



微细金属丝表面熔融盐自然对流传热实验 与数值模拟研究

鹿院卫*, 李小丽, 李强, 吴玉庭, 马重芳

北京工业大学环境与能源工程学院, 传热强化与过程节能教育部重点实验室, 北京 100124

* E-mail: luyuanwei@bjut.edu.cn

收稿日期: 2013-02-01; 接受日期: 2013-04-18

北京市自然科学基金(批准号: 3132012)、国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2010CB227103)和北京市科委科技计划(批准号: D121100001012002)资助项目

摘要 为了得到熔融盐自然对流传热规律, 本文在数值计算的基础上, 采用焦耳加热方法首先对水平微细金属丝在空气和水中的自然对流传热规律进行了实验研究, 在验证了实验方法, 实验系统及实验设备选择的可靠性后, 对熔融盐硝酸锂的自然对流传热规律进行了实验研究. 结果表明, 无论是计算结果还是实验结果, 都与考虑黏性耗散影响的 Fand 关联式符合较好.

关键词

焦耳加热
自然对流
数值模拟
熔融盐

在化石资源紧缺、环境恶化的今天, 太阳能高温发电成为人们的研究热点. 传热蓄热系统是太阳能发电中的重要环节, 目前在太阳能发电的商业应用中主要采用混合熔融盐作为传热蓄热介质. 熔融盐的自然对流传热规律对太阳能发电系统中蓄热器及熔盐罐中加热系统的设计均有着十分重要的意义, 但是, 到目前还没有见到对熔融盐自然对流实验研究的公开报道. Qian 等人^[1]仅对熔盐反应堆中方腔内熔融盐的流动特性进行了二维自然对流数值分析, 指出随着瑞利数(Ra)的增大, 自然对流加强, 但并未给出熔融盐自然对流传热关联式. 本文在数值模拟计算的基础上对熔融盐的自然对流传热规律进行了实验研究.

对于熔融盐的自然对流规律虽未见报道, 但有关空气、水等其他介质的自然对流传热规律可以成为研究熔融盐自然对流传热规律的依据. 目前, 在自然对流传热规律中最经典的是 Morgan 关联式^[2], 其是

在总结前人大量实验数据的基础上, 得出水平圆柱表面自然对流传热规律, 如下:

$$Nu = CRa^m \quad (10^{-10} < Ra < 10^{12}), \quad (1)$$

其中 C 和 m 取决于 Ra 的大小.

几十年来, 不同的研究者针对不同的传热介质(气体和液体)对不同材质(铜、铂、钛)的圆柱(管)表面自然对流传热规律进行研究, 根据自己的实验数据拟合出不同的关联式. 如 Tsubouchi 和 Masuda^[3]对铂丝在硅油中进行水平圆柱表面自然对流实验, 拟合出努塞尔数(Nu)与 Ra 的关联式:

$$Nu = 0.36 + 0.048Ra^{0.125} + 0.52Ra^{0.25} \quad (10^{-6} < Ra < 10^9). \quad (2)$$

并得出在 Ra 接近于零($< 10^{-7}$)时, Nu 为常数 0.36.

Fand 等人^[4]对空气、水和 3 种不同浓度的硅油进行实验, 分析实验数据发现, 黏性耗散对自然对流传热的影响不可忽略. Fand 和 Brucjer 总结了大量的前人实验数据并考虑黏性耗散的影响, 提出了 Fand 关

联式^[5]:

$$Nu=0.400Pr^{0.0432}Pa^{0.25}+0.503Pr^{0.0334}Ra^{0.0816}+0.958Ge^{0.122}/(Pr^{0.0600}Ra^{0.0511})$$

$$(10^{-8} \geq Ra \geq 10^8), \quad (3)$$

因为 Fand 关联式考虑了黏性耗散的影响, 在 Ra 较小的情况下可以给出较好的预测结果. 分析以上 3 个关联式发现, 不同研究者取得的实验数据不同, 得到的关联式具有较大的分散度, 因此提出的各关联式有着很大的差异. 本文在数值模拟及实验的基础上对空气、水和熔融盐的自然对流传热规律进行研究, 并与经典的关联式进行对比, 确定出能够反映熔融盐自然对流传热规律的关联式.

1 水平微细圆柱表面水与硝酸锂的自然对流传热数值模拟

以不同直径的铂丝为模拟加热段, 建立二维、对称的数值模拟模型, 模型尺寸为长 50 mm, 宽 240 mm 的计算域, 网格划分参照 Xin 等人^[6]提到的方法, 按一定的比率围绕中心圆柱建立由内向外周向均匀的网格. 考虑到由于浮升力的作用, 空间内会形成向上的羽流, 因此宽长比较大, 如图 1 所示.

根据集中参数法, 当毕渥数 $Bi = (\delta/\lambda)/(1/h) \geq 0.1$ (δ/λ 为固体导热热阻, $1/h$ 为固体表面对流热阻)

时, 可以认为整个固体温度均匀, 可以忽略固体内部网格. 经过计算, 本文计算模型满足上述条件.

计算域上部边界层设为压力出口, 其余 3 边设为恒温固体壁面, 采用隐式稳态模型, 利用 SIMPLE 算法进行二阶迎风计算. 在网格无关性验证的基础上, 进行水和熔融盐的自然对流传热研究. 图 2 为计算得到水的自然对流传热研究中铂丝表面平均温度的网格无关性验证. 图 3 为直径分别为 0.1, 0.4 和 1 mm 的铂丝表面硝酸锂的自然对流数值模拟网格无关性验证.

分别以图 2 和 3 中标出的网格数对微细圆柱施加不同的体积热流密度, 改变细丝表面温度. 分别分析

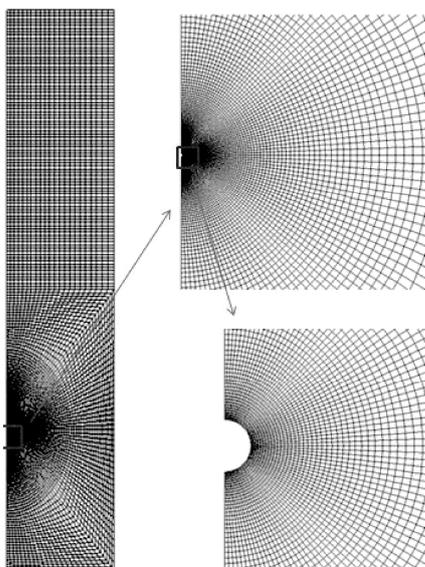


图 1 网格划分示意图

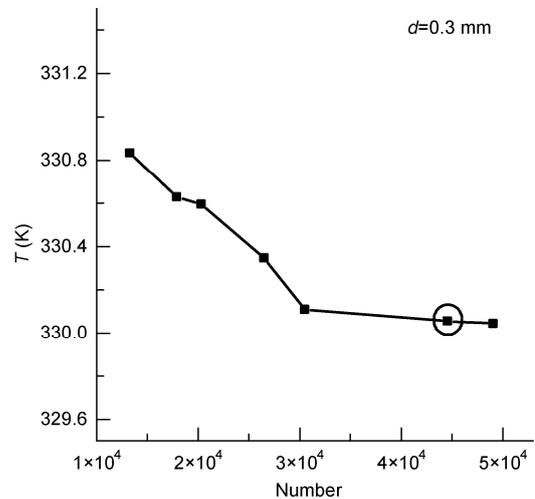


图 2 铂丝在水中模拟网格无关性验证

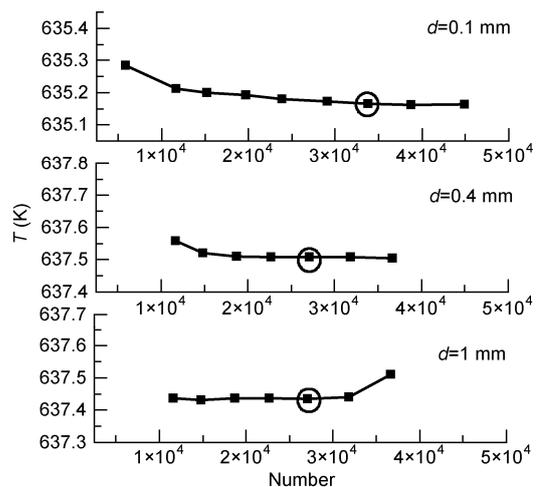


图 3 铂丝在 $LiNO_3$ 中模拟网格无关性验证

以水和硝酸锂为介质水平圆柱表面自然对流传热规律.

计算过程中, 水的物性取自软件 EES(Engineering Equation Solution)中的物性包, 熔融盐硝酸锂的密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$ 和黏性系数 $\eta(\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1})$ 分别由文献[7]和[8]确定, T 为熔融盐的绝对温度.

$$\rho_s = 2068 - 0.546T, \quad (4)$$

$$\eta = (20.4645 + 1.34189 \times 10^{-2}T - 1.31061 \times 10^{-4}T^2 + 1.06106 \times 10^{-7}T^3) \times 10^{-3}. \quad (5)$$

比热与导热系数^[8]分别为 $C_p = 1777 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $k = 0.599 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

将水和硝酸锂的自然对流传热模拟结果分别与 Tsubouchi, Morgan 及 Fand 关联式进行比较, 结果如图 4 和 5 所示.

可见, 不同的关联式之间差别较大, Tsubouchi 和 Morgan 关联式只是关于 Ra 数的函数, 两者相差相对较小. 而 Fand 关联式因考虑了黏性耗散的影响, 水和熔融盐的自然对流传热模拟结果与 Fand 关联式具有较好的一致性, 相对误差在 $\pm 10\%$ 范围内.

2 水平圆柱表面熔融盐自然对流实验研究

2.1 实验方法验证

由于目前还没有得到任何有关熔融盐自然对流传热实验的公开报道, 因此本文首先以空气作为传

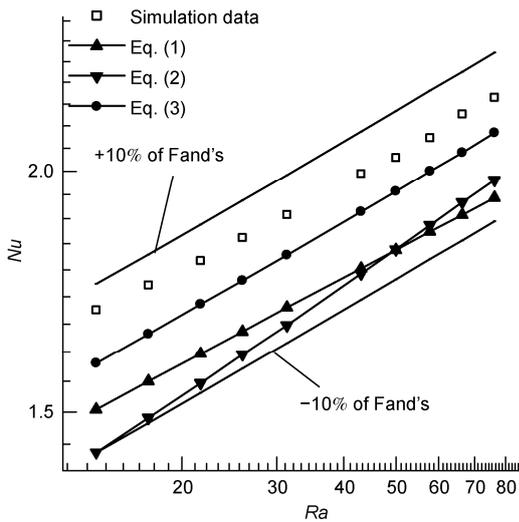


图 4 水的模拟结果与经典关联式的比较

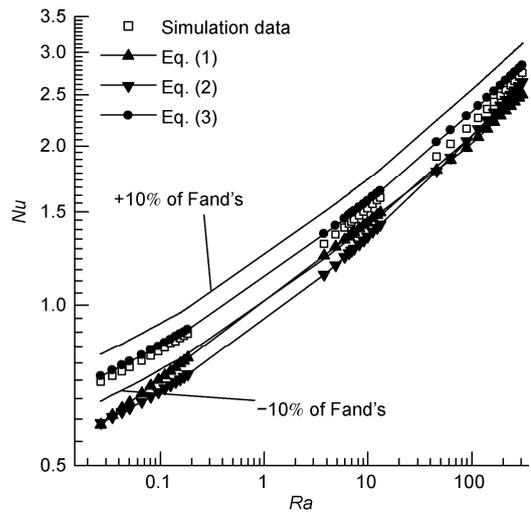


图 5 硝酸锂的模拟结果与经典关联式的比较

热介质进行实验研究, 以验证本文采用的实验方法的可靠性.

微细圆柱表面空气的自然对流传热实验在 $2 \times 1 \times 2 \text{ m}^3$ 的封舱内进行, 以减小周围环境对自然对流传热的影响. 直径分别为 0.285 和 0.360 mm , 长度分别为 340 和 590 mm 的微细铜丝通过铜焊焊接在直径为 6 mm 的铜棒上, 水平固定在密封舱内. 测试段铜丝的长度分别由长为 1 m , 最小量程为 0.5 mm 的钢尺测得, 直径由精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$ 的千分尺测量, 每隔一定距离取一个测点测得直径值求平均. 在进行自然对流传热实验之前, 通过标定实验(图 6)得到微细铜丝电阻随温度的变化关系, 然后采用焦耳加热法对微细铜丝进行自然对流传热实验. 实验系统如图 7 所示.

实验通过调节直流稳压电源(DH1716A-4)的恒流输出改变加到微细铜丝上的功率. 回路电流和测试段电压分别由 FLUKE 45/CH 万用表和 Agilent

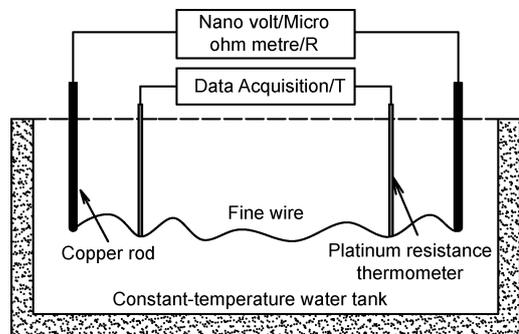


图 6 标定实验示意图

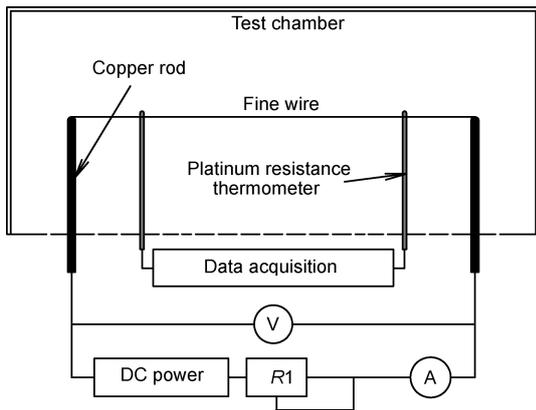


图7 空气中自然对流传热实验系统

34420A 纳伏-微欧表测得, 根据欧姆定律 ($R = U / I$) 得到测试段铜丝的电阻, 根据标定实验得到的电阻与温度的变化曲线计算出细丝的表面温度. 细丝周围流体温度采用 4 个 PT100 热电阻测量, 取其平均值, 并由数据采集仪 Agilent 34970A 记录.

实验 Nu 数由下列公式计算得到:

$$Nu = hdl/k = Qd/A(t_s - t_0)k \quad (6)$$

其中 Q 为细丝表面自然对流换热量, $Q = UI - Q_r$; Q_r 为辐射换热, $Q_r = \varepsilon A \sigma_b (T_s^4 - T_0^4)$; ε 为固体发射率; $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$; h 为自然对流换热系数, $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$; k 为介质的导热系数, W/m^2 ; d 为细丝直径, m ; A 为细丝表面积, $A = \pi dl$, m^2 ; t_s 为细丝表面温度, K ; t_0 为周围环境温度, K .

实验结果如图 8 所示, 可见空气的自然对流传热结果与 Fand 关联式重合性较好, 相对误差在 $\pm 10\%$ 范围内. 证明了本文实验方法的准确性.

2.2 实验系统可靠性验证

由于熔融盐的自然对流传热实验要在恒温炉中进行, 所以利用水进行实验系统可靠性的验证. 实验方法采用空气中的自然对流传热实验方法, 各实验设备不变, 与之不同的是实验空间将密封舱改为恒温炉, 用电阻较大的铂丝代替铜丝作为测试段, 支撑铂丝的铜棒固定在恒温炉的盖子上. 与图 5 不同的是, 将测试段与支撑部件倒转 180° 放置在恒温炉内. 水的自然对流传热标定实验直接在恒温炉中进行标定, 实验方法和实验设备不变.

图 9 为空气与水的自然对流传热实验数据. 与前

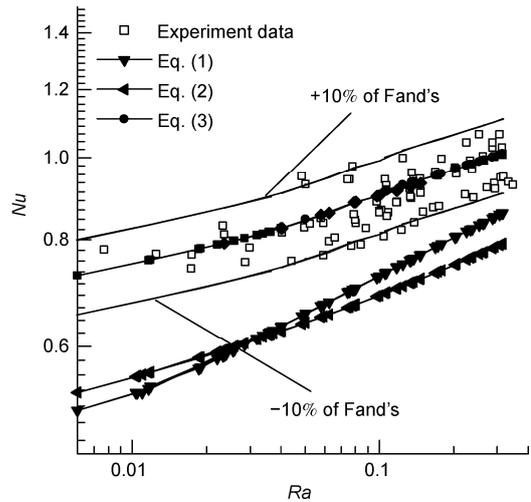


图8 空气中实验数据与经典关联式的比较

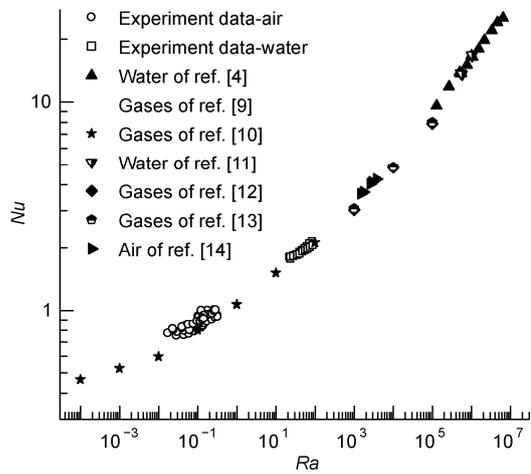


图9 空气、水中实验数据与文献中数据的比较

人实验和模拟数据的比较可以看出, 各实验数据基本在一条曲线上, 由此验证了本实验系统的可靠性.

图 10 为空气与水的自然对流传热实验数据与 Fand 关联式的比较, 可见, 实验结果与 Fand 关联式具有很好的一致性, 进一步验证了实验系统的可靠性.

2.3 熔融盐自然对流传热结果

在实验方法正确及实验系统具有可靠性的基础上, 采用相同的实验方法和实验系统对熔融盐自然对流传热规律进行实验研究.

在 350°C 条件下硝酸锂的导电性是常温下水的导电性的 2.43×10^5 倍, 导电性不可忽略, 所以, 在对硝酸锂进行自然对流实验之前要对铂丝表面进行绝

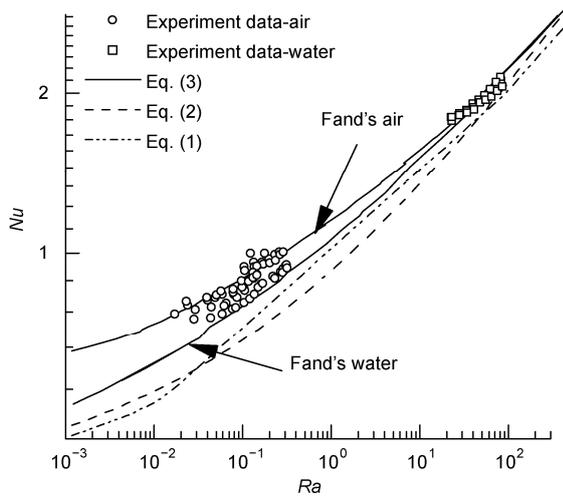


图 10 空气、水中的实验数据与经典关联式的比较

缘处理. 熔融盐在垂直方向的分层情况比较严重, 其在恒温炉中最大温差达到了 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$, 对实验结果影响较大. 为了减小测温误差的影响, 首先测量恒温炉内不同深度熔融盐的温度, 比较发现, 在距离底面 15 cm 以上温度基本恒定, 温差小于 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$, 确定铂丝固定在恒温炉中距离底面 15 cm 高度处. 其次, 将热电阻的测温部分折为 L 型, 4 根热电阻的测温段与铂丝固定在同一水平面距铂丝 1 cm 处的等温线上.

实验结果表明, 硝酸锂的实验数据大多在 Fand 关联式的 $\pm 20\%$ 范围内, 但与空气和水中的自然对流传热实验数据相比, 熔融盐的实验数据比较分散, 如图 11 所示. 尽管熔融盐自然对流 Nu 数与 Fand 关联式预测值偏差较大, 但在较大的 Ra 数范围内, 与前人数据符合较好, 如图 12 所示. 具体的误差原因, 需要在后续实验中细致分析硝酸锂在不同 Ra 范围内的数据分布规律, 判定引起实验数据与关联式趋势差异性的原因.

2.4 实验误差分析

误差除了来源于温度分层外, 主要来自与 Nu 数相关的温度测量、细线长度和直径、电压和回路电流. 通过计算最大误差单一参数, 发现对努塞尔数的最大的误差是 4.25% .

3 结论

1) 微细金属丝表面空气和水中的自然对流传热

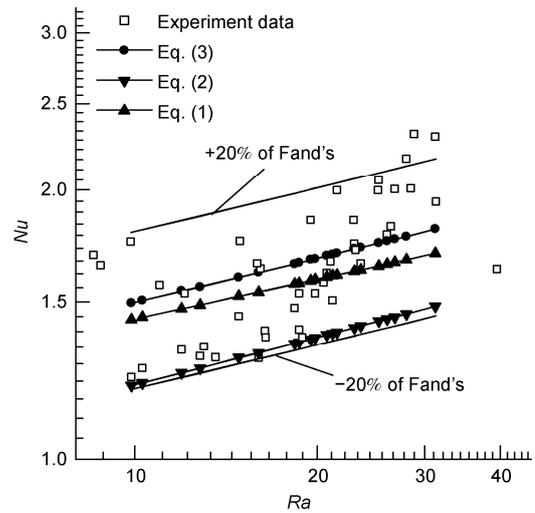
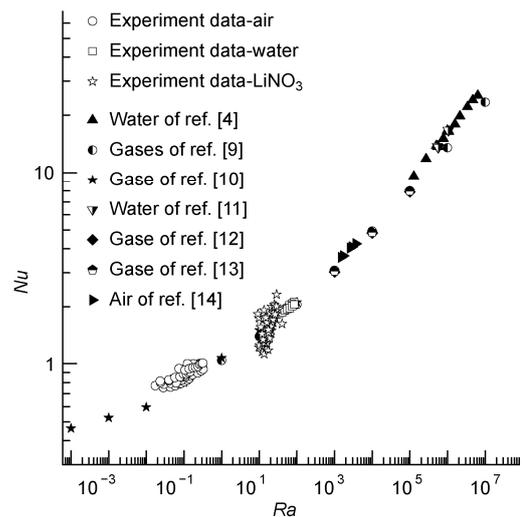


图 11 熔融盐中的实验数据与 Fand 关联式的比较

图 12 LiNO_3 中实验数据与空气、水中实验数据及文献中的数据比较

规律与 Fand 关联式有很好的 consistency.

2) 熔融盐的自然对流传热数值模拟结果与 Fand 关联式预测值之间误差在 $\pm 10\%$ 范围内, 而实验结果则在 $\pm 20\%$ 范围内, 误差原因需要在以后的实验中进行深入的分析.

3) 本文为小 Ra 数熔融盐自然对流传热分析提供了基础数据, 具有广泛的实用性.

参考文献

- 1 Qian L B, Qiu S Z, Zhang D L, et al. Numerical research on natural convection in molten salt reactor with non-uniformly distributed volumetric heat generation. *Nucl Eng Des*, 2010, 240: 796–896
- 2 Morgan V T. The overall convective heat transfer from smooth circular cylinders. *Adv Heat Transf*, 1975, 11: 199–264
- 3 Tsubouchi T, Masuda H. Heat transfer by natural convection from horizontal cylinders at low Rayleigh numbers. *Rep Inst High Speed Mech*, 1967, 19: 205–219
- 4 Fand R M, Morris E W, Lum M. Natural convection heat transfer from horizontal cylinders to air, water and silicone oils for Rayleigh numbers between 3×10^2 and 2×10^7 . *Int J Heat Mass Transf*, 1977, 20: 1173–1184
- 5 Fand R M, Brucjer J. A correlation for heat transfer by natural convection from horizontal cylinders that accounts for viscous dissipation. *Heat Mass Transfer*, 1983, 26: 709–726
- 6 Xin S H, Duluc M C, Lusseyran F, et al. Numerical simulations of natural convection around a line-source. *Int J Numer Methods Heat Fluid Flow*, 2004, 7: 830–850
- 7 谢钢. 熔融盐理论与应用. 北京: 冶金工业出版社, 1998
- 8 张丽娜. 太阳能高温熔盐蓄热的实验研究. 硕士学位论文. 北京: 北京工业大学, 2006
- 9 Kuehn T H, Goldstein R J. Numerical solution to the Navier-Stokes equations for laminar natural convection about a horizontal isothermal circular cylinder. *Int J Heat Mass Transf*, 1980, 23: 971–979
- 10 Hesse G, Sparrow E M. Low Rayleigh number natural convection heat transfer from high-temperature horizontal wires to gases. *Int J Heat Mass Transfer*, 1974, 17: 796–798
- 11 Fand R M, Keswani K K. Mass rate of flow in the natural convection plume above a heated horizontal cylinder immersed in a liquid. *J Heat Transf*, 1973, 15: 1175–1191
- 12 Saitoh T, Sajiki T, Maruhara K. Bench mark solutions to natural convection heat transfer problem around a horizontal circular cylinder. *Int J Heat Mass Transf*, 1993, 36: 1251–1259
- 13 Wang P, Kahawita R, Nguyen T H. Numerical computation of the natural convection flow about a horizontal cylinder using splines. *Numer Heat Tr A–Appl*, 1990, 17A: 191–215
- 14 Özgür Atayılmaz Ş. Transient and steady-state natural convection heat transfer from a heated horizontal concrete cylinder. *Int J Therm Sci*, 2010, 49: 1933–1943