含多孔介质的波纹管内海藻酸钠纳米流体流动 与传热特性的数值研究

符根硕¹, 刘春燕^{1*}, 魏子丰¹, 柳燕怡¹, 穆罕默德·拉姆赞²

¹北京建筑大学理学院,北京 ²巴里亚大学计算机科学系,伊斯兰堡 巴基斯坦

收稿日期: 2025年3月4日; 录用日期: 2025年4月3日; 发布日期: 2025年4月14日

摘要

本研究通过对海藻酸钠 - 四氧化三铁纳米流体在多孔介质波纹管内流动与传热特性的分析,旨在提升光 伏系统的冷却效果,解决光伏板温度分布不均的问题。首先,我们测量并拟合海藻酸钠纳米流体的导热 系数公式,选用Maxwell本构方程来描述其粘弹性特性。接着,将本构方程和导热系数公式作为参数文 件导入求解器中进行模拟,展示光伏表面温度分布等图像,并分析不同物理参数对光伏系统性能的影响。 结果显示,多孔介质可以增加流体与壁面的接触,提高传热效率。加入四氧化三铁纳米粒子还能优化光 伏板的温度分布,减少局部热点。不同多孔固体基质材料对系统性能有不同的影响。缩短松弛时间可以 提高海藻酸钠纳米流体对温度变化的适应性,同时降低光伏板表面温度。

关键词

多孔介质,海藻酸钠,Maxwell本构方程,波纹管,光伏系统

Numerical Study on Flow and Heat Transfer Characteristics of Sodium Alginate Nanofluid in Corrugated Tubes Containing Porous Medium

Genshuo Fu¹, Chunyan Liu^{1*}, Zifeng Wei¹, Yanyi Liu¹, Muhammad Ramzan²

¹School of Science, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing ²Department of Computer Science, Bahria University, Islamabad, Pakistan

Received: Mar. 4th, 2025; accepted: Apr. 3rd, 2025; published: Apr. 14th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 符根硕, 刘春燕, 魏子丰, 柳燕怡, 穆罕默德·拉姆赞. 含多孔介质的波纹管内海藻酸钠纳米流体流动与传 热特性的数值研究[J]. 材料科学, 2025, 15(4): 683-697. DOI: 10.12677/ms.2025.154073

Abstract

This study aims to improve the cooling effect of the photovoltaic system and solve the problem of uneven temperature distribution of photovoltaic panels by analyzing the flow and heat transfer characteristics of sodium alginate-ferric oxide nanofluid in corrugated tubes with porous medium. First, we measure and fit the thermal conductivity formula of sodium alginate nanofluid and then use the Maxwell constitutive equation to describe its viscoelastic properties. Next, we import the constitutive equation and thermal conductivity formula into the solver as parameter files for simulation. The simulation displays images such as the temperature distribution on the photovoltaic surface. We also analyze the effects of different parameters on the performance of the photovoltaic system. The results show that porous medium can increase the contact between fluid and wall surface and improve heat transfer efficiency. Adding ferric oxide nanoparticles can also optimize the temperature distribution of photovoltaic panels and reduce local hot spots. Different porous solid matrix materials have varying effects on system performance. Shortening the relaxation time improves the adaptability of sodium alginate nanofluid to temperature changes and reduces the surface temperature of photovoltaic panels.

Keywords

Porous Medium, Sodium Alginate, Maxwell Constitutive Equation, Corrugated Tubes, Photovoltaic Systems

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u> CO Open Access

1. 引言

随着化石能源的减少和环境问题的加剧,可再生能源的利用趋势越来越明显,社会各界积极促进其 普及[1]。太阳能技术应用广泛,光伏系统在可持续能源供应中起着关键作用,它能够将太阳能转化为热 能和电能[2]。然而,由于半导体材料的限制,转换效率较低,大量太阳能未能得到有效利用[3]。此外, 在高温环境下,光伏系统容易受到不可逆的热应力损伤,从而影响其使用寿命。

为了延长光伏系统的使用寿命,研究人员安装了冷却管道以降低温度。Hossain 等人[4]采用 U 型管 对光伏系统进行降温,发现光伏板温度降低了 3.92℃。波纹管相比 U 型管具有更大的换热面积,在传热 效果上更佳,从而使光伏板表面的温度分布更加均匀[5]。多孔介质由固体基质内相互连通孔隙网络组成 的材料[6],在管道中加入可增加流道接触面积、提升温度均匀性并改善光伏系统与冷却工质间热传递效 果[7] [8]。

海藻酸钠(Sodium Alginate, SA)因其在生物和工业领域的多种潜在应用而备受关注,在造纸、食品工 程等行业中发挥了重要作用[9]。海藻酸钠凭借其稳定的物理化学性质、良好的热稳定性为冷却系统的长 期稳定运行提供了保障。其优异的热传导性能有效延长冷却系统的使用寿命[10]。此外,在 SA 溶液中添 加纳米粒子,可以提升其流动性和热传导性能[11]-[13]。

应力与剪切速率呈非线性关系的流体被称为非牛顿流体[14]。粘弹性流体是其中一种,代表性物质包括高分子聚合物溶液,例如 SA 溶液。在外力作用下,粘弹性流体既能表现出材料的形变,又具有随时间变化的特性,这种双重性质使得粘弹性流体行为比纯粘性流体或纯弹性固体更加复杂。当前,描述粘弹

性流体行为的方法是通过建立反映流体粘弹性特性的力学模型,并赋予这些模型参数具体的物理意义, 采用这种方法建立的粘弹性流体模型有 Maxwell 模型、Oldroyd-B 模型和 Burgers 模型等[15]。Bafe 等人 [16]使用 Maxwell 模型描述 SA 溶液的粘弹性特性,并分析了其在径向可拉伸圆盘上的流动和传热行为。 在使用计算流体动力学(CFD)软件对粘弹性流体流动进行模拟时,可以使用软件内置的本构模型[17],或 通过用户自定义函数(UDF)作为参数文件进行导入[18]。

本文建立了带有多孔介质的波纹管光伏系统的模型,研究了在多孔介质和波纹管设计条件下,SA-Fe₃O₄纳米流体对光伏系统性能的影响,以评估其冷却效果。首先制备了 SA-Fe₃O₄纳米流体,测定其导 热系数并进行公式拟合。采用 Maxwell 本构方程描述该纳米流体的粘弹性行为,并通过 UDF 将其与导热 系数公式导入 CFD 求解器中,模拟纳米流体在管道中的流动和传热过程,分析不同参数变化对系统性能 的影响。

2. 数学建模

本研究的光伏系统模型由玻璃、光伏电池和吸热板组成,厚度分别为 2.5 mm、0.2 mm 和 0.3 mm, 整体尺寸为 100 mm × 40 mm × 3 mm。底部设有两个填充多孔介质的三角波纹冷却通道,每个通道的 进出口尺寸为 8 mm,通道间距离为 6 mm,模型见图 1。使用 Spaceclaim 软件绘制模型,并将其导入 Meshing 模块进行网格划分。图 2 展示了光伏系统背面结构的网格分布。表 1 列出了光伏部件的物理 性质。







Figure 2. Schematic diagram of meshing 图 2. 网格划分示意图

表1. 光伏系统各组件物理性质[2]					
光伏组件	密度(kg/m³)	比热(J/(kg·K))	导热系数(W/(m·K))		
玻璃	2200	830	0.76		
光伏电池	2330	700	148.0		
吸热板	2330	871	202.4		

Table 1. Physical properties of each component of the photovoltaic system [2]
表 1. 光伏系统各组件物理性质[2]

2.1. 纳米流体的制备与导热系数测定

根据 Bafe 等人[16]的研究,本文采用 Maxwell 本构方程描述 SA 水溶液的粘弹性行为,并在此基础 上加入 Fe₃O₄ 纳米粒子,制备 SA-Fe₃O₄ 纳米流体,以提高其导热性能。表 2 罗列了海藻酸钠和 Fe₃O₄ 的 物理特性,其中 SA 溶液的导热系数通过导热系数仪测定。纳米流体的物理性质计算式如下[19]:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi) \rho_{bf} + \varphi \rho_{np}, \qquad (1)$$

$$\left(\rho C_{p}\right)_{nf} = (1-\varphi)\left(\rho C_{p}\right)_{bf} + \varphi\left(\rho C_{p}\right)_{np},\tag{2}$$

$$\mu_{nf} = \left(1 + 7.3\varphi + 123\varphi^2\right)\mu_{bf} , \qquad (3)$$

上述各式中, φ 是纳米流体中 Fe₃O₄ 纳米颗粒的体积分数, $\rho \ , \rho C_p \ , \mu$ 分别代表密度,热容和粘 度,下标 np, bf 代表 Fe₃O₄ 纳米颗粒和 SA 溶液。

Table	2. Physical properties of nanofluid materials [15] [20]
表 2.	纳米流体材料的物理性质[15] [20]

材料	密度(kg/m³)	比热容(J/(kg·K))	导热系数(W/(m·K))	粘度(Pa·s)
Fe ₃ O ₄	5180	870	80.4	-
海藻酸钠	919	4176	0.4403	0.916×10^{-3}



Figure 3. Configured SA-Fe₃O₄ nanofluid 图 3. 配置的 SA-Fe3O4 纳米流体

制备 SA-Fe₃O₄纳米流体的步骤如下:在实验开始之前,需要配制 SA 溶液,并使用电子天平称取适 量的 Fe₃O₄纳米颗粒。然后用量筒量取所需的 SA 溶液。为了有效分散纳米颗粒,将 Fe₃O₄与表面活性剂 十二烷基苯磺酸钠充分混合,逐步加入到 SA 溶液中。使用磁力搅拌器持续搅拌,并进行超声震荡用以进 一步分散纳米颗粒。静置7天后,观察溶液是否有团聚现象,以判断纳米粒子是否均匀分散到溶液中。 使用导热系数仪测量纳米流体的导热系数,并通过 MATLAB 软件进行分析,得出 SA-Fe₃O₄纳米流体的 导热系数公式。配置好的纳米流体和曲线拟合图像分别如图 3 和图 4 所示。



Figure 4. Nanofluid thermal conductivity fitting image 图 4. 纳米流体导热系数拟合图像

SA-Fe₃O₄纳米流体的导热系数拟合公式如下:

$$k_{nf} = k_{bf} \left[\frac{0.92k_{np} + 1.92k_{bf} + 1.84\varphi(k_{np} - k_{bf})}{0.92k_{np} + 1.92k_{bf} - 0.92\varphi(k_{np} - k_{bf})} + A_1\varphi^{A_2} + A_3\varphi + A_4 \right],$$
(4)

其中 A₁ = -336.2941, A₂ = 1.9272, A₃ = 42.5690, A₄ = 1.5569为曲线拟合的参数。表 3 展示了曲线拟合的统计指标结果。根据表 3 和图 4, 拟合公式准确描述了纳米流体体积分数与导热系数的关系:纳米颗粒体积分数增加时,纳米流体的导热系数也上升。这表明,增加纳米颗粒含量可有效提升纳米流体的导热 性能。通过使用 UDF,将纳米流体的导热系数公式作为参数文件导入 CFD 求解器中。

 Table 3. Evaluation of thermal conductivity formula fitting data

 表 3. 导热系数公式拟合数据评估

拟合公式	R ²	调整 R ²	SSE	RMSE
(4)	0.9879	0.9543	0.000	0.0004

2.2. 控制方程的建立

本研究假设 SA-Fe₃O₄ 纳米流体在波纹通道内的流动为稳态和不可压缩的。SA-Fe₃O₄ 纳米流体的 Maxwell 本构方程表示为[21]:

$$\boldsymbol{S} + \lambda \left(\frac{\partial}{\partial t} + \left(\boldsymbol{U} \cdot \nabla \right) \right) \boldsymbol{S} = \mu_{nf} \boldsymbol{A} , \qquad (5)$$

其中参数 λ , t, S, μ_{nf} 依次表示松弛时间,时间,偏应力张量和纳米流体的粘度,而A的定义为: $A = L + L^{T}$, L表示速度向量 $U = (v_1, v_2, v_3)$ 的梯度,即 $L = \nabla U$ 。同导热系数公式一样,使用 UDF 将公式 (5)作为参数文件导入到 CFD 求解器中。

对公式(5)进行各项展开如下:

$$\boldsymbol{L} = \nabla \boldsymbol{U} = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 & v_2 & v_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial v_1}{\partial x_1} & \frac{\partial v_2}{\partial x_1} & \frac{\partial v_3}{\partial x_1} \\ \frac{\partial v_1}{\partial x_2} & \frac{\partial v_2}{\partial x_2} & \frac{\partial v_3}{\partial x_2} \\ \frac{\partial v_1}{\partial x_3} & \frac{\partial v_2}{\partial x_3} & \frac{\partial v_3}{\partial x_3} \end{pmatrix},$$
(6)

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{L} + \boldsymbol{L}^{\mathrm{T}} = \begin{pmatrix} 2\frac{\partial v_{1}}{\partial x_{1}} & \frac{\partial v_{2}}{\partial x_{1}} + \frac{\partial v_{1}}{\partial x_{2}} & \frac{\partial v_{3}}{\partial x_{1}} + \frac{\partial v_{1}}{\partial x_{3}} \\ \frac{\partial v_{1}}{\partial x_{2}} + \frac{\partial v_{2}}{\partial x_{1}} & 2\frac{\partial v_{2}}{\partial x_{2}} & \frac{\partial v_{3}}{\partial x_{2}} + \frac{\partial v_{2}}{\partial x_{3}} \\ \frac{\partial v_{1}}{\partial x_{3}} + \frac{\partial v_{3}}{\partial x_{1}} & \frac{\partial v_{2}}{\partial x_{3}} + \frac{\partial v_{3}}{\partial x_{2}} & 2\frac{\partial v_{3}}{\partial x_{3}} \end{pmatrix},$$

$$(7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} + (\boldsymbol{U} \cdot \nabla) = \frac{\partial}{\partial t} + v_{1}\frac{\partial}{\partial x_{1}} + v_{2}\frac{\partial}{\partial x_{2}} + v_{3}\frac{\partial}{\partial x_{3}}, \qquad (8)$$

$$\left(\boldsymbol{U} \cdot \nabla \right) \boldsymbol{S} = \begin{pmatrix} v_1 \frac{\partial S_{11}}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial S_{11}}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial S_{11}}{\partial x_3} & v_1 \frac{\partial S_{12}}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial S_{12}}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial S_{12}}{\partial x_3} & v_1 \frac{\partial S_{13}}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial S_{13}}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial S_{13}}{\partial x_3} \\ v_1 \frac{\partial S_{21}}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial S_{21}}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial S_{21}}{\partial x_3} & v_1 \frac{\partial S_{22}}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial S_{22}}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial S_{22}}{\partial x_3} & v_1 \frac{\partial S_{23}}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial S_{23}}{\partial x_1} + v_3 \frac{\partial S_{23}}{\partial x_3} \\ v_1 \frac{\partial S_{31}}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial S_{31}}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial S_{31}}{\partial x_3} & v_1 \frac{\partial S_{32}}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial S_{32}}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial S_{32}}{\partial x_3} & v_1 \frac{\partial S_{33}}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial S_{33}}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial S_{33}}{\partial x_3} \end{pmatrix},$$

$$\left(9 \right)$$

综合上述各式,公式(5)表示为:

$$\left(1+\lambda\frac{\partial}{\partial t}\right)S_{ji} = \mu_{nf}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right),\tag{11}$$

纳米流体的连续性方程和动量方程分别表示为:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0, \qquad (12)$$

$$\rho_{nf}\left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \rho_{nf} g_i + \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} + R_j, \qquad (13)$$

上式中, ρ_{nf} , $\rho_{nf}g_i$, P, 和 $\mathbf{R} = (R_1, R_2, R_3)$ 依次代表表示纳米流体的密度, 纳米流体的重力, 压力和 Darcy 阻力。

将公式(11)代入公式(13),并结合 $V = \phi U$ 和 $R = -\mu_{nf} V / \kappa$ 得到:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 , \qquad (14)$$

$$\rho_{nf} \left(1 + \lambda \frac{\partial}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \\
= - \left(1 + \lambda \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial P}{\partial x_j} + \rho_{nf} g_i + \frac{\mu_{nf}}{\kappa} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\mu_{nf}}{\kappa} \left(1 + \lambda \frac{\partial}{\partial t} \right) u_i,$$
(15)

其中 $V = (u_1, u_2, u_3)$ 表示 Darcy 速度, $\kappa \ \pi \phi$ 分别表示多孔介质的渗透率和孔隙率。

应用时均平均法进行推导得到的连续性方程和动量方程为:

$$=0,$$
 (16)

$$\rho_{nf}\left(1+\lambda\frac{\partial}{\partial t}\right)\left[\frac{1}{\phi}\frac{\partial\overline{u_{i}}}{\partial t}+\frac{1}{\phi^{2}}\frac{\partial\overline{(u_{j}u_{i})}}{\partial x_{j}}\right] \\ =-\left(1+\lambda\frac{\partial}{\partial t}\right)\frac{\partial\overline{P}}{\partial x_{i}}+\rho_{nf}g_{i}-\frac{\mu_{nf}}{\kappa}\left(1+\lambda\frac{\partial}{\partial t}\right)\overline{u_{i}}+\frac{\mu_{nf}}{\phi}\frac{\partial^{2}\overline{u_{i}}}{\partial x_{j}\partial x_{j}} \\ -\frac{\rho_{nf}}{\phi^{2}}\left(1+\lambda\frac{\partial}{\partial t}\right)\frac{\partial\overline{(u_{j}'u_{i}')}}{\partial x_{j}},$$
(17)

式中 $\overline{u_i}, u_i'(i=1,2,3)$, $v_{nf} = \mu_{nf} / \rho_{nf}$, $\partial(\overline{u_i'u_i'}) / \partial x_l$ 分别表示时均速度分量和脉动速度分量, 纳米流体的运动粘度和雷诺应力项。

 $\frac{\partial u_i}{\partial x_i}$

纳米流体的温度方程用张量形式表示为[22]:

$$\left(\rho C_{p}\right)_{m}\frac{\partial T}{\partial t}+\left(\rho C_{p}\right)_{nf}\left(u_{j}\frac{\partial T}{\partial x_{j}}\right)=k_{m}\frac{\partial^{2}T}{\partial x_{j}\partial x_{j}},$$
(18)

$$\left(\rho C_{p}\right)_{m} = \phi \left(\rho C_{p}\right)_{nf} + (1-\phi) \left(\rho C_{p}\right)_{s}, \qquad (19)$$

$$k_m = \phi k_{nf} + (1 - \phi) k_s, \qquad (20)$$

式中 k_{nf} , $(\rho C_p)_s \pi k_s$ 分别表示纳米流体的导热系数,多孔介质中固体基质的热容和导热系数,多孔介质固体基质材料物理性质如表 4 所示。

 Table 4. Physical properties of solid matrix materials in porous medium [8]

 表 4. 多孔介质固体基质材料的物理性质[8]

多孔介质基质材料	密度(kg/m³)	比热容(J/(kg·K))	导热系数(W/(m·K))	孔隙率(%)
铜(Cu)	8930	386	398	90.5
铝(Al)	2719	871	202.4	81
镍(Ni)	8900	460.4	91.4	94.2

类似地,由时均平均法推导的纳米流体温度方程为:

$$\left(\rho C_{p}\right)_{m}\frac{\partial \overline{T}}{\partial t}+\left(\rho C_{p}\right)_{nf}\frac{\partial \left(\overline{u_{j}}\overline{T}\right)}{\partial x_{j}}=k_{m}\frac{\partial}{\partial x_{j}}\left(\frac{\partial \overline{T}}{\partial x_{j}}\right)-\left(\rho C_{p}\right)_{nf}\frac{\partial \left(\overline{u_{j}'T'}\right)}{\partial x_{j}}.$$
(21)

根据瞬时速度和时均速度的动量方程推导,得到多孔介质下纳米流体的湍流动能(*K*)和湍流耗散率(*ε*) 方程如下:

$$\left(\frac{1}{\phi}\frac{\partial K}{\partial t} + \frac{1}{\phi^{2}}\overline{u_{j}}\frac{\partial K}{\partial x_{j}} + \frac{1}{\phi^{2}}\overline{u_{i}'u_{j}'}\frac{\partial \overline{u_{i}}}{\partial x_{j}}\right) = -\left[\frac{1}{\rho_{nf}}\frac{\overline{\partial(u_{i}'p')}}{\partial x_{i}} + \frac{1}{\phi^{2}}\frac{\partial}{\partial x_{j}}\left(\overline{K'u_{j}'}\right) + \frac{2\nu_{nf}K}{\kappa}\right] , \qquad (22)$$

$$-\lambda\frac{\partial}{\partial t}\left[\frac{1}{\rho_{nf}}\frac{\overline{\partial(u_{i}'p')}}{\partial x_{i}} + \frac{1}{\phi^{2}}\frac{\partial}{\partial x_{j}}\left(\overline{K'u_{j}'}\right) + \frac{2\nu_{nf}K}{\kappa}\right] + \frac{1}{\phi}\left(\frac{\partial^{2}K}{\partial x_{j}\partial x_{j}} - \varepsilon\right)$$

$$\left(1+\lambda\frac{\partial}{\partial t}\right) \left[\frac{1}{\phi}\frac{\partial\varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{\phi^{2}}\left(u_{j}\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_{j}} + 2v_{nf}\frac{\partial\overline{u_{j}}}{\partial x_{k}}\frac{\partial\overline{u_{i}'}}{\partial x_{k}}\frac{\partial\overline{u_{j}'}}{\partial x_{j}}\right)\right]$$

$$= -\left[\frac{2v_{nf}}{\rho_{nf}}\frac{\partial}{\partial x_{j}}\left(\frac{\partial p'}{\partial x_{k}}\frac{\partial u'_{j}}{\partial x_{k}}\right) + \frac{2v_{nf}}{\phi^{2}}\frac{\partial}{\partial x_{j}}\left(u'_{j}\frac{\partial u'_{i}}{\partial x_{k}}\frac{\partial u'_{j}}{\partial x_{k}}\right) + \frac{2v_{nf}}{\phi^{2}}\frac{\partial\overline{u_{i}'}}{\partial x_{k}}\frac{\partial u'_{j}}{\partial x_{k}}\frac{\partial\overline{u_{i}'}}{\partial x_{k}} + \frac{2v_{nf}\varepsilon}{\kappa}\right]$$

$$-\lambda\frac{\partial}{\partial t}\left[\frac{2v_{nf}}{\rho_{nf}}\frac{\partial}{\partial x_{j}}\left(\frac{\partial p'}{\partial x_{k}}\frac{\partial u'_{j}}{\partial x_{k}}\right) + \frac{2v_{nf}}{\phi^{2}}\frac{\partial}{\partial x_{j}}\left(u'_{j}\frac{\partial u'_{i}}{\partial x_{k}}\frac{\partial u'_{j}}{\partial x_{k}}\frac{\partial\overline{u_{i}'}}{\partial x_{k}}\right) + \frac{2v_{nf}\varepsilon}{\phi^{2}}\frac{\partial\overline{u_{i}'}}{\partial x_{k}}\frac{\partial\overline{u_{i}'}}{\partial x_{k}} + \frac{2v_{nf}\varepsilon}{\kappa}\right]$$

$$-\frac{2v_{nf}}{\phi^{2}}\left(1+\lambda\frac{\partial}{\partial t}\right)\left(\frac{\partial^{2}\overline{u_{i}}}{\partial x_{j}\partial x_{k}}u'_{j}\frac{\partial\overline{u_{i}'}}{\partial x_{k}} + 2\frac{\partial\overline{u_{i}'}}{\partial x_{j}}\frac{\partial\overline{u_{i}'}}{\partial x_{k}}\frac{\partial\overline{u_{j}'}}{\partial x_{k}}\frac{\partial\overline{u_{j}'}}{\partial x_{k}} + 2\frac{\partial\overline{u_{i}'}}{\partial x_{k}}\frac{\partial\overline{u_{i}'}}{\partial x_{k}}\frac{\partial\overline{u_{j}'}}{\partial x_{k}} - 2v_{nf}^{2}\left(\frac{\partial^{2}\overline{u_{i}'}}{\partial x_{j}\partial x_{k}}\right)^{2}\right]$$

$$(23)$$

2.3. 边界条件的设定

本研究假设波纹通道的底部和侧面为绝热壁面。入口处设置 Velocity-inlet,速度范围为 0.01 至 0.05 m/s,入口温度为 300 K,出口设定 Pressure-outlet。湍流模型选用 Realizable *k-ε* 湍流模型,SIMPLE 算法 用于对压力和速度进行耦合求解,能量方程,连续性方程和动量方程的误差设定为 10⁻⁴、10⁻⁶、10⁻⁶,以确保计算的收敛精度。由于两个波纹管内的流体流动分布一致,因此图像中仅需展示一个管子即可充分 反映管道内部的流动和传热特性。

平均努塞尔数(Nu)和摩擦因子(f)的定义为[2]:

$$Nu = hL_1/k_{nf}, \quad f = \Delta P / \left(\frac{L_1}{D_1}\right) \left(\frac{\rho_{nf}\overline{V}^2}{2}\right), \quad (24)$$

上式中 L_1 , D_1 , ΔP , \bar{v} 分别表示管道的长度、直径,以及压力差和通道内流体的平均横截面积速度。 $h = q/(T_{PV} - T_{in})$ 表示平均对流传热系数,其中 T_{in} , T_{PV} 分别是纳米流体的入口温度和光伏板表面温度, q是太阳辐射热通量,范围为 600 到 1000 W/m²。





Figure 5. Model verification: (a) grid independence verification; (b) test conditions; (c) model rationality verification 图 5. 模型验证: (a) 网格独立性验证; (b) 测试条件; (c) 模型合理性验证

3. 网格独立性验证和模型验证

为进行网格独立性测试,以光伏板表面温度和出口温度以评估指标,并选择纯水作为冷却工质。图 5(a)展示了网格节点数对模型性能的分布情况。如图所示,对 650,989 个节点的网格进行模拟,光伏板表 面温度和出口温度分别与前一网格有 0.02%和 0.03%的误差,而与后一网格的误差则为 0.01%和 0.12%。 这表明,拥有 650,989 个节点的网格已经足够精确,能够满足进一步模拟工作的需求。

为验证模型的合理性,选择空气作为冷却工质,并使用 Joshi 等人[23]记录的天气数据(如图 5(b)所示),分析在包含多孔介质和波纹管的光伏系统中温度的变化,将所得结果同 Joshi 等人[23]的数据进行对

比,并在图 5(c)中呈现温度变化趋势。结果显示,本研究模型的温度走势与 Joshi 等人的数据有一定的吻合,但在某些条件下仍存在差异,表明该模型具有一定的参考价值。

4. 结果与讨论

4.1. 冷却通道内的纳米流体速度与温度图像

图 6 呈现了纳米流体在波纹管中的速度与温度分布情况,同时考虑了有无多孔介质这两种不同情形。 如图 6(a),图 6(b)所示,在无多孔介质的情况下,纳米流体的流速主要受到波纹形状的影响。当流体流经 波峰时,其流动路径会因波纹形状而改变,导致速度分布发生变化,进而影响传热效率。这是因为,在 波峰区域附近,流体流动方向发生改变,原本应沿管壁顺利传递的热量,由于流动路径的变化,无法及 时带走,导致波峰区域局部热量积聚,温度上升。图 6(c),图 6(d)显示,引入多孔介质后,波纹管内的速 度和温度分布发生了变化。由于多孔介质内部复杂的孔隙结构对流体流动产生阻力,导致纳米流体通过 多孔介质时,沿主流道的速度发生局部减缓。此外,多孔介质增加了流体与部件的接触面积。从传热机 制来看,接触面积增加使得热量传递路径增多,一方面增强了流体与部件表面之间的对流换热,另一方 面提高了部件的导热效率。这两方面共同作用,提升了系统传热效率,改善了管内波峰区域的温度分布。





Figure 6. Flow velocity and temperature images in the corrugated pipe: (a) velocity (without porous medium); (b) temperature (without porous medium); (c) velocity (with porous medium); (d) temperature (with porous medium)
图 6. 波纹管内的流速和温度图像: (a) 速度(无多孔介质); (b) 温度(无多孔介质); (c) 速度(有多孔介质); (d) 温度 (有多孔介质)

图 7 显示了光伏板在三种不同条件下的表面温度分布,凸显了多孔介质和波纹管在热管理中的优势。 在无冷却条件下(图 7(a)),光伏板表面中心出现高温分布,这是因为光伏板持续吸收太阳能量并将其转化 为热能,但热量无法及时散出,导致中心区域温度不断上升。引入波纹管后(图 7(b)),光伏板中央区域温 度分布优化,散热效果提升。波纹管特殊形状增加流体与光伏板接触面积,使流体更有效地吸收光伏板 产生的热量,在波纹管中通过对流换热带走部分热量,优化温度分布。由于波纹管内流体在波峰处的流 速变化与主流道不同,导致局部换热不均匀。波峰处流速较慢,热量交换不足,使部分区域热量无法有 效带走,从而导致出口处温度较高。图 7(c)显示,在波纹管中引入多孔介质可以优化光伏板的出口温度 分布。多孔介质含有大量微小孔隙,增加了流体与固体的接触面积。相比传统材料,多孔介质的单位体 积表面积显著提升,有助于提高热量传递效率。其内部孔隙大小、形状和连通性各异,形成复杂通道网 络。这种结构不仅增强流体扰动和混合,还促进热量在流体和固体间的传递,使热量快速从流体传至固 体骨架并通过对流换热散出,提升散热性能,降低出口附近温度。



Figure 7. Temperature distribution on the surface of a photovoltaic panel: (a) without cooling; (b) without porous medium; (c) with porous medium

图 7. 光伏面板表面的温度分布: (a) 无冷却; (b) 无多孔介质; (c) 有多孔介质

4.2. 参数变化对光伏板温度变化的影响

图 8 展示了流速变化对光伏表面温度的影响。如图 8 显示,当太阳辐射强度在 0.01 至 0.05 m/s 范围 内变化时,SA 纳米流体在管道中的流动能有效降低光伏板表面温度,改善温度分布的均匀性,提升整体 散热性能。其原因在于:当流速从 0.01 m/s 增加至 0.05 m/s 时,对流换热系数显著提高,这加速了单位 时间内单位面积上流体与光伏板表面间的热量传递,有效降低了光伏板表面温度。此外,多孔介质内部 的孔隙结构形成了曲折的微通道。流体在曲折的流动路径上不断与壁面接触,使接触面积大幅增加。增 加的接触面积增强了流体与壁面之间的热量传递。同时,复杂的流动路径和微尺度下的混合作用强烈扰 动了边界层。边界层是流体与壁面之间热量和质量传递的阻碍层,其厚度直接影响传热效率。通过扰动 边界层,波纹管和多孔介质使边界层变薄,从而减小了热量从光伏板表面传递至流体主体的阻力。



Figure 8. Surface temperature changes of photovoltaic panels under different flow velocity conditions 图 8. 不同流速条件下光伏板表面温度变化

4.3. 多孔基质材料对系统性能的影响

图 9 展示了多孔介质材料对努塞尔数(Nu)和摩擦因子(f)的影响。如图 9(a)所示,根据表 4,多孔介质 金属材料结合了金属的高导热性能和多孔介质的结构特点。金属本身具有很高的导热系数,这意味着金 属能够快速传导热量。而当金属形成多孔结构时,这会导致在流体与金属表面之间的传热过程中,Nu 相 对较高。当 Nu 较高时,表示对流传热系数较大,流体能更快地将热量从壁面传递到周围环境,增强传热 效果。同时,较高的 Nu 通常意味着更薄的边界层,使得位于流体主流区域的流体更易接触壁面附近的高 温区域,加速高温区域热量传递,防止光伏表面局部过热,确保温度分布均匀,降低过热风险,保障系 统稳定。

图 9(b)显示,镍的高摩擦因子会阻碍流体流动,降低冷却剂通过孔隙的速度,减少对流换热效率。 相比之下,铝的摩擦因子较低使得流体能够更容易地通过孔隙,保持较高的流速,增强了对流换热过程, 使得更多的热量被流体带走,进而改善了光伏板的冷却性能。另外,在流体与光伏板表面接触处会形成 边界层。对于镍材料,其较高的摩擦因子意味着冷却剂在孔隙中流动时受到较大的阻力。这导致冷却剂 的流速降低,阻碍了热量从光伏板表面传递到流体主体区域,导致边界层内热量积聚,使光伏板表面温 度上升。相反,铝材料由于摩擦因子低,冷却剂流速较高,形成的边界层较薄。较薄的边界层有助于热 量迅速从光伏板表面传递到冷却剂主体区域,减少了热量在边界层内的积聚。因此,在相同操作条件下, 使用铝作为多孔介质可以提高传热效率,节省能源,并降低维持适当冷却剂流量消耗所需的能量。



Figure 9. The influence of different porous matrix materials: (a) *Nu*; (b) *f* 图 9. 不同多孔基质材料的影响: (a) *Nu*; (b) *f*

4.4. 松弛时间对系统性能的影响

图 10 展示了 SA-Fe₃O₄ 纳米流体的松弛时间(λ)对摩擦因子(f)和努塞尔数(Nu)的影响。图 10(a)显示, 随着流速增加,主流区的流体更多地参与换热过程。在低流速情况下,靠近壁面的流体主要负责换热, 而主流区流体参与较少。当流速增大,主流区的流体被带动向壁面靠近,使更多流体能够参与从光伏板 吸收热量的过程中。此外流速增加导致 Nu 增大,意味着对流传热系数提高,增强了对流换热效果,表明 流体与光伏板之间的热量交换更加频繁和高效,使热量更有效地从光伏板传递到流体中并散发出去。图 10(b)显示,虽然流速增加总体上减小了流动流体与波纹管内壁间的摩擦因子,但在相同速度下,多孔介 质的存在本身就增加了流体流动的阻力,而λ的延长进一步加剧了这种阻力效应。原因在于,多孔介质 内部结构复杂,流体通过时需频繁改变流动方向和速度,导致流体与孔隙壁面的碰撞和摩擦增加。松弛 时间延长使流体微团在碰撞后需要更多时间调整状态,从而增大流动阻力。为了克服阻力,流体会对孔 隙壁面做更多的功,这些功会转化为热能。此外,由于流体流动缓慢,热量在多孔介质内的传递效率降 低,容易导致局部热量积聚,使得多孔介质内的温度分布更加不均匀。





5. 结论

本研究探讨了SA-Fe₃O₄纳米流体在多孔介质波纹管中的流动与传热特性,旨在延长系统的使用寿命。 通过实验制备该纳米流体和测量导热系数,将拟合公式与 Maxwell 本构方程作为参数文件导入 CFD 求解 器进行模拟,分析了不同参数下对系统性能的影响。目前的研究结果有:

(1) 在光伏系统设计中,使用波纹管可以提高系统的传热性能。同时,加入多孔介质能够增加流体与 壁面的接触面积,从而提升传热效率,进一步改善冷却效果。

(2) 添加 Fe₃O₄ 纳米颗粒可以提高冷却介质的导热性能,优化光伏板的温度分布,减少局部热点的形成,保持最佳工作温度。

(3) 多孔基质材料的差异对系统性能产生不同影响: 镍由于摩擦系数高, 会阻碍流体流动并降低对流 换热效率; 而铝由于摩擦系数低, 能增强对流换热过程, 更快地传递热量。

(4) 缩短 SA-Fe₃O₄ 纳米流体的松弛时间,使其能够快速响应能够迅速感知到变化,快速调整自身的运动状态,并在增加流速的情况下,可以促进对流传热,提高 Nu,并降低 f,减小内部摩擦阻力。

基金项目

北京建筑大学金字塔人才培养项目(No.JDYC20220829),北京市教委科研项目(No.KM202310016-001) 和北京建筑大学研究生创新项目(No.PG2024151)资助。

参考文献

- [1] 崔歆韬. 双玻光伏组件的热电分析及辐射降温研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [2] Kazemian, A., Ma, T. and Hongxing, Y. (2024) Evaluation of Various Collector Configurations for a Photovoltaic Thermal System to Achieve High Performance, Low Cost, and Lightweight. *Applied Energy*, 357, Article ID: 122422. <u>https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122422</u>
- [3] Shen, Y., Hocksun Kwan, T. and Yang, H. (2022) Parametric and Global Seasonal Analysis of a Hybrid PV/T-CCA System for Combined CO₂ Capture and Power Generation. *Applied Energy*, **311**, Article ID: 118681. <u>https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118681</u>
- [4] Hossain, M.S., Pandey, A.K., Selvaraj, J., Abd Rahim, N., Rivai, A. and Tyagi, V.V. (2019) Thermal Performance Analysis of Parallel Serpentine Flow Based Photovoltaic/Thermal (PV/T) System under Composite Climate of Malaysia. *Applied Thermal Engineering*, **153**, 861-871. <u>https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.007</u>
- [5] Eisapour, M., Eisapour, A.H., Hosseini, M.J. and Talebizadehsardari, P. (2020) Exergy and Energy Analysis of Wavy Tubes Photovoltaic-Thermal Systems Using Microencapsulated PCM Nano-Slurry Coolant Fluid. *Applied Energy*, 266, Article ID: 114849. <u>https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114849</u>
- [6] Aghakhani, S. and Afrand, M. (2022) Experimental Study of the Effect of Simultaneous Application of the Air- and Water-Cooled Flow on Efficiency in a Photovoltaic Thermal Solar Collector with Porous Plates. *Applied Thermal Engineering*, 217, Article ID: 119161. <u>https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119161</u>
- [7] Asefi, G., Ma, T. and Wang, R. (2022) Parametric Investigation of Photovoltaic-Thermal Systems Integrated with Porous Phase Change Material. *Applied Thermal Engineering*, 201, Article ID: 117727. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117727
- [8] Sangtarash, A., Maadi, S.R., Taylor, R.A., Arabkoohsar, A., Wongwises, S., Sheremet, M., et al. (2024) A Comprehensive Investigation of Porous Media's Effects on the Performance of Photovoltaic Thermal Systems. Applied Thermal Engineering, 245, Article ID: 122766. <u>https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122766</u>
- [9] Ali, K., Ahmad, S., Ahmad, S., Jamshed, W., Tirth, V., Algahtani, A., *et al.* (2023) Insights into the Thermal Attributes of Sodium Alginate (Nacho) Based Nanofluids in a Three-Dimensional Rotating Frame: A Comparative Case Study. *Case Studies in Thermal Engineering*, **49**, Article ID: 103211. <u>https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103211</u>
- [10] Wahab, A., Khan, M.A.Z. and Hassan, A. (2020) Impact of Graphene Nanofluid and Phase Change Material on Hybrid Photovoltaic Thermal System: Exergy Analysis. *Journal of Cleaner Production*, 277, Article ID: 123370. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123370
- [11] 刘畅,陈艳军,张超灿.用于冷链的低温相变材料的研究进展[J].化工进展,2022,41(1):286-299.
- [12] Hatami, M. and Ganji, D.D. (2013) Heat Transfer and Flow Analysis for Sa-TiO₂ Non-Newtonian Nanofluid Passing

through the Porous Media between Two Coaxial Cylinders. *Journal of Molecular Liquids*, **188**, 155-161. <u>https://doi.org/10.1016/j.molliq.2013.10.009</u>

- [13] Akinshilo, A.T., Olofinkua, J.O. and Olaye, O. (2017) Flow and Heat Transfer Analysis of the Sodium Alginate Conveying Copper Nanoparticles between Two Parallel Plates. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 3, 258-266.
- [14] 李彦军, 金正浩, 李舒宏. 纳米 TiO2 对 NH3-H2O-LiBr 工质降膜吸收性能的影响[J]. 制冷技术, 2024, 44(1): 16-23.
- [15] 丁军, 索双富, 张琦, 等. 橡胶材料黏弹本构关系研究综述[J]. 合成橡胶工业, 2022, 45(6): 523-529.
- [16] Bafe, E.E., Firdi, M.D. and Enyadene, L.G. (2024) Entropy Generation and Cattaneo-Christov Heat Flux Analysis of Binary and Ternary Hybrid Maxwell Nanofluid Flows with Slip and Convective Conditions. *Case Studies in Thermal Engineering*, **61**, Article ID: 104986. <u>https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104986</u>
- [17] 沈洋, 王企鲲, 刘唐京. 两种典型粘弹性流体——Giesekus 流体与 FENE-P 流体的流变特性[J]. 建模与仿真, 2023, 12(5): 4559-4569.
- [18] 郑智颖. FLUENT 在粘弹性流体流动数值模拟中的应用[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [19] Gürsoy, E., Kadir Pazarlıoğlu, H., Dağdeviren, A., Gürdal, M., Gedik, E., Arslan, K., et al. (2022) Energy Analysis of Magnetite Nanofluid Flowing in Newly Designed Sudden Expansion Tube Retrofitted with Dimpled Fin. International Journal of Heat and Mass Transfer, 199, Article ID: 123446. <u>https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123446</u>
- [20] Qiao, Y., Yang, X., Xu, H. and Qi, H. (2024) Numerical Analysis of Two-Dimensional MHD Flow and Heat Transfer of Generalized Maxwell Fluid through a Rectangular Pipe. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **106**, Article ID: 109303. <u>https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109303</u>
- [21] Salman, A.H.A., Hilal, K.H. and Ghadhban, S.A. (2022) Enhancing Performance of PV Module Using Water Flow through Porous Media. *Case Studies in Thermal Engineering*, 34, Article ID: 102000. https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102000
- [22] Joshi, A.S., Tiwari, A., Tiwari, G.N., Dincer, I. and Reddy, B.V. (2009) Performance Evaluation of a Hybrid Photovoltaic Thermal (PV/T) (Glass-to-Glass) System. *International Journal of Thermal Sciences*, 48, 154-164. <u>https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.05.001</u>
- [23] Metzler, R. (2003) Fractional Relaxation Processes and Fractional Rheological Models for the Description of a Class of Viscoelastic Materials. *International Journal of Plasticity*, **19**, 941-959. <u>https://doi.org/10.1016/s0749-6419(02)00087-6</u>