

载气与玻璃微球间热传递系数的影响因素

漆小波,唐永建,李波,张占文,师涛

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心,四川 绵阳 621900)

摘要:为实现干凝胶法制备空心玻璃微球工艺中载气与微球间传热过程的有效控制,建立了载气与微球之间综合热传递系数的计算模型,研究了载气环境参数(组分、温度和压力)和微球几何参数(直径和壁厚)对热传递系数的影响。结果表明:在常用的工艺参数范围内,热传递系数对载气温度、压力以及微球壁厚的变化不敏感,但热传递系数随微球直径的增大显著降低、随载气中氦气含量的提高而显著增加,且这种递减趋势随载气中氦气含量的增加而趋于显著。

关键词:空心玻璃微球;热传递系数;载气;激光聚变靶丸

中图分类号: TL639. 11; TQ171

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2005)06-0535-05

Effect Factors of Heat Transfer Coefficient Between Hollow Glass Microsphere and Furnace Atmosphere

QI Xiao-bo, TANG Yong-jian, LI Bo, ZHANG Zhan-wen, SHI Tao

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

Abstract: In order to achieve an effective control of the heat transfer coefficient (h_q) between microsphere and furnace atmosphere in the fabrication of hollow glass microsphere by sol-gel technology, the effects of component percentage, temperature and total pressure of gas mixture on h_q are studied. Further, the influences of diameter and wall thickness of hollow glass microsphere on h_q are also investigated. The results show that in the range of component percentage, temperature and pressure of gas mixture commonly used in the fabrication of hollow glass microsphere by sol-gel technology, the temperature and total pressure of gas mixture and the wall thickness of hollow glass microsphere have little influence on h_q , but h_q significantly increases with the volume fraction of helium in the furnace atmosphere and significantly decreases with increasing of microsphere diameter.

Key words: hollow glass microsphere; heat transfer coefficient; furnace atmosphere; laser fusion target

在惯性约束聚变(ICF)实验研究中,空心玻璃微球(HGM)因其耐压强度高、气体渗透率

收稿日期:2004-12-21;修回日期:2005-02-03

作者简介:漆小波(1974—),男,重庆人,博士研究生,ICF靶制备专业

低、光学透明和相对较低的原子序数,是一种基础且重要的氘氚燃料容器^[1]。随着我国大功率激光驱动器的研制成功和 ICF 物理实验研究的深入,将来双壳层靶需要厚壁空心玻璃微球,现阶段的高能密度物理实验研究也需要高品质的厚壁空心玻璃微球,因此,研制厚壁(10~20 μm)空心玻璃微球已是刻不容缓的现实需要。相对于液滴法,干凝胶法需要较少的传质传热量,因此,干凝胶法适于制备厚壁空心玻璃微球^[2]。在干凝胶粒子的炉内成球过程中,有效控制粒子/微球和载气之间的传热速率以及总传热量是制备高品质空心玻璃微球的必要条件^[3,4],而粒子/微球与载气之间的热传递系数又是决定其传热速率和总传热量的关键参数。因此,研究粒子/微球和载气之间的热传递系数与各影响因素之间的定量关系,不仅是实现载气与粒子/微球之间传热速率和总传热量定量控制的理论基础,而且对各种制备工艺参数的选择也具有实践上的指导意义。

1 粒子/微球与载气间的热传递系数

根据热平衡关系,炉管内壁和载气与粒子/微球之间的热传递过程可表示为:

$$mc \frac{dT}{dt} = A_s h_q (T_g - T) + \sigma A_s \varepsilon (T_g^4 - T^4) \quad (1)$$

式中: m 、 c 、 A_s 、 T 分别为粒子/微球的质量、有效比热容、传热表面积和热力学温度; t 为时间; h_q 为炉内载气通过传导和对流向粒子/微球传热的综合热传递系数; T_g 为炉内载气温度; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数; ε 为粒子/微球对载气发射辐射的吸收系数。

Morrison^[5]的理论分析和实验结果均表明,由于载气通过辐射向粒子/微球传递的热量基本上可忽略,粒子/微球与载气之间的传热速率和总传热量由传导和对流综合传热过程控制,因此,粒子/微球与载气之间通过传导和对流传热的综合热传递系数 h_q 成为决定传热速率和总传热量的关键参数。鉴于此,获得 h_q 与各影响参数之间的定量关系是计算和控制载气与微球之间热传递系数的首要条件。

根据传热学原理,单个粒子/微球在载气中运动时 h_q 可通过努塞尔数 Nu 计算^[6]:

$$Nu = h_q L_d / \lambda_g \quad (2)$$

式中: L_d 为粒子/微球的努塞尔数特征尺寸; λ_g 为载气热传导系数。

大量实验结果^[6]表明,单个微球在载气中运动时与载气之间传导和对流综合过程的 Nu 可用下述经验回归式计算:

$$Nu = 2 + 0.6 (Re)^{1/2} (Pr)^{1/3} \quad (3)$$

式中: Re 为粒子/微球在载气中的运动雷诺数, $Re = \rho_g D u / \mu_g$,其中, ρ_g 为载气密度, D 为微球直径, u 为微球运动速度, μ_g 为载气粘度; Pr 为粒子/微球在载气中运动的普朗特数, $Pr = c_p \mu_g / \lambda_g$,其中, c_p 为载气比定压热容。

由于粒子进入炉内后升温很快(约为 3 000 $^{\circ}\text{C/s}$),相对于粒子/微球在炉内的停留时间和炉管热区长度,粒子受热发泡成为空心微球的时间较短,其所用的距离也有限,绝大部分时间内都以空心微球的终端速度匀速下落^[7],因此,特征尺寸 L_d 可取为微球直径 D 。同时,据液滴法制备空心玻璃微球过程的观察和过程模拟计算^[8,9],现阶段目标直径(200~500 μm)和壁厚(1~15 μm)的空心玻璃微球的终端运动速度小于 1.0 m/s ,其在载气中的运动处于滞流区,其终端运动速度可近似表达为:

$$V_t = \frac{g \rho_{\text{glass}} D t_w}{3 \mu_g} \quad (4)$$

式中: g 为重力加速度; ρ_{glass} 为玻璃的密度; t_w 为空心玻璃微球的壁厚。

因此,单个粒子/微球在载气中运动时的 h_q 可表示为:

$$h_q = \frac{\lambda_g}{D} \left[2 + 0.6 \left(\frac{g \rho_g \rho_{\text{glass}} D^2 t_w}{3 \mu_g} \right)^{1/2} \left(\frac{c_p \mu_g}{\lambda_g} \right)^{1/3} \right] \quad (5)$$

根据式(5), h_q 不仅与 D 、 t_w 和 ρ_{glass} 有关,还受 λ_g 、 μ_g 、 ρ_g 和 c_p 的影响。由于载气的物性直接由载气的组分、温度和压力决定,因此,研究载气的组分、温度和压力对载气物性的定量影响关系是计算和控制 h_q 的必要条件。

2 载气组分、温度和压力对 h_q 的影响

图 1 示出两种典型靶用空心玻璃微球在常用温度和压力范围内与不同组分载气间的 h_q 。可见,在可能选用的温度和压力范围内,同一玻璃微球与相同组分载气间的 h_q 差异很小,尤其

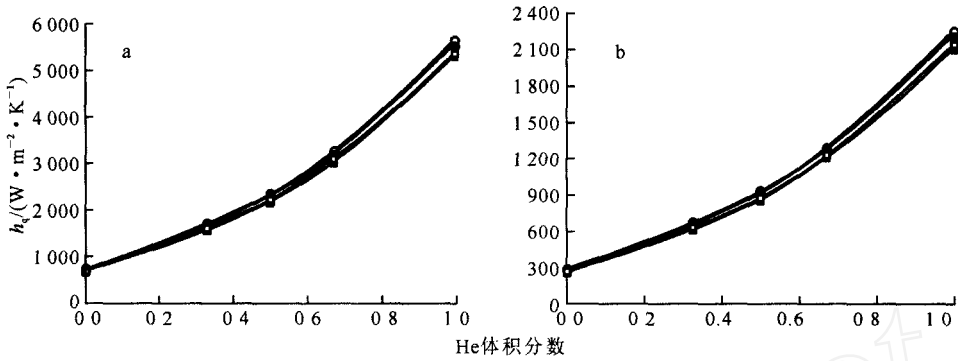


图1 不同载气组分、温度和压力下的 h_q

Fig.1 h_q of hollow glass microsphere under different composition gas mixture, different pressures and temperatures

a — $D=200\ \mu\text{m}$, $t_w=10\ \mu\text{m}$; b — $D=500\ \mu\text{m}$, $t_w=1\ \mu\text{m}$

□ — $1.01 \times 10^5\ \text{Pa}$, $1\ 500\ ^\circ\text{C}$; ○ — $1.01 \times 10^5\ \text{Pa}$, $1\ 650\ ^\circ\text{C}$; ■ — $0.4 \times 10^5\ \text{Pa}$, $1\ 500\ ^\circ\text{C}$; ● — $0.4 \times 10^5\ \text{Pa}$, $1\ 650\ ^\circ\text{C}$

是载气压力的变化对 h_q 基本上无影响。计算表明,在 $(0.40 \sim 1.01) \times 10^5\ \text{Pa}$ 的各种组分载气中,同一玻璃微球在 $1\ 500\ ^\circ\text{C}$ 载气环境下的 h_q 最大值仅比在 $1\ 650\ ^\circ\text{C}$ 下的 h_q 高 5.4% ;在 $1\ 500 \sim 1\ 650\ ^\circ\text{C}$ 的各种组分载气中,同一玻璃微球在 $0.4 \times 10^5\ \text{Pa}$ 载气环境下的 h_q 最大值仅比在 $1.01 \times 10^5\ \text{Pa}$ 下的 h_q 高 3.3% 。可见,本工作的计算结果与 Morrison^[5] 的实验结论是一致的。在 $(0.40 \sim 1.01) \times 10^5\ \text{Pa}$ 范围内,载气压力对气体与微球之间热传递系数和/或传热速率的影响很小,完全可忽略。但当载气压力降低到 $10\ \text{Pa}$ 以下时,载气与微球之间的对流传热和传导传热都急剧下降,以至于可忽略不计^[10]。

图1还表明,在相同的载气温度和压力下,载气组分对 h_q 有显著影响。计算表明,当 $p = 1.01 \times 10^5\ \text{Pa}$ 、 $t = 1\ 650\ ^\circ\text{C}$ 时,同一空心玻璃微球在 $n(\text{He})/n(\text{Ar}) = 4$ 载气环境下的 h_q 比 $n(\text{He})/n(\text{Ar}) = 1/4$ 时的 h_q 高 217.6% , $n(\text{He})/n(\text{Ar}) = 2$ 载气环境下的 h_q 是 $n(\text{He})/n(\text{Ar}) = 1/2$ 时 h_q 的 1.9 倍。这是由于氦气的导热系数约为相同条件下氩气的 8.2 倍。因此,随着载气中氦气含量的提高,载气的导热系数显著增加。由此可见, h_q 对载气中氦气的含量相当敏感,因此,通过调整载气中的氦气含量可定量控制 h_q 。

对比图1a和b可见,在相同的载气组分、温度和压力环境下,直径 $200\ \mu\text{m}$ 、壁厚 $10\ \mu\text{m}$ 的玻璃微球与载气之间的 h_q 是直径 $500\ \mu\text{m}$ 、壁

厚 $1\ \mu\text{m}$ 的玻璃微球与载气之间 h_q 的 2.5 倍。由此可见,玻璃微球的直径和壁厚也是 h_q 的重要影响因素。

3 微球直径和壁厚对 h_q 的影响

3.1 微球直径对 h_q 的影响

在相同温度和压力的载气环境下,不同直径玻璃微球与不同组分载气间的 h_q 示于图2。由图2可见,在相同载气环境下,随着玻璃微球直径增大,载气与微球间的 h_q 显著降低。计算表明,直径 $500\ \mu\text{m}$ 、壁厚 $1\ \mu\text{m}$ 的玻璃微球与载气间的 h_q 仅为直径 $100\ \mu\text{m}$ 、壁厚 $1\ \mu\text{m}$ 时 h_q 的 20.6% 。由此可见,制备大直径玻璃微球的难度显著大于小直径微球。

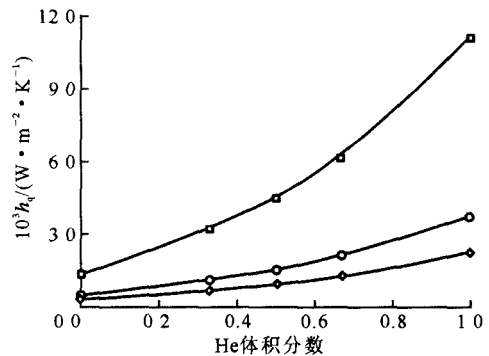


图2 不同微球直径下的 h_q

Fig.2 h_q under different HGM diameters

$D, \mu\text{m}$: ◇ — 500; ○ — 300; □ — 100

$p = 1.01 \times 10^5\ \text{Pa}$, $t = 1\ 650\ ^\circ\text{C}$, $t_w = 1\ \mu\text{m}$

图2还表明,载气中的氦气含量对载气与小直径玻璃微球间 h_q 的影响程度显著比大直径玻璃微球大。计算表明,当 $p = 1.01 \times 10^5$ Pa、 $t = 1650$ °C时,直径 $100\text{ }\mu\text{m}$ 、壁厚 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的玻璃微球与 $n(\text{He})/n(\text{Ar}) = 4$ 载气环境间的 h_q 比同一玻璃微球与 $n(\text{He})/n(\text{Ar}) = 1/4$ 载气环境间的 h_q 大 $5318\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$,而直径 $500\text{ }\mu\text{m}$ 、壁厚 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的玻璃微球与 $n(\text{He})/n(\text{Ar}) = 4$ 载气环境间的 h_q 仅比同一玻璃微球与 $n(\text{He})/n(\text{Ar}) = 1/4$ 载气环境间的 h_q 大 $1083\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

3.2 微球壁厚对 h_q 的影响

图3示出了相同温度和压力载气环境下不同壁厚玻璃微球与不同组分载气之间的 h_q 。由图3可见,在相同的载气环境下,微球壁厚对载气与玻璃微球之间 h_q 的影响完全可忽略。计算表明,在 $p = 1.01 \times 10^5$ Pa、 $t = 1650$ °C的 $n(\text{He})/n(\text{Ar}) = 2$ 载气环境下,对于直径 $500\text{ }\mu\text{m}$ 的玻璃微球,当壁厚从 $1\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $15\text{ }\mu\text{m}$ 时, h_q 仅增加了 $133\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$,其相对偏差仅为 9.5% 。

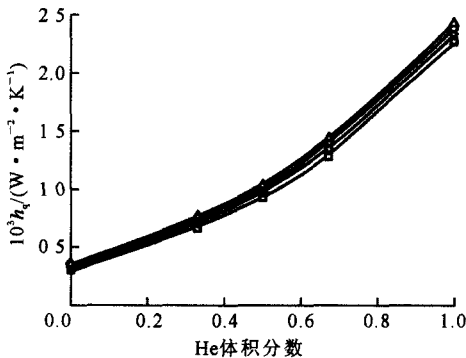


图3 不同微球壁厚下的 h_q

Fig. 3 h_q under different HGM wall thicknesses

$t_w, \mu\text{m}$: $\triangle$ —15; $\circ$ —10; $\diamond$ —5; $\square$ —1

$p = 1.01 \times 10^5$ Pa, $t = 1650$ °C, $D = 500\text{ }\mu\text{m}$

3.3 h_q 的控制

综上所述可知,载气温度、压力以及玻璃微球的壁厚对微球与载气之间 h_q 的影响相对很小,而微球与载气之间的 h_q 对载气组分和玻璃微球直径的变化非常敏感。因此,在制备一定直径的玻璃微球时,调整载气中氦气的含量可作为定量控制微球与载气之间的 h_q 的有效

方法。

为进一步比较载气中氦气含量对 h_q 的影响程度差异,图4示出了相同温度和压力条件下不同组分的载气对其与不同直径相同壁厚的玻璃微球之间 h_q 的影响趋势。由图4可见,在不同组分的载气环境下,随着微球直径的增大, h_q 有不同程度的降低,并且,递减趋势随着载气中氦气含量的降低而逐渐趋于平缓。在 $n(\text{He})/n(\text{Ar}) = 4$ 的载气环境中,直径为 100 和 $500\text{ }\mu\text{m}$ 时,其 h_q 相差 $6119\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$;而在 $n(\text{He})/n(\text{Ar}) = 1/4$ 的载气环境中,直径 100 和 $500\text{ }\mu\text{m}$ 时,他们的 h_q 仅相差 $1884\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 。可见,在制备小直径 ($< 500\text{ }\mu\text{m}$) 玻璃微球时,增加载气中氦气的含量可显著提高 h_q ,但在制备大直径 ($> 500\text{ }\mu\text{m}$) 玻璃微球时,载气中氦气含量的增加对提高 h_q 的效果不明显。

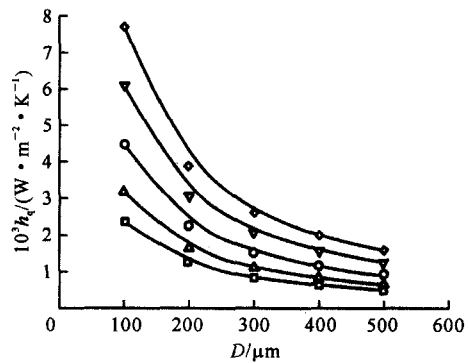


图4 不同载气组分下微球直径对 h_q 的影响

Fig. 4 Effect of HGM diameters on h_q

under different composition gas mixture

$n(\text{He})/n(\text{Ar})$: $\diamond$ —4; $\square$ —2;

$\circ$ —1; $\triangle$ —1/2; $\square$ —1/4

$p = 1.01 \times 10^5$ Pa, $t = 1650$ °C, $t_w = 1\text{ }\mu\text{m}$

在干凝胶法制备空心玻璃微球过程中的常用工艺参数范围内, h_q 基本上不受载气温度和压力的影响,但载气组分可作为控制 h_q 的有效途径。由于载气组分可在从纯氦气到纯氮气的宽广范围内选择,所以, h_q 和传热速率皆能在较大范围内变化。同时,由于载气组分、温度和压力对微球在炉内的飞行速度和停留时间无明显影响^[11],因此,可根据目标玻璃微球的直径和壁厚估算出其发泡、成球所需的传热速率和总热量,通过调整载气中的氦气含量和传热推动

力 ΔT 来定量控制其所需的传热速率和总热量。

需说明的是:在相同传热动力 $\Delta T (\Delta T = T_g - T)$ 和载气环境下,小直径玻璃微球与载气间的热传递系数虽明显高于大直径玻璃微球与载气间的热传递系数,但这并不表明,小直径微球与载气间具有比大直径微球更大的传热速率。根据式(1),热传递系数仅表示通过传导和对流传热的热流密度,而传热速率 $q (q = A_s h_q \cdot (T_g - T))$ 则不仅受热流密度的影响,还与传热面积大小和传热动力有关。

4 结论

通过研究载气环境参数(组分、温度和压力)和玻璃微球直径及壁厚对微球与载气之间热传递系数的影响,可得到如下结论:

1) 在用干凝胶法制备空心玻璃微球工艺常用的载气组分(He 和 Ar 体积比分别为 3 : 1、2 : 1、1 : 1、1 : 2、1 : 3)、温度(1 500 ~ 1 650 °C)和压力($(0.4 \sim 1.01) \times 10^5$ Pa)范围内,载气温度和压力以及微球壁厚对 h_q 的影响均可忽略,而 h_q 对载气组分和微球直径的变化敏感,因此,在制备一定直径的玻璃微球时,调整载气中的氦气含量可作为定量控制 h_q 的有效途径;

2) 增加载气中的氦气含量可提高 h_q , h_q 随微球直径的增大而显著降低,但这种递减的趋势随载气中氦气含量的降低而逐渐趋于平缓,因此,在制备小直径($< 500 \mu\text{m}$)玻璃微球时,增加载气中氦气的含量可显著提高 h_q ,但在制备大直径($> 500 \mu\text{m}$)玻璃微球时,载气中氦气含量的增加对提高 h_q 的效果不明显。

参考文献:

- [1] 唐永建. 激光惯性约束聚变靶技术研究[J]. 核物理动态, 1995, 12(4): 50~53.
Tang Yongjian. Investigation on Inertial Confinement Fusion (ICF) Target[J]. Trends in Nuclear Physics, 1995, 12(4): 50~53 (in Chinese).
- [2] Downs RL, Ebner MA, Miller WJ. Hollow Glass Microsphere by Sol-Gel Technology [A]. Sol-Gel Technology for Thin Films, Fibers, Pre-

forms, Electronic, and Specialty Shapes [C]. Park Ridge: Noyes Publications, 1988. 335~340.

- [3] Dorogotovtsev VM, Akunets AA. Influence of the Properties of the Furnace Atmosphere on Microsphere Quality[J]. Fusion Technology, 1997, 31: 411~417.
- [4] Downs RL, Ebner MA, Nolen RL. Glass Shell Manufacturing in Space: Final Report[R]. Michigan: KMS Fusion, 1981.
- [5] Morrison RL. Furnace Physics as Applied to Inertial Confinement Fusion Target Microsphere Production [R]. Livermore, California: Lawrence Livermore National Laboratory, 1980.
- [6] Masters K. Spray Drying: An Introduction to Principles Operational Practice and Applications [M]. London: Leonard Hill Books, 1972. 285~287.
- [7] Nolen RL, Ebner MA, Downs RL. Glass Shell Manufacturing in Space: Semiannual Report [R]. Michigan: KMS Fusion, 1980.
- [8] Campbell JH, Grens JZ, Poco JF. Preparation and Properties of Hollow Microspheres for Use in Laser Fusion Experiments [R]. Livermore, California: Lawrence Livermore National Laboratory, 1983.
- [9] 邱龙会, 傅依备, 魏芸, 等. 液滴法制备空心玻璃微球的模拟计算[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(3): 397~402.
Qiu Longhui, Fu Yibei, Wei Yun, et al. Mathematic Simulation of the Physical Process to Fabricate Hollow Glass Microspheres by Liquid Droplet Method [J]. Higher Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(3): 397~402 (in Chinese).
- [10] Dushman S. Scientific Foundations of Vacuum Technique [M]. New York: John Wiley & Sons, 1962. 107~109.
- [11] 漆小波, 李波, 唐永建, 等. 载气环境对液态空心玻璃微球运动状态的影响[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(4): 547~551.
Qi Xiaobo, Li Bo, Tang Yongjian, et al. Influence of Furnace Atmosphere Properties on the Kinetic Behaviors of Liquid Hollow Glass Microsphere [J]. Higher Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(4): 547~551 (in Chinese).