

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2011.02.012

太阳能烟囱发电系统蓄热层的试验研究

左 璐¹, 郑 源¹, 沙玉俊², 李振杰¹, 刘文明³

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098;

2. 清华大学机械工程学院, 北京 100084 丹华水利环境技术有限公司, 上海 200032)

摘要: 搭建了 3 台带有不同石块蓄热介质蓄热层的太阳能烟囱发电系统对比试验装置, 在实际天气条件下, 对该装置的运行性能进行了测试, 并对试验结果进行了对比分析. 结果表明 石块蓄热层具有储存热量的能力, 随着蓄热层深度的增加, 蓄热层内温度随外界影响就越小. 系统内热气流的温升主要在集热棚的中前段, 不同时间层热气流温升幅度不同. 辐射强度、辐射时间和其他环境因素及集热棚集热性状都会对热气流温升产生一定的影响. 石块蓄热材料的热容量和导热系数对蓄热层的平均温度和蓄热量影响较大, 热容量大, 蓄热层的平均温度日夜变化幅度相对较小, 对于太阳能烟囱发电系统的发电峰谷差的调整有利. 用同种石块作为集热和蓄热材料时, 应合理选择石块材料的粒径和孔隙率, 适当增大粒径和孔隙率可增强蓄热层的蓄热能力, 有利于提高蓄热层的平均温度. 没有太阳辐射时, 蓄热层储存的热量能更好地加热气流.

关键词: 太阳能烟囱 集热棚 蓄热层 热气流

中图分类号: TM615

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2011)02-0181-05

太阳能烟囱发电系统于 1978 年由德国教授 Schlaich^[1] 提出, 1981 年, 德国和西班牙合作在西班牙 Manzanares 建造了第 1 座太阳能烟囱示范电厂^[2] 后, 引起了许多研究人员的兴趣^[3-9].

集热棚作为太阳能烟囱发电系统的围护结构之一, 对系统内的热环境有着直接影响. 烟囱的拔风能力源于集热棚内气流温升导致的空气密度差所产生的浮升力. 蓄热层热状况的改变是影响系统内热环境的另一个因素. 集热棚温度、蓄热层温度与集热棚内气流温度是相互影响的, 因此, 建立具有较好集热性能的太阳能集热棚、较好储热性能的蓄热层, 是实现系统高效运行的关键环节之一.

为使蓄热层具有较高的容积蓄热密度, 要求蓄热材料有较高的比热容和密度. 目前, 应用最多的蓄热材料是水与石块. 水的蓄热容积密度比石块要大, 石块的优点是不像水那样有漏损和腐蚀等问题. 太阳能烟囱发电系统中有关蓄热层的研究不多见, 文献[10] 将蓄热层作为固体, 结合集热棚、烟囱, 通过数值模拟分析蓄热层的特性及整个太阳能烟囱发电系统的传热与流动. 文献[11] 将蓄热层作为多孔介质, 用数值模拟分析蓄热层中传热与流动特性, 以及太阳辐射对蓄热层特性的影响. 文献[12] 以沙子、石子及石子与充水黑色密封管的组合作为蓄热介质进行试验研究, 揭示不同蓄热介质的吸放热特性及其对集热棚内气流进出口温差、集热棚效率的影响规律. 本文建立了 3 台小型带有不同石块蓄热介质蓄热层的太阳能烟囱发电系统对比试验装置, 在实际天气条件下, 对该装置的运行性能进行了测试, 并对试验结果进行了讨论分析.

1 试验装置与测试系统

小型带有蓄热层的太阳能烟囱集热系统对比试验装置如图 1 所示, 装置组成如下.

- 烟囱 5 mm 厚灰色 PVC 管, 内径 80 mm, 高 2 500 mm.
- 集热棚盖板 透光率为 80%, 3.5 mm 厚的透明阳光平板, 气流进口处高 0.15 m.
- 蓄热槽盖板 透光率为 80%, 3.5 mm 厚的透明平板普通玻璃.
- 蓄热槽 3 mm 厚 PVC 板, 蓄热槽长 2 m, 内外侧均涂以黑色油漆. 从左到右, 第 I 台和第 II 台蓄热材料

收稿日期: 2010-04-06

基金项目: 河海大学自然科学基金(2007419611)

作者简介: 左璐(1966—), 女, 江苏江都人, 博士, 主要从事可再生能源利用研究. E-mail: zuoluyu@163.com

度,越往深处,温度滞后的效应就越强,即蓄热层中最高点温度随时间变化向蓄热层深处推移.对于底层蓄热层,即深 15 cm 处蓄热层,其温度在 18 30 左右达到最大,为 43.5℃,第 2 日凌晨 2 30 左右仍能保持 40.5℃左右.由此得出 岩石蓄热层具有热惯性,具有较好储存热量的能力.随着蓄热层深度的增加,蓄热层内温度随外界影响就越小.

太阳能烟囱发电系统的核心是集热棚出口处内外气流的温差.从图 4 还可看出,虽然蓄热层有明显的蓄热效果,使得气流在晚上温度高于环境温度,但并不明显,也就是蓄热对系统发电没有贡献.说明蓄热层的蓄热特性只是有利于调整系统的昼夜电力输出峰谷差、改善系统发电的稳定性.铺设蓄热层的目的是为了克服系统发电的间断性,实现连续发电.

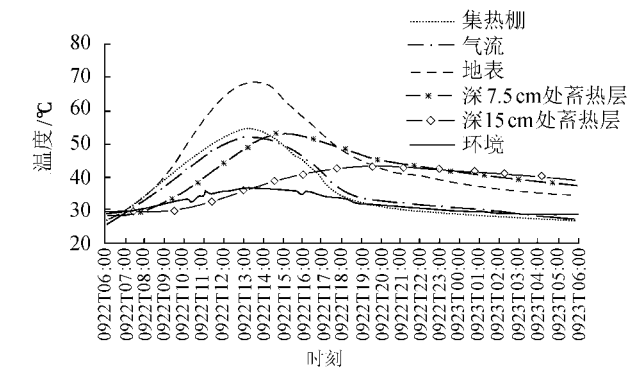


图 4 太阳能烟囱发电系统温升性能曲线

Fig. 4 Temperature rise performances of solar chimney power generation systems

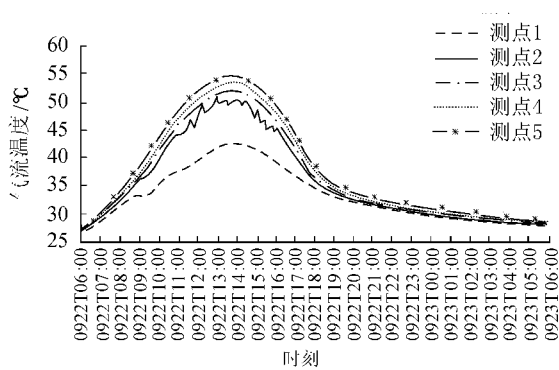


图 5 热气流沿集热棚径向温度变化曲线

Fig. 5 Variation curves of temperature of heat air flow along the heat collector

图 5 为热气流沿集热棚径向温度变化曲线,图 6 为热气流温度在不同时间层沿集热棚径向变化曲线.由图 5 和图 6 可见,系统内热气流温度的整体趋势是升高的,系统内热气流的温升,主要在集热棚的中前段.空气刚进入集热棚内,温度较低,在集热棚入口至集热棚中央位置流动过程中,通过对流传递到环境的热量较小.另一方面,地表与气流温差较大,气流吸收的热量较多,换热主要集中在此部分,因此气流温度升高较多.当气流温度升高到一定值后,由于与环境温差加大,损失的热量加大,同时与地表的换热温差减小,热气流升温平缓.由于试验装置的局限性,以及集热棚侧壁的存在,集热棚出口区域集气周壁与环境的接触面相对于玻璃盖板对热气流的加热面增大,这个区域受环境因素影响更为显著.因此,有太阳辐射段,热气流由第 4 测点断面层流向第 5 测点断面层时得热大于失热,热气流有显著温升.无太阳辐射段时,热气流损失的热量增加.热气流得失热量的不同,使得集热棚出口处热气流温度有可能低于集热棚中心处的热气流温度.不同时间层热气流从集热棚第 1 测点流向第 5 测点温度提高的幅度不同,在 13 30 左右达到最大,有 13.8℃.结果表明 辐射强度、辐射时间和其他环境因素(环境温度、风速等)、集热棚集热性状都会对热气流温升产生一定的影响.

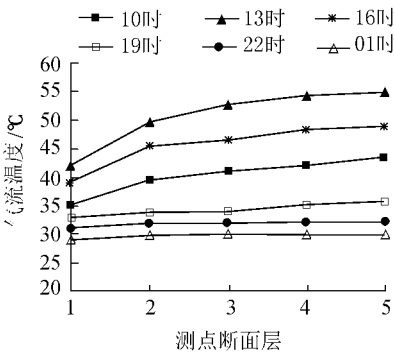


图 6 热气流温度在不同时间层沿集热棚径向变化曲线

Fig. 6 Variation curves of temperature of heat air flow along heat collector at different time levels

4 不同蓄热介质材料对蓄热层性能的影响

图 7 为鹅卵石与岩石蓄热层蓄热性能对比曲线.鹅卵石蓄热介质和岩石蓄热介质的粒径都为 3 ~ 4 cm,孔隙率都为 0.25 左右.由图 7 可见,2 种材料的蓄热层,其地表面温度比较接近.深 7.5 cm 处蓄热层,在有太阳辐射时,岩石介质蓄热层温度明显高于鹅卵石介质蓄热层的温度,没有太阳辐射时,岩石介质蓄热层温度低于鹅卵石介质蓄热层的温度.这是由于蓄热材料的热容量对蓄热层平均温度有较大影响.热容量越大,热惯性越大,蓄热能力越大,受外界环境影响相对较小,蓄热层平均温度日夜波动相对较小.而岩石介质的热容量($\rho_c = 1400 \times 836 \text{ J/K}$)低于鹅卵石介质的热容量($\rho_c = 2600 \times 920 \text{ J/K}$),因此,岩石介质蓄热层平均温度日夜波动相对较大,这对于太阳能烟囱发电系统的发电峰谷差的调整不利.

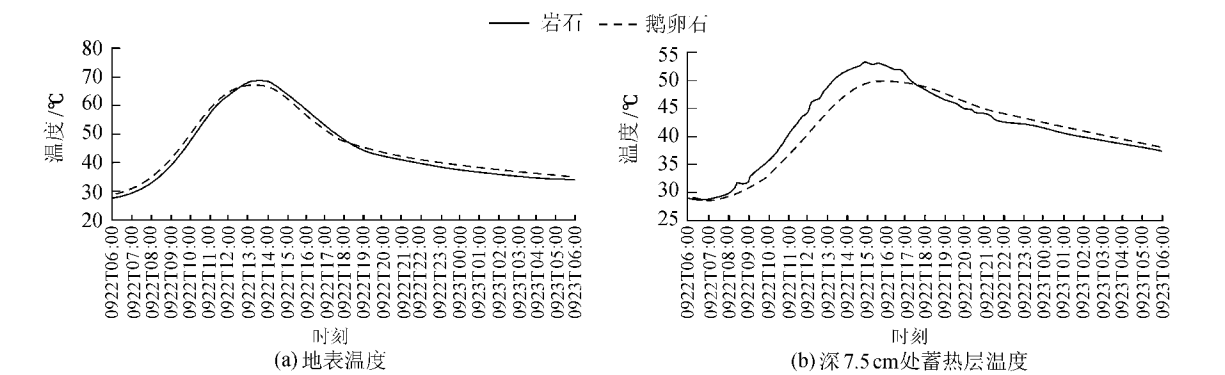


图 7 鹅卵石与岩石蓄热层蓄热性能对比曲线

Fig. 7 Comparative curves of heat storage performances of heat storage layers with cobblestone and stone

5 不同蓄热介质粒径大小对蓄热层性能的影响

图 8 为不同粒径鹅卵石蓄热层蓄热性能对比曲线. 2 种鹅卵石的规格分别为: 孔隙率为 0.15 左右, 粒径大小为 1 ~ 2 cm, 孔隙率为 0.25 左右, 粒径大小为 3 ~ 4 cm. 由图 8 可见, 在有太阳辐射时, 粒径不同的蓄热介质, 其蓄热层表面温度几乎相同. 没有太阳辐射时, 大粒径鹅卵石介质蓄热层温度高于小粒径鹅卵石介质蓄热层的温度. 深 7.5 cm 处蓄热层, 大粒径鹅卵石介质蓄热层温度高于小粒径鹅卵石介质蓄热层的温度. 这是由于蓄热材料导热系数对蓄热层平均温度也有较大影响, 导热系数越小, 热惯性增强, 无太阳辐射时, 蓄热层平均温度相对较高, 而大粒径鹅卵石介质蓄热层表观导热系数小于小粒径鹅卵石介质蓄热层的表观导热系数. 因此对于石块蓄热层, 适当增大粒径和孔隙率, 可增强蓄热层表面与蓄热层内的对流换热, 有利于提高蓄热层的平均温度和蓄热量. 没有太阳辐射时, 蓄热层储存的热量能更好地放热.

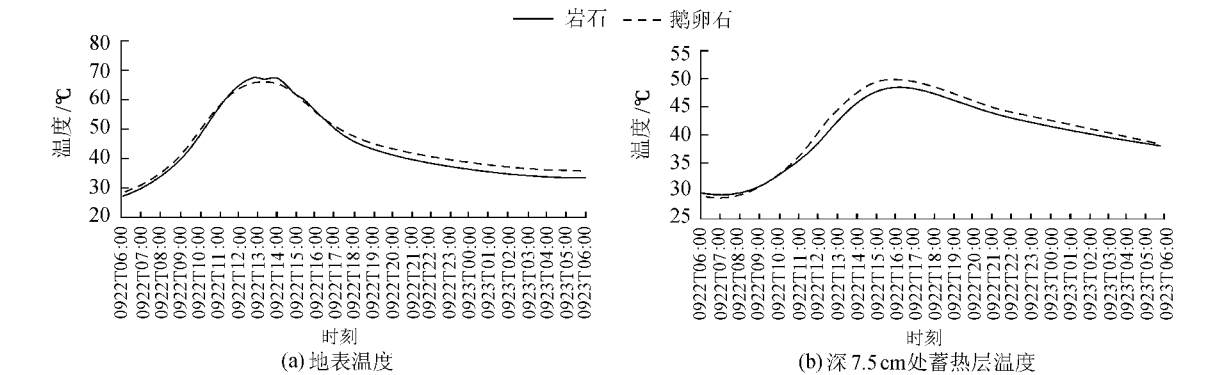


图 8 不同粒径鹅卵石蓄热层蓄热性能对比曲线

Fig. 8 Comparative curves of heat storage performances of heat storage layers with cobblestone with different sizes

6 结 论

- a. 石块蓄热层具有热惯性以及储存热量的能力, 随着蓄热层深度的增加, 蓄热层内温度随外界影响越小.
- b. 系统内热气流的温升, 主要在集热棚的中前段, 不同时间层热气流温升幅度不同. 辐射强度、辐射时间和其他环境因素及集热棚集热性状都会对热气流温升产生一定的影响.
- c. 蓄热对系统发电没有贡献, 蓄热层的蓄热特性只是有利于调整系统的昼夜电力输出峰谷差, 改善系统发电的稳定性, 实现连续发电.
- d. 蓄热材料的热容量对蓄热层的平均温度和蓄热量影响较大. 热容量大, 蓄热层的平均温度日夜变化幅度相对较小一些, 对太阳能烟囱发电系统的发电峰谷差的调整有利.
- e. 蓄热材料的导热系数对蓄热层的平均温度和蓄热量也有较大影响. 用同种石块材料作为集热和蓄热材料时, 应合理选择石块材料的粒径和孔隙率. 适当增大粒径和孔隙率, 可增强蓄热层的蓄热能力, 有利于提高蓄热层的平均温度. 没有太阳辐射时, 蓄热层储存的热量能更好地加热气流.

参考文献:

- [1] SCHLAICH J, MAYER G, HAFF W. Aufwindkraftwerke-die demonstrationsanlage in Manzanares, Spanien [C]//Proceedings of the National Conference on Power Transmission, Hamburg :[s. n.], 1980 97-112.
- [2] HAAF W, FRIEDRICH K, MAYER G, et al. Solar chimneys, part 1 :principle and construction of the pilot plant in Manzanares [J]. International Journal of Solar Energy, 1983, 2(1) 3-20.
- [3] 左璐, 郑源, 周建华, 等. 太阳能烟囱发电技术研究进展 [J]. 河海大学学报 :自然科学版, 2009, 37(1) 41-47. (ZUO Lu, ZHENG Yuan, ZHOU Jian-hua, et al. Progress of solar chimney generation technology [J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences, 2009, 37(1) 41-47. (in Chinese))
- [4] MAIA C B, FERRRIRA A G, VALLE R M, et al. Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behavior of the airflow in a solar chimney [J]. Computers and Fluids, 2009, 38(3) 625-636.
- [5] RICHARD P. Thermodynamic study of a simplified model of the solar chimney power plant [J]. Solar Energy, 2009, 83(1) 94-107.
- [6] KOONSRSISUK A, CHITSOMBOON T. Accuracy of theoretical models in the prediction of solar chimney performance [J]. Solar Energy, 2009, 83(10) 1764-1771.
- [7] BERNARDES D S M A, VON BACKSTROM T W, KROGER D G. Analysis of some available heat transfer coefficients applicable to solar chimney power plant collectors [J]. Solar Energy, 2009, 83(2) 264-275.
- [8] KOONSRSISUK A, CHITSOMBOON T. Partial geometric similarity for solar chimney power plant modeling [J]. Solar Energy, 2009, 83(9) : 1611-1618.
- [9] TOUFIK C, SALAH L, AMOR B. Thermo-hydrodynamic aspect analysis of flows in solar chimney power plants :a case study [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(5) 1410-1418.
- [10] PASTOHR H, KOMADT O, GURLEBECK K. Numerical and analytical calculations of the temperature and flow field in the upwind power plant [J]. International Journal of Energy Research, 2004, 28(6) 495-510.
- [11] MING T Z, LIU W, PAN Y, et al. Numerical analysis of flow and heat transfer characteristics in solar chimney power plants with energy storage layer [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(10) 2872-2879.
- [12] 黄惠兰, 张华, 安恩科, 等. 蓄热介质对太阳能热风发电集热器性能的影响 [J]. 动力工程, 2008, 28(4) 647-650. (HUANG Hui-lan, ZHANG Hua, AN En-ke, et al. Influence of thermal storage materials on thermal performance of heat collection solar chimney power generations [J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(4) 647-650. (in Chinese))

Experimental study on heat storage layers of solar chimney power generation systems

ZUO Lu¹, ZHENG Yuan¹, SHA Yu-jun², LI Zhen-jie¹, LIU Wen-ming³

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. College of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China ;

3. DHI Water and Environment, Shanghai 200032, China)

Abstract : Three solar chimney power generation systems with heat storage layers of different stone heat storage media were constructed. The operation performances of the systems under actual weather conditions were tested, and the results were compared and analyzed. The test results show that the stone heat storage layer has heat storage capacity. With the increasing depth of the storage layer, the effects of the environment on the temperature of the heat storage layer is smaller and smaller. The temperature rise of heat air flow in the system is mainly in the middle and front parts of the heat collector and its amplitude is different at different time levels. The radiation intensity, irradiation time, other environmental factors and heat storage characteristics of heat collectors all have certain influences on the temperature rise of heat air flow. The heat capacity and conductivity of stone heat storage materials have great influences on the average temperature and heat capacity of heat storage layer. The daily and nightly variations of the average temperature of heat collector are relatively small with large heat capacity, and it is in favour of adjusting the peak and valley difference of the solar chimney power generation systems. By adopting the same kind of stone as the heat collector and storage materials, the size and porosity of stone materials should be rationally chosen. The proper particle size and porosity can enhance the heat capacity of heat storage layer so as to improve the average temperature of heat storage layer. The heat stored in the heat storage layer can better heat the air flow under no solar radiation.

Key words : solar chimney ; heat collector ; heat storage layer ; heat air flow