

液化空气储能基本循环的热力学分析

孙潇^{1,2,✉}, 朱光涛¹, 裴爱国³

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;

2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 3. 中国能源建设股份有限公司, 北京 100022)

摘要: [目的] 以新能源为主体的新型电力系统对储能的需求不断增加, 液化空气储能是一种新兴的长时间、大容量物理储能方法, 具有广泛的应用前景。文章旨在探究液化空气储能的热力学原理以及关键参数对储能效率的影响规律。[方法] 建立了液化空气储能三种基本循环: 分离式循环、冷能回收循环、冷能热能回收循环的热力学模型, 分析了冷能回收、热能回收、高压压力、释能压力等关键参数对液化率和循环效率的影响。[结果] 结果表明液化率与循环效率正相关。分离式循环的液化率与循环效率极低, 冷能回收循环由于利用了液空复温过程中的冷量可以显著提升液化率与循环效率, 冷能热能回收循环在此基础上利用了压缩热而进一步提升液化率与循环效率。液化率与循环效率随冷能回收量的增加而升高、随高压压力的升高而升高、随释能压力的升高而下降。[结论] 冷能热能回收循环是液化空气储能的优选方案。高效蓄冷将对提升循环效率发挥重要作用。在液空复温过程中利用工业余热、废热有助于进一步提升循环效率。

关键词: 液化空气储能; 热力学分析; 冷能热能回收; 液化率; 循环效率

中图分类号: TK02; TK123

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)04-0053-10

开放科学(资源服务)二维码:



Thermodynamic Analysis of Basic Cycles of Liquid Air Energy Storage System

SUN Xiao^{1,2,✉}, ZHU Guangtao¹, PEI Aiguo³

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. China Energy Engineering Co., Ltd., Beijing 100022, China)

Abstract: [Introduction] The demand for energy storage of new power systems (dominated by renewable energy) is increasing. Liquid air energy storage is a new method of physical energy storage with large capacity for long time storage, which has a broad application prospect. the purpose is to explore the thermodynamic principle of liquid air energy storage system and the influence of key parameters on energy storage efficiency. [Method] The thermodynamic models of three basic cycles of liquid air energy storage system: separated cycle, cooling capacity recovery cycle and cooling capacity and heat recovery cycle were established. The influence of key parameters such as cold energy recovery, heat recovery, high pressure and discharge pressure on liquid yield and cycle efficiency was analyzed. [Result] The results show that there is a positive correlation between liquid yield and cycle efficiency. The liquid yield and cycle efficiency of the separated cycle are extremely low. The cooling capacity recovery cycle, using the cooling capacity during temperature rise, significantly improves the liquid yield and cycle efficiency. The cooling capacity and heat recovery cycle further improve the liquid yield and recycling efficiency for the use of heat of compression. The liquid yield and cycle efficiency increase with the increase of cooling capacity recovery, increase with the increase of high pressure, and decrease with the increase of discharge pressure. [Conclusion] Cooling capacity and heat recovery cycle is the optimal scheme of liquid air energy storage. Efficient cooling capacity storage plays an important role in improving cycle efficiency. The utilization of industrial waste heat in the process of liquid-air reheating is helpful to further improve cycle efficiency.

Key words: liquid air energy storage; thermodynamic analysis; cooling capacity and heat recovery; liquid yield; cycle efficiency

收稿日期: 2022-03-07 修回日期: 2022-04-14

基金项目: 中国能建广东院科技项目“新型电力系统下氢能与储能关键技术研究”(EV10071W)

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

在以新能源为主体的新型电力系统中,高比例可再生能源的峰谷差大、波动性强等特征将更加凸显,电网的稳定运行将受到巨大考验。储能技术将在提高电网对新能源的消纳能力,削峰填谷,提高电能质量等方面发挥重要作用。

已投入商业应用的大规模储能技术主要有抽水蓄能和压缩空气储能^[1]。抽水蓄能是目前最为经济可靠,容量最大,寿命最长的大规模储能技术,面临的主要挑战在于其建设对地理条件要求比较高,靠近负荷中心的建设场地越来越难以寻找^[2]。压缩空气储能通常采用地下盐穴储存高压空气,储气规模大,建造成本与抽水蓄能相当,但同样依赖于地理条件。为此,有学者提出将人工造穴^[3]、金属材料高压容器^[4]、柔性复合材料高压容器^[5]等作为储气装置,以期摆脱地理条件的限制^[6]。

液化空气储能在压缩空气储能的基础上增加液化环节,将空气以低压液态储存在绝热储罐中。由于液空的密度远大于压缩空气的密度,需要的储存空间大幅减少。液化空气储能不依赖于盐穴等地理条件,建设周期短,使用寿命超过20年^[7]。然而由于液化过程存在不可逆损失,液化空气储能的循环效率比压缩空气储能低5%~10%。考虑到压缩空气储能和液化空气储能的优劣与局限性,两者可以互为补充^[8]。

1977年,Smith^[9]首次提出使用液化空气作为储能介质给电网调峰,目的是开发一个比传统压缩空气储能系统体积更小的电能存储系统。液化空气储能的概念提出后,国内外研究人员致力于推动其商业化。Kishimoto等^[10]建造了一个2.6 MW的由液化空气驱动的朗肯循环,证实了其具有良好的发电稳定性。Chino等^[11]设计了一个带补燃和LNG冷能利用的液化空气储能方案。Highview Power和英国利兹大学的合资企业设计和建造了世界上第一座集成的液化空气储能电厂^[12]。这座350 kW/2.5 MWh的中试规模的电厂于2010年投入使用,于2013年完成测试,之后被转移到伯明翰大学进行进一步的

研究和开发。该系统为液化空气储能的商业化发展奠定了基础。2018年,Highview Power公司的另一座5 MW/15 MWh的预商用电厂投入运营^[13],该项目的设计效率为55%。近期,Highview Power公司在英国和美国部署了两座50 MW的液化空气储能电厂^[14],取名为CRYOBattery(低温电池)。这将是全球第一批并网连接的液化空气储能电厂。

截至目前,国内液化空气储能示范项目仅有一个,是国家电网在苏州市同里镇建设的综合能源服务中心内的500 kW液态空气储能示范项目,项目于2018年建成。该液化空气储能系统可为园区提供500 kWh电力,同时,利用溴化锂冷热双效机组为园区供冷和供热。

液化空气储能循环主要由液化循环加动力循环组成。液化循环将常温常压的空气液化得到液空,液空经过动力循环的加压汽化后膨胀做功最终变成常温常压下的空气。在液化循环方面,不同研究人员采用了不同的技术路线,如林德循环^[15]、克劳特循环^[16]、卡皮查循环^[17]和海兰德循环^[18]。但在发电循环方面,朗肯循环几乎是唯一选择^[16-18]。在液化循环和发电循环的基础上,通常还辅以储冷储热系统以实现冷能和热能的回收利用^[19-21]。

总体来看,液化空气储能的工业化应用处于初级阶段,设计方法尚不成熟。厘清液化空气储能系统液化率和循环效率的关键影响因素及其作用机制,探索适用于提高循环效率的方法,对于该技术的发展是非常必要的。文章对液化空气储能系统基本循环进行热力学分析,探究冷能回收和热能回收的必要性;分析关键参数如冷能回收终点温度、高压压力、释能压力的影响机制,为高效的液化空气储能系统的参数设计提供参考。

1 液化空气储能基本循环热力学模型

文章中液化空气储能基本循环由最简单的液化循环(林德循环)以及基础的动力循环(朗肯循环)组成。根据液化循环与动力循环的能量耦合程度分为三类:分离式循环、冷能回收循环、冷能热能回收循环。在分离式循环中,液化循环与动力循环相互独

立; 在冷能回收循环中, 动力循环液空汽化复温过程的冷量被回收用于液化循环部分的空气预冷; 冷能热能回收循环在此基础上, 进一步回收液化循环压缩热用于动力循环的液空复温。

为了抓住主要矛盾, 文章进行热力学分析时做出如下假设: 除节流阀之外没有不可逆压降; 无漏热; 换热器效率、压缩机、低温泵、膨胀机的效率均为 100%。

1.1 分离式循环

分离式循环示意图如图 1 所示, 温-熵 ($T-s$) 图如图 2 所示。其中林德液化循环由等温压缩 (1-2)、等压冷却 (2-3)、等焓节流 (3-4)、气液分离 (4-6-5)、低温气体等压复温 (5-1) 组成。朗肯动力循环由液空等熵增压 (6-7)、等压复温 (7-8)、等熵膨胀 (8-9) 组成。

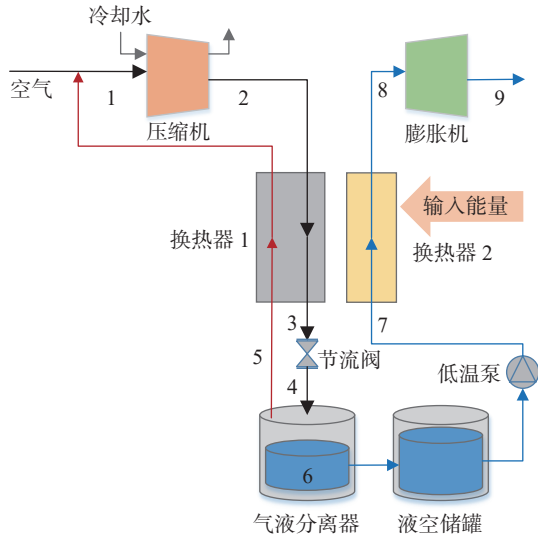


图 1 分离式循环流程示意图

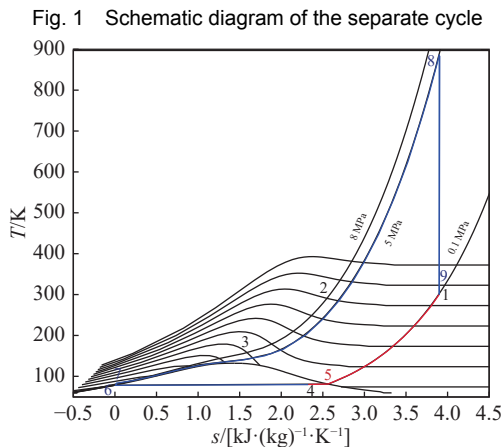


图 2 分离式循环 $T-s$ 图 (数据见表 1)

Fig. 2 $T-s$ diagram of the separate cycle (data shown in Tab. 1)

等温压缩 (1-2) 过程中压缩机电功耗和放热量分别为:

$$w_c = T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2) \quad (1)$$

$$q_c = T_1(s_1 - s_2) \quad (2)$$

式中:

w_c ——单位质量空气的压缩电功耗 (kJ/kg);

T ——温度 (K);

s ——空气的比熵 [kJ/(kg·K)];

h ——空气的比焓 (kJ/kg);

q_c ——单位质量空气的压缩放热量 (kJ/kg);

1, 2 ——下标数字表示状态点序号。

高压空气经过节流阀节流膨胀至点 4, 此时有部分气体被液化, 节流后未液化气体从气液分离器引出 (点 5), 流经换热器 1 复温到常温返回到压缩机入口。对换热器 1、节流阀和气液分离器做质量和能量平衡, 得液化率 y 为:

$$y = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_6} \quad (3)$$

式中:

y ——液化率。

由于液空的不可压缩性, 在等熵增压 (6-7) 过程中低温泵电功耗为:

$$w_p = \frac{p_7 - p_6}{\rho_6} \quad (4)$$

式中:

w_p ——单位质量液空的泵功 (kJ/kg);

p ——液空压力 (kPa);

ρ ——液空密度 (kg/m³)。

增压后的液空流经换热器 2 汽化升温 (7-8), 此过程单位质量液空的吸热量为:

$$q_{in} = h_8 - h_7 \quad (5)$$

式中:

q_{in} ——单位质量液空复温过程从外界吸热量 (kJ/kg)。

高温高压的空气膨胀做功 (8-9) 带动发电机对外发电实现释能, 单位质量空气的做功量为:

$$w_l = h_8 - h_9 \quad (6)$$

式中:

w_l ——单位质量空气做功量 (kJ/kg)。

储能循环效率定义为释能输出的功与输入的功

和热的比值:

$$\eta = \frac{y(w_t - w_p)}{w_c + y \cdot q_{in}} = \frac{w_t - w_p}{w_c/y + q_{in}} \quad (7)$$

式中:

η ——循环效率。

对上式进行定性分析可以发现,增加液化率 y 、降低输入的热量 q_{in} 都有助于提升循环效率。

1.2 冷能回收循环

冷能回收循环示意图如图3所示, $T-s$ 图如图4所示。在分离式循环的基础上,将液空复温过程中低于室温的部分冷能回收,用于预冷液化循环中的空气,增加了一个状态点 $8'$ 。

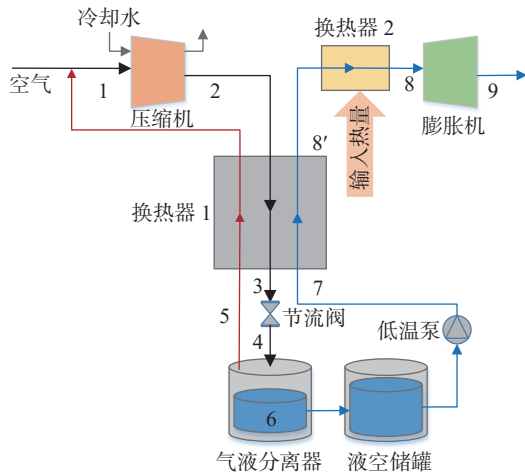


图3 冷能回收循环流程图

Fig. 3 Schematic diagram of the cooling capacity recovery cycle

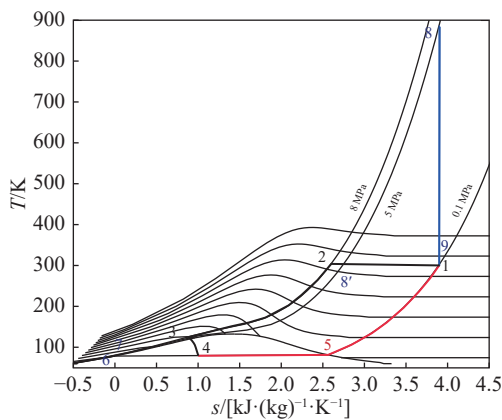


图4 冷能回收循环 $T-s$ 图(数据见表2)

Fig. 4 $T-s$ diagram of the cooling capacity recovery cycle (data shown in Tab. 2)

单位质量液空复温过程回收的冷能 q_{rec} 为:

$$q_{rec} = h_{8'} - h_7 \quad (8)$$

式中:

q_{rec} ——单位质量液空回收的冷能(kJ/kg)。

复温后的空气流经换热器2升温($8'-8$),此过程单位质量液空的吸热量 q_{in} 减小为:

$$q_{in} = h_8 - h_{8'} \quad (9)$$

此时,对换热器1、节流阀和气体分离器做质量和能量平衡,得到新的液化率 y 为:

$$y = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_6 - q_{rec}} \quad (10)$$

冷能回收循环效率同样为式(7)。将式(10)与式(3)比较可以发现冷能回收循环的液化率表达式中分母更小,液化率更大,可以预见循环效率会得到提升。

1.3 冷能热能回收循环

冷能热能回收循环示意图如图5所示, $T-s$ 图如图6所示。在冷能回收循环的基础上,将液化循环中空气的压缩热回收,用于辅助动力循环中的空气复温,增加了一个状态点 $8''$ 。

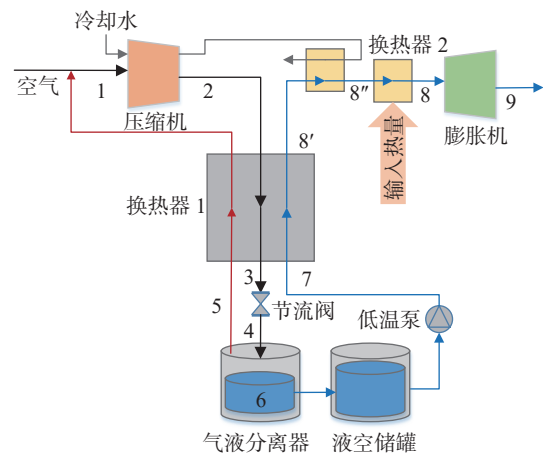


图5 冷能热能回收循环流程图

Fig. 5 Schematic diagram of cooling capacity and heat recovery cycle

单位质量空气复温过程回收利用的压缩热为:

$$q_{rec,h} = h_{8''} - h_{8'} \quad (11)$$

式中:

$q_{rec,h}$ ——单位空气复温过程回收利用的压缩热量(kJ/kg)。

复温后的空气流经换热器2升温($8''-8'$),此过程单位质量液空的吸热量 q_{in} 进一步减小为:

$$q_{in} = h_8 - h_{8''} \quad (12)$$

此时,液化率 y 与冷能回收循环一致,为式(10),循环效率同样为式(7)。

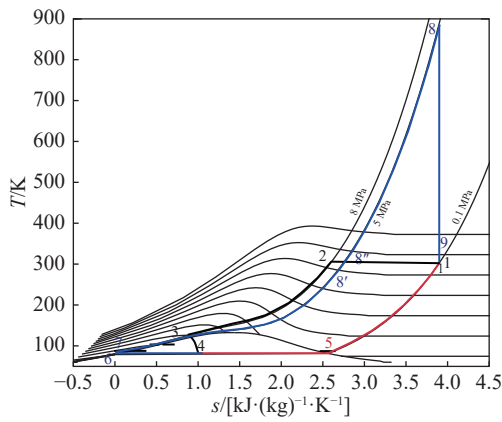


图 6 冷能热能回收循环 T-s 图(数据见表 3)

Fig. 6 T-s diagram of the cooling capacity and heat recovery cycle (data shown in Tab. 3)

表 1 分离式循环的热力学参数

Tab. 1 Thermodynamic parameters of the separate cycle

状态点	T/K	p/MPa	h/[kJ·(kg) ⁻¹]	s/[kJ·(kg) ⁻¹ ·K ⁻¹]
1	300	0.1	426.30	3.891
2	300	8	409.85	2.583
3	157.49	8	196.82	1.569
4	81.49	0.1	196.82	2.467
5	81.61	0.1	204.72	2.563
6	78.79	0.1	-0.22	-0.002 82
7	79.97	5	5.37	-0.002 56
8	882.22	5	1 041.80	3.891
9	300	0.1	426.30	3.891

w_r /[kJ·(kg) ⁻¹]	w_p /[kJ·(kg) ⁻¹]	w_c /[kJ·(kg) ⁻¹]	q_m /[kJ·(kg) ⁻¹]	y	η
615.5	5.60	375.95	1 036.43	0.063	0.078

表 2 冷能回收循环的热力学参数

Tab. 2 Thermodynamic parameters of the cooling capacity recovery cycle

状态点	T/K	p/MPa	h/[kJ·(kg) ⁻¹]	s/[kJ·(kg) ⁻¹ ·K ⁻¹]
1	300	0.1	426.30	3.891
2	300	8	409.85	2.583
3	117.24	8	80.71	0.730
4	79.83	0.1	80.71	1.034
5	81.61	0.1	204.72	2.563
6	78.79	0.1	-0.22	-0.002 82
7	79.97	5	5.37	-0.002 56
8'	290	5	404.86	2.699
8	882.22	5	1 041.80	3.891
9	300	0.1	426.30	3.891

w_r /[kJ·(kg) ⁻¹]	w_p /[kJ·(kg) ⁻¹]	w_c /[kJ·(kg) ⁻¹]	q_m /[kJ·(kg) ⁻¹]	y	η
615.5	5.60	375.94	636.91	0.609	0.486

表 3 冷能热能回收循环的热力学参数

Tab. 3 Thermodynamic parameters of the cooling capacity and heat recovery cycle

状态点	T/K	p/MPa	h/[kJ·(kg) ⁻¹]	s/[kJ·(kg) ⁻¹ ·K ⁻¹]
1	300	0.1	426.30	3.891
2	300	8	409.85	2.583
3	117.24	8	80.71	0.730
4	79.83	0.1	80.71	1.034
5	81.61	0.1	204.72	2.563
6	78.79	0.1	-0.22	-0.002 82
7	79.97	5	5.37	-0.002 56
8'	290	5	404.86	2.699
8''	297	5	412.49	2.725
8	882.22	5	1 041.80	3.891
9	300	0.1	426.30	3.891

w_r /[kJ·(kg) ⁻¹]	w_p /[kJ·(kg) ⁻¹]	w_c /[kJ·(kg) ⁻¹]	q_m /[kJ·(kg) ⁻¹]	y	η
615.5	5.60	375.94	629.29	0.609	0.489

2 循环效率的关键影响因素研究

2.1 三种基本循环性能比较

在相同的高压压力(8 MPa)和释能压力(5 MPa)下对比三种基本循环的性能,计算得到的每个状态点的热力学参数如表 1、表 2 和表 3 所示。在 3 种模型中,常温和常压分别取为 300 K 和 0.1 MPa,液化空气在常压下储存。即 $T_1=T_2=T_9=300$ K, $p_1=p_4=p_5=p_6=p_9=0.1$ MPa, 设定高压压力 $p_2=p_3=8$ MPa, 释能压力 $p_7=p_8=5$ MPa。工质的热力学状态可以由任意两个独立的热力学参数确定,计算流程如图 7 所示。

表 2 相较于表 1 增加了一个状态点 8', 即冷能回收的最终状态点。点 8' 的温度由蓄冷效率决定,通常低于室温,这里取为 290 K 是一种比较理想的情况。对比两个表的数据可以发现冷能回收使得空气节流前(点 3)的温度下降约 40 K, 比焓下降约 116 kJ/kg。这使得等焓节流后的点 4 的比焓也相应下降,意味着 T-s 图上点 4 更接近液相点 6, 从而使液化率 y 提升了一个数量级。同时,动力循环需要输入的热量 q_m 减少,而压缩机、泵的耗功以及膨胀机的做功保持不变,根据式(7)计算得到的循环效率 η 也提升了一个数量级。

表 3 相较于表 2 增加了一个状态点 8'', 即热能回收的最终状态点。点 8'' 的温度由压缩热的温度决

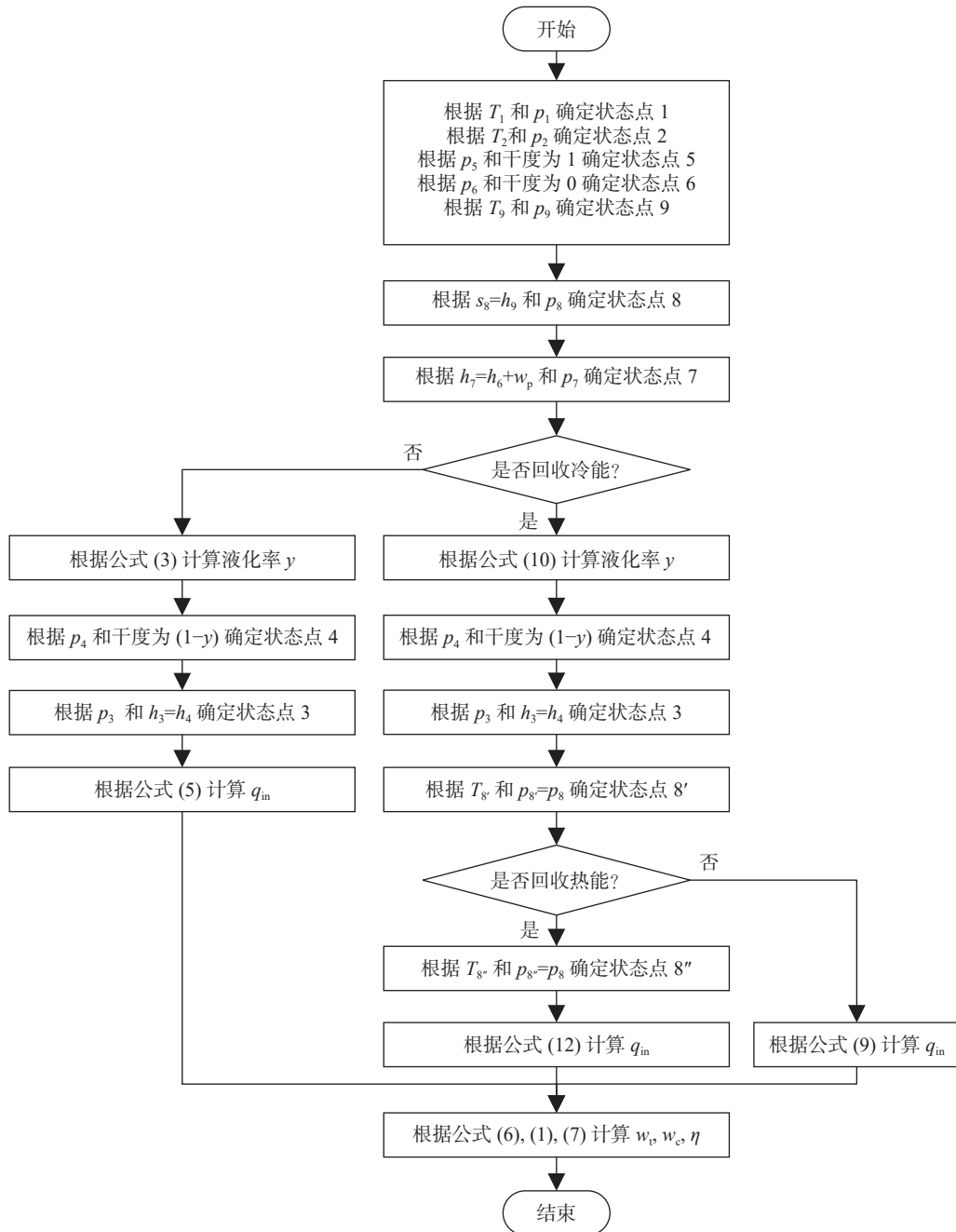


图7 热力学状态参数计算流程图

Fig. 7 Flow chart of thermodynamic state parameter calculation

定,考虑到传热温差,此处取为 297 K, 低于等温压缩温度。对比表 2 和表 3 可以发现热能回收不影响液化率 y , 但会使动力循环需要输入的热量 q_{in} 减少, 从而提升循环效率 η 。由于林德液化循环是在常温下等温压缩, 高于常温的热能仍然依赖外界输入, 因此循环效率的提升不显著。

对比三种基本循环, 分离式循环的液化率和循

环效率均非常低, 冷能回收循环在液化率和循环效率上均提升了一个数量级, 冷能热能回收循环进一步提升了循环效率。因此, 冷能热能回收循环是液化空气储能的优选方案。下文的分析也将针对冷能热能回收循环开展。

冷能热能回收循环中点 1、9 为常温常压状态, 点 5、6 分别为常压下的饱和气和饱和液, 这四个状

态点是固定的。其余状态点根据高压压力(p_{high})、释能压力(p_{dis})、冷能回收终点温度 T_g 以及热力学关系所确定。下面分别探究这三个独立的关键参数的影响。

2.2 冷能回收终点温度的影响

保持 p_{high} 为 8 MPa、 p_{dis} 为 5 MPa, 探究冷能回收终点温度的影响。计算结果如图 8 所示。图 8(a) 表明随着 T_g 从 200 K 升高到 290 K, 液化率从 0.125 增加到 0.609, 循环效率从 0.168 增加到 0.489。图 8(b) 表明随着 T_g 升高, 仅冷能回收量 q_{rec} 升高, 其余的功和热均保持不变。式(10)中分母减小, 从而液化率增加; 式(7)中因液化率增加导致分母减小, 从而循环效率增加。

由此可见, 冷能回收越充分, 越有利于提升循环效率。文章假设冷能直接通过液化循环的换热器回收, 且换热器效率 100%。在实际系统中, 通常另外设置一个(组)蓄冷器, 蓄冷效率随蓄冷时间的延长从 95% 下降至 65% 左右^[22]。因此, 开发高效的蓄冷方案是一个值得深入研究的方向^[23]。

2.3 高压压力的影响

保持 T_g 为 290 K, p_{dis} 为 5 MPa, 探究高压压力的影响。计算结果如图 9 所示。图 9(a) 表明随着 p_{high} 从 4 MPa 升高到 14 MPa, 液化率从 0.314 增加到 0.986, 循环效率从 0.372 增加到 0.576。图 9(b) 表明随着 p_{high} 升高, 仅压缩机耗功 w_c 升高, 其余的功和热均保持不变。

在液化率的表达式(10)中, 高压压力仅影响压缩终点的比焓 h_2 。由空气的 T - s 图(图 10)可知, 随着高压压力升高, 压缩终点(点 2)逐渐左移, h_2 逐渐减小。由式(10)可知, 在其他物理量保持不变的情况下, h_2 越小使得液化率越大。由此可知, 高压压力通过影响压缩过程的比焓降来影响液化率。

在循环效率的表达式(7)中, 高压压力影响压缩机耗功和液化率。图 9 表明随着高压压力升高, 液化率的增长率远大于压缩机耗功的增长率, 即单位质量液空的耗功(w_c/y)减小。式(7)的分母减小, 使得循环效率升高。

尽管高压压力升高对循环效率有益, 但在实际系统设计中, 要考虑换热器承压、高压压缩机成本等问题, 目前空气液化循环的高压压力通常不超过

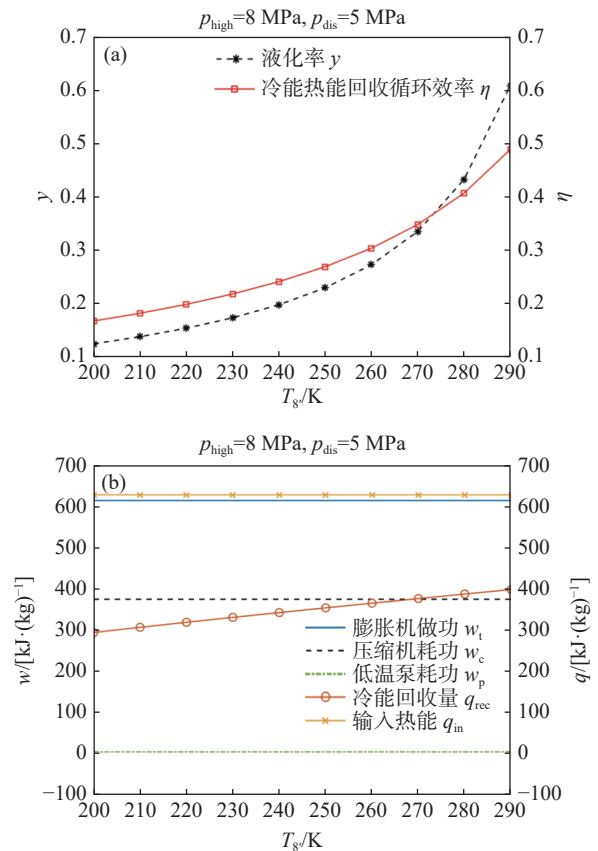


图 8 冷能回收终点温度的影响:(a) 液化率和循环效率; (b) 功和热

Fig. 8 Effect of terminal temperature of cold energy recovery on: (a) liquid yield and cycle efficiency; (b) work and heat

10 MPa^[24]。

2.4 释能压力的影响

保持 T_g 为 290 K、 p_{high} 为 8 MPa, 探究释能压力的影响。计算结果如图 11 所示。图 11(a) 表明随着 p_{dis} 从 4 MPa 升高到 14 MPa, 液化率从 0.695 降低到 0.300, 循环效率从 0.499 降低到 0.411。图 11(b) 表明随着 p_{dis} 升高, 仅压缩机耗功 w_c 保持不变, 膨胀机做功和低温泵耗功升高, 冷能回收量降低, 输入热量增加。

与 p_{high} 升高使 h_2 降低类似, p_{dis} 升高使 h_8 降低, 从而回收的冷能 q_{rec} 减少。液化率的表达式(10)中分母增大, 液化率减小。

在循环效率的表达式(7)中, 分子分母同时增加, 然而分母的增加幅度等大, 使循环效率降低。

尽管释能压力升高不利于循环效率, 但一味降

低释能压力也不可取。这是因为较低的释能压力对应较小膨胀机做功量。因此,要根据液化空气储能系统对释能功率和循环效率的综合需求来进行取舍,选择合适的释能压力。

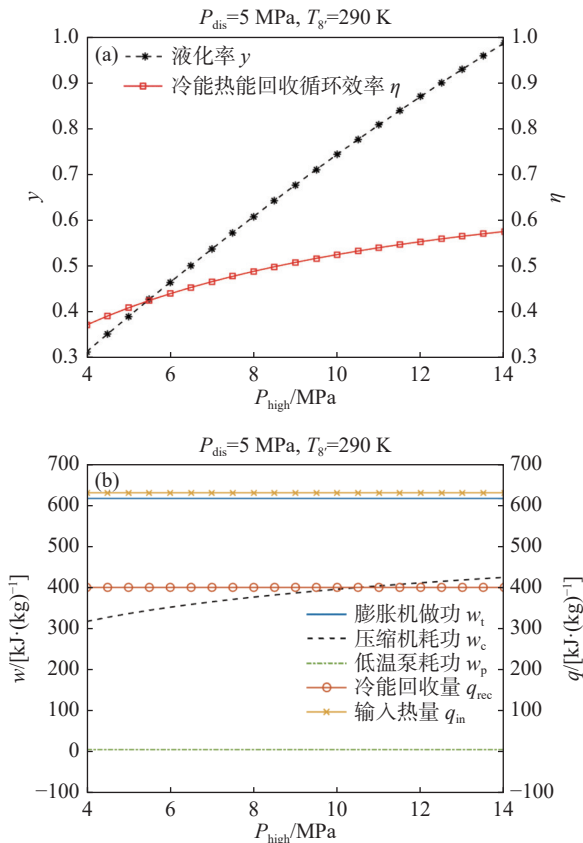


图9 高压压力的影响:(a) 液化率和循环效率;(b) 功和热
Fig. 9 Effect of high pressure on: (a) liquid yield and cycle efficiency; (b) work and heat

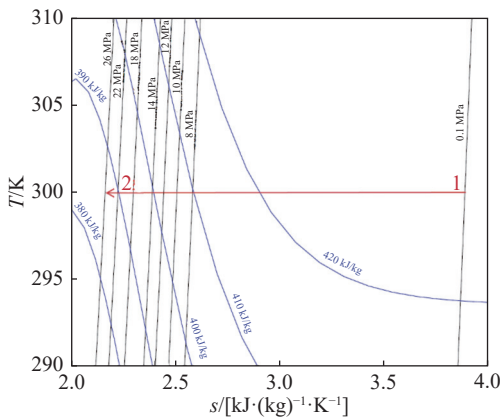


图10 高压压力对压缩终点比焓(h_2)的影响
Fig. 10 Effect of high pressure on specific enthalpy at compression end

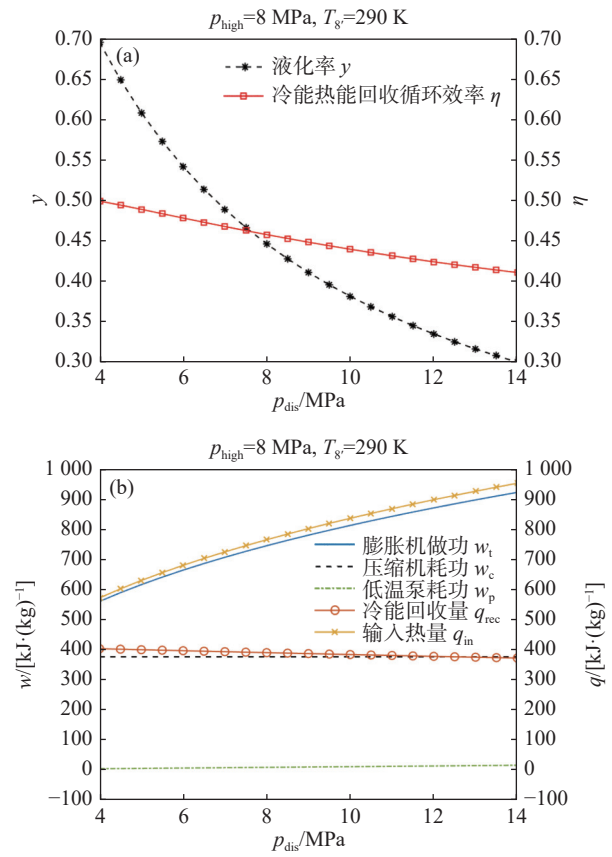


图11 释能压力的影响:(a) 液化率和循环效率;(b) 功和热
Fig. 11 Effect of discharge pressure on: (a) liquid yield and cycle efficiency; (b) work and heat

3 结论

通过比较分离式循环、冷能回收循环、冷能热回收循环的热力学性能,揭示了冷能回收对液化率的提升极为关键,冷能热回收循环的效率最高,是值得推荐的一种循环方案。

针对冷能热回收循环通过控制变量法探究了三个关键参数:冷能回收终点温度、高压压力、释能压力对液化率和循环效率的影响机制。结果表明液化率和循环效率正相关。液化率与循环效率随冷能回收终点温度(冷能回收量)的增加而升高、随高压压力的升高而升高、随释能压力的升高而下降。液化空气储能系统应配备尽可能高效的蓄冷装置、在系统允许的范围内选择尽可能高的高压压力、释能压力的确定则要对循环效率和功率做出取舍。

尽管文章的结论是在林德液化循环加朗肯循环的基础上得到的,但对于其他液化循环和动力循环

的组合同样适用。文章冷能和热能均来自系统内部, 如果对系统外的冷能和热能(如 LNG 冷能和工业余热)加以利用, 可以进一步提升循环效率。

参考文献:

- [1] 郭祚刚, 雷金勇, 邓广义. 匹配新能源电能并网的压缩空气储能站性能研究 [J]. *南方能源建设*, 2018, 5(3): 26-32. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.004.
GUO Z G, LEI J Y, DENG G Y. Performance analysis of compressed air energy storage system for grid-connection of renewable power [J]. *Southern Energy Construction*, 2018, 5(3): 26-32. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.004.
- [2] 张东辉, 徐文辉, 门锲, 等. 储能技术应用场景和发展关键问题 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(3): 1-5. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.001.
ZHANG D H, XU W H, MEN K, et al. Application scenarios of energy storage and its key issues in development [J]. *Southern Energy Construction*, 2019, 6(3): 1-5. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.001.
- [3] GLAMHEDEN R, CURTIS P. Excavation of a cavern for high-pressure storage of natural gas [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, 21(1): 56-67. DOI: 10.1016/j.tust.2005.06.002.
- [4] 文贤馗, 张世海, 王锁斌. 压缩空气储能技术及示范工程综述 [J]. *应用能源技术*, 2018(3): 43-48. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3230.2018.03.012.
WEN X K, ZHANG S H, WANG S B. Summary of compressed air energy storage technology and demonstration projects [J]. *Applied Energy Technology*, 2018(3): 43-48. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3230.2018.03.012.
- [5] PIMM A J, GARVEY S D, DE JONG M. Design and testing of energy bags for underwater compressed air energy storage [J]. *Energy*, 2014, 66: 496-508. DOI: 10.1016/j.energy.2013.12.010.
- [6] 郭丁彰, 尹钊, 周学志, 等. 压缩空气储能系统储气装置研究现状与发展趋势 [J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1486-1493. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0356.
GUO D Z, YIN Z, ZHOU X Z, et al. Status and prospect of gas storage device in compressed air energy storage system [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1486-1493. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0356.
- [7] 刘林林. 深冷液化压缩空气储能技术解读 [J]. *华北电业*, 2016(4): 47-49.
LIU L L. Cryogenic liquefied compressed air energy storage technology interpretation [J]. *North China Power*, 2016(4): 47-49.
- [8] BORRI E, TAFONE A, ROMAGNOLI A, et al. A review on liquid air energy storage: history, state of the art and recent developments [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 137: 110572. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110572.
- [9] SMITH E M. Storage of electrical energy using supercritical liquid air [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1977, 191(1): 289-298. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1977_191_035_02.
- [10] KENJI K, KEIICHI H, TAKAHISA A. Development of generator of liquid air storage energy system [J]. *Technical Review - Mitsubishi Heavy Industries*, 1998, 35(3): 60-63.
- [11] CHINO K, ARAKI H. Evaluation of energy storage method using liquid air [J]. *Heat Transfer - Asian Research*, 2000, 29(5): 347-357. DOI: 10.1002/1523-1496(200007)29:5<347::AID-HTJ1>3.0.CO;2-A.
- [12] MORGAN R E. Liquid air energy storage - from theory to demonstration [J]. *International Journal of Environmental Studies*, 2016, 73(3): 469-480. DOI: 10.1080/00207233.2016.1189741.
- [13] PENG X D, SHE X H, LI C, et al. Liquid air energy storage flexibly coupled with LNG regasification for improving air liquefaction [J]. *Applied Energy*, 2019, 250: 1190-1201. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.05.040.
- [14] HIGHVIEWPOWER. Developed and developing projects [EB/OL]. (2021-11-18) [2022-03-07]. <https://highviewpower.com/plants/>.
- [15] GUIZZI G L, MANNO M, TOLOMEI L M, et al. Thermodynamic analysis of a liquid air energy storage system [J]. *Energy*, 2015, 93: 1639-1647. DOI: 10.1016/j.energy.2015.10.030.
- [16] SCIACOVELLI A, SMITH D, NAVARRO M E, et al. Performance analysis and detailed experimental results of the first liquid air energy storage plant in the world [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2018, 140(2): 020908. DOI: 10.1115/1.4038378.
- [17] LIN X P, WANG L, XIE N N, et al. Thermodynamic analysis of the cascaded packed bed cryogenic storage based supercritical air energy storage system [J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 5079-5085. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.639.
- [18] HAMDY S, MOROSUK T, TSATSARONIS G. Cryogenics-based energy storage: evaluation of cold exergy recovery cycles [J]. *Energy*, 2017, 138: 1069-1080. DOI: 10.1016/j.energy.2017.07.118.
- [19] 苏苗印, 张益, 李晶晶. 盘管式蓄冷器在液化空气储能系统的应用研究 [J]. *真空与低温*, 2019, 25(3): 209-214. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7086.2019.03.010.
SU M Y, ZHANG Y, LI J J. Application of coil regenerator in liquid air energy storage system [J]. *Vacuum and Cryogenics*,

- 2019, 25(3): 209-214. DOI: [10.3969/j.issn.1006-7086.2019.03.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7086.2019.03.010).
- [20] 贾春蓉, 彭婧, 王洲, 等. 面向液化空气储能系统蓄冷器的新型材料制备及蓄冷特性研究 [J]. *电力电容器与无功补偿*, 2021, 42(1): 186-190. DOI: [10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2021.01.029](https://doi.org/10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2021.01.029).
JIA C R, PENG J, WANG Z, et al. Preparation of new materials and its cold storage performance study for regenerator in liquefied air energy storage [J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2021, 42(1): 186-190. DOI: [10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2021.01.029](https://doi.org/10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2021.01.029).
- [21] 杨德州, 贾春荣, 迟昆, 等. 深冷液化空气储能系统热力学建模与效率分析 [J]. *电力电容器与无功补偿*, 2020, 41(6): 185-190. DOI: [10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2020.06.030](https://doi.org/10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2020.06.030).
YANG D Z, JIA C R, CHI K, et al. Thermodynamic modeling and efficiency analysis of liquid air energy storage [J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2020, 41(6): 185-190. DOI: [10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2020.06.030](https://doi.org/10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2020.06.030).
- [22] DUTTA R, SANDILYA P. Experimental investigations on cold recovery efficiency of packed-bed in cryogenic energy storage system [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 755: 012103. DOI: [10.1088/1757-899X/755/1/012103](https://doi.org/10.1088/1757-899X/755/1/012103).
- [23] 金翼, 王乐, 杨岑玉, 等. 堆积床储冷系统循环性能分析 [J]. *储能科学与技术*, 2017, 6(4): 708-718. DOI: [10.12028/j.issn.2095-4239.2017.0083](https://doi.org/10.12028/j.issn.2095-4239.2017.0083).
JIN Y, WANG L, YANG C Y, et al. Cycle performance of a packed bed based cold storage device [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2017, 6(4): 708-718. DOI: [10.12028/j.issn.2095-4239.2017.0083](https://doi.org/10.12028/j.issn.2095-4239.2017.0083).
- [24] 安保林, 陈嘉祥, 王俊杰, 等. 液态空气储能系统液化率影响因素研究 [J]. *工程热物理学报*, 2019, 40(11): 2478-2482.
AN B L, CHEN J X, WANG J J, et al. Study on the influencing factors on liquid air energy storage system liquefaction rate [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2019, 40(11): 2478-2482.

作者简介:



孙潇

孙潇 (第一作者, 通信作者)

1993-, 女, 湖南长沙人, 博士后, 浙江大学制冷及低温工程博士, 主要从事机械式储能和氢液化方向的研究 (e-mail) sunxiao@gedi.com.cn。

(编辑 叶筠英)