

Numerically Investigating Influence of Different Steam Source Parameters on Charging Process of Marine Steam Accumulator

Lianwei Wu¹, Yuanlong Yang^{2*}

¹Navy Military Delegate Room of Wuhan 701 Research Institute, Wuhan

²China Ship Development and Design Center, Wuhan

Email: long31609@163.com

Received: Sep. 5th, 2014; revised: Oct. 1st, 2014; accepted: Oct. 7th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Two-fluid model and thermal change model with considerations of evaporation and condensation for vapor and liquid were utilized. Based on the coupled boundary conditions with different charging flow rates and temperatures, numerical investigation on the influence of different steam source parameters on charging process of marine steam accumulator was carried out. Effects of different charging flow rates and temperatures on the dynamic characteristics of charging process for steam accumulator were analyzed. The calculated results showed that higher charging temperature resulted in higher temperature for steam in an accumulator in the term of certain charging energy per unit time, causing nonuniform temperature and flow field. Lower charging flow rate could cause stronger steam jet.

Keywords

Marine Steam Accumulator, Charging Process, Steam Source Parameter, Numerical Simulation

不同汽源参数对船用蒸汽蓄热器充汽过程影响的数值研究

吴廉巍¹, 杨元龙^{2*}

*通讯作者。

¹海军驻武汉701所军事代表室, 武汉

²中国舰船研究设计中心, 武汉

Email: long31609@163.com

收稿日期: 2014年9月5日; 修回日期: 2014年10月1日; 录用日期: 2014年10月7日

摘 要

采用考虑汽液两相蒸发与冷凝的两流体模型和热相变模型, 基于不同充汽流量和温度耦合的边界条件, 进行了不同汽源参数下船用蒸汽蓄热器充汽过程数值模拟, 分析了不同充汽流量和温度对蒸汽蓄热器充汽过程动态特性的影响。计算结果表明, 充热能量一定条件下, 充汽温度越高, 蓄热器内部蒸汽温度越高, 温度场和速度场分布越不均匀; 充汽流量降低, 蒸汽射流效应更加强烈。

关键词

船用蒸汽蓄热器, 充汽过程, 汽源参数, 数值研究

1. 引言

船用蒸汽蓄热器是极短时间内为瞬时效耗汽量极大的蒸汽用户提供高温高压过热蒸汽的热力设备[1]。蒸汽蓄热器充汽系统具有充汽时间短, 瞬时充汽量大, 充汽参数协控复杂的特点[2], 而充汽流量和温度是影响船用蒸汽蓄热器供汽品质的关键指标, 因此研究不同汽源参数对船用蒸汽蓄热器充汽过程的影响对保证船舶蒸汽动力系统性能匹配具有重要意义。

由于实际船用蒸汽蓄热器充汽系统的特殊性和复杂性, 与公开报道的研究对象有本质区别[3]-[5]。鉴于此, 本文以船用蒸汽蓄热器为研究对象, 采用数值模拟研究了不同汽源参数对船用蒸汽蓄热器充汽过程动态特性的影响, 得到流速、压力、温度等关键热工水力参数的动态分布规律。为船用蒸汽蓄热器的安全控制和运行提供技术参考。

2. 几何模型及网格划分

蒸汽蓄热器筒体直径为 0.8 m, 长度为 2 m; 入口采用集管分配充汽, 集管上开孔均布 4 行, 每行开 24 个进汽孔, 进汽孔直径为 0.012 m; 出口位于上筒体中点处, 出口直径为 0.08 m, 高度为 0.25 m。蓄热器几何模型如图 1 所示。如图 2 所示, 采用非结构化网格方式进行蒸汽蓄热器的网格划分, 充汽集管、筒壁处网格进行局部加密处理。基于网格敏感性分析确认计算域共计 350,000 个单元, 扩展率、倾斜度、扭曲度达到标准。

3. 数学模型

液相连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \mathbf{U}_l) = -m_{vl} \quad (1)$$

汽相连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \mathbf{U}_v) = m_{vl} \quad (2)$$

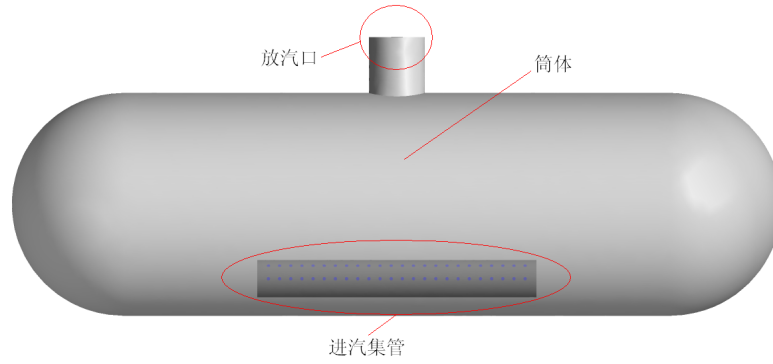


Figure 1. Physical model of steam accumulator

图 1. 蒸汽蓄热器物理模型

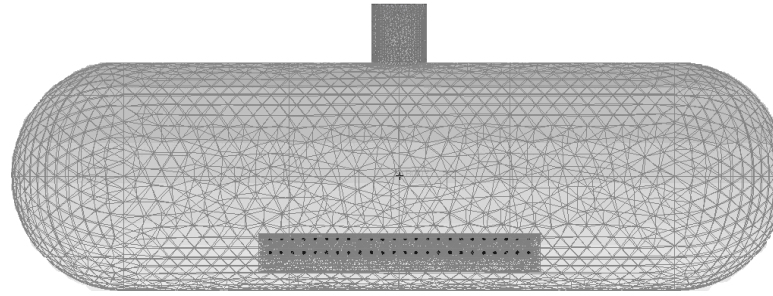


Figure 2. Grid model

图 2. 网格模型

液相动量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l \mathbf{U}_l) + \nabla \cdot \left(\alpha_l \left(\rho_l \mathbf{U}_l \mathbf{U}_l - \mu_l^e \left(\nabla \mathbf{U}_l + (\nabla \mathbf{U}_l)^T \right) \right) \right) \\ & = \alpha_l (\rho_l \mathbf{g} - \nabla p_l) + \mathbf{F}_{lv} - m_{vl} \mathbf{U}_l \end{aligned} \quad (3)$$

汽相动量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v \mathbf{U}_v) + \nabla \cdot \left(\alpha_v \left(\rho_v \mathbf{U}_v \mathbf{U}_v - \mu_v^e \left(\nabla \mathbf{U}_v + (\nabla \mathbf{U}_v)^T \right) \right) \right) \\ & = \alpha_v (\rho_v \mathbf{g} - \nabla p_v) + \mathbf{F}_{vl} + m_{vl} \mathbf{U}_v \end{aligned} \quad (4)$$

液相能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l h_l) + \nabla \cdot \left(\alpha_l \left(\rho_l \mathbf{U}_l h_l - \lambda_l^e \nabla T_l \right) \right) = Q_l \quad (5)$$

汽相能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v h_v) + \nabla \cdot \left(\alpha_v \left(\rho_v \mathbf{U}_v h_v - \lambda_v^e \nabla T_v \right) \right) = Q_v \quad (6)$$

式中, α 为体积分数; ρ 为密度, 单位为 kg/m^3 ; $\mathbf{U}$ 为流速, 单位为 m/s ; m 为质量传递率, 单位为 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; t 为时间, 单位为 s ; μ^e 为动力粘度, 单位为 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; $\mathbf{g}$ 为重力加速度, 单位为 m/s^2 ; p 为压力, 单位为 Pa ; $\mathbf{F}$ 汽液相间作用力, 单位为 N ; h 为比焓, 单位为 kJ/kg ; λ^e 为导热系数, 单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T 为温度, 单位为 K ; Q 为汽液相间总热量传递率, 单位为 $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; 下角标 l 、 v 和 vl 分别代表液相、汽相和从液相到汽相。

通过相界面传递的总热量分别为:

$$Q_l = q_l - m_{vl} h_{ls} = k_l A_{vl} (T_s - T_l) - m_{vl} h_{ls} \quad (7)$$

$$Q_v = q_v + m_{vl} h_{vs} = k_v A_{vl} (T_s - T_v) + m_{vl} h_{vs} \quad (8)$$

式中, q 为显热传递率, 单位为 $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; k 为汽、液相与相界面的对流传热系数, 单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A 为界面面积浓度, 单位为 $1/\text{m}$; T_s 为饱和温度, 单位为 K ; h_{ls} 为液相饱和焓, 单位为 kJ/kg ; h_{vs} 为液相饱和焓, 单位为 kJ/kg 。

根据相界面热量平衡 $Q_l + Q_v = 0$, 知:

$$m_{vl} = \frac{k_l A_{vl} (T_l - T_s) + k_v A_{vl} (T_v - T_s)}{h_{vs} - h_{ls}} \quad (9)$$

因此, 汽液相变潜热为:

$$L = h_{vs} - h_{ls} \quad (10)$$

式中, L 为汽化潜热, 单位为 kJ/kg 。

在实际的相变过程中, 对流换热系数 k_l 、 k_v 采用 Hughmark 关系式计算对流传热系数。汽液两相间作用力 F 通过 Ishii-Zuber 模型计算[6] [7]。

4. 计算边界条件

蒸汽蓄热器初始水位为 300 mm, 初始压力为 0.2 MPa, 充汽时间 70 s。为研究不同汽源参数对蒸汽蓄热器充汽过程的影响, 选用两种典型充汽参数工况: A. 充汽流量为 0.3 kg/s, 充汽温度为 195℃; B. 充汽流量为 0.275 kg/s, 充汽温度为 305℃。

5. 蓄热器充汽过程数值模拟

5.1. 温度场动态特性

图 3 描述了 A、B 工况下蒸汽蓄热器内部蒸汽温度随充汽时间的变化规律。从图中可以看出, 在 10 s 内 A、B 工况下蓄热器蒸汽温度均呈现急剧升高的变化规律, 这主要是由于在 10 s 内充汽压力高于蒸汽蓄热器初始压力, 两者压差大, 蒸汽流速高, 导致大部分过热蒸汽没有与饱和水充分换热而以未凝结汽态形式直接进入汽空间, 促使蒸汽温度快速升高。在充汽 10 s 后, 一方面, 蓄热器内部压力增大, 充汽压差减小, 充汽速率降低, 导致少部分过热蒸汽充入汽空间; 另一方面, 汽空间少部分蒸汽冷凝成饱和

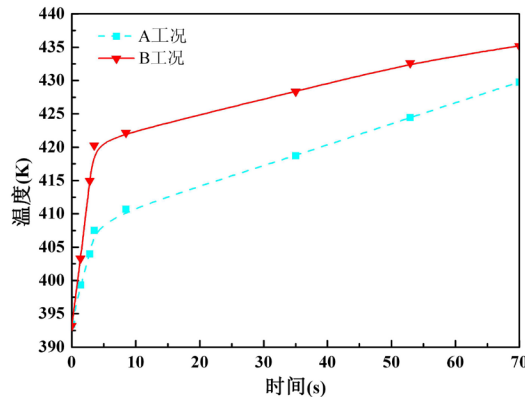


Figure 3. Temperature curves of steam accumulator
图 3. 蒸汽蓄热器温度随时间变化规律

水, 释放能量, 促使蒸汽温度降低, 从而导致汽空间蒸汽温度缓慢升高。数值模拟得到温度变化规律与文献[2]计算结果吻合较好。

通过 A、B 工况下蒸汽蓄热器蒸汽温度分布规律的对比可知, B 工况充汽流量低, 但充汽温度远大于 A 工况的充汽温度, 使得充入汽空间能量更高, 导致蒸汽温度高于 A 工况蒸汽温度。通过图 4~7 的对比, 验证了图 3 中的计算结果。因此在单位充汽时间内充汽能量一定条件下, 充汽温度对汽空间蒸汽品质影响大于充汽流量, 对蒸汽品质起主导影响作用。

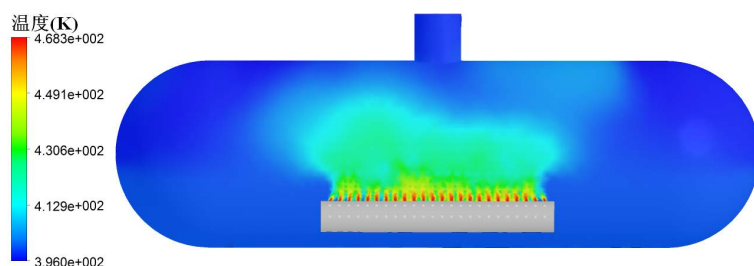


Figure 4. Steam temperature contours at 2 s at the case of A
图 4. A 工况下 $t = 2$ s 蒸汽温度分布云图

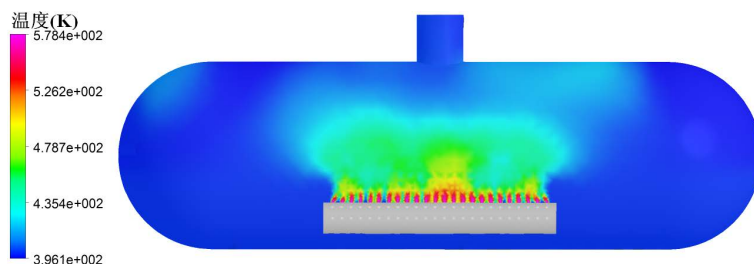


Figure 5. Steam temperature contours at 2 s at the case of B
图 5. B 工况下 $t = 2$ s 蒸汽温度分布云图

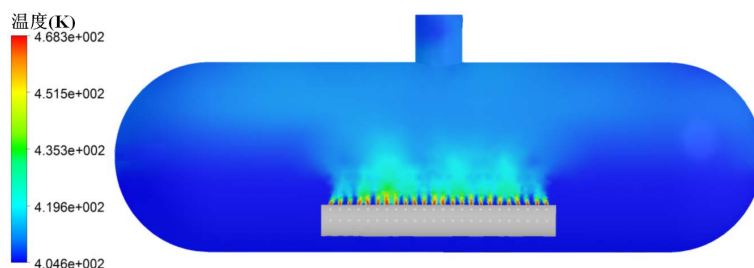


Figure 6. Steam temperature contours at 10 s at the case of A
图 6. A 工况下 $t = 10$ s 蒸汽温度分布云图

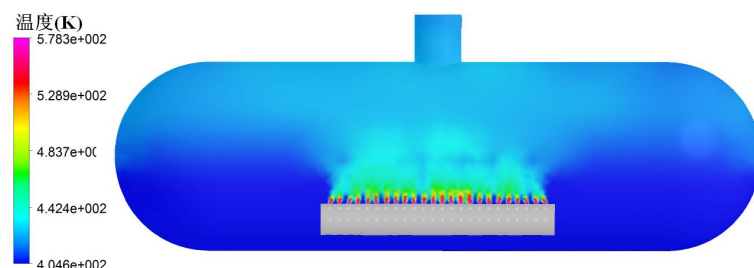


Figure 7. Steam temperature contours at 10 s at the case of B
图 7. B 工况下 $t = 10$ s 蒸汽温度分布云图

5.2. 流场动态特性

通过 A、B 工况下 $t = 5\text{ s}$ 时(图 8 和图 9)蓄热器内部蒸汽流速分布云图对比可知, B 工况下充汽流速高于 A 工况下的流速。究其原因主要是 B 工况下充汽流量略小于 A 工况, 但过热蒸汽温度远高于 A 工况下蒸汽温度, 促使 B 工况下充入的过热蒸汽密度较小, 产生射流效应更强烈, 最终导致 B 工况充汽流速更高。

从图 10 和图 11 可以看出, A、B 工况下蓄热器水位大致相同, 因此单位充汽时间内充汽能量一定, 不同汽源参数对蒸汽蓄热器水位影响较小。

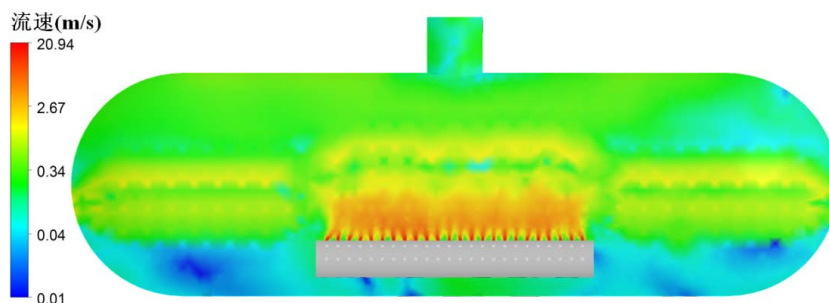


Figure 8. Velocity contours at 5 s at the case of A

图 8. A 工况下 $t = 5\text{ s}$ 流速分布云图

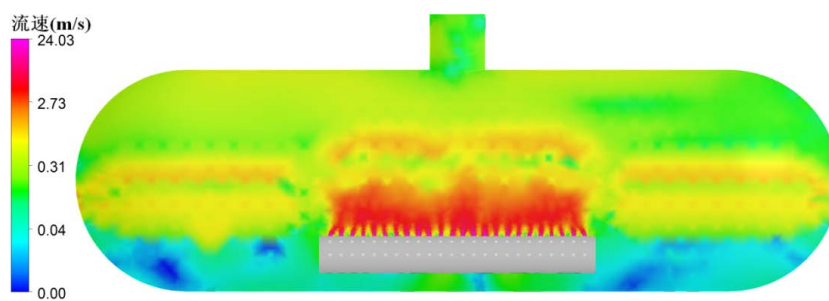


Figure 9. Velocity contours at 5 s at the case of B

图 9. B 工况下 $t = 5\text{ s}$ 流速分布云图

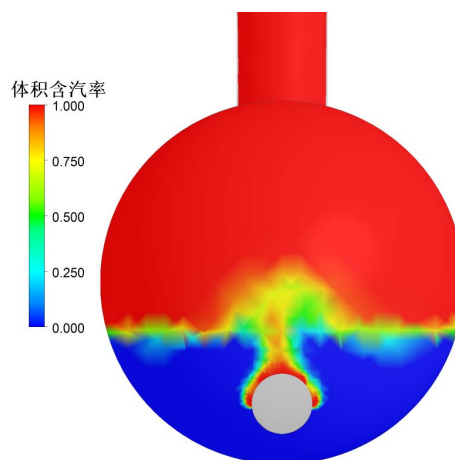


Figure 10. Void fraction contours at 5 s at the case of A

图 10. A 工况下 $t = 5\text{ s}$ 体积含汽率分布云图

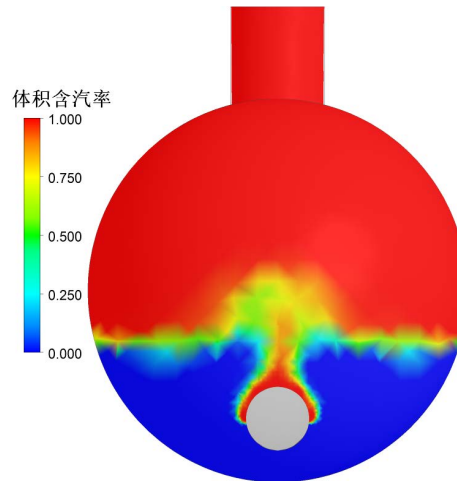


Figure 11. Void fraction contours at 5 s at the case of B

图 11. B 工况下 $t = 5$ s 体积含汽率分布云图

6. 结论

本文采用考虑汽液两相蒸发与冷凝的两流体模型和热相变模型，基于不同充汽流量和温度耦合的边界条件，进行了不同汽源参数下船用蒸汽蓄热器充汽过程数值模拟，分析了不同充汽流量和温度对蒸汽蓄热器充汽过程动态性能的影响规律。模拟结果表明，充热能量一定条件下，充汽温度越高，蓄热器内部蒸汽温度越高，温度场和速度场分布越不均匀；充汽流量降低，蒸汽射流效应更加强烈。

参考文献 (References)

- [1] 胡继敏, 金家善, 严志腾 (2012) 汽源参数变化对储汽筒充汽系统变工况性能的影响. *海军工程大学学报*, **5**, 102-107.
- [2] 孙宝芝, 郭家敏, 雷雨 (2013) 船用蒸汽蓄热器非平衡热力过程. *化工学报*, **S1**, 59-65.
- [3] 胡继敏, 金家善, 严志腾 (2012) 储汽筒充汽系统的热力过程建模与仿真. *上海交通大学学报*, **4**, 545-549.
- [4] 胡继敏, 金家善, 严志腾 (2012) 船用蒸汽蓄热器快速充汽过程吸热特性的测量方法研究. *船舶工程*, **S2**, 55-59.
- [5] Vladimir, D.S., Blazenka, M. and Sanja, P. (2012) Dynamics of steam accumulation. *Applied Thermal Engineering*, **37**, 73-79.
- [6] Yang, Y.L., Sun, B.Z. and Li, Y.J. (2013) CFD investigation of thermal-hydraulic characteristics for a steam generator with and without tube support plates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, **31**, 358-365.
- [7] Sun, B.Z. and Yang, Y.L. (2013) Numerically investigating the influence of tube support plates on thermal-hydraulic characteristics in a steam generator. *Applied Thermal Engineering*, **51**, 611-622.