DOI:10. 3969/j. issn. 1674-1951. 2021. 07. 009

# 储热过程竖排圆柱表面熔盐自然对流传热 规律研究

Research on natural convection heat transfer of molten salts on vertical cylinder surface during heat storage

于强<sup>1</sup>,何聪<sup>1</sup>,智瑞平<sup>1</sup>,鹿院卫<sup>1\*</sup>,吴玉庭<sup>1</sup>,杨桂春<sup>2</sup> YU Qiang<sup>1</sup>,HE Cong<sup>1</sup>,ZHI Ruiping<sup>1</sup>,LU Yuanwei<sup>1\*</sup>,WU Yuting<sup>1</sup>,YANG Guichun<sup>2</sup>

(1.北京工业大学 传热强化与过程节能教育部重点实验室暨传热与能源利用北京市重点实验室,北京 100124;2.中国寰球工程有限公司北京分公司,北京 100012)

(1.Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation/Beijing Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2.China Huanqiu Contracting and Engineering (Beijing) Company Limited, Beijing 100012, China)

摘 要:为了得到储热过程坚排圆柱表面熔盐自然对流传热规律,通过数值模拟的方法,对圆柱间距S/D=5~10(S为 相邻2根圆柱之间的间距,D为管排圆柱的直径)的2~8根竖排圆柱表面自然对流传热进行了研究。结果表明:管排 中每一根圆柱表面的自然对流传热与该圆柱在管排中的位置和圆柱间距S/D有关。整个管排圆柱表面熔盐自然对 流传热平均努赛尔数(Nu<sub>a</sub>)是由圆柱的间距S/D、圆柱根数N和瑞利数(Ra)决定的。当S/D较小时(S/D=5),多根管 排圆柱表面熔盐自然对流传热Nu<sub>a</sub>随着管排中圆柱根数的增加而减小;当S/D较大时(S/D=10),多根管排圆柱表面 熔盐自然对流传热Nu<sub>a</sub>随着管排中圆柱根数的增加而增大。研究结果可以为熔盐蓄热装置设计提供理论依据。 关键词:自然对流;熔盐;管排;圆柱间距;努赛尔数(Nu);瑞利数(Ra);传热规律;碳中和

中图分类号:TK 124 文献标志码:A 文章编号:1674-1951(2021)07-0054-08

Abstract: In order to obtain the natural convection heat transfer law by of molten salts on the surface of vertical cylinders during heat charging, a numerical simulation was made on the natural convection heat transfer around a cylinder array with 2 to 8 vertical pillars whose cylindrical spacing  $(S/D)=5\sim10$  (S is the distance between two adjacent cylinders, D is the diameter of the cylinder). The results show that the natural convection heat transfer on each cylinder surface is related to the position of the cylinder in the row and the its S/D. The average  $Nu(Nu_a)$  of the natural convection heat transfer made by molten salt around the whole cylinder array is determined by the S/D, the number of cylinders (N) and Ra. When S/D is small (S/D=5), the  $Nu_a$  of natural convection heat transfer of molten salt on the cylinders in the row. When S/D is large (S/D=10), the  $Nu_a$  of natural convection heat transfer on the cylinders' surface will augment with the number of cylinders in the row. The research results can provide theoretical basis for the design of molten salt heat storage device.

Keywords: natural convection; molten salt; cylinder array; cylindrical spacing; Nu; Ra; heat transfer law; carbon neutrality

# 0 引言

全球能源的消耗和电力需求日益增加,全世界 在发展清洁的可再生能源的进程中正面临着严峻 挑战。聚光太阳能热发电(CSP)与热能存储技术的 结合可以提供高品质电能,减少碳排放,助力碳中 和,实现可持续发展<sup>[1-4]</sup>。熔盐作为传热蓄热介质, 其传热规律成为人们研究的焦点<sup>[5-8]</sup>。双罐熔盐蓄 热是目前比较成熟的一种蓄热方式,但是双罐蓄热 成本较高。为了降低蓄热成本,人们提出了熔盐单 罐蓄热的方法,即在单罐蓄热罐内布置浸没式换热 器实现单罐的蓄、放热<sup>[9-10]</sup>。此时,罐内熔盐侧发生 的传热过程是自然对流传热。因此,研究换热器表 面熔盐自然对流传热规律对于单罐蓄、放热系统的 设计非常重要。

收稿日期:2021-05-07;修回日期:2021-06-15

基金项目:国家自然科学基金项目(52076006);国家重点研 发计划(2017YFB0903603);内蒙古科技重大专项 (2019ZD014)

目前,许多研究者以水和空气为介质对多个垂 直排列的水平加热圆柱表面自然对流传热进行了 大量的研究。文献[11]研究了垂直排列的水平椭 圆柱表面空气自然对流传热。研究发现,在不同的 瑞利数(Ra)下,圆柱间距对竖直排列的不同圆柱表 面自然对流传热的影响不同。文献[12]研究了垂 直排列的2根水平圆柱表面水的自然对流传热。分 析发现,下部圆柱表面自然对流传热不受上部圆柱 的影响,而上部圆柱表面自然对流传热受圆柱间距 的影响较大。文献[13]研究了2根水平圆柱间距为 2D~9D时,圆柱表面空气的自然对流传热。研究发 现,随着圆柱间距的增大,圆柱表面平均努赛尔数 (Nu。)也逐渐增大,换热的最大值出现在间距为 7D~9D之间。文献[14-15]研究了圆柱直列管束换 热强化的变化规律,结果表明存在一个最佳的圆柱 间距,使得换热强化最大。

综上可知,人们对于管排圆柱表面自然对流研 究多集中在空气和水为介质。作者所在研究团队 分别对2根竖排圆柱和多根竖排圆柱表面熔融盐自 然对流传热规律进行了初步研究。研究表明,整个 管排圆柱表面熔盐自然对流传热*Nu*。由圆柱的间距 *S/D*和*Ra*决定。当*S/D*较小(*S/D*=5)时,多根管排圆 柱表面熔盐自然对流传热*Nu*。随着管排中圆柱根数 的增加而减小;当*S/D*较大(*S/D*=10)时,多根管排圆 柱表面熔盐自然对流传热*Nu*。随着管排中圆柱根数 的增加而增大<sup>[16]</sup>。圆柱根数对管排圆柱表面熔盐 自然对流传热影响应存在临界间距,当间距大于某 一临界值时,才可使圆柱表面*Nu*。随着管排中圆柱 根数的增加而增大。为此,本文对不同间距影响下 的管排圆柱表面熔盐自然对流传热进行了详细的 研究。

# 1 数值计算模型

## 1.1 物理模型及边界条件

浸没式换热器在蓄热罐内的传热可以简化为 竖排圆柱表面的自然对流传热,物理模型如图1所 示。管排圆柱示意如图2所示。

采用商用 ANSYS CFX 软件进行计算。以5 根 圆柱为例,计算模型尺寸为150 mm×1 mm×250 mm (长×宽×高),管排圆柱模拟加热段的直径 D 为4 mm。沿z轴方向的前后 2 个面及 x 轴负方向的左侧 面为对称面边界,下面及右侧面设为等温固体壁面 边界,顶面设为开口边界。

壁面温度和周围流体的初温相同,周围流体初 温设为573.15 K。由于圆柱直径远远小于模型尺 寸,远离圆柱的流体很难被加热。因此,在Ra计算 时远离圆柱的流体温度可以近似认为是流体初温 573.15 K。圆柱体为恒体积热流密度,体积热流 $Q_v$ 为  $1\times10^5 \sim 1\times10^7$  W/m<sup>3</sup>,设圆柱在流固交界面上能量 守恒。



Fig. 2 Schematic view of the cylinder array

#### 1.2 数学描述

Ra定义为

水平圆柱表面自然对流传热方程满足质量、动 量和能量守恒定律。三维、稳态层流、流体不可压 缩、常物性、忽略辐射散热并仅有重力作用。

自然对流与膨胀系数β相关。膨胀系数β是定 压下与温度变化相对应的密度相对变化的度量:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \approx -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\rho - \rho_{x}}{T - T_{x}} \right), \qquad (1)$$

式中: $\rho$ 为密度,kg/m<sup>3</sup>;T为温度,K; $\rho_x$ 为无穷远处的密度,kg/m<sup>3</sup>;T<sub>x</sub>为无穷远处的温度,K。

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_0)D^3}{\alpha v}, \qquad (2)$$

式中:v为运动黏度,m²/s; $\alpha$ 为熔盐导温系数,m²/s;g为重力加速度,m/s²;D为加热段圆柱直径,mm; $T_s$ , $T_0$ 分别为圆柱表面温度和远离圆柱的流体温度,K。

加热圆柱表面自然对流传热Nu计算为

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} , \qquad (3)$$

式中: $\lambda$ 为导热系数, $W/(m \cdot K)$ ;h为对流传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

圆柱表面的对流传热系数h可以利用牛顿冷却 公式计算,为

$$Q_{\rm conv} = hA(T_{\rm s} - T_{\rm 0}) , \qquad (4)$$

式中:Q<sub>conv</sub>为热流量,W;A为传热面积,m<sup>2</sup>。

以上求解中,流体物性计算按照平均温度( $T_s$ + $T_0$ )/2所对应的物性计算。

#### 1.3 网格无关性及模型可靠性验证

以5根圆柱为例进行网格划分,对圆柱表面网格进行局部加密,如图3所示。模拟发现,流固交界面的网格对模拟结果有较大的影响。因此,在验证网格无关性时仅增加圆柱周围尤其是交界面处的网格数,而对于远离圆柱处的周围流体的网格数则基本保持不变。数值计算采用了稳态层流黏性流动模型,忽略圆柱表面的辐射换热,采用残差判定收敛,动量方程、能量方程和连续性方程的残差均设定为10<sup>-6</sup>。



图 3 网格划分 Fig. 3 Computational grid

取 *S/D*=5、体积热流 *Q*,=1×10<sup>7</sup> W/m<sup>3</sup>时,进行网格 无关性验证,如图 4 所示。图中第 1 根圆柱为管排 最底部的圆柱,第 5 根圆柱为管排最顶部圆柱,以此 类推。

在进行网格无关性验证时,网格数从28800逐 渐增加到85348。由图3可知,网格数较少时,圆柱



的*Nu*受网格数影响较大,但当网格数从60962增加 到85348时,*Nu*基本没有变化,说明管排圆柱的对 流换热受网格数的影响较小。对圆柱在不同体积 热流下,直径为4mm的竖直排列的两水平加热圆柱 在熔盐中的自然对流传热进行数值计算,本文选取 网格数75381进行网格划分。不同圆柱之间的努 赛尔数(*Nu*)并不相同,这是因为上部圆柱受到底部 圆柱羽流的速度冲击和圆柱周围流体温度的共同 作用,使得圆柱表面传热系数不同于第1根圆柱。

在网格无关性验证的基础上,以水为介质,对5 根圆柱进行圆柱表面自然对流传热的模型准确性 验证,计算结果与文献[17]的研究结果进行对比, 如图5所示。图中纵坐标为圆柱表面自然对流传热 平均Nu,横坐标为圆柱间距。在圆柱间距*S/D*为4~ 10,*Ra*=1×10<sup>3</sup>时,本文数值模拟结果与文献[17]的 研究结果一致,证实了本文计算模型的准确性。本 文数值计算采用的熔盐为低熔点四元混合硝酸盐, 其物性取值可参考文献[18]。



Fig. 5 Model accuracy verification

# 2 结果与讨论

# 2.1 竖直排列圆柱表面熔盐自然对流传热规律

本文分别分析了管排间距 *S/D*=5~10时圆柱表面自然对流传热规律。体积热流 *Q*,=1×10<sup>7</sup> W/m<sup>3</sup>,圆柱直径 *D*=4 mm,圆柱间距 *S/D*=6时5根竖排圆柱表面的温度分布如图6所示。



图 6 S/D=6 时圆柱表面温度分布 Fig. 6 Temperature distribution around cylinders when S/D=6

表1为对应条件下竖排圆柱表面从底部到顶部 不同圆柱表面局部对流传热系数。由图6和表1可 以看出,圆柱间距*S/D*=6~10时,最底部圆柱表面的 局部对流换热系数*h*<sub>1</sub>最小,这是因为上部圆柱受到 下部圆柱羽流的速度冲击作用,使得圆柱与周围熔 盐流体的换热增强,上部圆柱周围的对流换热系数 增大。

	表1	竖直排列圆柱表面局部对流换热系数
Tab. 1	Loc	al convective heat transfer coefficient around th

	$W/(m^2 \cdot K)$				
而日					
坝目 -	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$
S/D=5	727.45	768.35	751.76	731.84	713.89
S/D=6	732.84	791.61	782.61	767.12	752.60
S/D=7	726.86	809.26	806.97	796.07	783.46
<i>S/D</i> =8	723.51	823.89	827.47	820.36	810.19
<i>S/D</i> =9	723.55	837.15	845.81	841.75	833.55
S/D=10	723.98	848.55	861.95	860.49	854.53

当*S*/*D*=5~7时,第2根圆柱由于受到最底部圆 柱羽流的速度冲击作用局部对流传热系数h<sub>2</sub>最高; 当*S*/*D*=8~10时,第3根圆柱表面局部对流传热系数 h<sub>3</sub>最大。这是由于圆柱与周围熔盐流体换热,使得圆柱周围熔盐温度越来越高,顶部圆柱表面温度与圆柱周围流体温差减小,顶部圆柱自然对流传热减弱。同时,底部圆柱表面自然对流诱导流体流动的冲刷作用,使得圆柱表面自然对流传热增强;当 *S/D*≥8时,从底部第2根圆柱开始,竖直排列的圆柱 表面局部自然对流传热系数均有明显的升高,这是 由于上部圆柱受下部圆柱羽流的速度冲击作用占 主导地位,从而使圆柱与周围流体的自然对流传热 增强。

#### 2.2 管排中单根圆柱表面Nu的变化

在不同的Ra下,6根圆柱管排中某一圆柱表面 Nu(Nu<sub>i</sub>)与底部圆柱表面Nu(Nu<sub>1</sub>)的比值随圆柱位 置的变化如图7所示。横坐标(X/H)为管排圆柱中 圆柱的位置。X/H=0.1为底部圆柱,X/H=1为顶部 圆柱。由此可见,单根圆柱表面自然对流换热的增 强和减弱主要取决于管排间距S/D的大小。在相同 的Ra条件下,管排间距越小,自然对流换热呈现出 减弱的趋势,圆柱对周围流体的预热占主导地位; 相反,管排间距越大,自然对流换热呈现出增强的 趋势,底部圆柱自然对流对上部圆柱的冲刷占主导 地位。

当*Ra*=1.2×10<sup>3</sup>时,随着管排间距*S/D*的增加,单 根圆柱表面的*Nu*也逐渐增大。*S/D*=5时,从第3根 圆柱开始,圆柱表面*Nu*均小于最底部圆柱的*Nu*,并 随着圆柱位置的增加,下降趋势明显。当*S/D*增大 时,单根圆柱表面*Nu*随着位置的增加,下降趋势逐 渐趋于平缓,在*S/D*>8时,不同位置处单根圆柱 *Nu/Nu*<sub>1</sub>均大于1。在相同圆柱间距条件下,随着*Ra* 的增大,同一位置处单根圆柱的*Nu/Nu*<sub>1</sub>均增大。

在 Ra=1.2×10<sup>3</sup>下,分别模拟了不同数量的圆柱 组成的管排间熔盐自然对流换热情况,圆柱间距分 别为 S/D=6,8,10 时,不同圆柱表面相对 Nu (Nu<sub>i</sub>/Nu<sub>1</sub>)随圆柱位置 X/H的变化规律如图 8 所示。 可见,随着管排中圆柱根数的增加,在不同位置 X/H 的圆柱表面 Nu<sub>i</sub>/Nu<sub>1</sub>近似是重合的。可见,管排中任 一圆柱表面自然对流传热 Nu<sub>i</sub>仅仅与其下部的圆柱 根数有关,几乎不受其上部圆柱根数的影响。

图 8 中, *S*/*D*=6 时, 第 2 根圆柱表面的自然对流 传热最大。从第 2 根开始, 圆柱位置越高, 其表面自 然对流传热就越小。由此可见, 竖排圆柱表面自然 对流传热的强弱是由圆柱在管排中的位置决定的。 在圆柱间距较小时(*S*/*D*=6), 随着高度的增加, 受下 部圆柱的羽流影响, 使得上部圆柱处于下部圆柱的 热羽内, 导致上部圆柱周围流体温度升高, 上部圆 柱表面温度与周围流体之间的温差减小, 对流传热



图7 不同 Ra 和 S/D下, Nu<sub>i</sub>/Nu<sub>1</sub>随 X/H 的变化 Fig. 7 Nu<sub>i</sub>/Nu<sub>1</sub> varying with X/H at different Ra and S/D



图 8 Ra=1. 2×10<sup>3</sup>, 2~8 根圆柱在不同 S/D 时 Nu<sub>i</sub>/Nu<sub>1</sub>的变化 Fig. 8 Distributions of Nu<sub>i</sub>/Nu<sub>1</sub> in the array with 2 to 8 vertical pillars with different S/D and Ra=1. 2×10<sup>3</sup>

减弱;当圆柱间距逐渐增大时(S/D=10),下部圆柱 由于浮升力诱导的自然对流冲刷作用增强,圆柱表 面自然对流换热增强。

## 2.3 管排表面熔盐平均自然对流传热

管排表面熔盐平均自然对流传热规律对于换 热器的设计至关重要<sup>[19-20]</sup>。管排圆柱表面熔盐自然 对流传热*Nu*。由下式计算得到

$$Nu_{a} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} Nu_{i} \circ$$
(5)

不同管排间距条件下,管排圆柱表面熔盐自然 对流传热*Nu*。随圆柱根数的变化规律如图9所示。 图9a为*S/D=5*时,不同*Ra*条件下2~8根管排圆柱表 面熔盐自然对流传热*Nu*。随圆柱根数的变化。由图 可知,一定*Ra*条件下管排表面熔融盐自然对流传热 *Nu*。均随着圆柱根数的增加而减小;但随着*Ra*的增 加,管排圆柱表面熔盐自然对流传热*Nu*。也增加。 当*S/D=*8时,管排圆柱表面自然对流传热*Nu*。随圆柱 根数的影响减小,如图9b所示。但是,当*S/D*=10时,不同*Ra*条件下,管排圆柱表面自然对流传热*Nu*。随管排中圆柱根数的增加而增大,如图9c所示。





不同圆柱管排和 Ra下, Nu<sub>a</sub>随 S/D 的变化如图 10 所示。随着 Ra 的增加, 管排圆柱表面熔盐自然 对流传热 Nu<sub>a</sub>增加, 且随着管排间距 S/D 的增大而增 加。管排间距对管排圆柱表面熔盐自然对流传热 Nu<sub>a</sub>的影响随着圆柱根数的增加先减小后增大。S/D =8时,Nu<sub>a</sub>不受圆柱根数的影响。S/D<8时,管排圆 柱表面熔盐自然对流传热Nu<sub>a</sub>随着管排圆柱数量的 减小而增大;当8<S/D<10时,管排圆柱表面熔盐 自然对流传热Nu<sub>a</sub>随着管排数量的增加而。可见, 在实际的应用中,管排间距的选择十分重要。



图 10 不同圆柱管排和 Ra 下 Nu<sub>a</sub>随 S/D 的变化 Fig. 10 Nu/Nu<sub>1</sub> varies with S/D, at different array of cylinders and Ra number

#### 2.4 竖排圆柱表面自然对流传热关联式

管排圆柱表面熔盐自然对流传热Nu<sub>a</sub>与圆柱间 距(S/D)、管排圆柱的根数(N)以及Ra的大小有关。 为了对多根竖排圆柱表面熔盐自然对流传热进行 预测,本文在数值计算的基础上,分析不同因素对 管排圆柱熔盐平均自然对流传热影响关联式。分 析发现管排圆柱表面熔盐自然对流传热Nu<sub>a</sub>可以用 式(6)进行预测,预测结果如图11所示。

 $Nu_{a} = Ra^{0.235} \left\{ 0.315 \ln \left[ \left( S/D \right)^{0.4} \times N^{-0.2} \right] + 0.547 \right\}$ 

 $(5 \le N \le 8, 1\ 000 \le Ra \le 8\ 000, 5 \le S/D \le 10)$  (6)







拟合关联式(6)与计算值吻合较好,在1×10<sup>3</sup> ≪*Ra* ≪ 8×10<sup>3</sup>的范围内,数值计算的值基本都在拟合线和误差之内,关联式的相对误差为±4%。因此,管排圆柱表面熔盐自然对流传热*Nu*<sub>a</sub>可以由关联式(6)进行预测。

# 3 结论

管排中每一圆柱表面自然对流传热系数的大 小与该圆柱在管排中的位置与圆柱间距*S/D*有关。 管排中某一圆柱表面自然对流传热不受其顶部圆 柱根数的影响,仅受其下部圆柱的影响。

管排圆柱表面熔盐自然对流传热Nu<sub>a</sub>是由圆柱 的间距S/D,Ra及圆柱根数共同决定,当S/D较小(S/ D=5)时,Nu<sub>a</sub>随着管排中圆柱根数的增加而减小;随 着S/D的增大,多根圆柱Nu<sub>a</sub>随着管排中圆柱根数的 增加而增大。

不考虑黏性耗散影响,竖排圆柱表面熔盐自然 对流传热规律可以用简单的关联式进行预测。

# 参考文献:

- [1] LIU M, TAY S N H, BELL S, et al. Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 1411-1432.
- [2] ACHKARI O, FADAR A E.Latest developments on TES and CSP technologies - energy and environmental issues, applications and research trends [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 167:1359-4311.
- [3]AWAN A B, ZUBAIR M, PRAVEEN R P, et al.Design and comparative analysis of photovoltaic and parabolic trough based CSP plants[J].Solar Energy, 2019, 183:551-565..
- [4]徐其利,孙杰.用于太阳能光热发电系统的CaO/Ca(OH)<sub>2</sub>化学 储 热 技 术 综 述 [J]. 华 电 技 术, 2020, 42 (4) : 1-11. XU Qili, SUN Jie. Review of CaO/Ca(OH)<sub>2</sub> chemical heat storage technology for CSP[J]. Huadian Technology, 2020, 42(4):1-11.
- [5] HUANG Z J, ZOU Y K, WEI X L, et al. Mixed convection heat transfer of molten salt outside coiled tube [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, 120 (2). DOI: 10.1016/j. icheatmasstransfer. 2020.1 05004.
- [6] CHEN H, CHEN X, WU Y T, et al. Experimental study on forced convection heat transfer of KNO<sub>3</sub>-Ca (NO<sub>3</sub>) <sub>2</sub>+SiO<sub>2</sub> molten salt nanofluid in circular tube [J]. Solar Energy, 2020,206:900-906.
- [7]韩伟,崔凯平,赵晓辉,等.光热电站储热系统设计及储罐

预热方案研究[J].华电技术,2020,42(4):42-46.

HAN Wei, CUI Kaiping, ZHAO Xiaohui, et al. Design for CSP plants' energy storage system and research on preheating strategy with tanks [J]. Huadian Technology, 2020,42(4):42-46.

- [8]崔凯平,韩伟,倪煜,等.熔盐储罐热分层混温过程研究
  [J].华电技术,2020,42(5):8-13.
  CUI Kaiping, HAN Wei, NI Yu, et al. Research on thermal stratification and control process in molten salt storage tanks
  [J].Huadian Technology,2020,42(5):8-13.
- [9]LU Y W, ZHANG Y H, ZHANG C C, et al. Experimental study on heat discharging characteristic of single tank with different annular baffle conditions [J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44: 11434–11442.
- [10]ZHANG C C, SHI S L, LU Y W, et al. Heat discharging and natural convection heat transfer performance of coil heat exchanger in single molten salt tank [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 166. DOI: 10.1016/j. applthermaleng. 2019.114689.
- [11]YOUSEFI T, ASHJAEE M. Experimental study of natural convection heat transfer from vertical array of isothermal horizontal elliptic cylinders [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, 32:240–248.
- [12]REYMOND O, MURRAY D B, O'DONOVAN T S.Natural convection heat transfer from two horizontal cylinders [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 32 (8) : 1702–1709.
- [13]SPARROW E M, NIETHAMMER J E. Effect of vertical separation distance and cylinder-to-cylinder temperature imbalance on natural convection for a pair of horizontal cylinders[J].Journal of Heat Transfer, 1981, 103:638–644.
- [14]ZAHRA R, NENAD S. Natural convection heat transfer from a bundle of heated circular cylinders with staggered arrangement immersed in molten solar salt[J].International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 156. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119032.
- [15]ZAHRA R, NENAD S. Natural convection heat transfer from a bundle of in-line heated circular cylinders immersed in molten solar salt [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 148. DOI: 10.1016/j. ijheatmasstransfer.2019.119032.
- [16]LU Y W, YU Q, DU W B, et al. Natural convection heat transfer of molten salts around a vertically aligned horizontal cylinder set[J].International Communications in Heat & Mass Transfer, 2016, 76:147-155.
- [17]CORCIONE M. Correlating equations for free convection heat transfer from horizontal isothermal cylinders set in a vertical array [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2005, 48(17): 3660–3673.
- [18] REN N, WU Y T, MA C F, et al. Preparation and thermal

properties of quaternary mixed nitrate with low melting point[J].Solar Energy Materials & Solar Cells, 2014, 127: 6-13.

- [19]张晓盼,鹿院卫,于强,等.超声-微波法制备熔盐纳米复 合材料试验研究[J].华电技术,2020,42(4):12-16.
   ZHANG Xiaopan, LU Yuanwei, YU Qiang, et al.
   Experimental study on preparation of a molten salt nanocomposite by ultrasonic dispersion and microwave
- method[J].Huadian Technology, 2020, 42(4):12–16.
- [20]陈睿哲,熊亚选,张慧,等.储能供热熔盐换热器设计及 运行特性分析[J].华电技术,2020,42(12):54-59.

CHEN Ruizhe, XIONG Yaxuan, ZHANG Hui, et al. Design

and dynamic performance analysis on a molten salt heat exchanger for energy storage and heating [J]. Huadian Technology, 2020, 42(12):54-59.

(本文责编:张帆)

#### 作者简介:

于强(1988—),男,山东菏泽人,在读博士研究生,从事 熔盐传热蓄热方面的研究工作(E-mail;yuqiang@emails.bjut.edu.cn)。

鹿院卫\*(1971—),女,陕西蓝田人,教授,博士生导师, 博士,从事可再生能源利用方面的研究工作(E-mail: luyuanwei@bjut.edu.cn)。

# 

# "能源物联网下的电力系统需求侧负荷调控技术"专刊征稿启事

随着碳达峰、碳中和"3060"目标的提出,充分利用光伏、风电等新能源替代化石能源,减少碳排放,已成为我国经济进入高 质量发展的内在要求和必然趋势。可以预见,含高比例新能源的电力系统将很快成为现实。然而,新能源发电受天气影响波 动较大,具有高度不确定性。为消纳波动的新能源,维持电力供给侧和需求侧的实时平衡,以火电为代表的大量传统机组频繁 启停、爬坡,运行能效低、排放高。正在兴起的5G和物联网技术赋予了需求侧海量负荷的实时监测和调控能力,提供了维持电 网平衡的新途径。可通过灵活调整储能电池、电动汽车、空调等负荷资源的用电,在保证用户生活生产需求的前提下,为电网 提供调峰、调频、备用等服务。随着新能源的增加和传统机组的减少,挖掘需求侧海量负荷的调节潜能是实现新能源高效清洁 消纳、维持电网安全经济运行的有效途径。

为此,《华电技术》特推出"能源物联网下的电力系统需求侧负荷调控技术"专刊,邀请澳门大学智慧城市物联网国家重点 实验室惠红勋博士、澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室张洪财助理教授、浙江大学电气工程学院丁一教授担任特约主 编,共同探讨需求侧负荷调控领域发展的前沿成果、最新进展、关键技术及未来发展方向,欢迎业内同仁踊跃投稿。

#### 一、征稿范围(包括但不限于)

(1)负荷资源的建模与调节能力评估方法。

(2)大规模负荷资源的控制与优化方法。

(3)基于5G和能源物联网的负荷控制技术。

(4)基于数据驱动和数字孪生的负荷控制技术。

(5)多能源形态的负荷资源协同控制技术。

(6)极端事件下提升系统弹性的负荷调控技术。

(7)负荷资源的低碳用能建模与量化评估技术。

(8)负荷资源参与电力市场、碳排放市场的机制设计。

#### 二、时间进度

专刊拟于2021年9月30日截稿,2021年10期(10月25日)后择期出版。

#### 三、征稿要求

(1)专刊只收录未公开发表的论文,拒绝一稿多投。作者对论文内容的真实性和客观性负责。

(2)按照《华电技术》论文格式要求使用Word软件排版,论文模板请在网站(www.hdpower.net)首页"作者中心"下载。

(3)请保留论文图片、曲线和表格原始文件,并在投稿时按规定提交。

(4)论文作者应遵守相关学术不端规定。

#### 四、投稿方式

(1)在线投稿(推荐):登录在线采编系统(www.hdpower.net),完成在线全文投稿,欢迎投稿时推荐审稿人。

(2)邮箱投稿:hongxunhui@um.edu.mo(惠博士);hdjs-chd@vip.163.com(编辑部)。

(3) 咨询联系: 刘芳 0371-58501060 13838002988; 杨满成 010-63918755 13801175292。