

文章编号: 1001-4322(2002)04-0563-03

聚苯乙烯泡沫材料性能研究

杜 凯, 张 林, 周 兰, 张厚琼

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 研究了聚苯乙烯(PS)泡沫的液体(无水乙醇)浸润性能和动态机械性能。实验发现: 液体在泡沫中的浸润高度与时间的 1/2 次方成正比, 泡沫的压缩模量随温度的降低而升高, 随泡沫密度的减小而降低。

关键词: 聚苯乙烯; 泡沫; 惯性约束聚变靶

中图分类号: TL 639.11

文献标识码: A

在惯性约束聚变(ICF)实验研究中,用低密度、低原子序数(Z)、微孔的聚合物泡沫球壳吸附液体氘氚(DT)燃料,与传统的气体燃料内爆靶相比容易获得高密度压缩状态,提高聚变产率,因此是一种非常有前途的内爆靶型^[1],其结构如图 1 所示。形成球壳的聚合物泡沫材料必须具备一些独特的性质,例如要求液体 DT 对其有较好的浸润性能,保证能够稳定地吸附满足实验需要的液体燃料;泡沫材料必须在一定的温度范围内(从室温到液氢温度)具备相当的机械强度,满足对其进行机械加工的要求,并保证球壳在液氢(及其同位素)的毛细压力下不破碎。为此我们对目前 ICF 实验常用的聚苯乙烯(PS)泡沫材料的液体浸润性能及其机械性能进行了一系列研究。

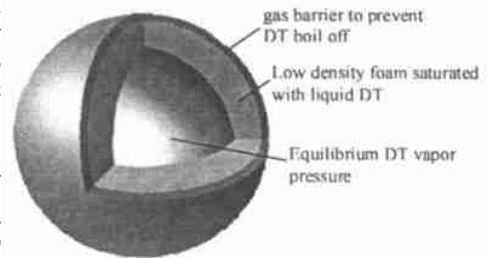


Fig 1 ICF cryogenic target containing a low-density foam shell inside

图 1 包含低密度泡沫球壳的 ICF 冷冻靶

1 实验内容

PS 泡沫通过反相乳化技术制备^[2]。制备工艺大致如下:内相是聚合引发剂-过硫酸钠($N a_2S_2O_8$)的水溶液,外相是可聚合单体-苯乙烯和二乙烯基苯(DVB)以及油性表面活性剂(SPAN 80)的混合溶液。两相混合形成反相乳液后在 50 °C 恒温 24 小时, $N a_2S_2O_8$ 引发苯乙烯和 DVB 的聚合反应。待聚合反应完全后,水滴界面形成固态的 PS 材料,再经过干燥脱水后就可以得到均匀的低密度泡沫材料。

由于使用液氢及其同位素有易燃易爆的危险性,并且低温冷冻具有一定的复杂性,因此采用无水乙醇(分析纯,成都化学试剂厂出品)代替液氢及其同位素研究 PS 泡沫的液体浸润性能。泡沫在浸润前后的质量用 AE200 型电子分析天平(mettler 公司生产)测量,液体在泡沫中的浸润高度 h 为

$$h = (m - m_0) / \rho_l \pi R^2 P \quad (1)$$

式中: m_0 和 m 分别是浸润前后泡沫的质量; ρ_l 是液体的密度; R 是块状泡沫材料的半径; P 是根据泡沫密度得出的泡沫材料孔隙率

$$P = (1 - \rho / \rho_0) \times 100\% \quad (2)$$

ρ_0 和 ρ 分别是致密材料与泡沫材料的密度,非晶态 PS 密度 $\rho_0 = 1.05g/cm^3$ 。

泡沫的机械性能利用 SEIKO 公司的 DM S6100 型动态热机械分析仪(DMA)测量。实验采用轴向压缩方式,频率 10Hz,测量材料压缩模量随温度的变化,由于仪器的限制,目前测量的温度最低只能达到 -140 °C。

2 结果与讨论

2.1 液体浸润性能

两种不同密度的 PS 泡沫的乙醇浸润曲线见图 2。从图可以看出:液体对泡沫材料的浸润速率由于密度的

收稿日期: 2001-12-24; 修订日期: 2002-03-05

基金项目: 国防预研基金资助课题(54.9.1)

作者简介: 杜 凯, (1972-), 男, 河北省武邑人, 硕士, 助研, 主要从事激光聚变靶及其材料的研究工作。绵阳 919-987 信箱。

降低而升高。如果将泡沫简单地看作由直径相同的毛细管整齐排列而成,则根据 Young-Laplace 方程可知,液体在蜂窝直径为 r 的开孔泡沫中浸润的驱动力 p 为液体在毛细管中的毛细压力

$$p = 2\gamma\cos\theta/r \quad (3)$$

式中: γ 为液体的表面张力; θ 为接触角。液体在泡沫中可以达到的平衡高度为

$$h_e = 2\gamma\cos\theta/rg\rho_l \quad (4)$$

液体在泡沫中的上升速度可以用 Poiseuille 方程表示为

$$dh/dt = r^2\Delta p/8\mu h \quad (5)$$

式中: μ 是溶液的粘度; h 是 t 时刻液体在泡沫中的高度。将式(3)代入式(5)可以得到

$$dh/dt = r\gamma\cos\theta/4\mu h \quad (6)$$

积分式(4)可得

$$h = \sqrt{r\gamma\cos(\theta)t/2\mu} \quad (7)$$

由上式可知,对于给定的液体和泡沫材料,液体的浸润高度与时间的二分之一方成正比。根据实验数据作 $h-t^{1/2}$ 图(见图 3,注意与图 2 横坐标的单位不同),线性拟合得到的直线斜率 $\sqrt{r\gamma\cos(\theta)/2\mu}$ 分别为 $0.40\text{cm}\cdot\text{s}^{-1/2}$ (泡沫密度 $52.5\text{mg}/\text{cm}^3$) 和 $0.64\text{cm}\cdot\text{s}^{-1/2}$ (泡沫密度 $35.2\text{mg}/\text{cm}^3$)。由于在 PS 泡沫制备过程中使用的表面活性剂和引发剂残留在泡沫中,其中疏水基团伸入聚合物材料内部,而亲水基团则暴露在聚合物与空气的界面,它可以大大地降低乙醇与聚合物之间的接触角,因此可以假定 $\theta=0$,查文献得乙醇 $\gamma=22.27\text{mN}/\text{cm}$ (20 $^\circ\text{C}$), $\mu=1.19\text{mPa}\cdot\text{s}$ (20 $^\circ\text{C}$)^[3],根据直线的斜率可以求出泡沫的蜂窝直径分别为约 $1.7\mu\text{m}$ 和约 $4.4\mu\text{m}$,与扫描电镜(SEM)测量结果基本相当。

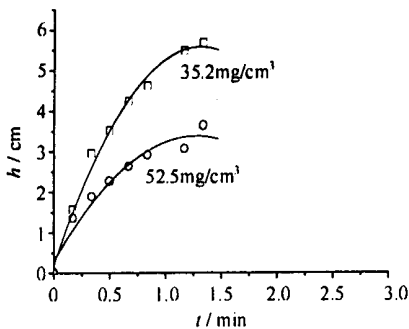


Fig. 2 Dependence of wetting height (h) on time (t) of PS foams

图 2 PS 泡沫液体浸润的高度-时间曲线

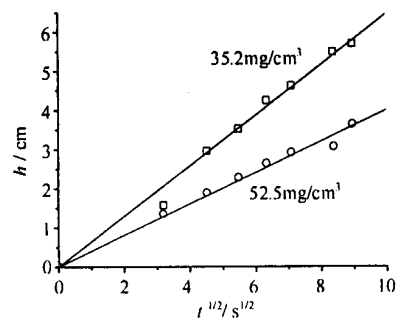


Fig. 3 Dependence of h on $t^{1/2}$ of PS foams' wetting

图 3 PS 泡沫液体浸润的高度-时间 $^{1/2}$ 曲线

2.2 机械性能

图 4 给出了不同密度的 PS 泡沫在一定温度范围内压缩模量的变化。由图可以看出: PS 泡沫的压缩模量随温度降低而升高。我们知道致密材料在低温下由于分子间堆积得更为紧密,因此更难于被压缩,其压缩模量更高。从实验结果可知,虽然泡沫材料为蜂窝状的网络结构,具有较高的孔隙率,但其压缩模量仍然表现出与致密材料类似的变化规律。

图 5 是 PS 泡沫在不同温度下的压缩模量随密度的变化曲线。由图可以看出,泡沫的压缩模量随密度的升高而增加。原因在于随着泡沫密度的增加,材料孔隙率降低,具有更加完整的结构。一般认为,多孔材料与致密材料的物理性质之间的关系为

$$P/P_0 = (\rho/\rho_0)^n \quad (8)$$

式中: P 与 P_0 分别是多孔材料与致密材料的物理性质(如模量、强度、电导率等,此处为材料的模量); ρ 与 ρ_0 分别为多孔材料与致密材料的密度; n 为定标指数。对(8)式两边分别取对数得

$$\lg(P/P_0) = n\lg(\rho/\rho_0) \quad (9)$$

取 $P_0=2.0\times 10^9\text{N}/\text{cm}^2$ ^[4],根据 20 $^\circ\text{C}$ 时的实验数据作 $\lg(P/P_0)-\lg(\rho/\rho_0)$ 图得一直线(见图 6),斜率为 2.02,即 $n=2.02$ 。Lemay J D 研究了利用不同方法制备的多种低密度泡沫材料后发现:只有通过反相乳化技术制备的 PS 泡沫的模量-密度定标指数约为 2,原因在于此类 PS 泡沫的网络状结构之间相互联结较好。我们的实验与上述结果相吻合^[5]。

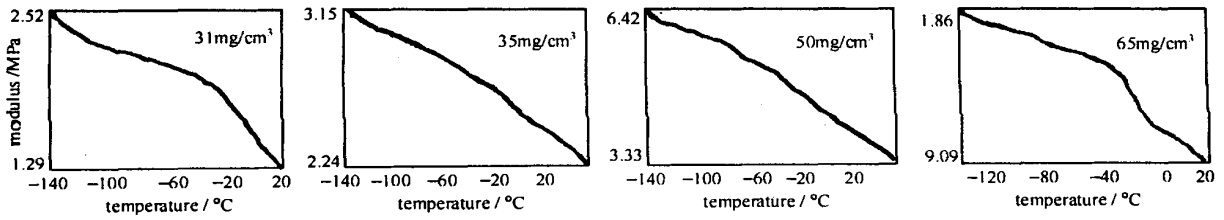


Fig 4 Dependence of compressive modulus of PS foams with different densities on temperature

图 4 不同密度的 PS 泡沫的压缩模量-温度曲线

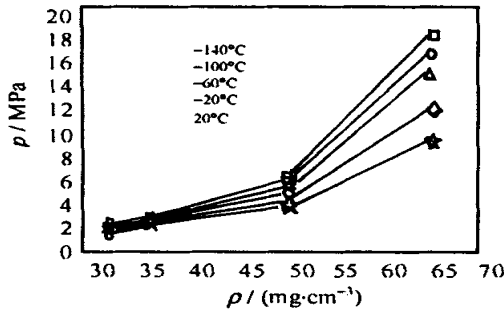


Fig 5 Influence of compressive modulus on density of PS foam

图 5 PS 泡沫的压缩模量与密度关系

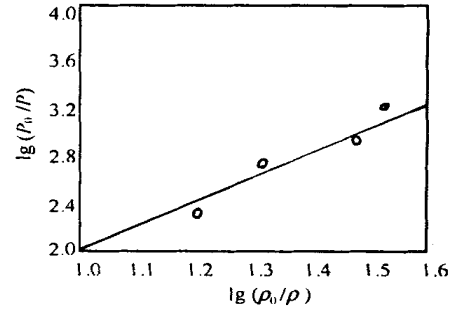


Fig 6 Dependence of $\lg(P_0/P)$ on $\lg(\rho_0/\rho)$ of PS foam at 20

图 6 20 时 PS 泡沫的 $\lg(P_0/P)$ 与 $\lg(\rho_0/\rho)$ 的关系曲线

3 结 论

利用无水乙醇研究了 PS 泡沫的液体浸润性能, 结果表明: 随着密度的降低, 浸润速率有所提高, 液体在泡沫中的浸润高度与时间的 $1/2$ 次方成正比。根据液体浸润高度与时间关系求得的泡沫蜂窝直径与 SEM 测量结果相当。

DMA 测试表明: PS 泡沫材料的压缩模量随温度的降低而升高, 随密度的降低而降低。压缩模量与密度之间的定标指数为 2.02。

致谢 感谢史光梅, 周本权同志在泡沫动态力学性能测试方面提供的帮助。

参考文献:

- [1] Sacks A, Darling D H. Direct drive cryogenic ICF capsules employing D-T wetted foam [J]. *Nuclear Fusion*, 1987, 27(3): 447—452
- [2] Cook R C, Overturf III G E, Haendler B L, et al. Low-density foam materials from styrene-divinylbenzene inverse emulsions[R]. UCRL-LR-109207, 1992
- [3] 程能林, 胡声闻. 溶剂手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1986 (Cheng N L, Hu S W. Handbook of solvent. Beijing: Chemical Industry Press, 1986)
- [4] 金日光, 华幼卿. 高分子物理[M]. 北京: 化学工业出版社, 1991 (Jin R G, Hua Y Q. Physics of polymer. Beijing: Chemical Industry Press, 1991)
- [5] Lemay J D. Mechanical structure-property relationships of microcellular, low density foam [R]. UCRL-JC-104516, 1990

Studies on target performance of PS foams

DU Kai, ZHANG Lin, ZHOU Lan, ZHANG Hou-qiong

(Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-987, Mianyang 621900, China)

Abstract The liquid (ethanol) wetting characteristic and dynamical mechanical property of polystyrene foams prepared by inverse emulsion with various densities have been studied. The wetting rate increases while the foam density decreases. The foam's cell sizes obtained from the relationship between the liquid wetting height and time correspond with the measured ones by SEM. The compressive modulus of the foam increases as temperature decreases and its density increases. The scaling exponent between the compressive modulus and density of PS foam is 2.02.

Key words: polystyrene; foam; ICF target