

DOI: 10.19666/j.rlfed.202209218

# 耦合喷射器的高背压机组变工况特性研究

魏 德<sup>1</sup>, 席新铭<sup>2</sup>, 李 健<sup>2</sup>, 杨志平<sup>2</sup>, 戈志华<sup>2</sup>

(1. 国电电力大同湖东发电有限公司, 山西 大同 037043;

2. 华北电力大学国家火力发电工程技术研究中心, 北京 102206)

**[摘 要]** 在喷射器辅助供热的背景下, 为了研究喷射器变工况特性, 对国内外有关喷射器的计算方法进行调研, 建立了喷射器计算模型并将模型与高背压机组进行耦合, 得到喷射器变工况时工作蒸汽、引射蒸汽、喷射器背压、喷射器开度对喷射器性能的影响。结果表明: 喷射器工作流体压力从 0.25 MPa 增至 0.45 MPa, 工作流体质量流量先变大后变小, 在工作蒸汽压力为设计工作蒸汽压力时喷射器性能最佳; 引射蒸汽压力提高, 临界背压提高; 引射后的混合流体的压力不仅会影响喷射器的工作, 也会影响凝汽器工作; 相比抽背机组, 高背压耦合喷射器机组低压缸最小冷却流量最大可降低 140 t/h, 供电范围提高 43 MW。

**[关 键 词]** 喷射器; 变工况特性; 引射比; 热电联产

**[引用本文格式]** 魏德, 席新铭, 李健, 等. 耦合喷射器的高背压机组变工况特性研究[J]. 热力发电, 2022, 52(5): 107-114.  
WEI De, XI Xinming, LI Jian, et al. Study on off design characteristics of high back pressure unit coupled with ejector[J]. Thermal Power Generation, 2022, 52(5): 107-114.

## Study on off design characteristics of high back pressure unit coupled with ejector

WEI De<sup>1</sup>, XI Xinming<sup>2</sup>, LI Jian<sup>2</sup>, YANG Zhiping<sup>2</sup>, GE Zhihua<sup>2</sup>

(1. GD Power Datong Hudong Generation Co., Ltd., Datong 037043, China;

2. National Thermal Power Engineering & Technology Research Center, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Under the background of auxiliary heat supply of ejector, in order to study the characteristics of ejector under variable working conditions, the calculation methods of ejector at home and abroad are investigated, the ejector calculation model is established and coupled with the high back pressure unit. Moreover, the effects of working steam, ejected steam, ejector back pressure, and ejector opening on the performance of the ejector under variable working conditions are obtained. The results show that, when the working fluid pressure of the ejector changes from 0.25 MPa to 0.45 MPa, the mass flow of the working fluid first increases and then decreases, and the ejector has the best performance at the design working steam pressure. The critical back pressure increases with the steam injection pressure. The pressure of the mixed fluid after injection will not only affect the work of the ejector but also the work of the condenser. Compared with the back pumping unit, the minimum cooling flow of the low pressure cylinder of the high back pressure coupling injector unit can be reduced by 140 t/h and the power supply range can be increased by 43 MW.

**Key words:** ejector; off design characteristics; ejection ratio; cogeneration

为进一步提高热电联产机组经济性, 实现能量的梯级利用, 高背压耦合喷射器应运而生。该系统能够实现能量的梯级利用, 具有明显的节能效果, 因此近年来将其用于机组热电联产成为当下新兴的一种供热方式<sup>[1]</sup>。

喷射器应用于热电联产主要有 2 种方式: 一是利用喷射器式热泵; 另一种则是直接利用喷射器引射低压蒸汽。针对前者, 康丽莎<sup>[2]</sup>提出利用喷射式热泵回收热电厂循环冷却水中低温余热, 并将回收热量应用于城市集中供热系统。王远超<sup>[3]</sup>在热力站

收稿日期: 2022-09-28 网络首发日期: 2022-11-03

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFB0606202)

Supported by: National Key Research and Development Program (2020YFB0606202)

第一作者简介: 魏德 (1969), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为火电机组节能运行及管理、风电场安全及运行管理, 15034224128@163.com。

增设喷射式热泵系统来提高原一次网供热量降低一次网回水温度。李亚平<sup>[4]</sup>基于“等动量混合理论”提出了一种新的高效喷射器结构尺寸与型线设计方法和新型双段喷射式大温差换热系统的基本结构。针对后者,宋四明<sup>[5]</sup>建立了 $2\times 300\text{ MW}$ “高背压-喷射器-抽汽”三级加热供热机组模型,结合热网水在喷射器凝汽器内的温升曲线对系统进行优化。熊念<sup>[6]</sup>通过数值模拟和正交试验对喷射器结构进行设计优化,并对该系统进行经济性分析。孙博昭<sup>[7]</sup>通过可调式喷射器三维 CFD 模拟得到喷射器对机组热电解耦和增量发电的优势。Zhang 等人<sup>[8]</sup>将喷射器一维数学模型与热电联产系统结合,使乏汽利用率提高 20%。Liu 等人<sup>[9]</sup>对热电联产系统内喷射器的并联及两级串联的热力解耦性能和能耗进行了分析,为进一步提高热电联产系统的经济性和灵活性提供了借鉴。

在喷射器的理论计算方面,Kennan 等人<sup>[10]</sup>基于连续性方程、动量守恒、能量守恒和理想气体动力学理论,提出了 2 种喷射器的概念,即等压混合喷射器<sup>[11]</sup>和等面积混合喷射器。Munday 等人<sup>[12]</sup>对等压混合理论进行改进,提出了“临界截面”的概念。台湾大学的 Huang 等人<sup>[13-14]</sup>针对临界截面进行了进一步的理论研究,将喷射器分为 3 种工作模式,并通过大量实验验证了该模型的准确性<sup>[15]</sup>。Cizungu 等人<sup>[16]</sup>建立了喷射器一维计算模型,并采用不同的工质对喷射器性能进行验证。祝银海<sup>[17-18]</sup>为二维圆管喷射器提出临界圆的概念替代临界截面,并建立了准二维计算模型,采用实际气体的性质进行计算。Chen 等人<sup>[19]</sup>提出了一种基于实际气体性质的全工况理论计算方法,并对其计算结果与 Huang 等人的实验模型进行验证,说明其在临界模式和亚临界模式下均具有较高的精度。Liu 等人<sup>[20]</sup>对 Huang 等人的模型进行简化,提高了固定式喷射器的性能计算效率。Eames 等人<sup>[21]</sup>提出采用速度系数来预测喷射器性能的方式。Zhang 等人<sup>[22]</sup>研究了摩擦损失对喷射器效率的影响,拟合了等截面混合室和扩压室的摩擦损失系数与对喷射器的效率的函数关系。Tang 等人<sup>[23]</sup>主要研究了混合室效率对喷射器性能的影响。Galanis 等人<sup>[24]</sup>加入了等截面混合室的长度对其损失系数的影响,对临界模式下的喷射器性能做出了更加准确的预测。索科洛夫等人<sup>[25]</sup>提出基于动量守恒的气体动力函数法,在大量实验的基础上,根据流动的基本方程和一维半经验近似公式对

喷射器的结构和性能进行计算。

目前,国内已有众多机组进行高背压供热改造,为喷射器的应用创造了条件。虽然我国对喷射器热电联产应用的研究较少,但由于其在节能减排方面的巨大作用、相对较低的成本和维护费用,已有多家电厂开始引入喷射器并显示出较好的节能效果。

本文针对目前新兴的耦合喷射器供热方式,以一维等压混合理论为基础,建立可调式喷射器的变工况数学模型,对喷射器的变工况特性进行详细分析。然后将喷射器模型引入高背压供热机组,对其与抽背机组进行对比分析,验证其供热供电优势。

## 1 研究对象

喷射器是一种增压混合装置,通过工作流体与引射流体的混合实现对引射流体的升压作用,能够实现能量梯级利用。高背压乏汽供热技术的逐渐成熟为利用喷射器实现对高背压乏汽的升压创造了条件。鉴于喷射器显著的节能减排效果,近年来开始逐步应用于热电联产领域。

喷射器的结构较为简单,一般包括工作喷嘴(拉法尔喷管)、吸入室、等截面混合室和扩压管 4 个部分。对于可调式喷射器,则在工作喷嘴的喉部增加 1 个调节锥,结构示意图如图 1 所示。通过改变调节锥与工作喷嘴喉部的相对位置,便可以控制通过喷嘴的工作流体的流量,从而改变喷射器的工作状态。

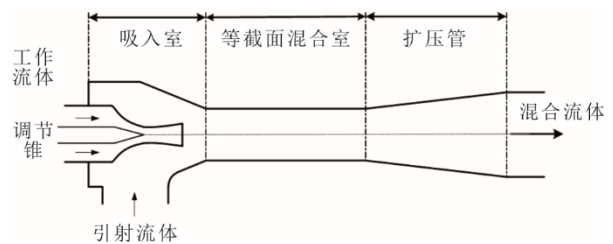


图 1 可调式喷射器结构示意图  
Fig.1 Structural diagram of the adjustable injector

在耦合喷射器高背压热电联产系统中,汽轮机的高背压乏汽得到了有效利用,其中一部分排汽直接进入高背压凝汽器,对热网回水进行一次加热;还有一部分被工作蒸汽卷吸进入喷射器形成中压蒸汽,对热网回水进行二次加热。工作蒸汽的汽源一般为中压缸排汽,最终加热不足的部分由抽汽进行尖峰加热。在这个过程中,汽轮机排汽的汽化潜热利用的越多,就能减少越多的高品质抽汽,喷射器的节能效果就越好。除此之外,喷射器作为一种

混合升压装置，其升压性能越好。排出的混合蒸汽的压力越高，在相同的加热器端差下就可以将热网回水加热到更高的温度。因此，在耦合喷射器高背压热电联产系统中，必须全面考虑喷射器的引射性能和升压性能，才能对喷射器的性能做出较为全面的评价。

喷射器的引射性能常用引射比来表示。引射比  $u$  定义为引射流体的质量流量与工作流体质量流量的比值：

$$u = \frac{m_s}{m_p} \quad (1)$$

式中： $m_s$  为引射流体的质量流量，kg/s； $m_p$  为工作流体的质量流量，kg/s。

喷射器的升压性能常用压缩比来表示。压缩比  $e$  定义为混合流体的出口静压力与引射流体的静压力的比值：

$$e = \frac{p_c}{p_s} \quad (2)$$

式中： $p_c$  为混合流体的出口静压力，MPa； $p_s$  为引射流体静压力，MPa。

对于给定参数的工作流体和引射流体，喷射器具有临界模式、亚临界模式和回流模式 3 种不同的运行模式（图 2）。

## 2 研究方法

### 2.1 耦合喷射器的热电联产机组模型

在热电联产系统中，供热机组作为热源，对其运行状态进行优化以实现节能降耗，以实现“源网协同”的目标。选取某电厂 330 MW 一次再热亚临界直接空冷抽汽供热机组为案例机组，其型号为

CZK330/261-16.7/0.5/537/537，回热系统配置为“三高三低一除氧”。机组的基本配置见表 1，机组模型如图 3 所示，模型校核见表 2。喷射器有关参数见表 3、表 4。

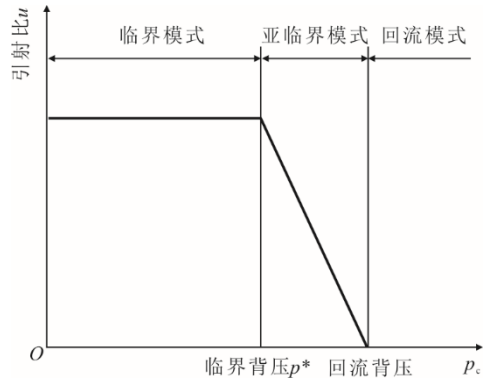


图 2 喷射器运行模式  
Fig.2 Operation mode of the injector

表 1 330 MW 供热机组基本参数  
Tab.1 Basic parameters of a 330 MW heating unit

项目	数值	项目	数值
额定功率/MW	330	再热蒸汽温度/℃	537
主蒸汽压力/MPa	16.670	额定抽汽压力/MPa	0.500
主蒸汽温度/℃	537	额定抽汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	570.0
主蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 037.1	安全运行背压/kPa	30.0
再热蒸汽压力/MPa	3.599	额定排汽压力/kPa	13.6

为验证该理论模型的可用性，本文利用 Python 软件调用 NIST 数据库对上述计算方法进行编程，并对文献[4,13,17]中的 65 组工况进行计算，将计算结果与文中的数据进行验证对比，对比结果如图 4 所示。从图 4 可以看出，本文计算结果与文献中数据的相对误差均在 ±15% 以内，因此认为通过本文计算模型对喷射器的性能计算较为准确。

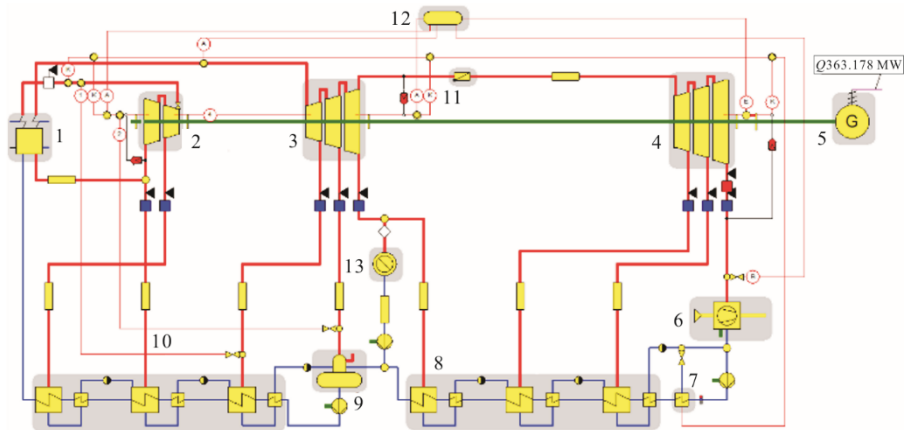


图 3 机组模型  
Fig.3 Schematic diagram of the unit model

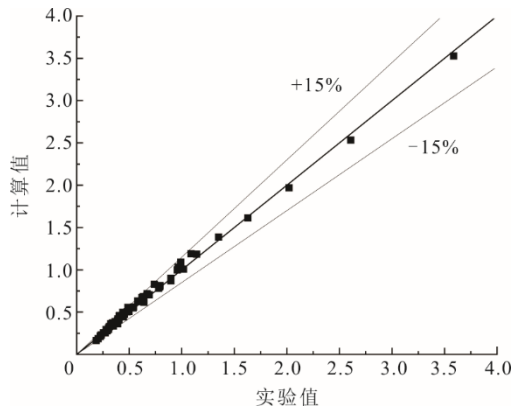


图4 喷射器理论计算结果验证

Fig.4 Verification of theoretical calculation results of the injector

表2 模型校核  
Tab.2 Model verification

工况	实际功率/MW	模拟功率/MW	相对误差/%
TMCR	351.711	353.198	0.423
100%THA	330.025	330.728	0.213
90%THA (定压)	297.028	295.969	0.356
80%THA (滑压)	264.006	262.521	0.562
75%THA (滑压)	247.523	245.958	0.632
50%THA (滑压)	165.046	164.388	0.398
40%THA (滑压)	132.031	131.996	0.027
30%THA (滑压)	99.042	98.541	0.506
额定抽汽工况	261.293	260.982	0.119

表3 喷射器几何结构参数  
Tab.3 Geometry parameters of the ejector

项目	数值/mm
工作喷嘴喉部直径/mm	308
工作喷嘴出口直径/mm	419
工作喷嘴长度/mm	2 218
调节锥顶角/(°)	60
等截面混合室直径/mm	1 018
混合室长度/mm	6 650
扩压管出口直径/mm	2 413
扩压管长度/mm	7 270

表4 喷射器设计工况参数  
Tab.4 Parameters of the injector under design operating condition

项目	压力/MPa	温度/°C
工作蒸汽	0.300	270.0
引射蒸汽	0.030	69.1
混合蒸汽	0.054	84.0~180.0

## 2.2 喷射器理论计算模型

自等压混合理论提出以来,已有众多学者对其进行改进和丰富,但大多基于理想气体定律,通过理论计算获得喷射器临界状态下的性能,能够计算

喷射器在亚临界状态下的性能则很少见。另外,由于水蒸气的气体性质与理想气体有很大不同,若采用理想气体定律计算会造成较大误差。因此本文采用 Chen 等人<sup>[54]</sup>建立的喷射器全工况计算模型,并采用实际气体的性质进行计算。对于水蒸气的气体性质,可采用水和水蒸气热力学性质计算公式 IAPWS97 或通过调用 NIST 数据库得到。

喷射器虽然结构简单,但是内部流场极为复杂,因此为简化计算,采用以下假设条件:

- 1) 假设喷射器内流场为一维稳态流动;
- 2) 忽略流场与喷射器壁面之间的传热;
- 3) 假设喷射器内的引射流体为饱和蒸汽或微过热蒸汽,忽略工作流体与引射流体的入口流速;
- 4) 假设在喷射器的临界截面  $y$  之前,2股流体的流动是独立的,在不同的喷射器工作模式下,它们在  $y$  截面开始等压混合。

对于可调式喷射器,其变工况主要依靠工作喷嘴喉部的调节锥位置改变喷射器的开度来实现。喷射器变工况计算流程如图5所示。

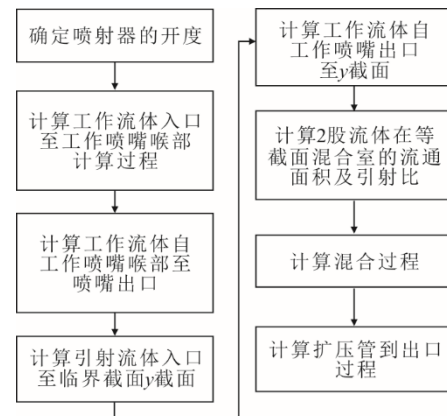


图5 喷射器性能计算流程

Fig.5 Flow chart for the injector performance calculation

## 3 结果分析

### 3.1 工作蒸汽压力对喷射器性能的影响

根据机组和喷射器的实际运行情况,选取压力为 0.25~0.45 MPa (以 0.025 MPa 为步长)、温度为 270 °C 的过热蒸汽作为工作蒸汽, 30 kPa 的饱和蒸汽作为引射蒸汽,喷射器背压为 54 kPa,喷射器开度为 100%,在不同的工作蒸汽压力下,喷射器的变工况性能如图6所示。从图6可以看出,随着工作蒸汽压力从 0.25 MPa 逐渐提高至 0.45 MPa,喷射器的临界背压从 48.3 kPa 升高到 71.0 kPa,工作蒸汽的质量流量从 83 t/h 增加至 150 t/h,引射蒸汽质

量流量与引射比先增加后减少,混合蒸汽质量流量从 120 t/h 提升至 229 t/h。这是因为工作蒸汽的压力提高,与引射蒸汽混合后混合蒸汽的能量品质也相应提高,克服背压的能力变强,因此其临界背压升高,同时工作蒸汽压力的提高增加了其密度,而速度几乎不变,因此工作流体的质量流量不断增加。当工作蒸汽压力为 0.3 MPa 时,引射蒸汽的质量流量最大,从乏汽利用最大化的角度来看,则在运行过程中应当保持工作蒸汽压力为 0.3 MPa。

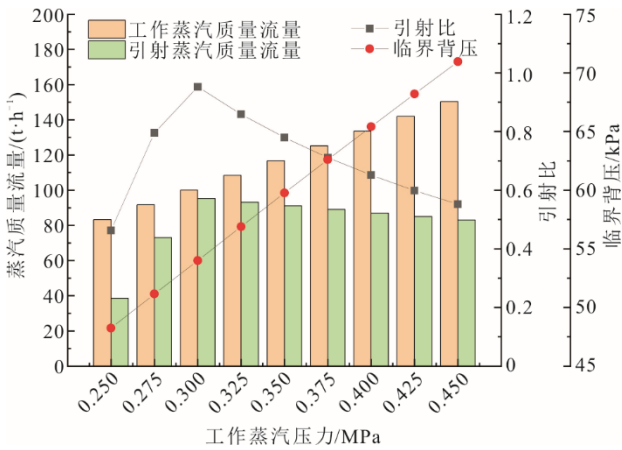


图 6 喷射器性能与工作蒸汽压力的关系  
Fig.6 Relationship between the ejector performance and the working steam pressure

### 3.2 引射蒸汽压力对喷射器性能的影响

虽然汽轮机设计安全运行背压为 30 kPa,但是当机组负荷较高时,其安全运行背压也会相应提高,其理论最高安全背压甚至可达 55 kPa。冬季需要一定量的采暖抽汽,其运行背压一般为 10~40 kPa,低于 20 kPa 的乏汽几乎没有引射价值,因此选取压力为 0.3 MPa、温度为 270 °C 的过热蒸汽作为工作蒸汽,20~40 kPa (以 2.5 kPa 为步长) 的饱和蒸汽作为引射蒸汽,喷射器背压为 54.0 kPa,喷射器开度为 100%。

在不同的引射蒸汽压力下喷射器的变工况性能如图 7 所示。从图 7 可以看出,随着引射蒸汽压力从 20 kPa 提高至 40 kPa,喷射器的临界背压从 47.3 kPa 提高至 60.4 kPa,工作蒸汽质量流量维持在 101 t/h 不变,引射蒸汽质量流量从 14 t/h 增加至 134 t/h,混合蒸汽的质量流量从 115 t/h 增加至 235 t/h。这是因为引射蒸汽的能量品质提高,与工作蒸汽混合后,混合蒸汽也具有更高的能量从而可以克服更高的背压。由于工作蒸汽压力一直不变且处于壅塞状态,因此工作蒸汽的质量流量不变。当

引射蒸汽压力高于 30 kPa 时,喷射器的运行背压低于其临界背压,喷射器处于临界运行模式,2 股蒸汽均处于壅塞状态。随着引射蒸汽压力的提高,引射蒸汽的密度增大,而其速度几乎不变,有更多的引射流体进入混合室,引射流体的质量流量增大,引射比随引射蒸汽压力的提高逐渐增加。当引射蒸汽低于 30 kPa 时,喷射器运行背压高于临界背压,喷射器处于亚临界运行模式,引射蒸汽的壅塞状态消失。但是由于运行背压不变,混合室的压力也几乎不变,随着引射蒸汽压力的降低,密度减小,引射蒸汽与混合室的压差减小,无法膨胀至音速,因此引射蒸汽的质量流量迅速减少,引射比随引射蒸汽压力的降低迅速减小。

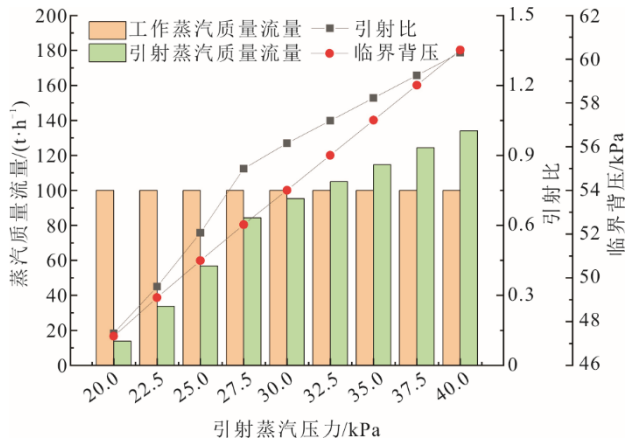


图 7 喷射器性能与引射蒸汽压力的关系  
Fig.7 Relationship between the ejector performance and the ejected steam pressure

### 3.3 喷射器背压对喷射器性能的影响

选取压力为 0.3 MPa,温度为 270 °C 的过热蒸汽作为工作蒸汽,15~40 kPa (以 5 kPa 为步长) 的饱和蒸汽作为引射蒸汽,喷射器开度为 100%,在不同喷射器背压条件下的引射比如图 8 所示。

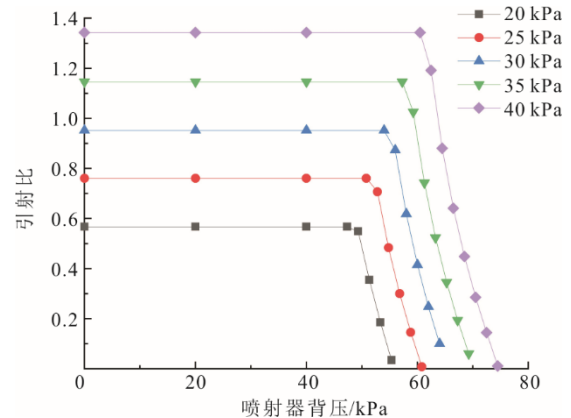


图 8 引射比与喷射器背压的关系曲线  
Fig.8 Relation curves between the injection ratio and the back pressure

由图8可以看出,在不同的引射蒸汽压力下,当喷射器背压低于临界背压时,工作蒸汽和引射蒸汽均处于壅塞状态,引射比保持不变,达到临界背压后喷射器的性能迅速下降,直至喷射器无法正常工作,引射比降至0。

自喷射器流出的混合蒸汽进入喷射器凝汽器进行供热,此时凝汽器的压力即为喷射器的运行背压。这不仅会影响喷射器的性能,也直接决定了凝汽器的运行状态。一般情况下,凝汽器的压力越高,对热网水温度的提升作用越大,因此保证凝汽器在喷射器的临界背压下工作既有利于保证喷射器的性能,也能使凝汽器的热负荷得到最大化。

### 3.4 喷射器开度对喷射器性能的影响

热电联产系统实际运行过程中,受制于凝汽器的换热能力及热网水条件,当进入凝汽器的蒸汽量过多时凝汽器无法及时完成换热过程,导致凝汽器内压力升高,进而抬高喷射器背压,直接影响喷射器的性能。因此需根据实际热负荷不断调整喷射器开度以改变混合蒸汽量。选取压力为0.3 MPa、温度为270℃的过热蒸汽作为工作蒸汽,30 kPa的饱和蒸汽作为引射蒸汽,不同开度条件下的引射比如图9所示。

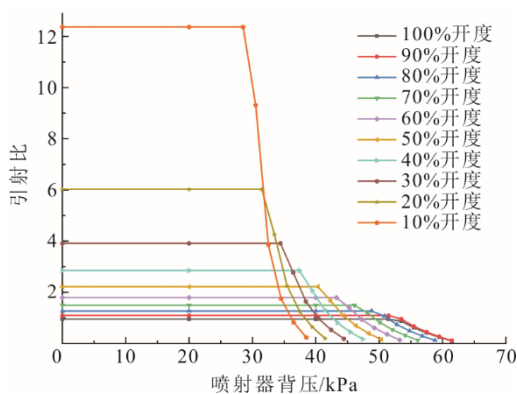


图9 引射比与喷射器开度的关系曲线

Fig.9 Relationship curves between the injection ratio and the opening

由图9可以看出:随着喷射器开度从100%降至10%,引射比从0.95迅速增大至12.4,但是其临界背压从54 kPa降低至28.5 kPa;当喷射器开度降到20%时,喷射器临界背压为31.5 kPa,对引射蒸汽的升压作用已经很小;当喷射器开度降到10%时,喷射器临界背压降低至28.5 kPa,虽然此时引射比高达12.4,但是已经无法实现对引射蒸汽的升压作用。

临界运行模式下喷射器性能与喷射器开度的关系如图10所示。由图10可以看出,随着喷射器开度从20%提升至100%,喷射器的临界背压从31.5 kPa逐渐提升至54 kPa,引射比从6.03降低至0.95,工作蒸汽质量流量从20 t/h提升至101 t/h,引射蒸汽质量流量从120 t/h降低至97 t/h。这是因为工作蒸汽质量流量与喷射器开度成正比关系,随着喷射器开度的增大,工作蒸汽质量流量增加,在等截面混合室中不断压缩引射蒸汽的流通空间,因此引射蒸汽的质量流量不断减少,引射比随喷射器开度的增大而减小。由于混合蒸汽中工作蒸汽的占比不断增加,因此混合蒸汽具有更高的能量可以克服背压,临界背压随着喷射器开度的增大而提高。

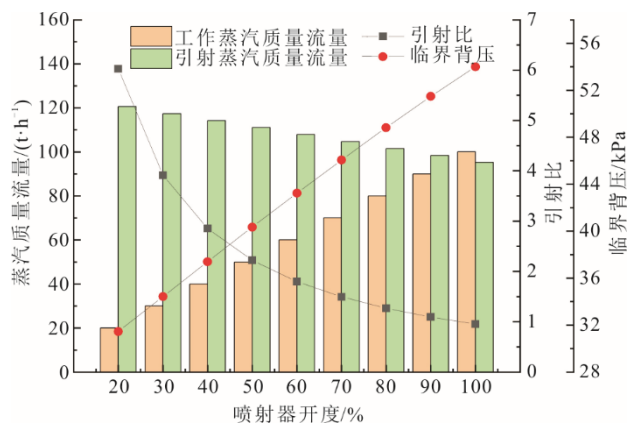


图10 喷射器性能与喷射器开度的关系

Fig.10 Relationship between the injector performance and the opening

### 3.5 耦合喷射器机组电负荷范围

与抽背机组相比,耦合喷射器机组在相同热负荷条件下可以利用更少的抽汽,因此喷射器对于抽背机组具有一定的热电解耦功能。为明确耦合喷射器机组在实际供热情况下的整个热负荷变化范围内的电负荷运行范围,则必须要确定机组达到对应热负荷条件下的最小主蒸汽流量。在保证各环境温度热负荷条件下对机组进行变工况计算,同时保证低压缸排汽流量达到最小冷却流量或主蒸汽流量达到锅炉最小蒸发量,得到各环境温度条件下的耦合喷射器机组最小主蒸汽流量如图11所示。由图11可以看出:当环境温度高于2.2℃时,喷射器不投运,因此喷射器与抽背机组的背压运行方式相同,其最小主蒸汽流量也相同;而当环境温度低于2.2℃时,喷射器开始投运,并且随着环境温度的降低,在相同热负荷下喷射器机组可以减少更多的抽汽使用,因此可以在更小的主蒸汽流量下运行。

与抽背机组相比,喷射器机组最多可以减少 101 t/h 抽汽的使用,但是将其带入到整个机组热力系统中,最小主蒸汽流量最多可以减少 140 t/h。

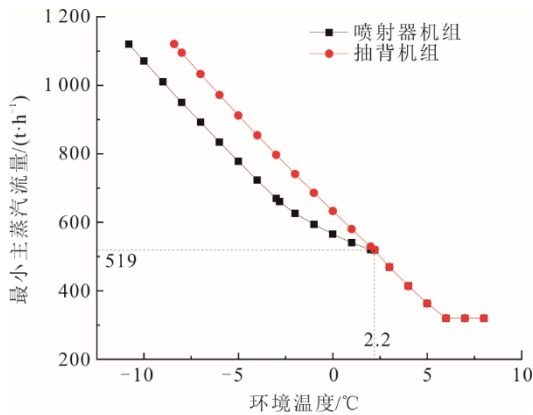


图 11 耦合喷射器机组与抽背机组不同热负荷下的最小主蒸汽流量对比

Fig.11 The minimum main steam flow of the coupled ejector unit and the back pumping unit at different heat loads

在对应的运行方式下分别对机组的最大主蒸汽流量和最小主蒸汽流量进行变工况计算,可求得机组在各环境温度条件下的电负荷范围如图 12 所示。从图 12 可以看出:环境温度降低,供热需求上升,热电联产机组供电能力受热负荷影响下降;当环境温度高于 2.2 °C 时,喷射器机组与抽背机组电负荷范围相同;而当环境温度低于 2.2 °C 时,喷射器机组的电负荷运行范围要明显大于抽背机组。以典型温度 -5 °C 为例,喷射器机组的电负荷运行范围为 206.6~309.2 MW;而抽背机组的电负荷运行范围为 236.5~296.1 MW,可运行范围增加了 43.0 MW,其中电负荷上限提高了 13.1 MW,下限降低了 29.9 MW,说明喷射器对实现高背压供热机组的热电解耦具有较好的效果。

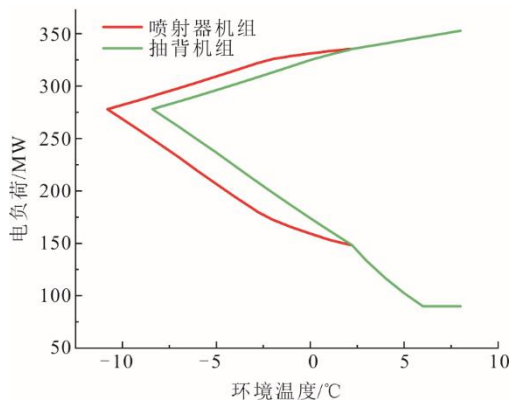


图 12 喷射器机组与抽背机组电负荷范围对比

Fig.12 Comparison of electric load range between the ejector unit and the back pumping unit

## 4 结 论

本文对喷射器的相关计算进行调研,建立喷射器的计算模型,在模型的基础上耦合热电联产机组对喷射器工作蒸汽压力、引射蒸汽压力、喷射器背压以及喷射器开度对喷射器性能的影响进行研究,为喷射器变工况计算提供参考。主要结论如下:

1) 喷射器从亚临界状态变化到临界状态,引射蒸汽能力先变大后变小,为保证喷射器运行在最佳状态工作蒸汽压力应维持临界点压力。

2) 引射蒸汽压力越高,引射比越大,引射比随引射蒸汽压力的降低迅速减小。

3) 保证凝汽器在喷射器的临界背压下工作既有利于保证喷射器的性能,也能使凝汽器的热负荷得到最大化。

4) 喷射器开度增大,工作蒸汽质量流量增加,引射蒸汽的质量流量不断减少,引射比随喷射器开度的增大而减小,临界背压随着喷射器开度的增大而提高。

5) 耦合喷射器机组相比抽汽机组在相同外界负荷条件下,供电能力更强,供热约束更小,表明喷射器具有提升机组热电解耦的能力。

### [参 考 文 献]

- [1] 杨志平,宋四明,李维,等.耦合喷射器热电联产系统设计及运行优化[J].中国电机工程学报,2020,40(9):2942-2951.  
YANG Zhiping, SONG Siming, LI Wei, et al. Design and operation optimization of combined heat and power system coupling with ejector[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2942-2951.
- [2] 康丽莎.基于喷射式热泵的新型集中供热系统研究[D].大连:大连理工大学,2012:1.  
KANG Lisha. Research for a new style of district heating system based on ejector heat pumps[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012: 1.
- [3] 王远超.喷射式热泵强化集中供热的新型系统研究[D].大连:大连理工大学,2013:1.  
WANG Yuanchao. Study of an innovative ejector heat pump-boosted district heating system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013: 1.
- [4] 李亚平.大温差换热系统能量转换机理与应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019:1.  
LI Yaping. Research and application of energy conversation mechanism in large-temperature-drop heat exchange system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 1.
- [5] 宋四明.耦合蒸汽喷射器热电联产系统建模及优化[D].北京:华北电力大学,2019:1.  
SONG Siming. Modeling and optimization of combined heat and power system coupling with steam ejector[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019: 1.
- [6] 熊念.蒸汽引射器数值模拟与结构优化[D].北京:华

- 北电力大学, 2021: 1.  
XIONG Nian. Numerical simulation and structure optimization of steam ejector[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021: 1.
- [7] 孙博昭. 350 MW 超临界机组可调式蒸汽喷射器工业供热应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021: 1.  
SUN Bozhao, Research on industrial heating application of adjustable steam ejector in 350 MW supercritical unit[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021: 1.
- [8] ZHANG Y J, XIONG N, GE Z H, et al. A novel cascade heating system for waste heat recovery in the combined heat and power plant integrating with the steam jet pump[J]. *Applied Energy*, 2020, 278: 115690.
- [9] LIU M M, LIU M, WANG Y, et al. Thermodynamic optimization of coal-fired combined heat and power (CHP) systems integrated with steam ejectors to achieve heat-power decoupling[J]. *Energy*, 2021, 229: 120707.
- [10] KEENAN J H, NEUMANN E P. A simple air ejector[J]. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1942, 9(2): A75-A81.
- [11] KEENAN J H, NEUMANN E P, LUSTWERK F. An investigation of ejector design by analysis and experiment[J]. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1950, 72: 299-309.
- [12] MUNDAY J, BAGSTER D. A new ejector theory applied to steam jet refrigeration[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1977, 16(4): 442-449.
- [13] HUANG B J, JIANG C B, HU F L. Ejector performance characteristics and design analysis of jet refrigeration system[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1985, 107(3): 792-802.
- [14] HUANG B J, CHANG J M. Empirical correlation for ejector design[J]. *International Journal of Refrigeration*, 1999, 22(5): 379-388.
- [15] HUANG B J, CHANG J M, WANG C P, et al. A 1-D analysis of ejector performance[J]. *International Journal of Refrigeration*, 1999, 22(5): 354-364.
- [16] CIZUNGU K, MANI A, GROLL M. Performance comparison of vapour jet refrigeration system with environment friendly working fluids[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2001, 21(5): 585-598.
- [17] 祝银海. 基于临界圆的二维喷射器模型构建及流动机理研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2009: 1.  
ZHU Yin Hai. Two-dimensional modeling investigation and flow mechanism analysis of ejectors based on shock circle definition[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2009: 1.
- [18] ZHU Y H, LI Y Z. Novel ejector model for performance evaluation on both dry and wet vapors ejectors[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2008, 32(1): 21-31.
- [19] CHEN W X, SHI C Y, ZHANG S P, et al. Theoretical analysis of ejector refrigeration system performance under overall modes[J]. *Applied Energy*, 2016, 185: 2074-2084.
- [20] LIU J P, WANG L, JIA L. A predictive model for the performance of the ejector in refrigeration system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 150: 269-276.
- [21] EAMES I W, APHORNRATANA S, HAIDER H. A theoretical and experimental study of a small-scale steam jet refrigerator[J]. *International Journal of Refrigeration*, 1995, 18(6): 378-386.
- [22] ZHANG H L, WANG L, JIA L, et al. Assessment and prediction of component efficiencies in supersonic ejector with friction losses[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 129: 618-627.
- [23] TANG Y Z, LIU Z L, LI Y X, et al. Study on fundamental link between mixing efficiency and entrainment performance of a steam ejector[J]. *Energy*, 2021, 215: 119128.
- [24] GALANIS N, SORIN M. Ejector design and performance prediction[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, 104: 315-329.
- [25] E R 索科洛夫, H M 津格尔. 喷射器[M]. 黄秋云, 译. 北京: 科学出版社, 1977: 1.  
SOKOLOV E R, ZINGER H M. Ejector[M]. HUANG Qiuyun, translated. Beijing: Science Press, 1977: 1.

(责任编辑 刘永强)