

# 等温压缩空气储能系统液气传热特性研究

陈华, 喻昌鲲, 彭钰航, 王燕令

(郑州轻工业大学 能源与动力工程学院, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 等温压缩空气储能(I-CAES)无需补燃、能源利用率高且碳排放低,在大规模储能领域具有重要应用前景。在建立喷雾的I-CAES系统的液气传热模型基础上,通过数值方法分析了喷雾流量对I-CAES液气传热特性的影响规律。结果表明:采用喷雾方法能够有效抑制压缩和膨胀过程的温度变化、强化液气传热并实现理想I-CAES过程;增大喷雾流量能够降低压缩功耗、提高膨胀做功并降低停机储气过程压损,可提高系统指示效率和储能效率。

**关键词:** 压缩空气储能;等温压缩空气储能;喷雾冷却;液气传热

中图分类号:TK124 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.09.011

[引用本文格式]陈华,喻昌鲲,彭钰航,等.等温压缩空气储能系统液气传热特性研究[J].热能动力工程,2022,37(9):89-96. CHEN Hua, YU Chang-kun, PENG Yu-hang, et al. Study on liquid-gas heat transfer characteristics of isothermal compressed air energy storage system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(9): 89-96.

## Study on Liquid-gas Heat Transfer Characteristics of Isothermal Compressed Air Energy Storage System

CHEN Hua, YU Chang-kun, PENG Yu-hang, WANG Yan-ling

(College of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, China, Post Code: 450000)

**Abstract:** Isothermal compressed air energy storage (I-CAES) has an important application prospect in large-scale energy storage field due to its advantages of high energy utilization rate, low carbon emission and no need for supplementary combustion. The liquid-gas heat transfer model of sprayed I-CAES system was established, and the influence rule of spray flow rate on liquid-gas heat transfer characteristics of I-CAES was analyzed by using the numerical method. The results show that the adoption of spray can effectively suppress the temperature variation in the compression and expansion process, which is an effective measure to enhance the liquid-gas heat transfer and achieve ideal I-CAES process. Increasing spray flow rate can reduce compression power consumption, increase the expansion work output, reduce pressure loss during shutdown and air storage stage, and finally improve the indication efficiency and energy storage efficiency of the system.

**Key words:** compressed air energy storage, isothermal compressed air energy storage, spray cooling, liquid-gas heat transfer

## 引言

由于太阳能、风能等可再生能源存在间歇性和

波动性,其在发电并网过程中会对电网产生冲击,导致电网功率波动,影响其运行可靠性<sup>[1]</sup>。储能技术能够通过间歇性地储能和释能,平抑大规模可再生能源发电并网中的功率波动,保障电网的安全运行。

收稿日期:2021-10-20;修订日期:2021-11-10

基金项目:国家自然科学基金(52006202);河南省高等学校重点科研项目(20A470013)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(52006202); Foundation of Henan Educational Committee(20A470013)

作者简介:陈华(1991-),女,湖北仙桃人,郑州轻工业大学讲师。

压缩空气储能 (Compressed Air Energy Storage, CAES) 技术由于储能容量大、可靠性高、经济可行性好及地理限制小等优点,在大规模电力存储、可再生能源并网、分布式能源系统、电力系统调峰和减少碳排放等领域中具有重大应用潜力<sup>[2-3]</sup>。

CAES 技术的基本原理为:储能过程,利用富余风电、光电或低谷电力驱动压缩机对空气进行压缩,将电能以高压空气的形式储存在高压储气罐或地下矿洞中;释能过程,在电力负荷高峰期,储存的高压空气推动涡轮做功对外发电。根据压缩空气储存和热能利用方式,CAES 可分为非绝热压缩空气储能 (Diabatic Compressed Air Energy Storage, D-CAES)、绝热压缩空气储能 (Adiabatic Compressed Air Energy Storage, A-CAES) 和等温压缩空气储能 (Isothermal Compressed Air Energy Storage, I-CAES) 3 大类型。D-CAES 系统在储能过程中,大部分电力转化为压缩热并直接排放。在释能过程中,压缩空气必须通过天然气或化石燃料燃烧加热之后,再进入涡轮膨胀带动发电机发电<sup>[4]</sup>。因此, D-CAES 系统能量损失大,储能效率低,且环境污染严重<sup>[5]</sup>。A-CAES 系统采用蓄热器将储能过程的压缩热收集并储存,在释能过程中利用蓄热器对进入涡轮的高压空气进行预热<sup>[6]</sup>。A-CAES 系统避免了外部加热,但是绝热压缩过程功耗巨大,且空气温升很大,对设备及蓄热材料的耐温要求很高<sup>[7]</sup>。I-CAES 系统采用喷雾冷却、液体活塞等手段,使空气的压缩和膨胀过程近似等温<sup>[8]</sup>,将系统的压缩热和膨胀热降到最低,其理论效率接近 100%<sup>[9]</sup>,且该系统不需要外部加热,大大提高了能源利用效率,并能够最大程度地减小碳排放。

I-CAES 技术克服了高温蓄热器和绝热压缩机的技术瓶颈,能够避免补燃并降低碳排放,具有优异的储能性能和广阔的应用前景<sup>[10]</sup>。为了将 I-CAES 概念性技术应用于实际工程,研究者们采用各种手段来强化压缩(膨胀)过程的传热特性,从而实现近似等温压缩(膨胀)过程。液体活塞<sup>[11-12]</sup>和液压泵<sup>[13-14]</sup>能够实现缓慢压缩(膨胀),为液气传热提供充足的热交换时间。

然而,实际 I-CAES 系统中,受气-液接触传热面积的限制,压缩和膨胀过程中的实际温度变化仍然较大,导致实际循环效率远低于理想循环。因此,强化液气传热对提高 I-CAES 实际储能效率具有重

要意义。在压缩(膨胀)过程中,向气缸内喷射水雾是强化液气传热的有效技术之一,能够进一步降低压缩(膨胀)过程的空气温度变化,大大提高系统储能效率。Qin 等人<sup>[15]</sup>利用喷雾强化传热来提高 CAES 的储能效率,数值模拟结果表明,在相同压比下,空气压缩过程温升仅为 40 °C,远低于 A-CAES 系统 260 °C 的空气温升,且储能过程的压缩效率高达 89%。贾冠伟等人<sup>[16]</sup>采用喷雾冷却降低压缩功耗,数值分析结果表明,其节能效率为 38.8%。Odukomaia 等人<sup>[17]</sup>对基于喷雾的近等温 CAES 系统的储能性能进行了理论研究,发现喷雾冷却将压缩终温降低了 30 °C,实现了高达 66% 的系统往返效率。Zhang 等人<sup>[18]</sup>分析了喷雾加热对空气膨胀过程做功的影响,与绝热膨胀相比,近等温膨胀过程的膨胀功增加了 12%。

综上所述,采用喷雾冷却是实现近等温 CAES 的有效技术。由于喷雾流量是影响喷雾冷却换热特性的重要因素,并且对 I-CAES 系统的传热强化及能量转化性能非常关键<sup>[19]</sup>,本文研究喷雾流量对 I-CAES 过程中液气传热特性的影响,并分析喷雾流量对 I-CAES 储能特性的影响。

## 1 基于喷雾冷却的 I-CAES 系统描述

图 1 为基于喷雾冷却的 I-CAES 系统示意图。该系统由工作气缸 A、工作气缸 B、储气罐、可逆液压泵(逆向运行时可作涡轮)、换向阀、发动机/发电机、水泵和喷嘴组成。该系统以空气作为储能工质,以水作为发电工质。

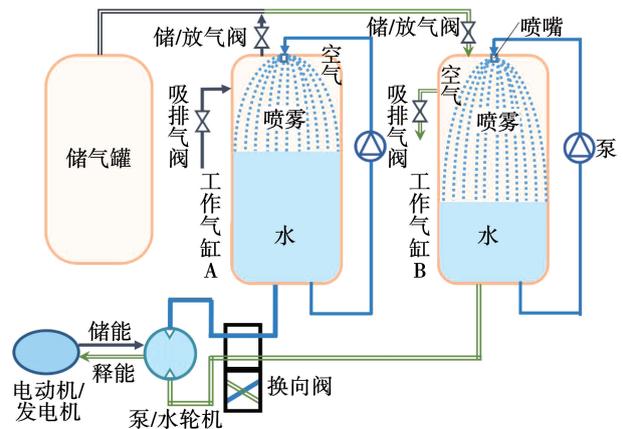


图 1 基于喷雾冷却的 I-CAES 系统流程

Fig. 1 System flowchart of I-CAES based on spray cooling

储能过程和释能过程单个工作气缸内的空气压力变化如图2所示。

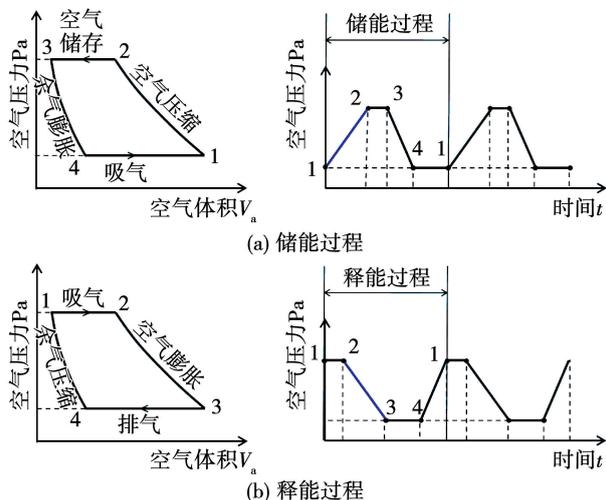


图2 储能和释能过程气缸内空气压力变化

Fig.2 Pressure variation of air in working cylinder during charge and discharge period

储能过程,工作气缸A吸气阀开启,环境空气吸入气缸A内部。当空气体积达到一定值时,吸气阀关闭,开始工作气缸A的储能过程。富余电力带动电动机驱动液压泵,将工作气缸B底部的水泵入工作气缸A,同时工作气缸B吸气阀开启并吸入环境空气。随着水不断流入工作气缸A,气缸A内的空气被压缩,空气体积不断降低,电能以压力能的形式储存在高压空气中。在空气压缩过程中,工作气缸A底部的水由水泵再循环进入工作气缸A顶部,经喷嘴雾化为高速微小液滴,并喷射入气缸A。由于水的比热容和热导率远大于空气,储能过程的压缩热几乎完全被气缸下部的水和气缸上部的喷雾液滴吸收,压缩空气的温度几乎不变,实现了等温压缩。当空气压力达到一定值后,工作气缸A储气阀打开,高压空气进入储气罐储存。然后,换向阀切换方向,工作气缸B开始储能过程,此时可逆液压泵内液体流动方向不变。富余电力驱动液压泵,水由工作气缸A进入工作气缸B,对气缸B内的空气进行压缩,且喷雾冷却使压缩过程接近等温压缩。同时,环境空气通过吸气阀进入工作气缸A,工作气缸A实现吸气过程,为下一次压缩空气做准备。至此,完成一个储能循环。储能过程中,换向阀来回切换,重复上述过程,则工作气缸A和工作气缸B交替压

缩空气,实现连续储能。

释能过程,与工作气缸A相连的放气阀开启,高压空气由储气罐流入工作气缸A,当空气体积达到一定值时,放气阀关闭。高压空气膨胀做功,推动工作气缸A下部的水逆向流经可逆液压泵,流入工作气缸B。此时,可逆液压泵工作在涡轮工况,水推动涡轮做功并驱动发电机发电。在空气膨胀过程中,气缸A底部的水也通过喷嘴喷入工作气缸A。喷雾液滴与气缸下部的水一起为空气膨胀提供热量,从而实现等温膨胀。当工作气缸A内空气压力达到一定值后,排气阀打开,膨胀后的空气排入大气环境。然后,换向阀切换方向,工作气缸B开始释能过程,此时可逆液压涡轮内液体流动方向不变。储气罐中压缩空气进入工作气缸B,高压空气膨胀对水做功,使水推动涡轮做功并带动发电机发电。水流经涡轮后进入工作气缸A,推动工作气缸A内的空气经排气阀流出,为工作气缸A下一次吸入高压空气并膨胀做功做好准备。至此,完成一个释能循环。释能过程中,换向阀来回切换,而涡轮中水的流动方向不变,重复以上过程,则工作气缸A和工作气缸B交替膨胀做功,实现连续释能。

## 2 液气传热理论模型

为了分析喷雾液气传热特性对I-CAES系统性能的影响,基于传热学基本理论及热力学第一定律建立了系统理论模型。其中,空气压缩(膨胀)过程的液气传热模型是研究的关键。以空气压缩过程为例,选取气缸内空气为研究对象,则系统与外界存在热量交换和功交换,不存在质量交换,应作为闭口系分析。图3为空气压缩过程的液气边界及传热、做功模型,该模型包含3部分:(1)气缸内空气与气缸下部水之间的传热模型;(2)气缸内空气与气缸外环境之间的传热模型;(3)气缸内空气与气缸上部喷雾液滴之间的传热模型。

在空气压缩过程中,气缸下部的水通过液气边界对空气做功,气缸内空气被压缩且温度升高。热量通过液气界面从高温空气传至气缸下部的水和上部的喷雾液滴。因此,该闭口系的能量守恒方程为:

$$\Delta U_a = Q_w + Q_{envi} + Q_{spr} - W_c \quad (1)$$

式中: $\Delta U_a$ —气缸内空气的热力学能变化; $Q_w$ 、 $Q_{envi}$ 和 $Q_{spr}$ —空气与气缸下部水、环境和喷雾液滴之间

的换热量;  $W_c$ —压缩过程耗功。

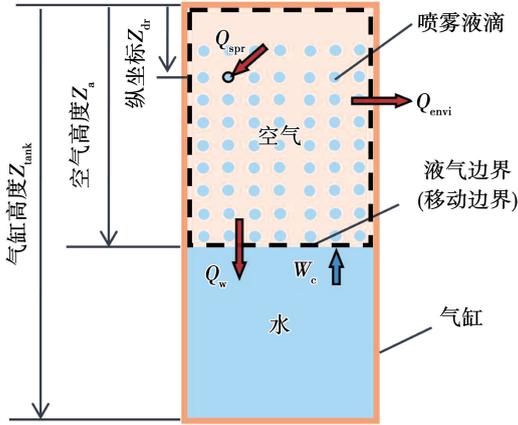


图3 空气压缩过程喷雾液气传热和做功模型

Fig.3 Modelling of liquid-gas heat transfer during air compression process

## 2.1 空气与气缸下部水的传热模型

首先,建立空气与气缸下部水的传热模型。气缸上部空气与下部水接触的液气边界为移动边界,空气与气缸下部水之间的换热量可表示为:

$$Q_w = h_{a,w} A_{a,w} (T_w - T_a) \quad (2)$$

式中:  $h_{a,w}$ —空气与气缸下部水之间进行换热的对流传热系数;  $A_{a,w}$ —空气与气缸下部水之间的接触面积;  $T_a$ ,  $T_w$ —空气和气缸下部水的温度。

由于气缸内空气体积与气缸内水的体积之和等于气缸总体积,则液气移动边界可表示为:

$$\frac{dV_a}{dt} + \frac{dV_w}{dt} = 0 \quad (3)$$

式中:  $V_a$ ,  $V_w$ —气缸内空气和气缸下部水的体积。

## 2.2 空气与气缸外环境的传热模型

空气与气缸外部环境之间的换热量可表示为:

$$Q_{envi} = UA_{a,t} (T_{envi} - T_a) \quad (4)$$

式中:  $T_{envi}$ —环境温度;  $UA_{a,t}$ —空气与环境换热的整体传热系数,可计算为:

$$\frac{1}{UA_{a,t}} = \frac{1}{h_{a,t} A_{a,t}} + \frac{d_l}{\lambda_l A_{a,t}} + \frac{1}{h_{envi,t} A_{a,t}} \quad (5)$$

式中:  $h_{a,t}$ —气缸内空气与气缸进行换热的对流传热系数;  $A_{a,t}$ —空气与气缸内壁的接触面积;  $d_l$ —气缸壁厚;  $\lambda_l$ —气缸材料的导热系数;  $h_{envi,t}$ —环境空气与气缸进行换热的对流传热系数。

## 2.3 空气与喷雾液滴的传热模型

喷雾液气传热是大量微米级喷雾液滴与空气对

流传热的叠加效果。因此,首先要分析单个喷雾液滴与空气之间的传热过程。当液滴受到的重力与空气拖拽力达到平衡时,液滴运行速度不再变化,液滴受力平衡方程为:

$$\frac{1}{8} \pi C_D \rho_a d_{dr}^2 u_{dr}^2 = \frac{1}{6} \pi d_{dr}^3 \rho_w g \quad (6)$$

式中:  $\rho_a$ ,  $\rho_w$ —气缸内空气与气缸下部水的密度;  $d_{dr}$ ,  $u_{dr}$ —喷雾液滴的直径和速度;  $C_D$ —气缸内空气的阻力系数,可计算为:

$$C_D = \begin{cases} 24/Re, Re \leq 0.2 \\ 18.5/Re^{0.6}, 0.2 < Re \leq 500 \\ 0.44, 500 < Re \leq 10^5 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $Re = \rho_a u_{dr} d_{dr} / \mu_a$ —液滴运动雷诺数;  $\mu_a$ —气缸内空气的动力粘度。

因此,液滴运动达到平衡时的速度可表示为:

$$u_{dr} = \sqrt{\frac{4d_{dr}\rho_w g}{3\rho_a C_D}} \quad (8)$$

则液滴与气缸内空气的接触时间可表示为:

$$t_{dr} = \frac{z_a}{u_{dr}} \quad (9)$$

式中:  $z_a$ —气缸内空气的高度,由于气缸上部空气与下部水接触的液气边界为移动边界,因此  $z_a$  在空气压缩过程中会发生变化。

单液滴的能量守恒方程为:

$$m_{dr} c_w \frac{dT_{dr}}{dt} = \frac{Nu_{dr} \lambda_w}{d_{dr}} A_{dr} (T_a - T_{dr}) \quad (10)$$

式中:  $m_{dr} = \pi d_{dr}^3 \rho_w / 6$ —喷雾液滴质量;  $A_{dr} = \pi d_{dr}^2$ —单个液滴与气缸内空气的接触面积;  $Nu_{dr} = 2 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3}$ —液滴与空气对流传热努塞耳数<sup>[20]</sup>。

液滴与气缸内空气传热过程的温度变化可由公式(7)~(9)联立解出,则单液滴飞行过程中与空气的换热量可表示为:

$$Q_{dr} = m_{dr} c_w \Delta T_{dr} \quad (11)$$

式中:  $Q_{dr}$ —单液滴换热量;  $c_w$ —水比热容;  $\Delta T_{dr}$ —液滴飞行过程温升。

喷雾液滴数目可由喷雾流量  $\dot{m}_{spr}$  和质量守恒方程进行计算:

$$N_{dr} = \dot{m}_{spr} t_{dr} / m_{dr} \quad (12)$$

因此,喷雾与气缸内空气之间的总换热量为:

$$Q_{spr} = \dot{m}_{spr} c_w \Delta T_{dr} \quad (13)$$

空气压缩过程的耗功量可表示为:

$$W_c = - \int V_a dp_a \quad (14)$$

式中:  $p_a$  —气缸内空气压力。

则空气压缩过程的能量守恒方程可改写为:

$$m_a c_a \frac{dT_a}{dt} = h_{a,w} A_{a,w} (T_w - T_a) + UA_{a,t} (T_{envi} - T_a) + \dot{m}_{spr} c_w \Delta T_{dr} - p_a \frac{dV_a}{dt} \quad (15)$$

式中:  $m_a$  —气缸内空气质量;  $c_a$  —空气比热容。

按照上述理论可建立空气膨胀过程的理论模型,从而建立整体 I-CAES 系统的理论模型。采用指示效率(Indicated Efficiency, IE)评价该系统在压缩和膨胀过程的热力学损失:

$$IE = \frac{W_e}{W_c} \quad (16)$$

式中:  $W_c$  —空气压缩过程耗功量;  $W_e$  —空气膨胀过程的做功量。

### 3 结果与分析

#### 3.1 模型验证

利用 MATLAB 建立系统模型,采用文献[21]基于液压泵的 I-CAES 实验结果来验证所建模型。由于该实验为无喷雾系统,因此在计算过程中喷雾流量设置为零。根据文献的实验参数,模拟参数设置如表 1 所示。系统流程为:一次储能循环,停机储存 5 h,一次释能循环。表 1 总结了空气压缩过程最高温度( $T_{max}$ )、空气膨胀过程最低温度( $T_{min}$ )和系统指示效率的计算结果与实验结果的对比。图 4 为储能和释能过程中气缸内空气和水的温度变化的理论与实验对比。可以看出,模拟结果的变化趋势与文献数据吻合较好。因此,将根据所建模型,对基于喷雾冷却的 I-CAES 系统进行参数影响分析。

表 1 理论模型计算结果与实验结果的比较

Tab. 1 Comparison of the present model results and experimental data

参数	模拟结果	实验结果	误差/%
空气初压 $p_{min}$ /MPa	7	7	-
空气终压 $p_{max}$ /MPa	13	13	-
环境温度 $T_{envi}$ /°C	21	21	-
空气最高温度 $T_{max}$ /°C	35	37	5.7
空气最低温度 $T_{min}$ /°C	18	15	16.7
指示效率 IE	0.95	0.91	4.2

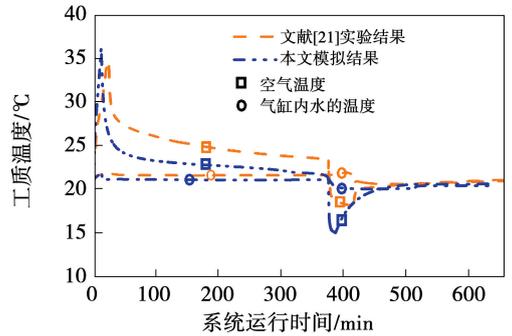


图 4 储能和释能过程气缸内空气和水的温度变化

Fig. 4 Temperatures variation of air and water in working cylinder during charge and discharge process

#### 3.2 喷雾流量对压缩空气储能影响

为了分析喷雾流量对压缩空气储能系统的影响,模拟了由一次储能过程、停机储存 4 h、一次释能过程、停机 4 h 组成的储能释能循环过程,表 2 为基于喷雾冷却的 I-CAES 系统模拟参数及取值。基于该循环,分析循环过程中喷雾流量对空气温度变化、储气压力损失、压缩耗功、膨胀做功及系统指示效率的影响。

表 2 喷雾冷却 I-CAES 系统计算工况

Tab. 2 Calculation conditions of I-CAES based on spray cooling

参数	数值
工作气缸容积 $V/m^3$	1
环境压力 $p_{envi}$ /MPa	0.1
环境温度 $T_{envi}$ /°C	25
压缩空气终压 $p_{max}$ /MPa	10
气缸余隙容积比 $\eta_v$	0.02
液压泵流量 $\dot{V}_w /L \cdot \min^{-1}$	35 ~ 60
喷雾流量 $\dot{V}_{spray} /L \cdot \min^{-1}$	5 ~ 10
工作气缸壁厚 $d_t/m$	0.02
喷雾液滴直径 $d_{dr}/mm$	50 ~ 100

##### 3.2.1 喷雾液气传热对循环的影响

储能过程,气缸内空气被压缩,空气热力学能增加,导致其温度增加。图 5 为有/无喷雾条件下气缸内空气和水的温度变化图。由图可知,储能过程,空气温度先缓慢增加,然后急剧增加至最高温度。与此同时,气缸下部水的温度变化极小。因此,热量自发地从高温空气传向低温水,空气压缩过程产生的

压缩热被气缸下部的水和喷雾液滴吸收。对比可知,有喷雾的情况下,空气压缩温升由 20 °C 降至 8 °C,降低了 12 °C,充分证明喷雾冷却能够有效抑制压缩过程温升,从而使过程更接近理想等温压缩。停机储气过程,空气的温度高于环境温度,因此压缩空气向环境散热,直至温度与环境温度相同。压缩空气储存的能量以热能的形式损耗,储气压力略有降低。释能过程,高压空气膨胀做功,其热力学能降低导致温度降低,而水的温度变化极小。因此,水和喷雾为空气膨胀过程提供热量。有喷雾的情况下,膨胀过程空气温度从 13 °C 降低至 9 °C,使过程更接近理想等温膨胀。

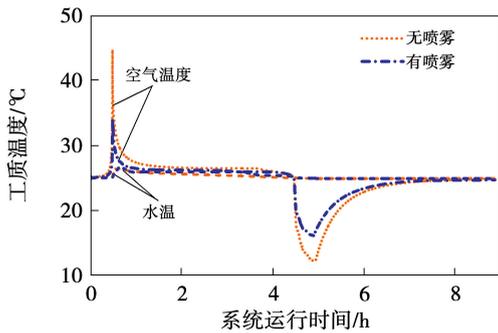


图5 有/无喷雾条件气缸内空气和水的温度变化

Fig.5 Temperature variation of air and water with and without spray

图6给出了喷雾对循环过程压缩功及膨胀功的影响。有喷雾的情况下,压缩过程耗功量降低了 2.9%,膨胀过程做功量增加了 2.7%,即喷雾对压缩功和膨胀功的影响较小。这表明,在一次循环中喷雾优势并不明显,只有在长期储能释能运行工况才能积累出显著效果。

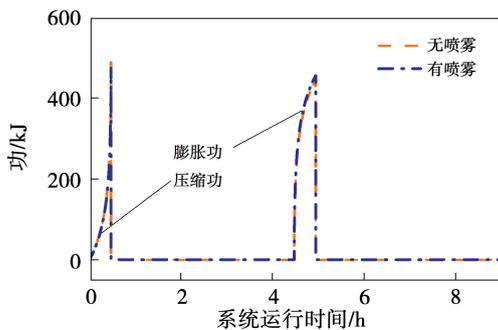


图6 喷雾对循环过程压缩功及膨胀功的影响

Fig.6 Variations of compression work and expansion work with and without spray

### 3.2.2 喷雾流量对循环性能的影响

图7为喷雾流量对空气温度影响。随喷雾流量增加,储能阶段的空气压缩终温不断降低,释能阶段的空气膨胀终温不断升高。这表明,向气缸中喷射一部分水,能够增强气液传热,从而使系统更加接近理想的 I-CAES。此外,停机储气阶段的降温也随喷雾流量增加而降低,即喷雾流量增大使得系统储气阶段的散热量和压力能损失降低。因此,喷雾冷却是强化液气传热并实现 I-CAES 的有效手段。

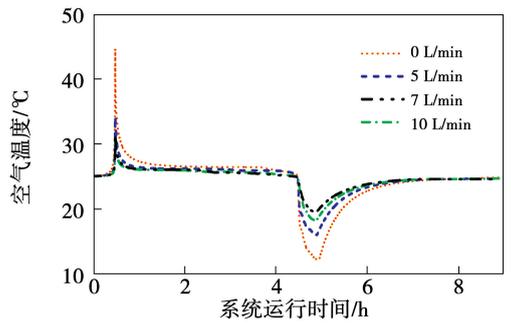


图7 喷雾流量对空气温度的影响

Fig.7 Effect of spray flow rate on air temperature

图8为喷雾流量对空气温度和压力的影响。压缩温升和膨胀温降随喷雾流量增加而降低,当喷雾流量为 10 L/min,压缩温升和膨胀温降仅为 5 °C。然而,温度变化梯度随流量增加而降低,即当流量过大时,进一步增大喷雾流量的经济效益不高。此外,喷雾流量增大时,水泵功耗增大,且液压泵中水的流量会降低,因此喷雾流量不宜过大。

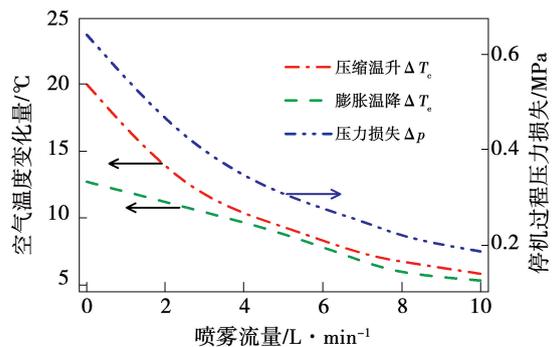


图8 喷雾流量对空气温度和压力的影响

Fig.8 Effect of spray flow rate on temperature change and pressure loss

图9为喷雾流量对功量及指示效率的影响。随喷雾流量增大,压缩耗功量逐渐降低,而膨胀做功量逐渐增大。根据指示效率的定义,则系统指示效率逐渐增大。当喷雾流量为10 L/min,指示效率高达0.98,说明系统储能-释能循环的热力损失极小,系统的储能效率越高,系统越接近理想 I-CAES。因此,采用喷雾冷却增强 I-CAES 的液气传热,能够有效提高储能系统的储能效率,且随着喷雾流量的增大,系统的储能效率提高越大。

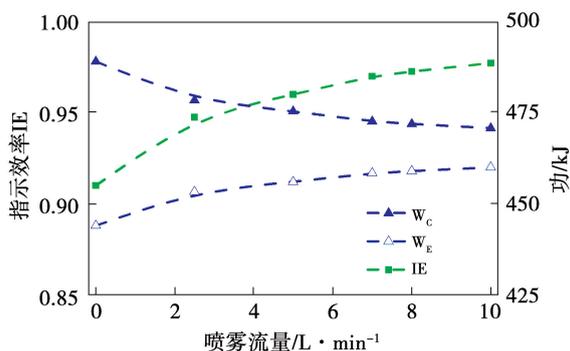


图9 喷雾流量对做功及指示效率的影响

Fig.9 Effect of spray flow rate on power work and indication efficiency

## 4 结 论

建立了基于喷雾冷却的 I-CAES 系统的液气传热模型,基于模型分析了喷雾流量对 I-CAES 液气传热特性和储能特性的影响,主要结论为:

(1) 基于喷雾冷却的 I-CAES 系统,能够有效抑制储能过程压缩温升和释能过程膨胀温降,使过程更接近理想等温压缩和理想等温膨胀。

(2) 喷雾冷却是强化液气传热并实现 I-CAES 的有效手段。随喷雾流量增加,储能过程压缩终温降低,释能过程膨胀终温升高,且停机储气阶段的散热量和压力能损失降低。

(3) 喷雾冷却能够有效提高 I-CAES 储能效率。喷雾流量越大,压缩功耗越低,膨胀做功越大,指示效率和储能效率越大;系统指示效率最高为0.98,非常接近理想 I-CAES。

## 参考文献:

- [1] 丁 明,吴 杰,张晶晶. 面向风电平抑的混合储能系统容量配置方法[J]. 太阳能学报,2019,40(3):593-599.  
DING Ming, WU Jie, ZHANG Jing-jing. Capacity optimization method of hybrid energy storage system for wind power smoothing [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(3): 593-599.
- [2] 李 季,黄恩和,范仁东,等. 压缩空气储能技术研究现状与展望[J]. 汽轮机技术,2021,63(2):86-89,126.  
LI Ji, HUANG En-he, FAN Ren-dong, et al. Research status and development prospects of compressed air energy storage technology [J]. Turbine Technology, 2021, 63(2): 86-89, 126.
- [3] 郭文宾,周 鑫,左志涛,等. CAES 离心压缩机可调扩压器调节规律研究[J]. 工程热物理学报,2021,42(2):335-341.  
GUO Wen-bin, ZHOU Xin, ZUO Zhi-Tao, et al. Regulation law research on adjustable diffusers of centrifugal compressor in CAES [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(2): 335-341.
- [4] BRIOLA S, MARCO P D, GABBRIELLI R, et al. A novel mathematical model for the performance assessment of diabatic compressed air energy storage systems including the turbomachinery characteristic curves [J]. Applied Energy, 2016, 178(9): 758-772.
- [5] VENKATARAMANI G, PARANKUSAM P, RAMALINGAM V, et al. A review on compressed air energy storage-A pathway for smart grid and polygeneration [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 62(9): 895-907.
- [6] 陈仕卿,许 剑,张新敬,等. 储能过程设计参数对压缩空气储能系统性能影响研究[J]. 热能动力工程,2017,32(3):40-46,133.  
CHEN Shi-qing, XU Jian, ZHANG Xin-jing, et al. Effect of design parameters on the performance of regenerative compressed air energy storage system [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(3): 40-46, 133.
- [7] XUE H, WHITE A. A comparative study of liquid, solid and hybrid adiabatic compressed air energy storage systems [J]. Journal of Energy Storage, 2018, 18(4): 349-359.
- [8] 何子伟,罗马吉,涂正凯. 等温压缩空气储能技术综述[J]. 热能动力工程,2018,33(2):1-6.  
HE Zi-wei, LUO Ma-ji, TU Zheng-kai. Survey of the isothermal compressed air energy storage technologies [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(2): 1-6.
- [9] QIN C, LOTH E. Simulation of spray direct injection for compressed air energy storage [J]. Applied Thermal Engineering,

- 2015,95(2):24-34.
- [10] SHIRAZI F A, SAADAT M, YAN B, et al. Iterative optimal and adaptive control of a near isothermal liquid piston air compressor in a compressed air energy storage system [C]//Proceedings of the American Control Conference, Washington, IEEE, 2013:2934-2939.
- [11] QIN C, LOTH E. Liquid piston compression efficiency with drop-let heat transfer[J]. Applied Energy, 2014, 114(2):539-550.
- [12] SAADAT M, LI P Y. Combined optimal design and control of a near isothermal liquid piston air compressor/expander for a compressed air energy storage (CAES) system for wind turbines [C]//Proceedings of the ASME 8th Annual Dynamic Systems and Control Conference. Columbus, Amer Soc Mechanical Engineers, 2015:V002T21A005.
- [13] ODUKOMAIYA A, KOKOU E, HUSSEIN Z, et al. Near-isothermal-isobaric compressed gas energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2017, 12(8):276-287.
- [14] 杨安, 孙春顺, 杨江涛, 等. 液气压缩空气储能在光伏发电中的经济性分析[J]. 电力科学与工程, 2015(6):41-46.  
YANG An, SUN Chun-shun, YANG Jiang-tao, et al. Economic analysis of the hydro-pneumatic compressed air energy storage in photovoltaic power system[J]. Electric Power Science and Engineering, 2015(6):41-46.
- [15] QIN C, LOTH E, LI P, et al. Spray-cooling concept for wind-based compressed air energy storage[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2014, 6(4):043125.
- [16] 贾冠伟, 蔡茂林, 许未晴. 喷雾直接冷却压缩空气特性分析[J]. 液压与气动, 2016(12):1-9.  
JIA Guan-wei, CAI Mao-lin, XU Mo-qing. The characteristics analysis of directly spray cooling compressed air[J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2016(12):1-9.
- [17] ODUKOMAIYA A, ABU-HEIBA A, GLUESENKAMP K R, et al. Thermal analysis of near-isothermal compressed gas energy storage system[J]. Applied Energy, 2016, 179(10):948-960.
- [18] ZHANG X J, XU Y J, ZHOU X Z, et al. Numerical study of a quasi-isothermal expander by spraying water [J]. Energy Procedia 2017, 142(12):3388-3393.
- [19] 何子伟, 罗马吉, 涂正凯. 等温压缩空气储能系统喷水量研究[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(1):33-39.  
HE Zi-wei, LUO Ma-ji, TU Zheng-kai. Research on the water spraying rate for an energy storage system of isothermal compressed air [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(1):33-39.
- [20] ZHANG X J, XU Y J, ZHOU X Z, et al. A near-isothermal expander for isothermal compressed air energy storage system[J]. Applied Energy, 2018, 225(9):955-964.
- [21] ODUKOMAIYA A, ABU-HEIBA A, GRAHAM S, et al. Experimental and analytical evaluation of a hydro-pneumatic compressed-air ground-level integrated diverse energy storage (GLIDES) system[J]. Applied Energy, 2018, 221(1):75-85.

(丛敏编辑)