

固体电蓄热装置的研究现状与展望

吴宏展¹ 李文成¹ 孙杰¹ 王一超^{1,2*}

1 河北建筑工程学院，河北 张家口 075000；2 河北省储能供热技术创新中心，河北 张家口 075000

摘要：本文对固体电蓄热装置的研究现状进行梳理，从蓄热材料的、换热载体以及装置结构等方面分析了已有的研究成果，并简要分析了典型固体电蓄热装置的应用效果，为固体电蓄热装置未来的发展指明了方向。

关键词：固体蓄热；电加热；应用现状

Research Status and Prospects of Solid Electric Thermal Storage Devices

Wu,Hongzhan¹ Li,Wencheng¹ Sun,Jie¹ Wang,Yichao^{1,2*}

1Hebei University of Architecture, Zhangjiakou, Hebei, 075000, China

2Hebei Energy Storage Heating Technology Innovation Center, Zhangjiakou, Hebei, 075000, China

Abstract: This paper reviews the current research status of solid electric thermal storage devices, analyzing existing research achievements in terms of thermal storage materials, heat exchange carriers, and device structures. Additionally, it briefly examines the application performance of typical solid electric thermal storage devices, providing insights into future development directions for these systems.

Keywords: Thermal energy storage; Electric heating; Application status

DOI: 10.62639/sspis01.20250204

引言

随着环境问题的日益凸显，能源利用效率提高以及温室气体减排备受关 注^[1]。固体电蓄热装置是一种广泛应用的供热装置，具有促进可再生 能源消纳，移峰填谷等作用，能够有效解决可再生 能源利用过程中弃风弃光、并网困难等问题。 本文主要围绕固体电蓄热装置的材料、换热载体

以及结构的研究现状进行分析，并提出未来的发 展展望。

一、固体电蓄热装置研究现状

（一）装置组成及工作原理

典型固体电蓄热装置的组成部分及工作原理 如图 1 所示。

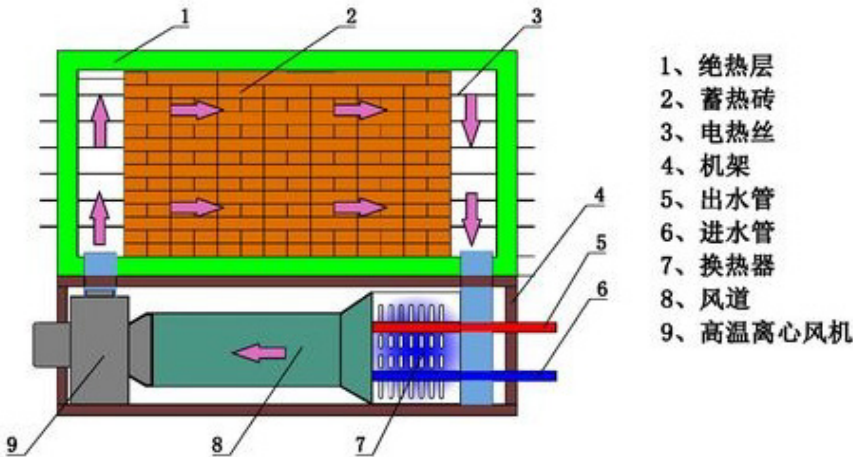


图 1 固体电蓄热装置工作原理图

（稿件编号：IS-25-1-12001）

作者简介：吴宏展（2000-），女，汉，河北衡水人，学士，在读研究生，从事固体蓄热装置特性研究。
李文成（2000-），男，汉，河北唐山人，学士，在读研究生，从事固体蓄热装置特性研究。
孙杰（2001-），女，汉，河北沧州人，学士，在读研究生，从事固体蓄热装置特性研究。
通讯作者：王一超（1988-），男，汉，河北张家口人，硕士，讲师，从事固体蓄热系统优化研究。
基金项目：河北省高等学校科学技术研究项目资助：“固体电蓄热装置多周期性运行性能优化研究”（QN2023076）。
河北建筑工程学院研究生创新基金项目资助：“直接接触式电加热固体蓄热蒸汽发生装置受热面优化研究”（XY2024088）。

固体电蓄热装置主要由绝热层、蓄热砖、电热丝、换热器、风机等部分组成。电加热丝布置在中间开孔的固体蓄热砖中，在电力低谷时段，电加热丝通电发热，热量储存在固体蓄热砖中，在峰电时段，开启风机，蓄热砖里储存的热量被循环风带走，换热后用于热用户供暖。

(二) 固体电蓄热装置研究现状

固体电蓄热供暖技术原理简单，技术成熟，大规模应用前景广阔，然而在实际运行中存在换热效率不高、温度分布不均匀等问题，对此，业内专家学者通过蓄热材料的热工性能分析、系统换热载体的比选以及固体电蓄热装置结构的优化研究，提升了固体电蓄热装置的性能和可靠性。

1. 固体蓄热材料研究现状

固体蓄热材料具有高效存储和释放热能的特点，可以应用在太阳能热利用、电力系统调峰、工业余热回收等领域。尹少武等通过实验与模拟相结合的方式，研究了粉煤灰、氧化镁、刚玉砂、刚玉球等材料的蓄放热特性，分析了蓄热材料种类对蓄放热特性的影响，得到了不同材料的蓄热密度和综合换热系数等关键参数^[2]。赵頔等通过数值模拟的方法，对氧化镁和氧化铝两种材质的砖体进行蓄放热特性研究，验证了氧化镁高效的蓄放热特性^[3]。Wentao L 等使用镁砖、硅砖、固体废物陶瓷砖三种不同的储放热材料来模拟和分析放热情况，结果表明，在 10 小时内硅砖的温度均匀性最好，镁砖次之^[4]。上述研究中的不同蓄热材料的物理特性参数整理如表 1。

表 1：不同蓄热材料的物理特性参数对比表

蓄热材料	密度	比热容	导热系数
单位	kg/m ³	kJ/(kg·℃)	W/(m·K)
粉煤灰	1600	0.92	0.5
氧化镁	2920-3000	0.87-1.12	2.7-10.9
氧化铝	3000	1	2.5
硅砖	3200	0.7	15
固体废物陶瓷砖	2340	1.04	1.51

从表中可以看出，氧化镁砖和硅砖的导热系数较高，蓄热体的传热效果较好，系统运行较稳定。但由于硅砖的制作成本高，因此选用镁砖作为固体蓄热材料的综合性能最好。但从镁砖的使用寿命来看，在高温蓄放热过程中，由于反复蓄放热，其内部结构由于热应力的反复作用而开裂分化，使用寿命受到一定限制^[5]。同时，在高温情况下，易与一些酸性物质发生化学反应，从而出现侵蚀砖体的现象。

2. 固体电蓄热装置换热载体研究现状

固体电蓄热装置的换热载体决定热量传递的效率与稳定性，常采用空气或水。赵雪等以空气为换热载体，通过改变空气正反流向的方式来探究电热丝被烧毁的问题^[6]。胡思科等以空气作为热能传输介质，分析了孔道中气流的温度、流速及换热量随孔道数和时间变化的关系^[7]。吉文丽等通过对以水为换热介质的固体蓄热装置构建负荷延续曲线数学模型，拟合负荷特性曲线，得出以水为换热载体可以提高锅炉加热蓄热的均匀

性、提高换热效率的结论^[8]。众多研究表明，以空气作为换热载体，存在温度分布不均、流动阻力大的问题；以水作为换热载体，存在占地面积大的问题。

导热油沸点高于水，密度大于空气，在节省设备占地面积的同时，还能实现储热温度的大幅提升。然而，导热油的成本相对较高，且在高温环境下存在泄漏和爆炸的风险，这限制了其在某些安全要求较高场合的应用。未来，导热油作为换热介质的研究仍有很大的发展空间，通过改进其稳定性、降低成本以及提高安全性，导热油有望在固体蓄热领域发挥更大的作用。

3. 固体电蓄热装置结构研究现状

蓄热体结构的设计对于提高蓄热效率和温度分布均匀性至关重要。黄新晨等利用数值模拟的方法研究孔隙率对蓄热性能的影响，得出蓄热温度随着孔隙率的增大而增大，蓄热量随着孔隙率的增大而减小的结论^[9]。毕月虹等利用仿真通过改变蓄热砖孔道结构的宽高比来研究蓄热单元的蓄放热特性，得出结论：随着矩形孔道宽高比的增加，蓄热单元的局部高温值越低，温度分布的均匀性越好，放热速度越快^[10]。Mengdong Chen 等通过模拟和实验研究蓄热砖圆形和椭圆形两种结构对固体蓄热装置的储热和放热的影响，得出当横截面积相同时，圆孔砖的传热性能比椭圆孔砖低 20%，椭圆孔的方向对传热性能没有影响的结论^[11]。李婷等研究了蓄热砖排列方式对蓄热体放热特性的影响，得出增加蓄热砖间的风道数量，能够提高蓄热体的放热均匀度^[12]。此外，电热丝的布置方式，蓄热砖的规格，管道的排列方式等因素也对改变固体蓄热装置的结构产生影响。

在设计固体蓄热装置时，关键在于平衡蓄热和放热效率，同时通过采用高性能材料、优化结构设计、实现模块化安装以及引入智能控制系统等措施，来减小装置体积、简化安装过程，并有效降低整体成本，以实现经济高效且易于维护的蓄热解决方案。

二、典型固体电蓄热装置的应用

在经济性方面，固体电蓄热装置充分利用电力峰谷差，降低用电成本；在环保性方面，固体电蓄热装置采主要消纳清洁能源，减少温室气体排放，是绿色、低碳的供暖方式；在高效性方面，蓄热材料储能密度高和热稳定性强，适合长期、大范围应用。基于以上优点，固体电蓄热装置在多个领域和行业得到应用与推广，如：

为解决蒙西地区电力外送不畅的情况，采用 3200kW 的固体电蓄热装置进行供暖，具有显著经济型^[13]。位于崇礼城郊的全球首例 110 千伏直入式蓄热电锅炉一次性用电成功，正式投入使用后，为崇礼城区近 50% 的供热面积清洁供热^[14]。青岛市某项目在选择空调系统的热源时，将市政热力、水蓄热电锅炉、固体电蓄热锅炉进行了经济性比较，最终选用氧化镁固体电蓄热锅炉作为热源^[15]。胡松涛等结合山东国际航运中心项目，

对固体蓄热式电锅炉和高效燃气真空热水锅炉进行了对比, 发现固体蓄热式电锅炉的运行费用更低, 经济性更高, 对电网贡献更大^[16]。

三、结束语

固体电蓄热装置通过其独特的技术优势和应用潜力, 在电力系统和供热领域中扮演着重要角色。本文对近几年中国在固体蓄热装置的蓄热材料、换热载体、结构三方面的研究进行了梳理与分析, 对典型固体电蓄热装置的应用进行了归纳与总结, 得出以下主要结论:

(一) 在固体电蓄热装置中, 电热丝是一个易损耗但又极其重要的材料, 选择电热丝功率时需要综合考虑加热需求、材料特性、工作电压、环境因素、功率因数和热损失等条件。

(二) 在固体电蓄热装置中, 蓄热材料的选择对于换热效率有着显著影响, 应充分考虑其热物理性能。

(三) 在固体电蓄热装置中, 导热油作为一种新的换热介质, 在固体电蓄热技术发展中有巨大的潜力, 有望在未来蓄热技术中发挥更加重要的作用。

(四) 对于固体电蓄热装置结构的研究, 除了改变蓄热砖的孔道结构, 还可以从管道排列方式、蓄热砖大小等多方面进行研究。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴-2023[J]. 中国统计, 2023.
- [2] 尹少武, 韩嘉维, 石永乐, 童莉葛, 王立. 非相变固体蓄热材料的蓄放热特性[J]. 化工进展, 2020, 39(12): 5161-5169.
- [3] 赵頔, 王启民, 王迪, 邱正霖, 徐鹏. 不同固体材料蓄热砖的蓄放热特性分析[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2023, 19(4): 30-33.
- [4] Wentao L, Yanjun J, Yuan L, et al. Heat Release Simulation Research Based on Solid Heat Storage and Release Materials[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2584(1).
- [5] 张承虎, 师熙隆, 朱添奇, 等. 适用于建筑供热蓄热技术的应用与发展[J]. 煤气与热力, 2023, 43(05): 15-19. DOI:10.13608/j.cnki.1000-4416.2023.05.009.
- [6] 赵雪, 罗勇, 韩博远. 新型固体蓄热电加热锅炉的方案研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2021, 34(4): 81-86.
- [7] 胡思科, 邢姣娇. 固体蓄热装置的蓄、放热特性数值模拟分析[J]. 流体机械, 2014, 42(8): 78-83.
- [8] 吉文丽, 侯子维, 张恒, 翟炯, 陈宁洁, 刘蒙, 师涌江. 满足负荷特性的固体蓄热电锅炉功率分配设计研究[J]. 河北建筑工程学院学报, 2023, 41(1): 136-142.
- [9] 黄新晨, 秦勤, 于庆波. 固体电蓄热装置结构优化及蓄放热特性的模拟[J]. 材料与冶金学报, 2021, 20(4): 290-296.
- [10] 毕月虹, 吴娟, 鲁一涵. 固体蓄热砖孔道结构参数对蓄/释热性能的影响[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(05): 543-551.
- [11] Chen M, Kang W, Tan H, et al. Simulation analysis on the influence of airflow channel shape on the thermal storage and release performance of solid heat storage device[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2835(1): 012064-012064.
- [12] 李婷. 固体蓄热装置储能体放热特性研究[D]. 天津商业大学, 2022. DOI:10.27362/d.cnki.gtsxy.2022.000186.
- [13] 秦晨. 蒙西地区固体电蓄热装置供暖应用分析[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(17): 81-85.
- [14] 全球首例 110 千伏直入式固体蓄热电锅炉在崇礼投运[N]. 张家口日报, 2021. 11. 19.
- [15] 高承峰, 刘明. 固体电蓄热技术应用及经济性分析[J]. 暖通空调, 2023, 53(9): 63-67.
- [16] 胡松涛, 宋仁江, 刘光乘, 张浩庭. 固体蓄热式电锅炉在青岛某办公建筑空调系统中的应用[J]. 暖通空调, 2015, 45(12): 25-29.