

DOI: 10.7652/xjtuxb201911011

冷冻靶黑腔氦气充注过程数值模拟与分析

郭富城, 李翠, 陈洵, 厉彦忠

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 基于 Hagen-Poiseuille 公式、耦合气体增压微分方程及气体状态方程, 采用 Matlab 编程的形式建立了黑腔内部气体增压物理模型, 针对冷冻靶黑腔氦气增压问题进行了数值模拟与分析。结果表明: 在氦气充注过程中采用连续流体模型计算即可满足精度要求; 毛细管的通流能力对腔内压力及温升影响剧烈, 在氦气初始温度相同的情况下, 毛细管通流能力越大, 氦气充注速率越大, 但同时腔内气体温升较高; 设置冷壁制冷变功率策略后, 随着冷壁最大制冷功率增加, 充气速率降低, 腔内温升降低, 冷壁最大制冷功率提高 0.5 mW, 腔内最大温升下降约 13 K; 氦气的初始温度对充注过程有较大影响, 氦气初始温度降低 1 K, 充气时间减少约 0.6 s, 腔内气体最大温升降低约 0.1 K。所提出的方法可推广至靶内燃料气体充注及腔内抽空流洗情形, 从而可为解决腔内气体充注问题提供一种有效便捷的数值模拟方法。

关键词: 氦气增压; 毛细管; Hagen-Poiseuille 公式; 数值模拟

中图分类号: TB651 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)11-0079-07

Numerical Simulation and Analysis of Helium Filling Process in Cryogenic Target Hohlraum

GUO Fucheng, LI Cui, CHEN Xun, LI Yanzhong

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Coupled with gas-pressure differential equation and gas-state equation, a Hagen-Poiseuille formula-based gas-charging physical model of the hohlraum is established by Matlab. Numerical simulation and analysis are carried out on the helium pressurization in the inertial confinement nuclear fusion process. The results show that the continuous fluid model in the helium filling process can meet the calculation accuracy requirements. The capillary flow capacity has great influence on the pressure and temperature rise in the hohlraum. When the initial temperature of helium is the same, as the capillary flow capacity increases, the gas filling rate is increased. Meanwhile, the gas temperature is raised in the hohlraum. After setting the cold-wall variable power strategy, as the maximum cooling power of the cold wall increases, the filling rate and the temperature in the hohlraum are decreased. Once the maximum cooling power of the cold wall goes up about 0.5 mW, the maximum temperature rise in the hohlraum is decreased by 13 K. In addition, the initial temperature of helium has also great influence on the filling process, namely, as the initial temperature of helium is decreased by 1 K, the filling time will be decreased by about 0.6 s, and the maximum temperature rise in the hohlraum is decreased by about 0.1 K.

收稿日期: 2019-05-07。 作者简介: 郭富城(1995—), 男, 硕士生; 李翠(通信作者), 女, 博士, 讲师。 基金项目: 国家重大专项资助项目; 国家自然科学基金资助项目(51506158)。

网络出版时间: 2019-08-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190812.1055.010.html>

This method could be applied to the fuel gas filling of the capsule and intracavity evacuation, providing an effective and convenient numerical simulation method for intracavity gas filling.

Keywords: helium pressurization; capillary; Hagen-Poiseuille formula; numerical simulation

随着惯性约束核聚变的发展,我国在相关技术的很多方面已经取得了突破,然而在燃料气体充注及冰层制备等方面仍存在问题亟需解决^[1-5]。在制靶过程中,需要将低压腔内的氦气增压至高压,以满足打靶需求^[6]。在增压过程中,既要满足一定的温度要求,防止在充气过程中靶内冰层融化,又要节约时间成本,在可以接受的时间内完成增压工作。为了解决以上问题,需要开展惯性约束核聚变过程中氦气增压过程的机理性研究。

Poiseuille 等提出了 Hagen-Poiseuille 公式,为公式法解决毛细管内流动问题开创了先河,其具体形式^[7]为

$$Q = \frac{\pi(P_0 - P_L)R^4}{8\mu L} \quad (1)$$

式中: Q 为毛细管入口处气体的体积流率; P_0 、 P_L 分别为毛细管入口、出口的压力; R 为毛细管半径; μ 为运动黏度; L 为毛细管长度。

Prud 等通过摄动分析法对毛细管内层流流动的 Hagen-Poiseuille 公式进行修正,考虑了流体可压缩性的影响,发现修正后的 Hagen-Poiseuille 公式在流体雷诺数 Re 小于 1 000 时,计算结果与实验值的偏差在 5% 以内^[8]。之后,Tison 在文献^[9]中针对腔体缝隙泄漏问题,对 Hagen-Poiseuille 公式进行了改进,使其在计算大压差驱动工况下微细通道内的流动情形时具有更高的精度。Bhandarkar 等在美国国家点火装置项目中针对腔内氦气充注抽空问题进行了实验研究,发现在氦气充注阶段,改进后的 Hagen-Poiseuille 公式计算结果与实验数据相差极小,但在氦气抽空终了阶段二者出现了较大差异^[10]。

目前,有关毛细管内流体流动过程的模拟主要集中在多相流动及有限压差驱动方面,针对毛细管内大压差驱动流动的研究甚少。美国科学家在国家点火装置项目中对氦气充注问题主要采用的仍是自编程序计算^[10-11],且其已发表的文献中并未涉及温度变化。本文在前人研究的基础上,考虑了温度变化对充气过程的影响,基于 Hagen-Poiseuille 公式,耦合气体增压微分方程及气体状态方程,建立了氦气充注模型。相较于商用 CFD 软件计算,此法计算时间成本低廉,计算结果相对可靠,可为实验提供一定

的技术指导。

1 模型建立

1.1 物理模型

本文主要模拟氦气通过毛细管充注进入冷冻靶黑腔内部时腔内的增压及温升过程,其物理模型如图 1 所示。腔体的内径 $D=2.6$ mm,高度 $H=5$ mm,腔体外部冷壁(图 1 中剖面部分)为腔体提供一定的制冷功率。腔体底部开设有内径为 d 的圆孔,外连长度为 L 、内径为 d 的毛细管。毛细管壁面绝热,其另一端连接气源。

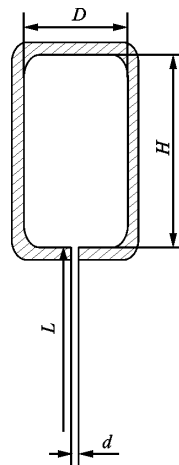


图 1 腔体内部气体增压物理模型

1.2 数学模型

1.2.1 毛细管计算模型 本文用自编程的方式对腔体内部的压力和温度变化进行模拟,使用 Hagen-Poiseuille 公式对毛细管内流体流动参数进行计算。修正后毛细管入口处气体体积流率的表达式^[10]为

$$Q = \frac{\pi(P_0 - P_L)R^4}{8\mu L} \left[1 - \frac{1}{2}\varepsilon - 0.029\kappa\varepsilon\beta + 0.029\kappa\varepsilon^2\beta + \left(\frac{2}{3} + 0.0023\kappa^2 \right) \varepsilon^2\beta^2 \right] \quad (2)$$

式中: $\beta=R/L$; $\varepsilon=(P_0 - P_L)/P_L$; $\kappa=R^3\rho_0(P_0 - P_L)/L\mu^2$; ρ_0 为毛细管入口处气体密度。

文献^[10]通过实验对式(2)进行了验证,结果表明在 100 Pa~70 kPa 的压力区间内,式(2)具有较高的计算精度。

对于体积为 V 的腔体而言,在气体温度为 T 时,充气过程中腔内气体压力 P 与体积流率 Q 之间

的关系可近似表示为^[12]

$$\frac{dP}{dt} = \frac{PQ}{V} \quad (3)$$

模型中能量输入为充注气体所携带的焓,能量输出为冷壁提供的制冷功率。在每一个离散时间步长内,气体自身携带进入系统的能量与冷壁带出的能量之差即为腔内所有气体的焓变化量。腔内氦气的温度 T 主要由腔内气体的焓 h 与腔内气体的密度 ρ 所决定,即气体状态方程^[13]为

$$T = f(h, \rho) \quad (4)$$

1.2.2 速度滑移模型 本文中气体充注初始阶段气体流态为滑移流($0.01 < Kn < 0.1$)。为探究充气初始阶段对整个充气过程的影响,本文对毛细管内壁面处流体流动计算采用速度滑移边界进行修正。

在毛细管内壁面处,流体与壁面之间存在滑移速度,即

$$u|_{r=R} = u_s \quad (5)$$

式中壁面滑移速度 u_s 可以通过下式求得^[14]

$$u_s = u(1 - f_s/2) \quad (6)$$

滑移流理论认为,有一部分流体分子在壁面处与壁面作镜面反射,即该部分流体分子与壁面不发生动量传递;另一部分流体分子与壁面之间作漫反射,该部分流体分子与壁面之间产生动量传递,定义作漫反射的流体分子的百分数为 f_s ^[15],本文计算时取 $f_s = 0.43$ ^[16]。

文献[10]得出采用速度滑移模型后的毛细管入口处气体体积流率为

$$Q_s = Q \left[1 + 4 \left(\frac{2}{f_s} - 1 \right) \right] \frac{\lambda}{R} \quad (7)$$

式中: λ 为分子自由程,计算公式^[17]为

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi d_m^2 P} \quad (8)$$

其中 k_B 为玻尔兹曼常数, d_m 为气体分子直径。

定义典型工况如下:毛细管长度为 400 mm、内径为 0.1 mm,毛细管入口处为 70 kPa、300 K 的氦气气源,腔内气体初始压力为 100 Pa、温度为 18.5 K,冷壁无制冷功率。分别采用速度滑移-连续流体模型与连续流体模型对充气过程中气体的压力及温度进行计算,结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出,在充气至 5.7 s 时, Kn 已降至 0.01,即从滑移区进入到连续流体区。整体而言,与连续流体模型相比,速度滑移-连续流体模型计算所得的气体压力与温度都有所降低,但由于滑移区所占比例很低,两种模型计算差异很小,可以认

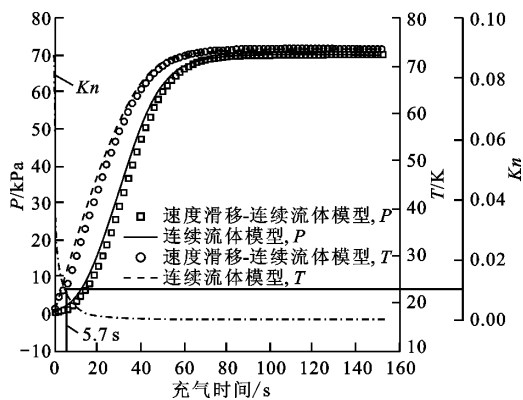


图 2 两种模型对充气过程中气体压力及温度的计算结果

为在整个充气阶段均采用连续流体模型亦可得出较为准确的结果。

1.2.3 复合管路计算模型 对于两根长度、内径均不同的均直毛细管耦合形成的复合管路,在已知进出口压差时,某一段均直管路上的压差^[10]为

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_2 &= \frac{x R_1^4 \Delta P}{R_2^4 + x R_1^4} \\ x &= \frac{L_2}{L_1} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

对于圆锥形管路,在计算时常常将其等效为均直管路,等效半径^[10]为

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{eff}} &= R_0 \left(\frac{3\alpha^3}{1 + \alpha + \alpha^2} \right)^{0.25} \\ \alpha &= \frac{R_L}{R_0} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

2 结果与分析

2.1 毛细管通流能力对腔内气体的影响

2.1.1 毛细管长度的影响 取毛细管长度分别为 50、100、200、400、600 mm,冷壁的制冷功率恒定为 2 mW,其余条件同典型工况。充气过程中不同毛细管长度下腔内气体压力和温度的变化曲线分别如图 3、图 4 所示。

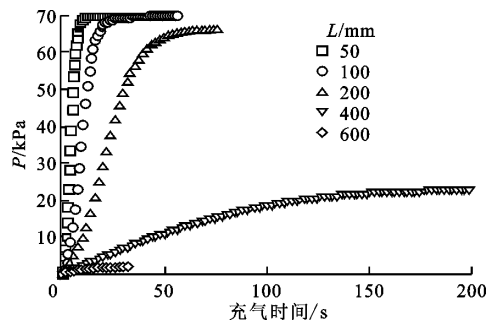


图 3 不同毛细管长度下腔内气体压力变化曲线

从图 3、图 4 可以看出,在毛细管内径一定的情况下,毛细管长度越长,通流能力越差,充气速率越

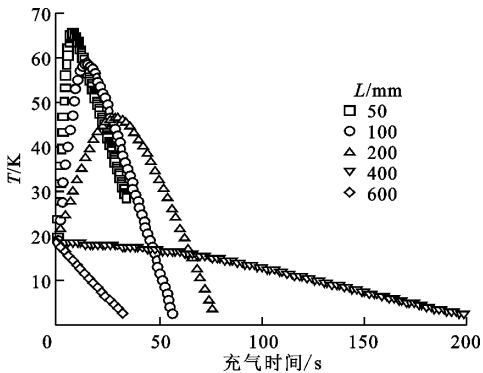


图 4 不同毛细管长度下腔内气体温度变化曲线

慢,腔内气体温升也越小。压力曲线基本呈倒“S”形,即压力曲线最大斜率出现在充注过程中段。这是由于腔内初始温度较低,高温气体注入腔内后温度急剧降低,体积变化剧烈,注入气体对腔内气体的增压效果有限;待到充气中段,腔内气体温度较高,此时注入气体对腔内增压效果明显。温度曲线基本呈“几”字形分布,初始阶段气体注入量最大,热冲击亦最大,冷壁制冷功率有限,腔内气体温度上升;待腔内压力逐渐升高后,气体流率降低,同时热冲击降低,腔内气体温度下降;当毛细管长度过大时,流动阻力过大,气体注入量过小,初始阶段腔内气体温度可能不升反降,若注入气体量进一步减小,或制冷功率进一步增大,甚至可能出现腔内压力不升反降的趋势。

2.1.2 毛细管内径的影响 取毛细管内径分别为 0.100、0.125、0.150 及 0.175 mm,冷壁制冷功率恒定 2 mW,其他条件同典型工况。充气过程中不同毛细管内径下腔内气体压力和温度变化曲线分别如图 5、图 6 所示。

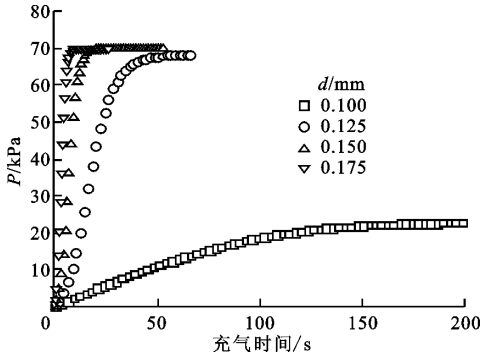


图 5 不同毛细管内径下腔内气体压力变化曲线

从图 5、图 6 可以看出,在毛细管长度一定的情况下,随着毛细管内径变大,通流能力增强,充气速率增大,腔内气体平均温升提高。压力曲线与温度曲线的基本趋势没有较大变化,对比 2.1.1 小节可

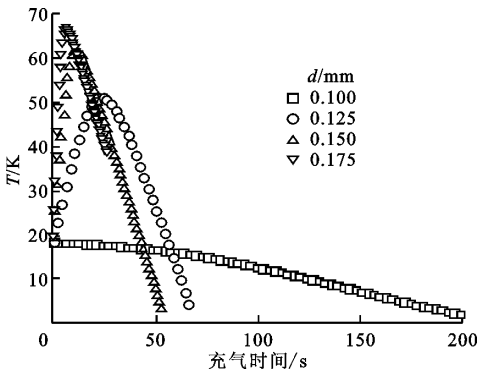


图 6 不同毛细管内径下腔内气体温度变化曲线

以看出,压力或温度变化对毛细管内径变化的敏感程度要高于对毛细管长度的变化。

2.1.3 复合管路 2.1.1 和 2.1.2 小节研究的毛细管路均为均直圆管,本小节对复合式管路进行探究。本文研究 4 组复合管路,其形式如图 7 所示,具体规格如下。

管路 I:内径为 0.15 mm、长度为 400 mm 的均直圆管。

管路 II:前半段内径为 0.15 mm、长度为 200 mm 的均直圆管;后半段出口内径为 0.1 mm、长度为 200 mm 的圆锥管。

管路 III:入口内径为 0.15 mm、出口内径为 0.1 mm、长度为 400 mm 的圆锥管。

管路 IV:内径为 0.1 mm、长度为 400 mm 的均直圆管。

毛细管管路形式如图 7 所示,冷壁制冷功率恒定 2 mW,其他条件同典型工况。充气过程中复合管路腔内气体压力和温度变化曲线分别如图 8、图 9 所示。

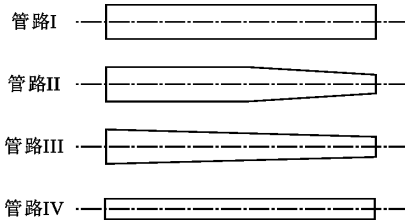


图 7 4 组复合管路的形式

在复合管路总长度不变的情况下,其影响可以看作是毛细管内径变化的影响。由图 8 和图 9 可以看出,随着复合管路等效内径增大,腔内增压速率增大,腔内气体温升增大。

毛细管规格对腔内增压速率和气体平均温度的影响本质上是毛细管的通流能力对两者的影响,即通流能力越强,腔内增压速率越大,气体平均温升也

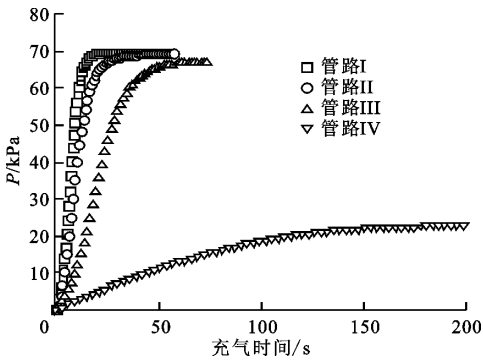


图 8 复合管路腔内气体压力变化曲线

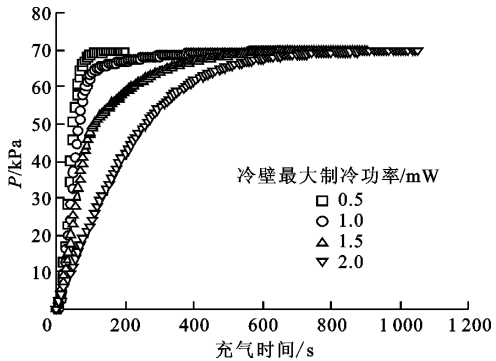


图 10 不同冷壁最大制冷功率下腔内气体压力变化曲线

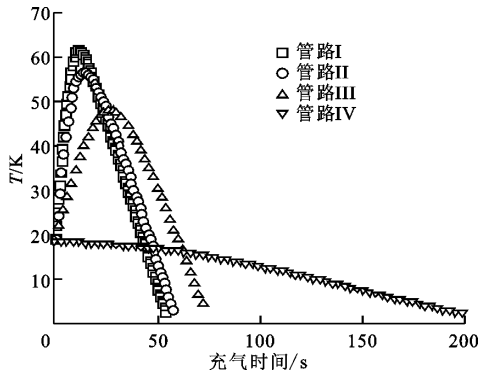


图 9 复合管路腔内气体温度变化曲线

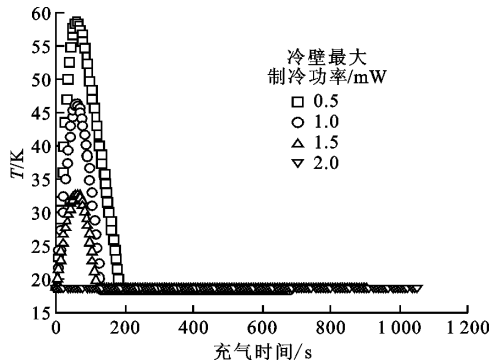


图 11 不同冷壁最大制冷功率下腔内气体温度变化曲线

越大。分析式(1)得到,毛细管的通流能力正比于 R^4/L ,即毛细管内径越大,长度越短,通流能力越强,并且毛细管内径的影响程度要远大于毛细管长度。在实际的工程应用中,往往不希望腔内气体最高温度过大,同时应尽量节约时间成本。基于以上研究,均直毛细管内径过大会使腔内承受较大的温度冲击,减小毛细管内径虽然会避免温度冲击,但是增加了时间成本,且考虑到加工难度和堵管的影响,较细的均直毛细管应用价值不大。与较粗均直管路相比,II型和III型管路形式使得腔内有较小的温度冲击,而且不会有较细均直毛细管时间成本过大、加工困难、较易堵管的问题,因此具有较高的应用价值。

2.2 充气过程工艺参数对腔内气体的影响

2.2.1 冷壁制冷变功率工况模拟 2.1节中的冷壁均为恒定制冷功率,实际操作中冷壁制冷功率以腔内温度为目标参数进行调控。冷壁制冷功率变化策略为:当热负荷大于最大制冷功率时,冷壁满功率运行;当热负荷小于最大制冷功率时,冷壁以保持腔内温度为18.5 K为目标运行。毛细管参数及其他条件同2.1节。取冷壁最大制冷功率分别为0.5、1.0、1.5和2.0 mW,冷冻靶黑腔内气体压力和温度变化曲线分别如图10、图11所示。

从图10可以看出,随着冷壁最大制冷功率的增

加,气体充注时间同样增加,同时充气过程中腔内最高气温有所降低,且冷壁最大制冷功率提高0.5 mW,腔内最大温升下降约13 K。这是由于在冷壁最大制冷功率较高时,高温氦气在腔内可以迅速冷却,气体体积收缩剧烈,从而使得气体对腔内的增压效果不明显,充气时间延长。图11中不同工况下腔内气体温度出现峰值的时刻随着冷壁最大制冷功率的增大而稍后移,冷壁最大制冷功率0.5、1.0与2.0 mW对应的峰值时刻分别为57.0、57.6和61.6 s。这是由于随着冷壁最大制冷功率的提升,其耐受充气热负荷的能力越强,故达到耐受临界的时刻延后。在冷壁最大制冷功率为2 mW时,冷壁功率始终大于充气热负荷,腔内气体未出现峰值。

2.2.2 氦气初始温度的影响 前文中氦气初始温度均为300 K,为了减小腔内气体在充气过程中的温升,可以在气源处对氦气进行预冷。本节模拟了氦气初始温度分别为50、100、200和300 K时,腔内气体压力和温度的变化情况,冷壁制冷功率恒定为1 mW,其余条件同2.1节,冷冻靶黑腔内气体压力和温度的变化曲线分别如图12、图13所示。

由图12可以看出,氦气初始温度越高,气体充注速率越低,充气时间越长。与冷环功率的影响规律类似,较低的氦气温度即较低的充气热负荷,在充

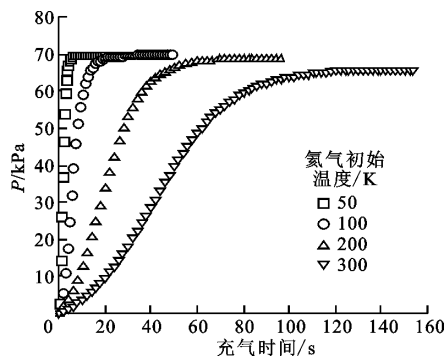


图 12 不同氦气初始温度下腔内气体压力变化曲线

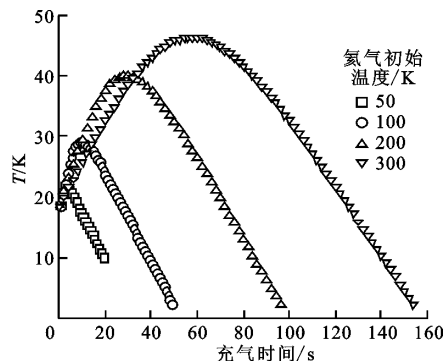


图 13 不同氦气初始温度下腔内气体温度变化曲线

气时气体体积变化程度较小,对腔内的增压效果明显,充气速率较高。同样地,如图 13 所示,较小的充气热负荷对黑腔的温度冲击也较小,腔内气体温升较小。

图 14 给出了充气时间和腔内最高温度与氦气初始温度的关系。从图中可以发现,充气时间和腔内最高温度与氦气初始温度基本成正比例变化,氦气初始温度降低 1 K,充气时间减少约 0.6 s,腔内气体最大温升降低约 0.1 K。

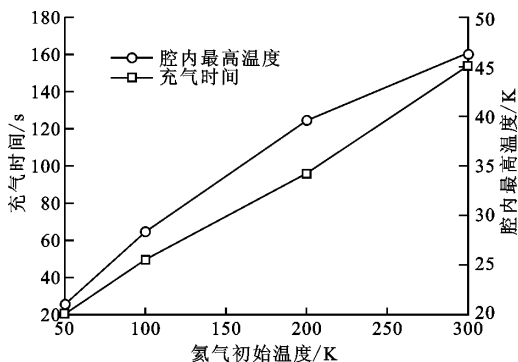


图 14 充气时间和腔内最高温度与氦气初始温度的关系

3 结 论

基于 Hagen-Poiseuille 公式,本文通过 Matlab

编程的方式,模拟了氦气通过毛细管充注进入腔体内部时腔内气体的增压及温升过程,得出以下结论。

(1)在氦气充气过程中,对采用速度滑移-连续流体模型的计算结果与采用连续流体模型的计算结果进行对比,发现两者差别很小,说明采用连续流体模型计算即可满足精度要求。

(2)毛细管的通流能力对腔内压力及温升影响剧烈。相同情况下,毛细管通流能力越大,即等效半径越大,毛细管长度越短,氦气充注速率越大,但同时腔内气体温升较高。结合实用价值分析,可采取管路 II 或管路 III 的布置形式优化充气过程。

(3)设置冷壁制冷变功率策略后,计算结果更符合实际过程,且随着冷壁最大制冷功率增大,充气速率降低,腔内温升降低,冷壁最大制冷功率提高 0.5 mW,腔内最大温升下降约 13 K。

(4)氦气的初始温度对充注过程有较大影响。氦气初始温度降低 1 K,充气时间减少约 0.6 s,腔内气体最大温升降低约 0.1 K。由此可见,氦气的预冷是氦气充注优化过程的关键所在。

参考文献:

- [1] EBEY P S, DOLE J M, GELLER D A, et al. Overview of recent tritium target filling, layering, and material testing at Los Alamos National Laboratory in support of inertial fusion experiments [J]. Fusion Science & Technology, 2008, 54(2): 375-378.
 - [2] DEWALD D L, LANDEN O L. Radiation-driven hydrodynamics of long pulse hohlraums on the National Ignition Facility [J]. Physical Review Letters, 2005, 95(21): 215004.
 - [3] KOZIOZIEMSKI B J, MAPOLES E R, SATER J D, et al. Deuterium-tritium fuel layer formation for the national ignition facility [J]. Fusion Science and Technology, 2011, 59(1): 14-25.
 - [4] SHULDBERG C M, SCHOFF M E, XU H, et al. Gas retention in multilayer alternate ablator capsules [J]. Fusion Science and Technology, 2016, 70(2): 164-172.
 - [5] 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.

(下转第 90 页)