

文章编号:1006-2467(2019)02-0134-06

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.02.002

在磁场作用下 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ 纳米 流体湍流对流换热实验研究

沙丽丽, 巨永林, 张 华

(上海交通大学 制冷与低温工程研究所, 上海 200240)

摘 要: 实验研究了不同体积分数 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ 纳米流体在磁场作用下的水平小圆管内的湍流流动对流换热特性, 测量了体积分数为 3% 的 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ 纳米流体的沿程压力降并计算了其能量比率, 探讨了在磁场作用下纳米流体强化对流换热的机制. 实验结果表明: $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ 纳米流体的对流换热系数随着体积分数的增加而升高, 其平均值最大提高了 4.3%; 在与流动方向垂直的均匀强磁场作用下, 当磁场强度为 23.809 和 39.682 kA/m 时, 纳米流体的换热系数几乎没有提高, 当磁场强度为 63.492 A/m 时, 换热系数有所提高, 其平均值最大提高了 3%; $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ 纳米流体的沿程压力降相对于基液去离子水增加了 50%, 外加磁场使其进一步增大, 并随着磁场强度的增加而增大, 当磁场强度为 63.492 A/m 时增加了 11.3%; $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ 纳米流体相对于基液去离子水的能量比率计算值小于 1, 说明添加 Fe_3O_4 纳米粒子没有达到节能的效果.

关键词: 纳米流体; 强化换热; 磁场; 摩擦压降; 能量比率

中图分类号: TK 114

文献标志码: A

Experimental Investigation of Convective Heat Transfer Coefficient of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ Nanofluids in the Presence of the Magnetic Field Under the Turbulent Flow Regime Conditions

SHA Lili, JU Yonglin, ZHANG Hua

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The effect of magnetic field on the convective heat transfer of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ nanofluids was experimentally studied. The $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ nanofluids flowed through a horizontal circular tube under the turbulent flow regime conditions. The pressure drop of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ nanofluids was measured at volume fraction of 3%. The mechanism of the heat transfer of magnetic nanofluids under the magnetic field was discussed. The experimental results showed that the heat transfer coefficient increased with the increase of the $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ nanofluids concentration, and the maximum averaged enhancement was 4.3%. In the presence of the perpendicular uniform magnetic field, almost no obvious enhancement of the convective heat transfer coefficient of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ nanofluids was observed in fields up to 23.809 and 39.682 kA/m but it was observed in fields of intensity up to 63.492 kA/m. The maximum averaged enhancement was 3%. Compared with the pressure drop of the distilled water, 50% enhancement was observed using

收稿日期: 2017-06-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51006069)

作者简介: 沙丽丽 (1983-), 女, 河北省唐山市人, 博士生, 主要从事磁流体脉动热管的强化传热研究.

通信作者: 巨永林, 男, 教授, 博士生导师, 电话 (Tel.): 021-34206532; E-mail: yju@sjtu.edu.cn.

$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ nanofluids at the volume fraction of 3%. Enhancement was also obtained under the applied magnetic field and the maximum averaged enhancement was 11.3%. The power ratio was less than 1, and thus the utilization of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ nanofluids in heat transfer could not save energy.

Key words: nanofluids; heat transfer enhancement; magnetic field; pressure drop; energy ratio

随着煤、石油和天然气等资源的过度开采,传统的石化能源储量日渐衰竭,全球能源问题日益严峻,提高能源利用率是当今解决能源危机的重要手段. 20 世纪以来,随着微电子器件与集成、高温超导、核电工业和航天器热控等技术的迅速发展,对能使设备保持正常运行的冷却手段提出了更高的要求,传统的换热工质已很难满足这些特殊工作条件下的换热需求. 鉴于纳米流体同时具有流体的流动性和金属(或者金属氧化物、聚合物)固体粒子的高导热性,Choi 等^[1]将其作为一种新型换热工质加以研究,引起了热科学研究者的浓厚兴趣.

纳米粒子的小尺度效应使纳米流体呈现出良好的稳定性和换热特性. Prasher 等^[2]测量了纳米流体的导热率和黏度,发现对基液添加纳米粒子后,其导热率和黏度均增加,并且黏度增加得更多,增幅大约是导热率的 4 倍;纳米流体的导热率与黏度也受温度影响,当温度为 30~60 °C 时,导热率随温度升高而升高,而黏度变化不大. 磁场对纳米磁流体的导热率和黏度有影响,Zhang 等^[3]在对磁场作用下摩擦压降的测量实验中发现,摩擦压降随着磁场的增强而增大,并认为这是由于在磁场作用下纳米粒子产生了阻力的缘故. 纳米流体的对流换热强化是导热率升高和黏度增大相互抵制的结果,高黏度使磁流体的流动性和换热效果变差. Goharkhah 等^[4-5]研究了体积分数为 1%~2% 的 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ 纳米流体的对流换热,发现磁场强化了纳米流体的对流换热,可见磁场的作用使纳米流体导热率的增加占主导地位. Yarahmadi 等^[6]在交变和恒定磁场作用下对铁磁流体在低雷诺数(Re)范围内的强化对流换热进行了实验研究,结果表明黏度是边界层的主要干扰因素,对于体积分数为 2.5% 的 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ 纳米流体,在磁场条件下, $Re=465$ 时,对流换热系数 h 提高 12.4%,而 $Re=1175$ 时, h 提高 3.2%. 由于在磁场作用下的纳米磁流体的换热情况较为复杂,本文对垂直匀强磁场作用下不同体积分数的 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ 纳米流体的对流换热系数和沿程压力降进行了实验研究,讨论磁场作用下的磁化换热机制并计算纳米流体的能量利用率,以期有助于分析磁性纳米流体在工业中的应用前景.

1 纳米流体制备及其热物理性质

磁性纳米流体的制备选用 2 步法:将直径为 20 nm 左右的 Fe_3O_4 纳米粒子混合在基液去离子水(DW)中,同时将分散剂四甲基苯磺酸钠以质量比 1:3 添加到混合液中,通过 6511 型搅拌器搅拌 15 min,接着再用 SCQ-5201 超声波清洗机对搅拌均匀的纳米溶液超声分散 30 min,可以得到均匀稳定的纳米溶液. 在磁场作用下, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ 纳米流体的黏度和导热率随着磁场的方向与大小变化,很难测定精确值. 不同的导热率模型计算结果有一定差别,但当纳米流体的浓度极低(体积分数一般不超过 5%)和外磁场强度不高时,将这些导热率的计算结果用于对流换热系数的计算时,对结果影响不大. 本实验采用 Brinkman^[7]和 Einstein^[8]经验公式分别计算导热率和黏度,其中: Fe_3O_4 纳米粒子的密度 ρ_P 为 5 180 kg/m³,比热容 c_P 为 670 J/(kg·K),导热率 k_P 为 90 W/(m·K).

计算纳米流体密度(ρ)、比热容(c)、黏度(μ)和导热率(k)的公式分别为

$$\rho = (1 - \varphi)\rho_{\text{DW}} + \varphi\rho_P \quad (1)$$

$$c = \frac{(1 - \varphi)\rho_{\text{DW}}c_{\text{DW}} + \varphi\rho_P c_P}{\rho} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{\mu_{\text{DW}}}{(1 - \varphi)^{2.5}} \frac{\rho_{\text{DW}}}{\rho} \quad (3)$$

$$k = \frac{k_P + 2k_{\text{DW}} + 2(k_P - k_{\text{DW}})\varphi k_{\text{DW}}}{k_P + 2k_{\text{DW}} - (k_P - k_{\text{DW}})\varphi} \quad (4)$$

式中: ρ_{DW} 为去离子水密度; c_{DW} 为去离子水比热容; μ_{DW} 为去离子水黏度; k_{DW} 为去离子水导热率; φ 为 Fe_3O_4 在纳米流体中的体积分数.

2 小圆管纳米流体对流换热试验台

小圆管对流换热试验台如图 1 所示. 实验段由长为 600 mm、外径为 5 mm、管壁厚为 1 mm 的紫铜管构成,直径为 0.35 mm 的 Cr20Ni80 加热丝双向均匀地缠绕在管壁上,并连接 TDGC 2J-1 型电压调节器,从而给实验段提供恒热量的边界条件. 厚度为 5 cm 的玻璃纤维保温层包裹在加热段外面,以减小热量损失. 纳米流体由 RA090S 型液压隔膜计量泵

提供动力. 进出口温度由插入实验段 Teflon 接头的 2 个铂电阻测得, 壁温则由实验室自制的通过绝缘导热胶均匀粘贴在铜管壁上的 6 个 T 型热电偶测得. 测量压力的 YSZK-311 型压力变送器连接在实验段进出口 Teflon 接头处. 通过连接在自制的盘管冷凝器上的 DC-0510 低温恒温槽将进口温度调节到 20 ℃. 通过称重法测量流速. 垂直磁场由实验室

自制的电磁铁提供, 电磁铁的实物照片和结构示意图如图 2 所示, 垂直磁场放置在第 3 个热电偶 (T3) 的附近. 由 WYJ-30V/10A 直流电源为电磁场供电. 电磁场强度由 CH1600 型高斯计测得, 温度和压力则信号通过 Keithley 2701 型数据采集系统采集, 每个数据重复测量 3 次, 以确保实验结果的准确性.

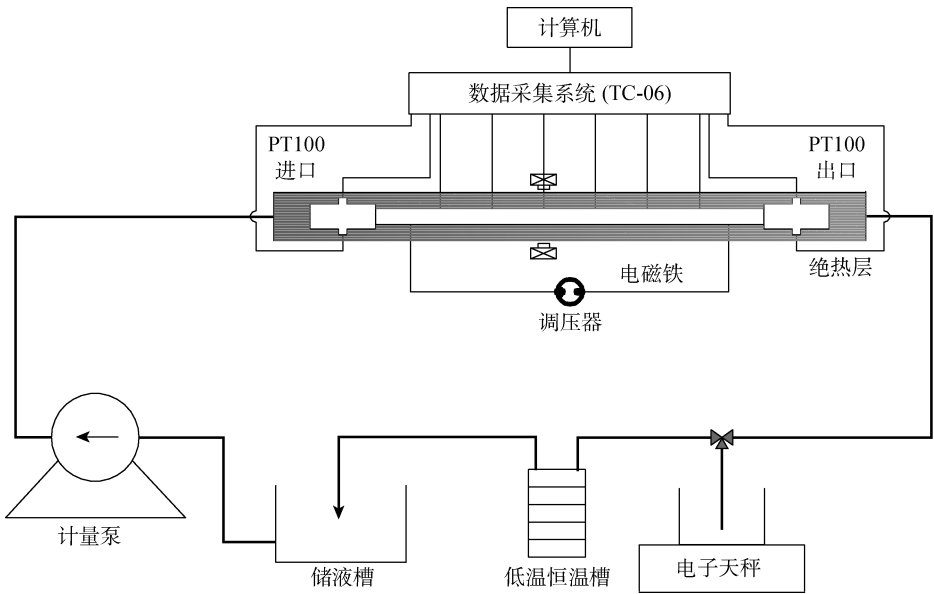


图 1 Fe₃O₄ 纳米流体对流换热系数实验测量装置

Fig. 1 Experimental device for the measurement of heat transfer coefficient of Fe₃O₄/Water nanofluids

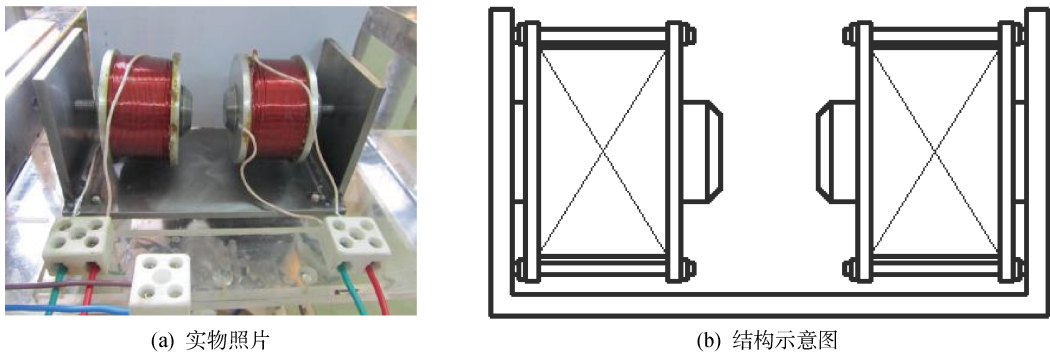


图 2 垂直均匀磁场装置图

Fig. 2 Schematic diagram of the electromagnets with perpendicular uniform magnetic field

3 实验数据处理与试验台可靠性验证

根据傅里叶导热定律计算内壁温

$$T_{w,in} = T_{w,out} - \frac{q}{2\pi L_e k_{Cu}} \ln \frac{D_{in}}{D_{out}} \tag{5}$$

式中: $T_{w,out}$ 为外壁温, 由热电偶测得; q 为热流密度; k_{Cu} 为铜导热率; L_e 为实验段有效加热长度; D_{in} 为管壁内径; D_{out} 为管壁外径.

实验中, 电磁场放置在流体进入管口沿程第 3

个热电偶附近的位置, 根据牛顿冷却公式计算对应的进口端 x 截面处的局部对流换热系数,

$$h(x) = \frac{q}{T_{w,in}(x) - T} \tag{6}$$

努塞尔数的计算公式

$$Nu(x) = h(x) D_{in} / k_f \tag{7}$$

式中: T 为纳米流体的温度; k_f 为流体导热率.

选择适用范围相对较广的准则方程 Gnielinski 公式^[9] 计算努塞尔数, 有

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5}(Pr^{0.66} - 1)} \times \left[1 + \left(\frac{D_{in}}{L}\right)^{\frac{2}{3}}\right]\left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0.11} \tag{8}$$

摩擦因子 f 的计算式为^[10]

$$f = (1.82 \lg Re - 1.64)^{-2} \tag{9}$$

根据 Darcy 方程^[10]计算小圆管内的沿程压力降,

$$\Delta p = f \frac{L}{D_{in}} \frac{\rho v^2}{2} \tag{10}$$

式中: L 为管长; D 为管径; v 为流体速度.

衡量纳米流体能否节能的能量比率计算公式为

$$\epsilon_{ER} = \frac{h_{av}/h_{av,DW}}{\Delta p/\Delta p_{DW}} \tag{11}$$

式中: h_{av} 为纳米流体的平均对流换热系数; $h_{av,DW}$ 为基液去离子水的对流换热系数; Δp_{DW} 为基液去离子水的沿程压力降.

为验证实验系统的可靠性,先对 DW 进行流动与换热实验,作为 Fe₃O₄/Water 纳米流体流动与换热实验结果的参考基准,并与 Gnielinski 湍流换热经验关联式^[9]进行对比,DW 湍流换热的实验结果与 Gnielinski 公式的计算结果如图 3 所示.可见,本实验系统的实验结果与其对应计算关联式的最大偏差 e 在 $\pm 20\%$ 以内,说明实验数据具有可靠性.

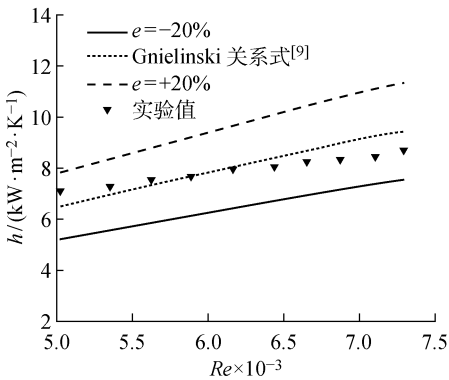


图 3 DW 的实验值与 Gnielinski 公式^[9]的计算值比较
Fig. 3 Comparison of experimental data of distilled water with the correlation by using Gnielinski equation^[9]

4 实验结果与分析

4.1 不同体积分数 Fe₃O₄/Water 对流换热系数的实验结果与分析

图 4 给出了 DW 与 φ 分别为 0.5%,1%,2%和 3%时 h 随 Re 的变化.添加 Fe₃O₄ 纳米粒子强化了 DW 的换热效果,并且 h 随着 φ 的增加而增大.当 $\varphi=0.5\%$ 时, h_{av} 提高 1.8%;当 $\varphi=3\%$ 时, h_{av} 提高

4.3%. 因为纳米流体中纳米粒子湍流旋涡一起运动,并做无规则的布朗运动,所以在 DW 中添加纳米粒子在提高导热率的同时降低了纳米流体边界层厚度,换热得到强化,并且强化换热效率随着 φ 的增加而增大.但是, h 不仅受到其导热系数的影响,还受到黏度的影响,黏度的增加导致边界层厚度增加,两者相互制约.

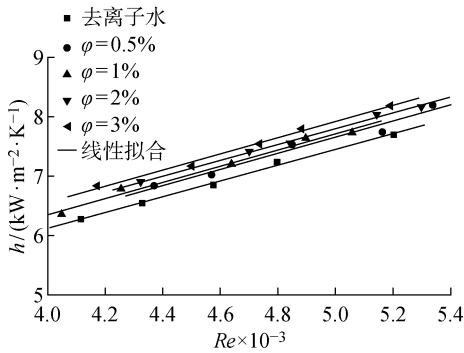


图 4 不同 φ 时 h 随 Re 的变化
Fig. 4 Local convective heat transfer coefficients for Fe₃O₄/Water nanofluids with various volume fractions along with the Re

4.2 外加垂直均匀磁场对 Fe₃O₄/Water 纳米流体对流换热系数的影响

图 5 给出了在垂直匀强磁场作用下, φ 分别为 0.5%,1%,2%和 3%时 h_{av} 随 Re 的变化情况.由图可见:当磁场强度 H 为 23.809 和 39.682 kA/m 时,不同的 φ 下 h 随 H 增加的效果不明显;当 H 增大到 63.492 kA/m 时,相对于 $H=0$ 的工况, h_{av} 分别增加了 1.8%,2.4%,2.5% 和 3%,表明 $H=63.492$ kA/m 时,不同 φ 下的 h 均增大,并随着 φ 的增加而增大.

在常温和外磁场强度为 793.650 kA/m 的条件下, $\frac{\mu H}{kT} \approx 0.02$,只有在极低温度时才会看到饱和状态.对于常温条件下,磁化强度与外磁场强度关系式可表示为^[11]

$$M = \frac{N\mu^2 H}{kT}$$

其中: N 为单位体积磁性材料中的原子数目.当 H 分别为 23.809 和 39.682 kA/m 时,Fe₃O₄ 纳米粒子在磁场方向上只有偏转的趋势,而并没有发生偏转,在磁场的作用下仅仅做左右摇摆运动,不能聚集成磁链,所以纳米粒子在 DW 中的分布没有变化,从而换热效果也没有发生明显的变化.当 H 增大到 63.492 kA/m 时,部分 Fe₃O₄ 纳米粒子沿着磁场方向排列,聚集成磁链,改变了 Fe₃O₄/Water 纳米

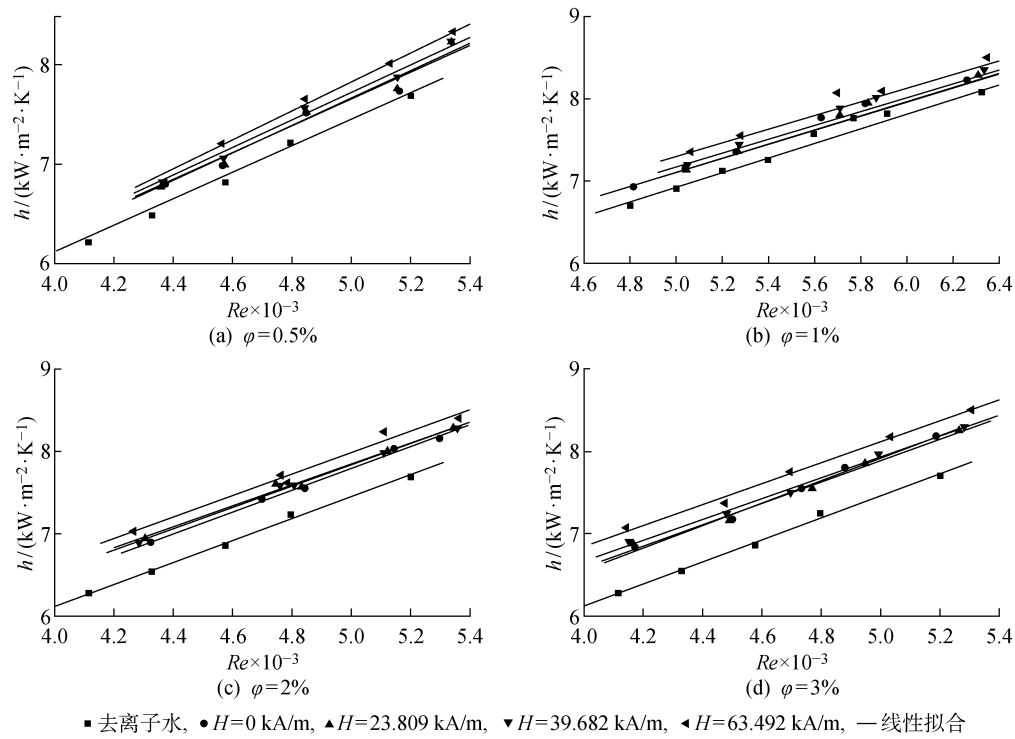


图 5 不同的 φ 时不同的 H 值下 h 随 Re 的变化

Fig. 5 Local convective heat transfer coefficients for $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ nanofluids with various volume fractions along with the Re in the presence of magnetic field with various intensities

流体的热物性参数^[12](主要是导热率和黏度),同时在管壁与流体之间形成了热通道,降低了 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ 纳米流体的边界层厚度,强化了换热,并且随着 H 的增加,磁链增长,对热边界层的扰动更剧烈,换热进一步被强化.实验结果表明,在 H 不低于 63.492 kA/m 时, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ 纳米流体的 h 随 H 和 φ 增加而增大.

4.3 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ 纳米流体能量比率的分析

图 6 给出了 φ 为 3% 时不同的 H 值下 Δp 随 Re 的变化.由图可见: $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ 纳米流体相对

于 DW, Δp 提高了 50%;在外磁场作用下,相对于无磁场条件, Δp 进一步提高,当 H 分别为 23.809, 39.682 和 63.492 kA/m 时, Δp 分别提高了 3.5%, 5.6% 和 11.3%.

将 H 分别为 0, 23.809, 39.682, 63.492 kA/m 时的不同 Δp 代入式 (11), 计算得到 ϵ_{ER} 分别为 0.086, 0.082, 0.079 和 0.119, 计算值均不大于 1. 可见,添加纳米粒子没有达到节能的效果.虽然纳米粒子强化了工质的换热效率,但是消耗了更多摩擦阻力功,需要外界提供等量的泵功,反而没有节能.

5 结论

本文对不同垂直匀强磁场作用下 φ 分别为 0.5%, 1%, 2% 和 3% 时的对流换热特性进行了实验研究,同时,测量了 φ 为 3% 时的 Δp 值,并对其进行了能效分析.通过实验研究发现:

(1) $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ 纳米流体强化了 DW 的对流换热, h 随着 φ 的提高而提高,当 φ 增大到 3% 时, h_{av} 提高了 4.3%;

(2) 当 H 分别为 23.809 和 39.682 kA/m 时, h 并没有被强化,当 H 增大到 63.492 kA/m 时,不同体积分数 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ 纳米流体的 h_{av} 均增加,最大增加量为 3%,并随着 φ 的增加而增大;

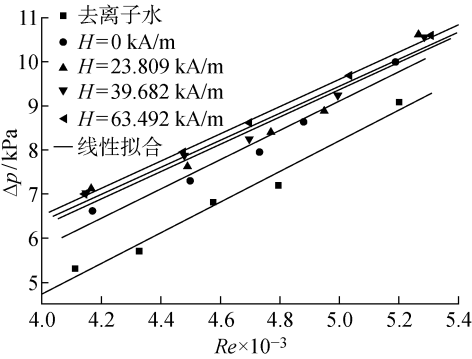


图 6 $\varphi=3\%$ 时不同的 H 值下 Δp 随 Re 的变化

Fig. 6 Pressure loss for $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ nanofluids at the volume fraction of 3% in the presence of magnetic field with various intensities

(3) $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ 纳米粒子大大提高了 DW 的摩擦阻力损失, φ 为 3% 时, Δp 增大 50%, 当外加磁场时, Δp 相对于未加磁场时的 φ 继续增加, 最大值为 11.3%;

(4) $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Water}$ 纳米流体的 ε_{ER} 经计算均远小于 1, 所以纳米流体的应用没有达到节能的效果。

参考文献:

- [1] CHOI S U S, EASTMAN J A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles developments and application of non-newtonian flows[J]. **ASME Journal of Heat Transfer**, 1995, 66(1): 99-105.
- [2] PRASHER R, SONG D, WANG J, *et al.* Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications[J]. **Applied Physics Letters**, 2006, 89(13): 255.
- [3] ZHANG P, LEE K H, LEE C H. Fretting friction and wear characteristics of magnetorheological fluid under different magnetic field strengths[J]. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 2017, 421: 3-18.
- [4] GOHARKHAH M, SALARIAN A, ASHJAEI M, *et al.* Convective heat transfer characteristics of magnetite nanofluid under the influence of constant and alternating magnetic field [J]. **Power Technology**, 2015, 274: 258-267.
- [5] GOHARKHAH M, ASHJAEI M, SHAHADADI M. Experimental investigation on convective heat transfer and hydrodynamic characteristics of magnetite nanofluid under the influence of an alternating magnetic field[J]. **International Journal of Thermal Sciences**, 2016, 99: 113-124.
- [6] YARAHMADI M, GOUDARZI H M, SHAFII M B. Experimental investigation into laminar forced convective heat transfer of ferrofluids under constant and oscillating magnetic field with different magnetic field arrangements and oscillation modes [J]. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2015, 68: 601-611.
- [7] BRINKMAN H C. The viscosity of concentrated suspensions and solutions [J]. **Journal of Chemical Physics**, 1952, 20(4): 571.
- [8] EINSTEIN A. Eine neue bestimmung der moleküldimensionen[J]. **Annals of Physics**, 1906, 324: 289-306.
- [9] GNIELINSKI V V, KARLSRUHE. Neue gleichungen für den wärme-und den stoffübergang in turbulent durchströmten Röhren and kanälen[J]. **Forschung Im Ingenieurwesen A**, 1975, 41(1): 8-16.
- [10] 张鸣远. 流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- ZHANG Mingyuan. Fluid mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [11] FEYNMAN R P, LEIGHTON R B, SANDS M. The feynman lectures on physics (2 volume set)[M]. United States: Addison-Wesley, 1964.
- [12] 宣益民. 纳米流体能量传递理论与应用[J]. **中国科学: 科学技术**, 2014, 44: 269-279.
- XUAN Yimin. An overview on naofluids and applications [J]. **Scientia Sinica (Technologica)**, 2014, 44: 269-279.