

纳米流体强化气体水合物生成研究进展

周诗崇¹, 余益松¹, 张 锦¹, 王树立¹, 赵书华¹, 李 泓²

(1. 常州大学油气储运技术省重点实验室, 江苏 常州 213016;

2. 长江(扬中)电脱盐设备有限公司, 江苏 扬中 212200)

摘要:水合物的高效快速生成对水合物技术的工业化应用具有重要的意义。对当前纳米流体促进水合物生成过程进行了分析和总结。结果表明,纳米流体能够极大地强化水合物反应体系的传热过程。纳米粒子的浓度、纳米颗粒本身的物性、纳米颗粒的尺寸大小、纳米流体中固体颗粒的分散稳定性、纳米流体在管道中的流动速度及湍动程度是影响体系传热的主要因素。此外,纳米颗粒能够极大地强化水合物反应体系的传质过程,运输作用、防气泡聚合机理、边界层混合机理、渗透机理被用来解释这一现象。但其具体的促进机理仍不清楚,基础理论的建立是未来研究方向。

关键词:纳米流体;水合物;传热;传质;强化

中图分类号:TQ021

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2014)04-0051-06

Research development of nanofluid-strengthened hydrate formation

ZHOU Shi-dong¹, YU Yi-song¹, ZHANG Jin¹, WANG Shu-li¹, ZHAO Shu-hua¹, LI Hong²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Oil and Gas Storage and Transportation Technology, Changzhou University, Changzhou 213016, China; 2. Changjiang (Yangzhong) Electric Desalting Equipment Co., Ltd., Yangzhong 212200, China)

Abstract: Efficient generation of hydrate is of great significance to the industrialization of hydrate technology. The hydrate formation process strengthened by nanofluid is analyzed and summarized. Nanofluids can greatly strengthen the heat transfer in the process of the hydrate formation. Factors influencing the thermal conductivity of nanofluids mainly include the concentration of the nanoparticles, the physical properties of nanoparticles itself, the size of the nanoparticles, the dispersion stability of nanofluid solid particles, the speed of nanofluid flow in the pipeline and turbulent degree. In addition, nanoparticles can greatly strengthen the mass transfer in the process of the hydrate formation. Transportation function, anti-bubble mixing mechanism, polymerization mechanism and the boundary layer infiltration mechanism are used to explain this phenomenon. However, the specific promotion mechanism is still unclear. Related research is still in its infancy. Various aspects are still not mature. The establishment of the basic theory is proposed as the main job in the future.

Key words: nanofluids; hydrate; heat transfer; mass transfer; strengthen

气体水合物是由作为客体的气体分子与主体水分子相互结合而形成的一种非化学计量的笼形络合物^[1]。目前,基于水合物的理化性质开发出了包括水合物储运技术、水合物海水淡化技术、水合物气体分离技术、水合物蓄冷技术等在内的一系列在各自领域具有很好发展前景的应用技术。然而,这些技术得以工业化推广的前提是能够高效快速地合成水合物。

水合物的生成是一个伴随着物质的转移与能量变化的过程,实质上是一个由传热和传质控制的过程,因此,强化水合物的生成过程也主要从传热、传质2个方向进行。传统的搅拌、喷淋、鼓泡等机械强化手段主要是为了增强气液扰动,强化气液间的传质过程,但这种方法的能耗大,不利于工业化应用。此外,各种添加剂,包括热力学促进剂和动力学促进

剂等对水合物的生成强化主要是通过降低气液界面的表面张力以使得气体分子更容易进入液相主体,从而降低水合物生成阻力来实现。这种方法具有非常好的应用前景,但寻找一种高效的水合物生成促进剂仍是当前研究的重点。纳米流体是在20世纪末提出的一种高导热及传热的工质,具有较大的比表面积及表面活性,能够极大地增大气液的接触面积,是一种理想的气体水合物生成促进体系。基于此,国内外一些学者通过对纳米流体的传热、传质特性进行了相关研究,并在此基础上,进行了纳米流动体系下水合物的生成实验。

1 传热强化

1.1 纳米流体对体系热导率的影响

纳米流体由于能够极大地增强体系的热导能力

收稿日期:2013-11-28;修回日期:2014-02-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51176015);中国石油科技创新基金项目(2011D50060606);江苏省研究生培养创新工程项目(CXZZ13-0735);扬中市科技局资助项目(YE2012015)

作者简介:周诗崇(1978-),男,博士生,副教授,研究方向为管道输送与气体水合物利用技术,0519-83290280, zsd@cczu.edu.cn。

而受到国内外研究者的广泛关注,有关研究虽然发展不过十几年时间,但亦取得了突破性的成果。

Eastman 等^[2]以水和机油为母液制备了氧化铝及铜纳米流体,对其导热系数进行了测量,并通过实验初步研究了纳米流体中颗粒的浓度对导热系数的影响。此后其与 Argonne 的其他成员研究了纳米颗粒的种类对纳米流体导热系数的影响,并通过测定铜/乙二醇与氧化铜/乙二醇的导热系数验证了纳米粒子的属性是影响其导热系数的重要因素的猜测。

Choi 在首次提出纳米流体的概念后与 Pak 合作研究了管道湍流状态下纳米流体的传热特性^[3],结果表明,雷诺数相同的情况下,纳米流体的传热能力远高于纯水的传热能力。在随后 Choi 对纳米流体的物性参数进行了测量,并对纳米流体的强化机理进行了探索。

Fotukian 等^[4]采用颗粒直径为 20 nm 的氧化铝颗粒配置而成了 0.03%、0.054%、0.067%、0.135% 4 种不同体积分数的纳米流体,对圆管湍流状态下的对流换热及压力降进行了研究,结果发现,在水中添加少量的纳米颗粒就能明显强化体系的换热性能,体积分数为 0.054% 纳米流体强化效果最佳,其可使体系换热系数增加 48%。

Xuan 等^[5]以单相流模型为基础,对管道流动体系下铜纳米流体的传热性能进行了研究,并考查了对流换热系数与努塞儿(Nu)数、雷诺数的关系。结果表明,对流换热系数与努塞儿(Nu)数随着雷诺数的增加而增加,同等条件下,纳米流体的 Nu 数比纯水的提高了将近 40%。

Kwark 等^[6]在大气压条件下,研究了纳米流体的平板传热规律,并初步得出了纳米流体的强化传热机理。认为临界热流密度得以增加的主要原因是换热表面的纳米颗粒聚集沉积。

Bang 等^[7]对不同体积分数的 Al_2O_3 纳米流体在光滑水平的换热表面的换热规律进行了研究。认为自然对流情况下,流体的换热特性并未得到有效的增强,相反却有所减弱。并认为换热表面特征的改变是引起这方面变化的主要原因。

凌智勇等^[8]在单相流体假设的基础上对层流状态下的纳米流体传热进行了数值模拟,结果表明,纳米流体的平均对流传热系数随着纳米颗粒与基液的热导率升高而增大,对于相同的基液与纳米颗粒,其随着纳米颗粒的体积分数减小以及颗粒直径的增大而减弱。

刁彦华等^[9]研究了体积分数为 0.001%、

0.01%、0.1% 的 $TiO_2/R141b$ 纳米流体,在 0.85×10^5 Pa 和 1.0×10^5 Pa 2 种不同的运行压力条件下微槽道结构蒸发器内的换热特性。结果表明,在运行压力为 0.85×10^5 Pa 的条件下,体积分数为 0.001%、0.01% 的纳米流体能够明显地强化换热效果,体积分数为 0.1% 的纳米流体出现了传热恶化的现象。而当压力为 1.0×10^5 Pa 时,前 2 种体积分数的强化效果不明显,后者的传热恶化现象更加严重。并认为,纳米流体的传热强化机理主要是因为纳米颗粒沉积层的存在。

1.2 纳米流体强化传热的机理及影响因素

在实验测定纳米流体热导率的基础上,研究者从微观方面对纳米流体对体系的强化传热机理及其影响因素进行了研究。

Keblinski 等^[10]首先从静态和动态 2 方面研究了纳米流体强化传热的可能机制。并初步将静态机制归因于宏观导热和颗粒尺寸效应;动态机制归因于纳米颗粒的吸附性、布朗运动及其稳定性,但并未对其进行细致的理论分析。此后,Cui 等^[11]对纳米流体强化传热的机理进行了研究,提出了一种不同于 Keblinski 基础上的微观解释,他们认为,纳米流体强化体系的传热过程主要与纳米颗粒的远程顺序结构及其所包含的能量原子比例密切相关。

当前,有关纳米流体强化传热机理的研究主要从以上 2 人所提出的方向进行。但研究者普遍认为,纳米流体之所以能够极大地提高体系的热导率是由于纳米颗粒的存在,一方面使得纳米颗粒在布朗运动的作用下,使得流动体系的湍流强度得到增强,强化了传热能力;另一方面,固体颗粒的导热系数大于纯液体工质的导热系数,且由于纳米颗粒的比表面更大,增强了气液接触面积,进而提高了导热效率。

在对纳米流体强化传热研究的基础上,研究者对纳米流体强化传热的影响因素进行了考察分析。Hammad 等^[12]通过实验研究了 pH、外加磁场、表面活性剂的种类和浓度及其不同基液对氧化铁及氧化铜纳米流体的传热性能的影响。研究表明,外加磁场能够强化纳米粒子在基液中的定向排列,且随着体系 pH、表面活性剂等因素的变化,热导率出现了较大的变化,但并未就此提出体系热导率随各因素变化的具体规律。

Zhou 等^[13]研究了银纳米流体对翅片散热性能的影响,并研究了不同体积分数的纳米流体及表面活性剂在管道中流动过程中的压降特性。研究结果

表明,相较于蒸馏水,当纳米流体中银离子的质量分数达到0.012%时,体系的传热热阻显著降低,且随着表面活性剂的加入体系的传热性能得到了提高,然而当表面活性剂的浓度达到一个定值时,随着流体的黏度增大,换热性能急剧恶化,因此,表面活性剂对纳米流体强化传热的影响存在着一个最佳值。

Cui等^[11]在对纳米流体强化传热的机理进行阐述的基础上,对纳米颗粒的浓度、颗粒的导热性、颗粒的比表面积等因素对提高体系热导率的影响进行了研究。结果表明,体系的热导率随着纳米颗粒所占百分比的增加而增大,且同一浓度下,导热率高、比表面积大的纳米颗粒热导率会增大。

总的来说,当前,有关纳米流体传热方面的研究表明,影响其传热能力的因素主要有以下几点^[14]:①纳米粒子的浓度;②纳米颗粒本身的物性,包括导热性、表面润湿性等;③所选纳米颗粒的尺寸大小;④纳米流体中固体颗粒的分散稳定性;⑤纳米流体在管道中的流动速度及湍动程度。然而,目前纳米流体强化传热方面的研究仍处于初步阶段,仍然有很多基础问题尚待解决,主要包括3方面:①深化对纳米流体的微观传热机理的认识,进一步明确其影响因素;②如何保证纳米流体的长时间稳定;③有关纳米流体的分布特征与聚集结构仍然需要进一步得到研究。

2 传质强化

2.1 纳米流体对传质效率的影响

纳米流体不仅能够强化体系的传热过程,而且能够极大地强化气液的传质过程,这对于提高以气液传质过程为基础的水合物反应效率具有非常重要的意义。

Olle等^[15]研究了不同体积浓度下以水为基液的 Fe_3O_4 纳米流体中 O_2 的吸收和溶解过程,结果表明, O_2 的吸收效率受纳米颗粒浓度的影响较大。本实验中 Fe_3O_4 纳米流体中纳米颗粒的体积分数以1%为界点,当体积分数小于界点时, O_2 的吸收效率随体积分数的升高而增大;当体积分数在界点之上时, O_2 的吸收效率随体积分数的升高将不再增大。Olle认为造成这种现象的原因在于纳米颗粒的存在不仅增加了气液相界面的面积,而且使水溶液的表面张力得到降低。

Kim等^[16]研究了氨初始浓度不同情况下,Cu、CuO、 Al_2O_3 纳米流体对氨气鼓泡吸收的强化实验。得到了以下的结论,氨气的吸收强化效果在初始氨

水浓度越高的情况下越明显;在纳米流体与表面活性剂共同作用下的氨气吸收效率可以达到原始效率的5倍之多;相同情况下Cu纳米流体对氨水吸收的强化传质效果最好。

盛伟等^[17]在 Al_2O_3 纳米流体的氨水鼓泡实验中研究了压力差和氨水浓度等因素对纳米流体强化氨水吸收强化效果。研究结果显示,在初始压力差大的情况下,纳米流体在初始就表现出了强化吸收效果,且在初始氨水浓度较高的情况下,相较于氨水,纳米流体的吸收强化效果更加明显。

刘辉等^[18]制备了FeO纳米流体,并分别以此与水为基液进行了氨水鼓泡吸收实验。通过对比分析,结果表明,FeO纳米流体对氨水吸收的强化效果与压力有关,常压情况下,在实验开始阶段,FeO纳米流体并不表现出氨水强化吸收的效果,但随着时间的增加,氨水的吸收效率得到了较大的提高;当压力在160 kPa时,FeO纳米流体在起始阶段就表现出较强的氨水强化吸收效果。

Kang等^[19]针对Fe和碳纳米管2种纳米粒子,分别研究了其在质量分数分别为0.01%和0.1% 2种浓度下的溴化锂水溶液的降膜式吸收过程,研究发现,这2种纳米粒子的加入都明显增强了溶液与水蒸汽之间的传质过程,但二者的强化程度有所不同,且随各自浓度的变化也有所区别。相比于Fe纳米流体,碳纳米管纳米流体的强化效果要更好些,且随着浓度的增加,强化效果越好。质量分数为0.01%的2种纳米流体中的吸收速率分别提高0.71倍和1.15倍;质量分数为0.1%时,吸收速率分别提高0.9倍和1.48倍。

2.2 纳米流体强化传质的机理

纳米流体能够强化气液的传质过程已经被实验数据所证实,然而有关其传热机理却并未明确,当前对纳米流体强化气液传质的过程主要存在着以下几种解释。

(1) 运输作用^[20]

该机理是在固体颗粒强化液体吸收气体的吸收速率模型的基础上得出的,其主要思想是,当液体中悬浮的颗粒尺度比气液传质边界层的厚度还小时,在渗透作用下,颗粒将穿过气液边界层来到气液界面,并吸收部分的气体分子,进而随流体微团再次穿过边界层回到液相主体,并最终在液相主体内释放出所吸附的气体分子,完成运输过程,并依此不断循环,从而强化了气液传质过程。类似的实验结果表明,气液传质系数随着纳米颗粒浓度的增加而增加,

但存在着一个最大值,即在纳米颗粒的浓度大于这个临界值时,其传质系数将不会再随浓度的变化而变化。此外传质系数还与颗粒的分配系数、亲/疏水性、平均表面停留时间有关。苏风民等^[21]采用 CNTs-ammonia 双组分纳米流体也进行了氨气鼓泡强化吸收的研究,发现碳纳米管的浓度能够极大地影响氨气的吸收强化效果,且其氨气吸收效率随着碳纳米管的浓度的增加而呈现出先增加后降低的趋势,证实了这一解释的合理性。

(2) 防气泡聚合机理^[20]

气液界面气泡的存在会极大地增加气液界面面积,进而会增加传质通量。防气泡聚合机理在于纳米颗粒的存在,在液相中依附于气泡表面,使得液相内的气泡更加稳定,不容易发生聚并,增加了气液接触面面积,使得传质速率增加。Ruthiya 等^[22]在强化鼓泡塔气体吸收过程中,采用小粒径的活性炭颗粒作为分散质分散于溶液中,可以明显观察到其可防止气泡聚集。

(3) 边界层混合机理^[20]

Kluytmans 等^[23]通过研究发现,小颗粒分散质的存在会改变周围流体的流体力学性质,使气液传质边界层变薄。边界层混合机理便是基于此提出的,指的是固体颗粒由于布朗运动在气液边界层发生相互碰撞,减小了传质的边界层厚度,且由于固体颗粒的存在,增加了液相的扰动和湍动程度,导致液膜的重新分布,使得液膜的流动速度和更新速度得到增强。

(4) 渗透机理^[20]

主要是指作用于非均相气体溶质的扩散与溶解的渗透理论,该机理假定气液传质过程中存在一薄液层,气体在进入液相主体的时候,首先要通过这一薄液层。

此外 Nagy 等^[24]对当前纳米流体强化传质的研究成果进行了总结,并在此基础上提出了一个用于预测气液传质速率的数学模型,并与实验所得的数据进行拟合,结果表明,其误差在可控范围之内,与实验结果较吻合。张树杨^[20]设计了一套纳米流体强化气体吸收实验装置,研究了各种纳米流体对 CO₂ 气体的吸收速率,并利用 PIV 装置对 CO₂ 传质过程的液相内部微对流现象进行了定量分析,在此基础上利用格子 Boltzmann 方法对纳米流体的流场情况进行了模拟,从宏观现象和微观机理 2 方面系统地研究了纳米流体的传质过程。

相较于纳米流体传热方面的研究,有关纳米流

体促进传质过程的研究较少,其促进机理仍然不太清楚,有关的研究还需要进一步进行。

3 水合物生成

纳米流体应用于水合物的生成强化主要从以下 2 方面来实现:①水合物在生成过程中会产生大量的反应热,这部分热量若不及时得以导出将会使反应体系的温度升高,进而抑制水合物的生成。纳米流体在强化体系反应热方面的优良特性使得水合反应热能够及时地被外界冷却介质带走,使得水和反应高效快速地连续进行。②水合物是一种由气体进入液相主体,并与之相互作用而形成的一种笼形配合物。因此,气液间的传质效率往往是决定水合物生成快慢的主要因素。然而,将纳米流体应用于强化水合物的生成的实验研究在最近才展开,相关研究还很不成熟。

马晓林等^[25]最早研究了纳米磁性液体对 HCFC141b 气体水合物生成特性的影响,得出了纳米流体改善体系传热传质的结论,然而,由于当时主要专注于研究磁场作用下水合物的生成特性,并未展开纳米流体促进水合物生成的研究。

李金平等^[26]首先提出了利用纳米流体强化水合物生成的设想,并为此进行了一些初步的实验探索。2006 年首先开展了纳米流体中气体水合物的生成实验。纳米流体通过实验室按照纳米铜离子、SDBS、去离子水(质量分数分别为 0.1%、0.04%、99.86% 和 1%、0.04%、98.96%)的比例自行配制,通过水合物的生成实验研究了相同过冷度下纳米 Cu 粒子对水合物的诱导时间及整个生成过程所经历的时间的影响。研究结果表明,纳米铜粒子的加入能够明显强化气体水合物生成过程中的传热传质。

2007 年李金平等^[27]开展了质量分数为 0.1% 和 1% 的铜纳米流体中 HFC134a 水合物的生成过程研究,实验分别对去离子水、SDBS 溶液、0.1% 和 1% 的铜纳米流体进行了水合物生成实验,比较了水合物生成过程中的温度压力变化曲线,考察了其对诱导时间、反应时间的影响。实验结果表明,铜纳米流体对水合物生成诱导时间的影响较小,但其可大大降低整个水合物生成反应的时间(4 种体系下的水合物反应时间分别为 300、150、120、100 min),且随着纳米颗粒浓度的增加,水合物生成反应的时间缩短。李认为纳米颗粒巨大的比表面积为水合反应提供了充分的反应界面,且纳米颗粒在液相主体中

剧烈的布朗运动及其本身所固有的高导热性使得水合反应过程中的反应热能够及时移出,加速水合物的生成过程。

在已有的基础上,李金平等^[28]随后研究了纳米粒子对制冷剂水合物热力学生成条件的影响,通过将纳米粒子尺寸分布因素考虑在内,将水的活性乘以合适的纳米粒子尺寸概率密度函数,并进行积分,重置了水的活度系数方程,并以此为基础建立了制冷剂气体水合物生成的热力学模型,对 R134a 气体水合物的生成条件进行了系统的研究。通过将所得的模型与实验数据进行拟合,发现相同温度条件下,相平衡的最大相对误差为 7.3%,平均误差为 5.3%,拟合结果较吻合。

李娜等^[29]在李金平的基础上研究了微乳液体系 HCFC141b 中添加不同浓度的纳米 Cu 和 Al_2O_3 粒子对水合反应的影响。与李金平所得的实验结果不同,其认为纳米 Cu 粒子的加入会进一步缩短 HCFC141b 水合物生成的诱导时间,但其实验结果在纳米粒子的加入会强化水合物生成过程的传热传质过程这一结论上达成了一致。

Park 等^[30]在上述基础上,采用颗粒尺度为 15~20 nm 的多壁碳纳米管(MWCNTs)以及氧化多壁碳纳米管(OMWCNTs)来强化水合物的生成,实验从水合物生成速率、气体的消耗量以及热力学相平衡条件 3 方面考察了纳米流体中水合物生成过程,实验结果表明,纳米颗粒能够促进水合物的形成,且水合物的形成速率与纳米颗粒的浓度和种类相关,对于 MWCNTs 其最佳质量分数为 0.004%,而 OMWCNTs 的最佳质量分数为 0.003%,但纳米颗粒对水合物形成的热力学相平衡条件影响较小。

总之,当前有关纳米流体应用于水合物强化过程的研究还较少,各方面还不成熟,但纳米流体的高传热传质特性能够极大提高水合物的生成速率已被实验所证实。其在水合物生成促进方面具有其他促进方法无法比拟的优势,但有关其基础理论却需进一步得到研究。

4 结论与展望

纳米流体在近十几年间得到迅速的发展,高导热、高传质的优良特性使得其在众多领域都具有重要的应用。针对水合物生成过程中的传热传质控制特点,将纳米流体应用于强化水合物的生成过程在近些年得到了众多学者的重视,并取得了如下一些重要的成果。

(1)实验和模拟结果证实,纳米流体能够极大地强化体系的传热过程。纳米粒子的浓度、纳米颗粒本身的物性(包括导热性、表面润湿性等)、所选纳米颗粒的尺寸大小、纳米流体中固体颗粒的分散稳定性、纳米流体在管道中的流动速度及湍动程度是影响体系导热能力的重要因素,但这方面的研究仍不成熟,有关其机理、稳定性、分布特征和聚集结构仍需进一步研究。

(2)纳米流体不仅能够强化反应体系的传热过程,而且能够极大地强化气液的传质过程。当前,用来解释这种现象的理论主要包括运输作用、防气泡聚合机理、边界层混合机理及渗透机理。

(3)纳米流体高传热及传质特性使得其在强化水合物生成方面具有较大的潜力,其强化程度与纳米颗粒的种类及浓度有关,但相关的研究仍处于探索阶段,有很多基础问题尚待解决,相关基础理论的建立将是未来较长时间内所做的工作。

参考文献

- [1] 周诗崇,余益松,王树立,等.天然水合物储气量测定研究进展[J].天然气化工,2013,38(4):80-84.
- [2] Eastman J A,Choi S U S,Li S, *et al.* Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nano-particles [J]. Appl Phys Lett, 2001, 78(6): 718-720.
- [3] Pak B C,Choi Y L. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles [J]. Exp Heat Transfer, 1998, 11(2): 151-170.
- [4] Fotukian S M,Nasr E M. Experimental investigation of turbulent convective heat transfer of dilute $\gamma-Al_2O_3$ /water nanofluid inside a circular tube [J]. Int J Heat Fluid Fl, 2010, 31(4): 606-612.
- [5] Xuan Y,Li Q. Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2003, 125(1): 151-158.
- [6] Kwark S M,Ratan K,Gilberto M, *et al.* Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2010, 53(5): 972-981.
- [7] Bang I C,Chang S H. Boiling heat transfer performance and phenomena of Al_2O_3 water nano-fluids from a plain surface in a pool [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2005, 48(12): 2407-2419.
- [8] 凌智勇,朱爱军,丁建宁,等.层流状态下纳米流体的对流传热特性[J].功能材料,2010,41(6):948-951.
- [9] 刁彦华,王瑞,刘岩,等. $TiO_2/R141b$ 纳米流体应用于微槽道结构蒸发器的强化换热特性研究[J].工程热物理学报,2013,34(6):1137-1141.
- [10] Keblinski P,PhillPot S R,Choi S U S, *et al.* Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles [J]. Int J Heat Mass

- Transfer, 2002, 45(4): 855 - 863.
- [11] Cui W Z, Bai M L, Lv J Z, *et al.* On the influencing factors and strengthening mechanism for thermal conductivity of nanofluids by molecular dynamics simulation [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2011, 17(50): 13568 - 13575.
- [12] Hammad Y, Greg C, Xinling L, *et al.* Effects of alignment, pH, surfactant, and solvent on heat transfer nanofluids containing Fe₂O₃ and CuO nanoparticles [J]. *J Appl Phys*, 2012, 111(6): 1 - 6.
- [13] Zhou M Z, Xia G D, Chai L, *et al.* Analysis of flow and heat transfer characteristics of micro-pin fin heat sink using silver nanofluids [J]. *Sci China Technol Sc*, 2012, 55(1): 155 - 162.
- [14] 刘辉, 李茂德. 纳米流体传热强化技术 [J]. *应用能源技术*, 2007, (10): 32 - 36.
- [15] Olle B, Bucac S, Homles T C, *et al.* Enhancement of oxygen mass transfer using functionalized magnetic nanoparticles [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2006, 45(12): 4355 - 4363.
- [16] Kim J K, Jung J Y, Kang Y T. Absorption performance enhancement by nanoparticles and chemical surfactants in binary nanofluids [J]. *Int J Refrig*, 2007, 30(1): 50 - 57.
- [17] 盛伟, 武卫东, 张华, 等. Al₂O₃ 纳米颗粒对氨水鼓泡吸收过程的强化影响 [J]. *化工学报*, 2008, 59(11): 2762 - 2767.
- [18] 刘辉, 武卫东, 盛伟, 等. FeO 纳米流体强化氨水鼓泡吸收过程实验 [J]. *化工进展*, 2009, 28(7): 1138 - 1141.
- [19] Kang Y T, Kim H J, Lee K I. Heat and mass transfer enhancement of binary nanofluids for H₂O/LiBr falling film absorption process [J]. *Int J Refrig*, 2008, 36(3): 850 - 856.
- [20] 张树杨. 纳米流体强化气液传质研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [21] 苏凤民, 马学虎, 陈嘉宾, 等. 双组分纳米流体强化泡状吸收过程的实验研究 [J]. *制冷学报*, 2008, 29(1): 8 - 12.
- [22] Ruthiya K C, Kuster B F M, Schouten J C. Gas-liquid mass transfer enhancement in a surface aeration stirred slurry reactor [J]. *Can J Chem Eng*, 2003, 81(3/4): 632 - 639.
- [23] Kluytmans J H J, Van Wachem B G M, Kuster B F M, *et al.* Gas holdup in a slurry bubble column: influence of electrolyte and carbon particles [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2001, 40(23): 5326 - 5333.
- [24] Nagy E, Feczakó T, Koroknai B. Enhancement of oxygen mass transfer rate in the presence of nanosized particles [J]. *Chem Sci*, 2007, 62(24): 7391 - 7398.
- [25] 马晓林, 舒碧, 郭开华, 等. 纳米磁性液体对 HCFC141b 气体水合物生成特性的影响 [J]. *武汉理工大学学报*, 2004, 28(6): 873 - 875.
- [26] 李金平, 吴疆, 梁德青, 等. 纳米流体中气体水合物生成过程的实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2006, 40(3): 365 - 368.
- [27] 李金平, 王立璞, 王春龙, 等. 纳米流体中 HFC134a 水合物的生成过程 [J]. *兰州理工大学学报*, 2007, 33(5): 48 - 50.
- [28] 李金平, 王春龙, 王林军, 等. 纳米流体中气体水合物生成条件 [J]. *工程热物理学报*, 2008, 29(12): 2065 - 2067.
- [29] 李娜, 马振魁. 利用纳米粒子强化微乳液体系 HCFC141b 水合物的生成 [J]. *科学通报*, 2011, 56(22): 1846 - 1853.
- [30] Park S S, An E J, Lee S B, *et al.* Characteristics of methane hydrate formation in carbon nanofluids [J]. *J Ind Eng Chem*, 2012, 18(1): 443 - 448. ■

江森自控创新余热回收技术实现绿色供暖

一站式楼宇解决方案供应商江森自控 2014 年 4 月 1 日宣布亮相第四届中国国际分布式能源及储能技术设备展, 展示了约克 TITAN™ 多级离心式热泵、YDST 单级离心式热泵以及余热回收集中供暖解决方案。通过回收利用工业生产过程中的低品位热量, 生产高温热水用于市政集中供暖或工艺加热, 可减少高达 50% 的煤炭消耗, 助力绿色供暖, 可广泛应用于热电厂、企业自备电厂、市政污水厂、工矿企业及石油化工等领域, 为节能减排、提高经济效益和治理雾霾提供了新的解决方案, 引起参观者和业界的极大关注。

江森自控开创性地提出了全方位的工业余热回收解决方案, 可提供制热量范围从 400 kW ~ 100 MW、热水出水温度范围从 50 ~ 110℃ 的全系列热泵系统, 包括电机驱动和蒸汽驱动机械式热泵以及吸收式热泵, 能满足各类工

业余热回收兼制冷/供热的应用需求。江森自控拥有全系列热泵产品 (包括电机驱动和汽轮机驱动的离心式热泵及吸收式热泵) 的企业, 也是能提供最高出水温度的热泵提供商之一。

作为此次江森自控余热回收解决方案的主打产品, 约克 TITAN™ 多级离心式压缩机和 YDST 单级离心式热泵均为蒸汽驱动。其中, 约克 TITAN™ 多级离心式压缩机已面世数十年, 其可靠性已得到全球几千例用户的验证, 后经技术改良, 从而更适用于大型区域供热; 江森自控最新开发的约克 YDST 单级离心式热泵, 可通过回收利用电厂凝汽器冷却水低品位热量, 用于城市大规模集中供暖, 同时增加热电厂供热能力, 降低热电厂运行能耗, 在解决供暖问题的同时, 又实现了节能减排的环保和经济效益。

(刘蕴仪)