

液滴法成球过程模拟计算软件

邱龙会, 傅依备, 王永川, 魏芸, 师韬

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要:根据液滴法制备空心玻璃微球的成球过程数学模型,用 Delphi 5.0 计算机语言编写了对应的模拟计算软件。该软件能够模拟计算成球过程中液滴/球壳的大小、下落速率、下落时间、壁厚、内气压等参数及其随操作条件改变的定量变化。初步实验表明:模拟计算结果与实验结果基本符合。

关键词:液滴法;空心玻璃微球;成球过程;计算软件

中图分类号:TL639.11 文献标识码:A 文章编号:1000-6931(2002)04/05-0477-04

A Software for Calculating the Fabrication Process of Hollow Glass Microspheres by Liquid Droplet Method

QIU Long-hui, FU Yi-bei, WANG Yong-chuan, WEI Yun, SHI Tao

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: According to the mathematical model of the formation process of hollow glass microspheres (HGM) fabricated by liquid droplet method, a simulation software, which runs in Win98 system, is compiled in computer language of Delphi5.0. It can be used to calculate the changes with the process conditions of a single liquid/shell's dropping velocities, outer diameters, wall-thicknesses, inner gas pressures, and time at any point in the furnace in the whole process or at any forming-stage. Experiments are designed to test the rationality of the software. And the calculated results are in good agreement with the experimental.

Key words: liquid droplet method; hollow glass microsphere; target fabrication; simulation software

用液滴法制备激光聚变靶丸燃料容器空心玻璃微球(HGM)的过程中,影响成球性能指标的因素比较复杂,任何环节都必须合理控制才能形成特定直径和壁厚的HGM。因无法直接观测成球过程,而只能通过初滴大小、浓度和产品HGM质量测定来推测各环节是否控

制合理,尽管业已成功地制备出满足“神光”首轮出中子物理实验的薄壁靶丸HGM^[1~3],但工艺条件的实验选择费时费力。若对液滴法成球过程的各环节进行分析,定量给出各影响因素的作用,就可大大减少实验次数,提高产品质量和产率,制备出多种直径和壁厚的靶丸。

收稿日期:2001-08-25;修回日期:2001-12-06

基金项目:中国工程物理研究院科研基金资助项目(990553)

作者简介:邱龙会(1970—),男,四川安岳人,副研究员,博士,无机化工专业

J. H. Campbell 等^[4]在 K. Masters^[5]对单个液滴干燥过程研究的基础上,分析了液滴在炉内的干燥和精炼过程,讨论了吹扫气体组成、液滴浓度、液滴大小等对成球过程的影响,过程分析是针对具体设备进行的,未见相应计算软件的文献报道。本实验室使用的液滴炉设备的结构不同,且炉内与大气相通。最近,我们对用现有的液滴炉设备制备 HGM 的成球过程分阶段进行了数学描述,给出了相应的数学模型。本工作将根据建立的数学模型编写计算机软件,并对计算结果进行初步实验验证。

1 数学模型

液滴法制备空心玻璃微球的设备是多区高温液滴炉^[1]。炉内各温区由自动控温系统加热与恒温,炉管内直径为 75 mm,精炼区两端由水冷套冷却。靶用现有液滴炉设备和液滴法制备空心玻璃微球的物理过程可划分为 7 个阶段进行分段模拟:液滴的形成;液滴下落到液滴挡板;液滴的封装;干凝胶球壳的形成;球壳预热至熔炼;球壳精炼;HGM 冷却与收集。在对成球物理过程分析^[6,7]的基础上,分阶段建立了 HGM 形成过程的数学模型。

2 模拟计算软件

2.1 语言与运行环境

采用 Delphi5.0 编写数学模型的计算程序,并编译成能在 Win98 操作系统中执行的软件包。

2.2 软件结构

按数学模型各阶段编写相对独立的软件功能块,在执行计算时,可根据需要任意更改,包括操作参数、物性参数和假定参数在内的各阶段计算程序的全部参数。沿炉体轴向上的实际温度分布单独形成纯文本文件,软件运行时,自动调用该文件,且可根据实际温度分布予以即时更新,这样,增大了软件的适用范围。

2.3 软件功能

在软件的主界面上,依次包括成球过程的 7 个阶段的计算模块,可计算感兴趣的任意成球阶段,启动任意阶段的计算模块均会弹出该阶段的界面。以干燥阶段为例,当输入全部参数后,启动“开始计算”按钮,计算出的结果将以

表格的形式输出,输出结果(包括输入的参数与计算结果)既可打印也可保存为数据文件。同时,计算结果也可以曲线形式给出,启动“曲线”按钮,计算结果以曲线图形式自动绘出。曲线输出界面可选择性地给出炉内任意位置处的液滴/球壳下落时间、速率、直径、壁厚、内气压、温度等的分布曲线,曲线均可直接存为图像文件。

通过选择曲线输出界面上的“高级”按钮,可进一步给出这些曲线随液滴直径、溶液初始浓度、抽气速率和发泡剂浓度等变化而改变的规律。同样,全部曲线可保存为数据文件和图像文件,数据文件可随时调用。

在曲线输出界面上,可利用鼠标选择感兴趣的区域进行放大,曲线上任意点的坐标可准确读数,便于定量比较某一条件变化时成球过程的变化。

2.4 计算示例

以高级曲线选项中随液滴初始直径变化为例,在液滴初始玻璃形成物质质量浓度为 0.08、发泡剂浓度为 0.01、抽气速率为 0.8 m³/h、炉内温度分布如图 1 所示条件下,分别计算了液滴初始直径 D_0 为 250、300 和 350 μm 时,液滴到达炉内任意位置 s 所对应的液滴/球壳下落时间 t 、速率 v 、直径 D 、壁厚 l 和球壳内气压 p_i ,计算结果示于图 2。

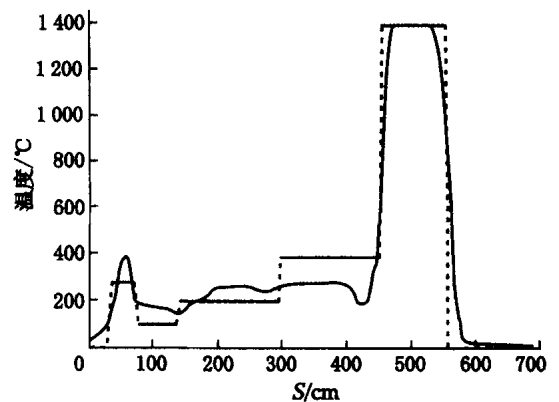


图 1 炉内温度的设定值与测量值

Fig. 1 Temperature distributions in the center of the furnace along z -direction
实线——测量值;虚线——设定值

从图 2 可看出:液滴越小,所需干燥距离越短,因液滴形成凝胶球壳后的下落速率 v 显著降低,仅为 0.1 ~ 0.3 m · s⁻¹,因而,形成 HGM

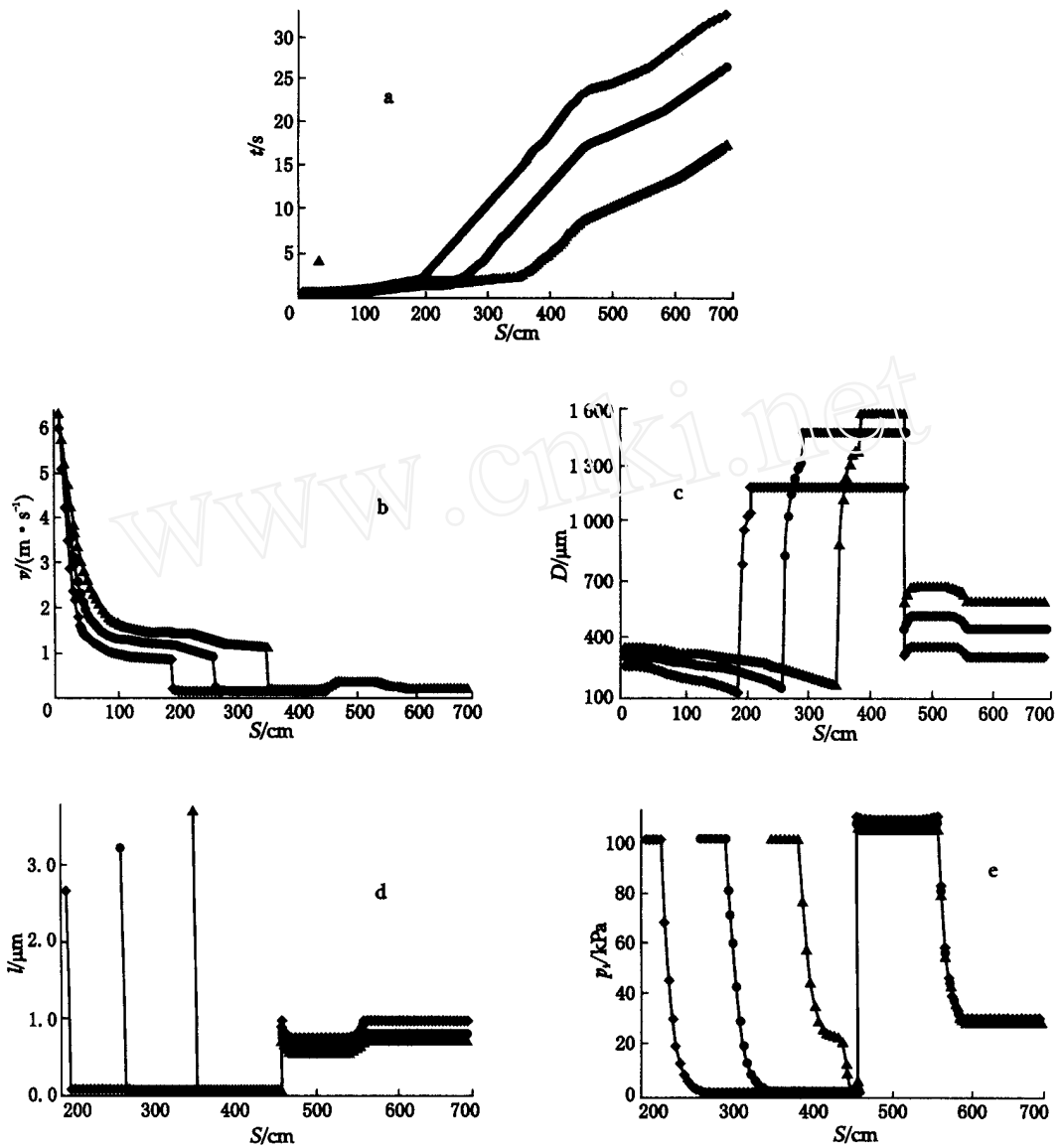


图2 不同液滴初始直径 D_0 液滴到达炉内任意位置 S 的液滴/球壳下落时间 t (a)、速率 v (b)、直径 D (c)、壁厚 l (d) 和球壳内气压 p_i (e)

Fig. 2 Variations of the falling time t (a), velocities v (b), diameters of the droplets/ HGM D (c), the wall-thickness of the microspheres l (d), and the gas pressures inside the microspheres p_i (e) with the place S inside the furnace under various initial diameters D_0 of droplets

— $D_0 = 250 \mu\text{m}$; — $D_0 = 300 \mu\text{m}$; — $D_0 = 350 \mu\text{m}$

时间越长,分别为 33、26、18 s;液滴越大,形成 HGM 直径越大,分别为 307、447 和 589 μm ;液滴越大,干凝胶球壳内发泡剂分解的有效摩尔量越高,所形成的 HGM 的壁厚越薄,分别为 0.95、0.78 和 0.71 μm 。

3 实验验证

以制备直径 500 μm 的薄壁空心玻璃微球为例,温度设置示于图 1,过程参数为:溶液玻璃形成物浓度 0.08,尿素浓度 0.01,溶液进料压力 35 kPa,小孔板内孔直径 168 μm ,射流崩断频率 7 000 Hz,分频数 2^{-5} ,抽气速率 0.8

m^3/h 。计算结果与实验结果列于表 1。

表 1 中: D_0 为液滴初始直径; v_j 为射流初

表 1 模拟计算软件的计算结果与实验结果的对比

Table 1 The calculated and experimental results in HGM's formation process

| | $D_0/\mu\text{m}$ | $v_j/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | $D_{m,\text{max}}/\mu\text{m}$ | $l_{m,\text{min}}/\mu\text{m}$ | $l_{m,d}/\mu\text{m}$ | $D_g/\mu\text{m}$ | $l_g/\mu\text{m}$ | p_i/kPa | t_t/s | $v_g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |
|-----|-------------------|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------------|----------------|------------------------------------|
| 计算值 | 331 | 6.00 | 1 500 | 0.095 | 0.12 | 525 | 0.76 | 28 | 20.6 | 0.21 |
| 实验值 | 328 | 6.1 | 900 | | 0.15 | 350~550 | | 0.7~1.2 | 20~30 | |

始速率; $D_{m,\text{max}}$ 为形成的凝胶球壳的最大直径; $l_{m,\text{min}}$ 为凝胶球壳的最小壁厚; $l_{m,d}$ 为干凝胶球壳的壁厚; D_g 为玻璃微球的直径; l_g 为玻璃微球的壁厚; p_i 为室温下 HGM 内的气体压力; t_t 为成球过程的总时间; v_g 为玻璃微球在收集区末端的速率。

计算与实验的结果对比可看出以下几点:

1) 液滴形成过程的计算值与实验结果基本符合,液滴形成过程的模拟计算结果与实际测定值符合良好^[5]; 2) 凝胶球壳直径的计算值(1 500 μm)与实验值(约 900 μm)存在较大差异,可能是因实验收集的凝胶球壳尚未完全干燥而具有弹性,内气压较低,室温下发生收缩的缘故,而计算值与文献值(1 400~1 600 μm)则吻合^[4]; 3) 干凝胶球壳壁厚的计算值(0.12 μm)与实验值(0.15 μm)相近; 4) 实验所得的玻璃微球中存在直径为 100~300 μm 的较小球壳,玻璃微球的直径主要分布在 350~550 μm 范围内,分布的中心约为 500 μm ,壁厚主要分布在 0.7~1.2 μm 之间,中心约为 0.85 μm ,除因部分液滴/球壳炸裂而形成直径较小的薄壁玻璃球外,与直径的计算值(525 μm)和壁厚的计算值(0.76 μm)接近; 5) 用气泡法测得的室温下玻璃微球内气压约为 20~30 kPa,与计算值(28 kPa)相符。

4 结论

所研制的模拟计算软件既能分阶段计算液滴法制备 HGM 的某一成球阶段,也可计算液滴/球壳的物理变化全过程。与过程相关的参

数(物性参数、操作参数、炉体的结构参数、假定参数)均可根据需要在运算界面上更改,这既增加了软件对不同炉体结构和气氛的适用性,也可模拟计算液滴法制备其它材料的空心微球的成球过程。从初步验证实验结果看,对制备薄壁 HGM 的成球过程的计算结果与实验结果基本一致,说明该软件可用于制备薄壁 HGM 的工艺条件的设计和选择。

参考文献:

- [1] 胡广才,李怀曾,魏胜,等. 玻璃微球壳生产工艺研究[J]. 强激光与粒子束,1995,7(2):183~188.
- [2] 邱龙会,傅依备,汪小琳,等. 液滴法制备高尺度比玻璃微球壳的研究[J]. 强激光与粒子束,1999,11(4):465~469.
- [3] 邱龙会,唐永建,傅依备,等. 神光 激光直接驱动聚变靶空心玻璃微球的研制[J]. 中国科学(A辑),2001,31(6):539~544.
- [4] Campbell JH, Grens JZ, Poco JF. Preparation and Properties of Hollow Glass Microspheres for Use in Laser Fusion Experiments:UCRL-53516[R]. California:Lawrence Livermore National Laboratory, 1983.
- [5] Masters K. Chemical and Process Engineering Series, Spray Drying[M]. London: Leonard Hill Books,1972. 279~291.
- [6] 邱龙会,魏芸,傅依备,等. 液滴法制备空心玻璃微球中初始液滴的定量形成[J]. 高校化学工程学报,2001,15(3):217~222.
- [7] 邱龙会,魏芸,唐永建,等. 液滴法制备空心玻璃微球的过程分析[J]. 原子能科学技术,2001,35(1):60~64.