

中低温化学热泵研究进展

何兆红^{1,2}, 黄宏宇^{1,2}, 王南南^{1,2}, 刘学成^{1,2}, 大坂侑吾³

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640;

2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广东 广州 510640;

3. 日本金泽大学, 石川 金泽 9201192)

摘要:中低品位能源品位低,应用范围窄,并且还具有余热的产生与应用时间或地点的不匹配性等特点,导致其利用率较低。化学热泵是一种新型节能热泵技术,利用可逆化学反应的吸热和放热,具有热量提质、储能、增热以及冷冻功能,实现能源品位的提升与高效利用。文中在阐述化学热泵工作机理基础上,结合中低品位能源利用情况,重点介绍中低温化学热泵在储能、提升能量品位方面的研究进展。

关键词:化学热泵; 中低品位能源; 储能; 热量提质

中图分类号: TM 911

文献标识码: A

文章编号: 1005-9954(2015)07-0001-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-9954.2015.07.001

A review on development of middle-low temperature heat source chemical heat pump

HE Zhao-hong^{1,2}, HUANG Hong-yu^{1,2}, WANG Nan-nan^{1,2}, LIU Xue-cheng^{1,2}, OSAKA Yugo³

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

Guangdong Province, China; 2. Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences,

Guangzhou 510640, Guangdong Province, China; 3. Kanazawa University, Kanazawa 9201192, Ishikawa, Japan)

Abstract: The efficiency of utilizing middle-low grade energy is low because the middle-low grade energy has the low quality and the time or location of generated and applied processes for industrial waste heat are out of step. Chemical heat pump is considered as a new heat pump for saving energy, which can achieve heat upgrading, storage, heating and refrigeration according to the endothermic and exothermic processes of reversible chemical reaction. And it is remarkable that the chemical heat pump can upgrade the energy quality and utilize the middle-low grade energy efficiently. The working principle of chemical heat pump was proposed. The development of heat storage and heat upgrading of chemical heat pump was focused on concerning the status of middle-low grade energy utilization.

Key words: chemical heat pump; middle-low grade energy; heat storage; heat upgrading

随着化石能源储存量的减少,提高能源回收利用率是解决能源紧缺的重要方法。根据我国能源回收利用状况,大部分的中低温余热没有得到有效的回收利用。因此,提高中低温能源利用率是改善能源紧缺局面的关键环节。中低温能源具有能量品位低、应用范围窄,并且还具有余热的产生与应用时间或地点上的不匹配性等特点,都是其利用率低的原因。

化学热泵利用可逆化学反应的吸热和放热,改变能量品位,同时实现储能过程^[1]。化学热泵储能因利用化学反应具有储能密度大、反应物与生成物储存时间长、热损小、不需要保温等优点,使得在众多的储能方式中脱颖而出成为比较有潜力的储能方式;同时,化学热泵采用合适的工质对,也能对低品位能源实现品位的提升,达到能源再利用的温度要求,如利用太阳能、地热能

收稿日期: 2014-11-06

基金项目: 中国科学院“百人计划”(y307y71001); 广东省自然科学基金项目(S2012040007846)

作者简介: 何兆红(1983—),女,博士,主要从事节能和吸附式热泵技术研究,电话:(020)37210762, E-mail: hezh@ms.giec.ac.cn; 黄宏宇,通信联系人。

以及大量的低品位工业余热,通过化学热泵技术,提升能量品位,达到中压蒸汽应用范围^[2],并且与常规热泵相比,不消耗电能、不使用氟氯烃化物以及较高热力特性的优势,使得化学热泵成为近几年热泵技术的新热点^[1,3]。结合上述中低品位能源的特点以及化学热泵所具备的特性发现,化学热泵能够解决目前能源紧缺背景下中低品位能源利用低的问题,是提高能源利用率的重要方法。

本文从中低品位能源利用状况出发,结合化学热泵发展趋势与应用现状,重点介绍目前化学热泵在储能、提升能量品位方面的研究进展。

1 化学热泵原理

化学热泵是依靠可逆化学反应进行吸热和放热过程,并将热能转变为化学能的装置。正向与逆向反应在不同的温度下进行,低温下吸热,高温下放热,完成热量的提质;通过正向和逆向反应的切换来实现化学热泵的储能作用。根据工作介质相态来分,化学热泵分为2类,一是气固式,另外一类是气液式。气固式化学热泵系统^[1]主要包括反应器、冷凝器、蒸发器,如图1所示。

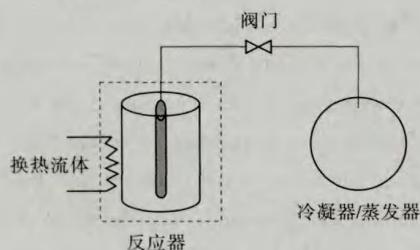
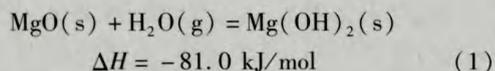


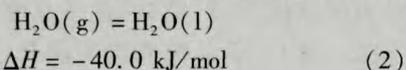
图1 气固类化学热泵结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of solid-gas chemical heat pump

以 $\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}$ 为例^[4],该化学热泵间歇地运行实现储能、加热或冷却过程,其化学反应如下:



冷凝器/蒸发器中进行的冷凝或蒸发过程,如下



通过 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的脱水反应实现化学热泵的储能过程,放能过程则通过 MgO 的水合反应实现。具体的工作过程为:储能模式, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 利用温度 T_d 的余热 Q_d 进行脱水反应,产生的水蒸气进入冷

凝器冷凝成液态,冷凝温度为 T_{cd} ,产生冷凝热 Q_{cd} 可以被回收利用;放能模式,液态的 H_2O 在低温 T_c 下吸收热量 Q_c 蒸发,气态的 H_2O 进入 MgO 反应器内进行水合反应,并伴随着温度 T_h 水合反应热 Q_h 的释放。储能、放能过程可根据需要灵活操作,并且储能过程无能量损失,这是其他储能方式无法比拟的,具体工作过程见图2。

气液式化学热泵系统主要包括2个反应器(吸热反应器、放热反应器)、冷凝器和蒸发器。

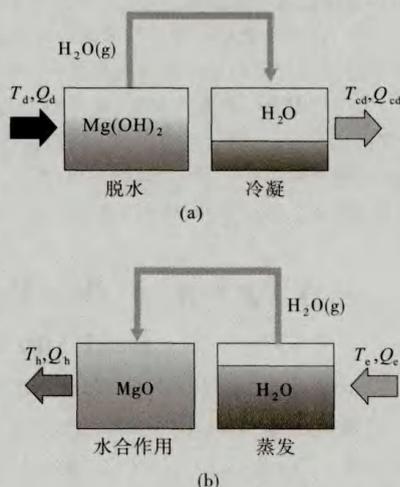


图2 $\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}$ 化学热泵系统

Fig. 2 Diagram of $\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}$ heat pump system

异丙醇/丙酮/氢气、甲醇/甲醛/氢气等为工作介质的气液化学热泵系统,与气固类化学热泵相比,只是参加反应的气固相态变为气液相态,工作过程相似,不过气液式化学热泵能够连续运行,实现储能、热量提质、加热或冷却。

2 化学热泵分类

化学热泵一般依靠可逆化学反应进行吸热和放热,同时将热能转变为化学能的装置;但也有一些热泵系统中发生的并不是化学反应,但系统中的重要部件与化学反应热泵区别不大,也称为化学热泵,例如固体吸附式热泵。在化学热泵系统中,在反应过程中只有一个状态参数的变化,为单变系统,如金属氢化物与氯化物的反应,只有反应压力的变化;另外,热泵系统中温度与压力同时都有变化的,称为双变系统,如固体吸附式热泵。

化学热泵工质主要有水系(氢氧化物/氧化物、氯化盐/盐等)、氨系(氨/碱性盐、甲胺,二甲胺/碱性盐等)、 SO_2 系(硫化物/氧化物等)、 CO_2 系(碳酸盐/

氧化物、氧化钡/碳酸钡等)、氢系(氢化物/氢化物或金属、氢化/脱氢等);采用的反应物质主要有吸附剂、金属基材料以及直接发生化学反应的化合物等^[1]。

化学热泵工质对种类繁多,根据实际的需要,来选择合适的化学热泵系统,表1为不同工质对的化学热泵性能与应用。

表1 不同化学热泵性能与应用
Table1 Performances and applications of different chemical heat pumps

化学热泵工质	反应过程	反应条件	应用	文献
水系	$\text{Mg}(\text{OH})_2(\text{s}) \rightleftharpoons \text{MgO}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	反应条件: $\Delta H = 81.0 \text{ kJ/mol}$, 反应温度 300—400 °C, 压力 12.3—47.4 kPa	中温储能	[4-5, 12]
	$\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{s}) \rightleftharpoons \text{CaO}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	反应条件: $\Delta H = 104 \text{ kJ/mol}$, 反应温度 510 °C, 压力 101 kPa	高温储能	[6]
氢系	$\text{MgH}_2(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Mg}(\text{s}) + \text{H}_2(\text{g})$	反应条件: $\Delta H = 75 \text{ kJ/mol}$, 反应温度 250—500 °C, 压力 10^2 — 10^4 kPa	高温储能(573— 1 273 K), 如 太阳能发电	[7]
	$\text{CaH}_2(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{s}) + \text{H}_2(\text{g})$	反应条件: 反应温度 900—1 100 °C, 压力 10— 150 kPa		[8]
	$(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}(\text{l}) \rightleftharpoons$ $(\text{CH}_3)_2\text{CO}(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$	反应条件: $\Delta H = 100.4 \text{ kJ/mol}$, 吸热反应温度 80— 90 °C, 放热反应温度 150—210 °C	中低温热量 提质	[5, 9, 25-26]
CO ₂ 系	$\text{CaCO}_3(\text{s}) \rightleftharpoons \text{CaO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$	反应条件: $\Delta H = 178 \text{ kJ/mol}$, 反应温度 700—1 000 °C, 压力 0— 10^3 kPa	高温储能	[7]
	$\text{PbCO}_3(\text{s}) \rightleftharpoons \text{PbO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$	反应条件: $\Delta H = 88 \text{ kJ/mol}$, 反应温度 440—450 °C, 压力 10^5 Pa		
氨系	$\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{NH}_3(\text{s}) \rightleftharpoons \text{CaCl}_2 \cdot$ $2\text{NH}_3(\text{s}) + 2\text{NH}_3(\text{g})$	反应条件: $\Delta H = (50 \pm 15) \text{ kJ/mol}$, 反应温度 -50— 300 °C, 压力 5×10^3 kPa	中低温储能和 热量提质	[5]

3 化学热泵应用

选择适当的化学反应循环和反应条件,化学热泵可以具备储能、热量提质、增热、冷冻4种机能^[10]。目前,根据热源温度和所提供的热能使用温度不同,化学热泵用途可分为热量提质型、增热型以及冷冻型。热量提质型,把中温热作为热源,放热端产生高温热以供利用;增热型化学热泵是把高温热作为热源,产生的中温热用来加热;冷冻型化学热泵原理与增热型相同,但使用目的不同,制造环境温度以下的低温,为制冷过程使用^[11]。另外,化学热泵可利用可逆化学反应进行储能/放能,具有储能密度大、热损小等特点,是一种优异的储能方式。

利用化学热泵技术的热量提质、增热、储能等作用解决中低品位能源品位低、余热的产生与应用时

间或地点上的不匹配性等问题,提高中低品位能源利用率。结合中低温能源的特点,本文重点介绍中低温化学热泵的储能、热量提质方面的应用。

3.1 储能

化学热泵依靠正逆化学反应的吸热和放热,通过对中低品位废热的吸热反应,以化学能形式储存能量,待进行放热反应时,释放能量。利用物质的化学反应储存能量,具有储能密度大,不需保温、无热损等特点,使得化学热泵成为储能技术近几年研究的热点。

化学热泵热电联产系统发动机中温烟气利用。热电联供系统利用汽油机、柴油机排气余热发电或供热,进行能量回收利用,但是低电负荷时,发电量远大于所需电量,需采用化学热泵储能方式把发动

机余热先储存起来,以待高电负荷时,启动放能模式,利用放热反应热产生蒸汽或加热进行发电或供热;2种模式都是按需开启,通过合理配比适用于各种工况下,操作灵活,从而最大限度地提高热能发电效率^[12]。结合发动机产生 400 ℃ 的烟气、90 ℃ 的冷却水,选取 $\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}$ 化学热泵, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 脱水反应温度为 350 ℃,蒸发器内蒸发温度 80 ℃,具体过程为:在储能模式下, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 利用发动机产生的烟气余热发生脱水反应,气态的水蒸气进入到冷凝器;在放热模式下,利用发动机冷却水加热蒸发器,水蒸气从蒸发器蒸发出来进入到 MgO 反应器中发生水合反应,同时释放温度 100—150 ℃ 的反应热,用于产生蒸汽或加热,完成发动机余热储能,再利用过程。图 3 为 $\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}$ 化学热泵发动机余热储能示意图^[12]。

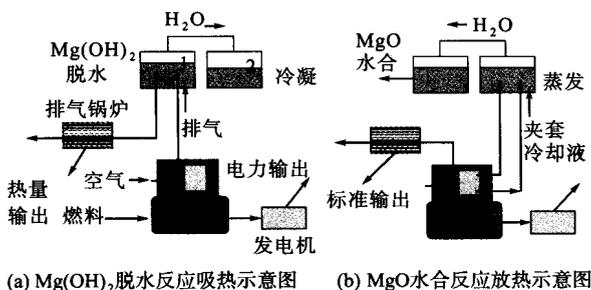


图 3 $\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}$ 化学热泵发动机余热利用示意图

Fig. 3 Engine waste heat storage using $\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}$ chemical heat pump

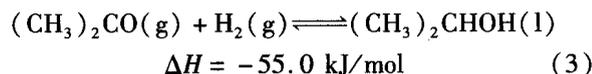
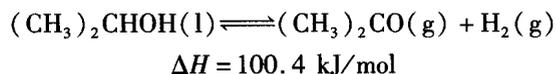
化学热泵汽车发动机余热储能。化学热泵不但能储热放热,而且还可以储热制冷。利用化学热泵的蒸发器蒸发,向外界提供冷量。汽车发动机产生 150 ℃ 的排气,直接排放到环境中,不但造成对环境的热污染,而且也是能源的浪费。同时,汽车空调一般采用蒸汽压缩式制冷,空调耗油量占汽车耗油的 10% 以上。因此,可利用化学热泵技术把汽车发动机排气余热储存起来,关闭发动机时,启动化学热泵的放热模式,通过蒸发器蒸发向车厢提供冷量。Jun-Hee Lee 等^[13]利用 $\text{CaSO}_4/\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ 的化学热泵系统,发动机运转时,启动储能模式,发动机排气余热可提供 CaSO_4 脱水反应所需热量;当发动机关闭时,启动放能模式,蒸发器蒸发提供给车厢 5 ℃ 的冷量。利用化学热泵储存汽车发动机余热来提供冷量,降低汽车空调油耗,是汽车空调发展重要方向。

另外,中低温化学热泵储能材料除了上述金属氧化物、硫酸盐等,还有结晶水合物和氯盐氨合物,如 $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, $\text{BaCl}_2 \cdot 8\text{NH}_3$ 。相对于其他化学储能材料而言,结晶水合物所具备的独特优势有:简单的水合与水解可逆反应即可完成储能,反应过程的条件温和,在安全性上展现出极大的优势;在低温蓄热方面的应用前景广阔,反应温度通常低于 150 ℃,大大拓展了化学储能技术的应用范围。

储能技术将成为未来能源系统中热电生产的一个重要组成部分,化学热泵储能在储能密度以及工作温度范围上的优势是其他储能方式无可比拟的,作为热化学气固相反应的工作介质和活性组分,其在化学储放热过程中并不会被消耗。然而基于上述化学储能材料的储能装置,目前小规模太阳能发电的应用仍然远远不够,很多应用领域还仅仅处于研究和尝试阶段。

3.2 热量提质

大量的工业余热没有得到有效的利用,一个重要的原因是温度太低,可利用的价值不大。针对这种状况,一方面研发新型低温利用技术,直接利用低品位热能,另一方面可采用热泵技术提升工业余热品位,达到成熟余热回收利用技术的温度要求。针对后者,目前工业应用比较多的是采用传统蒸汽压缩式热泵升温,但是对于高于 110 ℃ 的余热,大部分蒸汽压缩式热泵不能正常工作。化学热泵可以克服蒸汽压缩式热泵的缺点,通过选择合适的反应工质,利用不同温度下吸热、放热化学反应来完成升温过程,具体的是利用低温热源进行吸热反应,而放热反应则释放高温热量,实现化学热泵热量提质的作用。在这类化学热泵中,气液类具有代表性的是异丙醇/丙酮/氢气类。异丙醇可利用 80—90 ℃ 的低温热源发生吸热的脱氢反应,而丙酮的加氢放热反应则能产生 150—210 ℃ 的热量,具体的化学反应如下:



目前,异丙醇/丙酮/氢气化学热泵系统主要包括 2 个反应器、蒸馏塔、再沸器以及压缩机,利用蒸馏塔把脱氢反应中气态产物丙酮、氢气分离出来。异丙醇/丙酮/氢气类化学热泵已经开展了大量的研究^[14],首次提出的异丙醇/丙酮/氢气类化学热泵,被认为最有发展前途的化学热泵之一^[15],目前也开

展了深入的研究。1987年 Saito 等^[16]的包含蒸馏塔的异丙醇/丙醛/氢气化学热泵系统中,加氢的放热反应、脱氢的吸热反应分别在气相、液相中进行,提高了化学热泵的反应性能。催化剂的使用,可以明显提高化学反应速率。Kim 等^[17]采用 Raney nickel 对吸热、放热反应进行催化,实验发现丙酮与氢的较佳的比例为 4:1。Meng 等^[18]则对液相的脱氢反应采用 Ru 和 Ru-Pt 进行催化,得到比较好的效果;中国科学院工程热物理研究所开展了各操作变量对异丙醇/丙酮/氢气化学热泵 COP、焓的影响分析^[19]。

Mg(OH)₂/MgO/H₂O 类化学热泵^[20]能利用 100—150 ℃ 的低温热能(压力 12.3—47.4 kPa),产生高于 297 ℃ 温度的热量,可应用于工业余热或其他形式的低品位能量的利用。

另外,氯盐(碱性金属)/氨类化学热泵在热量提质方面也开展了大量的研究,其中包括开发新型工质对,提高化学热泵性能。各种氯盐(碱性金属)/氨类化学反应热的数量级基本保持一致,反应焓变为(50 ± 15) kJ/mol,反应器操作压力为 50 × 10⁵ Pa,温度范围为 -50—300 ℃^[21]。P. Neveu 等^[22]针对氯化物盐/氨类化学热泵的热量提质应用方面,总结了不同工质对对应热源温度和利用温度;研究发现,氯盐/氨类化学热泵的 2 个反应器的压力变化范围 0.1 × 10⁵—50 × 10⁵ Pa,温度提升至少为 40 ℃。当热源温度小于 100 ℃ 时,反应物可选 CaCl₂-MnCl₂、BaCl₂-CaCl₂。而 Mn, Ni 氯化物盐的化学热泵可获得较高的利用温度,最高可达 235 ℃。Ca, Mn, Mg, Fe, Ni 5 类金属氯化物化学热泵能够把热源温度 105 ℃ 提升至 200 ℃^[23],温度提升范围较大,在低温热源利用方面(太阳能)具有良好的应用前景。上海交通大学王如竹教授课题组对 MnCl₂-CaCl₂-NH₃^[24]以及 CaCl₂-NH₃^[25]化学吸附工质对进行了研究,将其用于高密度的热能储存以及能量品位的提升。MnCl₂-CaCl₂-NH₃ 化学热泵系统中应用了减压脱附技术,理论分析的结果显示可以将 87 ℃ 的低品位能提升到 171 ℃。

4 结语

化学热泵依靠可逆化学反应的吸热和放热,实现热量提质、储能、增热以及冷冻,特别是储能和热量提质方面能够解决中低品位能源不连续性、品位过低等问题,提高中低品位能源利用效率,具有广泛的应用前景,研发新型高效化学热泵,是提高中低品位能源利用率重要途径。但是由于结构复杂、设备

操作压力高,特别是化学反应热效率低、化学热泵反应材料体积无定型寿命短等问题,严重阻碍了化学热泵的发展,目前我国化学热泵方面还处于研究阶段。工质对的选择、高效反应物的制备以及化学热泵系统设计与优化都是研究的热点,开发高性能的工质对、提高化学热泵性能是化学热泵发展的重要趋势。

参考文献:

- [1] WONGSUWAN W, KUMAR S, NEVEU P, et al. A review of chemical heat pump technology and applications [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2001, 21(15): 1489-1519.
- [2] SPOELSTRA S, HAIJE W G, DIJKSTRA J W. Techno-economic feasibility of high-temperature high-lift chemical heat pumps for upgrading industrial waste heat [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2002, 22(14): 1619-1630.
- [3] CHUNG Y, KIM B J, YEO Y K, et al. Optimal design of a chemical heat pump using the 2-propanol/acetone/hydrogen system [J]. *Energy*, 1997, 22(5): 525-536.
- [4] KATO Y, TAKAHASHI F, WATANBE A, et al. Thermal performance of a packed bed reactor of a chemical heat pump for cogeneration [J]. *Institution of Chemical Engineers*, 2000, 78(5): 745-748.
- [5] YAN Q, ZHANG X, ZHANG L. Analysis and optimization on solar energy chemical heat storage material [C] // *Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014, 262: 121-129.
- [6] SCHAUBE F, KOCH L, WÖRNER A, et al. A thermodynamic and kinetic study of the de- and rehydration of Ca(OH)₂ at high H₂O partial pressures for thermo-chemical heat storage [J]. *Thermochemica Acta*, 2012, 538: 9-20.
- [7] PARDO A P, DEYDIERA A, ANXIONNAZ-MINVIELLE Z, et al. A review on high temperature thermochemical heat energy storage [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 32: 591-610.
- [8] CORGNALE C, HARDY B, MOTYKA T, et al. Screening analysis of metal hydride based thermal energy storage systems for concentrating solar power plants [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 38: 821-833.
- [9] KLINSODA I, PIUMSOMBOON P. Isopropanol-acetone-hydrogen chemical heat pump; a demonstration unit [J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(4): 1200-1207.

[10] 邹盛欧. 化学热泵的开发与应用[J]. 石油化工, 1996, 25:294-299.

[11] 王宁惠. 能量利用的新途径-化学热泵[J]. 天津理工学院学报, 1994, 10(3):27-34.

[12] 宋鹏翔, 丁玉龙. 化学热泵系统在储热技术中的理论与应用[J]. 储能科学与技术, 2014, 3(3):227-235.

[13] LEE Jun-Hee, OGURA H, SATO S. Reaction control of CaSO₄ during hydration/dehydration repetition for chemical heat pump system [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 63(1):192-199.

[14] PREVOST M, BUGAREL R. Chemical heat pump: system Isopropanol-Acetone-Hydrogen [C]// Proceedings of the International Conference on Energy Storage. 1980: 95-110.

[15] KITIKIATSOPHON W, PIUMSOMBOON P. Dynamic simulation and control of an Isopropanol-Acetone-hydrogen chemical heat pump [J]. Sci Asia, 2004, 30:135-147.

[16] SAITO Y, KAMEYAMA H, YOSHIDA K. Catalyst-assisted chemical heat pump with reaction couple of acetone hydrogenation/2-propanol dehydrogenation for upgrading low-level thermal energy: proposal and evaluation [J]. International Journal of Energy Research, 1987, 11(5):549-558.

[17] KIM T G, YEO Y K, SONG H K. Chemical heat pump based on dehydrogenation and hydrogenation of *i*-propanol and acetone [J]. International Journal of Energy Research, 1992, 16(9):897-916.

[18] MENG N, SHINODA S, SAITO Y. Improvements on thermal efficiency of chemical heat pump involving the reaction couple of 2-propanol dehydrogenation and acetone hydrogenation[J]. International Association for Hydrogen Energy, 1997, 22(4):361-367.

[19] GUO Jiangfeng, HUAI Xiulan, LI Xunfeng, et al. Performance analysis of Isopropanol-Acetone-Hydrogen chemical heat pump[J]. Applied Energy, 2012, 93:261-267.

[20] KATO Y, YAMASHITA N, KOBAYASHI K, et al. Kinetic study of the hydration of magnesium oxide for chemical heat pump[J]. Applied Thermal Engineering, 1996, 16(11):853-862.

[21] SPINNER B, Ammonia-based thermochemical transformers [J]. Heat Recovery Systems and CHP, 1993, 13(4): 301-307.

[22] NEVEU P, CASTAIANG J. Solid-gas chemical heat pumps: fields of application and performance of the internal heat recovery process[J]. Heat Recovery System and CHP, 1993, 13(3):233-251.

[23] GOETZ V, ELIE F, SPINNER B. The structure and performance of single effect solid-gas chemical heat pumps [J]. Heat Recovery Systems and CHP, 1993, 13(1):79-96.

[24] LI T, WANG R, KIPLAGAT J K. A target-oriented solid-gas thermochemical sorption heat transformer for integrated energy storage and energy upgrade[J]. AIChE Journal, 2013, 59(4): 1334-1347.

[25] LI T, WANG R, KIPLAGAT J K, et al. Performance analysis of an integrated energy storage and energy upgrade thermochemical solid-gas sorption system for seasonal storage of solar thermal energy[J]. Energy, 2013, 50: 454-467.

广 告 索 引

上海苏尔寿工程机械制造有限公司	封面	杭州原正化学工程技术装备有限公司	前插 6
华陆工程科技有限责任公司	封二、前插 1	南京华基塔业有限公司	前插 7
美国传热研究公司 - HTRI Xchanger Suite	前插 2	《化学工程》期刊编委会	前插 8
苏州安特威阀门有限公司	前插 3	山东天皓钢铁有限公司	前插 9
天津市新天进科技开发有限公司	前插 4	山东尧程新材料科技有限公司	前插 10—11
上海化工研究院 国家高效分离塔填料及装置	前插 5	北京北化工程技术有限公司	前插 12
技术研究推广中心	前插 5	天津市天大北洋化工设备有限公司	封三
		江苏新宏大集团	封底