

The Effect of Viscosity on the $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ Falling Film Absorption with Fe_2O_3 Nanofluid*

Liu Yang, Kai Du, Yanjun Li

School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing

Email: windy4ever@163.com

Received: Apr. 17th, 2011; revised: Jul. 5th, 2011; accepted: Jul. 11th, 2011.

Abstract: The effect of viscosity on the heat and mass transfer of $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ falling film absorption with Fe_2O_3 nanofluid is studied. The results show that, the viscosity, influenced by the ingredient of nanofluid, directly influence the performance of absorption. The heat and mass transfer of absorption, is weakened by high viscosity nanofluid of only adding sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS), while, enhanced by lower viscosity nanofluid with appropriate ingredients. The nanofluid with lowest viscosity, prepared by adding 0.2% Fe_2O_3 and 1.5% SDBS, achieves the optimal performance in mass and heat transfer.

Keywords: Viscosity; Nanofluid; Falling Film Absorption; Fe_2O_3

粘度对氧化铁纳米流体氨水降膜吸收的影响*

杨 柳, 杜 垲, 李彦军

东南大学能源与环境学院, 南京

Email: windy4ever@163.com

收稿日期: 2011 年 4 月 17 日; 修回日期: 2011 年 7 月 5 日; 录用日期: 2011 年 7 月 11 日

摘 要: 本文研究了粘度在氧化铁纳米流体管外降膜吸收氨气过程中对传热传质的影响。结果表明: 纳米流体的组分直接影响着纳米流体的粘度, 而粘度又直接影响着氧化铁氨水纳米流体降膜吸收过程中传热传质的性能。只添加表明活性剂十二烷基苯磺酸钠(SDBS)会使流体粘度增加, 从而导致吸收过程传热传质效率的降低; 而添加适当的 SDBS 和纳米氧化铁能获得较低粘度, 从而强化传热传质效率。实验表明氧化铁和 SDBS 质量分数分别为 0.2% 和 1.5% 的时候, 制得的纳米流体具有最低的粘度和最高的传热传质性能。

关键词: 粘度; 纳米流体; 降膜吸收; Fe_2O_3

1. 引言

纳米流体既是指纳米颗粒悬浮液, 是 Choi SUS^[1] 在 1995 年首先提出。随着纳米材料科学的迅速发展, 纳米流体在传热和传质两方面的强化作用也逐渐应用到氨水吸收系统中。目前国内外已经有学者对一些纳米材料应用于氨水中, 对其进行了稳定性研究, 或者通过鼓泡吸收等方式进行研究, 取得了较为理想的结果。2006 年 Jin-Kyeong Kim 和 Jun Young Jung^[2,3] 进行了在氨水溶液中添加 Cu 和 CuO 纳米颗粒和表面活性剂的鼓泡吸收实验, 结果表明单纯加入纳米颗粒吸收率可提高到 3.21 倍; 同时加入纳米颗粒和表面活性剂可提高到 5.32 倍, 但由于纳米颗粒都与氨水反应生成

*基金项目: 国家自然科学基金(No. 50876020)。

铜氨络离子, 很难在氨水中长期稳定存在。2007 年 Yong Tae Kang^[4] 等人进行了在氨水中添加碳纳米管的鼓泡吸收实验, 结果显示在添加了 0.001 wt% 的碳纳米管后氨水的吸收过程的传热和传质效率分别提高了 20% 和 29.4%。苏风民、陈嘉宾^[5] 等人通过对碳纳米管的表面改性, 在不使用分散剂的情况下配置出了氨水纳米流体, 并进行了鼓泡吸收实验, 实验表明吸收强化效果随纳米质量百分比的增加而先增后降, 随氨水初始质量分数的增加而下降。

目前对纳米流体在氨水吸收中的应用主要集中在鼓泡吸收, 而氨水鼓泡吸收中, 粘度对吸收效率的影响没有在降膜吸收中这么明显。因为粘度不仅影响氨气穿过液膜进入内部的阻力, 也决定降膜液膜的流速。

所以粘度对于氨水降膜吸收的影响和传热系数一样也是非常重要的,虽然有很多关于传热系数对纳米流体性能的影响,但是关于粘度对于氨水吸收的影响却很少见到,本文通过制备不同粘度的氧化铁纳米流体研究了粘度对氨水降膜吸收中传热传质的影响,并对其机理进行了一定的分析,对纳米流体在氨水吸收式制冷系统中的应用有一定的指导意义。

2. 实验

2.1. 纳米流体的制备

本文通过向水中添加纳米氧化铁和表面活性剂十二烷基苯磺酸钠来制备不同粘度的纳米流体。纳米氧化铁的平均粒径为 30 nm。通过使用紫外发射光谱仪检测其纯度大于 99.8%。通过 2 个小时磁力搅拌和 30 分钟超声振动来使其稳定分散于水中。在静置 1 个小时后,在表面活性剂由于振动产生的气泡消失后,使用 NDJ-1E 型数字粘度计测量了各种纳米流体的粘度,为一个大气压。

2.2. 降膜实验系统

纳米流体氨水降膜吸收试验系统如图 1 所示,主要由氨瓶、溶液罐(13 升)、降膜吸收器主体、恒流量器和冷却水系统组成。吸收器端盖和主体分别采用不锈钢和有机玻璃材料制作,降膜吸收过程可以从外部观看。由电脑自动采集和转换吸收过程中的温度和压力信号。圆筒形的降膜吸收器高 1200 mm,直径为 300 mm,主要由降膜管、端盖和布液器构成。不锈钢降膜管外径为 25 mm,降膜高度为 1000 mm,表面通过砂纸打磨具有一定粗糙度以便降膜时候液膜得到很好润湿。

布液器位于吸收器顶部,设计成了一种盘状结构,用来储存一定液面高度的初始溶液,从而保持液膜的稳定。补液孔由一系列位于布液盘底部的椭圆形的缺口组成,布液孔均匀的包围着降膜管,这样经过缺口形成的很薄的液膜均匀地分布于降膜管周围。为了让降膜管位于补液孔的正中央,设计了 3 个可调螺钉来从外部调整布液器的位置。经过大量的实验,证明这种形状的布液孔能形成稳定的液膜。冷却水采用逆流,从底部向上流来带走吸收所产生的热量。

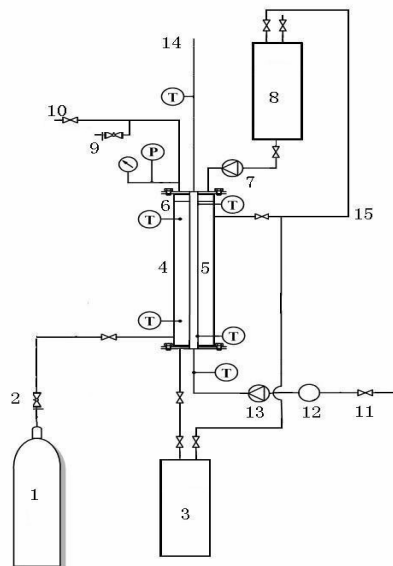


Figure 1. The experimental setup for $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ falling film absorption (1. NH_3 vessel; 2. decompression valve; 3, 8. container of solution; 4. falling film absorption; 5. falling film tube; 6. solution distributor; 7, 13. constant flow controller; 9. safety valve; 10. outlet for pumping air; 11. inlet of cooling water; 12. flowmeter; 13, 14. outlet of cooling water; 15. the tube for balancing pressure)
图 1. 氨水降膜吸收系统组成(1. 氨瓶; 2. 减压阀; 3, 8 溶液罐; 4. 吸收器主体; 5. 降膜管; 6. 布液器; 7, 13 恒流量泵; 9. 安全阀; 10. 抽真空接口; 11. 冷却水入口; 12. 流量计; 13, 14. 冷却水出口; 15. 压力旁通管)

2.3. 降膜实验流程

实验通过称量可拆卸的溶液罐重量变化来确定降膜过程氨气吸收量,为了表示吸收效率高低,定义了吸收速率如下式:

$$i = (m_{fin} - m_{ini}) / t \quad (1)$$

其中 i 为吸收速率, m_{fin} 和 m_{ini} 实分别为吸收前后溶液的质量,通称量 2 个溶液管吸收质量变化可以得到, t 为有效吸收时间。通过公式(1)可以获得单位时间内氨气吸收量。

实验过程如下:

1) 称量空溶液罐 3 和装满初始溶液的溶液罐 8(13 升)的初始重量。

2) 连接好管路后,启动试验系统,将系统抽真空,当压力降到 10 kPa 时候,停止抽气向系统通氨气,当压力达到 100 kPa 时候,停止通气,继续抽真空,抽气 3 次后,系统中氨气的纯度理论上能达到 99.9%。

3) 最后一次抽真空后,通入氨气使系统的压力稳定在 90 kPa,然后打开冷却水阀,调整流量稳定在 50 L/h。

4) 打开溶液阀使溶液流出开始吸收氨气, 调整氨降压阀门使吸收器压力保持恒定, 同时启动电脑自动采集系统温度和压力信号。

5) 在溶液罐 8 全部流光以后, 关掉电源拆下 2 个溶液管进行称量。

6) 在系统冷却后, 在溶液罐 8 装满相同体积的其他初始溶液从头开始试验。

3. 结果与讨论

实验过程中, 纳米流体粘度对氨气降膜吸收传质的影响主要体现在添加纳米流体后吸收速率的变化上, 而纳米流体对氨气降膜吸收传热效果的影响可以通过冷却水的温度变化上面。而吸收速率与和传热系数与降膜时间和液膜流速相关, 通过定体积溶液的有效降膜时间及流速也能体现出纳米流体对氨水传热传质的影响。

3.1. 粘度对氨水降膜吸收传质速率的影响

3.1.1. 添加不同质量分数活性剂时粘度对传质速率的影响

活性剂质量分数对氨水吸收速率和粘度的影响如图 2 所示, 可以看出当活性剂质量分数超过 0.5% 的时候, 吸收率迅速下降。为了解释这种现象, 通过研究粘度随活性剂质量分数变化关系可以看出当活性剂质量分数超过 0.5% 的时候, 溶液粘度迅速上升。这样可以得出原因: 粘度的上升时导致溶液吸收率下降的主要原因。粘度上升将会增加溶液降膜时间, 并且增加氨气分子从溶液表面到内部运动的阻力。所以只添加活性剂会导致溶液吸收率下降。

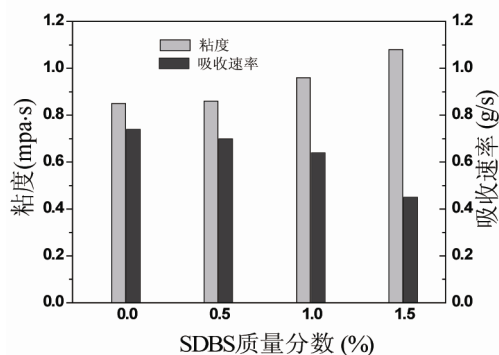


Figure 2. The effect of viscosity on absorption ratio with different mass fraction of surfactant

图 2. 添加不同质量分数活性剂时溶液的粘度及传质速率

3.1.2. 添加一定质量分数活性剂不同质量分数纳米颗粒时粘度对传质速率的影响

当活性剂 SDBS 质量分数为 1.5% 的时候添加不同质量分数的纳米颗粒, 其粘度及降膜吸收速率如图 3 所示。可以看出当添加纳米颗粒后, 溶液的粘度开始下降, 当氧化铁质量分数超过 0.2% 的时候, 溶液的粘度又开始上升。再者, 通过图 2 可以看出, 随着纳米颗粒的添加, 溶液的降膜吸收速率快速上升, 在质量分数为 0.2% 的时候达到最大, 超过 0.2% 后又会出现下降。纳米颗粒添加后溶液粘度下降的原因主要是因为添加的纳米颗粒吸附了溶液中的 SDBS 分子, 使溶液中自由活动的 SDBS 分子数下降, 而通过图 2 可以看出 SDBS 添加会时溶液粘度上升。这就是添加纳米颗粒后能使表面活性剂溶液粘度下降的原因。添加 0.2% 的纳米颗粒能获得最小的粘度, 从而增加了降膜流速, 增大了换热系数, 并且减少了有效降膜时间, 获得了最大的降膜吸收速率, 当颗粒质量分数超过 0.2% 的时候, 表面活性剂已经被全部吸附, 而纳米颗粒的添加会增加溶液粘度, 所以 0.3% 的纳米颗粒的降膜吸收速率反而下降。从图 3 中可以看 0.3% 的纳米颗粒加上 1.5% 的 SDBS 纳米流体的粘度虽然大于图 2 中纯水的粘度, 但是其降膜速率也大于纯水的降膜速率。这是因为纳米流体粘度并不是唯一决定降膜速率的因素, 其导热系数, 表面张力等因素也影响着吸收速率。

3.1.3. 添加一定质量分数纳米颗粒及其最佳活性剂质量分数时粘度对传质速率的影响

根据作者先前的研究结果^[6], 对于 0.1% 的纳米氧化铁, 其最佳活性剂质量大约分数为 0.8%, 而当纳米颗粒质量分数增加的时候, 其对应的活性剂质量分数近视为线性增加。图 4 说明了添加一定纳米颗粒和其对应的最佳活性剂质量分数的时候, 不同纳米流体的氨气吸收速率。可以看出, 随着颗粒的质量分数增加, 纳米流体的粘度变化不大, 在质量分数为 0.2% 的时候, 纳米颗粒粘度最小, 这个时候也获得了最大的氨气吸收速率。当纳米颗粒质量分数好过 0.2% 的时候, 其粘度会增加, 而氨气吸收速率又会下降。综上所述, 对于氨气吸收来说, 纯在一个最佳纳米颗粒和表面活性剂质量分数。而在纳米流体粘度不较大增加的情况下, 适当增加纳米颗粒质量分数能促进氨气的吸收速率。

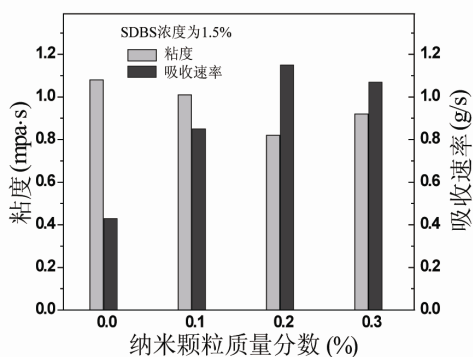


Figure 3. The effect of viscosity on absorption ratio with different mass fractions of nano-particles in certain mass fraction of surfactant
图 3. 添加一定质量分数活性剂不同质量分数纳米颗粒时纳米流体的粘度及传质速率

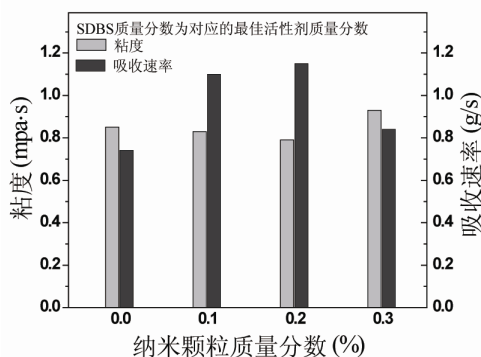


Figure 4. The effect of viscosity on absorption ratio with different mass fractions of nano-particles matched with optimal surfactants
图 4. 一定质量分数纳米颗粒及其最佳活性剂质量分数时纳米流体的粘度及传质速率

3.2. 粘度对氨水降膜吸收传热的影响

图 5 显示了不同粘度的纳米流体降膜吸收过程中冷却水温度变化及有效降膜时间。冷却水流量恒定的时候，冷却水的温差越大表明纳米流体的换热效果越好。从图中可以看出冷却水在降膜开始后温度迅速升高，一定时间后趋于稳定。可以看出氨气吸收速率最大的纳米流体，也就是添加 0.2% 纳米氧化铁和 1.5% SDBS 的纳米流体获得了最大的冷却水温升而其有效降膜时间也最少。而只添加 1.5% 活性剂的溶液由于具备较高的粘度其氨气吸收速率是最低的，其传热性能也最低，因为它对应的冷却水温差最小而相同体积初始溶液的有效降膜时间也最长。在添加适当质量分数的纳米颗粒及活性剂的时候，由于传热温差的加强会使纳米流体温升提高较快，温度的上升又会进一步降低纳米流体的粘度，从而形成一种传热传质强化的良性循环作用。而只添加

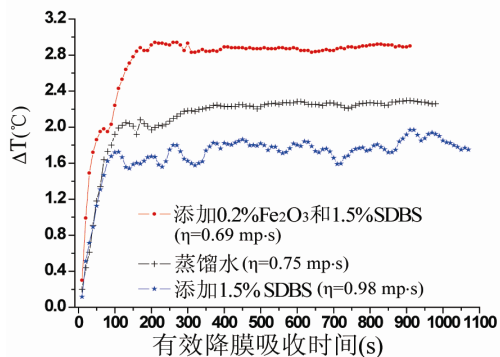


Figure 5. The effect of viscosity on the temperature changes of cooling water and the flowing time of nanofluid
(ΔT : the temperature change of cooling water; η : viscosity
图 5. 不同粘度的溶液对应的冷却水温度变化及有效降膜时间
(ΔT : 冷却水温升; η : 粘度)

1.5% 的 SDBS 的时候，由于粘度的增大，氨气分子从液面进入液膜内部的阻力增大，导致吸收速率下降，而导致溶液温升减小，相比之下粘度也较大，这样也会形成一个恶性循环。由此可见，纳米流体的粘度对于氨水降膜吸收的传热传质过程起着非常重要的作用，在实际应用中应尽量使用粘度较低的纳米流体。

4. 结论

本文通过研究包含不同比例的纳米颗粒及其表面活性剂的纳米流体在降膜吸收氨气过程中的传热传质性能，得出以下结论：纳米流体的组分直接影响着纳米流体的粘度，而粘度又直接影响着氧化铁氨水纳米流体降膜吸收过程中传热传质的性能。只添加表面活性剂十二烷基苯磺酸钠(SDBS)会使流体粘度增加，从而导致吸收过程传热传质效率的降低；而添加适当的 SDBS 和纳米氧化铁能获得较低粘度，从而强化传热传质效率。实验表明氧化铁和 SDBS 质量分数分别为 0.2% 和 1.5% 的时候，制得的纳米流体具有最低的粘度和最高的传热传质性能。

5. 致谢

感谢得国家自然科学基金项目(No. 50876020)的支持。

参考文献 (References)

- [1] S. U. S. Choi. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticle. San Francisco: International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, 1995, 231: 99-105.

- [2] J.-K. Kima, J. Y. Jung, and Y. T. Kang. Absorption performance enhancement by nano-particles and chemical surfactants in binary nanofluids. *International Journal of Refrigeration*, 2007, 30(1): 50-57.
- [3] J.-K. Kim, J. Y. Jung, and Y. T. Kang. The effect of nano-particles on the bubble absorption performance in a binary nanofluid. *International Journal of Refrigeration*, 2006, 29(1): 22-29.
- [4] Y. T. Kang, J.-K. Lee, and B.-C. Kim. Absorption heat transfer enhancement in binary nanofluids. Beijing: International Congress of Refrigeration, 2007: Article ID ICR07-B2-371.
- [5] 苏风民, 马学虎, 陈嘉宾. 纳米碳管在强化 $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ 泡状吸收热质传递过程的作用[A]. 广州: 传热传质学学术会议论文[C], 2007: Article ID 073300, 864-867.
- [6] 杨柳, 杜垲, 李彦军等. 氨水- Fe_2O_3 纳米流体稳定性影响因素研究[J]. *工程热物理学报*, 2011, 32(9): 1457-1460.