

纳米流体在含有球形凸起的双管并排的突扩管内流动与传热特性分析

符根硕, 刘春燕*, 王雨梦, 宋志德

北京建筑大学理学院, 北京

收稿日期: 2025年2月12日; 录用日期: 2025年2月21日; 发布日期: 2025年3月12日

摘要

本文旨在通过分析含球凸结构的双管并排突扩管内纳米流体流动与传热特性, 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。通过流变学实验制备纳米流体并测量其热导率, 利用曲线拟合得出导热系数公式。将Maxwell本构方程与导热系数公式通过用户自定义函数集成至计算流体动力学求解器中, 通过数值模拟展示光伏系统表面温度及管道速度、温度分布, 直观呈现各参数对系统性能的影响。数据分析表明, 双管异向布置能提高光伏系统热交换效率, 降低光伏板表面温度不均匀性。增加流速可使光伏表面温度分布更均匀, 间接增强系统总效率。缩短松弛时间能增强纳米流体适应温度变化的能力, 并减小摩擦因子。

关键词

Maxwell本构方程, 冷却效果, 球凸结构, 双管并排突扩管, 光伏系统

Investigation of Flow and Heat Transfer Properties of Nanofluids in Dual-Tube Sudden Expansions Tubes with Spherical Protrusions

Genshuo Fu, Chunyan Liu*, Yumeng Wang, Zhide Song

School of Science, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing

Received: Feb. 12th, 2025; accepted: Feb. 21st, 2025; published: Mar. 12th, 2025

Abstract

This paper aims to improve the cooling effect of the photovoltaic system and solve the problem of

*通讯作者。

文章引用: 符根硕, 刘春燕, 王雨梦, 宋志德. 纳米流体在含有球形凸起的双管并排的突扩管内流动与传热特性分析[J]. 流体动力学, 2025, 13(1): 37-49. DOI: [10.12677/ijfd.2025.131004](https://doi.org/10.12677/ijfd.2025.131004)

uneven temperature distribution of photovoltaic panels by analyzing the flow and heat transfer characteristics of nanofluids containing spherical convex structures in dual-tube sudden expansion tubes. Nanofluids are prepared via rheological experiments, and their thermal conductivity is measured. A thermal conductivity formula is derived from curve fitting. The Maxwell constitutive equation and thermal conductivity formula are integrated into a computational fluid dynamics solver using user-defined functions. Numerical simulations graphically display surface temperature, pipeline velocity, and temperature distribution, illustrating the impact of each parameter on system performance. Data analysis reveals that the double-tube anisotropic arrangement boosts heat exchange efficiency and reduces temperature unevenness on photovoltaic panels. Higher flow rates promote a more uniform temperature distribution, improving overall system efficiency. Shorter relaxation times enhance the nanofluid's adaptability to temperature changes and reduce friction factors.

Keywords

Maxwell Constitutive Equation, Cooling Effect, Spherical Convex Structures, Dual-Tube Sudden Expansion Tubes, Photovoltaic System

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着能源需求的增长和对化石燃料使用引发的环境问题的关注，替代能源技术不断发展。太阳能因其可获取性和经济性而备受青睐。光伏(PV)电池能够将阳光转化为热能和电能[1]。然而，通常只有4%~17%的太阳辐射被转化为电能[2]。剩余的辐射则以热量形式散失，导致光伏板温度升高。每升高1℃，光伏系统转换效率会降低0.3%~0.5%[3]。光伏板温度上升会产生连锁负面影响，即系统效率的永久损失和长期不可逆的电池损伤。

为防止光伏系统效率下降和温度升高，研究人员在光伏系统底部引入了不同类型的冷却管道进行降温。这些管道通过收集多余的热量并转化为电能，从而提高了系统的冷却效果，延长了电池寿命并提升了电池效率。当前光伏系统中常见的冷却管道设计包括并联式、螺旋式和波纹式，各具特色。然而，这些设计往往受到压降分布、吸热板接触表面积等多种因素的制约，进而造成热量分布不均匀的情况，对系统的整体性能产生不利影响。例如，在高温环境下，不均匀的热量分布可能导致某些区域过热，而其他区域则温度较低，这不仅降低了设备的效率，还可能引发安全隐患[4]。突扩管因其独特的几何形状，它能够提供更大的流动面积，有助于减小内部压降，使得流体在通过时能够更加顺畅地流动，减少了摩擦阻力，提高了系统性能，使得它在微型工业设备和热交换器领域有着广泛的应用[5]。Gupta与Kukreja[6]构建了一个二维突扩管模型，研究发现较大的倾斜角可增强内部附着区域的效果，从而优化流体分布并减少能量损耗。此外，研究人员通过在管道引入凹坑和球凸结构并装载到散热系统中，可以提升系统传热强度、降低管道内部流动阻力以及改善系统整体性能[7]-[9]。Ali等人[10]提出两种新型的双管光伏热集热器设计，即双管同向(DTUD)和双管异向(DTOD)设计，通过数值模拟和分析，展示了其在光伏系统中的冷却效果。

非牛顿流体是指剪切应力与剪切速率之间不存在线性关系的流体。粘弹性流体是非牛顿流体的一种，同时具备粘性和弹性特性[11]。常见的粘弹性流体包括聚合物溶液、涂料、面团及凝固汽油等。在模拟粘弹性流体的流动时，目前常见的计算流体动力学(CFD)软件，例如FLUENT，提供了部分粘弹性流体模型。

例如，幂律模型、Carreau 模型[12] [13]。然而，Maxwell 模型并未包含在内。为了实现对 Maxwell 流体的流动模拟，本文结合 C++ 编程语言，利用 FLUENT 自带的用户自定义函数(UDF)来编译 Maxwell 本构方程。

本文对具有球凸结构的双管并排突扩管光伏系统模型进行了数学建模，研究了不同入口位置的布置下系统性能。在数学建模过程中，我们通过流变学实验配置纳米流体，测定并拟合导热系数公式，并将 Maxwell 本构方程与导热系数公式一起通过 UDF 导入 CFD 求解器，模拟 Maxwell 流体在管道内的流动和传热过程，对比光伏板的冷却效果和性能分析。

2. 数学建模

图 1 展示了双管并排的球凸结构突扩管光伏系统的示意图。冷却通道根据两根管道入口位置的不同分为两种情况：入口在同一侧称为同向，反之称为异向。光伏系统尺寸为 $400 \text{ mm} \times 110 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ，其中玻璃、光伏电池和吸热板的厚度分别为 2 mm 、 0.3 mm 和 0.7 mm 。底部附有两个带有球凸结构的突扩管，每根管道中的细管直径为 4 mm ，扩管直径为 8 mm ，球凸结构直径为 5 mm ，相邻两个球凸之间的间距为 10 mm 。表 1 概述了模型各部件的物理性质。光伏系统模型采用 Spaceclaim 软件进行绘制，而网格划分采用 Meshing 软件进行划分，其中求解器偏好设置为“Fluent”，单元的阶选择“线性的”。图 2 显示了流体域的生成网格图。

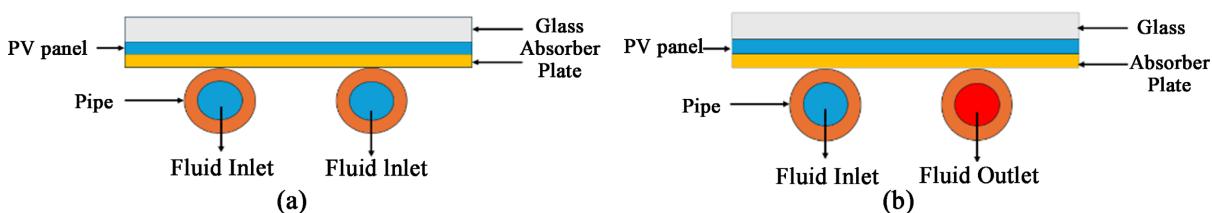


Figure 1. Schematic diagram of a photovoltaic panel model containing dual-tube sudden expansion tubes with a spherical convex structure: (a) Dual-Tube Uni-Directional (DTUD); (b) Dual-Tube Opposite-Directional (DTOD)

图 1. 含球凸结构双管并排的突扩管的光伏板模型示意图：(a) 双管同向；(b) 双管异向

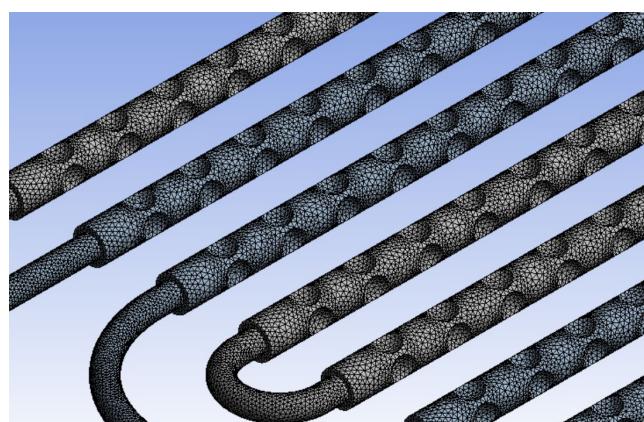


Figure 2. Mesh generation diagram of the fluid domain
图 2. 流体域的网格生成图

2.1. 流变学实验

本研究中使用的粘弹性流体是黄原胶(XG)-二氧化钛(TiO₂)纳米流体，表 2 列出了所选材料的物理特性，包括黄原胶溶液的热导率是使用导热系数仪进行测量的。纳米流体的相关参数表达式如下[14]：

Table 1. Physical properties of each component of the photovoltaic system [4]**表 1.** 光伏系统各组件物理性质

光伏组件	密度(kg/m ³)	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 2. Physical properties of nanofluid materials [14]**表 2.** 纳米流体材料的物理性质

材料	密度(kg/m ³)	比热容(J/(kg·K))	导热系数(W/(m·K))	粘度(Pa·s)
黄原胶	1550	1730	0.5986	0.0306
二氧化钛	4260	710	8.4	-

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

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi) (\rho C_p)_{bf} + \varphi (\rho C_p)_{np}, \quad (2)$$

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

其中， ρ_{np} 和 ρ_{bf} 分别为纳米颗粒和黄原胶溶液的密度， φ 为纳米流体中 TiO_2 的体积分数， μ_{bf} 为黄原胶溶液的粘度， $(\rho C_p)_{bf}$ 和 $(\rho C_p)_{np}$ 分别为黄原胶和纳米颗粒的热容。

制备 100 毫升黄原胶(Xanthan Gum, XG)-二氧化钛(TiO_2)纳米流体的步骤如下：首先，利用电子天平和量筒精确称量所需黄原胶溶液的体积及 TiO_2 纳米颗粒的质量。将 TiO_2 纳米颗粒与适量十二烷基苯磺酸钠分散剂混合后，加入黄原胶溶液中。随后，使用磁力搅拌器持续搅拌 3 小时，确保充分混合。将溶液转移至玻璃烧杯，并置于超声波振荡器中，进一步分散纳米颗粒。静置溶液 6 天，检查是否有团聚现象。若发现团聚，重复上述步骤直至纳米流体均匀分散。合成完成后，使用导热系数仪测量并记录纳米流体样品在常温条件下的导热系数。最后，通过曲线拟合方法分析数据，得出黄原胶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为图 3 和图 4。

**Figure 3.** Configured XG- TiO_2 nanofluid**图 3.** 配置的黄原胶-二氧化钛纳米流体

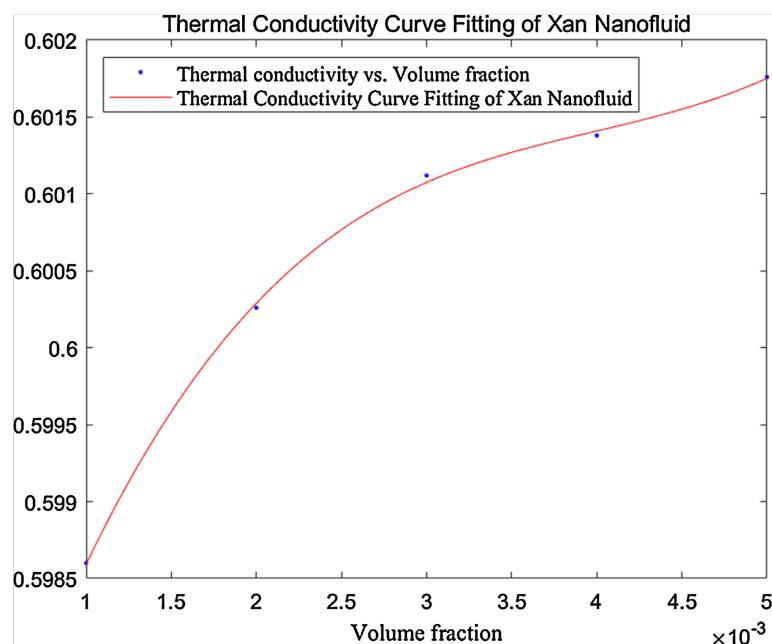


Figure 4. Nanofluid thermal conductivity fitting image
图 4. 纳米流体热导率拟合图像

黄原胶纳米流体的导热系数拟合公式如下：

$$k_{nf} = k_{bf} \left(1 + \frac{3\varphi\beta}{1 - \varphi\beta - 0.525\alpha\beta\varphi^{\frac{10}{3}}} + A_1\varphi^3 + A_2\varphi^2 + A_3\varphi + A_4 \right), \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{k_{np} - k_{bf}}{\frac{4}{3}k_{np}}, \beta = \frac{k_{np} - k_{bf}}{k_{np} + 2k_{bf}}, \quad (5)$$

其中 $A_1 = -0.05172$, $A_2 = 1.291 \times 10^5$, $A_3 = -1531$, $A_4 = 4.931$ 为曲线拟合的参数。表 3 展示了曲线拟合的统计指标结果。结合表 3 和图 4 可以看出，拟合公式在描述纳米流体体积分数与热导率之间的关系时，表现出高度的准确性和可靠性。最后通过 C++ 编程，利用用户自定义函数(UDF)将导热系数公式导入到 CFD 求解器中。

Table 3. Evaluation of thermal conductivity formula fitting data
表 3. 热导率公式拟合数据评估

拟合公式	R ²	调整 R ²	SSE	RMSE
(4)	0.9991	0.9871	0.000	0.001

2.2. 控制方程的建立

本研究假定纳米流体在管道中的流动是稳态不可压缩流动。纳米流体的 Maxwell 本构方程表示为[15]：

$$\left(1 + \lambda \frac{\partial}{\partial t} \right) \mathbf{S} = \mu_{nf} \mathbf{A}, \quad (6)$$

其中 λ 表示松弛时间， t 表示时间， \mathbf{S} 表示偏应力张量， μ_{nf} 对应于纳米流体的粘度，而 \mathbf{A} 定义为

$\mathbf{A} = \mathbf{L} + \mathbf{L}^T$, 这里 \mathbf{L} 表示速度向量 $\mathbf{V} = (u_1, u_2, u_3)$ 的梯度。同导热系数公式一样, 使用 UDF 将公式(6)导入到 CFD 求解器中。

纳米流体的连续性方程和动量方程分别为:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0, \quad (7)$$

$$\rho_{nf} \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{S}, \quad (8)$$

其中 ρ_{nf} 表示纳米流体的密度, p 表示流体压力。

将公式(6)代入公式(8), 根据时均平均法, 得到连续性方程和动量方程:

$$\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{u}_2}{\partial x_2} + \frac{\partial \bar{u}_3}{\partial x_3} = 0, \quad (9)$$

$$\left(1 + \lambda \frac{\partial}{\partial t} \right) \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_l \bar{u}_i)}{\partial x_l} \right] = - \left(1 + \lambda \frac{\partial}{\partial t} \right) \left[\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial (\bar{u}_l \bar{u}_i)}{\partial x_l} \right] + \nu_{nf} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_l \partial x_l}, \quad (10)$$

其中, $\bar{u}_i (i=1,2,3)$ 表示时均速度分量, $\nu_{nf} = \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}}$ 表示纳米流体的运动粘度, $\frac{\partial (\bar{u}_l \bar{u}_i)}{\partial x_l}$ 为雷诺应力项。

纳米流体的温度方程表示为:

$$(\rho C_p)_{nf} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) T \right) = k_{nf} \nabla \cdot (\nabla T), \quad (11)$$

其中 k_{nf} 表示纳米流体的热导率。类似地, 通过时均平均法推导的纳米流体温度方程为:

$$(\rho C_p)_{nf} \left[\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_l \bar{T})}{\partial x_l} \right] = k_{nf} \frac{\partial}{\partial x_l} \left[\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_l} - (\rho C_p)_{nf} (\bar{u}_l \bar{T}') \right]. \quad (12)$$

根据瞬时速度和时均平均速度的动量方程推导, 得到 Maxwell 流体的湍流动能(K)和湍流耗散率(ε)方程如下:

$$\begin{aligned} \left(1 + \lambda \frac{\partial}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial K}{\partial t} + \bar{u}_l \frac{\partial K}{\partial x_l} \right) &= - \left(1 + \lambda \frac{\partial}{\partial t} \right) \left(\bar{u}_i \bar{u}_l \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_l} \right) + \nu_{nf} \frac{\partial^2 K}{\partial x_l \partial x_l} \\ &\quad - \varepsilon - \left(1 + \lambda \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial}{\partial x_l} \left[\left(\bar{K} \bar{u}_l \right)' - \frac{\bar{p} \bar{u}_l}{\rho_{nf}} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \left(1 + \lambda \frac{\partial}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) &= \nu_{nf} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x_l \partial x_l} - \frac{2\nu_{nf}}{\rho_{nf}} \left(1 + \lambda \frac{\partial}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_l} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_l} \right)' - \left(1 + \lambda \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial (\bar{\varepsilon} \bar{u}_j)}{\partial x_j} \\ &\quad - 2\nu_{nf} \left(1 + \lambda \frac{\partial}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_l} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_l} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_l} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_l} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right)' . \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} &- 2\nu_{nf} \left(1 + \lambda \frac{\partial}{\partial t} \right) \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_l} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_l \partial x_j} - 2\nu_{nf} \left(1 + \lambda \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_l} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_l} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \\ &- 2\nu_{nf}^2 \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_l} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_l} \end{aligned}$$

2.3. 性能评估指标和边界条件的设定

本研究假设冷却管道的底部和侧壁为绝热状态。湍流模型选用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型。纳米流体进入管道时的初始温度设定为 300 K，在入口处设定了速度边界条件，其中速度范围设定为 0.01 至 0.1 m/s，湍流设置为“Intensity and Viscosity Ratio”，湍流强度为 5%，湍流粘度比为 10。出口处选用压力出口边界条件，且出口压力与标准大气压一致。使用 PISO 算法将压力与速度耦合，在空间离散方案中，动量方程和能量方程采用 Second Order 格式，而湍流动能和湍流耗散率方程则采用 QUICK 格式进行离散。

摩擦因子(f)和平均努塞尔数(Nu)定义为[4]:

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{D}\right)\left(\frac{\rho_{nf} \bar{V}^2}{2}\right)}, \quad Nu = \frac{hL}{k_{nf}}, \quad (15)$$

其中 D 和 L 代表管道的直径和长度， \bar{V} 和 ΔP 分别表示平均横截面速度和入口与出口之间的压力差。 $h = Q/(T_{PV} - T_{in})$ 是平均对流传热系数，其中 T_{in} 和 T_{PV} 表示纳米流体的入口温度和光伏板表面温度。 Q 代表太阳辐射热通量，其范围设定在 600 到 1000 W/m²。

光伏系统的热效率，电效率和总效率依次表示为[16]:

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{QA_s} = \frac{\dot{m}_{nf}(C_p)_{nf}(T_{out} - T_{in})}{QA_s}, \quad (16)$$

$$\eta_{ele} = \frac{P_{ele}}{Q} = \tau_g \xi_f \eta_r [1 - \beta_r(T_{PV} - T_{ref})], \quad (17)$$

$$\eta_{ov} = \eta_{ele} + \eta_{th}, \quad (18)$$

其中 \dot{m}_{nf} 是纳米流体的质量流量，它与流速 v 的关系是: $v = 4\dot{m}_{nf}/\rho_{nf}D^2$ 。 T_{out} 是纳米流体的出口温度， A_s 代表光伏电池的面积。参数 $\tau_g = 0.95$ 、 $\xi_f = 0.79$ 、 $\eta_r = 15\%$ 和 $\beta_r = 0.005$ 依次表示光伏电池的玻璃透射率、电池填充系数、光伏参考效率、参考模块温度和光伏温度系数。

3. 结果与讨论

3.1. 网格独立性和模型验证

图 5 描绘了网格密度对模型性能的影响，使用水作为冷却剂，流速为 0.01 m/s，热通量为 1000 W/m²。该图表明，使用 110 万个网格数的模型通过 CFD 模拟导致出口温度和光表面温度的误差仅为 0.0023% 和 0.0017%。因此，模型选用的 110 万个元素网格，在优化计算效率的同时，确保了模型网格的精确性，从而保障了研究结果的可靠性和稳健性。

图 6 展示了本模型的验证结果及数值模拟环境条件。采用水作为冷却剂，并基于 Ali [10] 等人的测定的太阳辐射量数据进行模拟，结果显示与 Rosli [17] 等人的数值实验结果一致，表明该模型具有较高的可信度，进一步验证了其准确性和有效性。

3.2. 光表面温度与管道内纳米流体速度与温度分布

图 7 显示了双管并排情况下管道内流体速度的分布。无论是双管同向还是异向排列，流体速度的分布趋势相同：当流体从细管进入扩管时，横截面积显著增大，根据质量守恒定律，单位时间内通过管道横截面的流体体积保持不变。因此，在扩管中，由于横截面积的增大，流体的流速会明显降低，以确保流量不变，此时流速的降低使得流体在扩管中的流动显得更加平稳。相反，当流体从较宽的区域流向

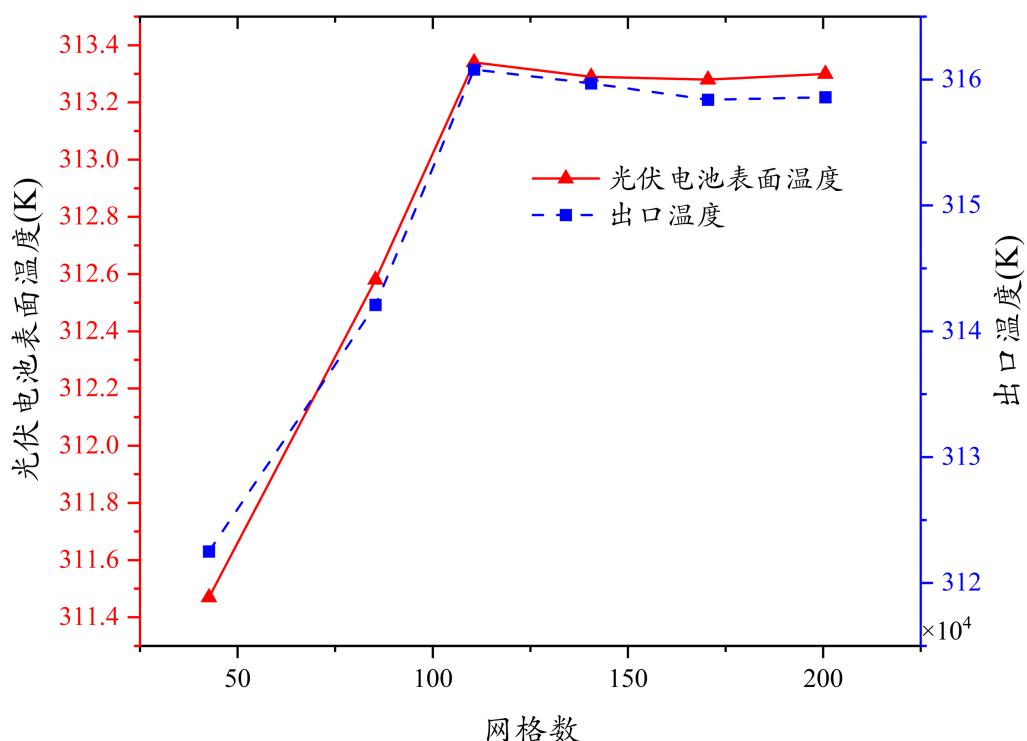


Figure 5. Grid independence verification

图 5. 网格独立性验证

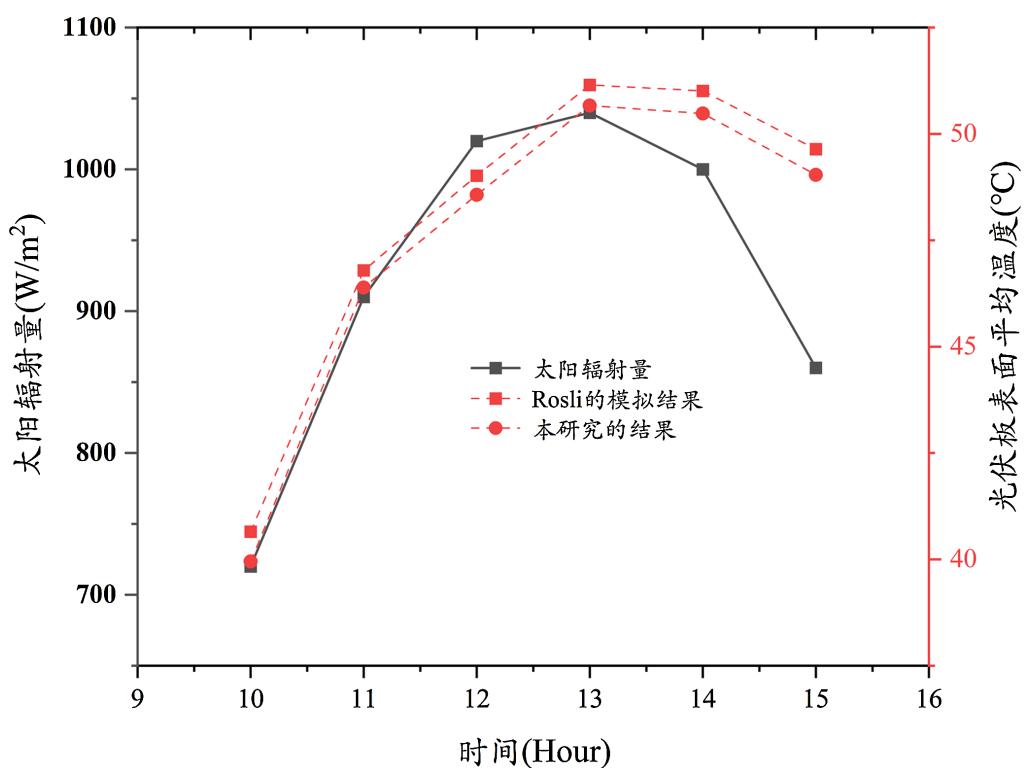


Figure 6. Model validation

图 6. 模型验证

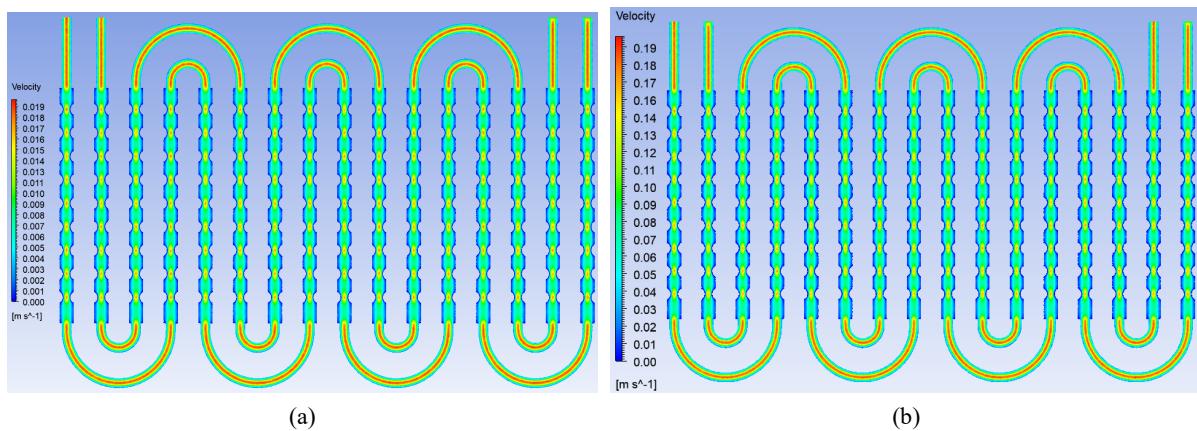


Figure 7. Fluid velocity image inside the pipe: (a) DTUD; (b) DTOD
图 7. 管道内部流体速度图像：(a)双管同向；(b)双管异向

较窄的凸起区域或由扩管进入细管时，横截面积急剧减小。为了保持流量不变，流体必须增加其流速以通过狭窄的区域。这种流速的上升是因为单位时间内通过该区域的流量需要增加，从而形成加速现象，这使得流体在狭窄区域中的流动变得更为湍急和快速。

图 8 展示的是太阳辐射为 1000 W/m^2 双管并排下光伏板表面和管道内的流体温度分布图像。可以看到，管道内的纳米流体温度分布趋势是相似的，管内流体流动时温度持续上升，主要源于两方面：一是光伏板吸收热量后，经系统元件热传导至管壁，再由流体吸收；二是流体在管内流动遇阻力与摩擦力，

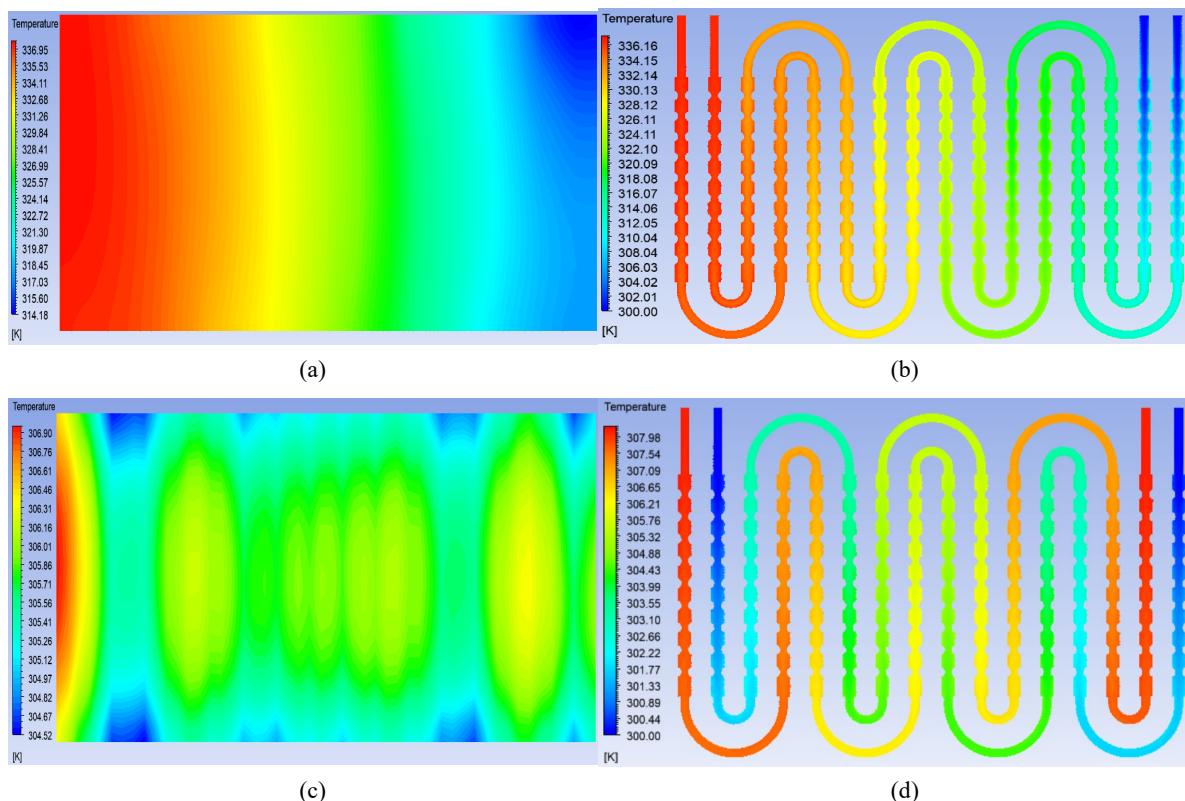


Figure 8. Temperature images of the photovoltaic panel surface and the fluid inside the pipe: (a, b) DTUD; (c, d) DTOD
图 8. 光伏板表面和管道内部流体温度图像: (a, b) 双管同向; (c, d) 双管异向

这些力转化为热能，促使流体温度进一步升高。此外，光伏板表面的热量分布均匀，纳米流体的高效传热特性使得温度梯度最小化。另外，由于纳米流体加热均匀，双管反向布置对应的光伏板上温度不均匀性最小。当采用双管异向布置方式时，两管道内流体流动方向相反，这种反向流动模式在管道内形成更复杂的流动模式，增强了流体间的混合程度和扰动效果。通过这种增强的混合与扰动作用，可以大幅提升纳米流体与光伏板之间的热交换效率，减小光伏板表面的温度梯度，从而提高整体系统的热能利用效率。

3.3. 不同流速下光伏系统的性能分析

图 9 展示的是在不同流速下的双管并排布置光伏系统表面温度和系统总效率的对比图像。可以看到，随着流速的增加，纳米流体通过管道时，它有效地降低了光伏板的表面温度，提高了光伏表面温度分布的均匀性，从而提升了整个光伏系统的散热能力。纳米流体在高速流动状态下，其微小颗粒与光伏板表面紧密接触，加速了热量的传递。此外，光伏板在较低的温度下工作性能得到优化，均匀的温度分布避免了因局部过热导致的光伏板性能衰减或损坏，确保了光伏系统在较长时间内能够稳定高效地运行。此时光伏板表面温度均匀分布，使得每个单元都能保持最佳的工作状态，减少了热应力对光伏系统的损害。因此，流速的增加通过提升纳米流体的散热能力，间接提升了整个光伏系统的总效率。具体而言，较高的流速促进了纳米流体与光伏板之间的热交换，使得热量能够更迅速地从光伏板传递到冷却介质中，进一步增强了系统的整体冷却效果。

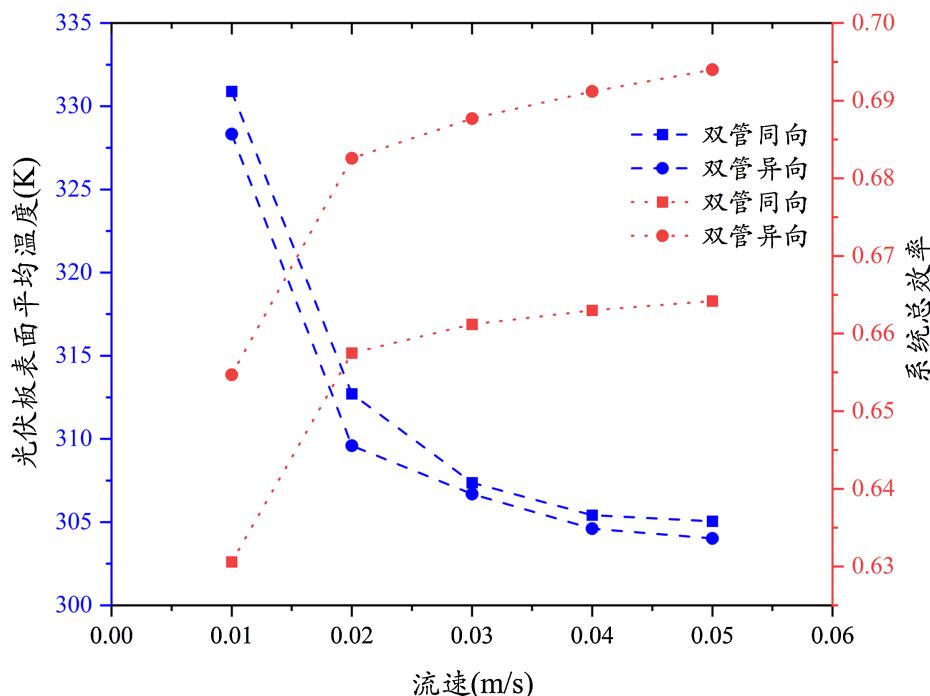


Figure 9. Photovoltaic panel surface temperature and system overall efficiency images at different flow rates
图 9. 不同流速下光伏板表面温度和系统总效率图像

3.4. 松弛时间对系统性能的影响

图 10 展示的是不同松弛时间对努塞尔数(Nu)和摩擦因子(f)的影响。图 10(a)显示，随着流速的提升，热边界层的厚度变薄，这不仅使得系统内部的热量传递更加迅速，还增强了系统的对流换热效能。这种变化直观地体现在 Nu 的增加上，表明系统的传热性能得到了增强。在这一过程中，流体的快速流动

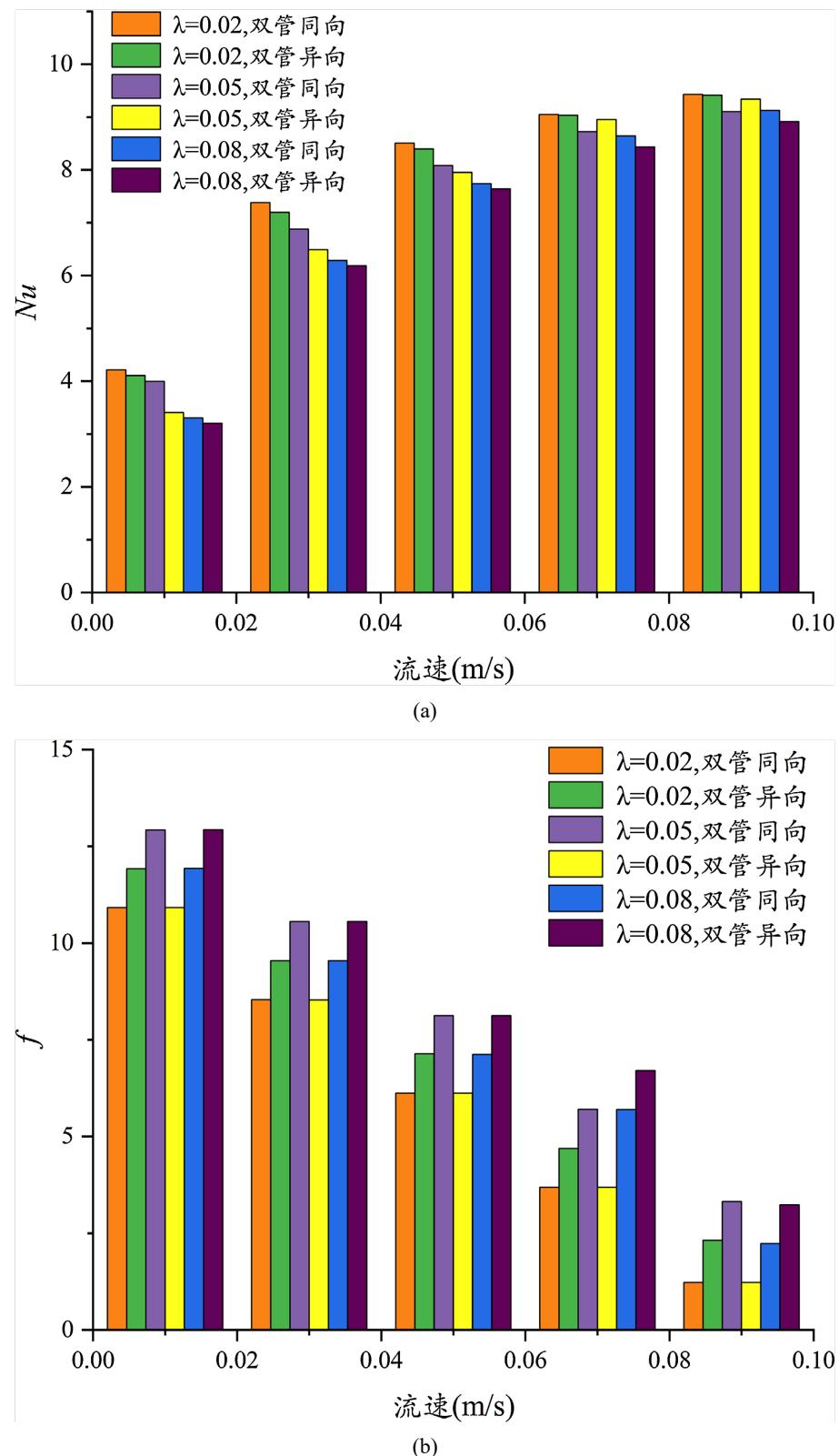


Figure 10. Effect of relaxation time on performance of double-tube side-by-side photovoltaic system: (a) Nusselt number (Nu); (b) friction factor (f).

图 10. 松弛时间对双管并排的光伏系统性能的影响: (a)努塞尔数(Nu); (b)摩擦因子(f)

有效地打破了原有的热边界层，促进了更高效的热交换，提升了整个系统的热效率和性能表现。此外，纳米流体的松弛时间越短，其热响应能力就越强，这一特性使得纳米流体能够及时捕捉到系统内的温度变化，并高效地将热量从高温区域传递到低温区域。同时由于纳米颗粒的存在，纳米流体在导热性能增强，能够快速响应温度波动，以维持系统的稳定性和高效性。**图 10(b)**显示，流速的增加会促使球凸结构导致管内不同位置的流体剪切速率出现差异。这种差异主要体现在流体在靠近管壁和中心区域的流动特性上。较短的松弛时间能够使流体更快地适应这些变化，从而最大限度地降低壁面剪切应力，有助于减少管道内部的摩擦损失，还能有效防止因高剪切应力造成的光伏系统磨损或损坏，进而降低 f ，提高系统的稳定性。

4. 结论

本文针对光伏板表面温度分布不均的问题，研究了纳米流体在具有球凸结构的双管并排突扩管内的流动与传热行为。通过纳米流体的流变学实验，并利用 UDF 功能，将拟合的导热系数公式和 Maxwell 本构方程集成到 CFD 求解器中进行模拟。在不同流速条件下，分析了光伏系统的冷却效果及其性能对比，得出以下结论：

- 1) 管道呈双管同向或异向布置时，内部的流体速度变化规律是相似的。
- 2) 双管异向的布置方式有助于提升纳米流体与光伏板之间的热交换效率，减小光伏板表面温度分布不均。
- 3) 流速的提升使得光表面的温度分布更加均匀，从而间接提高了光伏系统的总效率。
- 4) 松弛时间越短，纳米流体对温度变化的适应能力越强，能高效传递热量，同时能更快响应流速增加产生的剪切速率变化，减少摩擦因子。

基金项目

国家自然科学基金(No.12102032)、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)、北京建筑大学研究生创新项目(No.PG2024151)和 2024 年度研究生教育教学质量提升项目(J2024019)资助。

参考文献

- [1] 王晓梦, 董波. 太阳能光伏电池板降温技术研究进展[J]. 煤气与热力, 2024, 44(7): 33-38.
- [2] Hosseinzadeh, M., Salari, A., Sardarabadi, M. and Passandideh-Fard, M. (2018) Optimization and Parametric Analysis of a Nanofluid Based Photovoltaic Thermal System: 3D Numerical Model with Experimental Validation. *Energy Conversion and Management*, **160**, 93-108. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.006>
- [3] Fu, Z., Li, Y., Liang, X., Lou, S., Qiu, Z., Cheng, Z., et al. (2021) Experimental Investigation on the Enhanced Performance of a Solar PVT System Using Micro-Encapsulated PCMs. *Energy*, **228**, Article ID: 120509. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120509>
- [4] 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. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122422>
- [5] 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123446>
- [6] Gupta, S.K. and Kukreja, N. (2020) CFD Analysis of Flow over Backward Facing Step at Different Inclination Angle. *International Journal of Advanced Science and Technology*, **29**, 4696-4701.
- [7] Xie, S., Liang, Z., Zhang, J., Zhang, L., Wang, Y. and Ding, H. (2019) Numerical Investigation on Flow and Heat Transfer in Dimpled Tube with Teardrop Dimples. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **131**, 713-723. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.112>

- [8] Yao, Y., Ding, J., Zhang, Y., Wang, W. and Lu, J. (2022) Heat Transfer Performance of Pillow Plate Heat Exchanger with Molten Salt and Supercritical Carbon Dioxide. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **183**, Article ID: 122211. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122211>
- [9] Gürdal, M., Pazarlıoğlu, H.K., Tekir, M., Arslan, K., Gedik, E. and Taşkesen, E. (2022) Experimental Investigation on Thermo Hydraulic Performance of Ferronanofluid Flow in a Dimpled Tube under Magnetic Field Effect. *Experimental Heat Transfer*, **36**, 312-330. <https://doi.org/10.1080/08916152.2022.2027575>
- [10] Ali, S., Kalita, P., Bora, B.J., Deka, M.J., Kalita, P. and Dutta, P.P. (2024) Two Novel Dual-Tube Photovoltaic-Thermal Collector Designs with Improved Performance for Liquid-Cooled Photovoltaic-Thermal Systems. *Renewable Energy*, **232**, Article ID: 121062. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121062>
- [11] 刘佳杰. 粘弹性流体在弹性圆管内的流动动态响应研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2023.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [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] 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109303>
- [16] Khelifa, A., El Hadi Attia, M., Driss, Z. and Muthu Manokar, A. (2023) Performance Enhancement of Photovoltaic Solar Collector Using Fins and Bi-Fluid: Thermal Efficiency Study. *Solar Energy*, **263**, Article ID: 111987. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111987>
- [17] Mohd Rosli, M.A., Wai Loon, Y., Nawam, M.Z., Misha, S., Roslizar, A., Hussain, F., et al. (2021) Validation Study of Photovoltaic Thermal Nanofluid Based Coolant Using Computational Fluid Dynamics Approach. *CFD Letters*, **13**, 58-71. <https://doi.org/10.37934/cfdl.13.3.5871>