

不同背压下旋流式气液分离器工作特性

李 华^{1,2} 尹俊连³ 张 宁^{1,2} 钱 渊^{1,2} 刘 卫^{1,2}

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院核辐射与核能技术重点实验室 上海 201800)

3 (上海交通大学 机械与动力工程学院 上海 200240)

摘要 以一种适用于熔盐堆脱气系统的旋流式气液分离器为研究对象,利用流动可视化技术,对分离器气芯的形成进行了深入研究。研究表明,分离器的分离效率与气芯密切相关,分离器内形成稳定气芯就可实现对流体中气相的连续分离,分离器的背压对气芯的形成有重要影响。通过高速摄像技术记录了气芯的演变过程,气芯的演变主要分为负压、平衡、微正压和稳定四个阶段,不同的旋流数 S 和雷诺数 Re 下均可经过四个阶段最终形成稳定气芯,只是对应临界背压不同,分离器的经济性不同。利用计算流体动力学模拟软件 *Fluent* 模拟了背压对气芯形成过程的影响,计算结果与实验结论基本一致,背压越大,气芯越稳定,但分离器分流比越高,经济性越差,背压超过一定值时,贯穿分离器的气芯将逐渐被压缩变短。

关键词 气液分离器, 气芯, 背压, 旋流

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.010603

熔盐堆作为第四代核反应堆的候选堆型之一,可以安全高效地输出能量用于发电或制氢等行业。堆内的液态燃料避免了事故工况下堆芯熔化的严重后果,即使发生反应堆破口事故,冷却剂也会迅速凝固防止事故的进一步发展。熔盐堆相比于传统压水堆而言,可以在无水条件下运行,更适合在内陆建造,而且不需要高压运行,这极大降低了高压运行带来的潜在危险^[1-2]。

熔盐堆运行过程中会产生大量的氦、氩和氙等放射性气体。氦和氩作为中子毒物会降低其反应性,如果能够脱除这些裂变气体,将提高燃料的利用率。氙不仅会降低设备和管道的寿命,而且氙在金属材料中具有强渗透性,进入环境后还会对环境造成放射性污染^[3-4]。反应堆冷却剂系统一旦发生破损,熔盐中的氦、氩、氙等气体将对环境造成放射性污染。由于熔盐堆可以在低压下运行,所以能够使用在线处理的方式将这些放射性气体脱除。

美国、法国、日本等国家对熔盐中放射性气体的脱除技术相继开展了工程性质的研究工作,还未见相关文献报道。美国曾研究喷淋法除气技术,但出现了很多问题;继而又提出了鼓泡-脱气的技术以解决放射性裂变气体的脱除^[5]。系统中的气泡分离器便采用了传统的石油化工领域经常使用的旋流式

分离器结构设计^[6],这种分离器已经在液固分离^[7]、油气水的多相分离等方面^[8]开展了一些深入的研究。在分离器进出口处分别设置了旋流叶片和恢复叶片。如图1所示,由于旋流叶轮的作用,在分离器中心可形成一条稳定的气芯,并且由于旋流叶片和恢复叶片的轮毂为中空设计,分别连接到了两个出气接口上。因此,气芯中的气体就可以连续地被排除,从而实现对于液体中气体的连续分离。分离器中心气芯的形成对分离效率具有决定性影响^[9-10]。尽管针对分离器已经开展了一些实验研究工作,但气芯的形成机理还是值得进一步研究^[11-12]。本文通过对分离器内不同的几何参数、操作条件的实验和数值研究发现,分离器的出口压力即背压,是气芯形成的重要因素,进一步分析了分离器内的流动特性和气芯形成原理,为我国熔盐堆研究提供基础数据和设计参考。

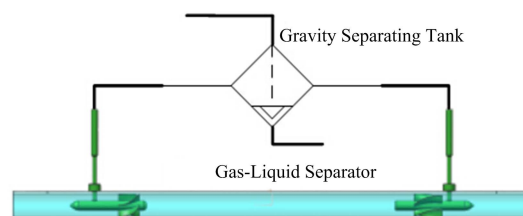


图1 气液分离器模型
Fig.1 Separator model.

中国科学院战略性先导科技专项(No.XDA02000000)资助

第一作者: 李华, 男, 1980 年出生, 2009 年于大连理工大学获博士学位, 研究领域为反应堆中的气路技术与气态裂变产物的分离

通讯作者: 刘卫, E-mail: liuwei@sinap.ac.cn

收稿日期: 2014-09-16, 修回日期: 2014-11-04

1 分离原理

为了详细说明整个分离过程,在图2中显示了使用高速摄像机拍摄的靠近分离器入口处的旋流叶片和出口处的恢复叶片。气泡进入分离器后,由于旋流叶片边缘和出气口处之间的压力差使气泡向轴心运动(图2(a)),产生了聚集,经过旋流叶轮后形成气芯。在分离之初,大气泡受压差影响较大,会先到达气芯,接着较小的气泡在更远的位置被挤压到气芯内^[12]。流体在向前流动后,泡状流体转变为液流和气流,两相间可以看到清晰的界面。部分气体进入恢复叶片出气口(图2(b)),旋转流受恢复叶片作用变为平行流后,流出分离器。

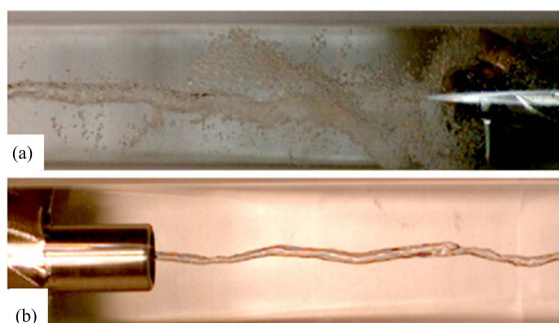


图2 气液分离器叶片的出入口
(a) 旋流叶片, (b) 恢复叶片

Fig.2 Air core near the swirling vane (a) and recovery vane (b).

2 实验方法

如图3所示,实验系统是由气泡生成系统、气液分离器、流体输送和控制部件组成。气泡生成系统包括气体储罐、气体压力传感器、阀门、质量流量计和气泡发生器。系统中主要设备性能参数见表1。气泡发生器产生氩气气泡直径控制在0.3–0.7 mm内,气泡直径由高速相机分层拍摄,经软件计算得到,在这个范围内的气泡更利于放射性气体在气液两相间扩散传质^[13]。通过调节气体流量控制器,可在0–2 L·min⁻¹内随意调节鼓泡器入口气体流量。液体入口流量 $Q_{L_{in}}$ 和出口流量 $Q_{L_{out}}$ 通过安装在气液分离器入口和出口的流量计测量。液体流量可以通过循环泵出口的节流阀进行调节。分离器的入口压力 P_{in} 和出口压力 P_{out} 也可以通过分离器前后的压力变送器测量。为了便于观测和测量气芯,回路中的主管道和气液分离器都是使用有机玻璃制作而成,回路水温在20–30℃内,水在回路中长时间闭路循环流动,因此认为水中溶解的氩气始终处于饱和状态,且水中溶解度对温度变化不敏感,所以实验中水溶解的氩气含量对实验结果忽略不计。

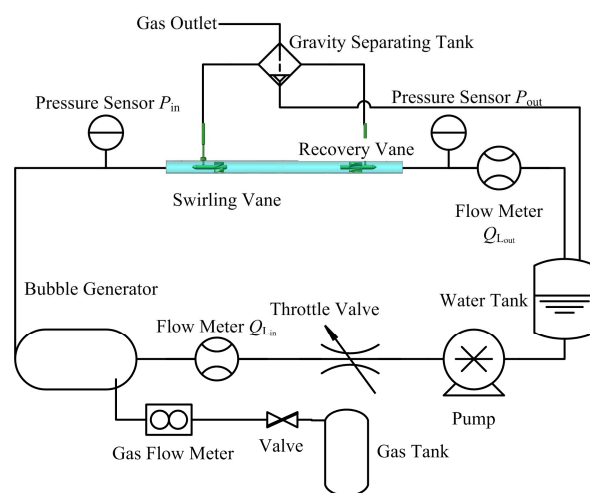


图3 鼓泡脱气水力实验系统

Fig.3 Schematic map of experiment system.

表1 主要设备一览表
Table 1 List of major equipments.

名称 Name	主要参数 Main parameters
水泵 Pump	桂林泵业, 定制, 流量 0–30 m ³ ·h ⁻¹ 变频可调 Guilin guanghai pump Co., Ltd., customize, flow 0–30 m ³ ·h ⁻¹ , frequency conversion
液体流量计 Liquid flow controller	上海自动化仪表厂, 流量 0–30 m ³ ·h ⁻¹ Shanghai Automatic Instrumentation Co., Ltd., flow: 0–30 m ³ ·h ⁻¹
节流阀 Throttle	上海自动化仪表厂, 开度调节 0%–100% Shanghai Automatic Instrumentation Co., Ltd., valve adjustment 0%–100%
压力表 Manometer	易福门, P2994, 0–0.5 MPa IFM, P2994, 0–0.5 MPa
气体流量计 Gas flow controller	北京七星华创, CS200D, 0–2 L·min ⁻¹ Beijing Sevenstar Electronics Co., Ltd., CS200D, 0–2 L·min ⁻¹
高速相机 High speed camera	美国 Phantom, V1210, 1 280×800@12 700 帧/秒 America Phantom, V1210, 1 280×800@12 700 fps·s ⁻¹

为研究叶片不同旋流数对分离器气芯的影响,实验中设计加工了多组旋流叶轮,叶片不同的出口角度具有不同旋流数^[14]。文中的几何旋流数 S 由式(1)^[15]计算得到:

$$S = \frac{1}{2} \times \frac{1}{1-\psi} \times \frac{1 - \left(\frac{R_n}{R_w}\right)^4}{1 - \left(\frac{R_n}{R_w}\right)^2} \tan \alpha_w \quad (1)$$

式中, Ψ 为阻塞系数; R_n 为旋流内径; R_w 为旋流外径; α 为叶片偏转角度。定义旋流数所涉及的参数如图 4 所示。

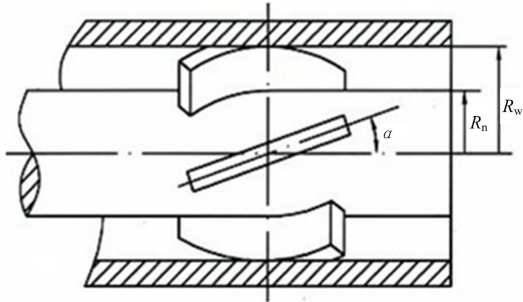


图 4 旋流数参数的定义
Fig.4 Schematic of parameters used for definition of swirl number.

3 结果与讨论

为了考察几何参数的影响, 在 5 组不同的雷诺数 Re 和 0.1%–0.5% 的气体含量 β 下, 分别测试了具有不同 S 的 5 组叶片的性能, 测试工况见表 2。

表 2 不同测试条件 Re 、 S 和 β
Table 2 Test conditions with different Re , S and β .

实验组 Number	Re	S	$\beta / \%$
1	35 262	0.77	0.1
2	56 419	0.96	0.2
3	77 576	1.17	0.3
4	98 734	1.42	0.4
5	119 891	1.71	0.5

3.1 背压的影响

在所有旋流数测定的过程中, 气芯的演变都会经历如图 5 所示的 4 个阶段。当 $Re=119\,891$ 、 $S=1.17$ 、 $\beta=0.5\%$ 、背压为 0.018 MPa 时, 分离器气芯内处于负压状态, 气体将从重力分离罐被吸入到分离器内。大量气体进入液体中, 形成的气腔具有较大的半径和不稳定的气线, 尾部发生涡旋破碎, 这意味此时的气液分离是失败的。气芯的这个行为被定义为负压状态 P_1 。随着背压的增加, 吸气现象慢慢减弱直至消失, 当背压为 0.026 MPa 时, 气芯内外压差为零, 分离器内既无气体吸入也无气体排出, 处于平衡状态。相较于 P_1 , 气芯被旋流压缩, 气腔半径逐渐变小。气芯的这个行为被定义为平衡状态 P_2 。当背压继续增加到 0.032 MPa 时, 气芯的形状随之变化。在这个阶段, 气芯内部变为正压, 有一定量的气体夹杂部分液体从分离器两端的排气孔流出。气

芯被进一步压缩, 在气芯尾端的涡旋破碎基本消失, 绝大部分气体能够通过出气口排出。此时的气芯被定义为微正压状态 P_3 。当背压增加到 0.059 MPa, 气芯将演变至第四个阶段, 气泡完全汇聚为稳定的气流, 形成一条直的贯穿旋流叶轮和恢复叶轮出气口的稳定气芯, 气芯刚性增强, 分离器中分为气液两相, 可以看到明显的气液界面, 涡旋破碎完全消失, 无小气泡逃逸, 分离效率接近 100%。至此气芯的演变基本结束, 在气芯的演变过程中, 背压起到了重要的作用。此时气芯被定义为稳定状态 P_4 , 在这个阶段的压力系数被定义为临界背压 P_{outc} 。

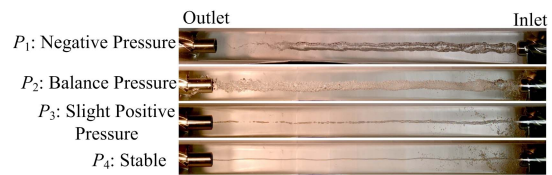


图 5 在不同条件下的气芯变化
Fig.5 Air core evolution with different condition.

气芯形状与气体的分离效率密切相关, 如图 6 所示, 是背压与分离器的分离效率关系曲线。在低背压的情况下, 气芯处于 P_1 和 P_2 状态时, 气体的分离效率为 0; 当背压大于 P_2 的平衡压力时, 气芯逐渐形成, 分离效率迅速增加, 处于 P_3 状态时, 气芯基本形成, 分离效率达到 96%, 继续增加背压到 P_{outc} 时, 气芯稳定, 分离效率接近 100%, 分离器出口已观测不到气泡流出。

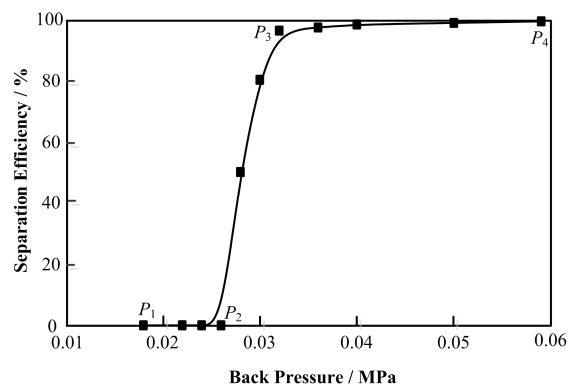


图 6 背压与分离器效率之间的关系($Re=119\,891$, $S=1.17$, $\beta=0.5\%$)

Fig.6 Relations back pressure with separation efficiency ($Re=119\,891$, $S=1.17$, $\beta=0.5\%$).

3.2 旋流数的影响

旋流数是主要由叶片角度决定的无量纲参数, 角度越大, 旋流数越大, 相同条件下, 径向压力梯度越大。气芯在 P_1 和 P_2 阶段, 对于 $S=0.77$ 时, 气

芯仍是由一些聚集的大气泡串联而成, 气芯尾端发生旋流破碎。在气芯尾部气泡逃逸出气芯, 而随液体流出。当 S 为 1.17、1.42 和 1.71 时, 气泡受径向压力增加, 气芯出现旋流破碎现象位置提前, 气泡更小, 气芯未贯穿旋流叶轮和恢复叶轮的出气孔, 破碎后流出分离器。

当贯穿分离器叶轮的气芯形成后, 旋流数不同, 气芯的形状也会有所不同。当 $S=0.77$ 时, 分离器中心可观测到明显直线型气芯, 但气芯的中后半部分受径向压力小, 部分气泡仍未破碎, 它们是由许多气泡串联而成; 当 S 增加时, 气芯中气泡的数量逐渐减少, 气泡汇聚成气线; 增加到 1.71 时, 已形成贯穿两出气口的气芯, 可看到明显的气液相界面, 但在高旋流数下, 气芯容易发生波浪型抖动, 在恢复叶轮附近, 由于气线抖动, 偶尔会有部分气泡逃逸出气芯, 从分离器出口随液体流出。不同旋流数下, 分离器内的气芯都可以演变到 P_4 阶段, 但是所需的最小背压值差别较大, 旋流数越大, 所需的背压值越小。

在 0.1%–0.5% 内, 含气量 β 对气芯的演变过程几乎没有影响, 含气量越高, 需要的分离时间越长。分离器两个叶轮间保持足够的距离, 即可实现气芯的完全分离。

3.3 雷诺数的影响

通过调节循环泵出口的节流阀, 可以改变液体流量, 雷诺数 Re 发生变化。当 $S=1.17$ 时, 随着 Re 的变化, 通过调节分离器背压, 气芯仍然体现了如图 5 所示的 4 个演变过程。当 $Re=35\,262$ 时, 气芯演变过程中尾部的絮状微气泡较多; 当 $Re=77\,576$ 和 $Re=119\,891$ 时, 稳定态气芯 P_4 呈现为一条直线, 刚性明显加强, 背压也由于 Re 的变化发生变化。

临界压力 P_{outc} 和 Re 的对比图见图 7。分析临界压力 P_{outc} 数据表明, 当 $S=0.77$ 时, P_{outc} 值随着 Re 增加。在一个特定的 Re 下, 形成稳定的气芯需要一定的径向压力来限制相界面。高旋流数可以产生较大的径向压力梯度, 出口背压也可以帮助产生径向压力梯度。因此, 高旋流数条件下, 对形成稳定气芯所需的临界背压 P_{outc} 的要求较小。如图 7 所示, $S=1.71$ 时所需的临界背压 P_{outc} 最小。为保持较大的旋流数则需要旋流叶片具有较大的偏转角度 α , 但这将增大分离器运行时的设备压降。

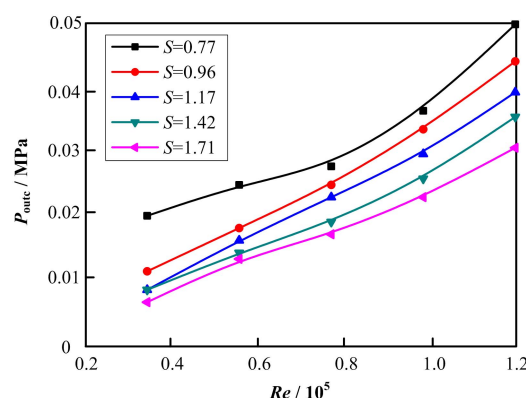


图 7 在不同 Re 和 S 条件下临界背压的变化
Fig.7 Variation of back pressure under different Re and S .

在气芯的形成过程中, 另一个衡量分离器能力的参数是液体分流比 λ , 它的定义如式(2)所示:

$$\lambda = \frac{Q_{L_{in}} - Q_{L_{out}}}{Q_{L_{in}}} \quad (2)$$

式中, λ 表示分离器的经济性, 也能反应重力分离罐的分离负荷水平; $Q_{L_{in}}$ 表示分离器进口液体流量; $Q_{L_{out}}$ 表示分离器出口液体流量。图 8 中, $S=0.77$, 表示不同 Re 分流比随背压变化情况, 分流比随着背压而增加。从分离器经济性而言, 在保证气体分离效率的前提下, 背压越小重力分离罐分离负荷越小。

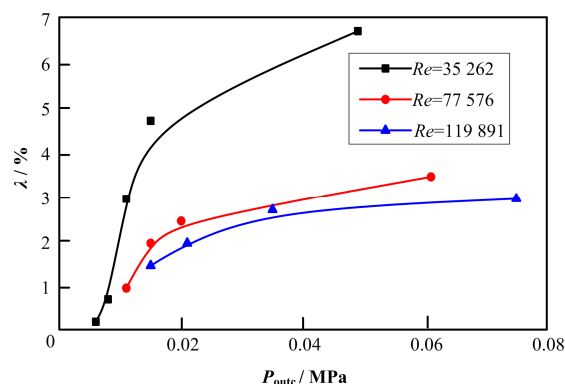


图 8 $S=0.77$ 、不同 Re 时临界背压与分流比的关系
Fig.8 Liquid entrainment ratio variation with the critical back pressure under different Re when $S=0.77$.

3.4 背压影响的数值模拟

采用商用软件 UG 生成三维几何模型, 采用 ICEM CFD 生成六面体网格(图 9), 总体单元数为 3×10^6 。管壁附近、搅浑叶片和恢复叶片的壁面附近进行了局部加密, 可以保证在操作流量范围内壁面的网格雷诺数 y^+ 满足湍流模型的需要^[16-17]。

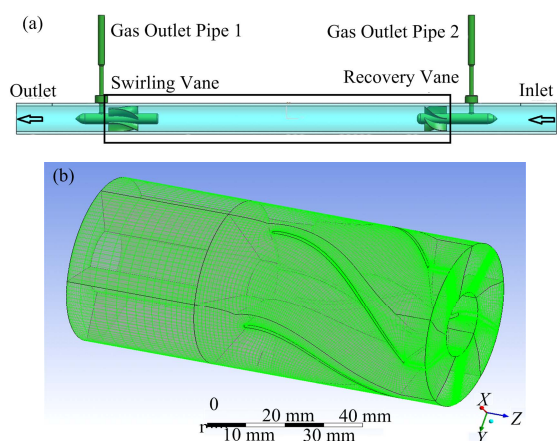


图9 旋叶式气泡分离器几何模型(a)和旋流叶片的网格划分图(b)

Fig.9 Geometry the of vane-type bubble separator (a) and mesh of the vane-type (b).

主管的出口背压是影响分离器的重要参数，影响到脱气系统在整个一回路系统中的安装位置，由于左、右支管的出口压力为大气压，考察的对象实质为主管出口压力与支管出口压力之差，为了考核出口背压对气液分离流动的影响，计算了背压增加过程中的两相流动，计算工况含气量为 0.2%，气泡平均直径为 0.5 mm，进口总体积流量为 $17 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，入口流速为 $2.87 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图 10 为不同背压条件下分离器内部空气芯分布。当背压比较小的时候，外界的气体会从左侧支管中流入分离器，也就是会发生倒吸现象，这是因为背压的减小会引起左侧支管进口处的压力降低，而当压力低于大气压时，会发生回流，从而进入分离器的气体在中心位置形成直径较大的气体柱，在流至出口处时，气芯发生旋流破碎后，流出分离器；随着背压的增大，气芯变直，内部逐渐转为正压状态，其直径变小，贯穿于两端的叶轮出气孔，实现气体的完全脱除，以上计算结果与实验结果基本一致。计算中发现，当背压 1 MPa 以上时，空气芯长度会逐渐减小，受玻璃实验管道的耐压限制，这个高压的计算结果并未在实验中得到验证，因此，控制分离器出口背压是脱气操作的关键。

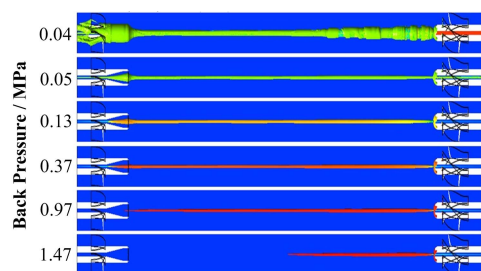


图 10 背压对空气芯形状的影响规律

Fig.10 Flow field distribution along the axis of the vane-type bubble separator.

4 结语

本文通过实验和数值计算研究了用于低含气量流体的气液分离器。与传统的水力旋流器类似，分离器利用旋流过程中产生的向心力，驱动气泡向分离器中心轴线方向运动，形成气芯。气芯的形成与分离器背压密切相关。实验中使用高速相机记录了气芯在不同背压下的演变过程。所有气芯的演变过程基本都可被分为 P_1 – P_4 的 4 个阶段。通过数值分析研究了背压对气芯形状的影响，气芯的形成过程的实验结果与计算结果基本一致，但高压下气芯变短的计算结果未能实现。

不同的 S 和 Re 下，均可以通过调节背压使气芯达到稳定状态。 S 会影响分离器的气芯形状； S 越大，稳定时所需的临界背压越小。 Re 增加，临界背压增大；背压增大，导致分离器分流比增大，经济性下降。综合考虑分离效率和经济性，分离器应在背压略大于临界背压的条件下运行。

参考文献

- 江绵恒, 徐洪杰, 戴志敏. 未来先进裂变能-TMSR 核能系统[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 366–374
JIANG Mianheng, XU Hongjie, DAI Zhimin. Advanced fission energy program-TMSR nuclear energy system[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 366–374
- 秋穗正, 张大林, 苏光辉, 等. 新概念熔盐堆的固有安全性及相关关键问题研究[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(S1): 64–75
QIU Suizheng, ZHANG Dalin, SU Guanghui, et al. Research on inherent safety and relative key issues of a molten salt reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(S1): 64–75
- Rosenthal M W. Molten salt reactor program semiannual progress report[R]. ORNL-4832, USA: Oak Ridge National Laboratory, 1972
- Moir R W. Recommendations for a restart of molten salt reactor development[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(7SI): 1849–1858
- Robertson R C. 1 000 MW(e) molten salt breeder reactor conceptual design study[R]. ORNL-4541, National Laboratory Oak, 1966
- Neesse T, Dueck J. Air core formation in the hydrocyclone[J]. Minerals Engineering, 2007, 20(4): 349–354
- 刘毅, 汪华林, 杨强. 旋流场超细颗粒聚集实验研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(3): 717–720
LIU Yi, WANG Hualin, YANG Qiang. Experimental

- investigation on aggregation of ultrafine particles in swirling flow field[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(3): 717–720
- 8 赵立新, 宋民航, 蒋明虎, 等. 轴流式旋流分离器研究进展[J]. 化工机械, 2014, 41(1): 20–25
ZHAO Lixin, SONG Minhang, JIANG Minghu, *et al.* Research progress in vane-guided cyclone separator[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2014, 41(1): 20–25
 - 9 Sripriya R, Meikap B C, Suresh N, *et al.* Role of air core in particle separation in cyclones[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2013, 122(1): 25–35
 - 10 Sripriya R, Suresh N, Chandra S, *et al.* The effect of diameter and height of the inserted rod in a dense medium cyclone to suppress air core[J]. Minerals Engineering, 2013, 42: 1–8
 - 11 张娜娜, 阎昌琪, 孙立成, 等. 熔盐堆除气系统中气泡分离器运行特性[J]. 核动力工程, 2014, 35(2): 137–140
ZHANG Nana, YAN Changqi, SUN Licheng, *et al.* Investigation on performance of gas separators in gas removal system for MSR[J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(2): 137–140
 - 12 蔡报伟, 王建军, 孙立成, 等. 熔盐堆旋叶式气水分离器工作特性数值分析[J]. 核技术, 2014, 37(4): 040603
CAI Baowei, WANG Jianjun, SUN Licheng, *et al.* Numerical study on the performance of a vane-type bubble separator for molten salt reactor[J]. Nuclear Techniques, 2014, 37(4): 040603
 - 13 Kress T S. Mass transfer between small bubbles and liquids in cocurrent turbulent pipeline flow[R]. ORNL-TM-3718, National Laboratory Oak, 1966
 - 14 Syred N. A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32(2): 93–161
 - 15 江旭昌. 多风道煤粉燃烧器旋流数的分析与计算[J]. 水泥, 2004, (9): 11–15
JIANG Xuchang. Analysis and calculation of swirling index of multi-channel burner[J]. Cement, 2004, (9): 11–15
 - 16 Zhang B, Shan J Q, Jiang J. Simulation of heat transfer of supercritical water in obstacle-bearing vertical tube[J]. Nuclear Science and Techniques, 2010, 21(4): 241–245
 - 17 Gu H, Yu Y Q, Cheng X, *et al.* Numerical analysis of thermal-hydraulic behavior of supercritical water in vertical upward/downward flow channels[J]. Nuclear Science and Techniques, 2008, 19(3): 178–186

Performance of a gas-liquid separator under different back pressure

LI Hua^{1,2} YIN Junlian³ ZHANG Ning^{1,2} QIAN Yuan^{1,2} LIU Wei^{1,2}

¹(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

²(Key Lab of Nuclear Radiation and Nuclear Energy Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

³(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract Background: One advantage of liquid fluoride thorium reactor is that it can separate almost all of fission products including its own transuranic products due to the on-line removing. The removing process can be defined as bubble generation-mass transfer-gas separation. **Purpose:** A gas-liquid separator is a core component in the removing system. In this paper, a kind of gas-liquid separator adopted to remove the fission gases for Thorium Molten Salt Reactor (TMSR) is studied. The air core formation, which is heavily depending on the back pressure, plays a significant role for separation efficiency. **Methods:** To illustrate the effect of back pressure on the evolution process of the air core, the air core behavior variation with the back pressure under different swirling numbers (S) and Reynolds numbers (Re) were recorded by visualization technique. **Results:** The flow pattern indicates that the air core evolution can be defined as four stages with respective characteristics. However, the air core can shape under different swirling numbers and Reynolds numbers differ a lot. **Conclusion:** It is proven that there is a critical back pressure which contributes an economic and high efficient separation. Thus, the critical back pressures were summarized for all the swirling numbers and Reynolds numbers involved, which can provide a guideline for the application of the separator.

Key words Gas-liquid separator, Air core, Back pressure, Swirling flow

CLC TL99