文章编号:1674-7607(2026)10-0115-09 DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.250462

CAES 系统中可调式喷射器高背压增效引射效果研究

文贤馗[1]， 王 维[2]， 张世海[1]， 周 科[1]， 曾栋坪[2]
(1. 贵州电网电力科学研究院，贵州贵阳 550002；
2. 长沙理工大学 能源与动力工程学院，湖南长沙 410114)

摘 要：针对在建的 10 MW 压缩空气储能(CAES)示范系统工程，基于计算流体力学模拟分析了可调式喷射器的内部流动特性和能耗分布特征，依据实际运行工况明确了乏气有效吸入方式，并开展喷嘴距、储气罐工作压力及喷针进程对可调式喷射器引射效果的影响研究。结果表明，在高背压工况下，喷射器通过中心喷嘴吸入乏气的方式可以回收压能，喷嘴距通过影响喷射器内部流场的能耗而制约其引射性能，在喷嘴距为 22.5 mm 时，引射进入透平做功的乏气质量流量最大为 2.65 kg/s。同时，可调式喷射器的引射比随着工作压力的降低呈现先升高后降低的趋势，且随喷针进程的减小而增大，当工作压力为 9.0 MPa 时，引射比最大为 11.4%。

关键词：压缩空气储能系统；可调式喷射器；数值模拟；增效引射；高背压工况
中图分类号:TK14 **文献标志码**:A **学科分类号**:480.40

Study on Enhanced Ejection Effect of Adjustable Ejector Under High Back Pressure in CAES Systems

WEN Xiankui[1], *WANG Wei*[2], *ZHANG Shihai*[1], *ZHOU Ke*[1], *ZENG Dongping*[2]
(1. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co, Guiyang 550002, Guizhou Province,
2. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan Province, China)

Abstract: For the under-construction 10 MW compressed air energy storage (CAES) demonstration system, the internal flow characteristics and energy consumption distribution features of the adjustable ejector were analyzed based on computational fluid dynamics simulation. An effective exhaust gas suction method was determined according to the actual operating conditions, and the effects of nozzle spacing, air storage tank operating pressure and needle process on the ejection performance of the adjustable ejector were investigated. Results show that under high back pressure conditions, the ejector can recover pressure energy by sucking exhaust gas through the central nozzle. The nozzle spacing may restrict the ejection performance by affecting the energy consumption of the internal flow field of the ejector. When the nozzle spacing is 22.5 mm, the maximum mass flow rate of the exhaust gas ejected into the turbine for work is 2.65 kg/s.

收稿日期:2025-07-18 **修订日期**:2025-08-07
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2024YFE0208100)；贵州省科技创新人才团队资助项目(黔科合平台人才-CXTD[2022]008)；南方电网公司重点科技资助项目(GZKJXM20222304)
作者简介:文贤馗(1972—)，男，安徽巢湖人，教授级高级工程师，从事储能及新能源研究方面的工作。
曾栋坪(通信作者)，男，讲师，博士，E-mail：zengdp@csust.edu.cn。

Meanwhile, the ejection ratio of the adjustable ejector first increases and then decreases as the operating pressure reduces, and increases as the needle process decreases. When the operating pressure is 9.0 MPa, the maximum ejection ratio is 11.4%.

Key words: compressed air energy storage system; adjustable ejector; numerical simulation; enhanced ejection effect; high back pressure condition

在“双碳”背景下,降低能耗、提升能效已成为国家重点能源政策。压缩空气储能(CAES)系统以空气为能量载体进行储、释能的工作循环,其中存在储气罐中的空气介质经节流阀进入透平机组做功,完成能量的释放[1-2]。常规的节流阀可以调控空气的压力、流量,保障透平机组在设计工况下运行,而节流阀变开度调压的过程存在严重的压能损失[3-4]。为了减小能量耗散,本文选取可调式喷射器代替节流阀调控进入透平做功的空气状态,其利用工作气体的过余压能,引射透平内乏气进行二次做功的模式,有望降低节流压能损失、提高整体能效[5-6]。而在实际运行过程中,CAES 系统中的可调喷射器不仅要面对气源压力有限且背压较高的现状,还要灵活响应载荷变化,尽可能提高 CAES 系统的稳定性。因此,研究可调式喷射器在高背压工况下的性能表现,以及其为 CAES 系统增加的效益具有重要意义。

喷射器具有结构简单、制作容易的优势,但动力部件的缺失严重制约着喷射器的性能[7-8],国内外学者针对喷射器的结构参数、流场状态及引射性能开展了大量研究。方凯跃等[9]对喷射器的结构参数进行伴随优化,发现主喷嘴采用收敛段分段式外凸曲线的设计可以减小能耗、提高性能。陈洪杰等[10]对比不同形状混合室的喷射器性能,发现锥-柱形混合室熵产率更低,具有更佳的喷射系数。赵丽娟等[11]研究了喉径比、喷嘴位置及喷嘴结构对射流泵喷射性能的影响,发现喉径比为 2 的余弦喷嘴引射性能最好。张学进等[12]探究了喷射压缩器在不同压力下的激波特性,发现随着出口压力的增大,扩散器内的激波不断减小直至喷射器失效。王林等[13]采用数值仿真研究变工况条件对喷射器引射比的影响,发现喷射性能主要受主流体压力影响且随次流体温度的升高而线性增加。郭祚刚等[14]通过分析喷射器对 CAES 系统的影响规律,确定了喷射器最佳的工作参数。周升辉等[15]通过建立储能系统充能过程热动力学模型,发现喷射器通过引射低压空气可使系统提高堵塞裕度,改善系统性能。以上研究阐述了喷射器不同结构、工况对引射性能的影响规律及对储能系统性能的改善;但是,在 CAES 系统高背压工况下,喷射器的进气方式、变压力条件下喷射器的引射性能及可调式喷射器为系统增加的效益尚不明确。因此,针对 CAES 系统内可调式喷射器的引射性能和改进后 CAES 系统的出力情况还需进一步深入研究。

基于以上研究现状,本文针对在建的 10 MW CAES 示范系统,提出在储气罐与透平之间部署可调式喷射器的增效措施,并开展高背压工况下喷射器的吸入方式、喷嘴距、工作压力及喷针进程对引射性能的影响规律研究。首先,根据 CAES 系统的实际运行工况参数确定可调式喷射器中低压乏气的吸入方式,并探究不同喷嘴距条件下可调式喷射器内流场的能量耗散特征及引射性能;然后,开展不同工作压力和喷针进程条件下可调式喷射器的引射性能研究,明确工作压力和喷针进程对喷射器引射比的影响规律;最后,通过分析 CAES 系统释能过程中不同阶段的出力特性,分析可调式喷射器主动平衡负荷扰动的效果。

1 数值仿真理论及模型验证

1.1 控制方程

喷射器的工作介质空气是可压缩的,在变密度流的工作中,优选 Navier-Stokes 方程进行数值仿真计算。同时,由于采用了考虑黏性耗散的能量方程和真实的气体的状态方程,连续性方程、动量方程和能量方程的控制方程的变式如下。

连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{1}$$

动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E+p)]=\vec{\nabla}\cdot[u_j(\tau_{ij})] \tag{3}$$

$$\tau_{ij}=\alpha_{\text{eff}}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\mu_{\text{eff}}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij} \tag{4}$$

$$\rho=\frac{p}{RT} \tag{5}$$

式中：ρ 为密度，kg/m^3；t 为时间，s；p 为压力，Pa；τ_{ij} 为作用在法线方向 j 的微元面上，指向 i 方向的应力分量，N/m^2；E 为总能量，kJ；α_{eff} 为有效热导率，W/(m·K)；μ_{eff} 为动力黏度，Pa·s；δ_{ij} 为二阶单位张量；T 为温度，K；R 为理想气体常数，J/(kg·K)；x_i、x_j、x_k 分别对应笛卡尔坐标系中 x、y、z 方向的坐标分量；u_i、u_j、u_k 分别为流体在 x、y、z 方向的速度分量，m/s。

1.2　可调式喷射器物理模型

本示范工程中储气罐最大压力为 10.0 MPa，而进入透平机组的设计气体压力为 7.0 MPa，其在释能过程中通过高压工作气体引射透平做功后的乏气，回收工作气体的过余压力势能、提高透平入口流量，进而改善系统做功能力。根据 CAES 系统的运行要求，采用带喷针的可调式喷射器模型引射乏气，其中喷射器内流场速度、压力分布特征和可调喷针的位置对可调式喷射器的引射性能具有显著影响[16]。针对聚集态相同但压比较大的工作气体与被引气体，在 CAES 系统中采用 12 组并联的可调式喷射器引射低压乏气，调控进入透平的气体的流量和压力，其中喷射器的关键尺寸参数参考现有空气喷射器模型进行等比例缩放[17]，详见表 1。

表 1　喷射器关键尺寸参数

Tab. 1　Key dimensional parameters of ejector

参数	数值	参数	数值
喷嘴入口直径/mm	10.16	混合室直径/mm	8.12
喷嘴出口直径/mm	2.88	混合室长度/mm	64.83
喷嘴收缩角度/(°)	15	扩压室长度/mm	130.42
吸入室入口直径/mm	24.00		

图 1 为 CAES 系统释能过程及喷射器示意图。CAES 系统在释能过程中依据储气罐的压力水平分为定压运行阶段和滑压运行阶段：当储气罐压力充足时，阀门Ⅰ关闭，阀门Ⅱ打开，由储气罐进入喷射器的工作气体，通过流路 c 从透平中级引射低压乏气，在混合气体达到透平的预设压力后经由流路 b 进入透平做功，此时为定压运行阶段；当储气罐压力不足以通过喷射器引射乏气时，阀门Ⅰ打开，阀门Ⅱ关闭，从储气罐流出的工作气体经流路 a 进入透平做功，此时为滑压运行阶段。可调式喷射器采用由吸入室、混合室、扩压室组成的气体通道及吸入室中心喷嘴内的可移动喷针结构，可以通过引射乏气，降低节流损失[18]。

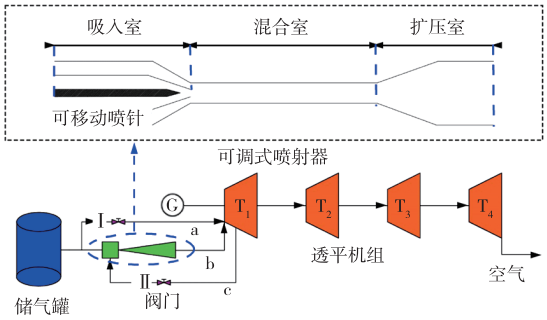


图 1　CAES 系统释能过程及喷射器示意图

Fig. 1　Schematic of energy release process and ejector of CAES system

1.3　网格划分及无关性验证

图 2 为可调式喷射器的网格模型，采用适应性较好的结构化网格划分方法将模型划分成二维轴对称流场网格，并对流道壁面处和中心轴线附近进行网格加密。采用喷射器 1/2 轴向截面进行网格划分，轴向为 x 向，径向为 y 向，原点在喷射器混合室入口处，左端外侧区域为工作气体。设置入口压力为 10.0 MPa；左端内侧区域为被引气体，设置入口压力为 5.4 MPa；右端为混合流体出口，设置背压为 7.0 MPa；环境温度统一设置为 373 K，壁面均设置为无滑移壁面。

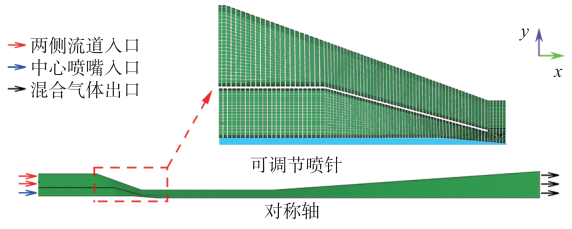


图 2　可调式喷射器的网格模型

Fig. 2　Mesh model of an adjustable ejector

喷射器出口处的质量流量对下游透平的出力能力影响显著，故加密喷射器出口处网格，将得到网格数为 98 762、147 858、199 754、248 764、310 568 的 5 种算例进行无关性验证。采用数值模拟软件 Fluent 2024 R2，根据现有研究，应用 Realizable k-ε 湍流模型对不同工况下喷射器内的气体混合和喷射过程进行模拟分析，可有效保证计算结果的准确性[19]。保持工作气体压力为 10.0 MPa，当射流流场计算收敛后，得到喷射器出口处质量流量随网格数量的变化（见图 3）。随着网格数量的增加，质量流量随之增大；当网格数量大于 25 万后，出口质量流量增幅渐缓。在满足计算精度的前提下，为节约计算时间成本，选择网格数为 248 764 的网格模型进行后续仿真分析。

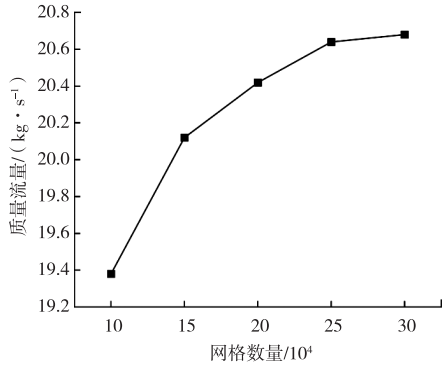


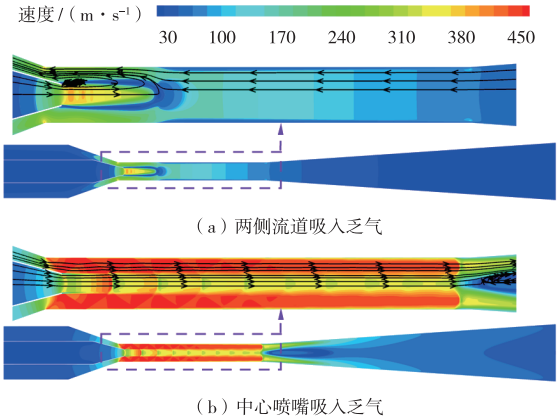
图 3 不同网格数量下出口质量流量计算结果

Fig. 3 Calculation results of outlet mass flow rate with different grid numbers

2 结果与分析

2.1 高背压工况乏气吸入方式

图 4 为喷射器通过不同方式吸入乏气时内部流场速度分布云图。当中心喷嘴为 10.0 MPa 的高压工作气体时，喷嘴出口存在局部高速区域并伴随有漩涡结构，且在喷射器混合室内出现明显的逆流现象。这是因为从喷嘴出口进入混合室的工作气体在出口高背压的阻碍作用下轴向速度逐渐减小至产生反向流动，此时喷射器失效。当中心喷嘴为 7.0 MPa 的低压乏气时，喷射器混合室的内部流场呈现两侧速度高、中心速度低的分布特征。这是因为中心的低压乏气在工作气体的裹携加速作用下克服喷射器出口背压，顺利进入透平做功。可见，通过中心喷嘴吸入乏气的方式能使喷射器在出口背压较高的工况下正常工作。



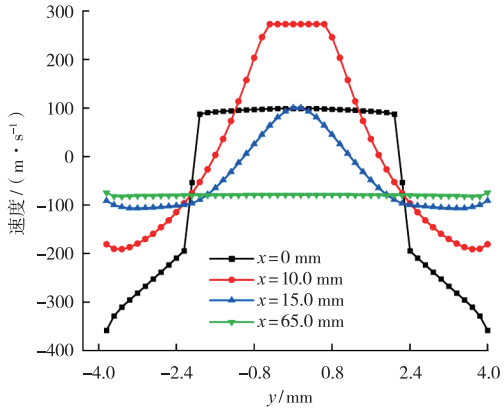
(a) 两侧流道吸入乏气

(b) 中心喷嘴吸入乏气

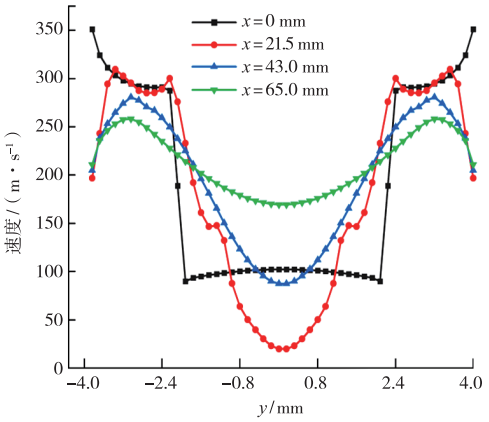
图 4 不同吸入方式内流场速度分布

Fig. 4 Velocity distribution in flow field with different inhalation modes

图 5 为喷射器通过不同方式吸入乏气时混合室内流场径向速度分布，以流向喷射器出口的方向为正方向进行分析。如图 5(a)所示，当中心喷嘴通入高压工作气体，从两侧吸入低压乏气时，混合室的入口 $x=0$ mm 处中心和两侧的气体呈现相反的流动方向，其中，在 $y=-1.8\sim1.8$ mm 的气体速度集中在+98.76 m/s，而区间外的气体速度跃变且方向相反，贴壁处的速度最大为−351.43 m/s。进入混合室的工作气体发展形成湍流核心区后，在出口高背压的作用下工作气体的速度迅速衰减，在混合室出口 $x=65.0$ mm 处速度降低为−75.0 m/s。靠近混合室边缘的气体完全逆流，由于中心喷嘴的工作气体在混合室的发展过程中通过接触作用抑制了逆流，进而在混合室入口 $x=0$ mm 处形成了速度脱离的现象，即近壁面端与中心区域速度方向相反。



(a) 两侧吸入乏气



(b) 中心吸入乏气

图 5 喷射器内流场径向速度分布

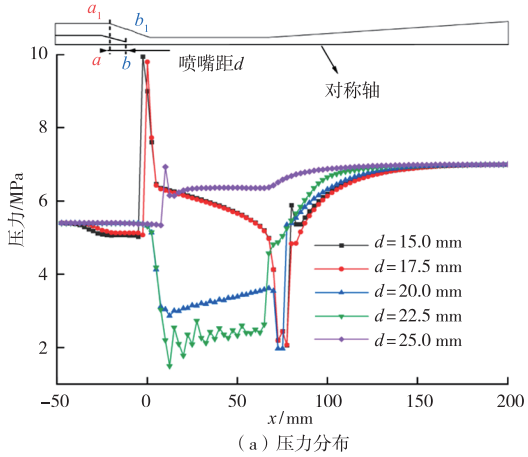
Fig. 5 Radial velocity distribution in flow field inside the ejector

如图 5(b)所示，当通过中心喷嘴吸入乏气时，整个喷射器内的气体均为正向流动，且中心喷嘴出口 $x=0$ mm 处的乏气速度(101.32 m/s)远小于两侧工作气体速度(315.46 m/s)；速度不同的气体由于剪切作用在混合室中发生动量传递，沿着混合室的出口方向逐渐形成了周向速度分布更均匀的混合

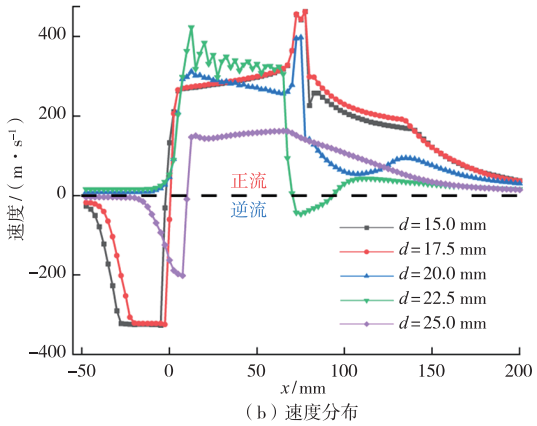
气体，在混合室出口的 $x=65.0$ mm 处，混合气体的速度分布趋势比较平缓，其速度最大差值缩小至 80.00 m/s。喷射器中心喷嘴的乏气在四周工作气体的裹挟加速作用下，顺利进入扩压室，并将动能有效转化为压力势能，最终通过喷射器出口进入透平做功。可见，针对 CAES 系统喷射器出口高背压而气源压力有限的运行工况，采用中心喷嘴吸入乏气的方式可有效进行能量再利用。

2.2　喷嘴距对引射性能的影响

图 6 为不同喷嘴距对喷射器内流场中心轴线气体压力的影响，喷射器内喷嘴出口截面（a_1-a）与混合室入口截面（b_1-b）之间的距离称为喷嘴距，记为 d。如图 6(a)所示，由于采用相同边界条件设置，5 组不同模型轴线首尾两端压力相同，但是喷嘴距不同，导致中间段轴线处的气体压力呈现明显不同的变化规律。d 为 20.0、22.5 mm 的喷射器在喷嘴出口均出现局部低压区域，引射气体可以通过喷嘴被正常引射，其中 d 为 22.5 mm 的喷射器喷嘴出口压力更低且伴随有明显的激波现象。同时，d 为15.0、17.5 mm的喷射器在喷嘴出口压力迅速升高到 10.0 MPa 附近。这是因为喷嘴出口过于靠前，此时工作气体未能充分加速形成低压区。d 为 25.0 mm 的喷射器在喷嘴出口压力达到极值（6.9 MPa），这是因为喷嘴位置靠后，围绕喷嘴出口的工作气体受出口高背压的影响使速度衰减，喷嘴出口形成局部高压区。



（a）压力分布



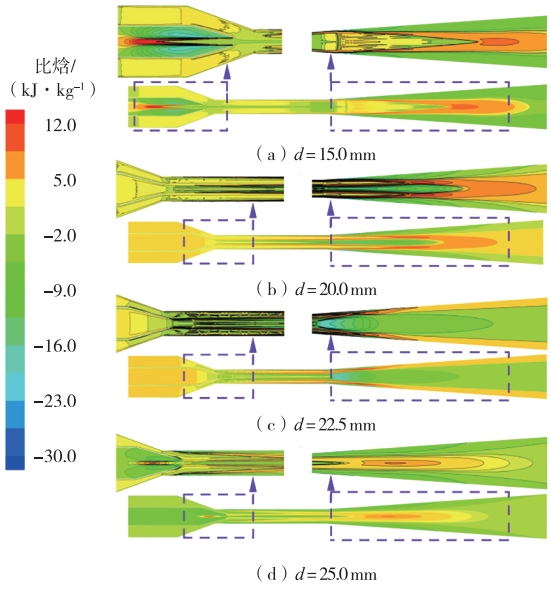
（b）速度分布

图 6　中心轴线内流场特征参数

Fig. 6　Characteristic parameters of flow field in the centre axis

如图 6(b)所示，在 d 为 20.0、22.5 mm 的工况下，中心喷嘴出口的乏气在工作气体的携带下速度迅速升高。其中：$d=22.5$ mm 时，由于速度较大，在混合室段出现明显的激波现象，工作气体通过激波混合层携带加速中心乏气；而 d 为 15.0、17.5 和 25.0 mm 的喷嘴均出现不同程度的局部回流现象。d 为 25.0 mm 时，喷嘴出口受喷射器背压影响较大，导致出现微弱的局部回流现象，而其他 2 组产生显著局部回流的原因是工作气体发展不充分，喷嘴出口压力大。由此可见，喷嘴距太大或太小都会因喷嘴出口压力较大造成喷射器失效。

图 7 为不同喷嘴距的喷射器内流场比焓分布云图。d 为 15.0、25.0 mm 时均出现工作气体通过喷嘴向低压乏气入口流动的局部回流现象。内流场的比焓较高的区域集中在喷嘴和扩压室，这是因为通过喷嘴回流的工作气体和进入扩压室的工作气体速度迅速衰减，气体的动能与压力势能相互转化，其中无法转化成压力势能的部分动能以热能的形式耗散。$d=20.0$ mm 时，在混合室出口的比焓更高，这是因为混合室出口的气体压能较大，在进入扩压室后速度先急剧增大至极值后又迅速衰减，连续的压



（a）d=15.0 mm

（b）d=20.0 mm

（c）d=22.5 mm

（d）d=25.0 mm

图 7　不同喷嘴距喷射器内流场比焓

Fig. 7　Specific enthalpy of flow field inside the ejector at different nozzle spacings

力势能与动能的转化加剧了扩压室内的能量耗散。d=22.5 mm 时喷射器内流场比焓较低且无局部回流现象发生，此时气体的能量耗散较小，更有利于喷射器的性能释放。

图 8 为不同喷嘴距条件下喷射器引射比变化，喷射器的引射比随着喷嘴距的增大呈现先上升再下降的抛物线趋势，其中：d 为 15.0、17.5、25.0 mm 的喷射器，由于喷嘴距设计不合理，导致喷射器失效；d 为 20.0、22.5 mm 的喷射器均可以正常引射低压乏气，且当 d=22.5 mm 时，工作气体通过激波混合层携带、加速被引气体，喷射器引射流量达到最大值(2.65 kg/s)。可见，喷嘴距通过改变内流场流动分离和激波现象的发生位置间接影响喷射器的引射性能。

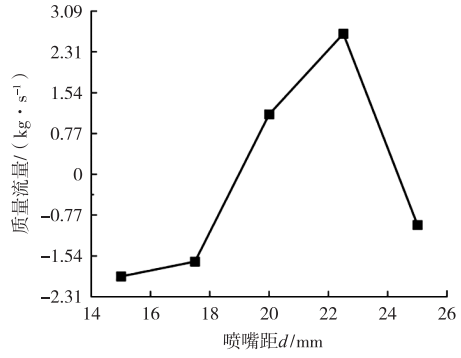


图 8 不同喷嘴距喷射器乏气流量变化

Fig. 8 Changes in exhaust gas flow rate from the ejector at different nozzle spacings

2.3 工作压力对引射性能的影响

图 9 为不同工作压力工况下喷射器内流场压力分布。进入吸入室的工作气体在沿壁面流动时压力逐渐降低，使吸入室出口形成局部低压区域，同时，乏气受此处低压的抽吸作用进入吸入室。其中：

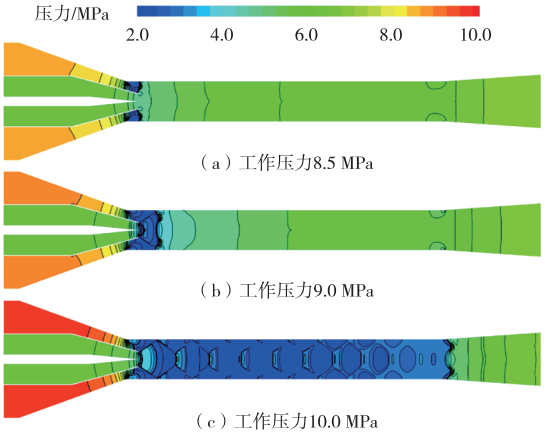


图 9 不同工作压力下内流场压力分布

Fig. 9 Pressure distribution of flow field with different operating pressures

当工作压力为 8.5 MPa 时，吸入室出口形成的局部低压区域较小，导致吸入乏气受限；当工作压力为 9.0 MPa 时，吸入室出口形成的局部低区域在混合室内迅速消失，满足引射乏气的条件且混合室内压力分布均匀；当工作压力为 10.0 MPa 时，吸入室出口的低压区域以膨胀波和压缩波交错分布的形式在整个混合室内蔓延，造成严重的能量损失。

图 10 为气体流量系数及喷射器的引射性能随工作气体压力变化，气体流量系数为某压力条件下的气体流量与 10 MPa 条件下的流量之比，引射比为进入喷射器的乏气流量与工作流量之比。

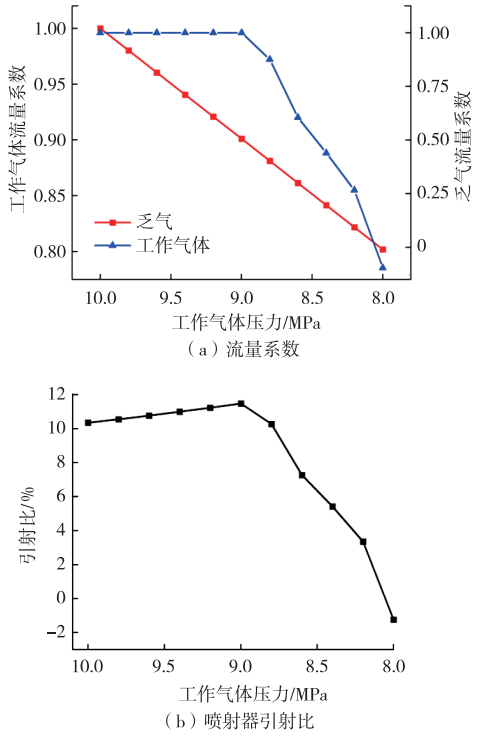


图 10 工作压力对引射性能的影响

Fig. 10 Influence of operating pressure on ejection performance

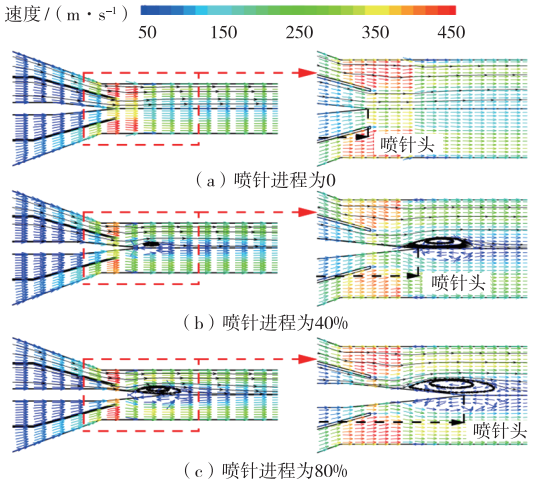
如图 10(a)所示，工作气体流量系数随工作气体压力的下降而下降，而乏气流量系数随工作气体压力的下降呈现先不变后下降的趋势。其中，当工作气体压力高于 9.0 MPa 时，乏气流量系数固定为常数，此时工作气体蕴含的过余能量无法通过引射乏气的方式回收，而是在混合室内以激波的形式耗散。

如图 10(b)所示，随着工作气体的压力降低，喷射器的引射比呈现先增大后渐小的趋势：当工作气体压力为 9.0 MPa 时，喷射器的引射比最大(为 11.4%)；当工作气体压力为 8.0 MPa 时，喷射器失效无法再引射乏气。

2.4 喷针进程对引射性能的影响

图 11 为喷针不同进程时的内流场速度矢量图。

喷嘴内的喷针可以通过前后移动改变乏气的通过面积进而影响喷射器内的流动特性。当喷针进程为 0 时，被引射的乏气通过全开喷嘴无障碍地进入混合室；当喷针进程为 40%时，喷针向前移动侵占乏气的通过截面阻碍乏气进入混合室，另外，混合室内在喷针头的位置出现漩涡结构也会影响乏气在混合室内的流动；当喷针进程为 80%时，乏气通过面积大幅减小，且喷针头附近的漩涡尺度变化，影响范围更广，进一步阻碍乏气进入混合室。



(a) 喷针进程为0

(b) 喷针进程为40%

(c) 喷针进程为80%

图 11　不同喷针进程内流场速度矢量

Fig. 11　Velocity vectors of flow field with different needle processes

图 12 为工作压力为 9.0 MPa 时，喷射器的引射比和乏气流量系数随喷针进程的变化。随着喷针进程的增大，乏气的流量系数逐渐下降，且下降幅度越来越大。一方面，喷针的移动通过改变喷嘴出口的通过面积间接影响乏气流量，而其对两侧的工作气体流量没有明显影响；另一方面，随着喷针进程的增大，喷针头处的漩涡结构的影响范围进一步扩大，导致喷射器的引射性能随喷针进程的增大而降低。可见，喷针改变乏气的通过面积和流场特性影响喷射器的性能。

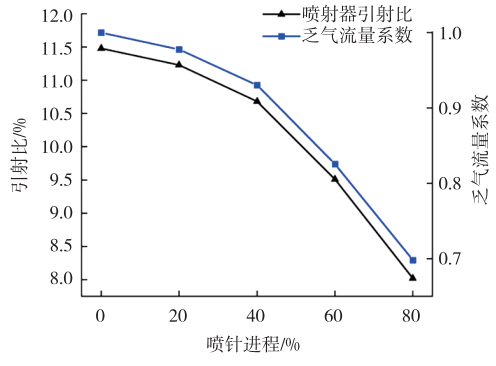


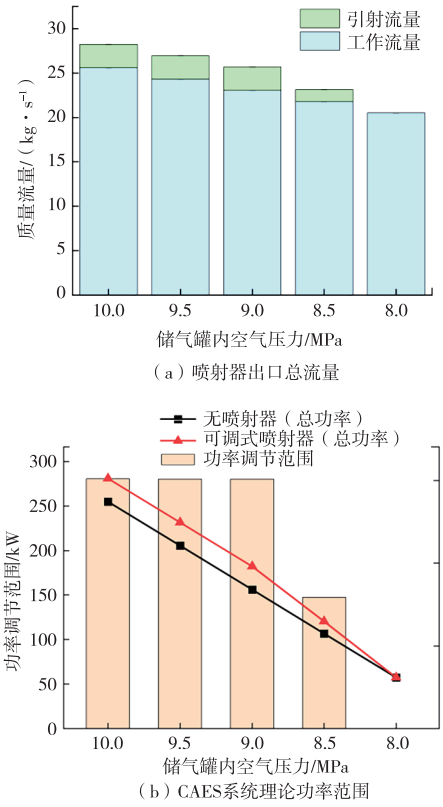
图 12　喷针进程对引射性能的影响

Fig. 12　Influence of needle process on ejection performance

3　改进后 CAES 系统效益探讨

本示范项目中 CAES 系统中储气罐的初始压力为 10.0 MPa，随着释能过程持续进行，气体排出，储气罐内的空气质量逐渐减小，压力逐渐降低。基于储气罐的压力变化特性及喷射器的有效工作范围，依据透平的入口压力将压缩空气储能系统的释能过程分为定压运行和滑压运行阶段，储气罐压力在 8.0～10.0 MPa 内为定压运行阶段；当储气罐压力低于 8.0 MPa 为滑压运行阶段，此时喷射器失效，不再参与调节。

图 13 为 CAES 系统变工况运行特性。



(a) 喷射器出口总流量

(b) CAES系统理论功率范围

图 13　CAES 系统变工况运行特性

Fig. 13　Operation characteristics of CAES system under variable operating conditions

图 13(a)展示了有喷射器参与调节的压缩空气储能系统，在定压运行过程中，进入透平机的总空气流量为工作气体流量与被引射的乏气流量之和。当储气罐压力在 9.0～10.0 MPa 时，喷射器处于全功率运行工况，其乏气引射质量流量最大，达到 2.65 kg/s，此时进入透平做功的气体总质量流量为 28.23 kg/s；当储气罐压力在 8.0～9.0 MPa 时，通过喷射器引射的乏气流量逐渐减小、功率调节能力逐渐降低，直至储气罐压力为 8.0 MPa 时喷射器失效，进入透平的空气只有工作气体，质量流量为 20.51 kg/s。

对于有喷射器参与调节的 CAES 系统，在定压运行释能阶段中的理论功率，随着储气罐内压力的降低，透平机组的出力能力呈下降趋势。当储气罐压力高于 9.0 MPa 时，工作气体压能充足，喷射器全功率运行，此时通过引射乏气功率提升范围为 0～280.52 kW、效率提升 0～2.8 百分点；当储气罐压力在 8.0～9.0 MPa 时，工作气体的压能减小，功率提升范围降低；当储气罐压力为 8.0 MPa 时，喷射器失效不再进行功率调节。在载荷不变(10.0 MW)的情况下，随着储气罐内压力的降低，工作流量减小；当储气罐压力为 9.0 MPa 时，未配备喷射器 CAES 系统的总功率为 9.7 MW，将无法满足载荷需求；而对于配备可调式喷射器的 CAES 系统，可以通过减小喷针进程，增大混合气体的流量，使总功率维持在 10.0 MW，平衡系统载荷与实际出力。

4 结论

(1) 针对 CAES 系统喷射器出口高背压而气源压力有限的现状，采用中心喷嘴吸入乏气的方式，可有效促使工作气体携带乏气进行二次做功。其中，在扩压室的入口 $x=65.0$ mm 处，气体的平均速度为 212.63 m/s，属于亚音速流动，避免了不必要的能量耗散，提高 CAES 系统整体能效。

(2) 喷嘴距通过改变内流场流动分离和激波现象间接影响喷射器的引射性能，其过大或过小均会因频繁“动-压”转化加剧能量耗散，使喷射器失效。当喷嘴距为 22.5 mm 时，工作气体通过激波混合层携带、加速被引气体，引射乏气的质量流量为 2.65 kg/s。

(3) 喷射器的引射比随工作气体压力的增加先升高后降低，喷针通过改变气体通过面积而使引射比随喷针进程的减小而增大。当工作气体压力为 9.0 MPa 时，喷针全开，最大引射比为 11.4%，当工作压力低于 8.0 MPa 后，喷射器失效。

(4) CAES 系统的释能过程分为定压运行和滑压运行阶段，当储气罐剩余压力在 9.0 MPa 以上时，功率最高可以提升 0.28 MW，效率提升 2.8 百分点；当储气罐剩余压力在 8.0～9.0 MPa 时，功率调节能力降低；当储气罐剩余压力低于 8.0 MPa 时，进入滑压运行阶段，喷射器不进行功率调节。

参考文献：

[1] 邹鑫，陈丹昊，邹爱孟，等. 考虑多种负荷需求响应的综合能源系统优化运行[J]. 动力工程学报，2025，45(1)：154-164.
ZOU Xin，CHEN Danhao，ZOU Aimeng，et al. Optimized operation of integrated energy systems considering multiple load demand response[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2025，45(1)：154-164.

[2] 辛传奇，王文权，陈伟，等. 压缩空气储能技术多维度应用与发展路径分析[J]. 储能科学与技术，2025，14(9)：3636-3647.
XIN Chuanqi，WANG Wenquan，CHEN Wei，et al. Multi-dimensional application and development paths of compressed air energy storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology，2025，14(9)：3636-3647.

[3] 李盼，杨晨，陈雯，等. 压缩空气储能系统动态特性及其调节系统[J]. 中国电机工程学报，2020，40(7)：2295-2305.
LI Pan，YANG Chen，CHEN Wen，et al. Dynamic characteristics of compressed air energy storage system and the regulation system[J]. Proceedings of the CSEE，2020，40(7)：2295-2305.

[4] 文贤馗，刘石，李翔，等. 先进压缩空气储能系统模拟与效率分析[J]. 动力工程学报，2021，41(9)：802-808.
WEN Xiankui，LIU Shi，LI Xiang，et al. Simulation and efficiency analysis of advanced compressed air energy storage system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2021，41(9)：802-808.

[5] HAN Yu，WANG Xiaodong，SUN Hao，et al. CFD simulation on the boundary layer separation in the steam ejector and its influence on the pumping performance[J]. Energy，2019，167：469-483.

[6] 张萱，陈来军，崔森，等. 先进绝热压缩空气储能系统宽工况运行可行域分析[J]. 电网技术，2025，49(12)：5147-5155.
ZHANG Xuan，CHEN Laijun，CUI Sen，et al. Feasible region analysis of advanced adiabatic compressed air energy storage system under wide operation condition[J]. Power System Technology，2025，49(12)：5147-5155.

[7] 柯世博，李赫，唐榛，等. 基于 NXP 变化对水蒸气喷射泵内部流场的数值模拟研究[J]. 机电工程技术，2025，54(22)：103-106，135.
KE Shibo，LI He，TANG Zhen，et al. Numerical simulation study on the internal flow field of water vapor jet pump based on NXP variation[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology，2025，54(22)：103-106，135.

[8] 杨勇，王宁，韩沛时，等. 可调式与固定式喷射器内

动量交换的相似性与非平衡特性研究[J]. 工程热物理学报，2025，46(4)：1067-1077.
YANG Yong，WANG Ning，HAN Peishi，et al. Research on similarity and non-equilibrium characteristics of momentum exchange in adjustable and stationary ejectors[J]. Journal of Engineering Thermophysics，2025，46(4)：1067-1077.

[9] 方凯跃，毛维斌，操正清，等. 基于伴随优化和正交实验的蒸汽喷射器结构优化[J]. 真空科学与技术学报，2025，45(5)：414-420.
FANG Kaiyue，MAO Weibin，CAO Zhengqing，et al. Optimization of steam ejector structure based on adjoint optimization and orthogonal experiment [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology，2025，45(5)：414-420.

[10] 陈洪杰，葛敬，陈柄旭，等. 基于喷嘴距可调的锥-柱形与圆柱形混合室喷射器性能对比分析[J]. 真空科学与技术学报，2025，45(3)：236-247.
CHEN Hongjie，GE Jing，CHEN Bingxu，et al. Comparative analysis of the performance for nozzle exit position adjustable conical-cylindrical and cylindrical mixing chamber ejectors[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology，2025，45(3)：236-247.

[11] 赵丽娟，张志军，高伟峰，等. 喷嘴位置及结构对液气射流泵喷射性能的影响[J]. 真空科学与技术学报，2024，44(12)：1019-1025.
ZHAO Lijuan，ZHANG Zhijun，GAO Weifeng，et al. Influence of nozzle position and structure on the ejection performance of liquid-gas jet pump[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology，2024，44(12)：1019-1025.

[12] 张学进，周立新，薛新宇，等. 气体喷射压缩器变工况激波特性分析与试验[J]. 流体机械，2019，47(1)：8-13.
ZHANG Xuejin，ZHOU Lixin，XUE Xinyu，et al. Numerical analysis and test on shock wave characteristics of air ejector under variable operating conditions [J]. Fluid Machinery，2019，47(1)：8-13.

[13] 王林，李少强，谈莹莹，等. 混合工质喷射器变工况性能研究[J]. 工程热物理学报，2024，45(5)：1300-1307.
WANG Lin，LI Shaoqiang，TAN Yingying，et al. Study on the performance of zeotropic mixture ejector under variable operating conditions[J]. Journal of Engineering Thermophysics，2024，45(5)：1300-1307.

[14] 郭祚刚，刘通，徐敏，等. 新型喷射增效压缩空气储能系统性能[J]. 储能科学与技术，2024，13(6)：1877-1887.
GUO Zuogang，LIU Tong，XU Min，et al. Theoretical analysis of a novel ejector augmented compressed air energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology，2024，13(6)：1877-1887.

[15] 周升辉，何阳，陈海生，等. 喷射器强化压缩空气储能充能过程[J]. 储能科学与技术，2021，10(5)：1503-1513.
ZHOU Shenghui，HE Yang，CHEN Haisheng，et al. Using an ejector to intensify the charging process of a compressed air energy storage system [J]. Energy Storage Science and Technology，2021，10(5)：1503-1513.

[16] 韩宇，王晓冬，李鹏飞，等. 激波结构对喷射器工作特性的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2024，45(9)：1309-1316.
HAN Yu，WANG Xiaodong，LI Pengfei，et al. Influence of shock wave structure on the ejector's operating characteristics[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science)，2024，45(9)：1309-1316.

[17] CHEN Hongjie，ZHU Jiahua，GE Jing，et al. A cylindrical mixing chamber ejector analysis model to predict the optimal nozzle exit position[J]. Energy，2020，208：118302.

[18] LIU Jiarui，LIU Ye，YU Jianlin，et al. Thermodynamic analysis of a novel ejector-enhanced auto-cascade refrigeration cycle[J]. Applied Thermal Engineering，2022，200：117636.

[19] TANG Yongzhi，LIU Zongliang，LI Yanxia，et al. Mixing process of two streams within a steam ejector from the perspectives of mass，momentum and energy transfer[J]. Applied Thermal Engineering，2021，185：116358.