



·惯性约束聚变物理与技术·

微腔内气体抽离的多尺度模拟与分析*

李海洋^{1,2}, 张占文², 易 勇¹, 毕 鹏¹, 栾 旭², 史瑞廷²

(1. 西南科技大学 材料科学与工程学院, 四川 绵阳 621000; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 基于适用于整个克努森数范围的流动理论, 建立了去除惯性约束聚变实验中靶丸内空气的理论模型, 并设计实验验证了此模型的可靠性。物理实验要求靶丸内空气浓度低于 10×10^{-6} , 数值模拟了去除靶丸内空气的过程, 重点分析了靶丸内空气浓度、压力与除气时间的关系。计算并比较了单管路一次抽气法、单管路循环抽气法与双管路流洗法三种去除靶丸内空气方法的时间成本。数值计算结果表明: 单管路一次抽气法中, 靶丸上的微通道的存在对去除靶丸内空气所需时间的影响不可忽略, 在考虑靶丸上微通道与充气管的情况下, 需要 1961.77 h 才能使靶丸内的空气浓度达到标准。单管路循环抽气法中, 抽气次数与单次抽气程度会影响去除靶丸内空气所需总时间, 在单次抽气程度值取最优的情况下, 采用充三次, 抽四次的方案可使达标总时间减少至 1 h 左右, 此方案下单次充气 and 抽气时间分别为 6 min 和 10 min。而采用双管路流洗法则仅需 11 min 便可使靶丸内空气浓度达标。

关键词: 抽气; 充气; 微管; 自由分子流; 数值模拟

中图分类号: O351.2

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.200243

Multi-scale simulation and analysis of gas evacuation processes in a microcavity

Li Haiyang^{1,2}, Zhang Zhanwen², Yi Yong¹, Bi Peng¹, Luan Xu², Shi Ruiting²

(1. School of Materials Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China;

2. Laser Fusion Research Center, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

Abstract: Based on the flow theory applicable to the whole Knudsen number range, a theoretical model for removing air from the target shot in inertial confinement fusion was established, and the reliability of the model was verified by designed experiments. The physical experiment requires the air concentration in the target capsule to be lower than 10×10^{-6} , the process of removing air in the capsule was simulated numerically, and the relationship between the air concentration in the capsule, the pressure in the capsule and time was emphatically analyzed. The time consumed by three methods for removing the air in the capsule, namely the single-pipe one-time gas evacuation method, the single-pipe circulation gas evacuation method and the double-pipe flow washing method, was calculated and compared. Numerical calculation results show that: in the single-pipe one-time gas evacuation method, the existence of the micro-channel on the capsule has a non-negligible effect on the time required to remove the air in the capsule, and it takes 1961.77 h for the air concentration in the target shot to reach the standard when the micro-channel on the capsule and the gas-filling pipe is considered. In the single-pipe cycle gas evacuation method, the number of evacuation times and the degree of single gas evacuation will affect the total time required to remove the air in the capsule. When the single gas evacuation degree is at the optimal value, the scheme that filling three times and evacuating four times can reduce the total time to reach the standard to about 1 h, while the single gas filling time and gas evacuation time are 6 min and 10 min, respectively. However, it takes only 11 minutes for the air concentration in the capsule to reach the standard by using the double-pipe flow washing method.

Key words: evacuation; gas filling; microcapillary tube; free molecular flow; numerical simulation

* 收稿日期: 2020-08-19; 修订日期: 2021-04-07

基金项目: 环境友好能源材料国家重点实验室自主课题资助项目(20fkxy04); 四川省重点研发计划项目(2019YFG0432)

作者简介: 李海洋(1995—), 男, 硕士, 从事空心玻璃微球打孔充气研究; lihaiyang1995@163.com。

通信作者: 张占文(1973—), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光聚变靶的研究与制备; bjzww1973@163.com。

在惯性约束聚变(ICF)实验中,有两种方法可以驱动ICF内爆^[1-3],即直接驱动和间接驱动。无论是直接驱动还是间接驱动,充气体的微腔(靶丸)都是靶的核心部件^[4],靶丸内的燃料气体或诊断气体的含量和变化均是ICF实验所关注的重点^[5-6]。目前,物理实验需在极低温度下将所需的燃料气体(氘)充入微腔,形成燃料冰层。然而,一旦微腔内原有的空气分子(氧气、氮气等)融入到燃料中,就会成为污染物,并在气体加载过程中提前结冰,堵塞管路,中断燃料填充过程^[7],从而影响靶的制备,即使成功制备靶丸,也会影响物理实验。

因此,在靶丸加载燃料气体前,要求除去靶丸内的空气,使其浓度低于 10^{-5} ^[7]。靶丸容积 2.483 mm^3 ,抽气管内径 $6\text{ }\mu\text{m}$,对于如此微小的容积与管径,使用现有的装置实验测量靶丸中的气压和微管中的流量不能获得准确数据^[8-9],无法建立靶丸内压、空气浓度与除气时间的关系,进而无法确定靶内空气浓度达标所需的除气时间。可见,研究一种用于定量预测去除空气过程中靶丸内空气浓度(c)与压力(p_i)的变化,并确定除气时间(t)的数值方法至关重要。

在靶丸除气过程中,靶丸内的压力在 $0.1\text{ MPa}\sim 1\text{ Pa}$ 内变化,根据克努森数(Kn)对流体的划分,微管内的气体流动跨越连续区,滑移区,过渡区与自由分子区^[10-11]。随着 Kn 的增大,气体稀薄效应逐渐增强^[12-13],基于连续性假设的宏观流动模型将失效。然而,在涉及多尺度气体流动的微腔体中,对气体流动过程的理论研究还很匮乏。目前,国内外一些研究集中在ICF腔(容积 17.482 mm^3)的低 Kn 流动过程($Kn<1$),而对高 Kn 流动过程研究甚少^[14-17]。对于靶丸(容积 2.483 mm^3)内空气浓度降至 10^{-5} 的过程,必然涉及低压气体在微管中的流动,对应的 Kn 数较大($Kn>10$),对流动模型的要求更加严格。

本研究采用一种适用于整个 Kn 数范围的流体流动模型,数值计算研究了以三种不同方法去除靶丸内空气过程中的多尺度流动问题。其中,对于单管路一次抽气法,研究了靶丸内压、靶丸内空气浓度与抽气时间的关系,并研究了靶丸上的微通道与过渡管的存在对整个过程的影响;对于单管路循环抽气法,研究了抽气次数、单次抽气程度对除气所需总时间的影响;对于双管路流洗法,研究了靶丸内压、靶丸内空气浓度及管道的质量流量与除气时间的关系。本文的研究有助于更全面地理解靶丸去除空气过程中气体的动态流动行为,为实验操作中快速去除靶丸内空气方案的选择与参数优化提供指导,因此具有十分重要的意义。

1 数值计算模型

1.1 物理模型

靶丸具体尺寸在不同物理实验中的要求不同^[18],在研究靶丸抽气过程中本文建立了如图1所示的物理模型,模型所采用的数据均参考自NIF冷冻靶点火实验数据^[19],整个模型由靶丸、充气管、过渡管、不锈钢管和一个燃料箱组成。靶丸外径 2 mm ,壁厚 $160\text{ }\mu\text{m}$;充气管内径 $6\text{ }\mu\text{m}$,外径 $10\text{ }\mu\text{m}$,长 2.2 mm ;过渡管长 166 mm ,内径 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。通过激光在靶丸上打出直径为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的微通道,形成充气孔,并对充气孔表面扩孔,使充气管能插入靶丸。图1中,充气管插入靶丸的深度为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 。靶丸内气体压力为 p_i ,充气室的压力为 p_o ,在整个过程中,靶丸内外温度均为 298 K 。

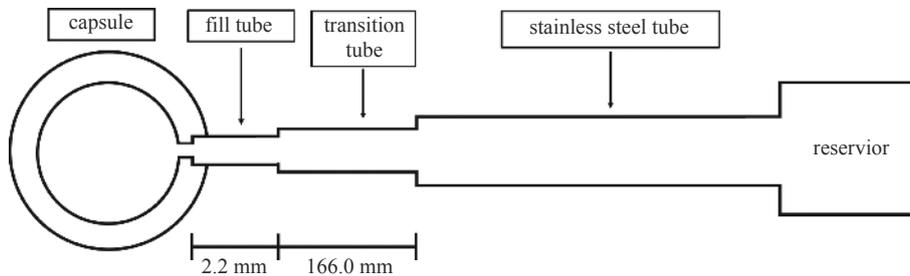


Fig. 1 Physical model of target capsule evacuation

图1 靶丸抽气物理模型

1.2 数学方程

为研究靶丸去除空气的过程,需建立一个流体流动模型来计算通过微管道的气体流量。根据 Kn 数值对流体的划分,研究对象覆盖连续区,滑移区,过渡区与自由分子区,考虑到连续流体力学无法充分描述的稀薄效应,采用Dongari^[20]提出的可用于计算整个 Kn 数范围的流动方程,用于数值计算靶丸除气过程。基于此流动方程,通过微管的气体质量流量可以表示为

$$\dot{M} = \frac{\pi r^4 p_o^2}{16\eta LRT} \left[\left(\frac{p_i}{p_o} \right)^2 - 1 \right] + \frac{\eta \pi r^4}{L} \ln \left(\frac{p_i}{p_o} \right)^2 \quad (1)$$

式中： \dot{M} 为通过微管的质量流量(kg/s)； L 为微管长度(m)； r 为微管内径(m)； T 为气体温度(K)； η 为气体粘度(Pa·s)； R 为气体常数(J·kg⁻¹·K⁻¹)； p_i 和 p_o 分别为微管的进出口压力(Pa)。对于小压降($p_i \approx p_o$)，式(1)转化为不可压缩牛顿流体的Hagen-Poiseuille方程，对于较大的压降($p_i \approx p_o$, $p_o = 0$)，其中对流项(式(1)的第一项)占主导，在这种情况下， \dot{M} 是Hagen-Poiseuille方程所预测的一半。

根据气体状态方程 $pV = mRT$ ，可以推导出

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{V} \left(mR \frac{dT}{dt} + RT \frac{dm}{dt} \right) \quad (2)$$

气体在微管中流动时，忽略温度的变化，式(2)可简化为

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT}{V} \frac{dm}{dt} = \frac{RT}{V} \dot{M} \quad (3)$$

对式(3)解微分方程，得到靶丸内压 p_i 与充气管气体质量流量 \dot{M} 的关系，结合式(1)，可得 p_i 、 \dot{M} 与 p_o 的关系。编写程序，可以获得实时的 p_i 、 p_o 与气体质量流量 \dot{M} 随时间的变化趋势。

另外一个需要解决的问题是复合型填充管。对于两根长度分别为 L_1 、 L_2 ，内径分别为 r_1 、 r_2 微管耦合形成的复合管路，通过单个管道的流量相等，可以推导式(4)^[17]，将总压降与由两个管道之一引起的压降联系起来。

$$\begin{cases} \Delta p_2 = \frac{xr_1^4 \Delta p}{r_2^4 + xr_1^4} \\ x = \frac{L_2}{L_1} \end{cases} \quad (4)$$

2 结果和讨论

2.1 模型验证

为了验证目前的模型，设计了如图2所示的抽真空过程的实验装置。一个容积为34.48 cm³的真空罐被用来模拟靶丸抽真空过程，真空罐上有压力表可用于监测罐内实时压力 p_i ，起始时罐内空气压力为150 kPa。真空罐通过微管与真空室相连接，微管长0.3 m，内径100 μm。真空室连接有机械泵与分子泵串联组成的抽气系统，此系统效率较高，可将真空室内压降至1 Pa以下，使真空室内压接近0。真空罐内的压力由150 kPa降至15 kPa的过程中，记录真空罐上压力表示数与对应的抽气时间。如图3所示，数值模拟结果与真空罐内气压变化的实验数据相吻合，均呈反比例函数形，证明所建立的模型能够预测容器内压力的动态变化。

为进一步研究算法的可靠性，采用本算法计算当充气室内压以1 MPa/min上升时，置于充气室中的ICF腔的内外压差(Δp)随时间的变化，计算结果如图4所示，计算模型及参数与Wu^[15]所采用的一致，计算结果与文献中的结果相一致， Δp 从0开始先增加后减少，在充气3.01 s时 Δp 取得最大值0.328 Pa，从另一方面验证了本算法的可靠性。

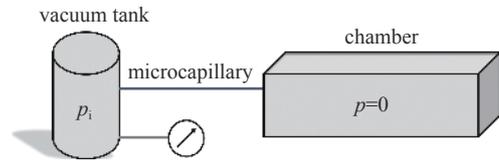


Fig. 2 Experimental setup of gas evacuation from vacuum tank

图2 真空罐抽气实验装置图

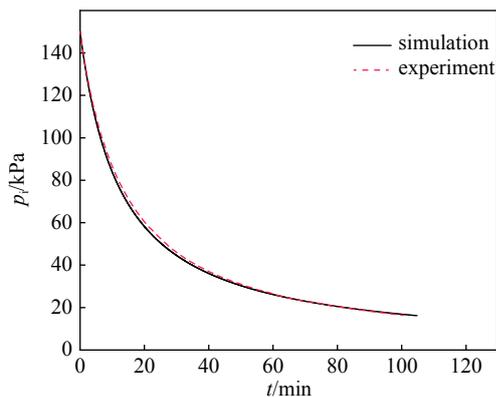


Fig. 3 Simulation and experimental data of the gas evacuation process in vacuum tank

图3 真空罐抽气过程的模拟与实验数据

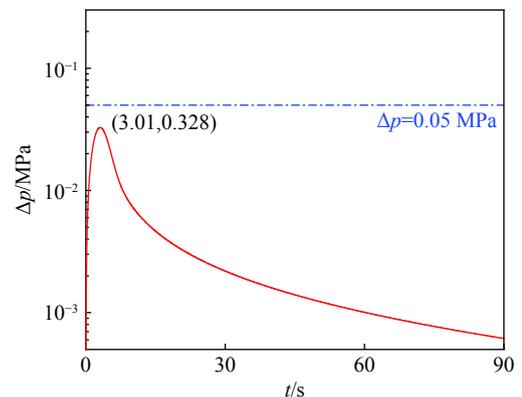


Fig. 4 Differential pressure changes inside and outside the ICF cavity during the gas filling process

图4 充气过程中ICF腔内外压差变化

2.2 单管路一次抽气法

从图1靶丸抽气物理模型可以看出,靶丸内的气体通过靶丸上的微通道,充气管,过渡管,不锈钢管被抽出。不锈钢管的管径一般较大($>500\ \mu\text{m}$),不会对整个抽气过程造成影响,不予考虑,而靶丸上的微通道,由于其内径过小($5\ \mu\text{m}$),有必要研究其对整个抽气过程的影响。因此,为更清楚地了解抽气过程中,靶丸内空气浓度(c)与压力(p_i)随抽气时间(t)的变化规律,同时研究靶丸上的微通道、充气管、过渡管对抽气过程的影响,数值计算了初始内压为 $0.1\ \text{MPa}$ 时,三种不同情况的抽气过程。分别为:情况A:不考虑靶丸上的微通道与过渡管;情况B:不考虑过渡管;情况C:不考虑靶丸上的微通道。三种情况下的气体流动行为如图5所示。

从图5中可以看出,压力曲线呈反比例函数数形,靶丸内压力(p_i)下降的速度不断减慢,当 p_i 从起始的 $0.1\ \text{MPa}$ 降至 $1\ \text{Pa}$ 时, $c=10^{-6}$,此时三种情况分别耗时 $1726.65\ \text{h}$, $1961.77\ \text{h}$ 和 $1792.61\ \text{h}$ 。相比情况A,情况B与情况C在时间成本上分别增加了 13.62% 和 3.82% ,其原因为考虑靶丸上的微通道与过渡管时,通过微管的质量流量有所减少。可见,过渡管对抽气过程的影响可忽略,而靶丸上的微通道的影响不可忽略,后续的研究则默认考虑靶丸上的微通道,不考虑过渡管。提取图5中情况B的数据,将靶丸内压从 $0.1\ \text{MPa}$ 降至 $1\ \text{Pa}$ 的过程分为5个阶段,每个阶段的起始压力与此阶段所消耗的时间如表1所示,其中第五列数据为此阶段的抽气时间与5个阶段的抽气总时间之比。

表1 情况B不同阶段的抽气时间

Table 1 Evacuation time at different stages of Case B

stage	initial pressure/Pa	final pressure/Pa	evacuation time/h	proportion/%
I	101 325	10132.5	0.17	0.01
II	10 132.5	1013.25	1.77	0.09
III	1013.25	101.325	17.66	0.90
IV	101.325	10.1325	176.56	9.00
V	10.1325	1.01325	1 765.61	90.00

由表1中的数据可以看出,从阶段I到阶段V,抽气时间呈数量级增长,观察第五列数据可以发现,抽气过程中,某个阶段所消耗的时间几乎为上一个阶段的10倍。对于阶段V, p_i 从 $10.1325\ \text{Pa}$ 减小至 $1.01325\ \text{Pa}$,对应的抽气时间占到总时间的90%,前四个阶段总共占10%,其原因为随靶丸内压降低,靶丸中空气的密度在不断下降,通过微管的质量流量不断减少。

显然采用此种一次性将靶丸内空气抽至 10^{-5} 的方法时间成本极高,难以被实验所接受,其主要原因为阶段V的低压抽气过程太过耗时。因此,本文将在2.3与2.4中讨论采用单管路循环抽气和双管路流洗的方法来避免出现低压抽气过程,提高去除靶丸内空气的效率。

2.3 单管路循环抽气法

在循环抽气过程中,初始时靶丸内为 $0.1\ \text{MPa}$ 的空气,先抽气使靶丸内压(p_i)降至 p_{i1} ,然后充入燃料气体氘气(D_2)至靶丸内压为 $0.1\ \text{MPa}$,再抽气使靶丸内压降至 p_{i2} ,反复充气与抽气,将靶丸内空气浓度(c)降至 10^{-5} 。

充入 D_2 后的抽气过程实际为混合气体通过微管道的流动过程,稀薄效应的存在使混合气体通过微管道后浓度发生变化,Present^[21]研究发现当分子自由程远大于微管管径时,流动是扩散的,并且分离系数(出口压力为0时)有最大值,循环抽气所涉及的过程中,避免了低压抽气的出现,浓度分离是极小的,因此可忽略此种效应对浓度的影响。不考虑浓度分离现象,在计算靶丸内空气和 D_2 抽离过程时,采用道尔顿分压定律,可对抽气时微管中的空气及 D_2 比例进行计算,结合1.2的数值计算方法,可获得抽气过程中,靶丸内空气及 D_2 的压力和浓度随时间的变化趋势。

先考虑通过两次抽气将 c 降至 10^{-5} ,记第一次抽气后,压力为 p_{i1} ,充 D_2 至靶丸内压为 $0.1\ \text{MPa}$ 后,再次抽气,靶丸内压降为 p_{i2} ,记 $X=101\ 325\ \text{Pa}/p_{i1}$, $Y=101\ 325\ \text{Pa}/p_{i2}$,则应满足 $XY=10^5$, X,Y 表示单次抽气程度值, X 与 Y 的值越大表示抽气进行得越彻底,其取值决定整个循环抽气过程的总时间。因此,有必要研究 X,Y 的值对整个抽气过程的影响,图6

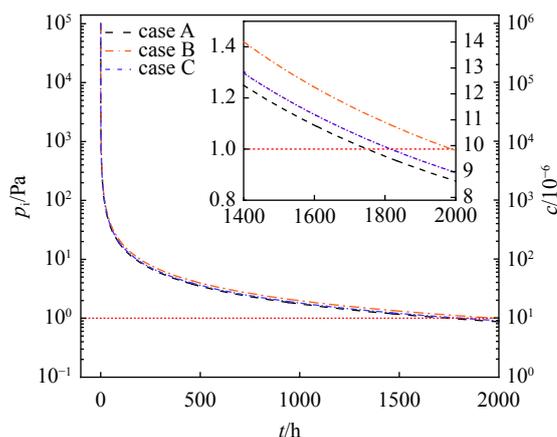


Fig. 5 Relationship between air concentration in the target capsule, pressure in the capsule and time under three conditions

图5 三种情况下靶丸内空气浓度及压力与时间的关系

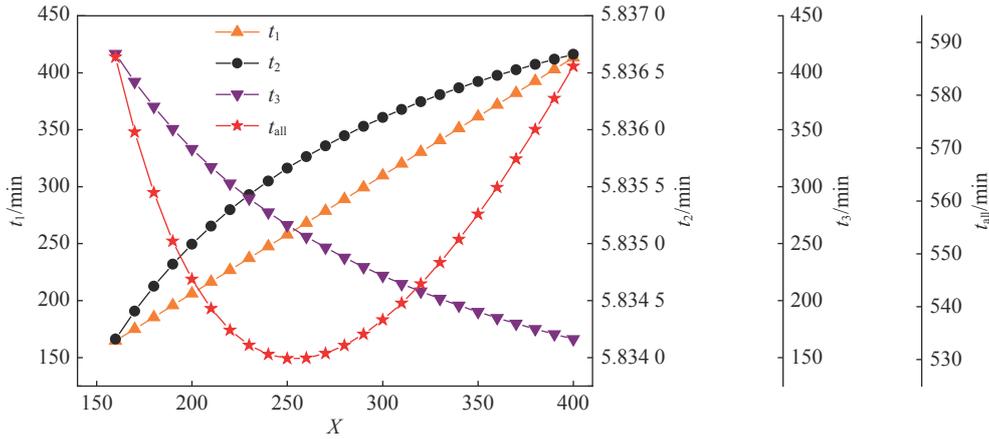


Fig. 6 Influence of the values of the first gas evacuation degree X on the first gas evacuation time (t_1), the first gas filling time (t_2), the second gas evacuation time (t_3), and the total time (t_{all})

图 6 第一次抽气程度 X 的值对第一次抽气时间 (t_1)、第一次充气时间 (t_2)、第二次抽气时间 (t_3)、与总时间 (t_{all}) 的影响

为 X 值从 160 增加至 400 的过程中, 求出的第一次抽气时间 (t_1), 第一次充气时间 (t_2), 第二次抽气时间 (t_3) 与总时间 (t_{all})。从图 6 中可以看出, 随着 X 增大, t_1 与 t_2 增大, t_3 减小, t_{all} 先减小后增大, 这是因为, p_{i1} 减小, 造成 t_1 与 t_2 增大; 而 X 增大后, Y 减小, 则 p_{i2} 增大, 因此 t_3 减小; 当 X 的值较小时, p_{i2} 的值较小, 使第二次抽气所消耗的时间成倍增加; X 的值较大时, p_{i1} 的值较小, 使第一次抽气所消耗的时间成倍增加。因此, X 增大的过程中, t_{all} 先减小后增加。可见 X 取合适的值, 可以避免出现低压抽气, 当 $X=250, Y=400$ 时, t_{all} 最小。

如图 7 为充气一次、抽气两次时 ($X=250, Y=400$ 时), 整个循环抽气过程中 p_i 及 c_A 随 t 的变化, 第一次抽气 $t_1=257.965$ min, p_i 降至 $p_{i1}=405.30$ Pa, 此时 $c_{A1}=4 \times 10^{-2}$; 第一次充气 $t_2=5.836$ min, 充气后, $p_i=0.1$ MPa; 第二次抽气 $t_3=266.41$ min, 抽气后 $p_i=p_{i2}=253.31$ Pa, 此时 $c_{A2}=10^{-5}$ 。整个过程用时 $t_{all}=530.211$ min。

图 8 为充气两次、抽气三次时, 单次抽气程度取最优的情况下, p_i 及 C_A 与 t 的关系图, 图中 B、D 和 F 对应

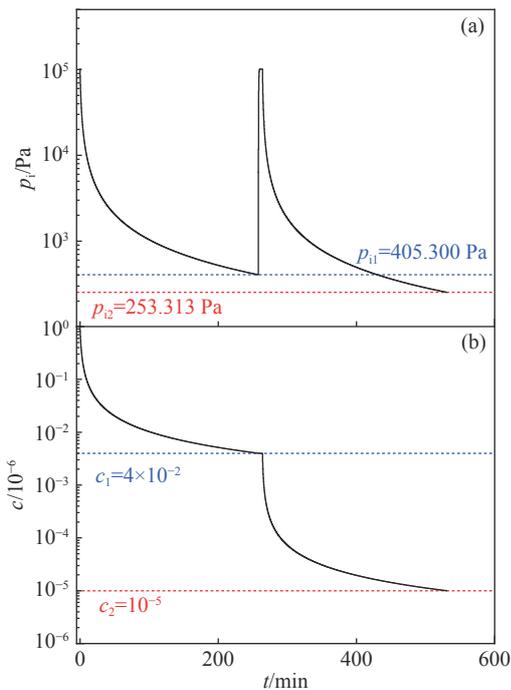


Fig. 7 Gas flow under filling one time and evacuating two times (a) relationship between pressure in the capsule and time; (b) relationship between air concentration in the capsule and time

图 7 充气一次和抽气两次时的气体流动 (a) 靶丸内压力与时间的关系 (b) 靶丸内空气浓度与时间的关系

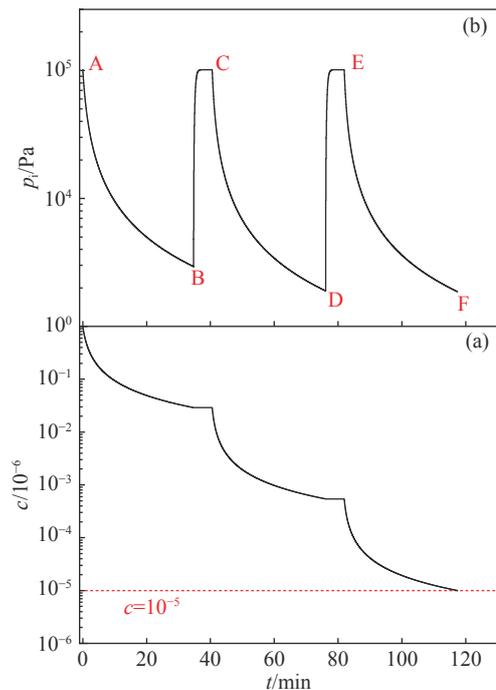


Fig. 8 Gas flow under filling two times and evacuating three times (a) relationship between pressure in the capsule and time; (b) relationship between air concentration in the capsule and time

图 8 充气两次和抽气三次时的气体流动 (a) 靶丸内压力与时间的关系 (b) 靶丸内空气浓度与时间的关系

的 p_i 分别为 2935.26, 1895.70 和 1869.54 Pa, 当 $c_A=10^{-5}$ 时, $p_i=1869.54$ Pa, $t_{all}=117.381$ min。其中 AB 段、CD 段与 EF 段分别为第一、第二和第三次抽气时的压力变化, 对应的抽气时间分别为 34.726, 35.553 和 35.459 min; BC 段和 DE 段分别为第一次和第二次充气所对应的压力变化, 对应的抽气时间分别为 5.818 和 5.825 min。整个过程用时 $t_{all}=117.381$ min。

图 9 为充气三次、抽气四次时, 单次抽气程度值取最优的情况下, p_i 及 c 与 t 的关系图, 图中 B, D, F 和 H 对应的 p_i 分别为 6949.59, 5673.29, 5206.83 和 5134.50 Pa, 当 $c=10^{-5}$ 时, $p_i=5134.50$ Pa, $t_{all}=67.795$ min。其中 AB 段、CD 段、EF 段与 GH 段分别为第一、第二、第三和第四次抽气时的压力变化, 对应的抽气时间分别为 14.068, 11.523, 12.325 和 12.487 min; BC 段、DE 段和 FG 段分别为第一、第二和第三次充气所对应的压力变化, 对应的充气时间分别为 5.791, 5.799 和 5.802 min。整个过程用时 $t_{all}=67.795$ min, 较 2.2 中单管路一次抽气法中情况 B 的抽气时间 1761.77 h, 缩短了 99.935%。

图 10 为单次抽气程度值取最优的情况下, 计算得出的充气三次、抽气四次的过程中, 单次充/抽气时间与管径的关系, 其中, 管径为 $6\ \mu\text{m}$ 时的抽气过程即为图 9 所描述的过程。当管径缩小至 $4\ \mu\text{m}$ 时, 第一、第二、第三和第四次抽气时间分别为 71.223, 58.340, 62.398 和 63.218 min; 第一、第二和第三次充气时间分别为 29.323, 29.366 和 29.382 min。当管径增大至 $8\ \mu\text{m}$ 时, 第一、第二、第三和第四次抽气时间分别为 4.451, 3.646, 3.899 和 3.951 min; 第一、第二和第三次充气时间分别为 1.831, 1.834 和 1.835 min。可以看出, 管径减小对整个抽气过程影响较大, 相比管径为 $6\ \mu\text{m}$ 时, 当管径减小至 $4\ \mu\text{m}$ 时, 充/抽气时间延长了 4 倍, 当管径增大至 $8\ \mu\text{m}$ 时, 充/抽气时间缩短了 2/3。

2.4 双管路流洗法

2.2 与 2.3 的研究表明, 相比单管路一次抽气法, 采用单管路循环抽气法来去除靶丸内的空气, 可以极大的缩短时间, 提升效率, 但也使操作过程变得复杂, 需要多次对靶丸进行抽气与充气操作, 且对操作时间的控制要求较为严格。如果物理实验允许再添加一根微管, 则可采用双管路流洗法来去除靶丸内的空气。在 2.2 中情况 B 的基础上, 增加一根与充气管参数相同的排气管, 组成双管路系统, 当充气管外接压力恒为 0.1 MPa 的 D_2 源, 排气管外压力始终为 0 时, 计算整个流洗过程如图 11 所示。

图 11 中显示了在双管路流洗过程中, 管路中的流量 Q 、靶丸内空气浓度 c_A 和靶丸内压 p_i 与时间的关系, 其中 Q_1 为充气管的质量流量, Q_2 为排气管的质量流量, $\Delta Q=Q_2-Q_1$, ΔQ 表示单位时间内靶丸内所减少气体的质量, 从

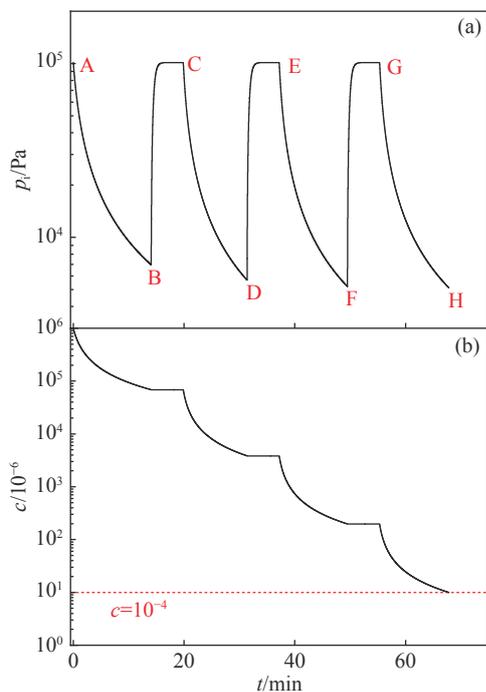


Fig. 9 Gas flow under filling three times and evacuating four times

图 9 充气三次和抽气四次时的气体流动情况

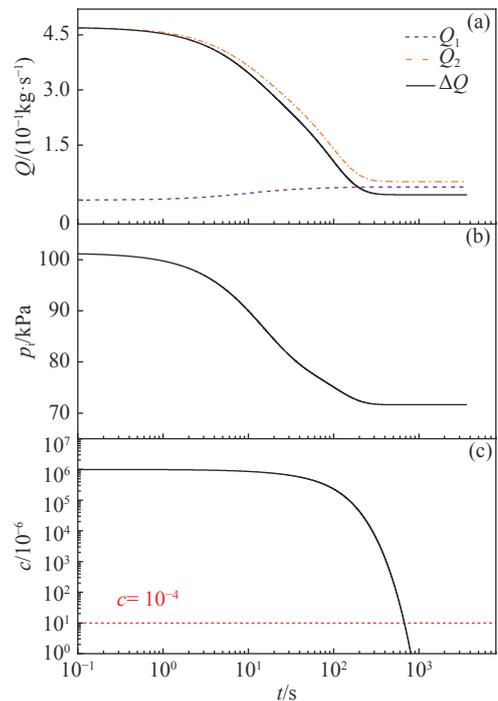


Fig. 11 Gas flow during double-line flow washing process

图 11 双管路流洗过程的气体流动情况

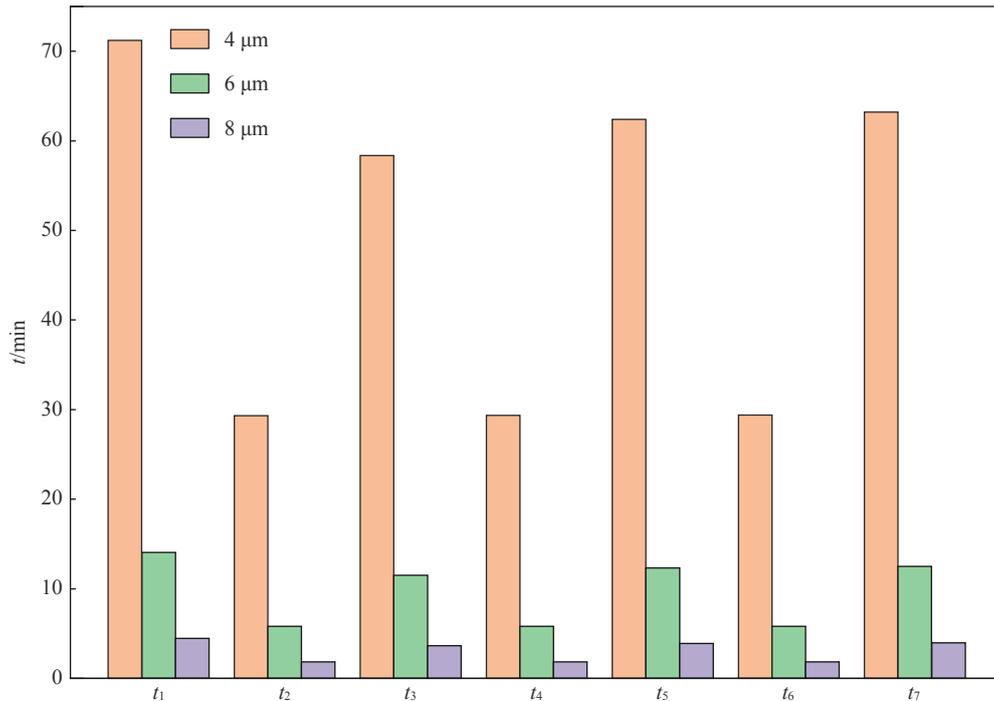


Fig. 10 Time of gas filling and gas evacuation under different pipe diameters

图 10 不同管径下的充气 and 抽气时间

图 11(a)中可以看出, 整个过程中, ΔQ 始终大于 0, 但其值却呈数量级地不断减小, 造成 p_i 不断减小, 当 $t=318.86$ s 时, ΔQ 减少至 1.74×10^{-12} 并趋于稳定, Q 的值太小, 因而 p_i 几乎不变。 c 随 t 不断减少, 在 $t=674.91$ s 时, $c=10^{-5}$, 此时 $p_i=71641.40$ Pa。相比单管路循环抽气法, 采用此方法将靶丸内空气降至 10^{-5} 所消耗的时间更短(约 11 min), 而且操作更简单。

3 结 论

以一种能描述整个 Kn 数范围的流动方程为基础, 建立模型, 编写程序, 研究了以三种不同方法将靶丸内空气降至 10^{-5} 过程中的多尺度流动问题, 这三种方法分别为: 单管路一次抽气法, 单管路循环抽气法与双管路流洗法。计算了靶丸内压和空气浓度与除气时间的关系。为高效除去 ICF 靶丸内空气提供了一种指导, 结论如下:

(1) 单管路一次抽气法中, 相比仅考虑充气管, 在分别增加对靶丸上微通道和过渡管的考虑后, 抽气达标时间分别增加了 13.62% 和 3.82%, 因此靶丸上微通道的存在不可忽略。在考虑靶丸上的微通道与过渡管时, 靶丸内空气达标所需总时间为 1961.77 h, 在抽气过程中阶段 V 最为耗时, 占抽气总时间的 90%。

(2) 单管路循环抽气法中, 单次抽气程度与抽气次数都会影响去除空气所需总时间。在采用充三次、抽四次的方案时, 单次抽气程度值取最优的情况下, 可将单次抽气时间与单次充气时间分别控制在 10 min 和 6 min 左右, 此时靶丸内空气达标所需总时间约为 1 h。当排气管管径由 $6 \mu\text{m}$ 减少至 $4 \mu\text{m}$ 时, 充/抽气时间延长了 4 倍; 当排气管管径由 $6 \mu\text{m}$ 增加至 $8 \mu\text{m}$ 时, 单次充/抽气时间缩短了 2/3。

(3) 若物理实验允许再添加一根微管, 则采用双管路流洗法时, 相比单管路循环抽气法可避免繁琐的操作, 并能将靶丸内空气达标所需总时间减少至约 11 min。

参考文献:

- [1] Campbell E M, Goncharov V N, Sangster T C, et al. Laser-direct-drive program: promise, challenge, and path forward[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2017, 2(2): 37-54.
- [2] Craxton R S, Anderson K S, Boehly T R, et al. Direct-drive inertial confinement fusion: a review[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22: 110501.
- [3] Li Feng, Zhang Zhanwen, Li Jing, et al. Study on the strength of titanium doped hollow glass microspheres[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2017, 459: 18-25.
- [4] 陈鹏玮, 厉彦忠, 丁岚, 等. 低温冷冻靶微管燃料充注流动冷凝特性[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 122001. (Chen Pengwei, Li Yanzhong, Ding Lan, et al. Flow and condensation characteristics of fuel filling in cryogenic target fill tube[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29: 122001)
- [5] Schmitt M L, Shelby J E, Hall M M. Preparation of hollow glass microspheres from sol-gel derived glass for application in hydrogen gas storage[J]. *Journal of*

- Non-Crystalline Solids, 2006, 352(6/7): 626-631.
- [6] Hoppe M L, Steinman D A. New developments in glass shells from SiGDP-residual gases, gas filling and tailored half-lives[J]. *Fusion Science and Technology*, 2007, 51(4): 606-610.
- [7] Parham T, Koziowski B, Atkinson D, et al. Cryogenic target system for hydrogen layering[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 407-419.
- [8] 张占文, 李波, 唐永建, 等. 准动态柱腔充气靶制备工艺研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(2): 209-212. (Zhang Zhanwen, Li Bo, Tang Yongjian, et al. Fabrication of the hohlraum gas-filled target connected with gas source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(2): 209-212)
- [9] Kline J L, Hager J D. Aluminum X-ray mass-ablation rate measurements[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2017, 2(1): 16-21.
- [10] Chen Yongping, Deng Zilong. Hydrodynamics of a droplet passing through a microfluidic T-junction[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, 819: 401-434.
- [11] Chen Yongping, Wu Liangyu, Zhang Chengbin. Emulsion droplet formation in coflowing liquid streams[J]. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, 2013, 87: 013002.
- [12] Zhang Chengbin, Deng Zilong, Chen Yongping. Temperature jump at rough gas-solid interface in Couette flow with a rough surface described by Cantor fractal[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 70: 322-329.
- [13] Deng Zilong, Liu Xiangdong, Zhang Chengbin, et al. Melting behaviors of PCM in porous metal foam characterized by fractal geometry[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 113: 1031-1042.
- [14] 林伟, 王凯, 毕鹏, 等. ICF冷冻靶微管充气过程中气体压力测量[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(10): 2343-2346. (Lin Wei, Wang Kai, Bi Peng, et al. Gas pressure measurement in ICF cryogenic target micro-tube gas-filling process[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(10): 2343-2346)
- [15] Wu Liangyu, Zhou Hua, Yu Cheng, et al. Simulation of the gas filling and evacuation processes in an Inertial Confinement Fusion (ICF) hohlraum[J]. *Processes*, 2019, 7: 269.
- [16] Yu Cheng, Wu Suchen, Yang Weibo. Theoretical investigation of gas filling and leaking in inertial confinement fusion hohlraum[J]. *Sustainability*, 2018, 10: 3763.
- [17] Bhandarkar S D, Parham T, Fair J. Modeling and experiments of compressible gas flow through microcapillary fill tubes on NIF targets[J]. *Fusion Science and Technology*, 2021, 59(1): 51-57.
- [18] Takagi M, Saito K, Frederick C, et al. Fabrication and attachment of polyimide fill tubes to plastic NIF capsules[J]. *Fusion Science and Technology*, 2007, 51(4): 638-642.
- [19] Johal Z Z, Crippen J W, Forsman A C, et al. Robust capsule and fill tube assemblies for the National Ignition Campaign[J]. *Fusion Science and Technology*, 2009, 55(3): 331-336.
- [20] Dongari N, Sharma A, Durst F. Pressure-driven diffusive gas flows in micro-channels: from the Knudsen to the continuum regimes[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2009, 6(5): 679-692.
- [21] Present R D, DeBethune A J. Separation of a gas mixture flowing through a long tube at low pressure[J]. *Physical Review Journals Archive*, 1949, 75(7): 1050-1057.