

· 专题一:双清论坛“分布式能源中的基础科学问题”·

## 分布式能源系统中能量的高效存储\*

何雅玲\*\* 严俊杰 杨卫卫 李印实 陶于兵

西安交通大学 能源与动力工程学院,西安 710049

**[摘要]** 分布式能源是能源革命的重要载体和推进手段,也是未来能源体系中的重要组成部分。储能技术作为分布式能源系统的关键支撑技术之一,会对能源生产和消费方式带来革命性的变化,对我国的能源转型具有重要的战略意义。目前我国储能技术发展迅速,大型示范和商业化储能项目不断增加,但是各种储能技术在实际应用过程中还存在着种种缺陷和不足,能源的高效存储面临着诸多挑战。本文立足于储能技术的实际应用,分析了各储能技术尤其是储热技术的优缺点及产业化发展现状,探讨了储能技术未来可能的发展趋势和面临的挑战,分析了储热技术中存在的关键科学问题及研究现状,并针对储能技术与行业的发展给出了一些政策性建议。

**[关键词]** 分布式能源;储能技术;储热性能强化;性能预测与设计;多尺度动态响应

### 1 分布式能源及储能系统的战略意义

目前全球能源生产和利用格局正在发生深刻的历史性变革,能源低碳化利用、可再生能源为主体能源以及多能互补的能源体系成为各国重点发展和攻关方向。据预测,至2040年可再生能源在一次能源中的占比将由目前的4%增加至约15%<sup>[1]</sup>。以天然气和可再生能源为主要能量来源的分布式能源系统,将冷、热、电系统以小规模、模块化、分散式的方式布置在用户附近,可独立地输出冷、热、电能(如图1所示),该能源系统具有以下优点:直接面向当地用户需求、供能系统为中小容量、包含多种能源输入形式、满足用户多种能量需求。分布式能源系统是对集中式供能系统的有力补充,同时为能源的综合梯级利用<sup>[2]</sup>提供了可能,实现了能量利用率的提高,也为可再生能源的利用开辟了新的方向,在能源体系中占据重要地位。

为在此次能源革命中取得领先地位,我国的能源供给结构也在迅速调整。按照《能源发展“十三五”规划》,到2020年底,我国的风电、气电、分布式光伏与生物质发电等分布式能源的装机容量需达3.95亿kW,占总装机容量的19.6%<sup>[3]</sup>。可见,可再



何雅玲 西安交通大学教授,中国科学院院士,现任十九届中央委员会候补委员,西安交通大学学术委员会主任,教育部高等学校能源动力类专业教指委主任,国务院学位委员会学科评议组成员,国家自然科学基金委员会工程与材料科学部咨询委员会委员,教育部科技委学部委员,中国制冷学会副理事长,中国动力学会副理事长等。

长期从事能源的高效利用及节能理论与新方法、太阳能利用、储能新技术、航天航空中的热流科学问题等方面的研究,发表学术论文500余篇,中英文著作及教材12部,论著被引20800余次。获何梁何利科学与技术进步奖,国家自然科学基金二等奖2项,国家技术发明二等奖1项,国家科学技术进步奖一等奖—创新团队奖1项,省部级科技一等奖3项。

生能源在分布式能源系统中占据重要地位。然而,太阳能、风能等可再生能源具有波动性和间歇性,为分布式能源系统的稳定与可靠运行带来了严峻挑战。同时,用户侧对能源的需求也随时段呈现一定的变化规律,需求侧与供给侧不同的波动状态引起强烈的能源供需不匹配。如图1所示的太阳能分布式热、电、冷联供系统,随着太阳辐射能随时间、天气、季节等因素的变化,能源供给侧会发生显著变化,造成发电环节不能连续稳定发电、供热/冷环节也不能连续稳定输出,在用户侧需要电能、热/冷能

收稿日期:2020-04-06;修回日期:2020-05-21

\* 本文根据第233期“双清论坛”讨论的内容整理。

\*\* 通信作者,Email:yalinghe@mail.xjtu.edu.cn



不同的储能技术在储能时间和功率方面各有差异。图3所示的是各类储能技术的储能时间及功率范围。电化学储能技术既包括应用较成熟的锂电池技术和铅酸电池技术,也包括液流电池和钠硫电池等新兴技术,不一而足。其中,截至2019年底<sup>[4]</sup>,锂离子电池累计装机规模达到7193 MW,占已投运电化学储能装机总容量的87.3%,但其目前仍存在能量密度低、循环寿命短和安全性差等问题,严重制约了锂电池的应用;铅酸电池的优点在于它的价格相对便宜,技术成熟,应用份额也比较高,迄今已投运装机容量为412 MW,占已投运电化学储能装机总容量的5%;液流电池与钠硫电池,作为新兴和高效的大容量电力储能电池,目前装机量占比分别为1.0%和6.2%,在规模较大的分布式发电和微网系统中有一定的应用前景。

此外,压缩空气储能和飞轮储能等机械能存储方式也有其独特的应用领域。目前已有部分压缩空气储能电站(如德国Huntorf CAES电站和美国McIntosh CAES电站)投入了商业运行。而飞轮储能作为一种可以进行快速调频的储能方式,适用于启动时间要求较高的快速调频领域,如电力调频、高铁和地铁的制动能量回收等。截至2019年底<sup>[4]</sup>,全球已投入运行的压缩空气储能电站和飞轮储能电站的装机容量,均占总储能装机容量的0.2%左右,约为366 MW。

与电化学和机械能存储技术相比,热能存储技术使用寿命更长、成本更低,在分布式能源利用系统中,将富余能源以热能的形式存储,比电能存储更加安全可靠,具有推广潜力。不仅如此,储热技术还具有更广阔的应用空间,根据国际权威顶级期刊*Science*报告,全球90%以上的能量以热能为最终形式被利用。同时国际能源署(IEA)指出<sup>[6]</sup>,目前热

能是占比最大的终端用能形式,家庭、工业或其他用途等的供热耗能占了总能量消耗的50%。因此,热能存储在未来的分布式能源系统乃至全社会的能源利用领域中起着至关重要的作用,故接下来着重介绍热能存储技术的发展趋势。

### 3 储热技术的发展趋势

按照热能存储形式的不同,可以将储热技术分为显热储热、潜热储热和热化学储热。其中,显热储热的储热能力较小,但系统简单、成本较低、技术最成熟,已得到广泛应用;潜热储热的储热能力较大,但受制于材料选择、系统复杂性和成本,目前仍处于实验室研究和中试阶段;热化学储热的储热能力很大,但技术同样尚不成熟,仍处于实验室研究阶段。

随着可再生能源比例的不断增加,分布式能源系统对新型储热材料与高效储热装置的需求日益突出,同时储热技术也呈现出多元化发展态势。在显热储热方面,主要有固体显热储热和液体显热储热技术。固体显热储热技术采用固体储热材料,如固体镁砖、混凝土、岩石、天然土壤、陶瓷材料、金属材料、无机盐复合材料等作为储热介质。该技术优点在于运行温度范围广、无腐蚀性、无冻结隐患以及成本低廉,在分布式能源中的主要应用形式有固体储热电锅炉、混凝土储热系统、填充床储热器等。其中,固体镁砖储热技术已经在储热电锅炉等清洁供暖、峰谷电消纳领域得到了广泛应用;混凝土储热储热系统,由于价格低廉,受到了广泛关注,逐渐得到应用。但在实际应用中,混凝土储热技术还存在由热应力导致的储热体开裂、力学性能差等问题,尚未进行大规模商业化应用。美国桑地亚国家实验室、德国宇航局以及EnergyNest等科研机构和公司针对混凝土储热装置进行了大量的研发投入。西安交通大学储热研发团队,研发出高效混凝土固体储热器(图4所示),与思安新能源股份有限公司合作,开发了5 MWh混凝土储热系统并与3000 m<sup>2</sup>槽式聚光集热系统结合,储放热效率达93%。该系统与仅用电锅炉相比,年运行费用节省40%,实现了国内首例用于农业供能的混凝土储热系统。

液体显热储热技术使用液体材料进行储热,如高温熔盐(硝酸盐等)、导热油以及水等作为储热介质,具有储放热效率高、结构简单、运行方便、使用寿命长等优点,其在能源枢纽中的应用主要以熔盐储热为主。熔盐储热技术,不仅有助于促进清洁供暖

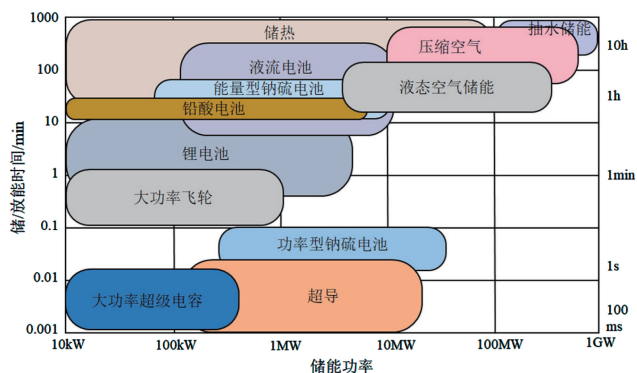
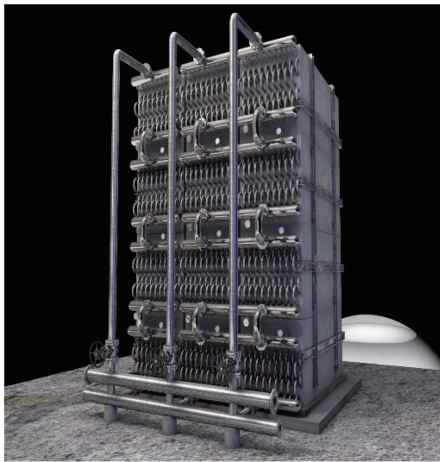


图3 各类储能技术的储能时间及功率范围<sup>[5]</sup>





(a) 混凝土固体储热器内部结构



(b) 混凝土固体储热器实物

图 4 西安交通大学储热研发团队研发的混凝土储热器

的实现,同时也可以应用于太阳能热发电,可弥补太阳能的不稳定性,使电力平稳输出<sup>[7,8]</sup>。目前,配备熔盐储热的太阳能热发电技术已逐步进入商业化运行阶段。2016年9月,国家能源局正式发布了20个中国首批光热发电示范项目名单,总装机容量约1.35GW,所有项目均配备大容量的储热装置,主要形式是双罐熔盐储热。此外,熔盐储热供热技术利用谷电或难以消纳的风电光电加热熔盐,以进行全天供热,不仅可实现风电光电的就地消纳和电力削峰填谷,还可以实现低价清洁供暖,有效降低我国北方地区供暖季节出现雾霾天气的频率和严重性。现阶段我国已开展了熔盐储热清洁供热技术示范项目的应用。

潜热储热利用储热材料在发生相变时吸收和释放的潜热进行热能的存储与释放,也称为相变储热

技术。其中,太阳能相变储热装置已在能源枢纽中得到一定应用,主要是用于扩展热能存储,以弥补正常电能的供需缺口。利用相变储热技术进行太阳能发电可降低发电成本,提高发电的有效性,实现高效满负荷运行,具有可调度性高、年利用率高、电力输出更平稳等优点。主要的固液相变储热材料有有机物、无机物、金属等。与双罐熔盐系统相比,由于相变储热器储热密度更大,需要的熔盐更少,有望使得总储热成本降低12%~64%<sup>[9]</sup>。然而,相变储热介质与容器的相容性较差,且相变材料价格高,大多数相变材料并不具备理想储热介质的热物性,因此,相变储热的研究主要集中在研究和开发新的储热介质,提高现有储热介质的性能。目前,固液相变储热技术处于中试阶段,尚未进行大规模商业化应用,未来有望应用于电力调峰、工业热能回收利用和清洁供暖等领域。

热化学储热技术通过化学反应将热能与化学能进行相互转化,从而实现热能的存储与释放。其优点是储热密度大,约为显热储能的10倍及潜热储能的5倍,同时对体积要求低,适用于结构紧凑的装置与设备,不仅可几乎无热损失地长期储存热能,而且可以实现热、冷的负荷存储。根据储热原理的不同,可将热化学储热技术主要分为浓度差热存储、化学吸附/吸收存储和化学反应存储三种。其中,浓度差热存储是利用酸碱盐溶液的浓度变化来实现热能的存储与释放,其结合太阳能集热系统在分布式能源系统中可用于满足建筑物冬季采暖需求;化学吸附热存储是利用吸附剂和吸附质的吸附和解吸过程来实现热能的存储与释放,主要用于低品位热能的回收利用和太阳能的跨季节存储等;化学反应热存储包括甲烷重整体系、氨分解体系、金属氢氧化物体系等。然而,热化学储热系统存在反应过程难以控制、储放热过程热损失较大、技术复杂、一次性投资大以及整体效率不高等缺点,目前仍处于储热介质基础测试和原理样机验证的研究阶段。

储能技术作为分布式能源系统的关键支撑技术,可以提高分布式能源系统稳定性和可再生能源的消纳水平。在现阶段,多种储能技术并存,各类技术都有各自的优势和不可避免的缺陷。在未来发展中,储能技术多元化的发展格局将会继续。同时安全性好、循环寿命高、成本低、效率高、易回收的要求将是未来储能技术的共同追求。

#### 4 分布式能源中储热技术的关键科学问题

储热系统是分布式能源高效运行、实现能量综



合梯级利用的关键环节。而影响储热系统性能的关键因素,包括三个方面:(1) 储热材料方面,具有高储热密度、高传热性能,便于减小设备体积、降低成本;(2) 储热器设计方面,具有高热量储存和释放速率,便于实现热量的快速存储和释放,满足分布式能源系统高灵活性的需求;(3) 储热系统优化方面,储热系统必须能与供能及用能侧合理匹配,实现能量的高品质梯级利用。因此,高效储热技术,必须具备高储热密度、高储热速率和高储热品质。但是,目前从储热材料、储热器结构和储热系统等方面来看,还存在诸多待解决的关键问题<sup>[10, 11]</sup>:(1) 在储热材料方面,储热材料导热性能差,储热密度有待提升,同时影响储热材料性能的因素较多,性能预测难,调控效果差;(2) 在储热器结构方面,目前储热装置多为简单套管式结构,结构单一,传热性能差,同时储放热过程存在着强烈的非线性特征,导致性能预测困难,设计难度大;(3) 在储热系统与电侧耦合方面,微网电力系统的电力响应通常为毫秒级瞬态响应,储热系统的热力响应通常为分钟级延迟响应,不同量级的时间常数使得实时微网负荷下储热系统的动态响应特性更加复杂。

因此,围绕以上三方面问题的解决,在储热理论、技术研究以及应用中,还存在以下理论和技术难点:(1) 如何在保证材料储热密度的条件下,提高材料的导热性能,并进一步准确预测材料性能,指导性调控技术;(2) 如何实现传储热过程的高速率和高效率;(3) 如何对储热器性能准确预测与设计;(4) 如何基于储能系统在大负荷变工况条件下的动态响应特性,提出具有最小热惯性的变工况控制方法。

针对以上理论和技术难点,下面拟从储热材料性能强化及机理、储热过程性能强化机制、储热器系统性能预测与设计方法、实时负荷下储热系统的多尺度动态响应等四个方面展开讨论。

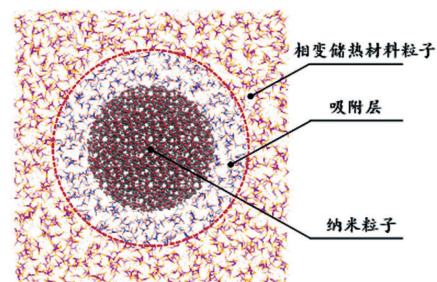
#### 4.1 储热材料性能强化及机理

开发高效储热材料是提高储热系统性能的基础。相变储热材料具有较高的储热密度,有望在未来实现大规模应用。然而,由于相变储热材料的导热系数较低,导致储热器储放热速率较低,难以得到推广应用。提高储热材料导热性能的常用方法有纵向翅片、环形翅片、仿生学翅片、石墨夹层等。常用的这些强化方法不可避免地会引起储热体体积增大、成本增加等问题,因此亟需提出高效、低成本的储热材料强化措施。在储热材料中添加极少量的纳米材料可以大幅提高储热材料的热物性,其强化机

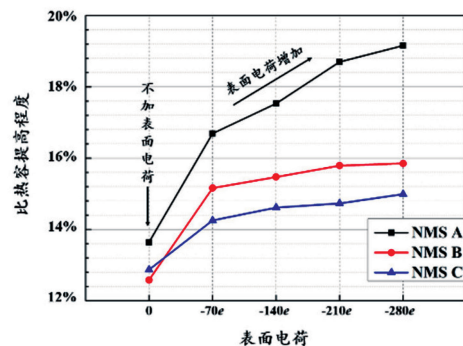
制为:纳米材料和储热材料通过载能微粒之间产生的耦合作用,形成了特殊的微观结构。这些特殊微观结构对储热材料导热系数与比热容的提高具有重要的促进作用。然而纳米复合储热材料要想得到大规模高效利用,必须进一步解决三个方面的挑战:材料制备、机理探究及热物性准确预测。

在材料制备方面,通过不断地优化筛选,获得了最优的纳米材料和分散剂材料,制备出性能稳定的纳米复合相变材料。通过形成导热链路,以提高导热系数;通过使材料具有高表面能,以提高比热容;通过对纳米复合储热材料进行酸化或碱化处理,以调节纳米材料表面的荷电性能,使相变材料粒子在纳米材料表面形成吸附层,并加强吸附层内离子的不均匀分布(图 5(a)所示),以进一步提高复合材料的储热能力。图 5(b)给出了不同相变材料的比定压热容随添加纳米材料表面电荷的变化趋势,可以看出随着纳米材料核电性能的加强,储热材料的比定压热容得到了一定程度的提高。

在储热材料性能预测方面,实际工程应用时,准确、经济和快速地获得储热材料物性十分必要,单纯依靠理论计算或实验测试的方法存在精度低、耗时长、过程繁琐等问题,不能满足实际工程的需求。为此,我们尝试结合理论和实验,通过建立新型导热系数半经验模型,借助极少量的实验数据来快速、准确



(a) 纳米材料表面形成吸附层



(b) 纳米材料改性对比定压热容提升效果

图 5 纳米复合相变储热材料改性效果<sup>[12]</sup>

地预测纳米复合储热材料导热系数。具体实施思路是基于吸附层理论,引入新的吸附层导热系数分布曲线(图 6(a)),并使用吸附层厚度来反映多个变量对导热系数的影响;同时利用有关实验数据与理论模型,获得吸附层厚度与纳米粒子浓度、纳米颗粒粒径及温度的经验关系式<sup>[13]</sup>。图 6(b)给出了部分预测结果与实验结果的对比,可以看出提出的导热系数计算模型预测精度较高,能够实现纳米复合储热材料导热系数的快速准确预测,满足实际工程运用中高效精准设计的需求。

#### 4.2 储热过程性能强化机制

高效储热材料是提高储热系统性能的基础,而储热设备的结构改进是提高储热性能的关键,可以从添加多孔介质、相变储热球等方面强化储热过程。在相变储热装置单元中添加具有高导热系数的多孔介质是提升储热装置储热性能的一种有效方法。然而由于多孔介质成本较高,需要对多孔结构的布置方法进行优化,以提高多孔材料的利用率。在此方面,我们构建出了综合考虑了储热速率、储热成本与储热密度、经济性的统一评价方法,并依据该评价指标,优化了多孔结构的材料种类、填充位置和填充含

量<sup>[14]</sup>,获得了储热器中填充多孔结构的最佳布置。

另外,单罐填充床式储热器与现在常用的双罐储热器相比,具有较高的储热密度、较小的储热罐体积,储热成本可以降低 30%~50%,同时,将储热材料替换为相变材料后,储放热过程近似等温,可以提高发电系统稳定性。然而,在填充床储热器中,冷热流体交界区域会形成温度斜温层,降低了储热器的储热效率。因此,减小斜温层的厚度和影响是非常重要的。我们根据斜温层厚度的发展规律,从减薄斜温层的角度出发,提出新型多层填料结构,实现了提高填充床储热器的储热量和储热效率的目的<sup>[15]</sup>。进一步地,为提高填充床储热器储热密度和储热速率,开发了高温相变填充床储热器。我们从高温相变储热球的制造、填充床储热器的结构设计等方面开展了研发。首先,制备了适用于高温储热环境的相变储热球,同时搭建高温熔盐相变储热实验平台;其次,应用所提出的储热综合性能定量评价经济性指标,指导双层相变填充床结构的优选,获得了最优的球径布置方案;最后,据此设计、加工完成了不同球径的储热球(图 7)以及变球径填充床储热器(如图 8)的研制,使得换热流体与储热球换热更充分,改善了填充床内换热不均匀的问题,保障了高储热速率及储热密度<sup>[16]</sup>。

#### 4.3 储热器系统性能预测与设计方法

为了指导高效储热器的设计,有必要实现相变储热单元传热特性的快速、准确预测。然而,储热器性能预测面临诸多困难:如动态特性、强非线性、影响因素众多等,亟需简单、快速、准确的储热器储热性能预测方法。针对此问题,可以从时均换热系数、储热效能评图及其关联式等方面对预测方法进行改进。

目前研究大多采用了线性假设,与实际有所偏离。针对此问题,我们提出了利用更准确且更具普

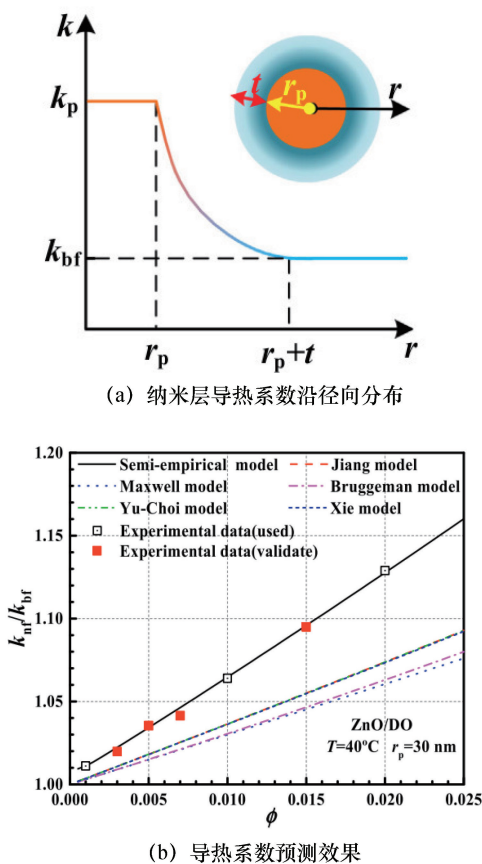


图 6 纳米复合材料导热系数预测<sup>[13]</sup>

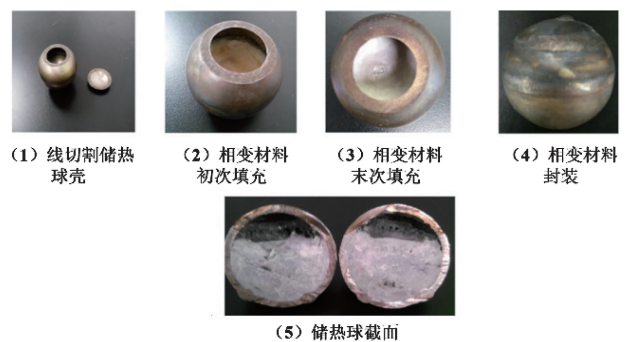


图 7 耐高温高储热密度相变胶囊储热球<sup>[16]</sup>



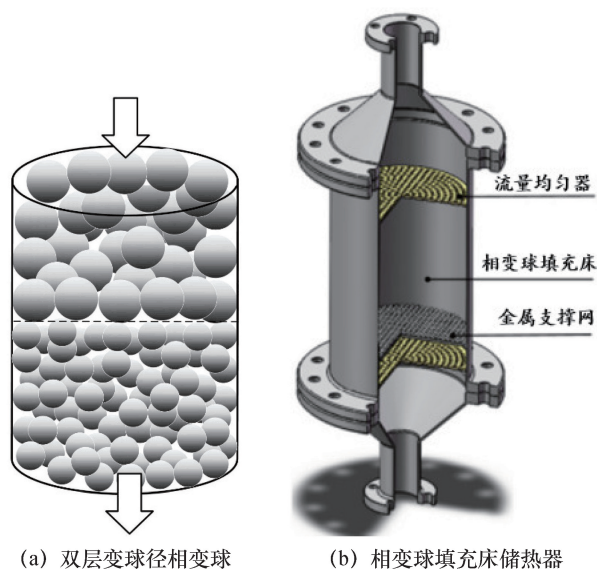


图8 双层变球径相变球填充床储热器<sup>[16]</sup>

适性的时均换热系数计算储热器动态性能的预测方法<sup>[17]</sup>。具体思路为:通过构建“半分析半数值”关联式,结合非线性半分析方法,将相变问题进行简化,利用解析解计算基准时均换热系数,使其能够体现相变储热过程的非线性特性,确定相变侧的时均换热系数;然后,利用时均换热系数公式针对相变储热器的尺寸进行设计。

在另一方面,可以通过建立通用效能关联式的方式,利用无量纲参数的计算,以达到快速计算获得填充床储热器储热效能的目的,同时也可以为提高储热效能提供改进方案。根据此思路,我们根据填充床储热器的传热、流动控制方程,总结出了填充床储热器储热性能的关键无量纲参数;然后,以关键无量纲参数为基准设计参数,进行了大量的模拟计算;最后根据计算结果,得到了共性、普适性强的填充床储热器效能关联式和储热效能评价图<sup>[18]</sup>(参见图9所示),以供工程实际使用。

#### 4.4 实时负荷下储热系统的多尺度动态响应

由于用户负荷的随机性以及新能源的间歇性,分布式能源负荷具有强烈的多变性和动态性,使得储热系统也一直在动态变工况条件下运行。然而,分布式能源系统的电力响应通常为毫秒级瞬态响应,储热系统的热力响应通常为分钟级延迟响应。不同量级的时间常数使得储热系统在分布式能源实时负荷下的动态响应特性更加复杂。有效解决该问题的可行方案之一是建立储热系统和分布式能源相耦合的多尺度动态响应模型,深入分析分布式能源下储热系统的多尺度动态响应特性。因此,可从以

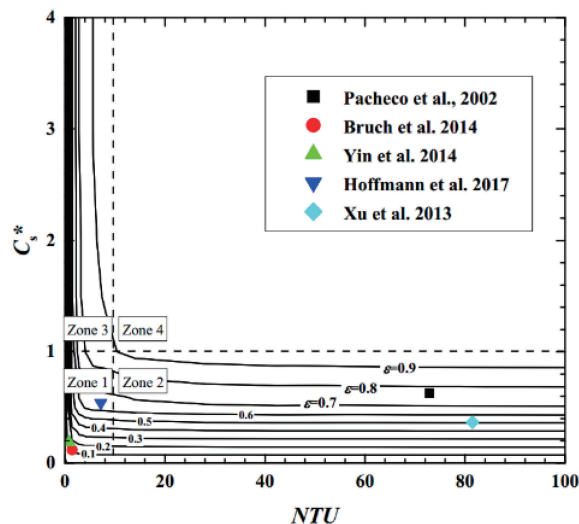


图9 填充床储热器储热效能评价图<sup>[18]</sup>

下几方面展开研究:首先,结合材料学、传热学、流体力学等学科,建立从储热材料到关键部件,再到整个储热系统的热学动态模型,深入分析储热系统热力学参数和结构参数对储热系统效率、储热密度、成本等性能参数的动态影响规律;其次,结合分布式能源负荷预测算法等潮流分析算法等,建立热侧分钟级和分布式能源毫秒级相耦合的实时分布式能源负荷下储热系统的动态响应模型,探究变负荷、变参数条件下储热系统储热速率、动态储热效率等性能参数的动态响应规律,获得实时分布式能源负荷下储热系统的多尺度、全工况动态响应特性;最后,构建以高效性、经济性和灵活性为目标,综合考虑响应速度、储热速率、储热效率、储热成本与储热密度的储热系统性能评价方法,为分布式能源储热系统的选型、设计和优化提供理论指导。

## 5 促进储能技术与行业发展的若干建议

为促进储能技术在分布式能源系统中的进一步发展和应用,推进能源结构变革,提出以下建议:

(1) 储能技术在分布式能源系统中具有重要的地位,应以需求为导向,根据不同负荷应用情景及相关领域的实际需求(例如:工业节能、家庭储能等)发展相适应的储能系统;安全性好、循环寿命高、成本低、效率高、易回收是储能技术发展的总体目标。

(2) 针对现在能源互联网的快速发展,亟需研究大容量、响应速度快、稳定性高、具备随时启动能力的储能系统,提升系统供电安全性。同时增强对能源互联网的信息收集、整理、分析能力,发展基于



能源互联网大数据的人工智能,对包含储能系统的能源互联网进行管理与调控,保障能量的有序化生产、存储和利用。

(3) 在技术研究方面,深入储能材料制备、器件设计制造到系统集成的全产业链技术研究。在材料层面,促进良好导热系数和储热密度、高稳定性纳米复合储热材料的机理探究、预测方法和实际产品开发;在器件设计与制造层面,提出具有高储放热性能的储放热器件结构及其设计方法,同时改进制造工艺;在系统调控层面,针对太阳能、风能等可再生能源消纳、电网侧辅助服务、清洁供暖、分布式能源等不同领域的储能需求,根据储能密度、储能容量、响应时间等不同的储能特性,灵活选用适宜的储能方式,设计出满足不同储能需求的储能系统及其统筹协调调控方式。

(4) 在产业推进方面,完善电力市场化交易机制和峰谷电价政策、引导储能补贴政策,制定储能上网标准。同时完善储能参与电力需求响应和电力辅助服务获取奖励机制,以回收成本及提升经济效益。

### 参 考 文 献

- [1] BP plc. BP energy outlook; 2019 edition. London: BP plc, 2019.
- [2] 吴仲华. 能的梯级利用与燃气轮机总能系统. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [3] 能源发展“十三五”规划. 北京: 国家发展与改革委员会, 2016.
- [4] 中关村储能产业技术联盟. 全球储能数据库. [http://esresearch.com.cn/#/global\\_PDB/introduce](http://esresearch.com.cn/#/global_PDB/introduce), 2020-02-16.
- [5] 丁玉龙, 来小康, 陈海生. 储能技术及应用. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [6] International energy agency. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/heating>, 2020-02-16.
- [7] He YL, Wang K, Qiu Y, et al. Review of the solar flux distribution in concentrated solar power: non-uniform features, challenges, and solutions. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 149: 448—474.
- [8] He YL, Qiu Y, Wang K, et al. Perspective of concentrating solar power. *Energy*, 2020, 198: 117373.
- [9] Raud R, Cholette ME, Riahi S, et al. Design optimization method for tube and fin latent heat storage systems. *Energy*, 2017, 134: 585—594.
- [10] 何雅玲. 分布式能源系统中能量的高效存储. 国家自然科学基金委员会双清论坛第233期《分布式能源中的基础科学问题》主题报告, 2019. 5. 6—8, 东莞.
- [11] Tao YB, He YL. A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 93: 245—259.
- [12] Yuan F, Li MJ, Qiu Y, et al. Specific heat capacity improvement of molten salt for solar energy applications using charged single-walled carbon nanotubes. *Applied Energy*, 2019, 250: 1481—1490.
- [13] Li MJ, Li MJ, He YL, et al. A novel semi-empirical model on predicting the thermal conductivity of diathermic oil-based nanofluid for solar thermal application. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 138: 1002—1013.
- [14] Xu Y, Ren Q, Zheng Z J, et al. Evaluation and optimization of melting performance for a latent heat thermal energy storage unit partially filled with porous media. *Applied Energy*, 2017, 193: 84—95.
- [15] Li MJ, Qiu Y, Li MJ. Cyclic thermal performance analysis of a traditional Single-Layered and of a novel Multi-Layered Packed-Bed molten salt Thermocline Tank. *Renewable Energy*, 2018, 118: 565—578.
- [16] Li MJ, Jin B, Ma Z, et al. Experimental and numerical study on the performance of a new high-temperature packed-bed thermal energy storage system with macroencapsulation of molten salt phase change material. *Applied Energy*, 2018, 221: 1—15.
- [17] Xu Y, Zheng ZJ, Li MJ. A half-analytical correlation of total melting time for shell-and-tube latent-heat thermal energy storage unit. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 161: 114176.
- [18] Ma Z, Li MJ, Yang WW, et al. General performance evaluation charts and effectiveness correlations for the design of thermocline heat storage system. *Chemical Engineering Science*, 2018, 185: 105—115.

## High Efficient Energy Storage in Distributed Energy System

He Yaling\* Yan Junjie Yang Weiwei Li Yinshi Tao Yubing

*School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049*

**Abstract** Distributed energy system is the important carrier and promotion method of the energy

\* Corresponding Author, Email: yalinghe@mail.xjtu.edu.cn

revolution. It is also an important part of the future energy system. As the key supporting technology of distributed energy systems, energy storage technology will bring revolutionary changes to energy production and consumption, and has important strategic significance of China's energy transformation. At present, with the rapid development of China's energy storage technology, large-scale demonstration and commercial energy storage projects continue to increase. However there are still various defects and deficiencies in the practical application of energy storage technology. Based on the practical application of energy storage technology, advantages and disadvantages of each energy storage technology were analyzed primarily, especially that of the heat storage technology in the distributed energy supply system. Secondly, the potential development trend and challenges of energy storage technology in the future were discussed. Moreover, the key scientific problems in the heat storage technology were analyzed. Recommendations on the development of energy storage technology and industry policy were provided finally.

**Keywords** distributed energy system; energy storage technology; heat storage technology enhancement; performance prediction and design; multi-scale dynamic response

(责任编辑 张强)

· 成果快报 ·

## 我国学者在超强高韧金属材料研究领域取得新进展

在国家自然科学基金项目(批准号:U1764252)等资助下,由香港大学机械工程系黄明欣教授和美国劳伦斯伯克利国家实验室罗伯特·里奇(Robert O. Ritchie)教授领导的科研团队提出了“高屈服强度诱发晶界分层开裂增韧”的新机理,突破了超高强钢的屈服强度—韧性极限。研究成果以“晶界分层增韧超高强钢(Making Ultrastrong Steel Tough by Grain-Boundary Delamination)”为题,于2020年5月8日在《科学》(*Science*)上在线发表。论文链接:<https://science.sciencemag.org/content/early/2020/05/06/science.aba9413>。

为满足可持续性发展的要求,工业界一直致力于开发低成本、轻质且具有超强高韧的新型结构材料。然而,材料的强度和韧性往往是鱼与熊掌的关系,两者不可兼得。材料强度的提升往往会降低其韧性,导致材料脆性增加。因此,发展超高强度兼具优良韧性的结构材料,一直是材料科学家及工程师试图解决的难题。尤其是当屈服强度进入2 GPa的超高范围时,进一步改善材料韧性的难度成倍增加。

最近,科研团队获得了同时具备极高屈服强度( $\sim 2$  GPa)、极佳韧性( $102 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )以及良好延展性(19%的均匀延伸率)的低成本变形分配钢(D&P钢)。对比现有航空航天用马氏体时效钢(例如Grade300,其屈服强度和裂纹萌生断裂韧性分别是1.8 GPa和 $70 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ),超强高韧D&P钢以较低的原材料成本实现了强度与韧性双提升。同时团队开创性地提出高屈服强度诱发晶界分层开裂增韧新机制。研究表明,通过简单轧制与热处理,D&P钢获得了独特的两相层状组织结构。D&P钢超高的屈服强度诱发锰元素富集的原奥氏体晶界在垂直于主裂纹面的方向上启动分层裂纹。原奥氏体晶界分层开裂之后,原本的平面应变断裂转变成一系列沿样品厚度方向的平面应力断裂,从而极大地提高了D&P钢的断裂韧性。

该研究颠覆了传统的提高强度必然导致断裂韧性降低的观点,为发展超强高韧金属材料提供新的设计思路。

(供稿:工程与材料科学部 郑雁军 邓意达 王之中)