

文章编号: 1671-6612 (2020) 05-532-06

基于低谷电力利用电锅炉水蓄热的 清洁供暖的实验研究

王 会^{1,2,3} 李建强^{1,2} 杜鹏程³ 梁志龙³

(1.中国科学院过程工程研究所中国科学院绿色过程与工程重点实验室 北京 100190;

2.中国科学院绿色过程制造创新研究院 北京 100190;

3.中科烟台产业技术研究院 烟台 265500)

【摘 要】 清洁供暖是解决能源及环境问题的重要途径之一。以烟台福山区气候特点为背景。通过热负荷计算,对设备进行选型,最后搭建了基于低谷电力利用电锅炉水蓄热的清洁供暖实验系统。该供暖系统采用夜间谷电对水蓄热箱蓄热,白天利用水蓄热箱单独供暖。同时对室内温度、散热器进回水温度以及耗电量情况进行了分析。

【关键词】 清洁供暖;水蓄热;电锅炉;谷电
中图分类号 TK02 文献标识码 A

Experimental Study on Clean Heating System Based on Off-peak Electricity Using Water Storage of Electric Boiler

Wang Hui^{1,2,3} Li Jianqiang^{1,2} Du Pengcheng³ Liang Zhilong³

(1. CAS Key Lab. of Green Process and Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190;

2. Innovation Academy for Green Manufacture, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190;

3. Zhongke Yantai Industrial Technology Research Institute, Yantai, 265500)

【Abstract】 Clean heating is an important way to solve energy consumption and environmental pollution problems. In this paper, the thermal load is calculated, the equipment is selected, and a clean heating experimental system based on the off-peak power using water storage of electric boiler for heat storage is built. The heating system uses the off-peak electricity to heat the water storage bank at night and the water storage bank to heat the water separately during the day. At the same time, the indoor temperature, the temperature of radiator inlet and backwater and the power consumption are analyzed.

【Keywords】 Cleaning heating; Water storage; Electric boiler; Off-peak electricity

基金项目: 中国科学院洁净能源先导科技专项资助 (XDA21070302)

作者简介: 王 会 (1987.3-), 女, 博士研究生, E-mail: wangh@ipe.ac.cn

通讯作者: 李建强 (1975.1-), 男, 博士研究生, 研究员, E-mail: jqli@ipe.ac.cn

收稿日期: 2020-01-13

0 引言

我国北方地区取暖能源以燃煤为主, 燃煤取暖

面积约占总取暖面积的 83%, 年耗约 4 亿吨标准煤, 占一次能源消耗的 9.17%, 其中约二分之一为污染严重的散烧煤^[1]。而电能、天然气、工业余热等清洁能源占比较低。取暖用能结构不合理导致我国北方地区冬季大气污染物排放严重, 并且增加了区域性雾霾爆发的趋势, 严重制约经济发展, 因此迫切需要推进清洁供暖技术^[2]。清洁供暖技术是指利用清洁化燃煤、天然气、电能、工业余热等洁净能源, 通过高效用能、实现低能耗、低碳排放的取暖技术^[3,4]。清洁供暖关系着广大群众能够温暖过冬, 关系着雾霾天气能否得到有效改善, 是一项重要的政治任务、民生任务、紧要任务, 因此需要大幅提升清洁供暖技术的发展, 改善人民群众的居住环境和生活质量^[5]。电供暖作为一种清洁无污染的供暖方式被大力推广使用, 尤其利用低谷电能进行蓄热的供暖方式。因其利用廉价的谷电时段, 启动电锅炉将其产生的热量存储在蓄热装置中; 在非谷电时段, 利用蓄热装置将热量供给用户, 从而减少高峰时段少用电甚至不用电; 因此采用低谷电能蓄热的清洁供暖技术不仅可以有效平衡电网负荷, 还可以解决风光、光电等可再生能源电力的波动性, 促进可再生能源消纳, 同时利用低谷电价政策, 使用户节省供暖运行费用, 所以低谷电能蓄热的清洁供暖技术逐渐成为研究和应用热点^[1]。

蓄热方式通常由显热蓄热、潜热蓄热以及化学蓄热三种方式^[6,7]。其中显热蓄热是指利用材料自身的热容来实现热量的存储与释放^[8]。显热蓄热的材料来源广泛、价格低廉、对环境友好, 因此是研究最早, 利用最广泛, 是目前成熟的蓄热技术。其中最典型的是研究水蓄热清洁供暖技术。麻延等^[9]利用电锅炉高温水蓄热供暖系统为北京建筑质量监督总站供暖。结果表明: 相较于燃气锅炉, 电锅炉高温水蓄热供暖系统运行费用可节省 52%。王坤^[10]以唐山为例, 针对供暖面积 10000m², 比较了利用燃气、地源热泵、市政及水蓄热四种供暖方式的经济效益。结果发现: 水蓄热的综合经济效益较好。在三种蓄热技术中, 热化学蓄热正处于实验阶段, 潜热蓄热技术是目前研究和应用的热点, 相比较而言, 水蓄热供暖技术具有经济效益、技术成熟等优势, 虽然存在蓄热密度较小等缺点, 但是水蓄热技术仍是清洁供暖的主流技术之一。

本文以水蓄热箱为蓄热装置, 利用谷电时段,

采用电锅炉一方面给房间供暖, 另一方面对水蓄热箱蓄热; 非谷电时段, 电锅炉停止运行, 水蓄热箱开启, 给房间供热, 满足房间的供暖需求。本研究从热负荷计算, 到设备选型, 到最后成功搭建基于低谷电力采用电锅炉水蓄热的清洁供暖系统。并分析了室内房间运行温度, 散热器运行状态以及耗电量和水蓄热箱的蓄热时长, 本课题的研究为水蓄热电锅炉清洁供暖技术提供数据参考和理论指导。本研究对进一步实现我国建筑清洁供暖和能源的高效利用具有十分重要的战略意义。

1 实验系统

本实验搭建基于低谷电能水蓄热的清洁供暖系统, 主要包括电锅炉、蓄热箱、补水箱、变频水泵、散热器以及控制系统等。供暖房间为 2 个, 合计供暖面积为 100m², 地点为烟台市福山区。

1.1 实验系统原理

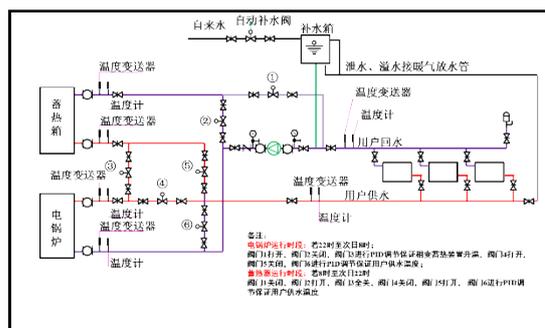


图 1 低谷电能水蓄热供暖系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of heating system



图 2 低谷电能水蓄热供暖系统实物图

Fig.2 Experimental diagram of heating system

图 1 和图 2 分别为低谷电能水蓄热供暖的原理图和实物图。由图 1 可知, 在夜间, 利用低谷电通过电网输送至供暖系统所在地, 电锅炉开启进行制热, 制热过程一边给房间供暖, 一边给蓄热箱内的材料进行蓄热。非低谷电时段, 关闭电锅炉, 利用

蓄热箱中储存的热量为末端用户的散热器提供热源。其流程为：由散热器回水流经蓄热箱，通过热交换带走蓄热箱中的热量并使得散热器回水温度升高，高温水在流经散热器，通过散热器，将热量传热给房间的空气，使得空气温度升高从而维持房间所需的供暖温度。

1.2 热负荷计算

(1) 通过维护结构的基本耗热量计算公式：

$$Q_j = \alpha FK(t_n - t_{wn}) \quad (1)$$

式中： Q_j 为基本耗热量，W； K 为传热系数，W/(m²·°C)； F 为计算传热面积，m²； t_n 为冬季室内设计温度，°C； t_{wn} 为采暖室外计算温度，°C； α 为温差修正系数。

(2) 附加耗热量计算公式：

$$Q = Q_j(1 + \beta_{ch} + \beta_f + \beta_{lang}) \times (1 + \beta_{fg}) \times (1 + \beta_{jian}) \quad (2)$$

式中： Q 为考虑各项附加后，某围护的耗热量，W； Q_j 为某围护的基本耗热量； β_{ch} 为朝向修正； β_f 为风力修正； β_{lang} 为两面外墙修正； β_{fg} 为房高附加； β_{jian} 为间歇附加。

(3) 冷风渗透计算：

$$Q = 0.28 \times C_p \times P_{wn} \times V \times (t_n - t_{wn}) \quad (3)$$

式中： Q 为通过门、窗冷风渗透耗热量，W； C_p 为干空气的定压质量比热容（取值1.0056kJ/(kg·°C)）； P_{wn} 为采暖室外计算温度下的空气密度，kg/m³； V 为渗透冷空气量，m³/h； t_n 为冬季室内设计温度，°C； t_{wn} 为采暖室外计算温度，°C。

①通过门窗缝隙的冷风渗透量计算

$$V = L_0 \times L_1 \times m^b \quad (4)$$

式中： L_0 为在基准高度单纯风压作用下，不考虑朝向修正和内部隔断的情况时，每米门窗缝隙的理论渗透冷空气量，m³/(m·h)。

$$L_0 = \alpha_1 \times (P_{wn} \times V_0^2 / 2)^b \quad (5)$$

式中： α_1 为外门窗缝隙渗风系数，m³/(m·h·Pa^b)，当无实测数据时，可根据建筑外窗空气渗透性能分级标准采用； V_0 为基准高度冬季室外最多方向的平均风速，m/s； L_1 为外门窗缝隙长度，应分别按各朝向计算，m； b 为门窗缝隙渗风指数， $b=0.56 \sim 0.78$ 。当无实测数据时，可取 $b=0.67$ ； m 为风压与热压共同作用下，考虑建筑体型、内部隔断和空气流通因素后，不同朝向、不同高度的门窗冷风渗透

压差综合修正系数。

$$m = C_r \times C_f \times \left(n^{1/b} + C \right) \times C_h \quad (6)$$

式中： C_r 为热压系数； C_f 为风压差系数，当无实测数据时，可取0.7； n 为渗透冷空气量的朝向修正系数； C_h 为高度修正系数。

$$C_h = 0.3 \times h^{0.4} \quad (7)$$

式中： h 为计算门窗的中心线标高； C 为作用于门窗上的有效热压差与有效风压差之比，按下式计算：

$$C = 70 \times (h_z - h) / \left(C_f \times V_0^2 \times h^{0.4} \right) \times \left(t_n' - t_{wn} \right) / \left(273 + t_n' \right) \quad (8)$$

式中： H_z 为单纯热压作用下，建筑物中和界标高，m，可取建筑物总高度的二分之一； t_n' 为建筑物内形成热压作用的竖井计算温度（楼梯间温度），°C。

②忽略热压及室外风速沿房高的递增，只计入风压作用时的渗风量

$$V = \sum (l \times L \times n) \quad (9)$$

式中： L 为房间某朝向上的可启门、窗缝隙的长度，m； L 为每米门窗缝隙的渗风量，m³/(m·h)，见表5.1-7（详见实用供热空调设计手册）； n 为渗风量的朝向修正系数，见表5.1-8（详见实用供热空调设计手册）。

③换气次数法

$$L = K \times V_f \quad (10)$$

式中： L 为房间冷风渗透量，m³/h； K 为换气次数，1/h，见表5.1-13（详见实用供热空调设计手册）； V_f 为房间净体积，m³。

④百分比法计算冷风渗透耗热量

$$Q = Q_0 \times n \quad (11)$$

式中： Q 为通过外门窗冷风渗透耗热量，W； Q_0 为围护结构总耗热量，W； n 为渗透耗热量占围护结构总耗热量的百分率，%。

(4) 外门开启冲入冷风耗热量计算公式：

$$Q = Q_j \times \beta_{kq} \quad (12)$$

式中： Q 为通过外门冷风侵入耗热量，W； Q_j 为某围护的基本耗热量，W； β_{kq} 为外门开启外门开启冲入冷风耗热量附加率；利用天正软件计算出单位平米热负荷指标为58W/m²。

1.3 设备选型

根据上述计算的单位平米热荷指标为 $58\text{W}/\text{m}^2$, 供暖面积为 100m^2 , 因此正常情况下可选择功率 6kW 的电锅炉。因该系统中采用谷电时段将白天所需的热量提前存储起来, 因此也需要同样功率的电锅炉。故此本系统选择电锅炉功率为 12kW ; 蓄热箱定制委托加工尺寸 $1000\text{mm}\times 1000\text{mm}\times 1800\text{mm}$, 箱体净重 416kg ; 水泵选择变频水泵。补水箱尺寸 $500\text{mm}\times 500\text{mm}\times 500\text{mm}$ 。散热器选择 100 片(铜铝复合)。

蓄热箱中水的填充量计算:

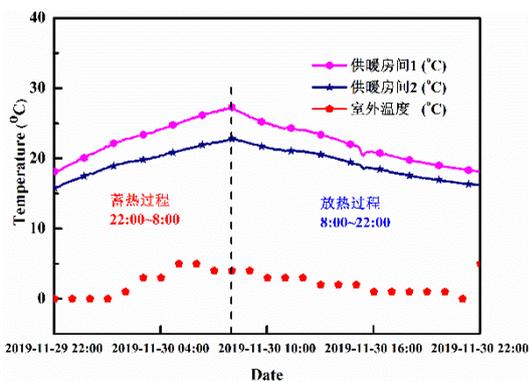
$$C \times m \times \Delta T = 3600 \times W \times t \quad (13)$$

式中: C 为水的比热容, $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$; m 为蓄热箱中水的质量, kg ; ΔT 为蓄热箱水温温差, $^{\circ}\text{C}$, 取值 50 ; W 为电锅炉的功率, kW ; t 为电锅炉谷电时段能运行的时长, h , 取值范围在 $8\sim 14$ 。

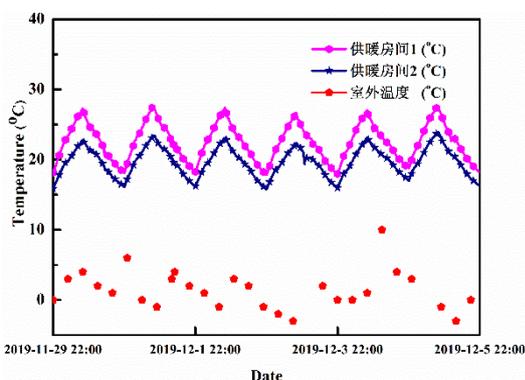
经计算, 考虑到蓄热箱的效率, 因此填充量为 900kg 左右。

2 实验结果与讨论

2.1 室内外温度分析



(a) 运行时间(2019/11/30 22:00~2019/12/1 22:00)



(b) 连续运行 5 天房间温度

图 3 采用蓄热系统供暖房间温度

Fig.3 The temperature of heated room

图3为采用相变蓄热水箱供暖系统房间与室外温度对比分析。由图3(a)可知, 运行时间为2019-11-29 22:00~2019-11-30 22:00, 室外温度最高温度 5°C , 最低温度 0°C , 平均温度为 2.0°C , 采用相变蓄热水箱系统的供暖房间1的室内平均温度为 22.45°C , 房间2的室内平均温度为 19.44°C 。供暖房间1比供暖房间2室内平均平均温度高 3.01°C , 是由于房间1中的供暖系统部分连接管道未做保温, 故此部分管道会向房间释放一部分热量, 从而造成房间1比房间2温度略高些。但是两个房间的室内平均温度满足国家规定的供暖温度 $18\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。同时由图3(a)所示, 夜间22:00~8:00, 房间供暖热量来自于电锅炉系统, 因此随着时间的推移, 房间的室内温度逐渐升高; 而8:00之后, 电锅炉系统停止, 房间供暖热量来自于水蓄热箱, 蓄热箱中的水利用温差, 释放出热量, 因此随着时间的推移, 蓄热箱中水的温度逐渐降低, 换出的热量能力逐渐减弱, 因此室内温度逐渐降低, 在夜间22:00时, 温度最低。22:00点过后, 房间的温度再次逐渐升高, 开启下一个周期循环。图3(b)有效展示了5天的室内运行状况。两个房间的室内平均温度均能够满足 $18\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以上。

2.2 散热器进回水温度的变化分析

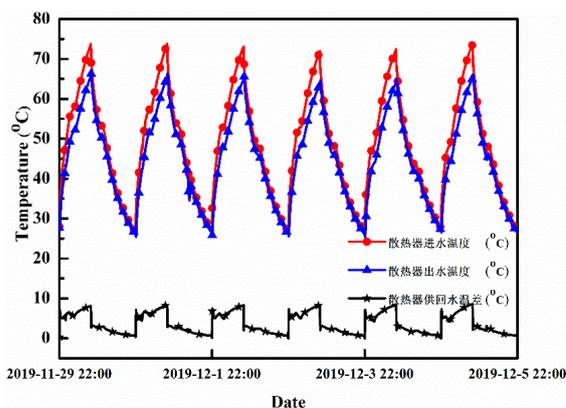


图 4 散热器进回水温度变化图

Fig.4 Diagram of inlet and return water temperature of radiator

图4为散热器进回水温度以及温差图。由图可知, 当谷电时段22:00~8:00之间采用电锅炉给房间供暖时, 由于电锅炉持续运行, 因此水温逐渐升高, 进入散热器的温度也逐渐升高, 此时散热器内温度与室内温差较大, 此时采用变频泵采用小流量运行; 而非谷电时段8:00~22:00, 由于蓄热箱中水与散热

器回水之间利用温差来进行热交换，蓄热水箱中水温下降释放热量，从而使得散热器回水得热，使其温度升高。往复循环后，蓄热水箱中的水温逐渐降低，从而使得散热器的进水温度逐渐降低。此时在散热器进回水温差越来越小，此时变频泵会增大转速，提高水流量，从而使得系统在非谷电时段，散热器表现出大流量小温差运行。由此可以得到，在热源为高温时，采用小流量大温差进行供热，热源较低时，系统采用大流量小温差进行供热，以满足房间供暖所需的热量。

2.3 为耗电量分析

图5 为系统运行时段2019/11/29 22:00—2019/12/5 22:00，谷电时段与其他时段电量对比。由图5可知，系统运行期间每日总耗电量在137.3~140kWh。其中谷电时段与其他时段耗电量占比分配如表1所示。由表可以看出采用该系统92%

的用电量来自谷电时段，而只有近8%的用电量在非谷电时段，通常谷电时段的电价是高峰时段的三分之一，因此可以大幅度地减少供暖的运行费用。

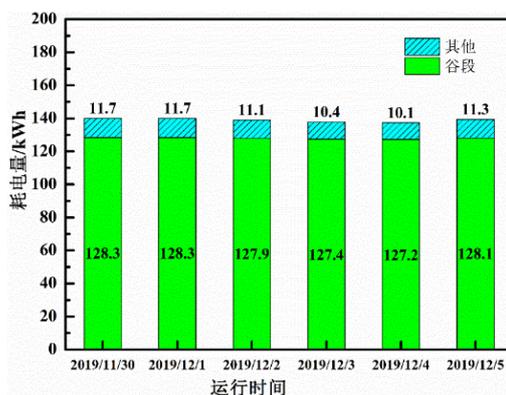


图5 采暖季每日耗电量（谷电时间：22:00~8:00，非谷电时间：8:00~22:00）

Fig.5 Power consumption per day

表1 运行时段谷电与其他时段耗电量表

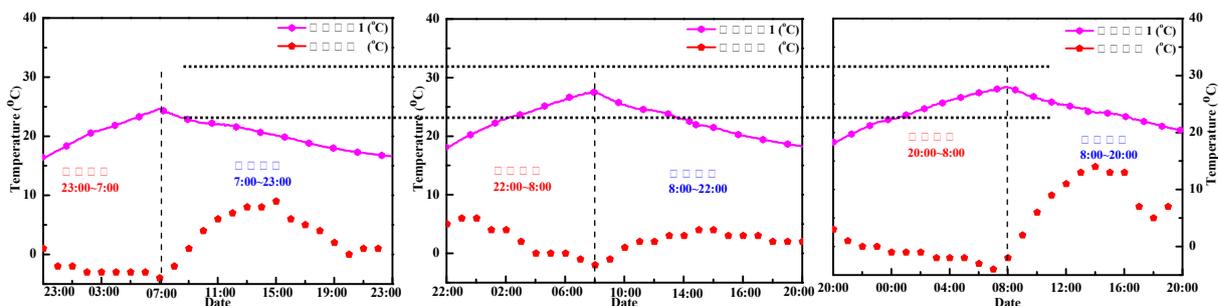
Table 1 Power consumption in cereal and other periods

类别	11月30日	12月1日	12月2日	12月3日	12月4日	12月5日
谷段耗电量占比	91.64%	91.64%	92.01%	92.45%	92.64%	91.89%
其他时段耗电量占比	8.36%	8.36%	7.99%	7.55%	7.36%	8.11%

2.4 不同蓄热时长对房间温度的影响

为了能够优化蓄热时间及放热时间比例，同时由于各省市峰谷电价政策的不同，谷电时段可在8~14小时之间，其余时间为非谷段时段（一个周期24小时）。图6给出了一个周期内，蓄热时长分别为8小时、10小时以及12小时情况下，房间1室内温度随时间的变化图。由图6可以看出，随着蓄热时间

的增大，房间1的室内的最低、最高温度均逐渐升高。其中当蓄热时长8小时，房间的最低温度为16.42℃，最高温度24.02℃，满足国家规定的供暖室内温度标准。因此对于本系统建议蓄热时间为8小时。对于其他谷电时段高于8小时的地区，对于该系统可以建议增加供热面积。



(a) 蓄热8小时，放热16小时 (b) 蓄热10小时，放热14小时 (c) 蓄热12小时，放热12小时

图6 蓄热时长下房间温度的变化曲线

Fig.6 The temperature of heated room with heat storage time

3 结论

(1) 本文搭建了电锅炉水蓄热的清洁供暖系统,主要利用谷电时段进行蓄热,非谷电时段放热满足供暖需求。

(2) 电锅炉在谷电时段一边给蓄热箱蓄热,一边给房间进行供暖,此时散热器的运行状态为小流量大温差;在非谷电时段,电锅炉不运行,全部由蓄热水箱利用温降供给散热器所需的热量,此时散热器运行状态为大流量小温差。

(3) 针对本系统,建议谷电蓄热8小时,可满足白天16小时房间供暖。若对于谷电时段为10~12小时的,建议可适当增大供热面积。

参考文献:

- [1] 凌浩怨,何京东,徐玉杰,等. 清洁供暖储热技术现状与趋势[J]. 储能科学与技术,2020,9(3):861-868.
- [2] 孙恩慧,王璐琪,赖小垚,等. 北方冬季农村供暖对PM2.5的影响及解决方案研究[J]. 环境科学与管理,2013,38(7):90-93.
- [3] 关于促进储能技术与产业发展的指导意见. 中华人民

共和国国家发展和改革委员会
,http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201710/t20171011_863348.html.

- [4] 太阳能中温供暖开启亿元级市场[J]. 中国能源报,
http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2019-01/14/content_1904210.htm#.
- [5] 朱义成,张璐,张延杰,邹议. 清洁取暖现状与发展-以山东省为例[J]. 制冷与空调,2019,33(1):80-81.
- [6] 侯婉靖,孔令娜,王萍,等. 相变蓄热材料的节能分析[J]. 能源与节能,2019,(4):69-70.
- [7] 于永生,井强山,孙雅倩. 低温相变储能材料研究进展[J]. 化工进展,2010,29(5):896-913.
- [8] 李贝,刘道平,杨亮. 复合相变蓄热材料研究进展[J]. 制冷学报,2017,38(4):36-43.
- [9] 麻延,苏巨东,闫建民. 电锅炉高温水蓄热供暖运行总结[J]. 储能技术,2004,(6):264-265.
- [10] 王昆. 水蓄热电锅炉作为中小建筑物冬季取暖热源的应用[J]. 河北理工大学学报(自然科学版),2010,32(1):30-33.