

基于有机液体储氢载体的氢储能系统能效分析*

伊立其^{1,2,3,4}, 郭常青^{1,2,3}, 谭弘毅¹, 彭 垚^{1,4}, 闫常峰^{1,2,3,4†}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640; 3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 有机液体储氢材料是理想的储氢介质。本文建立了以有机液体储氢材料为基础的氢储能系统的能效分析模型, 并以乙基咔唑和二苊基甲苯两种有机液体储氢载体为算例, 逐步计算了制氢、储氢和燃料电池等过程的能耗。研究表明, 乙基咔唑能效优于二苊基甲苯, 其储氢效率为 84.17%、系统能效为 47.58%。本研究所开发的框架可衡量基于有机液体储氢载体的氢储能系统的能效, 并可用于筛选有机液体储氢载体。

关键词: 有机液体储氢; 氢储能; 能效分析

中图分类号: TK91

文献标志码: A

doi : 10.3969/j.issn.2095-560X.2017.03.006

Efficiency Analysis of LOHC Based Hydrogen Energy Storage System

YI Li-qi^{1,2,3,4}, GUO Chang-qing^{1,2,3}, TAN Hong-yi¹, PENG Yao^{1,4}, YAN Chang-feng^{1,2,3,4}

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou 510640, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Liquid organic hydrogen carrier (LOHC) is a promising hydrogen storage medium. In this paper, an efficiency analysis model of liquid organic hydrogen carrier based hydrogen energy storage system is established, and the efficiency of ethylcarbazole and dibenzyltoluene is investigated by calculating the energy consumption in the steps of hydrogen production, storage and fuel sell process. It is found that the hydrogen storage efficiency of the ethylcarbazole is 84.17% and the system efficiency is 47.58%, which are better than that of dibenzyltoluene. The framework developed in this study is suitable for evaluating the efficiency of liquid organic hydrogen carrier based hydrogen energy storage system and can be useful for screening candidate liquid organic hydrogen carrier.

Key words: liquid organic hydrogen storage; hydrogen energy storage; thermodynamic analysis

0 前 言

可再生能源是未来能源发展的大趋势,但随着可再生能源电力并网装机容量的不断增长,限电也变得愈发严重。氢储能可将电能通过电解水的方式转化为氢气的化学能,再通过燃料电池反应可以重新获得电能,因而是解决可再生能源限电的一种途径^[1]。

氢气的储运是氢储能系统在运行中的关键环节之一。由于氢气的特殊性质,高压输送氢气存在一定的风险^[2],而通过天然气管道输送又有掺混上限,同时还会降低天然气的热值^[3-4]。有机液体储

氢载体 (LOHC) 可以在一定条件下与氢气发生加氢反应,生成液态的氢化物,在需要氢气时经过脱氢反应可重新释放出氢气。通过这种储氢材料可以解决高压储氢和天然气管道输送等方式存在的问题。经过广泛的研究,发展出了苯、甲苯、萘等烃类和咔唑、乙基咔唑等杂环类有机液体储氢材料^[5-8],其种类繁多、性能各异。烃类有机物储氢密度大,但氢化物的脱氢温度较高。相对烃类有机物,杂环有机物加氢、脱氢反应温度低,但储氢密度相对较小。例如,二苊基甲苯与氢气的摩尔比为 1 : 9,脱氢反应温度约为 583.15 K,而乙基咔唑与氢气的摩尔

* 收稿日期: 2017-02-03

修订日期: 2017-04-05

基金项目: 广东省自然科学基金研究团队项目 (2015A030312007)

† 通信作者: 闫常峰, E-mail: yan cf@ms.giec.ac.cn

比为 1/6，脱氢反应温度约为 433.15 K。为衡量有机液体储氢材料的储氢效率，CHOI 等^[9]建立了咪唑类储氢材料的理论加氢、脱氢反应的热力学模型，并对比了三种咪唑类储氢材料的储氢能效及焓效率。WANG 等^[10]建立了新型乙基咪唑类储氢材料的理论加氢、脱氢反应能效分析模型，分析了其理论储氢能效，并与高压储氢技术进行对比。目前，在衡量有机液体储氢材料储氢效率的研究中所建立的模型通用性较差，无法用于甄选合适的储氢材料，且并未计算电力储能至释能全过程的能效。

针对以上问题，本文建立了以有机液体储氢载体为基础的氢储能系统的电力储能与释能全过程能效分析模型，并分别以二苄基甲苯和乙基咪唑为算例，简要对比其能效。

1 系统描述

有机液态储氢材料为基础的氢储能系统在电力储能和释能主要经历电解水制氢 (I)、加氢 (II)、脱氢 (III) 和燃料电池反应 (IV) 等 4 个过程，图 1。

过程 I，在电解槽内进行水电解反应产生氢气；过程 II，首先通过压缩机将氢气压缩至加氢反应压力，氢气和载体加热至加氢反应温度后进行反应并生成氢化物，产生的氢化物与用于加氢反应的载体在换热器 1 中交换热量，反应器的反应热由冷却水进行吸收；过程 III，将氢化物送入脱氢反应器内发生脱氢反应并释放氢气，其中比例为 x 的氢气经燃烧用于维持脱氢反应，脱氢反应完成后的载体用于加热氢化物，该换热过程在换热器 2 中完成；过程 IV，剩余的 $(1-x)$ 氢气引入燃料电池电堆发电，燃料电池的废热经由冷却水吸收。

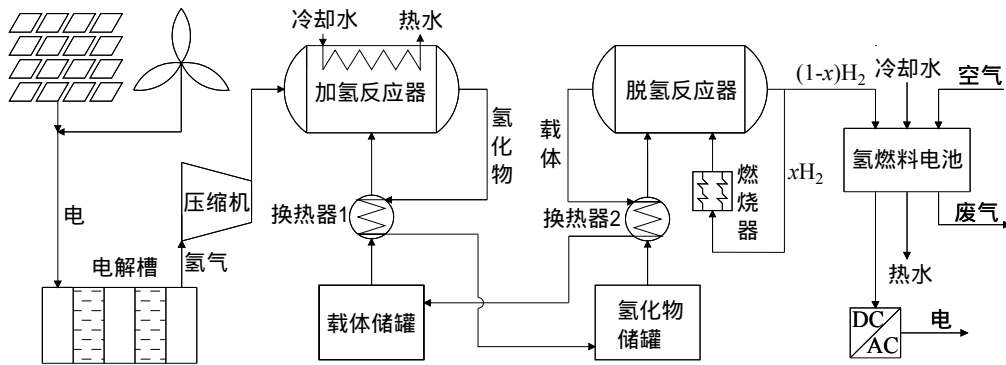


图 1 基于有机液体储氢载体的氢储能系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the liquid organic hydrogen carrier technology based hydrogen energy storage system

2 能效分析模型

以下按上述 4 个过程建立分析模型。需特别指出的是，由于泵功低于其他过程中的能耗^[9]，为简化模型，忽略了泵功，且设定电力储能和释能不同时进行，即加氢反应产生的热量不用于脱氢反应。

2.1 电解水制氢

由电解槽的能量平衡可知：

$$Q_{in,Ele} - Q_{H_2,Ele} - Q_{loss} = 0 \tag{1}$$

式中， $Q_{in,Ele}$ 为单位时间电解所用能量， $J \cdot s^{-1}$ ； $Q_{H_2,Ele}$ 为单位时间产生氢气的能量， $J \cdot s^{-1}$ ； Q_{loss} 为单位时间电解过程能量损失， $J \cdot s^{-1}$ 。

输入的能量均由电能提供，则：

$$Q_{in,Ele} = V_{Ele} I_{Ele} \tag{2}$$

式中， V_{Ele} 为电解电压，V； I_{Ele} 为电解电流，A。

仅考虑氢气的化学能，则电解产生氢气的能量可以表示为^[11]：

$$Q_{H_2,Ele} = V_{H_2}^0 L_{HV,H_2} \tag{3}$$

式中， $V_{H_2}^0$ 为电解槽生产氢气的体积流量， $Nm^3 \cdot s^{-1}$ ； L_{HV,H_2} 为氢气的低位热值，取 $10790 \text{ kJ} \cdot Nm^{-3}$ 。

该过程的能效可通过输出、输入能量的比值进行计算：

$$\eta_{Ele} = \frac{Q_{H_2,Ele}}{Q_{in,Ele}} \tag{4}$$

式中， η_{Ele} 为电解水制氢过程能效。

2.2 加氢

2.2.1 氢气压缩

电解槽出口氢气的压力通常达不到加氢反应的条件要求。设压缩机入口氢气的压力为 P_1 ，加氢反应所需压力为 P_{r1} ，经由多级压缩升压至加氢反应压力，则压缩机功耗最小时的各级压缩比相等，且为：

$$\pi_i = \sqrt[m]{\frac{P_{r1}}{P_1}} \quad (5)$$

式中， m 为压缩级数。

各级功耗相等，故压缩机总功耗为各级功耗之和：

$$W_c = \frac{mkV_{H_2}^0 \rho RT_1}{\eta_m \eta_i M_{H_2} (k-1)} \left[(\pi_i)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (6)$$

式中， W_c 为压缩机耗功，W； T_1 为压缩机入口氢气的温度，K； k 为绝热指数，取 1.4； ρ 为氢气的密度， $0.0899 \text{ kg}\cdot\text{Nm}^{-3}$ ； R 为气体常数， $8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ； M_{H_2} 为氢气的摩尔质量， $2.016 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ； η_m 为压缩机机械效率； η_i 为压缩机绝热效率。

设各级进气温度相等，则各级等熵排气温度亦相等，且为：

$$T_{is} = T_1 (\pi_i)^{\frac{k-1}{k}} \quad (7)$$

式中， T_{is} 为各级排气温度，K。

已知绝热效率，则各级实际排气温度为：

$$T_i = \frac{T_{is} - T_1}{\eta_i} + T_1 \quad (8)$$

2.2.2 加氢反应

参与加氢反应的氢气和载体需加热至反应温度。氢气升温至加氢反应温度所需的热量等于其焓变，即：

$$\Delta H_{H_2} = \int_{T_3}^{T_{r1}} \frac{V_{H_2}^0}{22.4} C_p dT \quad (9)$$

式中， ΔH_{H_2} 为氢气的焓变， $\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$ ； T_{r1} 为加氢反应温度，K； C_p 为定压比热容， $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ，可通过经验公式计算：

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (10)$$

式中对应的参数列于表 1。

表 1 氢气定压比热容系数^[12]

Table 1 Coefficients of constant pressure specific heat capacity of hydrogen^[12]

a	$b/(\times 10^{-2})$	$c/(\times 10^{-5})$	$d/(\times 10^{-9})$	温度范围/K
29.11	-0.1916	0.4003	-0.8704	273 ~ 1800

综上可知，加氢反应产物的冷却热用于加热载体。反应的载体和反应后的有机氢化物比热略有差异，但二者比较接近^[10]，故此处以相同的流体特性进行分析。若物性产生较大的变化，可依据不同的物性参数重新计算换热器效能。设换热器 1 的效能为 ε_1 ，由于流体物性相同，且流量相同，热流量的比值为 1，则换热器 1 出口载体的温度为：

$$T_{c,out} = T_a + \varepsilon_1 (T_{r1} - T_a) \quad (11)$$

式中， T_a 为环境温度，取 298.15 K。

载体由换热器出口温度升温至加氢反应温度所需的热量：

$$Q_1 = n_c C_c (T_{r1} - T_{c,out}) / (\varphi \psi) \quad (12)$$

式中， n_c 为理论加氢反应所需载体摩尔流量， $\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ ； C_c 为载体的比热容， $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ； φ 为加氢转化率； ψ 为脱氢转化率。

加氢反应为放热反应，其反应热设为 ΔH_R ，则加氢反应的净放热量 Q_{net1} 为：

$$Q_{net1} = \Delta H_R - \Delta H_{H_2} - Q_1 \quad (13)$$

一般来说，有机液体储氢材料的反应热远高于加热反应物所需的热量。设反应器余热回收效率为 η_{rel} ，则加氢反应器废热回收量为：

$$Q_{rel} = \eta_{rel} Q_{net1} \quad (14)$$

2.3 脱氢

2.3.1 脱氢反应

脱氢反应完成后的载体用于加热氢化物，假定换热器 2 过程的设计与加氢反应相同，则换热器 2 出口氢化物的温度为：

$$T_{hy,out} = T_a + \varepsilon_2 (T_{r2} - T_a) \quad (15)$$

式中， T_{r2} 为脱氢反应温度，K； ε_2 为换热器 2 效能。

同样，氢化物由换热器出口温度升温至脱氢反应温度所需的热量：

$$Q_2 = n_{\text{hy}} C_{\text{hy}} (T_{\text{r2}} - T_{\text{hy,out}}) / \psi \quad (16)$$

式中, n_{hy} 为理论脱氢反应所需氢化物摩尔流量, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$, $n_{\text{hy}} = n_{\text{c}}$; C_{hy} 为氢化物的比热容, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 设 $C_{\text{c}} = C_{\text{hyo}}$

脱氢反应为吸热反应, 则脱氢反应需要的净热量为:

$$Q_{\text{net2}} = Q_2 + \Delta H_{\text{R}} \quad (17)$$

该热量由脱氢反应生成的部分氢气的燃烧热来提供。设用于燃烧的氢气占脱氢反应生成氢气的比重为 x , 则有^[10]:

$$x \eta_{\text{c}} n_{\text{H}_2} L_{\text{HV,H}_2} = Q_{\text{net2}} \quad (18)$$

式中, η_{c} 为燃烧器的效率。

剩余的氢气用于燃料电池, 则其化学能为:

$$Q_{\text{H}_2,\text{FC}} = (1-x) V_{\text{H}_2}^0 L_{\text{HV,H}_2} \quad (19)$$

2.3.2 储氢过程能效

储氢过程的能效为燃料电池获得的氢气化学能和加氢反应器回收余热之和与加氢反应输入氢气的化学能和压缩耗电之和的比值, 即:

$$\eta_{\text{hs}} = \frac{Q_{\text{H}_2,\text{FC}} + Q_{\text{rel}}}{Q_{\text{H}_2,\text{Ele}} + W_{\text{c}}} \quad (20)$$

式中, η_{hs} 为储氢过程能效。

2.4 燃料电池反应

通过燃料电池反应获得的电能可由下式计算:

$$W_{\text{FC}} = \eta_{\text{e}} Q_{\text{H}_2,\text{FC}} \quad (21)$$

式中, η_{e} 为燃料电池电效率。

设燃料电池的余热回收效率为 η_{re2} , 则燃料电池的余热回收量:

$$Q_{\text{re2}} = \eta_{\text{re2}} Q_{\text{H}_2,\text{FC}} \quad (22)$$

该过程能效为燃料电池电效率与热效率之和, 即:

$$\eta_{\text{FC}} = \eta_{\text{e}} + \eta_{\text{re2}} \quad (23)$$

2.5 系统能效

系统能效可通过总输出与总输入能量的比值进行计算:

$$\eta_{\text{total}} = \frac{W_{\text{FC}} + Q_{\text{re1}} + Q_{\text{re2}}}{Q_{\text{in,Ele}} + W_{\text{C}}} \quad (24)$$

式中, η_{total} 为系统能效。

3 算例分析

算例分析所用的系统参数及其数值在表 2 中列出。其中, 电解电压、电解电流和氢气的体积流量取为某公司公布的 $100 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 碱性电解槽工作参数, 压缩机入口氢气的温度和氢气的压力分别取为该电解槽工作温度和工作压力, 压缩级数取 2, 机械效率与绝热效率均参考实际氢气压缩机参数选取; 换热器 1 和 2 的效能由换热器设计手册选取, 反应器的余热回收效率与燃烧器的效率无设计手册作为参考, 故而设为 0.75 进行计算; 燃料电池的效率以及余热回水效率分别设为 0.55 和 0.3。

表 2 算例分析必要的系统参数

Table 2 Necessary system parameters of the case study

参数	数值
环境温度, T_{a} / K	298.15
氢气的低位热值, $L_{\text{HV,H}_2} / (\text{kJ} \cdot \text{Nm}^{-3})$	10790
氢气的密度, $\rho / (\text{kg} \cdot \text{Nm}^{-3})$	0.0899
氢的摩尔质量, $M_{\text{H}_2} / (\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$	2.016
电解电压, $V_{\text{Ele}} / \text{V}$	102
电解电流, $I_{\text{Ele}} / \text{A}$	4600
氢气的体积流量, $V_{\text{H}_2}^0 / (\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	100
压缩机入口氢气温度, T_1 / K	333.15
压缩机入口氢气压力, P_1 / MPa	1.6
压缩级数, m	2
绝热指数, k	1.4
机械效率, η_{m}	0.92
绝热效率, η_{i}	0.90
反应器余热回收效率, η_{re1}	0.75
换热器 1 效能, ε_1	0.8
换热器 2 效能, ε_2	0.8
燃烧器效率, η_{c}	0.75
燃料电池电效率, η_{e}	0.55
燃料电池余热回收效率, η_{re2}	0.3

本文以文献[10,13]中提供的有机液体储氢材料为例进行对比分析, 其物理性质见表 3。因所选储

氢载体的加氢、脱氢转化率并未在文献中注明，故本文先设加氢、脱氢转化率均为 100%，后分析转化率对系统能效的影响。

系统全过程的能效分析结果列于表 4。对比两种储氢载体，在上述计算条件下，乙基咪唑以 84.17% 的储氢效率、47.58% 的系统能效略优于二苄基甲苯。由于乙基咪唑的加氢、脱氢反应温度较为接近，在实际加氢、脱氢反应过程中可能存在两种反应同时进行的情况，这将会导致加氢、脱氢转化率低于 100%。图 2a、图 2b 为系统能效随乙基咪唑加氢、脱氢转化率的变化情况。

表 3 有机液体储氢载体的物理性质

Table 3 Physical properties of LOHC

参数	乙基咪唑	二苄基甲苯
反应比例	1 6H ₂ ^[10]	1 9H ₂ ^[13]
比热容 / (J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹)	293.01 ^[10]	674.36
反应热 / (J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹ H ₂)	54 ^[10]	65 ^[13]
加氢反应温度 / K	413.15 ^[10]	423.15 ^[13]
脱氢反应温度 / K	433.15 ^[10]	583.15 ^[13]
反应压力 / MPa	5.5 ^[10]	5 ^[13]

表 4 能效分析结果

Table 4 Energy efficiency analysis results

过程	项目	乙基咪唑	二苄基甲苯
电解水制氢过程	输入电能/MJ·h ⁻¹	1689.12	1689.12
	氢气流量/Nm ³ ·h ⁻¹	100	100
	氢气化学能/MJ·h ⁻¹	1079	1079
	损失能量/MJ·h ⁻¹	610.12	610.12
	过程能效/%	63.88	63.88
加氢过程	压缩耗电/MJ·h ⁻¹	20.45	18.74
	载体摩尔流量/mol·h ⁻¹	744.05	496.03
	氢化物余热回收量/MJ·h ⁻¹	20.06	33.45
	加氢反应热回收量/MJ·h ⁻¹	173.59	209.553
脱氢过程	氢化物流量/mol·h ⁻¹	744.05	496.03
	载体余热回收量/MJ·h ⁻¹	23.55	76.26
	氢气燃烧比 x	0.31	0.38
	储氢过程能效/%	84.17	79.75
燃料电池反应过程	(1- x)H ₂ 的化学能/MJ·h ⁻¹	747.25	666.67
	产生电能/MJ·h ⁻¹	410.99	366.67
	余热回收量/MJ·h ⁻¹	224.17	200.00
	过程能效/%	85.00	85.00
全过程	输入能量/MJ·h ⁻¹	1709.565	1709.565
	输出能量/MJ·h ⁻¹	813.35	776.82
	损失/MJ·h ⁻¹	896.21	932.75
	系统能效/%	47.58	45.44

从图 2 可知，在转化率大幅度变动时，系统能效虽然稍有降低，但并未产生较大影响。主要原因

是转化率的变动虽然会增加加热载体和氢化物所需的热量，但从表 4 可知加热所需能量远低于反应器

的吸、放热量，并且换热器可以回收载体和氢化物的余热，故而对系统能效的影响并不大。

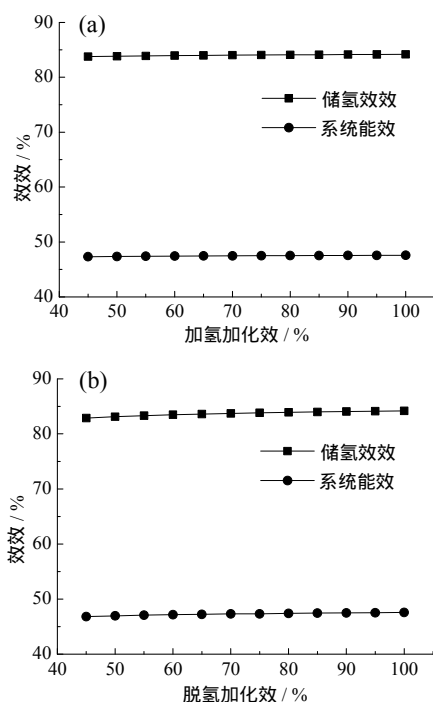


图 2 乙基咔唑加氢 (a) 及脱氢 (b) 转化率对系统能效的影响

Fig. 2 Effects of hydrogenation (a) and dehydrogenation rate (b) of ethylcarbazole on the energy efficiency of the system

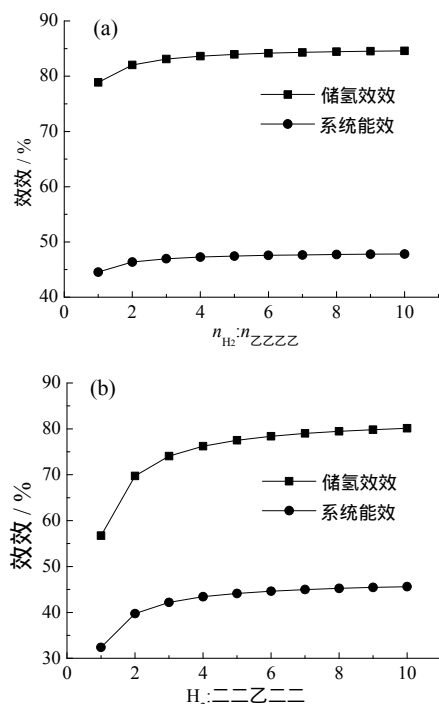


图 3 氢气与 LOHC 反应比例对系统能效的影响

Fig. 3 Effects of reaction ratio of hydrogen and LOHC on the energy efficiency of the system

图 3 为不同的反应比例对系统能效的影响。图中横轴数字表示氢气的不同化学反应计量数。相比转化率，反应比例对能效有着较大的影响。但从图中趋势来看，反应比例达到某一比值后，对系统能效的影响开始逐渐降低。此时再增加反应比例也仅能提升储氢密度，对提升储氢及系统能效并无太大作用。由于氢气与所选乙基咔唑和二苄基甲苯的反应比例分别为 6 和 9，均在变化趋势较缓的范围内，故而当该比例变动不大时，可以认为所选乙基咔唑的能效优于二苄基甲苯。

4 结 论

本文建立了以有机液体储氢载体为基础的氢能系统能效分析模型，并以两种载体为例进行了算例分析及对比，得出以下结论：

(1) 基于算例数据，在不考虑转化率的情况下，乙基咔唑的储氢效率为 84.17%、系统能效为 47.58%，优于二苄基甲苯。

(2) 加氢、脱氢转化率对乙基咔唑的储氢效率和系统能效影响不大，故而在转化率低于 1 时其效率仍然高于二苄基甲苯。

(3) 反应比例较小时，系统能效受影响较大，但当反应比例高于某一程度时，系统能效基本不受影响。

(4) 本研究为筛选适用于氢储能系统的有机储氢载体提供了一种基于能效分析的筛选方法，有助于比较有机液体储氢载体的性能。

参考文献：

- [1] GAHLEITNER G. Hydrogen from renewable electricity: an international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications[J]. International journal of hydrogen energy, 2013, 38(5): 2039-2061. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.12.010.
- [2] 郑津洋, 开方明, 刘仲强, 等. 高压氢气储运设备及其风险评估[J]. 太阳能学报, 2006, 27(11): 1168-1174. DOI: 10.3321/j.issn:0254-0096.2006.11.018.
- [3] 刘延雷, 徐平, 郑津洋, 等. 管道运输高压氢气与天然气的泄漏扩散数值模拟[J]. 太阳能学报, 2008, 29(10): 1252-1255. DOI: 10.3321/j.issn:0254-0096.2008.10.013.
- [4] 黄明, 吴勇, 文习之, 等. 利用天然气管道掺混输送氢气的可行性分析[J]. 煤气与热力, 2013, 33(4): 39-42. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4416.2013.04.010.
- [5] HE T, PEI Q J, CHEN P. Liquid organic hydrogen carriers[J]. Journal of energy chemistry, 2015, 24(5): 587-594. DOI: 10.1016/j.jechem.2015.08.007.
- [6] BOURANE A, ELANANY M, PHAM T V, et al. An overview of organic liquid phase hydrogen carriers[J].

- International journal of hydrogen energy, 2016, 41(48): 23075-23091. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.07.167.
- [7] TEICHMANN D, ARLT W, WASSERSCHIED P, et al. A future energy supply based on liquid organic hydrogen carriers (LOHC)[J]. Energy & environmental science, 2011, 4(8): 2767-2773. DOI: 10.1039/C1EE01454D.
- [8] VEREVKIN S P, EMEL'YANENKO V N, HEINTZ A. Liquid organic hydrogen carriers: an upcoming alternative to conventional technologies. Thermochemical studies[J]. Industrial & engineering chemistry research, 2012, 51(37): 12150-12153. DOI: 10.1021/ie301898m.
- [9] CHOI I Y, SHIN B S, KWAK S K, et al. Thermodynamic efficiencies of hydrogen storage processes using carbazole-based compounds[J]. International journal of hydrogen energy, 2016, 41(22): 9367-9373. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.04.118.
- [10] WANG H W, ZHOU X, OUYANG M G. Efficiency analysis of novel liquid organic hydrogen carrier technology and comparison with high pressure storage pathway[J]. International journal of hydrogen energy, 2016, 41(40): 18062-18071. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.08.003.
- [11] CALISKAN H, DINCER I, HEPBASLI A. Energy, exergy and sustainability analyses of hybrid renewable energy based hydrogen and electricity production and storage systems: modeling and case study[J]. Applied thermal engineering, 2013, 61(2): 784-798. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.04.026.
- [12] 张亚宁, 李炳熙, 张波, 等. 生物质氧气气化和水蒸气气化的能量分析及焓分析[J]. 华北电力大学学报, 2012, 39(1): 64-69. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2691.2012.01.013.
- [13] EYPASCH M, SCHIMPE M, KANWAR A, et al. Model-based techno-economic evaluation of an electricity storage system based on Liquid Organic Hydrogen Carriers[J]. Applied energy, 2017, 185: 320-330. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.10.068.

作者简介：

伊立其(1990-),男,硕士研究生,主要从事太阳能制氢储能技术研究。

闫常峰(1969-),男,博士,研究员,主要从事纳米催化材料、制氢、清洁生产等研究。

郭常青(1978-),男,博士,副研究员,主要从事制氢、传热传质、清洁生产等研究。