

# 用于生物反应器的旋转热管传热性能的研究

印彩霞 张 红 王中贤 陈 芳

(南京工业大学 能源学院 江苏 南京 210009)

**摘 要:** 在现有生物反应器的基础上 结合生物反应的特点 采用热管技术高效取热 研究开发出一种新型旋转热管生物反应器。该反应器采用热管本身作为搅拌轴 热管蒸发段置于生物反应器内 冷凝段采用旋转强制风冷。建立了旋转热管生物反应器的试验装置 以水为模拟介质 在不同操作条件下对用作搅拌轴的旋转热管的传热性能进行试验研究 结果表明所设计的旋转热管能有效地驱除生物反应热 并得出了旋转速度及反应温度对旋转热管传热性能的影响关系 这为选取用于高效取热的传热性能最佳的旋转热管提供了试验依据。

**关 键 词:** 旋转热管生物反应器; 旋转热管; 传热性能; 旋转速度; 反应温度

中图分类号: TK172.4; TK64 文献标识码: A

## 引 言

热管作为高性能传热元件,已被广泛应用于各技术领域,目前利用热管驱除反应热已成为有效途径之一。2002 年李冰峰等人应用热管的原理,将热管的优越性能应用于生物反应器设计加工了一种全新的集搅拌、气升及热管传热于一体的生物反应器,测定在不同的模拟介质体系、工况条件下反应器的温度分布。2003 年南京工业大学王煜等人对热管生物反应器的传递过程进行了研究<sup>[1]</sup> 结果表明热管生物反应器内温度分布均匀,通过改变工况条件均能维持反应温度在 30℃ 以上。2008 年雷照等人设计并制造了特殊形状的倒 J 型铜-水热管和倒 Z 型铜水热管用于搅拌釜 将其作为强放热反应的换热元件。

综上所述,以上热管生物反应器在温度分布均匀性上有所改善,传热效率有所提高,但冷却水的消耗并没有得到降低,且换热元件的增加减小了反应器的装填空间,降低了生产效率。本研究在上述基础上开发了一种采用热管作为搅拌轴<sup>[2]</sup>,冷凝段采用旋转强制风冷的生物反应器,并对各种不同工况下旋转热管的传热性能进行了试验研究,此反应器具有管外换热系数增强、装填空间增加和冷却水用

量少等优点。

## 1 试验装置与试验步骤

### 1.1 试验装置

旋转热管生物反应器的传热性能模拟试验装置如图 1 所示,实验选用 10 L 不锈钢平底生物反应器,反应器内布置 3 根功率为 300 W 的不锈钢加热棒以模拟生物反应热,通过变频调速电机使旋转热管实现变速转动,热管蒸发段置于反应液中,热管冷凝段布有众多环形散热片,随轴转动与冷空气形成强制对流,热管管壁温度由过孔式集流环通过滑环将镍铬-康铜热电偶所测得的温度信号传输出来。试验所用的热管内部工质为乙醇,管壳材料为 20 号锅炉用无缝钢管,充液率为 10%,热管的结构尺寸和热电偶布置如图 2 所示。

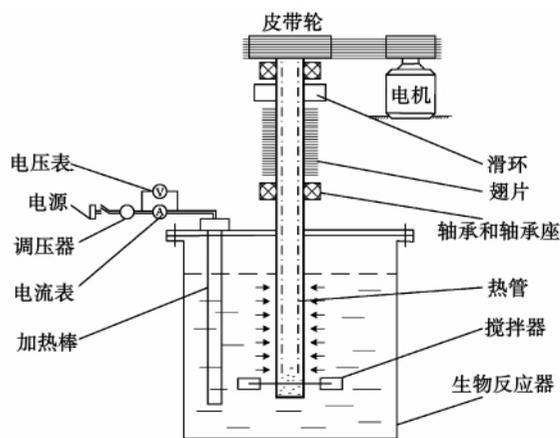


图 1 旋转热管生物反应器模拟试验装置

### 1.2 试验步骤

采用水作为模拟介质<sup>[3~6]</sup>,旋转速度分别取  $N = 93, 187, 280, 363$  和  $467$  r/min,试验时,在不同转速条件下调节加热功率(5~400 W),使得主流体温度(反应温度)分别达到  $T = 30, 40, 50, 60, 70$  和  $80$

收稿日期:2010-07-06; 修订日期:2010-09-14

基金项目:国家高新技术研究发展计划(863) 基金资助项目(2006AA05Z419)

作者简介:印彩霞(1984-),女,江苏泰州人,南京工业大学硕士研究生。

℃ 时, 记录各热电偶所测得的温度值及电流、电压、转速等所有参数值。

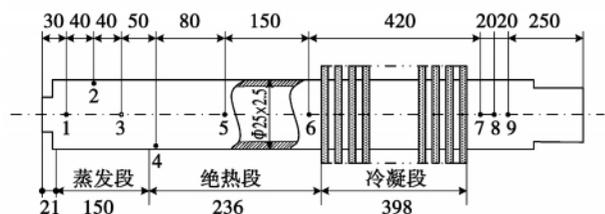


图 2 旋转热管结构及热电偶布置

### 1.3 试验数据处理

试验中, 热管的蒸发段置于反应液中, 加热棒提供的热量通过水传递给热管蒸发段, 再通过热管冷凝段的旋转运动将热量耗散在周围环境中。在这一过程中, 冷凝段管外换热系数、热管的输出功率、加热棒的输入功率及热管热阻的计算方法如下:

热管冷凝段管外换热系数  $h_{co}$ :

$$h_{co} = Nu\lambda / d_{co} \quad (1)$$

式中:  $Nu$ —换热方式为自然对流和旋转运动形成的强制对流共同影响<sup>[7]</sup>  $Nu = 0.18 [(0.5 Re^2 + Gr) Pr]^{0.315}$ ;  $\lambda$ —空气的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $d_{co}$ —热管冷凝段外径  $m$ 。

热管输出功率  $Q_c$ :

$$Q_c = h_{co} A_{co} (t_{co} - t_k) \quad (2)$$

式中:  $A_{co}$ —冷凝段管外换热面积,  $m^2$ ;  $t_{co}$ —冷凝段外壁温度,  $^{\circ}C$ ;  $t_k$ —冷源空气温度,  $^{\circ}C$ 。

加热棒输入功率  $Q_h$ :

$$Q_h = UI \quad (3)$$

式中:  $U$ —加热棒输入电压,  $V$ ;  $I$ —加热棒输入电流,  $A$ 。

热管热阻  $R$ :

$$R = (t_{co} - t_{eo}) / Q_c \quad (4)$$

式中:  $t_{eo}$ —蒸发段外壁温度,  $^{\circ}C$ 。

搅拌雷诺数  $Re$ :

$$Re = Nd_j^2 / 60\nu \quad (5)$$

式中:  $N$ —旋转速度,  $r/min$ ;  $d_j$ —搅拌器的直径,  $m$ ;  $\nu$ —液体的运动黏度,  $m^2/s$ 。

## 2 结果与讨论

在不同的旋转速度和反应温度的工况下对旋转热管进行传热试验研究, 并分析旋转速度( $Re$  数)和反应温度对旋转热管传热性能的影响,  $Re$  数的大小与旋转速度一一对应。

### 2.1 旋转速度和反应温度对冷凝段管外换热系数的影响

图 3 为旋转速度和反应温度对冷凝段管外换热系数  $h_{co}$  的影响曲线, 热管冷凝段为自然对流和旋转强制对流共同影响,  $h_{co}$  随着转速的增加而增加, 管外换热增强。  $h_{co}$  由式(1)和经验式(2)求得, 主要受搅拌雷诺数( $Re$ )的影响。从图 3 还可以看出, 在相同的旋转速度下, 反应温度越高,  $h_{co}$  略有增大趋势, 这是因为反应温度越高, 热管管壁温度越高, 与冷源空气的温差越大,  $Gr$  数越大, 但由于  $h_{co}$  主要受  $Re$  数影响, 因此增大趋势不是很明显。

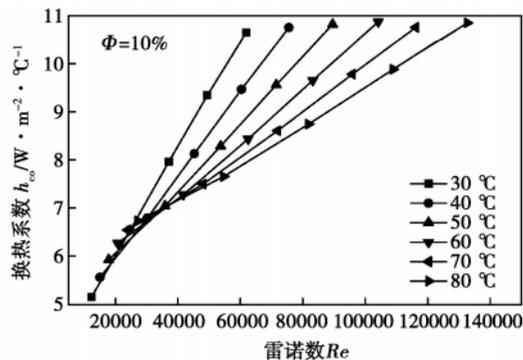


图 3 冷凝段管外换热系数随  $Re$  数变化曲线

### 2.2 旋转速度和反应温度对热管输出功率的影响

旋转速度和反应温度对热管输出功率  $Q_c$  的影响如图 4 所示, 在反应温度  $T = 30^{\circ}C$  的工况下,  $Q_c$  随着旋转速度的增加而增加, 这是因为此时管外换热系数增加, 当转速  $N = 280 r/min$  时, 再增加转速,  $Q_c$  降低, 这是因为在较低温度下, 管内蒸汽温度低, 对于乙醇工质而言, 传输因素很低, 热管传热能力差, 而冷凝液的回流受重力和壁面摩擦力的影响, 当转速增加时, 离心力作用变大, 增加了壁面摩擦力, 阻碍了冷凝液的回流, 输入热量不能及时带走, 容易造成热管蒸发段干涸, 这意味着以乙醇为工质、充液率较小的热管在较低的反应温度下, 当旋转速度超过某一临界转速时, 若再提高转速, 以乙醇为工质的热管传热能力越差, 存在一个最佳转速使其传热性能达到最佳。在反应温度  $T = 40, 50, 60, 70$  和  $80^{\circ}C$  的条件下,  $Q_c$  随着转速的增加而增加, 当转速达到最大即  $N = 467 r/min$  时,  $Q_c$  也达到最大, 此时, 反应温度较高, 管内蒸汽温度较高, 热管的传热能力较好, 能抵消由于转速增大而引起的壁面摩擦增大, 但是随着转速的继续提高,  $Q_c$  增加的趋势渐缓。

由图 4 还可以看出, 在相同的转速下,  $Q_c$  随反应温度的升高而增大, 这是因为反应温度与冷源温度

温差增大,相应传递的热量增多。

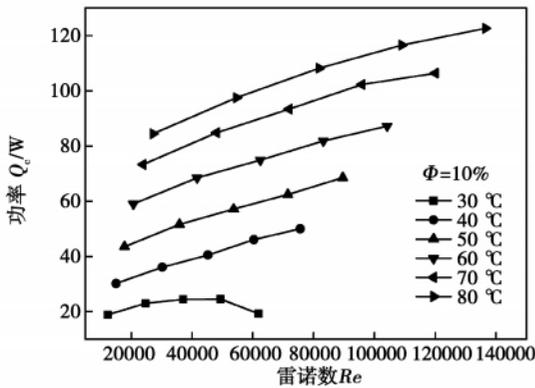


图 4 热管输出功率随 Re 数变化曲线

### 2.3 反应温度一定条件下旋转速度对加热棒输入功率的影响

在反应温度一定条件下旋转速度对加热棒输入功率  $Q_h$  的影响如图 5 所示。 $Q_h$  随旋转速度的变化趋势与图 4 基本一致,  $Q_h$  约为热管输出功率  $Q_c$  的 2 倍左右,  $Q_h$  受热管传热性能及冷源温度的双重影响。

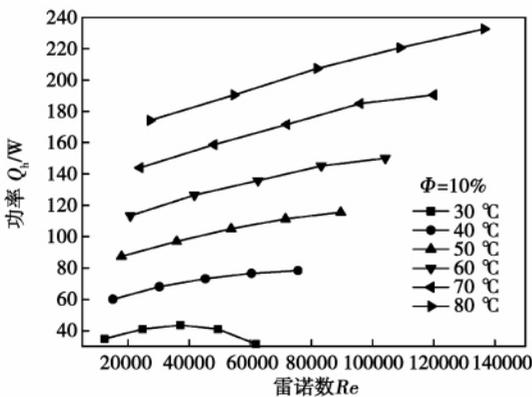


图 5 反应温度一定条件下加热棒输入功率随 Re 数变化曲线

### 2.4 旋转速度对热管热阻的影响

热阻  $R$  随旋转速度的变化如图 6 所示,在  $T = 30\text{ }^\circ\text{C}$  的条件下,热阻随着转速的增加而增加,且在  $N > 280\text{ r/min}$  时,增加幅度较大,此时传热性能较差。综合图 4 ~ 图 6 可以发现,反应温度  $T = 30\text{ }^\circ\text{C}$  时的最佳转速存在于  $280\text{ r/min}$  左右。在其它反应温度  $T = 40、50、60、70$  和  $80\text{ }^\circ\text{C}$  的条件下,热阻随着转速的增加先缓慢增加,然后再缓慢降低,这是因为在低速区,液体受重力控制,液体大部分在底部,其它壁面上只有很薄的一层液膜,因此热阻很小,随着转速的提高,液膜厚度增加,热阻增大,当转速继续升

高时,蒸发段形成了环状流,从而热阻下降,总体热阻值很小。在相同的旋转速度下,热阻随着反应温度的升高而降低,这是由于随着反应温度的升高,管内蒸汽温度上升,热管传输能力提高。

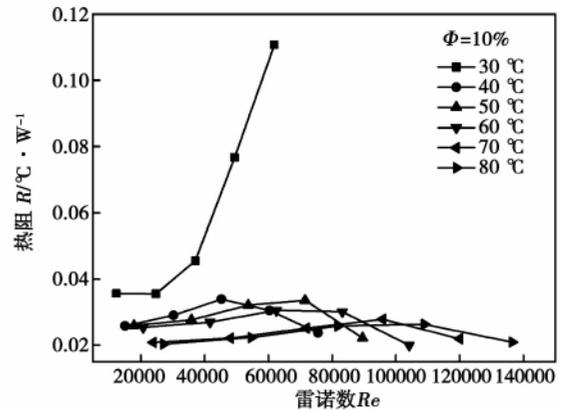


图 6 热阻随 Re 数变化曲线

## 3 结 论

通过对 10% 充液率的旋转热管的传热性能进行试验研究,其结果表明:

- (1) 所设计的旋转热管能够有效地驱除生物反应热。
- (2) 反应温度  $T = 30\text{ }^\circ\text{C}$  的工况下,存在最佳转速  $N = 280\text{ r/min}$  以使旋转热管的传热性能达到最好,反应温度  $T = 40 \sim 80\text{ }^\circ\text{C}$  时,转速越高,旋转热管传热性能越好。
- (3) 冷凝段管外换热系数、热管输出功率、加热棒输入功率均随反应温度的升高而增加,而热阻随反应温度的升高而降低。

### 参考文献:

- [1] 王 煜. 热管生物反应器的传递过程研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2003.
- [2] 庄 骏, 张 红. 热管技术及其工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [3] 欧阳平凯. 植物细胞培养用气升式反应器的传质动力学特性的研究[J]. 化工机械, 1992, 19(5): 249 - 254.
- [4] 李稳宏, 刘永强. 气升式环流反应器的传质特性//第七届全国生物化学学术会议论文集[C]. 北京: 化学工业出版社, 1996: 55 - 58.
- [5] 武 斌, 戴干策. 搅拌槽粘稠物系中气液相间氧传递[J]. 化学反应工程与工艺, 1997, 13(1): 45 - 51.
- [6] 于鲁强, 刘 焯, 冯连芳. 刮壁浆在槽式釜的传热研究[J]. 化学工程, 1997, 25(5): 20 - 22.
- [7] 金培玉, 王晶. 旋转热管型磁粉离合器的设计研究与测试分析[J]. 山东工业大学学报, 1994, 24(2): 114 - 115.

Science and Engineering , Harbin Institute of Technology , Harbin , China , Post Code: 150001) , FANG Ming-zhu ( Jinlin Provincial Yanbian Korean Nation Autonomous Prefecture Science and Technology Intelligence Research Institute , Yanji , China , Post Code: 133001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 , 26 ( 4) . - 471 ~ 474

In the light of the illumination characteristics and the specific features that the outdoor temperature in winter in the northern frigid regions is excessively low , presented was a scheme for heating by using solar energy-soil source heat pumps and with Harbin City serving as a background , the influence of such factors as the primary energy source utilization rate , change in fuel prices etc. on the operation energy consumption and cost was compared and analyzed under the following five heating modes: solar energy-soil source heat pumps , soil source heat pumps , oil-fired boilers , gas-fired boilers and electrically heated boilers. The authors have come to a conclusion that the solar energy-soil source heat pumps have a lowest energy consumption and cost and the highest energy source utilization rate among the above-mentioned five heating modes. **Key words:** solar energy-soil source heat pump , primary energy source utilization rate , cost-effectiveness analysis

螺旋埋管地热换热器的线圈热源模型及其解析解 = **Coil Heat Source Model for Embedded Spiral Tube-based Geothermal Heat Exchangers and Its Analytical Solutions** [刊 汉] LI Xin , FANG Liang , FANG Zhao-hong ( Education Ministry Key Laboratory on Renewable Energy Source Architectural Utilization Technologies , Shandong Architectural University , Jinan , China , Post Code: 250101) , ZHAO Qiang( Shandong Fangya Geothermal Source Heat Pump and Air Conditioning Technology Co. Ltd. , Jinan , China , Post Code: 250101) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 , 26( 4) . - 475 ~ 479

With applications of a pile foundation embedded tube-based geothermal source heat pump system in engineering projects serving as a background , an analysis and argumentation was conducted of an unsteady-state heat transfer model for spiral embedded tube-based geothermal heat exchangers. On this basis , a coil heat source model was presented with the temperature distribution in the embedded coil tubes along the depth direction and the influence of the pitch being considered. By using the Green's function method and the dummy heat source method , the expressions of the analytic solutions to the infinite and finite long coil heat source models for an unsteady state temperature field were obtained respectively. Based on these analytic solutions , the influence of various parameters in the model on the heat exchange performance of the embedded coil tube-based heat exchange was analyzed. **Key words:** geothermal source heat pump , pile foundation embedded tube-based heat exchanger , heat transfer model

用于生物反应器的旋转热管传热性能的研究 = **Investigation of the Heat Transfer Performance of Rotating**

**Heat Pipes for Use in Bioreactors** [刊, 汉] YIN Cai-xia, ZHANG Hong, WANG Zhong-xian, CHEN Fang ( College of Energy Source, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, China, Post Code: 210009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(4). - 480 ~ 482

On the basis of the currently available bioreactors, studied and developed was a new type rotating heat pipe-based bioreactor by using the heat pipe technology to absorb heat effectively. With water serving as the simulation working medium, the heat transfer performance of the rotating heat pipes (used as the agitator shafts) under different operating conditions was experimentally studied. It has been found that the rotating heat pipes thus designed can give out effectively the bio-reaction heat and the influence of the rotating speed and reaction temperature on the heat transfer performance of the rotating heat pipes was also identified. **Key words:** rotating heat pipe-based bioreactor, rotating heat pipe, heat transfer performance, rotating speed, reaction temperature

**不同湍流模型对海水淡化用提升泵模拟精度的影响 = Influence of Various Turbulent Flow Models on the Precision of Simulating a Seawater Desalination-purpose Lift Pump** [刊, 汉] HU Jing-ning, JIANG Wei, LIU San-hua ( Research Center for Fluid Mechanical Engineering Technologies, Jiangsu University, Zhenjiang, China, Post Code: 212013), XU Wan-guo ( Coal Coking Company, Ma'an Iron and Steel Stock Co. Ltd., Ma'an, China, Post Code: 243021) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(4). - 483 ~ 486

By using software Fluent, a numerical simulation was performed of a dual volute type seawater desalination-purpose lift pump by employing the standard  $k - \varepsilon$ , RNG  $k - \varepsilon$  and Realizable  $k - \varepsilon$  turbulent flow calculation models respectively. Furthermore, the flow fields inside the volute and blades were analyzed by using the three turbulent flow models. On this basis, a performance prediction was conducted and compared with the test results. The research results show that when the RNG  $k - \varepsilon$  turbulent flow model is used for calculation, the streamlines inside the impeller and volute are comparatively smooth and the performance prediction result is in relatively good agreement with the test one. When the  $k - \varepsilon$  and Realizable  $k - \varepsilon$  turbulent flow model are used for calculation, the streamlines inside the impeller and volute are disordered with vortexes being produced and the performance prediction result has a relatively big difference from the test one. The foregoing indicates that the RNG  $k - \varepsilon$  turbulent flow calculation model is more suitable for the performance prediction of seawater desalination-purpose lift pumps and centrifugal pumps with the same structure. The research results can provide a certain reference for performance prediction and numerical simulation of seawater desalination-purpose lift pumps and centrifugal pumps with the same dual volute structure. **Key words:** seawater desalination-purpose lift pump, software Fluent, performance prediction, turbulent flow calculation model, double volute