

储热技术研究进展与趋势

汪翔, 陈海生*, 徐玉杰, 王亮, 胡珊

中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190

* 联系人, E-mail: chen_hs@mail.etp.ac.cn

2016-06-03 收稿, 2016-08-30 修回, 2016-08-30 接受, 2016-12-08 网络版发表

国家自然科学基金联合基金(U1407205)、国家重点基础研究发展计划(2015CB251302)、国家国际科技合作专项(2014DFA60600)和中国科学院可再生能源高效利用创新交叉团队项目资助

摘要 储热最大的潜力就在于解决由于时间、空间或强度上的热能供给与需求间不匹配所带来的问题。储热技术的开发和利用能够有效提高能源综合利用水平, 对太阳能热利用、电网调峰、工业节能和余热回收、建筑节能等领域都具有重要的应用价值。近年来, 储热在基础研究和技术应用方面均受到了极大的关注。本文首先利用 Thomson Reuters 公司的检索平台 Web of Science 对显热、潜热及热化学 3 大类储热技术从 2000~2015 年的研究趋势进行统计, 分析的结果显示在基础研究方面潜热储热是当前最受关注的储热技术, 热化学储热的关注度居中, 显热储热的关注度最小, 这主要取决于 3 种储热技术的成熟度。其次, 在广泛总结前人研究成果的基础上, 对比了 3 类储热的主要技术特色, 诸如储能密度、储能规模、储能周期、储能成本、优缺点、未来研究重点等, 并指出各储热技术应用领域的选择与拓展应充分考虑其各自的技术特色。最后, 对储热技术的最新进展进行重点分析, 主要包括近 5 年来出现的以储热瓷与类离子液体为代表的潜热储热技术、钙基高温热化学储热技术、以及混合储热技术, 详细阐述了这些储热技术的原理与发展潜力, 旨在为新型储热系统的研究与应用提供详实的参考。

关键词 储热, 显热, 潜热, 热化学

储热技术是以储热材料为媒介将太阳能光热、地热、工业余热、低品位废热等热能储存起来, 在需要的时候释放, 力图解决由于时间、空间或强度上的热能供给与需求间不匹配所带来的问题, 最大限度地提高整个系统的能源利用率而逐渐发展起来的一种技术。储热技术的开发和利用能够有效提高能源综合利用水平, 对于太阳能热利用、电网调峰、工业节能和余热回收、建筑节能等领域都具有重要的研究和应用价值。我国科学技术部 2012 年发布的《太阳能发电科技发展“十二五”专项规划》及国家能源局 2016 年发布的《能源技术革命创新行动计划(2016~2030 年)》中均对各种重点储热技术的研发进行了部署。国际能源署 IEA 近年来持续启动了 SHC Task 32, SHC

Task 42 系列项目, 旨在筛选并突破有潜力的储热技术。在储热技术的市场前景预测方面, 全球权威调研机构 Technavio 在 2015 年发布的研究报告《Global Thermal Energy Storage Market 2015–2019》指出: 到 2019 年, 预计储热产业的收益将超过 13 亿美元; 预计 2015~2019 年期间, 全球储热市场将以 18.7% 的年复合增长率上涨。总的来说, 储热技术正在成为能源利用研究领域的一个热点。

储热技术主要分为显热储热、潜热储热与热化学储热 3 大类^[1]。其中, 显热储热是利用材料物质自身比热容, 通过温度的变化来进行热量的存储与释放; 潜热储热是利用材料的自身相变过程吸/放热来实现热量的存储与释放, 所以潜热储热通常又称为相变

引用格式: 汪翔, 陈海生, 徐玉杰, 等. 储热技术研究进展与趋势. 科学通报, 2017, 62: 1602–1610

Wang X, Chen H S, Xu Y J, et al. Advances and prospects in thermal energy storage: A critical review (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 1602–1610, doi: 10.1360/N972016-00663

储热;热化学储热是利用物质间的可逆化学反应或者化学吸/脱附反应的吸/放热进行热量的存储与释放.通过细致的文献调研可知,近3年,针对这3大类储热技术的原理特点、研究进展、应用现状进行综述的工作已有大量报道,代表性综述文章如表1所示^[2~15].为了使侧重点区别于前述的储热技术评述工作,本文的组织思路如下:首先,利用Thomson Reuters公司开发的信息检索平台Web of Science对储热技术的总体研究趋势进行统计分析;其次,对3类储热技术的主要特性进行对比分析,并对技术的发展趋向进行展望;最后,对近5年有较大创新的储热技术进行重点分析.旨在为储热技术研究、应用领域的科研人员、工程师等提供最新和详实的参考.

1 储热技术研究趋势分析

利用Thomson Reuters公司的检索平台Web of Science对3大类储热技术从2000~2015年的研究趋势进行统计分析.以潜热储热为例,检索主题为:“Thermal Energy Storage” AND “Latent Heat” OR “Phase Change” NOT “Sensible Heat” NOT “Thermochemical Heat”.其中“AND”,“OR”,“NOT”分别为逻辑运算“与”、“或”、“非”.同时,文献的研究领域及类型分别限定为“Science & Technology”,“Article & Meeting”.采用相似的方法对显热储热、热化学储热

进行检索.结果显示,2000~2015年间显热储热、潜热储热、热化学储热相关论文的总收录量分别为149,1788,242篇,逐年趋势见图1.

由图1可知,2011年以后储热技术的研发处于爆发期,这与政府机构加大对太阳能热利用的支持力度不无关系.其中,潜热储热无疑是最受关注的储热技术,其对应的论文年发表量远远超过其他两项储热技术的论文年发表量,这主要是因为潜热储热的储能密度明显大于显热储热的储能密度,同时它的技术突破难度当前又比热化学储热的低很多.其次受关注的是热化学储热技术,这主要是因为它在三者中拥有理论上最大的储能密度,进而不断激起科研人员的探索欲望.相对而言,在技术研发层面关注度最差的是显热储热,其论文年发表量最少,这主要是因为显热储热技术趋于成熟,进而理论和技术突破的工作较少.

2 各储热技术对比分析

2.1 储能密度对比

储能密度是评估储热系统潜力的最重要参数之一.它同储热系统涉及的物理过程、特征材料及温度区域范围密切相关.图2所示为已报道并具代表性的中低温($\leq 200^{\circ}\text{C}$)储热技术的储能密度对比^[16].目前,

表1 近3年具有代表性的储热技术综述文献汇总

Table 1 Representative reviews for thermal energy storage form nearly 3 years

来源	发表时间	评述重点
Li ^[2]	2016年	显热储热的材料、器件、效率及影响因子,建议储/释热模式的创新应为未来显热储热研究的重点
汉京晓等人 ^[3]	2014年	太阳能热发电用显热储热的介质、模式,建议重点发展间接接触式显热储热
Nkwetta等人 ^[4]	2014年	潜热储热的关键影响因素、子技术的局限性、研究方法等.建议储热系统的实用性探索为今后的重点
Sharif等人 ^[5]	2015年	潜热储热在供暖、供热领域的应用现状
Xu等人 ^[6]	2015年	潜热储热在太阳能热发电领域的应用现状
Pielichowska等人 ^[7]	2014年	潜热储热的材料研究进展、新型材料开发的方向
徐治国等人 ^[8]	2014年	中低温潜热储热的研究进展,建议了材料性能强化、器件设计及研究方法的发展方向
Aydin等人 ^[9]	2015年	近期热化学储热的研究进展,认为热化学储热系统很不成熟,从材料、反应器到循环都需要深入探索
Yan等人 ^[10]	2015年	可逆化学反应储热系统的研究进展,建议化学反应过程及成本的控制为该技术未来突破的重点
Pardo等人 ^[11]	2014年	高温热化学储热技术的研究进展,建议技术经济性方面的研究应尽快开展
Trausel等人 ^[12]	2014年	基于水合盐的热化学储热技术研究进展,建议了四种最优潜力的水合盐热化学储热系统
Heier等人 ^[13]	2015年	建筑各用能领域储热技术的可行性及应用现状,建议重点发展潜热储热和热化学储热
Kuravi等人 ^[14]	2013年	聚光太阳能热发电用储热系统类型、设计方法及其应用现状
Xu等人 ^[15]	2014年	跨季节长周期储热技术的类型、应用现状,建议未来重点发展潜热储热和热化学储热

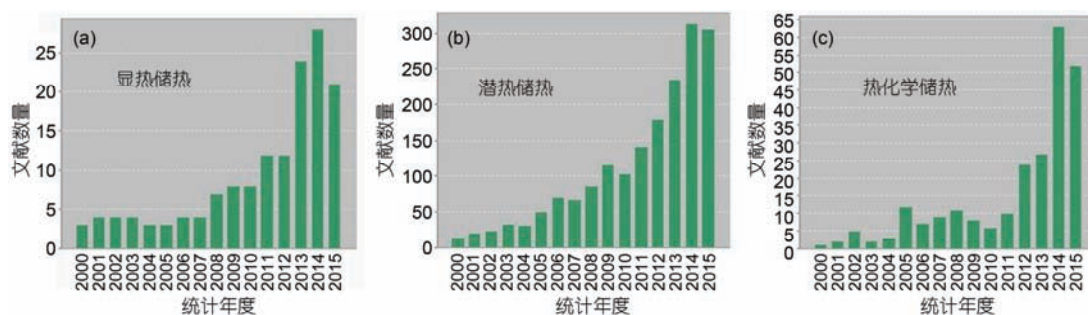


图1 (网络版彩色)基于Web of Science统计的2000~2015年储热技术研究趋势。(a) 显热储热; (b) 潜热储热; (c) 热化学储热

Figure 1 (Color online) Research trends of thermal energy storage from 2000 to 2015—Using database in Web of Science. (a) Sensible heat storage; (b) latent heat storage; (c) thermochemical heat storage

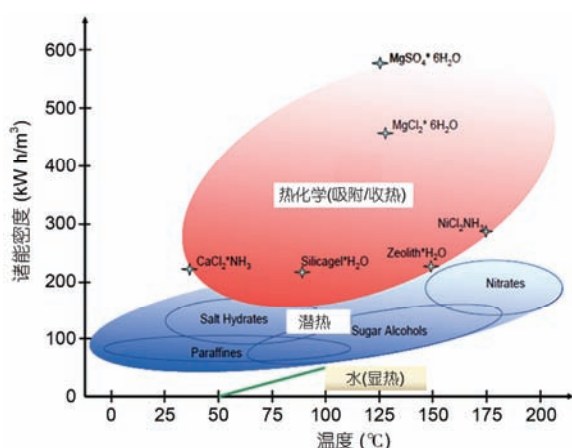


图2 (网络版彩色)中低温($\leq 200^{\circ}\text{C}$)储热的储能密度^[16]

Figure 2 (Color online) Density of thermal energy storage at middle-low temperature($\leq 200^{\circ}\text{C}$)^[16]

中低温储热技术主要用于建筑供能、节能领域,适用于中低温储热的技术以吸附/收为代表的热化学储热、以水合盐/石蜡/糖醇等为代表的潜热储热,以及以水为代表的显热储热。很明显,吸附/收过程对应的储能密度最高可达到水显热对应的储能密度的10倍,潜热储热的储能密度处于二者之间。

图3所示为已报道并具代表性的中高温($>200^{\circ}\text{C}$)热化学与潜热储热的储能密度对比^[6,11,17~24]。表2给出了常见的中高温显热储热的储能密度对比^[14,25,26]。目前,中高温储热技术通常应用于聚光太阳能热发电领域,适用的技术主要包括以可逆化学反应为代表的热化学储热、金属相变与熔盐相变为代表的潜热储热,以及导热油/熔盐/液态金属/混凝土等为代表的显热储热。可以看出,可逆化学反应对应的最大储能密度可接近导热油类显热储热的20倍。此外,近年来由于金属相变与熔盐相变的储热潜力相继被深

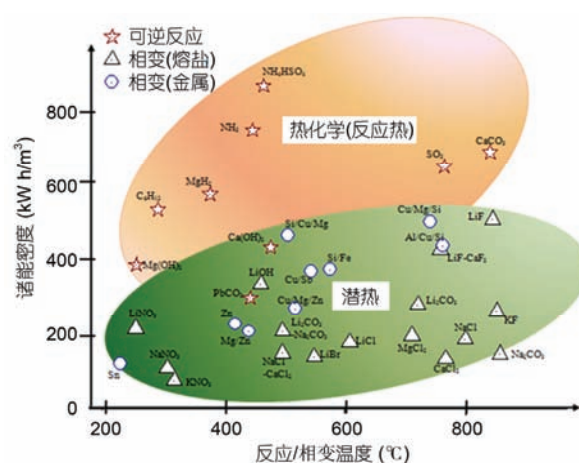


图3 (网络版彩色)中高温($>200^{\circ}\text{C}$)热化学与潜热储热的储能密度(数据源自文献[6,11,17~24])

Figure 3 (Color online) Density of reaction and latent heat storage at middle-high temperature($>200^{\circ}\text{C}$) (Data adapted from Refs. [6,11,17~24])

入挖掘与研究,部分潜热储热的储能密度已接近于某些热化学储热的储能密度。

总的来说,在特定的适用温区热化学储热的储能密度远远超过显热储热的储能密度,潜热储热的储能密度一般居于二者之间。但需指出的是,目前所知的显热、潜热的储能密度中相当部分已经过实验室示范甚至商业示范的验证,其未来的提升方向将主要集中在储热系统参数优化方面;而热化学储热的储能密度目前大部分是理论测算的或者仅经过实验室小型原理机的验证,示范系统的储能密度亟待全面验证与挖掘,其提升的方向将主要集中于储热循环的改良、传热强化及控制创新等方面。

2.2 主要技术特色对比

综合考虑前期储热技术研究的进展、各储热技术

表 2 中高温显热储热的储能密度(数据源自文献[14,25,26])

Table 2 Storage density of sensible heat storage at middle-high temperature (Data adapted from Refs. [14,25,26])

储热介质	温度范围(°C)		平均热容 (kJ/(kg K))	最大储能密度 ((kW h)/m ³)
	冷端	热端		
合成油	250	350	2.3	57
硅油	300	400	2.1	52
液态亚硝酸盐	250	450	1.5	152
液态硝酸盐	265	565	1.6	249
液态钠	270	530	1.3	80
砂岩石+矿物油	200	300	1.3	60
加固混凝土	200	400	0.85	100
铸铁	200	400	0.56	160
耐火硅砖	200	700	1.0	150

评述工作所展示的主流观点,对显热储热、潜热储热及热化学储热的储能规模、效率、储能周期、成本、优缺点、成熟度、未来研究重点等技术特色分别进行统计、凝练,并对比分析,如表3所示^[16]。

可以看出,到目前为止显热储热技术已充分发展,而潜热储热技术亦整体趋于成熟,在未来应针对二者的技术缺点重点攻关、并选择其适用的储能领域广泛探索、验证合理的商业模式。热化学储热技术的成熟度最低,其从实验室验证到商业推广还有很长的一段路要走,在未来热化学储热技术的循环原理、

控制机制及技术经济性仍然需要大量的研究。此外,储热成本是最受关注的技术变量。美国能源部2011年启动SunShot Initiative计划^[27],其目标是在2020年左右将聚光太阳能发电的成本降至0.06 \$/(kW h)以下,对应的中高温储热成本降低到15 \$/(kW h)(约13 €/kW h,当前汇率)以下。很明显,大部分的中高温潜热储热和热化学储热在未来很长一段时间内均存在降低成本的压力。欧洲储能协会(EASE)与欧洲能源研究联盟(EERA)联合公布了储能技术发展路线,其目标是在2020年左右将潜热储热与热化学储热的成本降低

表 3 各储热技术的主要特色对比

Table 3 Comparison of main features from thermal energy storage technologies

储热类型	储能规模 (MW) ^[16]	典型储能周期	成本 (€/kW h) ^[16]	技术优点	技术缺点	技术成熟度	未来研究重点
显热储热	0.001~10	数小时~数天	0.1~10	储热系统集成相对简单;储能成本低,储能介质通常对环境友好	储能密度很低,系统的体积庞大;自放热与热损问题突出	高;工业、建筑、太阳能热发电领域已有大规模的商业运营系统	储热系统运行参数的优化策略创新;储/释热过程中不同热损的有效控制等
潜热储热	0.001~1	数小时~数周	10~50	在近似等温的状态下释热,有利于热控;储能密度明显高于显热	储热介质与容器的相容性通常很差;热稳定性需强化;相变材料较贵	中;处于从实验室示范到商业示范的过渡期	新型相变材料的开发;已有相变材料的相容性改进;储/释热过程的优化控制等
热化学储热	0.01~1	数天~数月	8~100	储能密度最大,非常适用于紧凑装置;储热期间的散热损失可以忽略不计	储/释热过程复杂,不确定性大,控制难;循环中的传热传质特性通常较差	低;处于储热介质基础测试、实验原理机验证阶段	新型储热介质对的筛选、验证;储/释循环的强化与控制;技术经济性的验证,以及适用范围的拓展

到50 €/(kW h)以下^[28].

3 储热技术最新进展分析

3.1 潜热储热

日本东京大学的Tokoro等人^[29]开发出一种能够长时间存储热能的新型固-固相变材料,他们称之为储热瓷(heat-storage ceramic). 这种材料为条状 λ 五氧化三钛,其储热机制为:在压力条件(60 MPa)的触发下,条状 λ 五氧化三钛相变成 β 五氧化三钛,并释放潜热,为230 kJ/L;反之,通过输入热量, β 五氧化三钛相变成条状 λ 五氧化三钛,进而实现储热,过程如图4所示. 基于该储热瓷的储热技术拥有其他潜热储热技术不具备的优点:(1) 释热过程完全可控(压力触发), 随需随取, 并能够长周期储存;(2) 除了输入热量的方式外, 也可以通过输入光能或电流的方式实

现 β 五氧化三钛相变成条状 λ 五氧化三钛, 储能方式多样化. 此外, 条状 λ 五氧化三钛为一种简单的氧化钛, 是蕴藏量丰富的元素而且很环保.

Bhatt和Gohil^[30]利用太阳灶测试并评估7种离子液体(四丁基铵阳离子+无机阴离子)相变储热的可行性. 其研究显示, 离子液体具有与传统潜热储热材料相当, 甚至更加优越的性质, 如蒸汽压低、储能密度高、物理和化学稳定好、热传导性好、熔点低和可设计性等. 在国内, 北京化工大学的Zhu等人^[31]也初步开展了离子液体作为相变材料的可行性验证, 结论与上述研究类似. 近年来, 随着材料合成成本的逐步下降, 离子液体及类离子液体很有潜力成为优良的中低温潜热储热材料.

3.2 热化学储热

2014年美国南方研究院(southern research institute, SRI)获得能源部105万美元的资助, 用于开发一种新型的高温热化学储热系统(<http://www.southernresearch.org/u-s-department-of-energy-and-southern-research-sign-3-million-agreement-to-demonstrate-a-high-temperature-solar-energy-storage-system/>). 2015年, 美国南方研究院获得能源部300万美元的追加资助, 用于示范验证这种新型的高温热化学储热系统(<http://www.southernresearch.org/u-s-department-of-energy-and-southern-research-sign-3-million-agreement-to-demonstrate-a-high-temperature-solar-energy-storage-system/>). 该系统利用可逆的化学吸附/脱附反应来实现热能的存储与利用, 其核心技术包括两个方面: 在综合权衡储能密度、材料成本、循环寿命的前提下改良钙基吸收剂; 基于闭式循环的反应器设计. 目前, 该系统的正常运行温度可达到900℃, 储能密度超过1 MW h/m³, 而现有熔盐系统的储能密度仅为0.25~0.40 MW h/m³. 此外, 该系统的综合成本预计可达到现有熔盐显热储热系统的1/4, 潜力很大. Chacartegui等人^[32]提出一种类似的钙基高温热化学储热系统, 但他们并没有进行钙基吸收剂的改良, 只重点关注系统的能效分析, 在实际运行条件下集成系统的热效率可达到40%~46%.

3.3 混合储热

为实现多种储热技术的优势互补, Weber等人^[33]提出一种新型的热水显热与沸石-水吸附热混合存储的系统, 如图5所示. 该系统充分利用热水的热量供

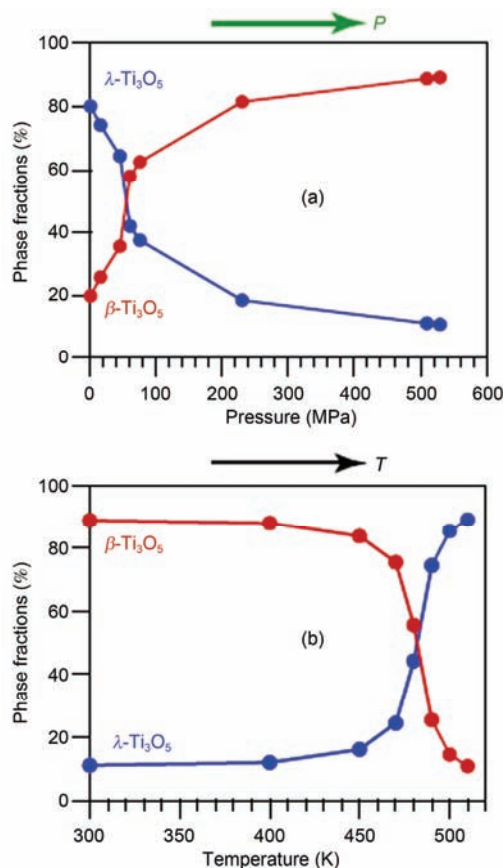


图4 (网络版彩色)储热瓷的储/释热示意图. (a) 释热过程中相组分的压力演化; (b) 储热过程中相组分的温度演化^[29]

Figure 4 (Color online) Heat storage and release of heat-storage ceramic. (a) Pressure evolution of the phase fractions in heat release; (b) temperature evolution of the phase fractions in heat charge^[29]

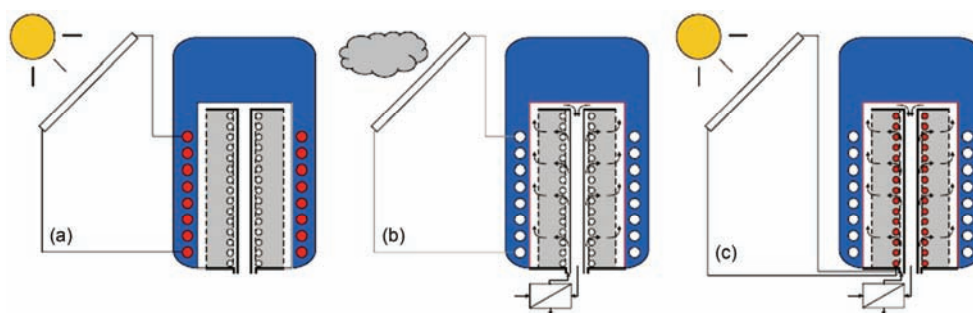


图5 (网络版彩色)显热/吸附热混合储能系统示意图. (a) 太阳能加热水箱; (b) 吸附放热; (c) 解吸附储热^[33]

Figure 5 (Color online) Schematic of a hybrid adsorption/sensible heat storage. (a) Solar charging of hot water store; (b) adsorption; (c) desorption^[33]

给率高、沸石-水吸附储热量大及储热周期长的优点. 其主要工作过程为: 太阳光连续充足时, 加热水箱, 主用显热储能; 在阴雨天气或阳光连续不足期间, 环境空气进入内置的吸附床, 空气中的水蒸汽与沸石吸附放热进而加热水箱, 以弥补显热储能的不足; 当阳光再次充足时, 加热水箱, 并使吸附床脱附, 实现储热.

为了最大限度减小显热储能装置在释热时的出流温降, Geissbuhler等人^[34]提出一种新型的显热/潜热混合储能系统, 如图6所示. 其研究结果显示, 在限定释热出流最大温降的条件下, 相对于单纯的显热储热系统, 显热/潜热混合储能系统的材料成本降低, 焓效率提高, 说明该系统是有潜力的.

综观上述的储热技术, 其创新点主要来源于两个方向: 储热介质的创新和储能模式的创新. 储热介质的创新包括新材料的开发、已有材料的改良; 储能模式的创新主要是多种储热形式的综合, 比如混合储热.

4 结语

储热技术是一项有前景的资源节约、环境友好技术, 近年来备受关注. 2011年以后储热技术的研发处于爆发期. 依据前期的储热技术研究成果, 本文对比分析了各储热技术的总体研究趋势、主要技术变量, 同时点评了新出现的有较大创新的储热技术. 主要结论与建议如下:

在研究层面, 当前最受关注的是潜热储热, 其次是热化学储热, 显热储热的关注度最小, 这主要取决

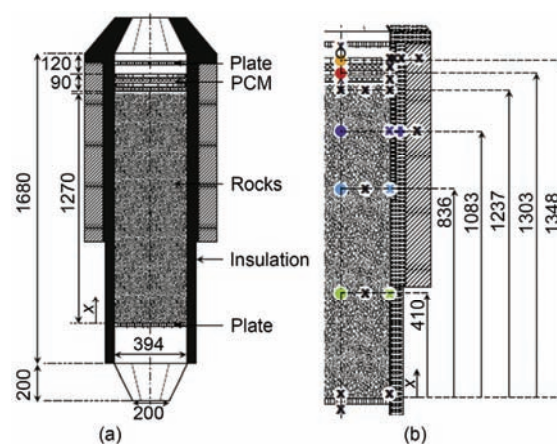


图6 (网络版彩色)显热/潜热混合储能系统示意图. (a) 储热装置结构; (b) 热电偶布点^[34]

Figure 6 (Color online) Schematic of a sensible/latent heat storage. (a) Structure of thermal storage device; (b) thermocouple positions^[34]

于3种储热技术的成熟度. 由于显热储热已充分发展, 潜热储热亦趋于成熟, 未来储热技术的突破重点将是热化学储热.

3种储热技术各具特色, 如: 热化学储热的储能密度最大, 但目前成本最高; 显热储热的储能密度最小, 但成本最低, 同时非常适合大规模储能; 潜热储热的性能基本居于二者之间, 但其技术优点是在恒定的温度放热. 各储热技术应用领域的选择与拓展应充分考虑其各自的技术特色.

在未来的储热技术创新方面, 储热介质的创新与储能模式的创新应是重点. 混合储热不仅创新了储能模式, 还能够重点解决储热系统的实际问题, 建议适当关注.

参考文献

- 1 Hadorn J C. Advanced storage concepts for active solar energy—IEA SHC Task32 2003–2007. In: Proceedings of First International Conference on Solar Heating, Cooling and Building. Lisbon: Eurosun, 2008
- 2 Li G. Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations. *Renew Sust Energy Rev*, 2016, 53: 897–923
- 3 Han J X, Yang Y P, Hou H J. Review on sensible heat thermal energy storage in solar thermal generation (in Chinese). *Renew Energy Res*, 2014, 32: 901–905 [汉京晓, 杨勇平, 侯宏娟. 太阳能热发电的显热蓄热技术进展. *可再生能源*, 2014, 32: 901–905]
- 4 Nkwetta D N, Haghighat F. Thermal energy storage with phase change material—A state-of-the art review. *Sust Cities Soc*, 2014, 10: 87–100
- 5 Sharif M K A, Al-Abidi A A, Mat C, et al. Review of the application phase change material for heating and domestic hot water systems. *Renew Energy Res*, 2015, 42: 557–568
- 6 Xu B, Li P W, Chan C. Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: A review to recent developments. *Appl Energy*, 2015, 160: 286–307
- 7 Pielichowska K, Pielichowski K. Phase change materials for thermal energy storage. *Prog Mater Sci*, 2014, 65: 67–123
- 8 Xu Z G, Zhao C Y, Ji Y N, et al. State-of-the-art of phase-change thermal storage at middle-low temperature (in Chinese). *Energy Stor Sci Tech*, 2014, 3: 179–190 [徐治国, 赵长颖, 纪育楠, 等. 中低温相变蓄热的研究进展. *储能科学与技术*, 2014, 3: 179–190]
- 9 Aydin D, Casey S P, Riffat S. The latest advancements on thermochemical heat storage systems. *Renew Sust Energy Rev*, 2015, 41: 356–367
- 10 Yan T, Wang R Z, Li T X, et al. A review of promising candidate reactions for chemical heat storage. *Renew Sust Energy Rev*, 2015, 43: 13–31
- 11 Pardo P, Deydier A, Anxionnaz-Minvielle Z, et al. A review on high temperature thermochemical heat energy storage. *Renew Sust Energy Rev*, 2014, 32: 591–610
- 12 Trausel F, de Jong A, Cuypers R. A review on the properties of salt hydrates for thermochemical storage. *Energy Procedia*, 2014, 48: 447–452
- 13 Heier J, Bales C, Martin V. Combining thermal energy storage with buildings—A review. *Renew Sust Energy Rev*, 2015, 42: 1305–1325
- 14 Kuravi S, Trahan J, Goswami D Y, et al. Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants. *Prog Energy Comb Sci*, 2013, 39: 285–319
- 15 Xu J, Wang R Z, Li Y. A review of available technologies for seasonal thermal energy storage. *Sol Energy*, 2014, 103: 610–638
- 16 IEA-ETSAP and IRENA. Thermal energy storage. Technology Brief E17, Bonn, 2013
- 17 Wentworth W E, Chen E. Simple thermal decomposition reactions for storage of solar thermal energy. *Sol Energy*, 1976, 18: 205–214
- 18 Aihara M, Nagai T, Matsushita J, et al. Development of porous solid reactant for thermal-energy storage and temperature upgrade using carbonation/decarbonation reaction. *Appl Energy*, 2001, 69: 225–238
- 19 Felderhoff M, Bogdanovic B. Review: High temperature metal hydrides as heat storage materials for solar and related applications. *Int J Mol Sci*, 2009, 10: 325–344
- 20 Kato Y, Takahashi F, Sekiguchi T, et al. Study on medium temperature chemical heat storage using mixed hydroxides. *Int J Refrig*, 2009, 32: 661–666
- 21 Schaub F, Kohzer A, Schutz J, et al. De- and rehydration of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in a reactor with direct heat transfer for thermochemical heat storage. Part A: Experimental results. *Chem Eng Res Des*, 2013, 91: 856–864
- 22 Chubb T A. Analysis of gas dissociation solar thermal power system. *Sol Energy*, 1975, 17: 129–136
- 23 Hoshi A, Mills D R, Bittar A, et al. Screening of high melting point phase change materials (PCM) in solar thermal concentrating technology based on CLFR. *Sol Energy*, 2005, 79: 332–339
- 24 Liu M, Saman W, Bruno F. Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems. *Renew Sust Energy Rev*, 2012, 16: 2118–2132
- 25 Herrmann H, Kearney D W. Survey of thermal energy storage for parabolic trough power plants. *J Sol Energy Eng*, 2002, 124: 145–152
- 26 Geyer M A, Winter C J. Thermal storage for solar power plants. *Sol Power Plants*, 1991, 7: 110–115
- 27 Liu M, Steven T N H, Bell S, et al. Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies. *Renew Sust Energy Rev*, 2016, 53: 1411–1432
- 28 Teller O, Nicolai J P, Lafoz M, et al. Joint EASE/EERA Recommendations for a European Energy Storage Technology Development Roadmap Towards 2030. Brussels: European Association for Storage of Energy and European Energy Research Alliance, 2013

- 29 Tokoro H, Yoshikiyo M, Imoto K, et al. External stimulation-controllable heat-storage ceramics. *Nat Commun*, 2015, 6: 7037
- 30 Bhatt V D, Gohil K. Performance evaluation of solar cooker using some $[N^{+}_{4444}]$ based ionic liquids as thermal energy storage materials. *Adv Mat Lett*, 2013, 4: 277–282
- 31 Zhu J, Bai L, Chen B, et al. Thermodynamic properties of phase change materials based on ionic liquids. *Chem Eng J*, 2009, 147: 58–62
- 32 Chacartegui R, Alovisio A, Ortiz C, et al. Thermochemical energy storage of concentrated solar power by integration of the calcium looping process and a CO_2 power cycle. *Appl Energy*, 2016, 173: 589–605
- 33 Weber R, Kerskes H, Druck H. Development of a combined hot water and sorption store for solar thermal systems. *Energy Procedia*, 2014, 48: 464–473
- 34 Geissbuhler L, Kolman M, Zanganeh G, et al. Analysis of industrial-scale high-temperature combined sensible/latent thermal energy storage. *Appl Therm Eng*, 2016, 101: 657–668

Summary for “储热技术研究进展与趋势”

Advances and prospects in thermal energy storage: A critical review

WANG Xiang, CHEN HaiSheng^{*}, XU YuJie, WANG Liang & HU Shan

Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

^{*}Corresponding author, E-mail: chen_hs@mail.etp.ac.cn

Thermal energy storage is an indispensable technology for adjusting the instability and time discrepancy between supply and demand of energy. It is mainly utilized for intermittent occasion, such as solar energy, variable energy load, and excessive energy that would be wasted rather than effectively utilized if it cannot be stored. Due to their potential for efficiently improving the comprehensive utilization rate of energy, thermal energy storage systems are of growing importance within the energy awareness: solar thermal utilization, peak shaving, industrial energy saving and waste heat recovery, building energy conservation, energy internet construction and so on. Developing efficient and inexpensive thermal energy storage devices is as important as developing new sources of energy, thus, in the past several years the thermal energy storage techniques have attracted a great deal of attention from both fundamental research and technological applications. Usually, there are three different mechanisms for thermal energy storage techniques: the sensible heat storage, the latent heat storage and the thermochemical heat storage. The scope of this review is to give an overview and further analysis on the research which has been done on these three kinds of thermal energy storage techniques, and this review will be beneficial for the researchers and engineers to develop more efficient and optimized thermal energy storage systems.

On the one hand, the research trends of three kinds of thermal energy storage techniques from 2000 to 2015 are carefully analyzed in the present review by using the statistics functions within the Web of Science Platform managed by Thomson Reuters. The statistics results show that according to the trends on paper numbers of each thermal energy storage techniques within the whole statistics period, the latent heat storage currently can be concluded as the most popular thermal energy storage technique in terms of fundamental research, the sensible heat storage is classified as least concern because main sensible heat storage systems so far have been almost matured, and the thermochemical heat storage is attracting more and more attention from researchers. On the other hand, the main technical characteristics (such as, energy storage density, energy storage scale, energy storage period, energy storage cost, advantages of technology, disadvantages of technology, future research focus, technology maturity and so on) of three kinds of thermal energy storage techniques are systematically compared in the present review on the basis of summarizing the previous related research work, and the final compared results reveal that because the key features for each thermal energy storage technology are totally different, the selection and extension of application fields for one thermal energy storage technique cannot move forward without a full consideration of its own technical characteristics. Finally, the latest progress on the development of thermal energy storage technologies is further discussed. The technical principles of the recently developed novel thermal energy storage concepts, mainly including of new latent heat storage materials represented by heat-storage ceramics and ionic liquids, the calcium based high temperature thermochemical heat storage systems and hybrid thermal energy storage systems, are introduced in detail, moreover, the technical potential and future outlook of these new thermal energy storage concepts are also addressed.

thermal energy storage, sensible heat, latent heat, thermochemical heat

doi: 10.1360/N972016-00663