

基于气液溶解与气体压缩复合原理的 高能量密度液压储能方法

王伟平* 周心怡 陆 顺

江苏师范大学机电学院, 徐州, 221116

摘要:为了解决传统液压蓄能器的低能量密度问题,提出了一种基于气液溶解与气体压缩复合原理的高能量密度液压储能方法,该方法通过向液压蓄能器的气体部分添加定量液体溶剂从而使储能过程兼具气体压缩和气液溶解功能。通过气液溶解,一部分能量以液相内能的形式储存,减小了气体内能的增幅。推导了复合储能方法的能量密度表达式并进行了对比分析,建立了气体多变指数与气体压缩速率等因素的数值关系,选择二氧化碳和水的组合作为储能介质进行了模拟和实验验证。仿真和实验结果表明,在气体预充压力 5 MPa、储能时间 5 s、注水量 1 L 的情况下,能量密度提高率达到 9%。

关键词:高能量密度;气液溶解;液压蓄能器;液压储能

中图分类号:TH137

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.03.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



High Energy Density Hydraulic Energy Storage Method Based on Composite Principle of Gas Liquid Dissolution and Gas Compression

WANG Weiping* ZHOU Xinyi LU Shun

School of Mechanical Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu, 221116

Abstract: To address the issues of low energy density in traditional hydraulic accumulators, a high-energy-density hydraulic energy storage method was proposed based on the combined principle of gas-liquid dissolution and gas compression. This method involved adding a quantitative amount of liquid solvent to the gas section of the hydraulic accumulator, enabling the energy storage processes to encompass both of gas compression and gas-liquid dissolution. Through gas-liquid dissolution, a portion of the energy was stored in the form of internal energy within the liquid phase, thereby reducing the increase in internal energy of the gas. The energy density expression for the composite energy storage method was derived and comparatively analyzed. Numerical relationship between the gas polytropic index and factors such as gas compression rate was established. Finally, a combination of carbon dioxide and water was selected as the energy storage medium for simulation and experimental validation. Both of simulation and experimental results indicate that, under conditions of a pre-charged gas pressure of 5 MPa, an energy storage duration of 5 s, and a water injection volume of 1 L, the energy density improvement rate reaches 9%.

Key words: high energy density; gas liquid dissolution; hydraulic accumulator; hydraulic energy storage

0 引言

液压蓄能器是液压系统的主要储能元件,与电储能中的电池以及机械储能中飞轮等储能元件相比,具有功率密度高的独特优势^[1]。然而,尽管液压蓄能器的应用范围广泛,但其能量密度低的问题多年来一直存在。根据相关文献数据^[2],液压蓄能器的能量密度约为 6 kJ/kg,比电池的能量密度低两个数量级,因此,在储存较大能量时,液

压蓄能器所需的安装空间往往很大。这一问题严重阻碍了蓄能器的进一步推广应用。

提高液压蓄能器能量密度的重要途径之一是在单个组件中以不同形式组合来储存能量。如一种集成了飞轮和液压蓄能器的飞轮蓄能器,能够同时以飞轮的机械能和液压蓄能器的液压能形式储存能量^[3]。在实际应用中,存在三种储能模式,即纯气体内能、纯动能以及它们的组合。数值模拟结果表明,所提出的飞轮蓄能器的能量密度大约是传统液压蓄能器的 10 倍。模型分析^[4-5]以及应用结果^[6-7]表明,通过飞轮回收的额外机械能可以显著提高液压蓄能器的能量密度。

收稿日期:2024-10-27

基金项目:国家科技支撑计划(2015BAF07B06);徐州市科技计划(KC23005);江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(23KJB460013)

另一个途径是通过创新机械结构来最小化液压蓄能器中的压力变化,即设计一种恒压蓄能器^[8-9]。这样可以在相同的压力变化条件下增加蓄能器的可回收油量,从而提高其能量密度。如文献[2]提出了一种恒压液压蓄能器,其特点是活塞杆面积随行程变化。这种独特结构确保了即使气体压力发生变化,液体压力也能保持相对恒定。能量密度分析表明,当体积比为 2.71 : 1 时,恒压储能装置的能量密度比传统液压蓄能器提高了 16%,当体积比低至 1.8 : 1 时,其能量密度也超过了传统液压蓄能器的最大能量密度。此外,相关文献还研究了基于凸轮结构^[10]以及双皮囊结构^[11]的恒压蓄能器,利用凸轮或皮囊的非线性特性来抵消气体压力与体积变化之间的非线性关系,从而将压力保持在相对稳定的范围内。

还有一些相关研究利用弹性体的应变作为储能形式来提高蓄能器的能量密度^[12]。文献[13]在现有气囊型蓄能器结构的基础上,利用弹性材料聚氨酯的应变能构建了一种应变储能装置,结果表明,通过增加气囊的膨胀压力和使用更薄的气囊可以有效提高该装置的能量密度。此外,文献[14-15]展示了一种基于橡胶材料的新型恒压弹性应变能储能装置,该装置能够在恒压下储存和释放能量。

对于传统液压蓄能器,气体压力和体积是被动地由负载决定的。通过主动控制气体压力等参数来形成一种“开放式”结构^[16-17],可以提高能量密度。这种方式结合了气动系统高能量密度和液压系统高功率密度的优点。文献[18]介绍了一种基于气体调节器的新型可控液压蓄能器,与传统液压蓄能器相比,它的能量密度提高了近 1.5 倍,并且随着体积比的增大而线性增大,突破了传统

液压蓄能器的限制。区别于以上研究思路,通过改变蓄能器结构也可间接改变气体压力和体积从而达到增大压力和减小体积的效果^[19]。该液压蓄能器通过两个活塞室储存油液,使气体室的压力加倍,气体体积减半。与传统活塞式液压蓄能器相比,这种双油室结构显著减小了液压蓄能器的体积,适用于工作空间有限的移动液压设备。

以上方案通常需要对现有蓄能器的机械结构进行修改或添加控制组件,如泵/电机和比例阀。在能量形式方面,现有研究成果主要涉及气体内能、机械能和弹性应变能。作为替代方案,本研究提出了一种基于气液溶解和气体压缩复合原理的高能量密度液压储能方法。通过在传统液压蓄能器的气体部分加入液体,从而使储能过程同时具有气体压缩以及气体和液体的溶解过程。从直观的角度来看,一些气体分子在压力作用下进入液体可以为储存更多压力油提供可能。从能量的角度来看,气液溶解允许一部分能量以液相内能的形式储存,从而减小了气体内能的增幅。

1 复合储能原理分析

复合储能方法的基本工作原理如图 1 所示。传统的气体加载式液压蓄能器通常使用纯氮气(N₂)作为储能介质。本文采用二氧化碳代替 N₂,并在气瓶中加入适量的水,形成了一种基于气液溶解与气体压缩复合原理的液压储能方法。

当液压缸中的高压油进入活塞式蓄能器后,蓄能器中的二氧化碳气体被压缩,部分气态二氧化碳 CO₂(g)克服界面张力,通过扩散进入水中,转化为溶解态的二氧化碳 CO₂(aq),这被称为物理溶解。随后,溶解的二氧化碳与水发生水合反应并形成化学物质,如 HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻,这被称

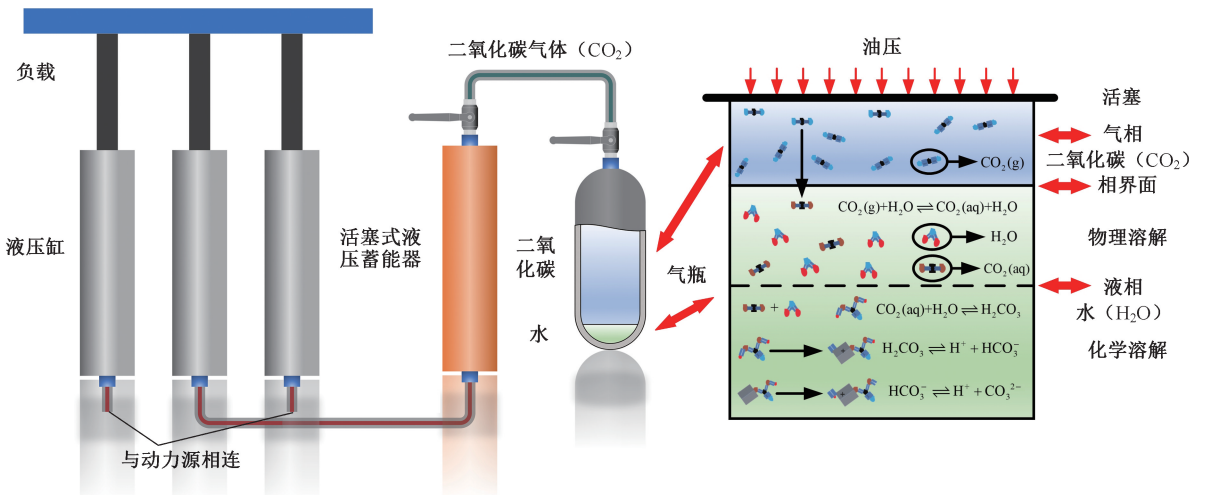


图 1 复合储能方法工作原理

Fig.1 Working principle of composite energy storage method

为化学溶解^[20]。在此过程中,气体压缩与气液溶解同步进行,促使液压能分别以气体内能及液相内能形式存储。这种方案的优势具体表现为:在一定的储油体积下,气体压力上升将更加平缓;或者,在一定的气体压力变化范围内,这种复合储能方法将可以储存更多的压力油。

为了简化表示,本文中用 TGL 表示传统的气体加载式液压蓄能器,GLD 表示基于复合储能原理的液压蓄能器。为方便对比分析,假设 TGL 和 GLD 两种方法的气体分子总摩尔数 n 、预充压力阶段的气体温度 T_0 、蓄能器总体积 V_1 、预充压力 p_0 、最小工作压力 p_1 和最大工作压力 p_2 均相同。TGL 和 GLD 的储能过程如图 2 所示,可以看出,两种方法在三种工作状态下的相应气体体积不同。在初始状态下,由于气瓶中少量液体的存在,GLD 的气体体积将略小于 TGL 的气体体积。在最低工作压力下,GLD 中的少量气体溶解进入液体,使得进入 GLD 的油液量比进入 TGL 的油量稍多。随着压力逐渐增大到最大工作压力,气体在液体中的溶解度也增大,使得此过程中 GLD 存储的油液体积变化高于 TGL。因此,从预充压力至最高工作压力的整个过程中,GLD 比 TGL 可以储存更多的压力油,即蓄能器中存储的总能量更高。当仅考虑最低工作压力至最高工作压力的储能过程时,应当使最低工作压力接近预充压力从而使 GLD 和 TGL 在初始状态下的气体体积接近(忽略 GLD 中较小的液体体积),从

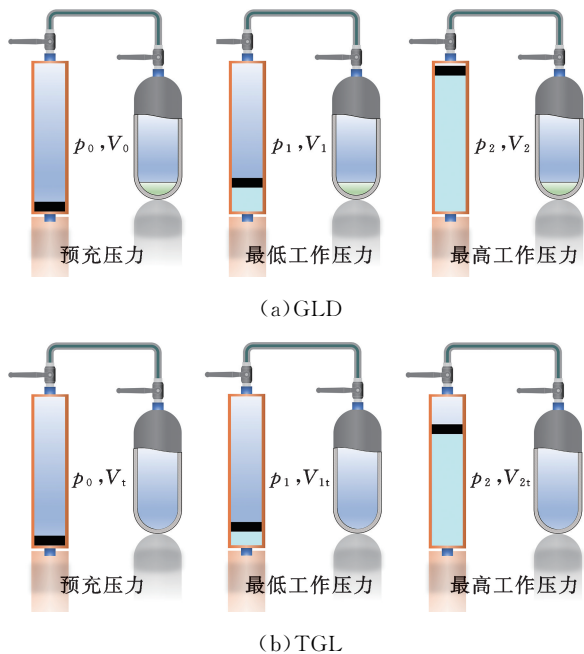


图 2 TGL 和 GLD 的储能过程对比

Fig.2 Comparison of energy storage processes between TGL and GLD

而尽可能地提高能量密度。

本文中,二氧化碳和水的气液组合只是所提出方法的典型方案,任何具有较高溶解度并且符合安全性和耐腐蚀性要求的气液组合都可作为实施方案。

2 能量密度对比分析

理想气体状态方程可表示为

$$p = nRT/V \quad (1)$$

式中: p 为气体压力; V 为气体体积; R 为气体常数; T 为气体温度。

对于 GLD,其中的未溶解气体仍可看作理想气体,因此,上述方程在 GLD 的预充压力阶段可改写为

$$n_{g0} = p_0 V_0 / (RT_0) \quad (2)$$

式中: n_{g0} 为 GLD 在预充压力阶段的未溶解气体分子摩尔数; V_0 为预充压力阶段的气体体积, $V_0 = V_1 - V_L$; V_L 为蓄能器中的液体体积。

根据亨利常数法和摩尔分数法,气液溶解度可表示为

$$x = n_r / (n_r + n_L) = Hp \quad (3)$$

$$n_L = V_L \rho_L / m_L \quad (4)$$

式中: H 为亨利常数; x 为摩尔分数溶解度; n_r 为溶解于液体中的气体分子摩尔数; n_L 为液体分子的摩尔数; m_L 为蓄能器中液体的摩尔质量; ρ_L 为液体的密度。

基于式(3)和式(4)可得预充压力阶段溶解的气体分子摩尔数:

$$n_{r0} = \frac{H_0 p_0 n_L}{1 - H_0 p_0} \quad (5)$$

式中: H_0 为预充压力阶段的亨利常数。

因此,基于式(2)和式(5)可得蓄能器气体分子总摩尔数为

$$n = n_{r0} + n_{g0} = \frac{H_0 p_0 n_L}{1 - H_0 p_0} + \frac{p_0 (V_1 - V_L)}{RT_0} \quad (6)$$

GLD 的气体状态方程根据式(1)可表示为

$$\frac{p_0 V_0}{n_{g0} T_0} = \frac{p_1 V_1}{n_{g1} T_1} = \frac{p_2 V_2}{n_{g2} T_2} = R \quad (7)$$

$$n_{g1} = n - n_{r1} \quad n_{g2} = n - n_{r2}$$

$$n_{r1} = \frac{H_1 p_1 n_L}{1 - H_1 p_1} \quad n_{r2} = \frac{H_2 p_2 n_L}{1 - H_2 p_2}$$

式中:下标 1 和下标 2 分别表示最低工作压力阶段和最高工作压力阶段; n_g 为未溶解气体摩尔数。

TGL 的气体状态方程根据式(1)可表示为

$$\frac{p_0 V_t}{T_0} = \frac{p_1 V_{1t}}{T_{1t}} = \frac{p_2 V_{2t}}{T_{2t}} = nR \quad (8)$$

式中:下标 t 表示 TGL。

对于 TGL,气体温度和体积的关系可表示为

$$T_0 V_t^{k-1} = T_{1t} V_{1t}^{k-1} = T_{2t} V_{2t}^{k-1} = C \quad (9)$$

式中: C 为常数; k 为 TGL 的气体多变指数(等温状态下为

1, 绝热状态下, 氮气的 k 值约为 1.4, 二氧化碳的 k 值约为 1.3)。

根据式(8)和式(9), TGL 的气体状态方程可改写为

$$p_0 V_0^k = p_1 V_1^k = p_2 V_2^k = nCR \quad (10)$$

类比式(9), GLD 的气体温度和体积的关系可表示为

$$T_0 V_0^{k-1} = T_1 V_1^{k-1} = T_2 V_2^{k-1} = \alpha(n_g)C \quad (11)$$

其中, $0 < \alpha(n_g) \leq 1$, $\alpha(n_g)$ 是与溶解度相关的未知修正系数, 且溶解度越大, 该系数越小, 即 $1 \geq \alpha(n_{g0}) > \alpha(n_{g1}) > \alpha(n_{g2}) > 0$ 。

由于 GLD 中大量气体分子溶解进入液体中, 因此同等压力下, TGL 中的气体分子数更多, 造成气体分子在压缩过程中的平均动能更高, 表现为气体温度比 GLD 的气体温度高。此外, 由图 2 可知, 相同压力下, GLD 的气体体积小于 TGL 的气体体积, 因此, 式(11)中的修正系数在绝热状态下理论上是小于 1 的, 且溶解度越大(或未溶解的气体分子摩尔数越小)则该系数越小。由于溶解度和压力成正相关, 因此预充、最低和最高工作压力下的气体摩尔数有 $n_{g0} > n_{g1} > n_{g2}$, 即可得到 $1 \geq \alpha(n_{g0}) > \alpha(n_{g1}) > \alpha(n_{g2}) > 0$ 。此外, 对比式(9)和式(11)可知, 在等温状态下, 假设三种状态下的温度均相同, 则以上分析结论仍然成立。

将式(11)代入式(7), 可得 GLD 的气体状态方程为

$$\frac{p_0 V_0^k}{\frac{n_{g0}}{n} \alpha(n_{g0})} = \frac{p_1 V_1^k}{\frac{n_{g1}}{n} \alpha(n_{g1})} = \frac{p_2 V_2^k}{\frac{n_{g2}}{n} \alpha(n_{g2})} = nCR \quad (12)$$

式(12)可进一步简化为

$$p_0 V_0^{k_e} = p_1 V_1^{k_e} = p_2 V_2^{k_e} = nCR \quad (13)$$

式中: k_e 为 GLD 的气体多变指数。

由式(12)和式(13)分别可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{p_1}{p_2} \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k &= \frac{n_{g1} \alpha(n_{g1})}{n_{g2} \alpha(n_{g2})} > 1 \\ \frac{p_1}{p_2} \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k_e} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

结合图 2 及上述变量定义可定性描述 TGL 和 GLD 的压力-体积变化关系, 如图 3 所示。

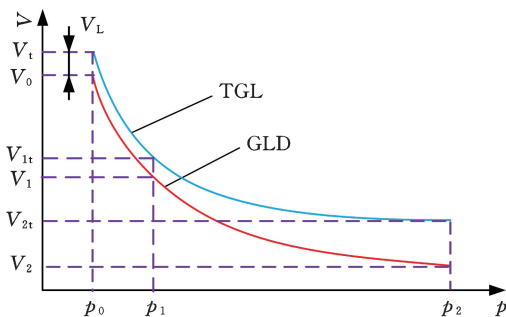


图 3 TGL 及 GLD 的压力-体积曲线

Fig.3 Pressure-volume curves of TGL and GLD

由式(14)可得, GLD 的气体多变指数小于 TGL 的气体多变指数, 即 $k_e < k$, 并且气液溶解度越大则两者的多变指数差别越大。

由于液压蓄能器的储能过程通常可认为是绝热的, 因此, 本文仅在绝热状态下进行分析。假设最高工作压力和最低工作压力的比值为 a , 即 $p_2/p_0 = a$, 则 GLD 和 TGL 在预充压力至最高工作压力阶段储存的能量参考图 3 分别表示为

$$E = \int_{p_0}^{p_2} V dp - (p_2 - p_0)V_2 = \int_{p_0}^{p_2} \left(\frac{p_0 V_0^k}{p}\right)^{1/k_e} dp - (p_2 - p_0)V_2 = \left[\frac{k_e}{k_e - 1} (a^{1-1/k_e} - 1)(V_1 - V_{1L}) - (a - 1)V_2\right] p_0 \quad (15)$$

$$E_t = \int_{p_0}^{p_2} V dp - (p_2 - p_0)V_{2t} = \left[\frac{k}{k - 1} (a^{1-1/k} - 1)V_1 - (a - 1)V_{2t}\right] p_0 \quad (16)$$

假设蓄能器中的液体体积与蓄能器总体积的比值为 b , 即 $V_L/V_1 = b$, 则基于式(10)、式(13)并将式(15)及式(16)除以蓄能器总体积 V_1 可得 GLD 和 TGL 的能量密度分别为

$$\mu = \left[\frac{k_e}{k_e - 1} (a^{1-1/k_e} - 1)(1 - b) - \frac{a - 1}{a^{1/k_e}} (1 - b)\right] p_0 \quad (17)$$

$$\mu_t = \left[\frac{k}{k - 1} (a^{1-1/k} - 1) - \frac{a - 1}{a^{1/k}}\right] p_0 \quad (18)$$

由式(17)和式(18)可以看出, GLD 的能量密度与压力比例 a 、注水体积比 b 、与溶解度相关的气体多变指数 k_e 以及预充压力 p_0 有关。直观可见, 提高预充压力可以提高 GLD 的能量密度且可以放大 GLD 与 TGL 的能量密度差值。图 4 所示为 GLD 与 TGL 的能量密度比和多变指数的关系, 可知, 溶解度越大则气体多变指数越小从而能量密度提高率越大。图 4 中实线为 $b=0.047$ 时不同的压力比例 a 作用下 GLD 与 TGL 的能量密度比随气体多变指数 k_e 的变化规律, 可以看

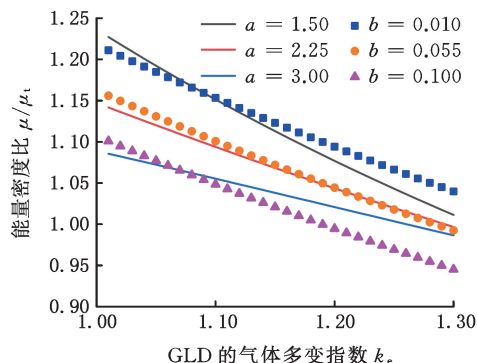


图 4 GLD 与 TGL 的能量密度比和多变指数的关系
Fig.4 The relationship between the energy density ratio of GLD and TGL and polytropic index

出,压力比例越小,即储能过程中的压力变化范围越小,则 GLD 的能量密度越高。此外,储能压力范围越小,则能量密度的提高率对溶解度的灵敏度越高。根据数值分析,最理想情况下,GLD 的最大能量提高率接近 40%。图 4 中符号线为 $a=2$ 时不同的注水比例 b 作用下的能量密度比随气体多变指数 k_e 的变化规律,可以看出,随着 GLD 中注水体积的增大,能量密度显著降低。这是由于蓄能器中的水占用了部分储能空间。因此,当注水过多时,GLD 的能量密度可能低于 TGL 的能量密度。式(17)以及图 4 中的曲线未考虑注水体积和溶解度的关系。实际上,气液溶解度与溶剂的体积成正相关,因此增大水的体积反而在一定程度上有助于提高能量密度。

对于特定的气液组合以及储能压力范围,需要合理设置水的比例从而在最大程度上提高能量密度。假设 GLD 和 TGL 的能量密度相同,并假设 TGL 的气体多变指数 k 为 1.4 而 GLD 的气体多变指数 k_e 为 1.3(纯二氧化碳气体的多变指数为 1.3),利用式(17)和式(18)可得参数 a 和 b 的拟合关系:

$$b = -3.921a^{0.00865} + 3.992 \quad (19)$$

式(19)反映了当 CO_2 气体与水的溶解度为 0(由前述分析可知,只要有部分 CO_2 气体溶解进入水,则 k_e 必然小于 1.3)且 GLD 和 TGL 的能量密度相同时,不同的压力比值下采用的注水比例。在实际储能时,由于必然存在一定的气液溶解,因此当实际注水比例小于此理论比例时,GLD 的能量密度必然大于 TGL 的能量密度。

需要说明的是,由于溶解度受到多种因素影响,因此,该理论比例为安全比例而非能够得到最大能量密度的最优比例。此外,当实际注水比例大于此安全比例时,仍然有可能获得较高的能量密度。

3 气体多变指数分析

确定特定配置下的气体多变指数或获得其变化规律是计算蓄能器体积及匹配工作压力从而正确选择液压蓄能器的前提。由于 GLD 的气体多变指数主要与溶解度有关,而溶解度的影响因素众多,因此本文构造气体多变指数的变化函数 k_e 。并采用拟合方法获得相应参数。

首先定义气体平均压缩速率为

$$\epsilon = \frac{V_w/t}{V_0} = \frac{V_b}{t} \quad (20)$$

式中: V_w 为存储的油液体积或气体体积减小量; $V_b =$

$V_w/V_0, V_b$ 为气体体积变化比例; t 为储能时间。

函数 k_e 应符合以下规律^[21]:①当 $\epsilon \rightarrow \infty$ 或 $t \rightarrow 0$ 时函数的极限应存在,此时储能过程表现为绝热并假设此时的气体多变指数为 k_a ,此参数受溶解度影响,非定值;②当 $\epsilon \rightarrow 0$ 或 $t \rightarrow \infty$ 时函数的极限应存在,此时储能过程表现为等温并假设此时的气体多变指数为 αk_a , α 为系数;③当 ϵ 或 t 在 $0 \rightarrow \infty$ 整个区间内变化时,函数应该是单调连续的并且其一、二阶导数均存在且不改变符号,这个条件反映了当气体平均压缩速率从 0 逐渐增大时气体多变指数的变化不存在间断、突变、折拐或趋向于无穷等情况。

根据以上分析,构造函数为

$$k_e = k_a(1-\alpha)\left(\frac{1}{1-\alpha} - e^{-\beta\frac{V_b}{t}}\right) \quad (21)$$

式中: β 为气体平均压缩速率对气体多变指数的影响系数。

下文将结合实验结果对函数系数进行分析从而得到任意工况下的气体多变指数。

4 仿真分析

为了对所提出的复合储能原理进行验证,本文利用 FLUENT 软件进行了仿真分析。蓄能器总体积为 14 L(实验中分为气瓶和活塞式蓄能器两部分;仿真中将气瓶和活塞式蓄能器合并从而简化建模和仿真过程,但保证仿真和实验中的气液接触面积相同)。气瓶内的注水体积为 1 L(在式(19)以及实际测试的基础上进行了微调)。仿真主要参数如表 1 所示。CFD 模拟的细节总结如下:在模拟之前,添加 N_2 、 CO_2 和 H_2O 等材料,并定义碳酸等产物的材料特性;能量方程、组分传输模型、黏性方程和欧拉多相流被激活,考虑到液压缩蓄能器的储能特性,黏性方程为层流,并在组分传输模型中引入了体积反应。此外,在混合物模

表 1 仿真参数配置

Tab.1 The configuration of simulation parameters

参数	数值
蓄能器半径/mm	90
蓄能器高度/mm	550
活塞最大移动距离/mm	157
注水高度/mm	40
气体预充压力/MPa	5
初始温度/K	300
化学计量系数	1
化学速率指数	1
动网格移动速率/(mm·s ⁻¹)	31.4
松弛因子	0.75
残差	0.001

型中定义水和二氧化碳的化学反应参数。欧拉多相流中各组分的传质机理被定义为亨利定律,以模拟气液溶解过程。求解方法为耦合求解,压力求解方程设置为 PRESTO!。基于动网格技术,活塞从模型顶部压缩气体部分,根据活塞式液压蓄能器的最大容积计算其最大行程。通过控制动网格的压缩速度来模拟能量存储时间。通过标记单位并设置初始化体积分数来分配 H₂O 和 CO₂ 的面积,以模拟不同注水量的影响。气体预充压力通过不同的初始化压力来模拟。

由于篇幅限制,图 5 仅展示了 5 MPa 预充压力、5 s 储能时间下二氧化碳、碳酸体积分数以及气体压力在储能的初始、中间以及终了时刻的状态。以二氧化碳体积分数为例,图中红色区域代表二氧化碳,蓝色区域代表水。在储能过程中,二氧化碳区域被蓄能器活塞逐渐压缩,部分二氧化碳进入水中并和水产生碳酸等产物,同时,气体压力逐渐上升。图 6 所示为 CO₂-H₂O、纯 CO₂ 以及纯 N₂ 在 5 s 储能时间及不同预充压力下的压力-体积变化曲线,可以看出,CO₂-H₂O 的压力上升曲线最为平缓。

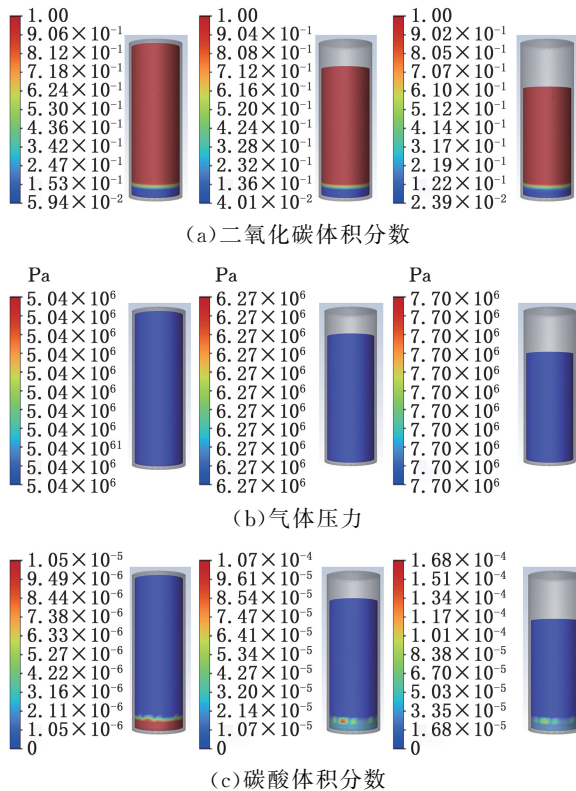


图 5 仿真结果

Fig.5 Simulation results

图 7 中柱状图为基于图 6 获得的不同预充压力下的压差,其中蓝色为 CO₂-H₂O 组合在气体从 13L 压缩至 9L 后的压力变化,绿色为纯 CO₂ 气体与 CO₂-H₂O 组合相比增加的压差,红色为

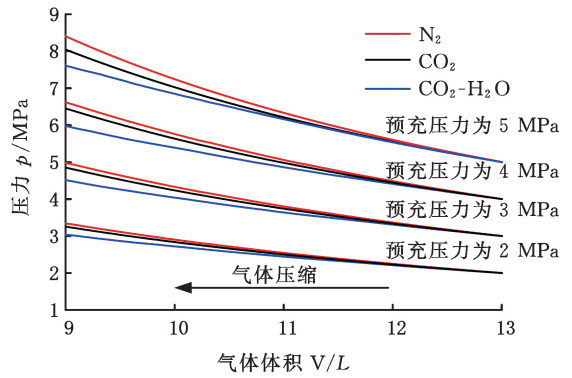


图 6 不同储能介质在不同预充压力下的压力-体积仿真曲线

Fig.6 Pressure-volume simulation curves of different energy storage medias under different pre-charge pressures

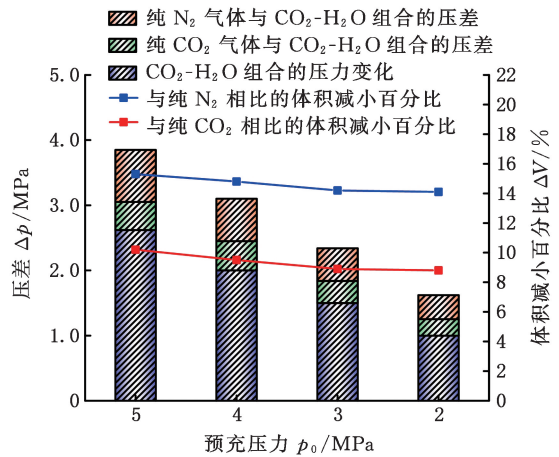


图 7 压差及体积减小百分比

Fig.7 Percentage reduction in volume and pressure difference

纯 N₂ 与 CO₂-H₂O 组合相比增加的压差。从图 7 中可以看出,随着预充压力的增大,纯 CO₂ 气体和纯 N₂ 与 CO₂-H₂O 组合的压差逐渐增加。这是因为纯 N₂ 的气体多变指数高于纯 CO₂ 气体,而 CO₂-H₂O 组合的气体多变指数因气液溶解的存在而低于纯 CO₂。由式(10)及式(13)可知,多变指数越小则相同储油体积下的压力上升越缓慢。利用这一特点,本文所提出的复合储能方法可以在相同的储能压力范围内储存更多的压力油;或者,基于复合储能原理的液压蓄能器可以采用较小的体积实现与纯 CO₂ 和纯 N₂ 蓄能器相同的压力变化规律。如图 7 中曲线所示,通过复合储能原理可以减小蓄能器体积从而减小装机空间。

5 实验分析

图 8 所示为复合储能原理的实验设备,活塞式蓄能器体积为 4 L,气瓶体积为 10 L。实验的具体过程如下。

1) 实验准备。实验前,将一定体积的水注入

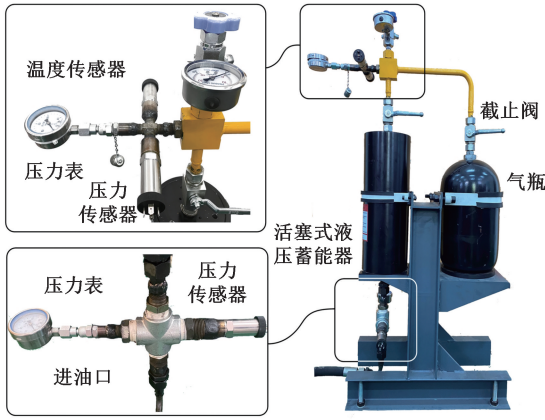


图 8 实验设备

Fig.8 Experimental equipment

气瓶,然后向蓄能器充入二氧化碳,直至达到预充压力。因此,可以在实验前调整水量和预充压力的大小,以模拟不同的操作条件。

2) 储能阶段。液压泵通过方向阀和节流阀向液压缸的有杆腔供油,推动液压缸移动,因此,液压缸无杆腔中的油将通过管道加压到被测蓄能器中,从而完成储能过程。在此过程中,通过调节节流阀,可以控制储能速度以改变储能时间。

3) 能量释放阶段。切换方向阀将液压缸的有杆腔连接到油箱。由于外部压力的降低,被测蓄能器内的气体膨胀,先前储存的油被释放。油液进入液压缸的无杆腔,推动液压缸反向移动,直到被测蓄能器中的所有油都被释放。可以通过控制节流阀来调节能量释放时间。

由上述实验工作原理可以看出,进入液压蓄能器的油量取决于液压缸的工作面积和实际行程,因此,通过测量液压缸的实时位移并将其乘以液压缸的工作面积,可以获得填充到液压蓄能器中的油量。同时,还可以获得储能速度,以确保液压蓄能器的储能时间符合预期。

图 9 所示为实验得到的 CO₂-H₂O、纯 CO₂ 以及纯 N₂ 在 5 s 储能时间及不同预充压力下的压力-体积变化曲线。实验及仿真曲线相互佐证,共同说明了所提出的复合储能方法的有效性。

由压力-气体体积变化曲线并根据式(13)可获得不同工况下的气体多变指数。图 10 为气体多变指数以及基于式(21)的拟合曲线。由拟合结果可以看出,预充压力的增大可以减小气体多变指数从而显著提高能量密度。这一结果与图 4 以及第 2 节的分析相符。此外,预充压力的大小对绝热状态下的气体多变指数 k_a 的影响相对较小。然而,随着储能时间的增长,储能过程逐渐趋向于等温并且此时预充压力对气体多变指数的影响逐渐增大,即预充压力越大则气体多变指数减小越

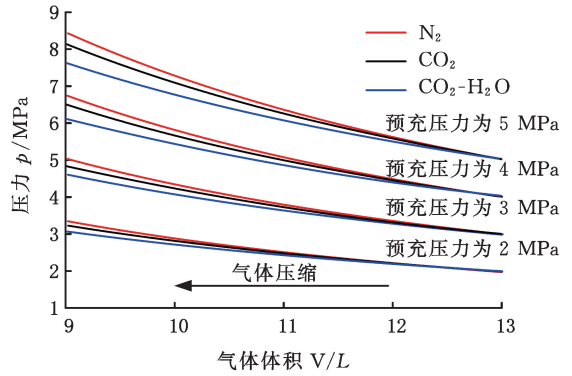


图 9 不同储能介质在不同预充压力下的压力-体积实验曲线

Fig.9 Pressure-volume experiment curves of different energy storage medias under different pre-charge pressures

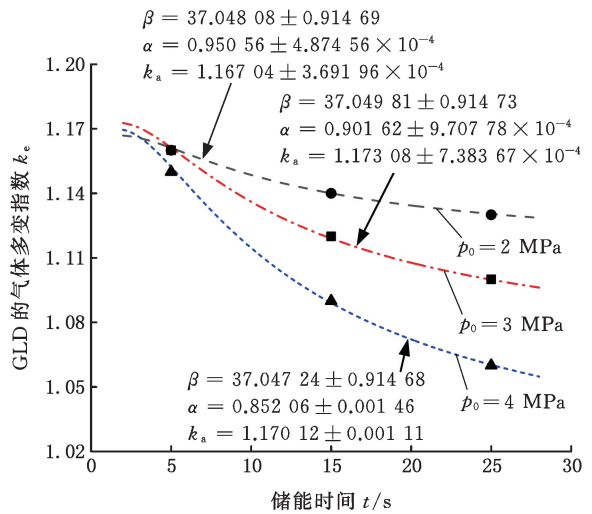


图 10 不同预充压力下的拟合结果及参数值

Fig.10 Fitting results and parameter values under different pre-charge pressures

快(反映为参数 α 的快速下降趋势)。这是因为等温状态相比于绝热状态的储能时间较长,气体与液体能够充分接触和溶解从而有助于减小气体多变指数。另外,三种预充压力下的参数 β 基本保持不变,表明气体平均压缩速率或储能时间对气体多变指数的影响与预充压力的关系较小。

从定量分析的角度来看,由于 k_a 变化很小,因此在式(21)中可以取平均值作为其结果。预充压力每提高 1 MPa 则参数 α 约下降 0.05。参数 β 基本不变可以作为常数。因此,对于本文案例(即 V_L 为 1 L, V_w 为 4 L, V_0 为 13 L),其气体多变指数的表达式经整理可表示为

$$k_e = 0.0585(p_0 - 1) \left(\frac{20}{p_0 - 1} - e^{-11.4/t} \right) \quad (22)$$

根据式(22)可以进一步绘制气体多变指数、储能时间以及预充压力的关系图,如图 11 所示。基于以上分析,可以计算其他工况下的气体多变指数,从而获得气体压力和体积的变化关系。

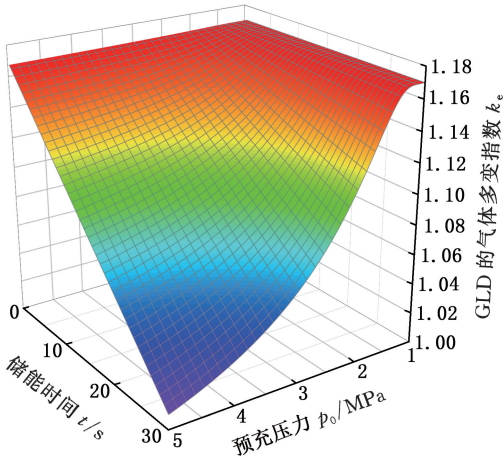


图 11 气体多变指数与储能时间及预充压力的关系
Fig.11 The relationship between gas polytropic index, energy storage time, and pre-charge pressure

在比较能量密度时需要令 GLD 和 TGL 使用相同的压力计算范围,继而可以计算得到式(17)和式(18)的结果。根据前述分析,不同的压力范围(或压力比值)对能量密度也有影响。本文假定预充压力 5 MPa、4 MPa、3 MPa 和 2 MPa 的计算压力范围分别为 5~8.5 MPa、4~7 MPa、3~5.5 MPa 和 2~3.5 MPa。复合储能原理在不同预充压力和储能时间下的能量密度如图 12 所示。

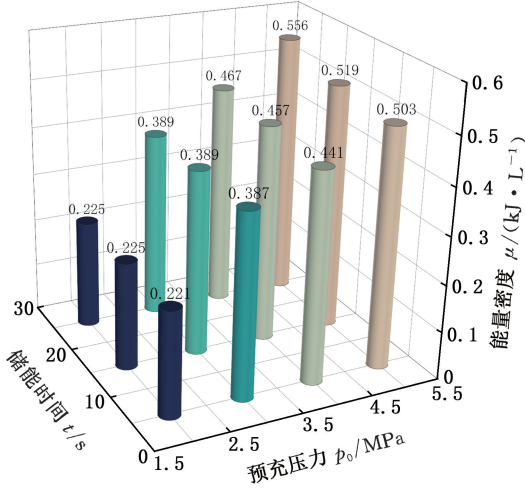


图 12 不同预充压力和储能时间下的能量密度
Fig.12 Energy density under different pre-charge pressures and energy storage times

从图 12 中可以看出,随着预充压力的增大,能量密度逐渐提高。此外,储能时间的增长也有助于进一步提高能量密度,但影响相对较小。在大多数使用液压蓄能器的场合,其储能时间也相对较短,因此,本文仅展示了 5 s 储能时间下各种储能介质的能量密度,如图 13 所示。从图 13 中可以看出,复合储能方法的能量密度在多种预充压力下均是最高,并且预充压力越大,三者差别越明显。在 5 MPa 压力、5 s 储能时间下,CO₂-

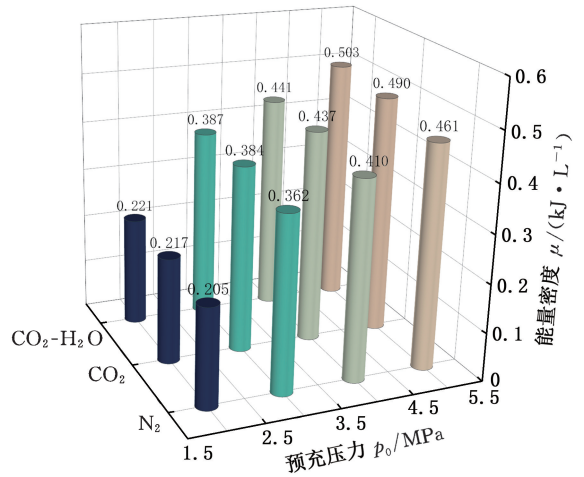


图 13 不同储能介质在不同预充压力下的能量密度
Fig.13 Energy density of different energy storage media under different pre-charge pressures

H₂O 组合的能量密度比纯 N₂ 的传统液压蓄能器的能量密度高出约 9%。

6 结论与展望

1) 阐述了复合储能原理并推导和对比了传统气体加载式液压蓄能器和复合储能原理液压蓄能器的能量密度。探讨和分析了注水体积、预充压力、气体多变指数以及压力比例等因素对能量密度的影响,给出了注水比例的安全阈值。

2) 使用 CO₂-H₂O 组合作为储能介质进行了仿真和实验分析,证实了复合储能原理在提高能量密度方面的有效性。获得了储能过程中气体压力和体积之间的关系并计算得到不同工况下的能量密度和气体多变指数。在此基础上获得了气体多变指数和预充压力、储能时间的变化规律函数。

3) 更高的预充压力和更长的储能时间可以更好地提高能量密度。虽然较大的液体体积会增加溶解的气体量,但过大的液体体积实际上会限制能量密度的提高。具体而言,在预充压力 5 MPa、储能时间 5 s、注水量 1 L 的条件下,储能密度提高率达到 9%。

4) 从理论推导、仿真和实验结果可以看出,进一步提高能量密度的关键是实现气体和液体的高效溶解。本文仅研究了 CO₂-H₂O 组合,未来可以进一步探索其他高溶解度气液组合或采用多孔介质等方式以进一步提高能量密度。此外,虽然本文的实验参数不足以使气体液化,但在后续的研究中,气体在压缩过程中的相变、储能的热力学过程、功率密度等方面也需要进一步研究。

5) 从实际应用的角度出发,需要对液压蓄能器内与水接触的部分进行防锈及耐腐蚀处理从而

防止水或碳酸对蓄能器的破坏。此外,需要改进活塞密封以防止水蒸气等进入液压部分。

参考文献:

- [1] DINDORF R, TAKOSOGLU J, WOS P. Review of Hydro-pneumatic Accumulator Models for the Study of the Energy Efficiency of Hydraulic Systems[J]. *Energies*, 2023,16(18):6472
- [2] Van de Ven J D. Constant Pressure Hydraulic Energy Storage through a Variable Area Piston Hydraulic Accumulator[J]. *Applied Energy*, 2013,105:262-270.
- [3] VANDEVEN J D. Increasing Hydraulic Energy Storage Capacity:Flywheel-accumulator[J].*International Journal of Fluid Power*,2009,10:41-50.
- [4] CRONK P, VANDEVEN J, STROHMAIER K. Design Optimization, Construction, and Testing of a Hydraulic Flywheel Accumulator[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021,44:103281.
- [5] 马浩钦,鲍东杰,秦泽.飞轮式液压蓄能器的储能特性研究[J].*液压与气动*,2020(9):35-41.
MA Haoqin, BAO Dongjie, QIN Ze. Research on Energy Storage Characteristics of Flywheel Hydraulic Accumulator[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2020(9):35-41.
- [6] LATAS W, STOJEK J. A New Type of Hydrokinetic Accumulator and Its Simulation in Hydraulic Lift with Energy Recovery System [J]. *Energy*, 2018,153:836-848.
- [7] 李竞克,王强.飞轮储能蓄能器挖掘机动臂设计及负载特性分析[J].*中国工程机械学报*,2024,22(3):337-340.
LI Jingke, WANG Qiang. Design and Load Characteristics Analysis of Excavator Boom with Flywheel Energy Storage Accumulator[J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2024,22(3):337-340.
- [8] 荆忠亮,宁志强,卫立新.基于恒压蓄能器非对称缸能量回收及强度校核[J].*中国工程机械学报*,2024,22(4):452-457.
JING Zhongliang, NING Zhiqiang, WEI Lixin. Energy Recovery and Strength Verification of Asymmetric Cylinder Based on Constant Pressure Accumulator[J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2024,22(4):452-457.
- [9] 赵美卿,卫立新,宁志强.恒压蓄能器调控下制动能量回收方法与样机试制[J].*液压与气动*,2023,47(3):123-129.
ZHAO Meiqing, WEI Lixin, NING Zhiqiang. Braking Energy Recovery Method and Prototype Trial Production under the Regulation of Constant Pressure Accumulator[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2023,47(3):123-129.
- [10] ZHAO Donglai, GE Wenjie, MO Xiaojuan, et al. Design of a New Hydraulic Accumulator for Transient Large Flow Compensation [J]. *Energies*, 2019,12(16):3104.
- [11] 秦泽,王爱红,马浩钦,等.基于 AMESim 的新型蓄能器节能分析[J].*机床与液压*,2021,49(20):137-140.
QIN Ze, WANG Aihong, MA Haoqin, et al. Energy-saving Analysis of a Novel Accumulator based on AMESim[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2021,49(20):137-140.
- [12] 杨冬冬,熊伟,度红望.气动应变能蓄能器充放气动特性仿真与实验分析[J].*液压与气动*,2021,45(4):110-115.
YANG Dongdong, XIONG Wei, DU Hongwang. Simulation and Experimental Analysis of Charging and Discharging Dynamic Characteristics of Pneumatic Strain Energy Accumulator[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2021,45(4):110-115.
- [13] TUCKER J M, BARTH E J. Design, Fabrication, and Evaluation of a Distributed Piston Strain-energy Accumulator[J]. *International Journal of Fluid Power*, 2013,14:47-56.
- [14] DU Hongwang, BIAN Xin, XIONG Wei. Energy Analysis and Verification of a Constant-pressure Elastic-strain Energy Accumulator Based on Exergy Method[J]. *Sustainability*, 2022,14(18):11689.
- [15] DU Hongwang, BIAN Xin, XIONG Wei. Energy-saving for Industrial Pneumatic Actuation Systems by Exhausted Air Reuse Based on a Constant Pressure Elastic Accumulator[J]. *Sustainability*, 2022,14(6):3535.
- [16] SAADAT M, SHIRAZI F A, LI P Y. Modeling and Control of an Open Accumulator Compressed Air Energy Storage(CAES) System for Wind Turbines[J]. *Applied Energy*, 2015,137:603-616.
- [17] 马浩钦,武锷辉,高有山,等.可调压式液压蓄能器的节能仿真分析[J].*机床与液压*,2021,49(15):141-145.
MA Haoqin, WU Kunhui, GAO Youshan, et al. Energy-saving Simulation Analysis of Adjustable Pressure Hydraulic Accumulator[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2021,49(15):141-145.
- [18] LIU Yanxiong, XU Zhicheng, HUA Lin, et al. Analysis of Energy Characteristic and Working Performance of Novel Controllable Hydraulic Accumulator with Simulation and Experimental Methods[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020,221:113196. (下转第 443 页)

- and Microwave Sintering[J]. *Ceramics International*, 2024, 50(1):1807-1813.
- [17] QIAO Li, WANG Zhenhua, LU Taiyi, et al. Effects of Microwave Sintering Temperature and Holding Time on Mechanical Properties and Microstructure of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{N-SiC}$ Ceramics[J]. *Materials*, 2019, 12(23):3837.
- [18] XU Weiwei, YUAN Juntang, YIN Zengbin, et al. Effect of Metal Phases on Microstructure and Mechanical Properties of Si_3N_4 -based Ceramic Tool Materials by Microwave Sintering[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(16):19872-19878.
- [19] QI Yongshun, SONG Bo, WANG Hailong, et al. Investigation on the Microwave Sintering Heating Process and Mechanism of H-BN/ZrO₂/SiC Composites[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(12):20594-20600.
- [20] XU Weiwei, YIN Zengbin, YUAN Juntang, et al. Preparation and Characterization of Si_3N_4 -based Composite Ceramic Tool Materials by Microwave Sintering[J]. *Ceramics International*, 2017, 43(18):16248-16257.
- [21] XU Weiwei, YIN Zengbin, YUAN Juntang, et al. Reliability Prediction of a Microwave Sintered Si_3N_4 -based Composite Ceramic Tool[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(12):16737-16745.
- [22] KHALILE N, MEUNIER C, PETIT C, et al. Microwave Sintering of Dense and Lattice 3Y-TZP Samples Shaped by Digital Light Processing[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(5):7350-7358.
- [23] WANG Zemin, TANG Zhimeng, XU Lei, et al. Thermal Properties and Thermal Cycling Stability of Graphite/Copper Composite Fabricated by Microwave Sintering[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 20:1352-1363.
- [24] 钟汶帆, 吴孟强. 微波氮化硅陶瓷高温介电性能建模研究[J]. *压电与声光*, 2014, 36(5):857-860. ZHONG Wenfan, WU Mengqiang. Dielectric Properties Modeling Studies of Silicon Nitride Ceramic in High Temperature[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2014, 36(5):857-860.
- [25] 李志强, 谭晓瑜, 段忻磊, 等. 氮化硅微波高温介电函数深度学习分子动力学模拟[J]. *物理学报*, 2022, 71(24):399-407. LI Zhiqiang, TAN Xiaoyu, DUAN Xinlei, et al. Deep Learning Molecular Dynamics Simulation on Microwave High-temperature Dielectric Function of Silicon Nitride[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(24):399-407.
- [26] ZHU Zhiyong, YIN Zengbin, HONG Dongbo, et al. Preparation of Complex-shaped $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiCp}/\text{SiCw}$ Ceramic Tool by Two-step Microwave Sintering[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(17):27362-27372.

(编辑 王旻玥)

作者简介:徐伟伟*,男,1991年生,博士、讲师。研究方向为先进制造工艺与装备。E-mail: xuweiwei@njit.edu.cn.

本文引用格式:

徐伟伟,张作轩,朱松青,等.氮化硅基陶瓷材料微波烧结参数实验优化[J].*中国机械工程*,2025,36(3):435-443.

XU Weiwei, ZHANG Zuoxuan, ZHU Songqing, et al. Experimental Optimization of Microwave Sintering Parameters for Si_3N_4 -based Ceramic Materials[J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(3):435-443.

(上接第 434 页)

- [19] YANG Cheng, ZHOU Lianquan, WANG Jinfeng, et al. Research on Energy Saving System of Hydraulic Excavator Based on Three-chamber Accumulator[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72:108571.
- [20] 李树刚,张静非,林海飞,等.采空区碳封存条件下 CO₂-水界面特性及溶解传质规律[J].*煤炭学报*, 2024,49(1):513-527. LI Shugang, ZHANG Jingfei, LIN Haifei, et al. CO₂-water Interface Characteristics and Dissolution Mass Transfer Laws under Carbon Sequestration Conditions in Goaf[J]. *Coal Journal*, 2024, 49(1):513-527.
- [21] 杨伟达,何天德,韩宝琦.蓄能器充压过程中气体多变指数的确定及储油量计算[J].*吉林林学院学*

报,1998,14(1):27-30.

YANG Weida, HE Tiande, HAN Baoqi. Determination of Gas Variability Index and Calculation of Oil Storage Capacity during Accumulator Charging Process[J]. *Journal of Jilin Forestry University*, 1998, 14(1):27-30.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:王伟平*,男,1990年生,讲师。研究方向为液压节能与控制。E-mail:kuangdaxiao5@cumt.edu.cn.

本文引用格式:

王伟平,周心怡,陆顺.基于气液溶解与气体压缩复合原理的高能量密度液压储能方法[J].*中国机械工程*,2025,36(3):426-434.

WANG Weiping, ZHOU Xinyi, LU Shun. High Energy Density Hydraulic Energy Storage Method Based on Composite Principle of Gas Liquid Dissolution and Gas Compression[J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(3):426-434.