

# The Numerical Study of the Throttle Coil Location Effects on Steam Dryer Working Performance

Zhenyu Xun<sup>1</sup>, Lin Cai<sup>2</sup>, Dongmin Liu<sup>2</sup>, Aili Tuo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Navy Military Delegate Room of Dalian Ship Building Industry Company, Dalian

<sup>2</sup>China Ship Development and Design Center, Wuhan

Email: cailin03313@163.com

Received: Jun. 6<sup>th</sup>, 2013; revised: Jun. 19<sup>th</sup>, 2013; accepted: Jun. 24<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Zhenyu Xun et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** This paper investigates the flow field of a steam dryer and the effects of throttle coil location on dryer working performance. The results show that the ratio of superheated steam to saturated steam is the key factor. As the steam consumption of downstream users decreases, the outlet superheat degree increases. There is a critical value of downstream users steam consumption, when the consumption is lower than critical value, the superheat degree is zero. For the various flow pattern in the various simulated conditions of this paper, the distance between throttle coil and superheat steam pipe centerline is increased from 40 mm to 300 mm, and the critical value of consumption increases by 21.23%.

**Keywords:** Throttle Coil; Steam Dryer; Water Vapor; CFD

## 节流圈位置对蒸汽干燥器工作性能的影响研究

旬振宇<sup>1</sup>, 蔡林<sup>2</sup>, 刘东民<sup>2</sup>, 度艾莉<sup>2</sup>

<sup>1</sup>海军驻大连船舶重工集团有限公司军事代表室, 大连

<sup>2</sup>中国舰船研究设计中心, 武汉

Email: cailin03313@163.com

收稿日期: 2013年6月6日; 修回日期: 2013年6月19日; 录用日期: 2013年6月24日

**摘要:** 本文利用 CFD 方法分析了蒸汽干燥器内流场特性, 并讨论了饱和蒸汽管路节流圈位置对蒸汽干燥器工作性能的影响。结果表明, 过热蒸汽和饱和蒸汽流量比是影响干燥器出口蒸汽干度的重要因素, 随着下游用户蒸汽耗量的增加, 过热蒸汽与饱和蒸汽流量比和出口过热度增大, 干燥器存在临界用户耗气量, 当下游用户耗气量低于临界流量后, 干燥器出口蒸汽干度为 0。节流圈位置对干燥器工作性能的影响不可忽略, 在本文模拟的工况下, 节流圈与过热蒸汽管路中心线距离由 40 mm 增大到 300 mm 后, 干燥器的临界用户耗气量增大了 21.23%。

**关键词:** 节流圈; 干燥器; 水蒸汽; CFD

### 1. 引言

在蒸汽动力系统中, 动力辅机是蒸汽动力系统的重要组成部分, 一般采用饱和蒸汽作为动力辅机的工作蒸汽, 当汽轮机输送管路较长时, 管路压力损失、

温度损失较大, 采用饱和蒸汽会使得进入动力辅机的工作蒸汽湿度增加, 大大降低其做功能力, 而且湿度较大的工作蒸汽会加剧汽轮机末级叶片的磨蚀<sup>[1,2]</sup>。为解决上述问题, 工程中常采用具有一定过热度的微

过热蒸汽作为动力辅机的工作蒸汽。产生微过热蒸汽的装置称为蒸汽干燥器或微过热蒸汽发生器，其实现途径有多种方式，如利用燃料燃烧释放的热能加热饱和蒸汽<sup>[3]</sup>。本文研究的蒸汽干燥器工作机理是饱和蒸汽通过节流降压后与一定流量的过热蒸汽掺混，再经过压力调节阀调节至设计压力。其核心部件为三通管，由于饱和蒸汽压力高于过热蒸汽压力，需要对饱和蒸汽进行降压节流。本文利用 FLUENT 软件求解了干燥器内三通内部管流场，并分析了节流圈位置变化及典型结构形式对干燥器工作性能的影响，为节流圈设计及布局提供理论基础。

## 2. 计算域网格划分及边界条件

本文模拟的蒸汽干燥器工作原理如图 1 所示，饱和蒸汽和过热蒸汽分别被节流后在三通管内混合，饱和蒸汽进口参数记为下标“1”，过热蒸汽进口参数记为下标“2”，混合后蒸汽参数记为下标“j”，混合蒸汽经过调压阀后达到下游用户需求压力，参数记为下标“3”。符号 P、T、m、h 分别代表压力、温度、流量、比焓。

对于本文模拟的干燥器而言，出口蒸汽的过热度即 T<sub>3</sub> 是一个重要指标。假设压力调节阀调压前后焓

值不变，则有：

$$h_j = h_3 \quad (1)$$

假设饱和蒸汽和过热蒸汽掺混过程绝热，则有：

$$h_j = (m_1 \times h_1 + m_2 \times h_2) / (m_1 + m_2) \quad (2)$$

假设过热蒸汽流量比饱和蒸汽流量为 x，则有

$$h_3 = \frac{xh_1 + h_2}{1 + x} \quad (3)$$

蒸汽出口压力 P<sub>3</sub> 由调压阀控制是已知量，则由 P<sub>3</sub>、h<sub>3</sub> 及水蒸气热力性质可以求出蒸汽出口温度 T<sub>3</sub>。可见，影响干燥器出口温度的最重要参数是过热蒸汽和饱和蒸汽流量比 x，而 x 由三通管内流场特性决定，本文借助 CFD 软件 FLUENT 求解三通管内蒸汽掺混流场，求得不同工况下 x 值，并进一步研究饱和蒸汽节流圈位置对 T<sub>3</sub> 的影响规律。

采用 ICEM 划分干燥器计算域网格，全场采用六面体网格类型，对节流圈附近进行网格加密，全场共划分 22 万网格。进口采用压力进口，给定进口总温、总压，出口采用压力出口，给定出口压力 P<sub>j</sub>，壁面做绝热无滑移假设。由于整个蒸汽流场为饱和蒸汽和过热蒸汽的掺混，不会发生相变，对水蒸气做理想气体假设<sup>[4,5]</sup>，其比热按照真实物性进行拟合<sup>[6]</sup>(见图 2)。

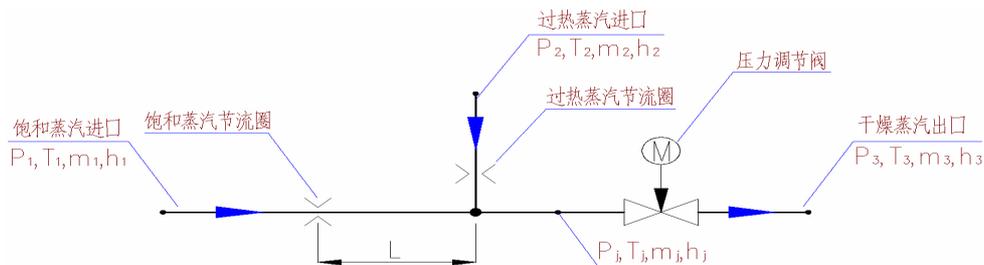


Figure 1. The schematic diagram of steam dryer  
图 1. 干燥器工作原理图

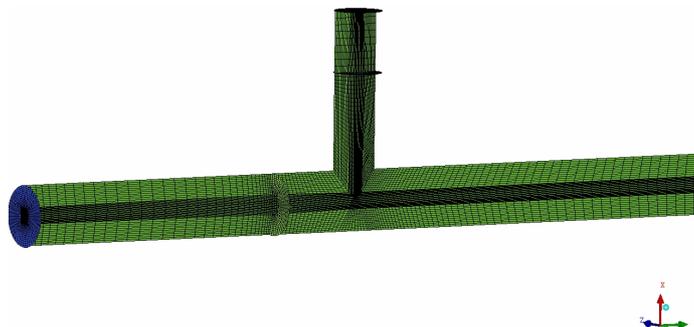


Figure 2. The mesh of steam dryer calculation field  
图 2. 干燥器计算域网格图

### 3. 计算结果及分析

#### 3.1. 用户蒸汽需求量对出口温度的影响

干燥器的蒸汽产量是由下游用户在不同工况下的需求来决定。图 3 给出了  $L = 100 \text{ mm}$  时, 不同出口流量下的过热蒸汽与饱和蒸汽流量比值( $x$ ), 可以看出随着  $m_3$  的增大,  $x$  值逐渐增大, 即出口温度  $T_3$  逐渐增高。当  $m_3 = 1.128 \text{ kg/s}$  时,  $x$  等于 0, 此时的  $m_3$  值就是干燥器的临界工作流量, 记为  $m_3^*$ , 如果下游用户的耗气量小于  $m_3^*$ , 则过热蒸汽不能流入干燥器内, 干燥器起不到干燥作用。图 4 给出了随着  $m_3$  变化时与出口温度对应关系, 当  $m_3$  由临界流量  $1.128 \text{ kg/s}$  增大到  $2.76 \text{ kg/s}$  时, 出口过热度由 0 增大到了 70 摄氏度。根据上面的分析可知, 在进行干燥器结构尺寸设计时, 要首先考虑下游用户蒸汽耗量, 如果下游用户蒸汽耗量小于  $m_3^*$ , 则需要重新设计干燥器结构尺寸。

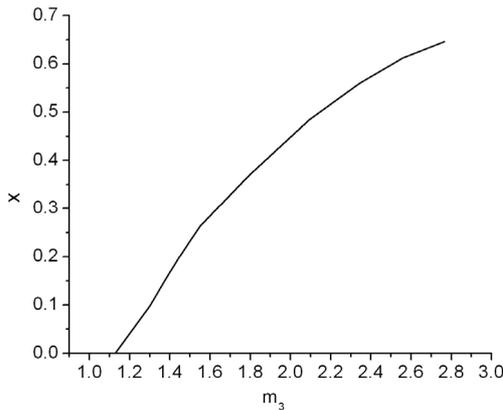


Figure 3. The distribution of  $x$  against  $m_3$   
图 3. 下游用户蒸汽耗量与蒸汽掺混比例  $x$  关系

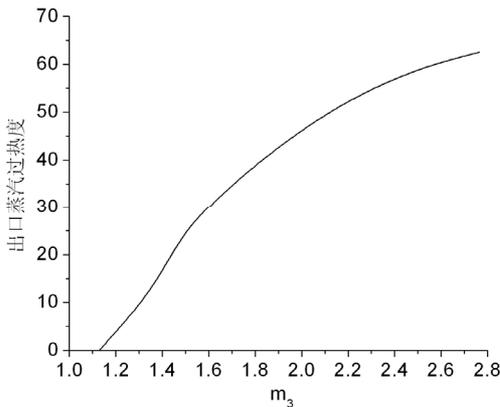


Figure 4. The distribution of outlet temperature against  $m_3$   
图 4. 下游用户蒸汽耗量与干燥器出口温度关系

#### 3.2. 节流圈位置对出口温度的影响

当干燥器的结构尺寸确定后, 饱和蒸汽节流圈的位置将成为影响其工作性能的重要因素。假设节流圈距离过热蒸汽管路中心线的距离为  $L$ , 其变化范围为  $100 \text{ mm} \sim 40 \text{ mm}$ 。图 5 给出了不同  $L$  下出口过热度变化关系( $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_j$  保持不变), 可以看出, 随着  $L$  的增大, 出口过热度逐渐下降, 即干燥器的干燥能力变差, 当  $L$  由  $40 \text{ mm}$  增大到  $300 \text{ mm}$  后, 出口过热度由  $49.0$  摄氏度下降到  $38.7$  摄氏度, 下降了  $21\%$ 。图 6 给出了不同  $L$  值下  $m_3^*$  变化, 随着  $L$  的增大,  $m_3^*$  逐渐增大, 这意味着随着  $L$  的增大干燥器的工作适应范围减少, 当  $L$  由  $40 \text{ mm}$  增大到  $300 \text{ mm}$  后,  $m_3^*$  增大了  $21.23\%$ , 可见节流圈对干燥器的性能影响不可忽略, 而且离过热蒸汽端进口越近越好。

图 7~9 给出了中心线上马赫数、压力、温度的分布规律, 饱和蒸汽流入节流圈后, 出现速度突增, 在本文模拟的工况下马赫数在节流圈内达到最大值  $0.4$ 。

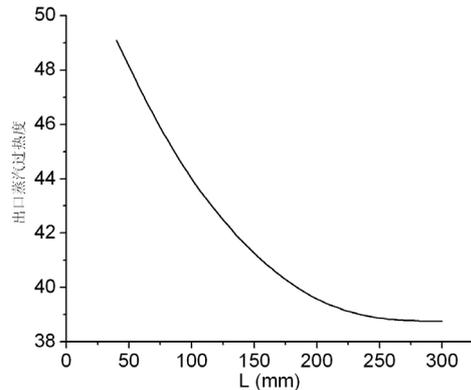


Figure 5. The distribution of outlet temperature against  $L$   
图 5. 节流圈位置对出口蒸汽温度影响规律

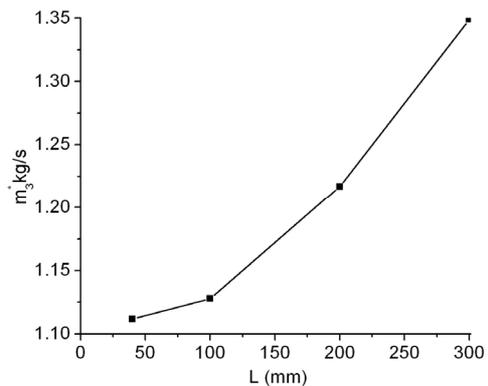


Figure 6. The distribution of  $m_3^*$  against  $L$   
图 6. 节流圈位置对临界工作流量影响规律

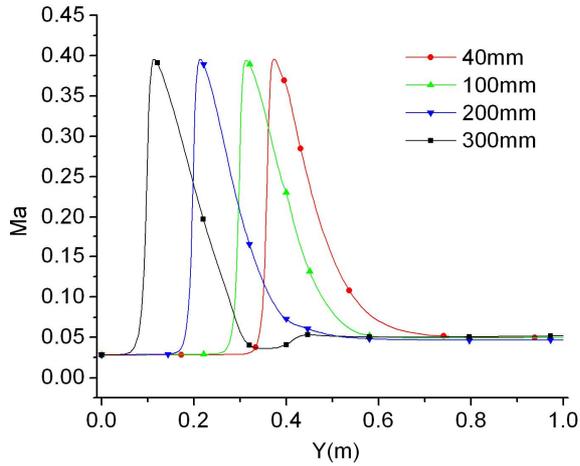


Figure 7. The mach number distribution at different L  
图 7. 不同节流圈位置对中心线马赫数分布的影响

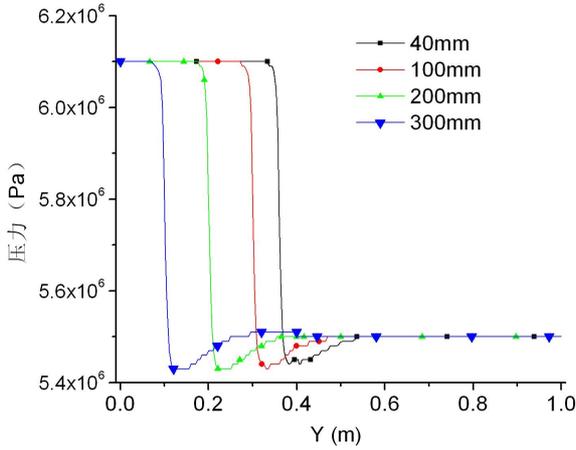


Figure 8. The static pressure distribution at different L  
图 8. 不同节流圈位置对中心线静压分布的影响

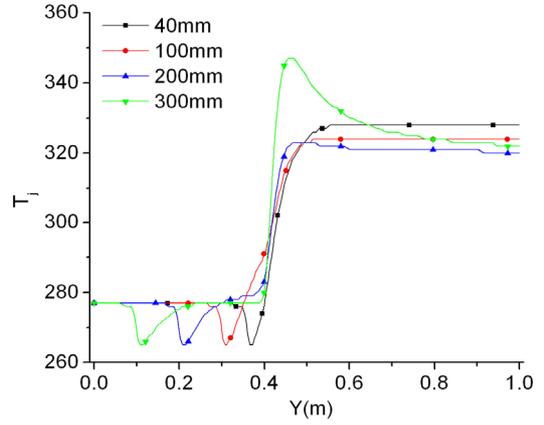


Figure 9. The static temperature distribution at different L  
图 9. 不同节流圈位置对中心线温度分布的影响

饱和蒸汽经过节流圈的作用，压力降低，此压力低于过热蒸汽进口压力，因此过热蒸汽会流入干燥器并与饱和蒸汽掺混，当饱和蒸汽通过节流圈后，由于节流圈前后管径相同，流体静压会得到一定的恢复，因此节流圈如果离过热端过远，会降低同工况下过热蒸汽掺混流量，这就是减少 L 值可以增大干燥器的出口流量范围的原因。饱和蒸汽经过节流圈后静温有所下降，与过热蒸汽掺混后，其温度进一步升高。图 10 给出了干燥器外壁面温度分布，可以看出在出口管道上出现了温度分布梯度。因此，在结构设计时，应重点考虑出口管路上的热应力分布和热变形。饱和蒸汽经过节流圈后发生强烈的扰动并产生漩涡，此外过热蒸汽流入干燥器后在出口管路上亦产生漩涡，如图 11

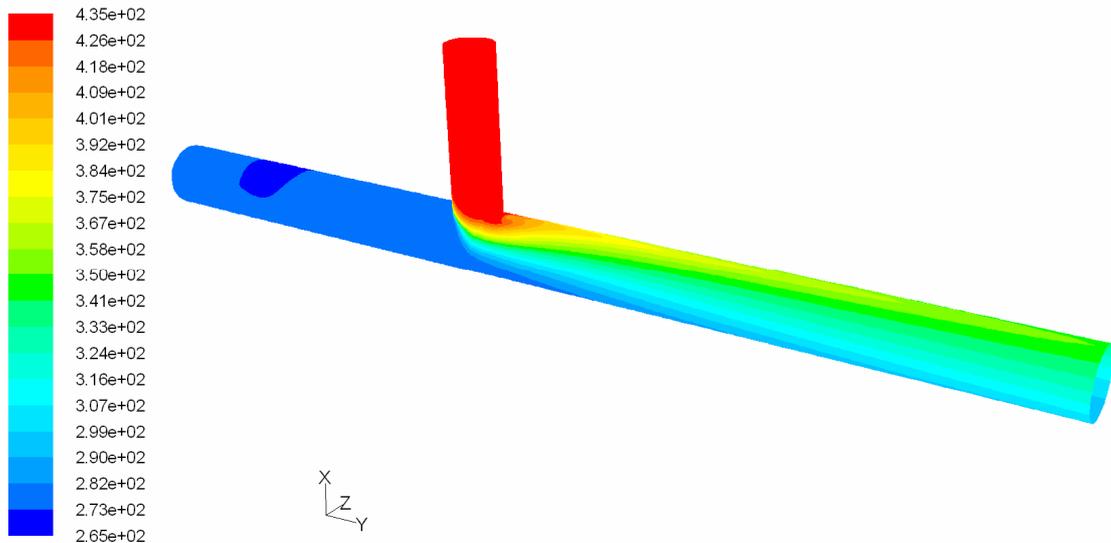


Figure 10. The temperature contour of outside wall  
图 10. 干燥器外壁面温度分布

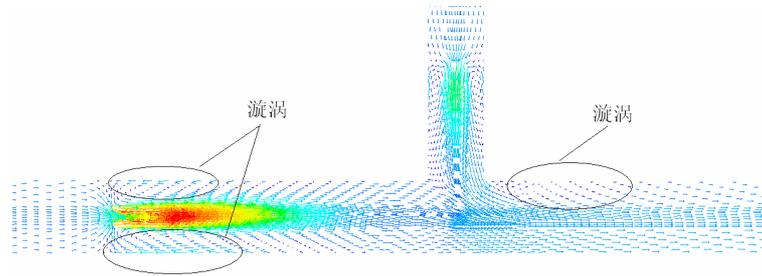


Figure 11. The velocity vector distribution at middle plane  
图 11. 干燥器中间截面速度矢量分布

所示，节流圈出口半径范围内蒸汽速度较高，压力较低，形成射流，带动周围工质反向流动并形成漩涡，蒸汽经过节流圈后，是一个复杂的物理过程，漩涡的产生会带粘性耗散，产生热能。

#### 4. 总结

本文利用 CFD 方法分析了某型蒸汽干燥器内流场特性，并讨论了饱和蒸汽节流圈位置对干燥器工作性能的影响，总结如下：

1) 干燥器存在临界工作流量，当下游用户的耗气量小于临界流量，干燥器出口温度为对应压力下的饱和蒸汽温度，起不到干燥作用。

2) 对于本文模拟的工况，饱和蒸汽节流圈距离掺

混点越近，干燥器临界流量越小，工作范围越大。

#### 参考文献 (References)

- [1] 蔡颐年. 蒸汽轮机[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [2] 黄树红. 汽轮机原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [3] 张广卿. 油田专用微过热蒸汽发生器[J]. 油气田地面工程, 2012, 31(5): 86-87.
- [4] C. Lin, H. Miao. A numerical study on the supersonic steam ejector use in steam turbine system. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013: Article ID 651483.
- [5] T. Sriveerakul, S. Aphornratana and K. Chunnanond. Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 1. Validation of the CFD results. International Journal of Thermal Sciences, 2007, 46(8): 812-822.
- [6] W. Wagner, J. R. Cooper, A. Dittmann, et al. The IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, 122(1): 150-180.