

基于当地纬度倾角太阳能集热棚集热特性分析

聂 晶¹, 蔡琦龙¹, 田 瑞^{1, 2}, 张维蔚¹, 郭子睿¹, 阮 强³

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古可再生能源重点实验室, 呼和浩特 010051;

3. 呼和浩特市城发供热有限公司, 呼和浩特 010010)

摘 要: 选取太阳能烟囱集热棚集热特性为研究对象, 采用 40° 作为太阳能烟囱集热棚倾角进行实验测试, 对集热棚内蓄热层在该倾角下不同太阳总辐照度(GHI)的最高温度、温度场均匀性、蓄热层壁面 Nu 展开分析。结果表明, 随着 GHI 的增大, 蓄热层最高温度及温度场均匀性变化趋势不同。对湍流强制对流传热的准则间关联式进行拟合, 利用最小二乘法得出在 Re 为 $1.3 \times 10^4 \sim 3.0 \times 10^5$ 、 Pr 为 $0.694 \sim 0.703$ 范围之间, 基于当地纬度集热棚倾角湍流强制对流传热准则间关联式, 耦合系数为 0.9261 。

关键词: 太阳能烟囱; Nu 数; 温度场; 集热棚倾角

中图分类号: TK514

文献标识码: A

0 引 言

太阳能烟囱发电技术是近年发展较为迅速的太阳能低温热发电应用。印度^[1]、加拿大^[2]、伊朗^[3]、美国^[4]等国家均在可行性应用研究, 但由于太阳能烟囱发电效率极低^[5, 6], 目前尚无大规模示范电站生产运用, 但其集热效率较高^[7]。因此, 世界各国对太阳能烟囱发电的研究并未止步。各国学者在实验方面已进行了多方位和多角度的研究, 如Ghalamchi等^[8]搭建烟囱高为2 m, 集热棚直径为3 m的太阳能烟囱发电系统, 对气流速度和温度分布进行研究, 发现降低太阳能烟囱入口高度导致任何参数和环境温度变化可提升太阳能烟囱性能。2015年, Nasirivatan等^[9]运用混合动力电晕风进行研究, 结果表明增加混合动力, 强化集热棚内传热, 提高太阳能烟囱的输出功率。不仅如此, 研究者还对不同地域太阳能烟囱利用进行了研究, 如Sangi^[10]对伊朗12个不同地理区域进行太阳能烟囱性能评价分析认为烟囱高度在350 m和集热棚直径在1000 m是最佳结构。

太阳能烟囱系统内集热棚棚顶和集热棚蓄热层壁面间的换热, 国内外学者在理论上假设属于管内受迫流动和外掠平板受迫流动并使用Gnielinski

公式进行分析^[11], 对于需要精确分析集热棚内的换热情况, 缺乏专门的准则关联式。本文基于呼和浩特地区同纬度倾角集热棚设计太阳能烟囱测试装置, 展开集热棚集热特性测试, 得出该条件下集热棚在不同天气情况、不同太阳总辐照度(GHI)蓄热层温度场分布情况, 根据实验数据分析得到基于当地纬度集热棚倾角湍流强制对流传热准则间关联式, 为后期优化系统设计提供实践数据支持, 从而确保系统达到最优效率。

1 集热棚温度特性

呼和浩特东经 $110^\circ \sim 112^\circ$, 北纬 $40^\circ \sim 41^\circ$, 海拔1070 m, 当集热棚倾角与当地纬度相同时太阳辐照最强^[12]。选取集热棚倾角 40° , 进行实验测试系统台架搭建。集热棚内温度是集热棚能流密度收集程度的直接体现, 其中蓄热层表面温度分布、温度均匀性以及集热棚进出口温度决定集热棚内空气流体的换热情况。因此, 通过分析蓄热层温度特性来衡量集热棚集热特性。

2 实验测试系统

2.1 太阳能烟囱系统结构

太阳能烟囱测试系统集热棚空气入口高度距

收稿日期: 2017-08-21

基金项目: 内蒙古自治区重大基础研究开放课题(2017); 内蒙古自然科学基金(2017MS0530)

通信作者: 田 瑞(1956—)男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事传热传质及其强化和能源利用方面的研究。tianr@imut.edu.cn

地面 0.1 m、集热棚直径 4 m、烟囱高度 2.50 m、烟囱直径 0.12 m。集热棚底座支架采用 50 mm×50 mm 方钢焊接,集热棚棚面材料采用透光率为 85% 阳光板,集热棚支架采用 40 mm×20 mm 方钢分 6 组焊接组成,中间使用 50 mm×50 mm 方钢进行固定;集热棚底部支架与集热棚支架之间采用密封条密封,集热棚侧边和底边采用压条密封,阳光板夹层以及集热棚与烟囱之间的空隙采用硅酮玻璃胶密封;蓄热层由 30 mm 橡塑加厚海绵与 80 mm 挤塑板下敷设 30 mm 竹丝板组成。

2.2 集热棚温度场测试系统

集热棚温度场测试系统由 PT100 型粘贴式铂电阻温度传感器、TOPRIETP700 多路数据记录仪、Testo425 精密型风速仪、AVM~07 式流动风速仪、BSRN3000 型气象观测系统组成。分别选取晴天、多云、闷晒、阴天多种有代表意义天气情况进行数据采集。测试系统如图 1 所示。

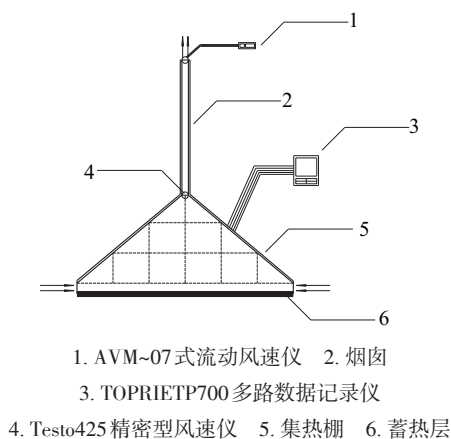


图1 太阳能烟囱测试系统

Fig. 1 Solar chimney test system

BSRN3000 气象观测系统每 60 秒进行 1 次数据采集。记录太阳总辐、直辐、散辐以及风速风向等环境气象数据。PT100 型粘贴式铂电阻温度传感器数据通过 TOPRIETP700 多路数据记录仪进行数据采集每 30 秒 1 次,AVM~07 式流动风速仪每 60 秒进行 1 次数据采集。在测试数据采集过程中, TOPRIETP700 多路数据记录仪采样数据与 BSRN3000 气象观测系统每 60 秒同步记录, TOPRIETP700 多路数据记录仪多一次数据采集,两次取平均值,减少测量误差。太阳能烟囱集热棚测试系统中蓄热层上下表面均布 68 个温度传

感器,从集热棚进口至集热棚出口分 3 层布点。

3 实验数据分析

3.1 集热棚温度分析

太阳能烟囱测试系统搭建在室外环境,测试条件受外界环境风速影响较大,外界环境风速较大引起蓄热层表面气体流速的增大,增大对流换热热量,蓄热层温度测量精度受到影响。因此实验选择在外界环境风速基本稳定的工况下进行测试。实验时间选择在 2017 年 6 月下旬~7 月末,此期间天气状况基本稳定,满足测试需求。选取 7 月 7 日、18 日、23 日典型天气进行数据分析。其中 7 日全天无云,气象条件良好, GHI 范围为 417~894 W/m^2 ; 18 日为典型闷晒天气 GHI 范围为 462~990 W/m^2 ; 23 日为雨后有云遮挡天气 GHI 范围为 156~1168 W/m^2 ,在各时间段 GHI 变化较大。如图 2 为 GHI 随时间的变化趋势,为使数据具有可比性,选择 10:30~11:30 之间 GHI 在 700~900 W/m^2 范围内进行比较分析。

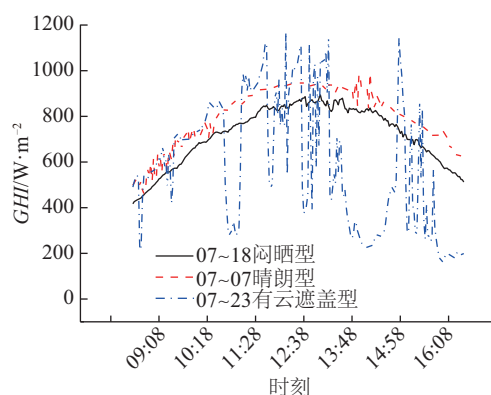
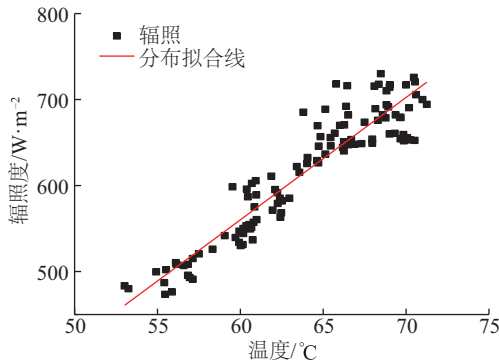


图2 GHI 随时间变化曲线图

Fig. 2 The total irradiance varies with time

为避免个别实验数据出现坏点影响实验结果,对相似天气情况进行多次重复测试,对实验数据进行归一化处理,使实验数据具有重复性、归一性。同时对相似测量工况即不同测试日期相同总辐照强度工况下测试系统各点温度进行概率统计,剔除相差较大且出现概率较小的点,使用均值法排除偶然因素对实验结果的影响,提高实验结果的真实性,得到 GHI 随蓄热层表面最高温度的变化关系,如图 3 所示。

图3 GHI 随蓄热层最高温度变化规律Fig. 3 GHI with heat storage layer temperature variation

GHI 与温度的目标函数:

$$I = a + bT \quad (1)$$

式中, I ——辐射强度, W/m^2 ; a 、 b ——拟合系数;
 T ——温度, $^{\circ}C$ 。

$$a = \frac{\sum T^2 \sum I - \sum T \sum IT}{n \sum T^2 - (\sum T)^2} \quad (2)$$

$$b = \frac{n \sum IT - \sum T \sum I}{n \sum T^2 - (\sum T)^2} \quad (3)$$

截距 a 与一次项系数 b 均利用最小二乘法,修正拟合参数,将差值最小的参数定义为最佳拟合结果。

回归结果:

$$I = 26.11948 + 0.6136T \quad (4)$$

校正决定系数: $R^2 = 0.93451$ 。

以7月18日闷晒型天气作为研究对象,全天环境风速低于 2 m/s 。选择 08:30~13:30 时段 GHI 逐渐升高过程进行分析。随着 GHI 的增大,蓄热层温度变化较为明显。其中, GHI 变化范围为 $462 \sim 990 \text{ W/m}^2$ 时,蓄热层温度随 GHI 的增大而增大,温度变化范围在 $53.02 \sim 71.25 \text{ }^{\circ}C$ 之间逐渐增大。在上述 GHI 和蓄热层温度变化时, GHI 与温度之间对应关系呈线性变化,采用数学拟合方法,得到 GHI 与蓄热层温度变化关系函数,利用该表达式可确定蓄热层在不同 GHI 下环境稳定条件下的温度值。

3.2 蓄热层温度场均匀性分析

集热棚内蓄热层温度分布均匀程度是集热棚整体蓄热能力的体现,将蓄热层上表面某点 (x, y) 对应温度值 $T_{(x, y)}$ 作为一组离散型随机数列,采用方差分析法对离散型随机变量温度分布进行均匀性

分析。设 S^2 为离散型温度随机数列偏离均值的平均程度,定义 ΔS 为温度非均匀性系数。

随机数列在蓄热层表面的平均温度 \bar{T} 为:

$$\bar{T} = \frac{T_i + T_{i+1} + \dots + T_{k-1} + T_k}{k} \quad (5)$$

式中, k ——数据数量, $k=13$; T_i ——热电偶各点测试温度, $^{\circ}C$ 。

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^L (T_i - \bar{T})^2 + \sum_{i=1}^M (T_i - \bar{T})^2 + \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}{L + M + N} \quad (6)$$

式中, L ——正南方向热电偶分布数量, $L=7$; M ——正西方向热电偶分布数量, $M=3$; N ——正东方向热电偶分布数量, $N=3$ 。

$$\Delta S = S^2 \times 10^{-3} \quad (7)$$

从图4可看出,随着 GHI 的增大,蓄热层表面的温度非均匀性系数增大,蓄热层表面温度变化较为剧烈,温度分布呈非均匀变化。因为集热棚呈圆台布置,接受阳光辐照有向光面和背光面之分,蓄热层表面不同位置接收 GHI 不同,温度分布不同,非均匀性加剧。所以当 GHI 达到最大值后,蓄热层壁面辐射及对流换热共同作用,蓄热层表面温度非均匀性系数降低。

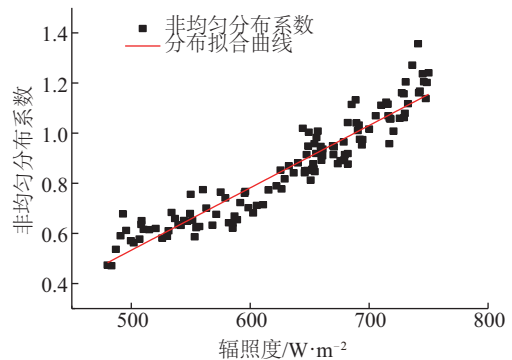


图4 蓄热层温度场均匀性分析

Fig. 4 Thermal reservoir temperature uniformity analysis

3.3 蓄热层温度场测试分析(水平面)

如图5为选取7月7日的10:29、18日11:29、23日的10:32共3d的典型气象天气情况分别 GHI 分别为 700 、 800 、 900 W/m^2 条件下蓄热层温度场分布图。在7月7日晴,无云,环境温度 $16 \sim 29 \text{ }^{\circ}C$, 风速 $1.6 \sim 3.3 \text{ m/s}$, 西北风, GHI 为 800 W/m^2 时蓄热层温度在 $35.7 \sim 73.5 \text{ }^{\circ}C$ 之间,温度分布非均匀性适中,在集热棚迎光面及中心区域最高温度分布均匀;7月18日属于闷晒型天气,环境温度为 $20 \sim 34 \text{ }^{\circ}C$ 风

速 1.6~3.3 m/s, 西南风, 由于气象条件闷晒影响, GHI 达到 800 W/m^2 的时间较 7 日和 23 日滞后约为 1 h, 18 日风速较低, 对集热棚入口温度影响较小, 集热棚蓄热层温度分布在 $38.2\sim 73.9\text{ }^\circ\text{C}$ 之间, 蓄热层表面非均匀性较低, 高温分布较均匀; 7 月 23 日晴, 多云有遮挡, 环境温度 $18\sim 27\text{ }^\circ\text{C}$, 风速 $3.4\sim 5.5 \text{ m/s}$, 北风, 蓄热层温度在 $44.8\sim 70.7\text{ }^\circ\text{C}$ 之间。如图 5c 低温区域范围比图 5a、图 5b 中低温区域面积大, 虽然温度变化范围较小, 但非均匀程度较图 5a、图 5b 大。因为虽然图 5c 日最高 GHI 达到 1168 W/m^2 , 但在测量时间段云层间断遮挡严重, 所以对蓄热层温度分布影响较大。

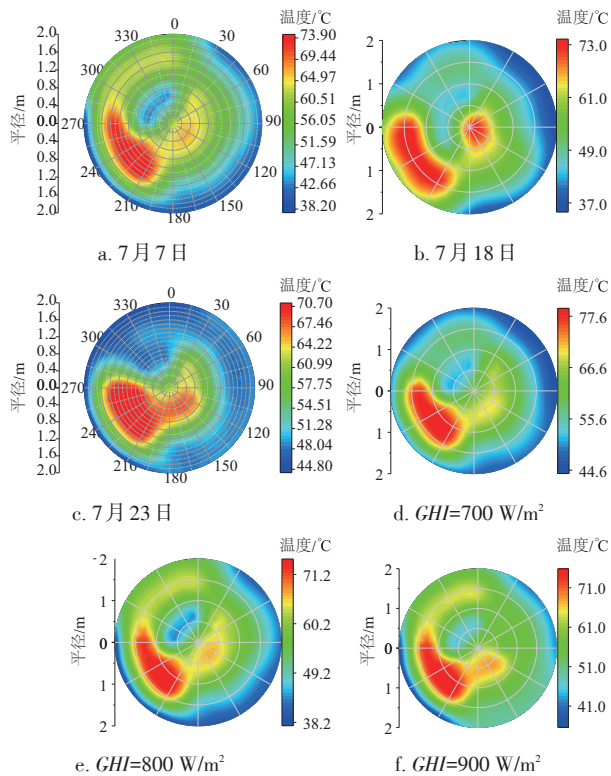


图5 蓄热层温度场分布

Fig. 5 Temperature distribution of heat storage layer

由于 7 月 18 日, 全天空气质量较差, 闷晒天气, 当总辐照度为 700 W/m^2 时蓄热层温度场温度变化范围在 $44.6\sim 78.6\text{ }^\circ\text{C}$; GHI 在 800 W/m^2 时温度场变化范围在 $38.2\sim 73.9\text{ }^\circ\text{C}$; GHI 为 900 W/m^2 时温度场变化范围在 $36.4\sim 75\text{ }^\circ\text{C}$ 。从图 5d 可看出, 在 GHI 为 700 W/m^2 时, 蓄热层温度场温度较图 5e (GHI 为 800 W/m^2) 和图 5f (GHI 为 900 W/m^2) 时高。因为在 GHI 为 700 W/m^2 时, 环境瞬时最大风速为 2.68 m/s , 平均风速为 0.79 m/s ; 图 5e 在 GHI 为 800 W/m^2 时,

环境瞬时最大风速为 3.48 m/s , 平均风速为 2.15 m/s ; 图 5f 在 GHI 为 900 W/m^2 时, 环境瞬时最大风速为 4.28 m/s , 平均风速为 2.67 m/s 。由于环境风速的影响, 蓄热层壁面对流换热增强, 集热棚蓄热层表面温度变化较大, 导致蓄热层温度范围有所降低。同时, 随着 GHI 的增大, 内部温度场出现极化现象, 对流换热热量增加, 使温度呈下降趋势。

3.4 蓄热层壁面 Nu 数分析

太阳能烟囱系统中, 进入集热棚入口处的空气流动状态属于旺盛湍流区域。对于湍流强制对流换热, 准则方程为:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (8)$$

根据实验值得:

$$Nu = \frac{h \cdot D}{\lambda} \quad (9)$$

式中, h —— 对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; D —— 蓄热层直径, m ; λ —— 导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

$$h = \frac{c_p m(t_i'' - t_i')}{A_1(t_w - t_i)} \quad (10)$$

式中, c_p —— 定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; m —— 质量流量, kg/s ; t_i'' —— 出口温度, $^\circ\text{C}$; t_i' —— 入口温度, $^\circ\text{C}$; t_w —— 壁面温度, $^\circ\text{C}$; t_i —— 流体进出口平均温度, $^\circ\text{C}$; A_1 —— 面积, m^2 。

$$Re = \frac{u \cdot D}{\nu} \quad (11)$$

式中, u —— 流体速度, m/s ; ν —— 运动粘度, m^2/s 。

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} = \frac{v}{a} \quad (12)$$

式中, μ —— 动力粘度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; a —— 热扩散率, m^2/s 。

根据相似原理, 由经验及实际情况, 采用对流换热已定准则数的幂函数形式整理数据。

$$Nu = C Re^n Pr^m \quad (13)$$

系数 C 、 n 、 m 等常数由实验数据确定。根据该实验关联式形式上的特点, 横、纵坐标是对数的双对数坐标图上的一条直线。首先确定 m , 根据 Sherwood 得到的同一 Re 下不同种类流体的实验数据确定 m , 取对数形式:

$$\lg Nu = \lg C' + m \lg Pr \quad (14)$$

式中, C' —— 相同 Re 时的 $C Re^n$ 值。

$$m = \left(\frac{\lg Nu_1 - \lg Nu_2}{\lg Pr_1 - \lg Pr_2} \right) \approx 0.4 \quad (15)$$

求得 m 后, 式(13)变为:

$$\frac{Nu}{Pr^{0.4}} = C Re^n \quad (16)$$

取对数形式:

$$\lg \left(\frac{Nu}{Pr^{0.4}} \right) = \lg C + n \lg Re \quad (17)$$

为使系数 n 更为准确, 把实验数据分为 12 组, 分别求出对应 n 值:

$$n = AVE \left[\frac{\frac{Nu_1}{Pr_1^{0.4}}}{\frac{Nu_2}{Pr_2^{0.4}} \dots \frac{Nu_{n-1}}{Pr_{n-1}^{0.4}} \frac{Nu_n}{Pr_n^{0.4}}} \right] \approx 0.89 \quad (18)$$

取 $\lg Re=0$ 时, $\lg C$ 为直线在纵坐标上的截距:

$$\lg C = \lg \left(\frac{Nu}{Pr^{0.4}} \right) \quad (19)$$

求得 $C=0.2280$, 代入式(13)得到:

$$Nu = 0.2280 Re^{0.59} Pr^{0.4} \quad (20)$$

实验点与关联式耦合系数为 0.9261, 该关联式适用条件为: Re 范围 $1.3 \times 10^4 \sim 3.0 \times 10^5$; Pr 范围为 0.694~0.703。

4 结 论

针对基于当地纬度太阳能烟囱集热棚内蓄热层温度特性进行分析, 设计太阳能烟囱集热棚实验系统, 对集热棚内蓄热层在不同 GHI 下的最高温度, 温度分布均匀性以及蓄热层壁面 Nu 数进行研究。结果表明:

1) GHI 为 473.47~725.51 W/m² 时, 集热棚内蓄热层温度呈上升趋势, 最高温度达 78.6 °C, 线性拟合方法得到蓄热层最高温度与 GHI 的关系式表明, 当 GHI 大于此范围时, 蓄热层温度出现极化现象, 最高温度呈下降趋势; 在相同 GHI 条件下对不同天气状况集热棚内蓄热层温度均匀性进行比较分析, 蓄热层表面温度的均匀性受到环境风速及云层遮挡的影响较大; 在不同 GHI 下对蓄热层壁面温度的均匀性进行云图比较分析, 均匀性特征明显。

2) 根据相似理论, 利用最小二乘法对基于呼和浩特地区纬度太阳能烟囱集热棚蓄热层壁面 Nu 进行拟合。利用该方法得到 Re 范围在 $1.3 \times 10^4 \sim 3.0 \times 10^5$ 之间, Pr 范围在 0.694~0.703 之间、湍流强制对流传热的准则间关联式, 即蓄热层壁面 Nu 的关联式, 使用该方法增强其适用性与可靠性。

[参考文献]

- [1] Beerbaum S, Weinrebe G. Solar chimney power plants for high latitudes [J]. Solar Energy, 2000, 79 (5): 449—458.
- [2] Bilgen E, Rheault J. Solar chimney power plants for high latitudes [J]. Solar Energy, 2005, 79 (5): 449—458.
- [3] Mehrpooya M, Shahsavan M. Modeling, energy and exergy analysis of solar chimney power plant—Tehran climate data case study [J]. Energy, 2016, 115 (1): 257—273.
- [4] Krisst R. Energy transfer system [J]. Alternate Sources, 1983, 63(5): 8—11.
- [5] 葛新石, 叶宏. 太阳烟囱发电系统及其固有的热力学不完善性分析 [J]. 太阳能学报, 2004, 25 (2): 263—268.
- [5] Ge Xinshi, Ye Hong. Solar chimney electric generating system and analysis of its intrinsic thermodynamic defect [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2004, 25 (2): 263—268.
- [6] Cao Fei, Li Huashan, Zhao Liang, et al. Design and simulation of the solar chimney power plants with TRNSYS [J]. Solar Energy, 2013, 98, Part A: 23—33.
- [7] Cao Fei, Li Huashan, Zhao Liang, et al. Performance analysis of conventional and sloped solar chimney power plants in China [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50 (1): 582—592.
- [8] Ghalamchi M, Kasaeian A, Ghalamchi M. Experimental study of geometrical and climate effects on the performance of a small solar chimney [J]. Renew Sustain Energy, 2015, 43 (3): 425—431.
- [9] Nasirivatan S, Kasaeian A, Ghalamchi M, et al. Performance optimney power generation of solar chimney in the troics [J]. Energy Engeer, 2015, 78 (12): 22—30.
- [10] Sangi R. Performance evaluation of solar chimney power plants in Iran [J]. Renewalde and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16 (1): 704—710.

- [11] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [11] Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015.
- [12] Pasurmarthi N, Sherif S A, Performance of a demonstration solar chimney model for Power generation [A]. Proceeding of the 1997 35th Heat Transfer and Fluid[C], Sacramento, CA, USA, 1997, 203—240.

HEAT COLLECTING CHARACTERISTICS ANALYSIS OF SOLAR HEAT COLLECTING SHED BASED ON LOCAL LATITUDE

Nie Jing¹, Cai Qilong¹, Tian Rui^{1,2}, Zhang Weiwei¹, Guo Zirui¹, Ruan Qiang³

(1. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Key Laboratory of Wind Energy and Solar Energy of the Ministry of Education, Hohhot 010051, China;

3. Hohhot Chengfa Heating Co., Ltd., Hohhot 010010, China)

Abstract: Taking heat collecting characteristics of heat collecting shed with solar chimney as the research object, 40° slope angle of solar chimney was used to carry out the experimental test. At this slope angle, the analyses of maximum temperature, the uniformity of the temperature field, and the wall Nu number of heat storage layer in heat collecting shed under different total solar irradiance were carried out. The results show that with increases of total solar irradiance, the maximum temperature and temperature field uniformity of heat storage layer have different change trend. The fitting of the correlation between the criteria for turbulent forced convection heat transfer is carried out, the least square method is used to obtain that Re is between 1.3×10^4 and 3.0×10^5 and Pr is between 0.694 and 0.703, for the correlation between turbulence forced convection heat transfer criterion and slope angle of solar chimney for heat collecting shed based on local latitude, coupling coefficient is 0.9261.

Keywords: solar chimney; Nu number; temperature field; slope angle of solar chimney for heat collecting shed