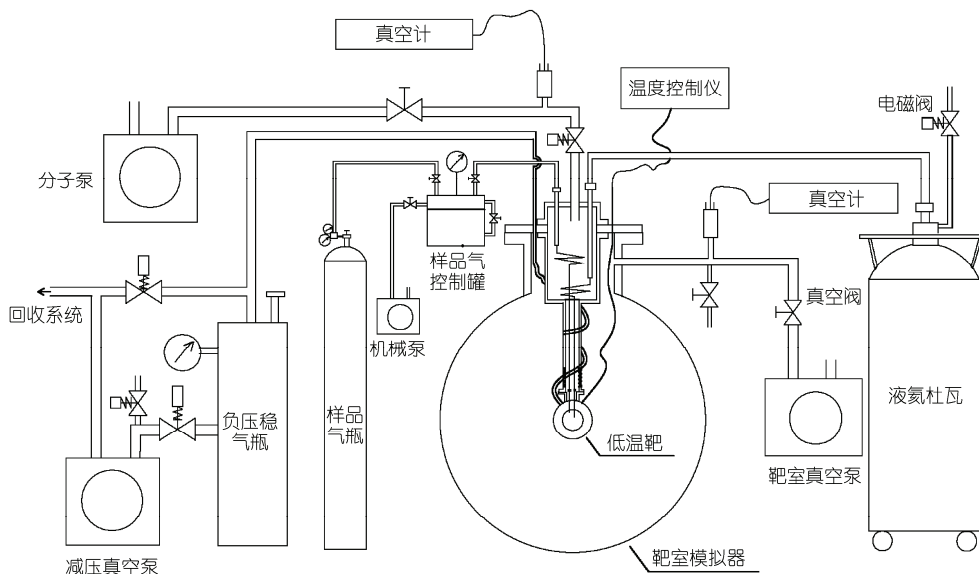


图5 液氮温度低温靶实验系统示意图

击压缩实验的靶室环境，样品气控制罐起到纯化样品气和控制样品气压强的作用；当样品温度接近 4.2 K 时通过开启减压降温泵对液氮进行减压降温，并利用负压稳定器起到稳定负压的作用。

图6为低温靶的降温实验，在启动减压降温情况下获得了 3.63 K 的最低温度和 (3.70 ± 0.01) K 的稳定温度，并成功实现了氮气的液化，整个实验降温过程耗时 55 min。

图7(a)为没有启动减压降温情况下样品室(S2)在 $Y=14$ mm 处的温度，从该图可知该点稳定温度为 4.42 K。图7(b)为没有启动减压降温情况下样品室 S2 面在 $Y=14$ mm、挡板 S3 面在 $Y=35$ mm 和气冷屏外壳在 $X=126.5$ mm, $Y=-9.5$ mm 和 $X=15$ mm, $Y=-9.5$ mm

处温度，从图7(b)可知在样品室(S2)稳定温度为 4.77 K 时气冷屏外壳温度接近 10 K。

通过对图3和图7的对比可知，样品室 S2 面、挡

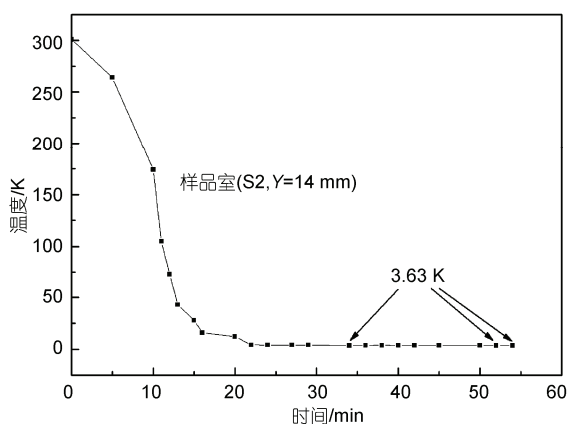


图6 开启减压降温情况下样品室(S2)的降温过程

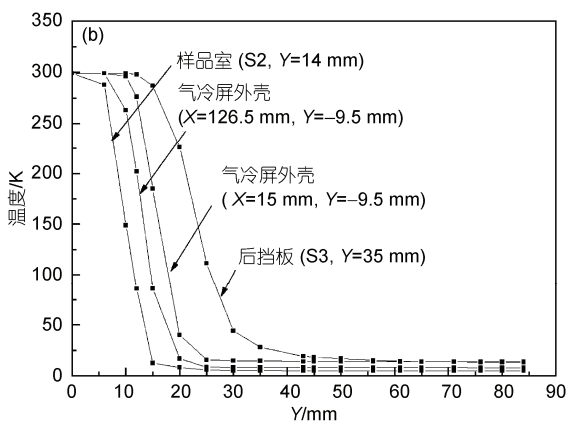
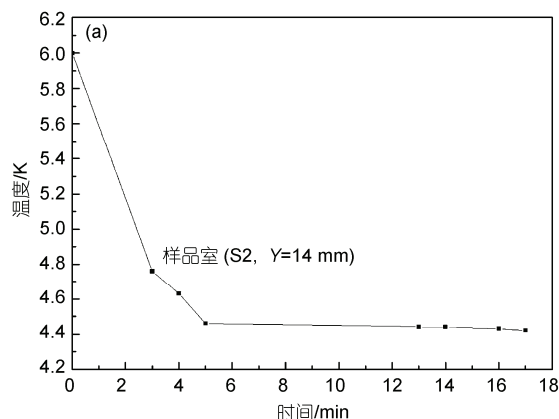


图7 样品室(S2)、后挡板(S3)和气冷屏外壳降温过程

板 S3 面的实验温度分别比计算温度高 0.02 K 和 0.62 K, 这可能是由于低温靶并没有完全稳定和温度计引线的焦耳热造成的, 因此可以认为计算结果与温度结果基本一致, 计算结果可以应用于低温靶的设计和优化以及实验过程中的流量控制.

4 结论

本文介绍了一种自研的、应用于冲击压缩实验的

液氮温度低温靶, 该低温靶能够在 100 Pa 真空环境下正常运行.

实验获得了 3.63 K 的最低温度和 (3.70 ± 0.01) K 的样品稳定温度, 降温速度和温度稳定性都非常满足热质较低和尺寸受限的冲击压缩实验要求.

利用 Fluent 对低温靶进行了热分析, 获得了与实验吻合较好的计算结果, 并定量描述了低温靶的绝热性能.

参考文献

- 1 Korbeek P J, Schouten J A. Equation of state of fluid helium to very high pressure. *J Chem Phys*, 1991, 95: 4519—4524
- 2 Nellis W J, Holmes N C, Mitchell A C, et al. Shock compression of liquid helium to 56 GPa (560 kbar). *Phys Rev Lett*, 1984, 53: 1248—1251
- 3 Nellis W J, Ross M, Holmes N C. Temperature measurements of shock-compressed liquid hydrogen: Implications for the interior of jupiter. *Science*, 1995, 269: 1249—1252
- 4 Mitchell A C, Nellis W J. Diagnostic system of the Lawrence Livermore National Laboratory two-Stage light-gas gun. *Rev Sci Instrum*, 1981, 52: 347—359
- 5 蔡灵仓, 陈其峰, 张林, 等. 稠密氦气物态方程研究. *原子与分子物理学报*, 2001, 18: 167—172
- 6 Nellis W J, Mitchell A C, van Thiel M, et al. Equation-of-state data for molecular hydrogen and deuterium at shock pressures in the range 2—76 GPa (20—760 kbar). *J Chem Phys*, 1983, 79: 1480—1486
- 7 孙悦, 陈先猛, 陈攀森, 等. 轻气炮低温靶的结构及液态 CO₂ 样品的制备技术. *低温物理学报*, 1997, 19: 150—155
- 8 施尚春, 董石, 黄跃. 液态 N₂, CO 冲击压缩特性研究. *高压物理学报*, 1999, 13: 295—300
- 9 施尚春, 董石, 黄跃. 液态气体冲击压缩实验技术. *高压物理学报*, 1999, 13: 211—217
- 10 Campbell S J, Herbert I R, Warwick C B, et al. A continuous flow cooling unit for ESR experiments over the temperature range 3.7—300 K. *J Phys E: Sci Instrum*, 1976, 9: 443—446
- 11 Dostal M, Petera K. Vacuum cooling of liquids: Mathematical model. *J Food Eng*, 2004, 61: 533—539
- 12 Boukeffa D, Boumaza M, Francois M X, et al. Experimental and numerical analysis of heat losses in a liquid nitrogen cryostat. *Appl Therm Eng*, 2001, 21: 967—975
- 13 FLUENT User's Guide, Fluent Inc., 2006
- 14 鲁钟琪. 两相流与沸腾传热. 北京: 清华大学出版社, 2002