射水抽气器改进的方法

肖汉才
(长沙电力学院)

[摘要] 本文首先分析一些低效射水抽气器的结构,指出不合理性,然后提出改进的方法,并论述了长喉管比短喉管、多喷嘴比单喷嘴抽气效率高。最后结合实例介绍了设计方法、改进步骤和改进前后效果的比较。

关键词　抽气器　喷嘴　喉管　效率
分号类　TK264

1　改进低效射水抽气器的必要性

为了保持汽轮机凝汽器的高度真空、必须连续地把凝汽器中的空气抽出来。抽取空气的设备有射水抽气器、射汽抽气器或真空泵。由于射水抽气器结构简单、工作可靠、运行维护都很方便,因此,国内大中型汽轮机大多采用射水抽气器。

经调查,目前国内射水抽气器的型式比较多,但有些结构不合理,效率低。第一种情况,传统的短喉管射水抽气器,如图 1 所示,这种抽气器能耗高,抽气效率低,并且二次喷嘴易损坏(后面第三节详细论述)。

第二种情况,主辅射水抽气器 ,如图 2 所示,这种抽气器,由于射水分流容易引起接凝汽器的主抽气器能力不足,而接轴封加热器的辅抽气器抽气能力多余,因此工作水能量得不到充分利用,并且有主、辅两套抽气器,多占场地,安装维护工作量增大。

第三种情况,分流射水抽气器,如图 3 所示,这种情况类似第二种,也是容易引起凝汽器处抽气能力不足,而分支的射流能量有些浪费。

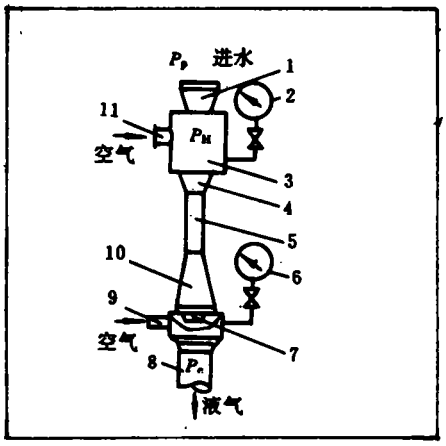

图 1　短喉管射水抽气器
1. 一次喷嘴　2. 6. 真空表　3. 吸入室
4. 收缩管　5. 短喉管　7. 二次喷嘴　8. 排水管
9. 接轴封加热器　10. 扩散管　11. 接凝汽器

收稿日期　1994—03—10　修改定稿　1994—11—01
本文联系人　肖汉才　男　45　副教授　410077　长沙电力学院 10 栋 3 单元

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

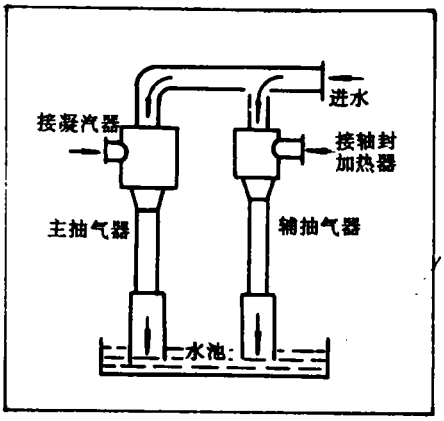

图 2　主辅射水抽气器

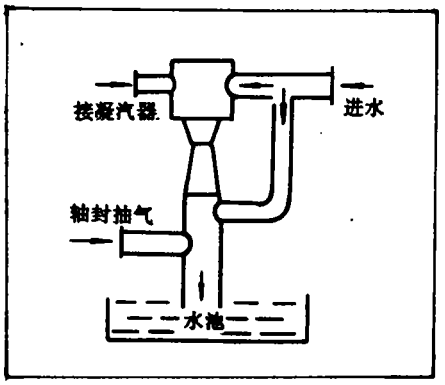

图 3　分流射水抽气器

第四种情况，射水抽气和引风机抽气，如图 4 所示，这种是凝汽器抽气靠射水抽气器，而轴封加热器处抽气靠马达带动引风机抽气。这是两套系统，并且各有一套备用装置，因此安装维护工作量大，设备多，能耗高，而且轴封加热器的抽气直接排入汽机房，引起噪音、热污染和湿气。

针对以上情况，很有必要改进低效射水抽气器。随着人们对射流技术的深入研究和节能降耗的重视，人们对改进射水抽气器进行了认真的探讨。

2　提高射水抽气器抽气效率的途径

现在提高射水抽气器抽气效率的主要途径是采用长喉管和多喷嘴。

2.1　改短喉管抽气器为长喉管抽气器

由于射水抽气器的工作水温和从凝汽器抽吸的空气（并带少量的蒸汽）温度不同，并且有水—气—汽多相流体，因而引起射水抽气器的工作过程是多相流体质量传递—气水混合，能量传递—换热凝结等几个连续步骤的复杂过程。有人曾用透明玻璃钢制作的射水抽气器做试验观察到，大致分为三段过程，如图 5 所示。

第一阶段—液气相对运动：工作水通过喷嘴后成为高速射流，进入吸入室和收缩管时保持自己最初的密实圆柱形状，由于射流边界层与气体之间的粘滞作用，射流将气体卷吸带入喉管，密实射流和环形空气流作相对运动。

第二阶段—液滴运动：液体射流离开喷嘴后的一定长度时，受气体扰动和装置振动的影响，因而产生脉动和表面波。同时空气中的少量蒸汽也凝结成液体，液体质点杂乱扩散，射流表面波振幅增大，当振幅超过射流半径时，射流破裂成为液滴，并且气体被加速和压缩，这个阶段中看到乳白色的水—空气—蒸汽的乳状液。这个阶段后期，射流完全破裂，液滴变为不连续介质，气体成气相聚合状态。

第三阶段—气液泡沫流运动：在这个阶段气体又被液滴粉碎为微小气泡，成为分散介质，通过扩压管（即排水管）后，压力升高，气体压缩，液滴又聚合为液体，成为连续介质。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

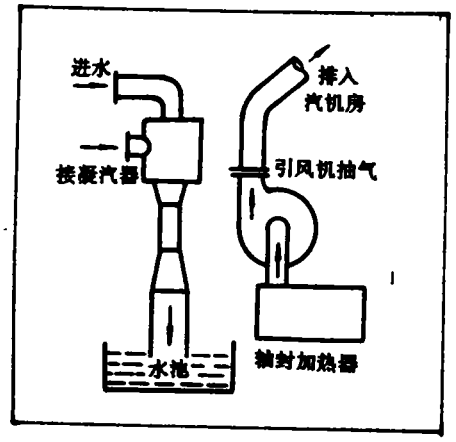

图 4　射水抽气和引风机抽气

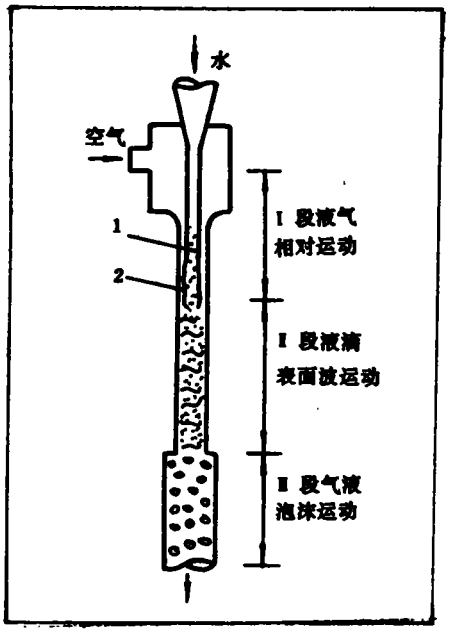

图 5　射水抽气器流动状态

1—密实液体射流；2—环形空气流

由于射水抽气器对气体的抽吸和压缩主要是在第一、第二阶段，在工作时气水混合，换热凝结过程在喉管这一区段表现得特别强烈，并要在较长喉管内才能完成。由于短喉管抽气器没有足够的长度来完成第二阶段，不能使液体充分混合，在喉管壁面有明显倒流现象，因而能量损失大，效率低。而长喉管抽气器有足够的长度来完成第一、第二阶段，喉管长度满足了射流破裂长度的要求，气水混合过程在喉管内完成，不产生倒流现象，所以能量损失小，效率高。

设计长喉管抽气器时要考虑最佳面积比和最佳喉管长度。由于射水抽气器内多相流动和传热传质等复杂过程，从理论上很难推出精确公式，经我们在实践中筛选验证一些资料介绍的公式，如下经验公式比较合适。

2.1.1　喉管与喷嘴最佳面积比 F_3/F_1

$$\frac{F_3}{F_1}=\frac{1.181P_P-0.181P_C-2.7P_n}{P_C-2.7P_n} \quad (1)$$

式中：F_1— 喷嘴截面积(m^2)；

F_3— 喉管截面积(m^2)；

P_p— 工作水压(MPa)；

P_c— 抽气器背压(MPa)；

P_n— 工作水温对应的饱和蒸汽压力(MPa)。

2.1.2　喷嘴直径 D_1(m)

$$D_1=2.946\times10^{-3}\times\sqrt{\frac{G_H(t_P+273)(P_C-2.7P_n)}{\mu(P_H-P_n)(P_P-P_C)\sqrt{P_P-P_H}}} \quad (2)$$

式中：P_H— 吸入室压力(MPa)；

t_p— 工作水温(℃)

G_H— 抽吸空气量(kg/s)；

μ— 流量系数，$\mu=0.92\sim0.98$。

2.1.3　喉管直径 D_3(m)

$$D_3=D_1\sqrt{\frac{F_3}{F_1}} \quad (3)$$

2.1.4　最佳喉管长度 L_3(m)

$$L_3=(7.77+2.42\frac{F_3}{F_1})D_3 \quad (4)$$

或者　$$L_3=M(\frac{F_3}{F_1}-1)D_1 \quad (5)$$

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中：M— 调整系数，$M = 11 \sim 13$。

2.1.5 扩压管(排水管)直径 D_c(m)

$$D_c \geqslant 1.2D_3 \qquad (6)$$

利用上述公式求出喷嘴直径 D_1、喉管直径 D_3、喉管长度 L_3 和排水管直径 D_c，再根据布置位置决定排水管长度。

2.2 改单喷嘴抽气器为多喷嘴抽气器

增加射流与气体接触的表面积，在单位时间内能使射流抽吸更多的空气，因而能使射水抽气器提高抽气效率。

现将单喷嘴与多喷嘴情况作一下比较，并使工作水流量和压力相同(即水泵马达耗电相等)。设单喷嘴出口半径为 R，射流水柱长为 h，那么喷嘴出口截面积 $s = \pi R^2$，周长 $L = 2\pi R$，射流表面积 $F = Lh = 2\pi Rh$。

如果将单喷嘴改为 n 个多喷嘴，并使 n 个喷嘴截面积之和等于单喷嘴的截面积。令小喷嘴的半径为 r，截面面积为 s'、周长为 l，水柱长也近似为 h，那么

$$ns' = s$$

即 $n\pi r^2 = \pi R^2$

得 $$r = \frac{R}{\sqrt{n}}$$

$$l = 2\pi r = 2\pi\sqrt{\frac{R^2}{n}} = 2\pi\frac{R}{\sqrt{n}}$$

n 个小喷嘴的总圆周长 L' 为

$$L' = nl = \frac{2\pi nR}{\sqrt{n}}$$

n 股射流的总表面积 F' 为

$$F' = L'h = \frac{2\pi nRh}{\sqrt{n}}$$

故得多喷嘴射流表面积 F' 与单喷嘴射流表面积 F 之比为

$$\frac{F'}{F} = \frac{n}{\sqrt{n}} \qquad (7)$$

由式(7)看出，多喷嘴能增加射流与气体的接触面积而多抽气，所以能提高抽气效率。有的资料介绍喷嘴数目可为 4 ～ 19 个，考虑到制作、摩阻等因素，实际上多采用 4 ～ 9 个喷嘴。

现在改进的射水抽气器有单喷嘴长喉管，多喷嘴共一根长喉管，还有多喷嘴连多根长喉管，如图 6 所示，以多喷嘴多喉管型抽气效率最高，但是制作加工比较复杂。

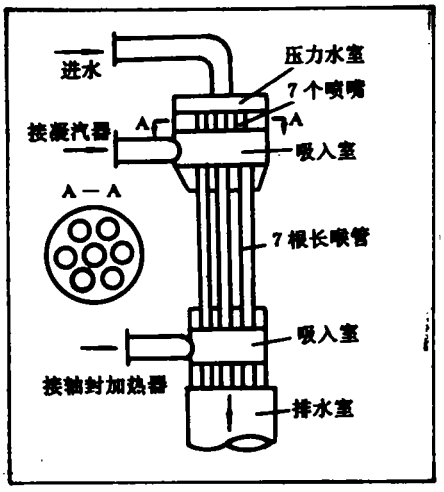

图 6 七喷嘴七喉管射水抽气器

3 短喉管射水抽气器改进后的实际效果

由于图 1 所示的短喉管射水抽气器不但抽气效率低，而且二次喷嘴很容易汽蚀损坏，如图 7 所示损坏的二次喷嘴，是由 8 mm 厚钢板制成，仅运行四年，整个内圆就汽蚀成蜂窝状影响发电。因此，我们利用机组检修的机会，将其设计改进为图 8 所示的长喉管抽气器，改进后的抽气器只保留吸入室(因改变吸入室需翻砂加工、工作量大)和收缩管，去掉了二次喷嘴和扩散管，改变了一次喷嘴，加长了喉管，并将接轴封加热器的管子连在排水管上，这样与原来的抽气器相比，不但结构大大简化，防止了汽蚀损坏喷嘴的现象，而且提高了效率，降低了能耗，如表 1 所示。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

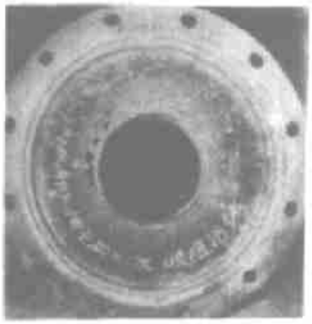

图 7　损坏的二次喷嘴

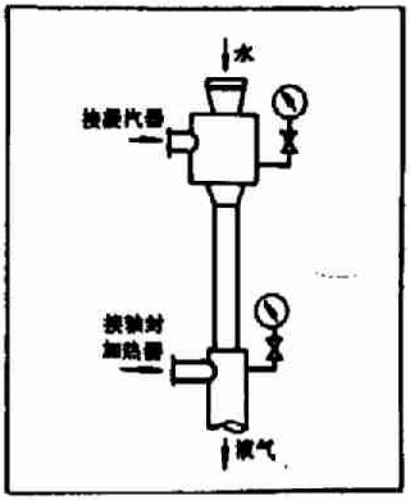

图 8　改进后的长喉管射水抽气器

表 1　两种抽气器性能指标比较

射水抽气器型式	汽机功率 (MW)	工作水压 P_w(MPa)	吸入室压力 P_u(MPa)	抽吸空气量 G_a(kg/s)	单位耗功 N(kW · h/kg)
短喉管抽气器	50	3.0×10^{-1}	4.5×10^{-2}	2.80×10^{-3}	3.6
长喉管抽气器	50	2.9×10^{-1}	4.5×10^{-2}	8.12×10^{-3}	1.62

从表 1 看出，在相近工况下，长喉管射水抽气器抽吸空气量是短喉管的 2.9 倍，而长喉管抽气器的单位耗功却不到短喉管抽气器的一半，只占 45%，由于长喉管抽气器抽吸空气效率高，一方面使凝汽器真空提高，作功焓降增大，可使汽轮发电机组多发电；另一方面缩短开机时间，使汽轮发电机提前开机并网多发电。如一台 200 MW 机组，因抽真空加快缩短开机时间 5 分钟，就可提前多发电 1.6 万 kW · h 左右。还由于长喉管抽气器单位能耗低，故可大大降低射水泵电耗，一台 100 MW 机组射水泵一年就可节电 21 万 kW · h，并且取消了二次喷嘴，不存在喷嘴因汽蚀而损坏的现象，使抽气器安全可靠，因而改进后的长喉管射水抽气器达到了高效节能安全的目的。

同样，图 2、图 3、图 4 类型的射水抽气器也可参照上述的改进步骤，选择加工适当的喷嘴和喉管，将轴封加热器抽气连接到扩压管适当的高度，调整水压水量，也能取得好的效果。

参 考 文 献

1　陆宏圻. 射流泵技术的理论及应用. 北京：水利电力出版社，1989. 6

2　Ефимочкин Г И. Корешков В Е. Исследование и выбор водоструйных эжекторов с удлиненной цилиндрической камерой смешения. Электрические Станции，1976(4)

3　山东工学院. 工程流动力学. 北京：水利电力出版社，1979. 12

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

向心汽轮机与热电冷三联产——热电联产工程系列报告之三＝Centripetal Turbines and Simultaneous Production of Heat Energy, Electricity and Refrigeration-the Third in a Series of Reports Concerning the Cogeneration of Heat and Electricity[刊,中]/Yu Hongqing, Ye Zhaogu, Qiang Guofang(Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -129-134

The authors give a description of the performance, construction and certain technical details of a recently developed radial-flow centripetal back-pressure turbine with a Curtis stage, followed by an exploratory study of some typical engineering applications of such turbines in the cogeneration of heat and electricity (including refrigeration). Key words: centripetal steam turbine, Curtis stage, simultaneous production of heat energy, electricity and refrigeration

射水抽气器改进的方法＝A Method for the Imprvment of Water-jet Air Ejectors[刊,中]/Xiao Hancai(Changsha Electrical Power Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -135-139

The stuctural desgin of certain low-efficiency water-jet air ejectors os analysed with its irrationality being pinpointed. On this basis an improved method is proposed. The author explained why a long throat tube and mulitple nozzles should be utilized in preference to a short throat tube and single nozzle in order to enhance air extraction efficiency. In conclusion, by citing some specific examples presented in this paper are the design method, procedures for its improvement and comparison of results before and after the introduction of the improved design. Key words: air ejector, nozzle, throt tube, efficiency

百叶窗煤粉浓缩器气流和静压分配问题＝On the Flow Rate and Static Pressure Distribution of a Louvered Pulverized Coal Concentrator [刊,中]/Xing Chunli, Qin Yukun(Harbin Institute of Technology)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -140-143

The exit area ratio amd blade coverage ratio of a louvered pulverized coal concentrator which exercise a major influence on its performance are studied by the authors as to their effect on the flow rate and static pressure distibution of the said concentrator. The study results show that for a given structural design of the louver there exists an exit area ratio which can ensure a uniform distribution of the flow rate and static pressure between two exits of the louvered pulverized coal concentrator. Key words: louver, concentrator, distribution

矩形平壁循环流化床冷态流动特性研究＝A Study on the Cold-state Flow Characteristics of a Rectangular Flat Wall Circulating Fluidized Bed[刊,中]/Huang Suhua, Lu Jidong, Qian Shizhi, et al (Central China University of Science and Technology)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -144-148

With air serving as fluidized medium and samd(0.1-0.45mm)as bed material the concentraion distribution of axial and radial particles has been separately determined on a circulating fluidized bed cold-state test rig through the use of a reflexive optical fiber probe. A special study is conducted of the effect of the rectangular section circulating bed edge angle on the gas-solid dual-phase flow and the radial particle concentration distribution. Also studied is the gas-solid flow in the neighborhood of the wall surface. An sequential analysis method hsa been introduced to establish a parameter model for the sampled data. The experimental re-sults can play a significant role in achieving an in-depth understanding of the gas-solid dual-phase flow in the circulating fluidized bed. Key words: circulating fluidized bed, rectangular section, particle concentration, AR model

循环流化床燃烧炉膛压降与轴向固体浓度＝The Combustion Furnace Pressure Drop of a Circulating Fluidized Bed and Axial Solid Concentration[刊,中]/Li Yintang, Li Jun, Che Defu(Xi' an Jiaotong University)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, -1995, 10(3). -149-153

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net