

CN9000649

CNIC-00262

RINPO-0005

# 中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

立式蒸汽发生器汽水分离装置的试验研究

THE TESTING OF A STEAM-WATER  
SEPARATING DEVICE USED FOR  
VERTICAL STEAM GENERATORS

*(In Chinese)*



原子能出版社

中国核情报中心

China Nuclear Information Centre

**CNIC-00262**

**RINPO-0005**

# **立式蒸汽发生器汽水分离装置的试验研究**

**THE TESTING OF A STEAM-WATER  
SEPARATING DEVICE USED FOR VERTICAL  
STEAM GENERATORS**

*(In Chinese)*

**丁训慎 崔保元 薛运燧 刘世勋**

**(核动力运行研究所, 武汉)**

**中国核情报中心**

**原子能出版社**

**北京·1989**

## 摘 要

本文介绍了立式蒸汽发生器汽水分离装置所进行的空气-水冷态透型试验。着重介绍了在高温高压水试验台上进行的立式蒸汽发生器汽水分离装置的热态考核试验。综合性能试验表明,经干燥后的蒸汽湿度远低于0.25%的规定值。

**关键词** 蒸汽发生器 汽水分离器 干燥器 蒸汽湿度

# **THE TESTING OF A STEAM-WATER SEPARATING DEVICE USED FOR VERTICAL STEAM GENERATORS**

**Ding Xunshen**

**Cui Baoyuan**

**Xue Yunkui**

**Liu Shixun**

**(Research Institute of Nuclear Power Operation, Wuhan)**

## **ABSTRACT**

The air-water screening tests of a steam-water separating device used for vertical steam generators at low pressure are introduced. The article puts emphasis on the qualification test of the steam-water separating device at hot conditions in a high temperature and pressure water test rig. The performance of the comprehensive test of the steam-water separating device indicates that the humidity of the steam at the drier exit is much less than the specified amount of 0.25%.

# 一、前 言

蒸汽发生器是核动力装置的重要设备之一，蒸汽发生器中的汽水分离装置——包括汽水分离器和干燥器是该设备的主要部件，其作用是保证自蒸汽发生器引出的饱和蒸汽的湿度低于0.25%的湿度指标，确保核动力装置安全、经济地运行。汽水分离的两相流动和分离过程比较复杂，目前尚不能用纯理论公式来进行计算，必须通过一系列试验，即水-空气试验台上的冷态透型试验和实际额定蒸汽参数下的热态考核试验。我们在冷态试验台上对汽水分离器和干燥器进行了大量的透型试验，定性地选出较好的结构型式，并在立式蒸汽发生器试验体热态试验台上对选定的结构进行了考核试验，本文将介绍汽水分离装置综合性能定量的试验结果。

## 二、汽水分离器的冷态试验 [1]

汽水分离器的冷态试验是将水喷入空气流中造成汽水混合物，用积盐法确定分离效果。图1为旋叶式汽水分离器试验件。表1为试验条件及试验件结构尺寸。

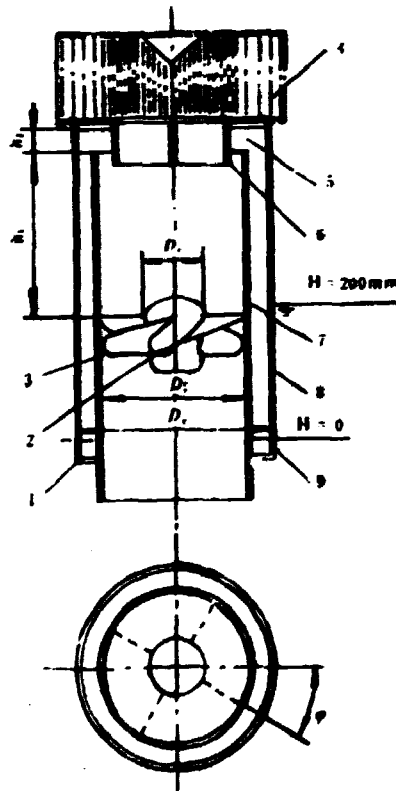


图1 旋叶式汽水分离器试验件

- 1——旋叶式汽水分离器；2——中心柱；3——螺旋叶片；4——顶帽；5——蒸汽口；  
6——出汽筒；7——分离筒；8——套筒；9——通水节流孔。

表1 試驗条件及試驗件结构尺寸

项 目	符 号	单 位	通 型 试 验
試驗压力	$P$		大 气 压
空气体积流量 (风量)	$Q$	$m^3/h$	1000~2200
循环水量	$G$	$t/h$	20
水位	$H$	mm	200
中心性直径	$D$	mm	83
分离筒直径	$D_1$	mm	226
盖筒直径	$D_2$	mm	296
叶片升角 (平均直径处)	$\alpha$		14°, 18°, 20°
叶片出口至分离筒出口高度	$h_1$	mm	120, 240, 378
相邻叶片重叠角	$\varphi$		15°, 30°, 45°
叶片数目	$n$	片	3, 4, 6
出汽筒口径比	$\beta$		0.65, 0.75, 0.85
疏水口高度	$h_2$	mm	20, 30, 40
疏水节流孔数目 (直径10mm)	$m$	只	24, 36, 48

试验内容主要有:

- 螺旋叶片选型试验: (1) 叶片升角试验; (2) 叶片出口至分离筒出口高度试验; (3) 相邻叶片重叠角试验; (4) 叶片数目试验。
  - 出汽筒选型试验: (1) 出汽筒口径比试验; (2) 其它结构的试验。
  - 疏水结构选型试验: (1) 疏水口高度试验; (2) 疏水节流孔试验; (3) 提前疏水试验。
  - 顶帽选型试验: 对径向出汽、两侧出汽和轴向出汽的顶帽进行了试验。
  - 性能试验: (1) 循环水量试验; (2) 水位试验。
  - 旋叶式汽水分离器与立式旋风分离器对比试验。
- 旋叶式汽水分离器冷态试验所获得的主要成果如下:
- 汽水的离心分离取决于螺旋叶片与分离筒的结构尺寸。当叶片升角 (平均直径处)  $\alpha=18^\circ$ , 叶片出口至分离筒出口高度  $h_1=240\text{mm}$ , 相邻叶片重叠角  $\varphi=30^\circ$ , 叶片数目  $n=4$  时, 汽水分离器具有良好的分离效果。
  - 本试验得出的最佳出汽筒口径比  $\beta=0.75\sim 0.85$ 。
  - 可取疏水口高度  $h_2=40\text{mm}$ , 疏水节流孔数目  $m=36$  只。
  - 分离筒直径  $D_1=226\text{mm}$  时, 临界风量  $Q_c=1600\text{m}^3/h$ ;  $D_1=270\text{mm}$  时,  $Q_c=2300\text{m}^3/h$ , 表明临界风量与分离器直径的平方成正比。
  - 比较各种顶帽型式, 以径向出汽的立式波形板顶帽的分离效果为最好。
  - 循环水量对分离效果有显著影响, 循环水量越大, 分离效果越差。

7. 套筒外的水位可在较大的范围内变动, 最高水位可达分离筒出口的高度。水位在疏水节流孔以上时, 应有不低于200mm的水封。

8. 旋叶式汽水分离器最佳型式的分离效果大大好于电站锅炉上普遍采用的以水平式波形板为顶板的立式旋风分离器的分离效果, 前者临界风量是后者的2.3倍。

### 三、干燥器的冷态试验<sup>[2]</sup>

干燥器的冷态试验是使空气穿过水层造成气水混合物, 用积盐法确定分离效果。对内、中、外三圆立式波形板的试验件进行了试验。图2为立式波形板干燥器试验件。表2为试验条件及试验件结构尺寸。

试验内容主要有:

1. 三圆波形板试验件对比试验;
2. 改变气流流动方向的试验;
3. 疏水槽结构改进试验;
4. 加装前、后多孔板的试验。

干燥器通过冷态试验所获得的主要成果如下:

1. 三圆的分离效果不一样, 外圆最好、中圆次之、内圆最差, 外圆临界风量比内圆约高24%。

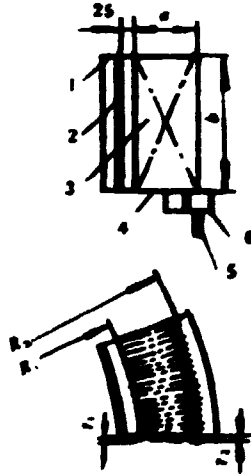


图2 立式波形板干燥器试验件

1——顶板; 2——多孔板; 3——波形板; 4——底板; 5——疏水管; 6——疏水槽。

2. 湿空气流从内侧流向外侧分离效果较好, 临界风速比从外侧流向内侧约高 $1\text{m/s}$ 。
3. 疏水结构对分离效果影响很大, 应能及时疏水并保证气流不再吹起水滴。
4. 在立式波形板进口加装多孔板可改善分离效果, 而在出口装多孔板使分离效果变差。

表2 干燥器试验条件及试验件结构尺寸

项 目	符 号	单 位	试 验 件 I (内 侧)	试 验 件 II (中 侧)	试 验 件 III (外 侧)
试验压力	P		大 气 压	大 气 压	大 气 压
空气体积流量 (风量)	Q	m <sup>3</sup> /h	1200-2300	1200-2700	1200-2300
试验件入口空气流速	w	m/s	3.6-6.8	3.6-8.0	3.6-6.8
试验器体水位	h	mm	100	100	100
试验件筒空间高度	H	mm	300	300	300
试验件中湿空气流动方向			由内侧向外侧	由内侧向外侧 由外侧向内侧	由内侧向外侧
半径 (内圆)	R <sub>1</sub>	mm	260	515	760
半径 (外圆)	R <sub>2</sub>	mm	375	630	875
波形板间距 (内圆)	t <sub>1</sub>	mm	8.2	9.0	9.5
波形板间距 (外圆)	t <sub>2</sub>	mm	11.8	11.0	10.7
波形板平均间距	t <sub>平</sub>	mm	10	10	10
波形板数量	n	片	46	38	36
波形板宽度	e	mm	115	115	115
波形板高度	b	mm	240	240	240

## 四、汽水分离装置的热态试验

### 1. 试验体

图3为立式蒸汽发生器汽水分离装置试验体，它由上、下筒体、一次侧封头、U形管束和汽水分离装置等组成。筒体外径为710mm，240根 $\phi 15 \times 1.5$ mm的不锈钢U形管侧立于管板上。试验体总高度为5.789m。

一回路水从入口接管进入半球形一次侧封头入口腔，流经U形管束后，在出口腔经出口接管引出。给水从筒体中部进入试验体中给水环形管，与汽水分离器的疏水混合后沿着环形下降通道向下流动，然后在平管板上表面折向进入由U形管束构成的上升通道。汽水混合物沿着U形管束上升，含汽量不断增大直至管束出口。管束顶部的套筒直径缩小，在此处装置有一个汽水分离器，汽水分离器上方布置了干燥器，经分离后的饱和蒸汽从上部封头出口接管引出。筒体与汽水分离器之间的环形体积较大，一般正常水位就位于这里，有玻璃水位表显示出水位。试验体上、下筒体用法兰连接，以便更换汽水分离器和干燥器的试验件。

试验体中的汽水分离器和干燥器是通过冷态试验选出的最佳结构。汽水分离器是分离筒直径为226mm的旋叶式分离器，叶片升角（平均直径处）18°，相邻叶片重叠角为30°，叶片为4片。顶帽为径向出汽的立式波形板组件，波形板宽度为80mm，高度为100mm。整个汽水分离器的高度1521mm。干燥器是单圆立式波形板分离器，结构尺寸与冷态试验的内圆组件相近，汽流方向从内侧向外侧，在进口处装有前孔板。



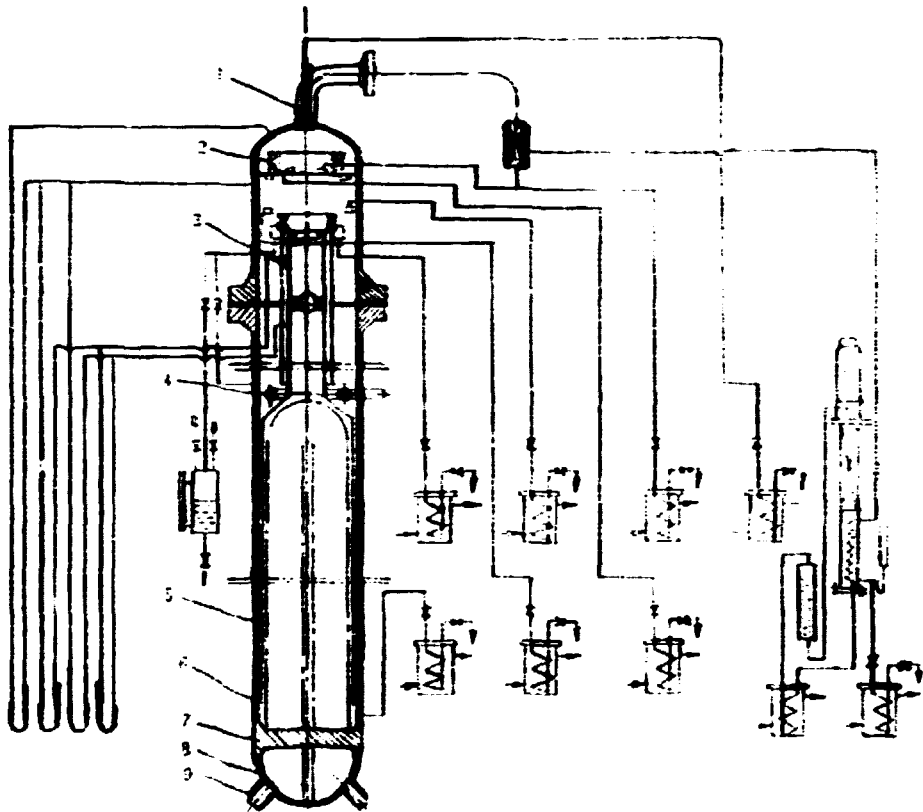


图3 汽水分离装置试验体及测量系统

- 1—蒸汽出口接管；2—干燥器；3—汽水分离器；4—给水分配管；5—U形管束；  
6—筒体；7—浮球；8—回路倒接头；9—回路水速、出口接管。

## 2. 试验台系统

试验台系统如图4所示。回路均由铜合金钢管构成闭合回路，压力为  $1 \times 10^7 \text{Pa}$  (100

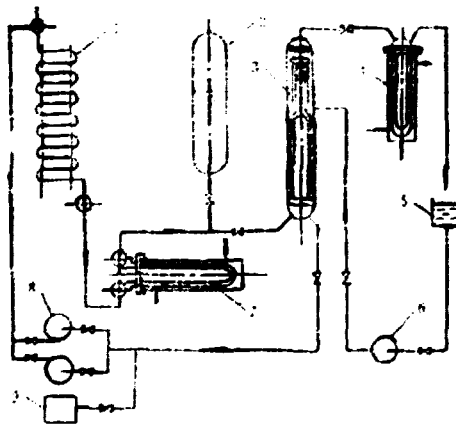


图4 试验台系统

- 1—热水锅炉；2—稳压器；3—试验体；4—中压蒸汽分离器；5—二回路水嘴；  
6—给水泵；7—冷却器；8—循环阀；9—补给水泵。

atm)的一回路水由两台离心式循环水泵同时进行循环。一台以煤气为燃料的热水锅炉供给一回路水热量,它可使流量为 $65\text{L/h}$ 的一回路水的温度升高 $60^\circ\text{C}$ 。一台减温器位于热水锅炉出口处,用控制热水锅炉的煤气流量、减温器冷却水量和二次侧蒸汽流量的方法来调节一回路水温、出口温度,使其满足试验的要求。为了使一回路系统的压力稳定,回路上安装了稳压器。一台能随时投入运行的补给水泵为一回路补水。

二回路系统为开式系统,试验体可产生最大蒸汽量为 $5\text{t/h}$ 左右,从试验体引出的饱和蒸汽进入中压蒸汽冷凝器,冷凝液进入二回路水箱,再经给水泵打入试验体,试验时,调节给水流量,使水位保持在试验程序的高度。

### 3. 测试方法

汽水分离器和干燥器的测试指标,一般用分离效率和阻力两项指标来测定。因此,必须测定汽水分离器出口、干燥器入口和出口的蒸汽湿度,以及汽水分离器和干燥器的阻力。

#### (1) 蒸汽湿度的测定

直接测定蒸汽中的含水量是很困难的,其中,绝热蒸汽发生器,蒸汽中携带的水分主要以机械方式携带,可用测得的蒸汽中含盐量和给水中含盐量的比值来测定蒸汽湿度。试验期间循环水含盐量保持在 $1000\sim 1500\text{mg/L}$ 范围内,为保证数据的可靠,蒸汽和给水中的含盐量用硫酸盐残渣、电导度和火焰分光光度计三种方法同时测定。

蒸汽湿度的测量系统如图3所示,在汽水分离器出口布置了双瓶式和缝筒式取样器各一只,干燥器进口也布置了双瓶式和缝筒式取样器各一只,试验体出口布置了探针式取样器,在出口蒸汽管道中布置了混合筒取样器。另外,还布置了汽水分离器旁水取样和循环水取样。所有试样经取样引出接管进入取样冷却器,用两瓶取样器方法达到等速取样,以保证试样的代表性。

#### (2) 阻力测定

汽水分离器和干燥器阻力的大小也是测定分离性能的主要指标,过大的阻力会导致循环倍率的下降和饱和蒸汽出口压力的降低。

试验中阻力的测定如图3所示,采用在汽水分离器和干燥器前、后引用静压测点,用双管差压计进行测定。

#### (3) 循环倍率和热工参数的测定

循环倍率的测定采用三种方法,即测下降通道水速法、热焓法和质量衡法,给水和蒸汽流量的测定,一次元件为标准孔板,二次元件为双管差压计;压力测量采用弹簧管式标准压力表;温度的测量用二级标准水银温度计。

### 4. 试验结果与分析

试验是在蒸汽发生器运行时的几个主要工况下进行,如表1所示,测定了热工参数、循环倍率、汽水分离器和干燥器的蒸汽湿度和阻力值。下面,从四个方面来分析试验结果。

#### (1) 汽水分离效果

在进行汽水分离装置热态试验时,主要是测定汽水分离器和干燥器组合后的汽水分离效果,即试验体出口处的蒸汽湿度是否满足小于 $0.25\%$ 的湿度要求,为了保证出口处蒸汽湿度测量的正确性,除了采取上述三种含盐量方法同时测定外,还在试验体出口和出口蒸汽管道中布置了取样器,以获得出口蒸汽的湿度值。

表3 蒸汽发生器试验体汽水分离装置动态试验数据

蒸汽负荷 D, t/h		8.02	6.14	5.11	2.44	5.36	5.36	6.97	6.81
水位高度 H, mm		19	1	30		31	683	1134	1213
循环流量 C, t/h		2.59	4.02	5.06	10	4.35		3.72	4.11
湿	汽水分离器出口 $\omega_1$ , %	0.23							
	干燥器出口 $\omega_2$ , %	0.11	0.02						
	干燥器出口 $\omega_3$ , %	0.01							
	蒸汽管道 $\omega_4$ , %	0.01	0.01						
干	汽水分离器出口 $\omega_1$ , %	0.05	0.01	0.07	0.07	0.01	1.00		69.7
	干燥器出口 $\omega_2$ , %	0.03	0.01		0.02		0.30	10.9	30
	干燥器出口 $\omega_3$ , %	0.01					0.02		3.82
	蒸汽管道 $\omega_4$ , %	0.01				0.01	0.02	0.41	2.57
湿	汽水分离器出口 $\omega_1$ , %	0.08					0.04	98	
	干燥器出口 $\omega_2$ , %	0.05					0.02	24.7	
	干燥器出口 $\omega_3$ , %	0.01				0.01	0.01	0.01	
	蒸汽管道 $\omega_4$ , %	0.01				0.01	0.01	0.01	
循环水含盐量 S, mg/L		1498	1200			1900			
阻力	汽水分离器 $\Delta P_1$ , mmH <sub>2</sub> O	1415	1011	940	225	1237		2003	2022
	干燥器 $\Delta P_2$ , mmH <sub>2</sub> O	150	80		41	116		232	286
阻力系数	汽水分离器 $\xi_1$	1.21	1.15	1.20	0.85	1.47		1.30	1.25
	干燥器 $\xi_2$	3.79	3.44	6.22		5.01		5.94	6.29

当水位为正常水位时，即在汽水分离器疏水孔之上350mm处，在各试验工况下，相应的蒸汽量为8.02、6.14、5.11和2.44t/h时，试验体出口蒸汽湿度均在0.01左右。即若循环水含盐量为1000mg/L，则蒸汽含盐量为0.1mg/L。试验表明：汽水分离器和干燥器的分离效果是很好的，出口湿度远低于0.25%的湿度指标。

在蒸汽负荷为8.02t/h时，汽水分离器出口蒸汽已大量带水，但经干燥器后蒸汽品质仍然良好，故在超负荷和动态工况下，干燥器还可以保证蒸汽品质符合要求。在8.02t/h的负荷下，干燥器叶片间蒸汽平均速度约为1m/s，此值可作为推荐给设计的允许值。因试验体蒸汽量有限，试验未能作出干燥器的临界工况。

(2) 水位对分离效果的影响

在额定蒸汽负荷下，水位升至汽水分离器螺旋叶片位置时，即自正常水位提高到683mm，出口蒸汽湿度 $\omega=0.02\%$ ，蒸汽品质仍然很好；水位部分淹没汽水分离器顶部( $H=1134mm$ )

时,  $\omega=0.41\%$ ; 水位完全淹没汽水分离器顶帽 ( $H=1213\text{mm}$ ) 时,  $\omega=2.57\%$ , 蒸汽品质严重恶化。所以, 在运行中水位提升不要超过汽水分离器顶帽下沿。

### (3) 阻力

蒸汽量为 $8.02\text{t/h}$ 时, 汽水分离器的阻力 $\Delta P_1=1415\text{mmH}_2\text{O}$ 。根据各次试验, 其阻力系数可取 $\zeta_1=1.2\sim 1.4$  (取螺旋叶片间蒸汽流速为计算速度), 此阻力系数值可推荐用作水循环计算。

干燥器的阻力, 在蒸汽量为 $8.02\text{t/h}$ 时,  $\Delta P_2=199\text{mmH}_2\text{O}$ 。该阻力中孔板的阻力占大部分, 但阻力值也不大。虽然, 该阻力不影响水循环, 但会影响饱和蒸汽出口压力。

### (4) 动态过程中的蒸汽品质

每次动态试验均测量了蒸汽湿度的变化, 测量结果皆满足蒸汽品质的要求。如一次升负荷扰动 (负荷由 $25\%$ 提升至 $100\%$ ), 试验体出口蒸汽湿度由 $0.044\%$ 升至 $0.085\%$ , 低于规定指标。

## 参 考 文 献

- [1] 丁训慎等, 核动力工程, 2(3), 58(1981)
- [2] 丁训慎等, 核动力工程, 5(1), 22(1984)



P.O.Box 2103

书号, 15175-00262

Beijing, China

**China Nuclear Information Center**