

蒸汽发生器蒸汽限流器设计改进与试验验证

孟 剑 徐金康 林绍萱 宋印玺

(上海核工程研究设计院 上海 200233)

摘要 介绍了压水堆核电站蒸汽发生器蒸汽限流器的一种改进设计。在保持相同喉部总流通面积的条件下,通过试验证明,改进后的19个文丘里管的蒸汽限流器结构的压力损失比传统的7个文丘里管的明显减小,并验证了蒸汽限流器的压力损失计算方法。

关键词 蒸汽发生器, 蒸汽限流器, 文丘里, 压力损失

中图分类号 TL353

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.070604

蒸汽发生器是压水堆核电站的关键设备之一。蒸汽限流器是安装在蒸汽发生器蒸汽出口管嘴中的一种装置。它的作用是在发生蒸汽系统失压事故时(如主蒸汽管道破裂或安全阀意外开启),限制蒸汽发生器的蒸汽流量,以避免反应堆大幅度超负荷,引起冷却剂温度降低,从而导致反应性突然增加,并避免汽水混物流速过高导致蒸汽发生器内件损坏和安全壳压力快速上升。正常运行时,由于蒸汽通过蒸汽限流器存在压力损失,因此要求蒸汽限流器在正常运行时压力损失较小。蒸汽限流器一般由7个文丘里管组成^[1-2],如图1所示。

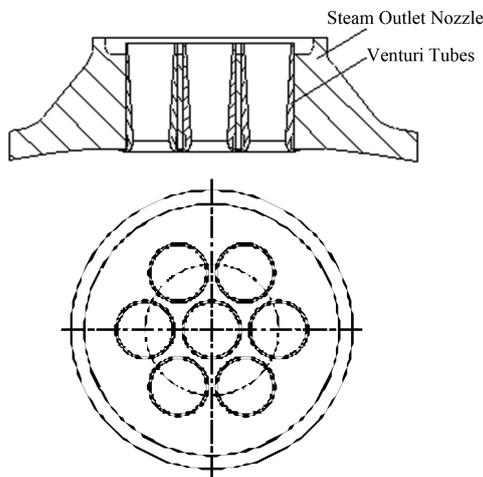


图1 传统的蒸汽限流器结构
Fig.1 Traditional steam flow limiter.

1 设计改进

蒸汽限流器的设计输入为喉部总流通面积、蒸汽压力和蒸汽流量。传统7个文丘里管结构的蒸汽限流器的优点是结构简单,缺点是压力损失较大。

为了降低其压力损失,根据蒸汽限流器的设计特点,对传统蒸汽限流器进行设计改进。改进的目标是降低蒸汽限流器的压力损失。改进后的蒸汽限流器由19个文丘里管组成,结构见图2。

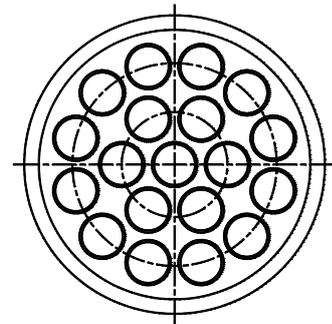


图2 改进后的蒸汽限流器
Fig.2 Steam flow limiter after improvement.

2 试验

2.1 试验原理与试验件设计

蒸汽限流器的压力损失可以通过测量蒸汽限流器前后的差压来确定,见图3。其中一个取压口位于上游至少1D处,另一个在下游至少6D处(试验取10D)。试验时将试验介质流过蒸汽限流器,通过改变试验介质流量,测量不同流量下的差压值。试验介质应尽量选择与实际运行情况相同的介质。蒸汽限流器压力损失试验选择的试验介质为饱和蒸汽(蒸汽湿度小于0.1%),蒸汽压力为6.0 MPa(a),蒸汽流量为4-11.5 kg·s⁻¹。

为了验证改进后的蒸汽限流器能够降低压力损失,设计了2个试验件进行试验。试验件1由7个按比例缩小的文丘里管组成。试验件2由19个按比

第一作者: 孟剑, 男, 1980年出生, 2006年于浙江大学获硕士学位, 工程师, 从事蒸汽发生器与承压设备的研究和设计工作
收稿日期: 2014-01-26, 修回日期: 2014-03-01

例缩小的文丘里管组成。试验件 1 的文丘里管的喉部总流通面积与试验件 2 相同。试验件的缩小比例按试验台架管道内径与主蒸汽管道内径的比值确定。试验件 1 和试验件 2 的结构简图如图 4 所示。

试验测量的参数主要有蒸汽压力、蒸汽温度和试验件取压口的差压。蒸汽压力测量管嘴、蒸汽温度测量管嘴和上游差压测量管嘴在试验件上，下游差压测量管嘴在试验台架管道上。

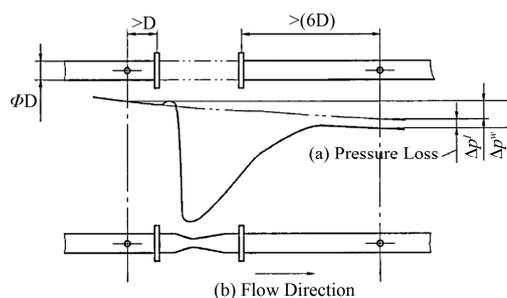


图 3 蒸汽限流器的压力损失原理图^[1]
Fig.3 Schematic drawing of steam flow limiter pressure loss.

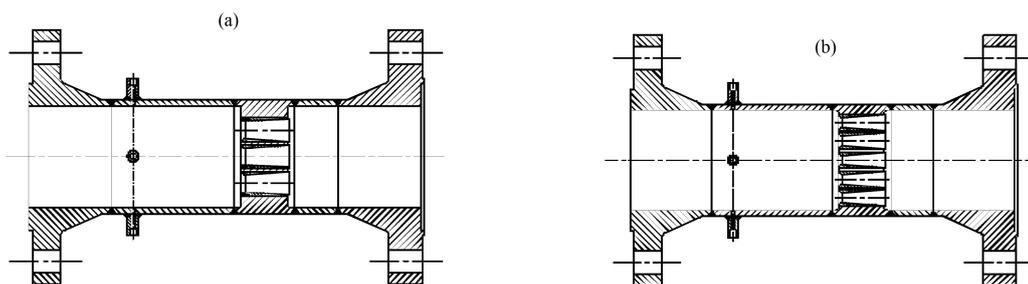


图 4 试验件 1(a)和 2(b)结构简图
Fig.4 Diagram of test model 1 (a) and 2 (b).

2.2 试验台架

蒸汽发生器蒸汽限流器压力损失试验在国内某研究所的蒸汽发生器综合试验台架上进行。该试验台架由一回路系统、二回路系统和各种辅助系统组成。在一回路系统中，以燃油热水锅炉代替反应堆，蒸汽发生器模拟体是连接一、二回路的枢纽。二回路系统是一个由减温减压装置、冷凝器、给水泵等构成的汽水循环回路。蒸汽发生器模拟体是提供饱和蒸汽的供汽换热器，二回路连接一个汽水分离试验回路，蒸汽限流器试验件安装在汽水分离试验本体出口管道上。蒸汽限流器压力损失试验所需的蒸汽由蒸汽发生器模拟体产生，通过汽水分离试验本体后满足湿度要求。

2.3 试验结果

试验结果为：不同试验介质流量下，试验件 1 的压力损失为 3–24 kPa，试验件 2 的压力损失为 5–42 kPa。对试验数据进行整理，并按式(1)计算压力损失系数^[3]。计算后得到试验件 1 的压力损失系数 $K_1=6.9$ ，试验件 2 的压力损失系数 $K_2=4.4$ 。试验件 2 的压力损失系数比试验件 1 小 36%左右。

$$K = \frac{2P_{\text{loss}}}{\rho u^2} \quad (1)$$

式中， K 为压力损失系数，无量纲； P_{loss} 为试验件压力损失，Pa； ρ 为试验介质密度， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； u 为试验介质速度， $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

3 验证计算方法

蒸汽限流器进口压力损失和出口压力损失的计算方法见式(2)^[3]：

$$P_{\text{loss}} = \zeta \rho \frac{u^2}{2} \quad (2)$$

式中， P_{loss} 为局部压力损失，Pa； ζ 为局部压力损失系数，无量纲； ρ 为流体密度， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； u 为流体速度， $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

文丘里管压力损失计算较复杂，先根据式(3)计算 Δp ，然后根据式(4)计算压力损失^[4–5]。

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1} \quad (3)$$

式中， q_m 为质量流量， $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ； C 为流出系数，无量纲； β 为文丘里管喉部直径与入口直径的比值，无量纲； ε 为膨胀系数，无量纲； d 为文丘里喉部直径，m； Δp 为差压，Pa； ρ_1 为蒸汽密度， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

$$P_{\text{loss}} = \xi \Delta p \quad (4)$$

式中， ξ 为相对压力损失（压力损失与差压之比）。

蒸汽限流器的总压力损失为进口压力损失，文丘里管压力损失和出口压力损失之和。根据试验件 1 和试验件 2 的结构尺寸和试验流量，由式(4)计算总压力损失，并和试验值相比较，结果是计算值和

试验值较吻合。试验件 1 的压力损失的计算值与试验值的误差为 13%左右，试验件 2 压力损失的计算值与试验值的误差为 8%左右。试验件 1 和试验件 2 压力损失的计算值见表 1。计算值与试验值的比较见图 5。

表 1 试验件 1 和 2 压力损失计算值
Table 1 Calculated values of pressure loss of test model 1 and 2.

流量 Flow rate / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	进口 Inlet / kPa	文丘里管 Venturi tubes / kPa	出口 Outlet / kPa	总计 Sum / kPa
model 1				
4.09	0.767	0.481	4.215	5.463
4.11	0.770	0.482	4.228	5.480
8.30	3.161	1.996	17.174	22.331
8.40	3.251	2.054	17.654	22.959
10.66	5.293	3.371	28.479	37.143
10.69	5.347	3.405	28.762	37.514
11.63	6.208	3.964	33.279	43.451
11.64	6.247	3.993	33.474	43.714
model 2				
4.08	0.772	0.713	1.792	3.277
4.09	0.776	0.716	1.800	3.292
8.20	3.178	2.955	7.281	13.414
8.23	3.204	2.979	7.339	13.522
10.73	5.455	5.104	12.345	22.904
10.74	5.461	5.109	12.358	22.928
11.26	5.834	5.459	13.184	24.477
11.41	6.082	5.697	13.722	25.501

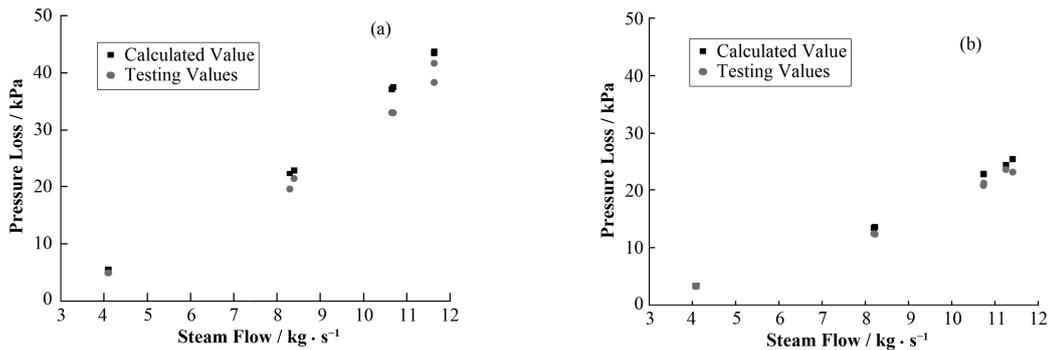


图 5 试验件 1(a)和 2(b)压力损失计算值与试验值比较
Fig.5 Comparison of calculated values with testing values of test model 1 (a) and 2 (b) pressure loss.

4 结语

本文介绍了压水堆核电站蒸汽发生器蒸汽限流器的一种改进设计。在保持相同喉部总流通面积的条件下，通过试验证明了以下结论：

(1) 相同介质流量下，改进后的 19 个文丘里管的蒸汽限流器结构的压力损失比传统 7 个文丘里管的蒸汽限流器结构小 36%左右；

(2) 验证了蒸汽限流器的压力损失计算方法。

参考文献

- 1 林诚格. 非能动安全先进核电厂 AP1000[M]. 北京: 原子能出版社, 2008: 110-113
LIN Chengge. An advanced passive plant AP1000[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2008: 110-113
- 2 邹小平, 顾振波. 秦山核电二期 600 MW 蒸汽发生器关键焊接技术[J]. 锅炉技术, 2006, 37(4): 5-8
ZOU Xiaoping, GU Zhenbo. Summarizing of welding of 600 MW steam generator for Qinshan phase II extension[J]. Boiler Technology, 2006, 37(4): 5-8
- 3 何潮洪, 冯霄. 化工原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 48-52
HE Chaohong, FENG Xiao. Chemical principle[M]. Beijing: Science Press, 2001: 48-52
- 4 GB/T 2624.4-2006, 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量(第 4 部分): 文丘里管[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006
GB/T 2624.4-2006, Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full-Part 4: Venturi tubes[S]. Beijing: Standard Press of China, 2006
- 5 刘世勋, 高拥军. 蒸汽发生器用蒸汽限流器的理论分析与设计[J]. 中国核科技报告, 1996, (00): 133-143
LIU Shixun, GAO Yongjun. Analysis and design of flow limiter used in steam generator[J]. China Nuclear Science and Technology Report, 1996, (00): 133-143

Design improvement and test verification of steam flow limiter of steam generator

MENG Jian XU Jinkang LIN Shaoxuan SONG Yinxi

(Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract Background: Steam flow limiter is an important device of steam generator in nuclear power plant. It limits the steam flow during the event of steam line break. However, it is required that the steam flow limiter has low pressure loss during normal operation of steam generator. **Purpose:** The aim is to design a steam flow limiter with lower pressure loss. **Methods:** An improved design of steam flow limiter is developed by increasing the number of Venturys from 7 to 19. Two test models of steam flow limiters of traditional design and improved design are tested. **Results:** The pressure loss factor of the traditional design test model is 6.9. The pressure loss factor of the improved design test model is 4.4. **Conclusion:** Based on the same total throat flow area, it is verified by tests that the pressure loss of steam flow limiter containing 19 Venturis is significantly lower than that containing 7 Venturis. The pressure loss calculation method is verified simultaneously.

Key words Steam generator, Steam flow limiter, Venturi, Pressure loss

CLC TL353