

文章编号: 1000-8055(2024)12-20220304-08

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220304

网幕通道式液体获取装置相分离 特性低温实验研究

王 晔¹, 杨 光¹, 金 鑫², 尚 锐², 任 枫², 汪 彬², 吴静怡¹

(1. 上海交通大学 制冷与低温工程研究所, 上海 200240;

2. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109)

摘 要: 为研究网幕通道式液体获取装置的运行性能, 搭建了以液氮为工质的液体输运实验系统, 研究了网幕通道在稳定运行工况和临界泡破失效工况下的相分离性能。获得了不同网幕规格、不同气体暴露长度下通道总压损与液体流量的变化规律, 分析了通道相分离失效的临界压力以及最大液体获取流量。实验结果表明: 通道总压降按照 203×1 600 网、130×1 100 网和 325×2 300 网的顺序逐渐增加, 该趋势与多孔网幕自身的压降预测规律一致。网幕自身的泡破压力研究能够反映网幕通道的极限工作特性。实验证明在网幕规格的选择上, 流动压损与泡破压力存在明显的博弈关系。重力因素对通道相分离性能的影响体现在重力静压损和气体覆盖率两方面, 所获得的低温实验数据能够指导网幕通道的选型优化。

关 键 词: 低温推进剂; 网幕通道式液体获取装置; 相分离特性; 液体在轨管理; 多孔网幕

中图分类号: V511.6

文献标志码: A

Cryogenic experimental study on the phase separation performance of screen channel liquid acquisition device

WANG Ye¹, YANG Guang¹, JIN Xin², ZHUAN Rui², REN Feng²,

WANG Bin², WU Jingyi¹

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Institute of Aerospace System Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: Gas-free liquid delivery experiments for liquid nitrogen were conducted to evaluate the performance of the screen channel liquid acquisition devices. The phase separation capability of the screen channel was investigated in detail under successful separation conditions and critical separation failure conditions. The influences of the total channel flow resistance and liquid flow rate of the channel under different screen specifications and the exposed length of the channel to gas phase were obtained, while the critical breakthrough failure pressure and the maximum achievable flow rate were analyzed. Experimental results indicated that the total pressure loss in the screen channel increased with the trend of 203×1 600 screen, 130×1 100 screen, and 325×2 300 screen. This trend of the channel flow resistance was similar to the trend of the screen pressure drop. The bubble point pressure tested for the porous screen can be directly

收稿日期: 2022-05-03

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51936006); 中国航天科技集团第八研究院产学研合作基金资助项目(USCAST2020-15);

上海市科技计划项目(20YF1447900)

作者简介: 王晔(1995—), 女, 工程师, 博士, 主要从事低温推进剂在轨管理、多孔介质流动与传热等方面的研究。

通信作者: 杨光(1988—), 男, 副教授, 博士, 主要从事低温流动与传热等方面的研究。E-mail: y_g@sjtu.edu.cn

引用格式: 王晔, 杨光, 金鑫, 等. 网幕通道式液体获取装置相分离特性低温实验研究[J]. 航空动力学报, 2024, 39(12): 20220304. WANG Ye, YANG Guang, JIN Xin, et al. Cryogenic experimental study on the phase separation performance of screen channel liquid acquisition device[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(12): 20220304.

applied to the dynamic separation processes of the screen channel. Moreover, experimental results indicated that there was a best choice of the screen specifications to balance between the flow resistance and the breakthrough failure threshold. The influence of the gravity on the separation performance was reflected on the caused static pressure loss and the gas coverage ration on the screen channel. The cryogenic experimental results may provide a guidance for practical application of the screen channel liquid acquisition devices.

Keywords: cryogenic propellants; screen channel liquid acquisition device; phase separation performance; on-orbit liquid management; porous screen

液氢、液氧、液态甲烷等低温推进剂因其高比冲特性成为未来空间应用中的首选推进剂之一。在地面常重力环境或空间加速飞行过程中,贮箱中的低温推进剂由于密度差异导致气液相分离。但在微重力环境中,表面张力成为影响气液固相界面分布的主导因素,液相黏附于贮箱壁面,以液包气的形式分布,贮箱内气液相分布不确定^[1-2],无法实现气液分层和定位,造成推进剂的获取和运输困难。如果不进行气液分离而直接取用,将导致发动机供液夹气,引起发动机起动不平稳,甚至会导致发动机起动失效^[3]。美国国家科学技术委员会在 2022 年发布的《关键和新兴技术清单》中将低温流体管理列为空间系统领域的核心技术。

表面张力驱动式分离技术能够充分利用微重力环境下起主导作用的表面张力,不受低温流体蒸发的影响、无需消耗多余燃料,是一种极具前景的低温推进剂气液分离技术。其中,采用多孔介质来增强表面张力的网幕通道式液体获取装置(liquid acquisition device, LAD)被认为是未来实现低温流体空间气液分离的最佳选择^[4]。其相分离机理就是借助多孔网幕内较强的表面张力来阻隔气体,液体在压差作用下能够穿过多孔网幕进入液体输运通道,而气体因微米级孔隙中的液体的表面张力而被阻挡于多孔网幕之外。由此,在多孔网幕处实现了气液分离,将液体推进剂输送至发动机进液通道,保障发动机平稳起动。

国内外研究者针对多孔网幕的关键性能参数,包括多孔网幕内液体的毛细润湿性能、相分离过程涉及的单相流体流经多孔网幕的压降特性(flow-through-screen, FTS)以及相分离失效时涉及的临界泡破失效性能均已开展了大量研究,并取得了一定成果。NASA 的研究起步较早,针对常温和低温工质均进行了实验测试^[5-8]。国内,作者研究团队也针对上述 3 个关键性能参数开展了系列研究^[9-11]。Ma 等^[12]、Zhu 等^[13-14]针对网幕的毛

细性能和泡破性能开展了理论和实验研究。

然而,从多孔网幕扩展到部件级别的网幕通道,现有研究对网幕通道整体相分离性能的关注较少。大多研究者采用数值模拟方法研究液体在网幕通道内的流动性能^[15-16],但是,数值模型大多将多孔网幕简化为一个多孔介质压力阶跃边界,只进行了单相流动模拟,无法反映实际运行过程中的气液两相流动形态和多孔网幕对气相的阻挡作用。实验研究方面,以常温流体为工质的研究较多,Darr 等^[17]以水为工质,实验研究了网幕通道内的速度场和压力场,考虑了实际运行状态下流体速度沿网幕通道分布的不均匀性。作者研究团队以水和异丙醇为工质,实验研究了网幕通道对常温流体的相分离过程,获得了相分离过程中网幕通道内外液体的速度分布特性^[18-19]。低温实验方面,Hartwig 等^[20-21]以液氢为工质研究了地面环境中网幕通道的反重力输运性能,但是研究对象较为单一,仅使用了一种网幕规格,且并未验证多孔网幕研究结果在通道研究中的适用性。

综合而言,网幕通道式液体获取装置仍然处于基础研究阶段,技术成熟度低^[22]。尽管针对多孔网幕的研究已经取得一定进展,但是扩展到网幕通道上,仍然缺乏对通道部件相分离性能以及液体输运性能的研究,尤其缺乏针对低温流体的实验数据。因此,本文以网幕通道式液体获取装置的关键部件网幕通道为研究对象,搭建了以液氮为工质的液体输运实验系统,研究网幕通道在稳定相分离工况和临界泡破失效工况下的相分离性能,探究多孔网幕各性能参数研究结果在通道相分离过程中的适用性,所获得的相分离性能实验结果能够指导网幕通道的设计及选型优化。

1 低温流体的液体输运实验

1.1 低温实验系统概述

实验系统的原理图如图 1 所示,主要包含实

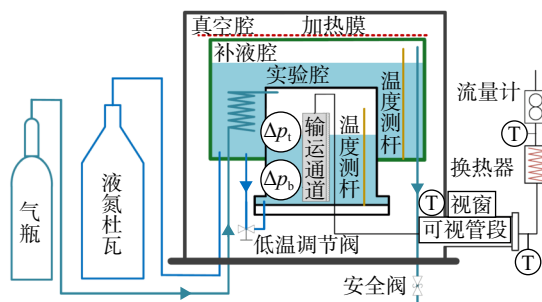


图 1 低温流体液体运输的可视化实验系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the visualization system of vapor-free liquid delivery

验腔主体、充注排放子系统、低温可视化子系统、测量及控制子系统、真空绝热子系统等。 Δp_t 与 Δp_b 分别为压差传感器测量获得的顶部和底部位置网幕两侧压差。地面常重力环境下,液体由于密度差异会沉底,无法模拟微重力环境中气液两相混合的状态。因此,液体输运实验系统中采用通道出口在上的形式竖直安装在实验腔中,使网幕通道上端暴露于气体区域、通道下端浸没于液体区域。进而,通过气瓶向实验腔内加压,液体工质将在压差驱动下垂直穿过浸没于液体中的多孔网幕进入通道;暴露于气体区域的通道上端则会依靠网幕孔隙内吸附液体的表面张力阻止气体入侵,以此模拟网幕通道的相分离过程。随后,液体进入网幕通道后向上流动,并从通道顶部的出口流出实验腔,最终实现液体获取功能。在实验过程中,通过进气阀门调节实验腔压力,控制网幕通道内外的压差。当通道内外压差超过多孔网幕的泡破压力时,气体将从上方突破多孔网幕进入通道,导致相分离失效,此时从网幕通道出口的可视管段处可以观察到气液两相流。

低温实验系统的实物图如图 2 所示,网幕通道的实验部分如图 3(a) 所示,网幕通道是由三侧不锈钢壁面和一侧多孔网幕组成的空心通道,下

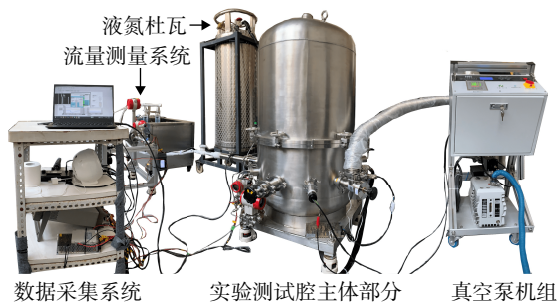


图 2 低温流体液体运输的可视化实验系统实物图

Fig. 2 Photograph of the visualized liquid delivery apparatus

底面是不锈钢壁面,上顶面焊接 12.7 mm 的毛细管出口。网幕通道的总长度 L 为 0.2 m。多孔网幕采用满焊的方式焊接在通道侧面,并采用低温胶密封,保证通道边缘位置的密闭性。密封后网幕通道内多孔网幕的有效流通面积为 $0.2 \text{ m} \times 0.01 \text{ m}$ 的长方形截面。实验腔采用法兰在下、上方外置补液腔的形式,能够保证实验腔内的温度均匀性,减小气相和液相区域的温差,避免经网幕通道获取的液体工质在管路中的流动过程受到热影响。

低温可视子系统由可视观察窗和可视管段组成。液氮经网幕通道流出后即经过可视管段,可视管段安装在真空腔内,通过过渡夹套引出。可视窗是平面玻璃法兰,固定在真空腔侧壁面,便于观测可视管段内的液体流动情况,判断网幕通道的泡破失效工况。图 3(b) 展示了可视管路的实物图。可视管段由石英玻璃经可伐合金焊接在不锈钢管上,另外连接波纹管防止玻璃段承力。可视管段通过金属垫片面密封管接头(VCR)连接于网幕通道出口,随后由高真空法兰固定于真空腔侧壁面。实验过程中能够通过可视窗观测网幕通道出口的液体或气液两相流体的流动情况。

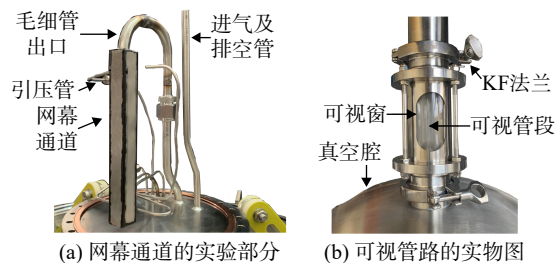


图 3 网幕通道和可视管路的实物图

Fig. 3 Photograph of the screen channel section and the cryogenic visualization

实验腔内部竖直布置了 5 支铂电阻 PT100 温度计,其精度为 $\pm 0.3 \text{ K}$,用于测量实验腔内的液位高度,进而确定网幕通道暴露在气体区域的长度。补液腔和实验腔间连接了型号为 Swagelok®SS-8UW-TF 的低温调节阀,用于向实验腔中补液。压差变送器的型号为 Meacon®MIK-2051,测量精度为 0.075 级,安装在靠近网幕通道顶部位置,用于测量顶部暴露于气体区域的通道内外压差。压力传感器的型号为 Meacon®MIK-P300,测量精度为 0.5 级,用于测量实验腔内压力。液氮经过可视管段后,流经换热器,在换热器出口布置有温度测点,保证液氮已完全气化。换热器后连接气体流量计,型号为 Meacon®LUGB-MIK-DN15,精

度为 1.5 级,带温压补偿,保证氮气流量的测量精度。气体流量计测量的是标准状况下的氮气流量 $Q_g(N_2)$,单位是 m^3/h ,需要根据气体流量计测量数据换算成液氮的实际流量 $M_l(N_2)$,单位是 kg/s 。由物性查询软件 NIST REFPROP9 获得氮气在标况下的密度为 1.23 kg/m^3 ,再将时间单位从每小时转化为每秒钟,最终获得液氮流量的计算公式如下:

$$M_l(N_2) = \rho Q_g(N_2) / t = 3.43 \times 10^{-4} Q_g(N_2) \quad (1)$$

1.2 实验流程

实验开始前,首先使用真空泵将腔内真空度抽到 10^{-3} Pa 时开始充注液氮,充分预冷,直到实验腔和补液腔中完全充满液氮。随后,向实验腔中通入冷氮气加压并维持实验腔内压力恒定,打开可视段出口阀门,液氮将在压差驱动下以一定流量从网幕通道出口流出。在实验初始阶段,首先维持贮箱内的压力较低,保证只有液相沿网幕通道流出,维持可视段满液流动 20 s 以上,以确保网幕通道到可视段之间的管路中不存在因漏热导致液相蒸发所形成的气泡。随后,逐渐增加驱动压差,记录网幕通道内总压损和液体获取流量等参数。

图 4 展示了实验过程中高速相机拍摄的可视管路空管、满液单相流动及气液两相流动的图像,由此判断网幕通道处于稳定运行工况还是泡破失效工况。在稳定运行工况下,网幕通道可以成功实现气液两相分离,将液体工质输送至通道出口,此时通道出口的可视管段中可以观测到满液流动情况,如图 4(b)所示。临界泡破失效工况是指相分离失败的情况,气泡将突破多孔网幕进入通道,可视段能够观测到明显气泡,如图 4(c)所示;同时压差信号也会出现小幅波动,通过可视段观测

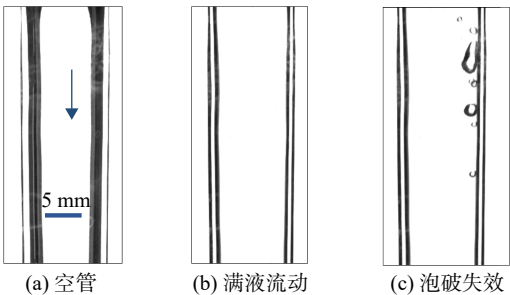


图 4 液体获取工况和泡破失效工况的实验图像
Fig. 4 Photograph under the liquid acquisition condition and the separation failure condition

到的单相/两相流动情况以及压差信号的波动情况共同判断网幕通道的运行情况。实际工程中应调节贮箱内压力与贮箱出口的压力差,维持网幕通道内外压差始终小于泡破压力,保证网幕通道始终处于稳定运行工况,避免泡破失效情况的出现。

1.3 网幕通道方案与工况设定

为了明确网幕规格对通道相分离性能的影响,检验网幕通道在不同工况下的液体输运性能,本次实验针对不同规格的多孔网幕开展了液体输运实验研究。采用 3 种编织密度的斜纹密纹网幕作为研究对象,研究网幕通道内外压差与液体获取流量之间的变化规律,以及临界泡破失效工况下网幕通道的最大液体获取效率。斜纹密纹网幕的几何结构和扫描电镜(SEM)图像如图 5 所示,所用网幕均为不锈钢材质,其中 $325 \times 2\,300$ 网幕即表示经纬线方向上每英寸长度由 325 根经丝和 2 300 根纬丝编织而成。各网幕的具体参数列于表 1,3 种网幕的等效泡破孔径是根据文献 [11] 计算获得。由于丝线直径和密度差异,不同规格网幕的流动阻力和泡破压力不同,会表现出不同的相分离性能。通道的相分离过程还需要考虑液体与网幕通道的有效接触面积、重力引起的静压损等因素。因此,将暴露长度定义为网幕通道暴露于气体区域的长度,通过改变通道的暴露长度 ($L_{ex}=0.11, 0.08, 0.05\text{ m}$),研究不同流动阻力条件下网幕通道的运行性能。需要说明的是,由于

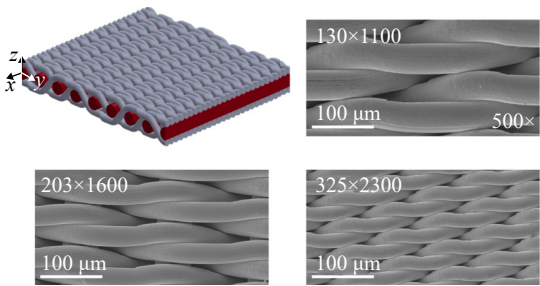


图 5 斜纹密纹网幕的几何结构和扫描电镜图像
Fig. 5 Schematic diagram and SEM image of the metal wire screens

表 1 斜纹密纹网幕的结构参数
Table 1 Geometrical parameters of the screen samples

项目	网幕规格		
	130 × 1 100	203 × 1 600	325 × 2 300
经线直径/ μm	71.0	50.0	32.6
纬线直径/ μm	50.0	32.0	25.0
泡破孔径/ μm	31.3	20.3	12.9

网幕 $130 \times 1\ 100$ 的孔径较大, 在通道暴露长度为 0.11 m 时, 重力产生的静压损占泡破压力的 80% , 因此在网幕 $130 \times 1\ 100$ 的实验过程中, 暴露长度还未降至 0.11 m 网幕通道就已经出现泡破失效, 所以网幕 $130 \times 1\ 100$ 只进行了 0.05 m 和 0.08 m 两组不同暴露长度的实验。表 2 展示了实验工质液氮在 100 kPa 下的物性参数。液氮等低温流体与网幕基材的接触角可视为 0° ^[23]。

表 2 实验工质液氮在 100 kPa 下的物性Table 2 Physical properties of liquid nitrogen at 100 kPa

工质	温度/K	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$\mu/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	$\sigma/(\text{mN}/\text{m})$
液氮	77	806.59	0.161	8.90

2 理论分析

网幕通道式液体获取装置稳定运行的关键就是在给定的驱动压差下, 液相能够穿过多孔网幕并沿网幕通道输送至贮箱出口, 而气相会被阻挡在多孔网幕之外。将气体突破表面张力束缚进入网幕通道所需的压力定义为泡破压力 Δp_{bp} 。冷却气体对推进剂贮箱加压产生的驱动压差表示为 $\Delta p_{\text{applied}}$ 。网幕通道的总压损表示为 Δp_{total} 。为保证网幕通道式液体获取装置的稳定运行, 各压力必须满足以下条件:

$$\Delta p_{\text{applied}} = \Delta p_{\text{total}} < \Delta p_{\text{bp}} \quad (2)$$

液体在整个流程中产生的 Δp_{total} 可以表示为^[5]

$$\Delta p_{\text{total}} = \Delta p_g + \Delta p_{\text{FTS}} + \Delta p_f + \Delta p_d + \Delta p_{\text{other}} \quad (3)$$

式中 Δp_g 是网幕通道中由重力引起的静压损失, Δp_{FTS} 是液体流经多孔网幕产生的 FTS 压损, Δp_f 是流体在网幕通道中克服侧壁面黏性力产生的压损, Δp_d 是液体流动过程中伯努利效应产生的压力损失, Δp_{other} 是由于网幕震动变形等其他因素产生的压损。

考虑地面常重力实验环境, 图 6 展示了布置有网幕通道的实验腔示意图。网幕通道总长度为 L , 浸没在液氮中的长度为 L_{sub} , 暴露在气体区域的长度为 L_{ex} 。实验腔内的压力为 p_{ullage} 。压差传感器测点 T 布置在网幕通道的顶部, 此处的网幕通道内外压差最大, 是气泡最易突破的位置, 因此将 Δp_T 认为是整个网幕通道内的总压损。 T 测点通道外的压力为:

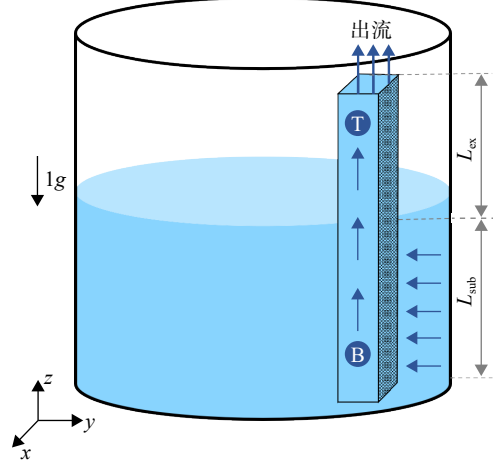


图 6 具有网幕通道的实验腔示意图

Fig. 6 Schematic of the tank equipped with a screen channel LAD

$$p_{T,\text{out}} = p_{\text{ullage}} \quad (4)$$

T 测点通道内的压力为:

$$p_{T,\text{in}} = p_{\text{ullage}} - \rho g L_{\text{ex}} - \Delta p_{\text{FTS}} - p_f(L) - p_d(L) - p_{\text{other}}(L) \quad (5)$$

式中 Δp_{FTS} 表示液体流经浸没区域的多孔网幕产生的 FTS 压降, $p_f(L)$ 代表流体在网幕通道中的黏性压损, $p_d(L)$ 代表流体流动过程中由伯努利效应产生的动压损, $p_{\text{other}}(L)$ 代表震动等其他因素产生的压损。最终, 压差传感器在 T 测点测量的网幕通道总压损为:

$$\Delta p_T = \rho g L_{\text{ex}} + \Delta p_{\text{FTS}} + p_f(L) + p_d(L) + p_{\text{other}}(L) \quad (6)$$

3 结果与讨论

3.1 相分离过程的网幕通道总压损分析

多孔网幕的规格直接决定了液体流经网幕的 FTS 压降。图 7 展示了在暴露长度 $L_{\text{ex}} = 0.05\text{ m}$ 工况下, 使用网幕 $130 \times 1\ 100$ 、 $203 \times 1\ 600$ 和 $325 \times 2\ 300$ 的通道在稳定相分离工况下的通道总压损随液体流量的变化曲线。从图中可以看出, 网幕通道内的总压损随液体流量的增加均呈现增加趋势。根据作者之前研究中建立的多孔网幕 FTS 压降预测模型^[9], 在相同流速下, 3 种网幕的 FTS 压降按照 $203 \times 1\ 600$ 、 $130 \times 1\ 100$ 和 $325 \times 2\ 300$ 的顺序增加。在通道部件的研究中, 对比网幕规格的影响, 可以看出, 在液体获取流量为 0.002 kg/s 时, 使用网幕 $130 \times 1\ 100$ 和 $203 \times 1\ 600$ 的通道总压损约为 0.97 kPa 和 0.63 kPa , 而使用编织结构最

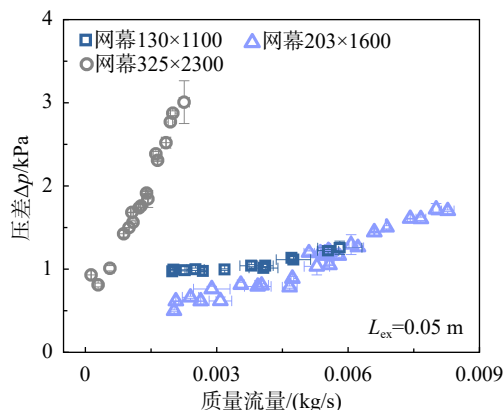


图 7 不同规格的网幕通道总压损随液体流量变化曲线

Fig. 7 Measured pressure difference in the screen channel as a function of mass flow rate evaluated for various screen samples

紧密的网幕 325 × 2 300 的通道总压损可达 2.77 kPa, 涨幅超过 100%。也就是说, 在相同液体流量和暴露长度工况下, 3 种网幕通道的总压降按照 203 × 1 600、130 × 1 100 和 325 × 2 300 的顺序增加, 该趋势与网幕 FTS 压降预测结果吻合良好。尽管地面实验环境下网幕通道的总压损还涉及重力静压损和黏性压损等其他参数, 但是总压损的变化规律仍然与网幕 FTS 压降的预测规律一致, 证明多孔网幕规格对 FTS 压降特性的影响规律仍然适用于网幕通道的总压损研究中。

3.2 临界相分离失效工况下的最大液体获取流量

在液体输运实验中, 当可视觉观测到气液两相流动时, 即意味着网幕通道已经泡破失效, 不再具备阻隔气体的能力。此时, 在通道顶部测量到的压差即为该网幕通道的临界失效压力。图 8 对比了在低温实验中测量的通道临界失效压力与作者在之前研究中所建立的网幕泡破压力预测模型^[11]获得的理论泡破压力。结果表明, 在相分离过程中, 通道失效的临界压力与网幕泡破压力模型预测结果吻合良好, 相对误差小于 20%, 说明临界泡破压力受系统动态相分离过程的影响较小。从多孔网幕扩展到网幕通道的研究中, 其临界泡破失效性能不变, 网幕泡破压力的研究结果能够直接应用于通道部件的研究中。

网幕通道在泡破失效前所能获得的最大液体获取流量是衡量通道相分离能力的重要参数。图 9 展示了在不同气体暴露长度下, 不同规格的网幕通道在泡破失效前能够达到的最大液体获取流量, 柱状图中的误差线代表重复实验的标准偏差。对比网幕规格对相分离性能的影响, 从实验

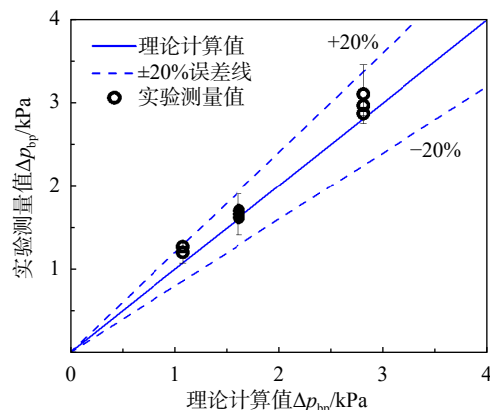


图 8 临界泡破压力的相分离实验结果与文献 [11] 的理论预测结果对比

Fig. 8 Comparison between the measured bubble point pressure in the vapor-free liquid delivery experiments and the predicted value based on Ref. [11]

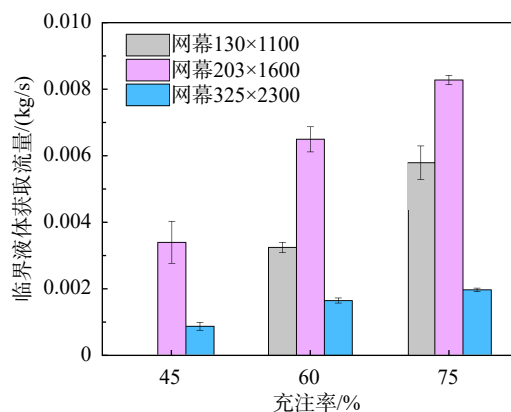


图 9 不同规格的网幕通道在不同暴露长度下的临界液体获取流量

Fig. 9 Critical mass flow rate at the breakthrough failure point evaluated for various screen samples and exposed length

结果可以看出, 在不同工况下, 网幕 203 × 1 600 的相分离性能均优于网幕 130 × 1 100 和 325 × 2 300, 其临界液体获取流量最大。以通道暴露长度为 0.05 m 为例, 使用网幕 203 × 1 600 的系统最大液体获取流量为 0.008 3 kg/s, 而使用网幕 130 × 1 100 的系统最大液体获取流量仅为 0.005 8 kg/s, 涨幅达 43%。说明在多孔网幕规格的选择上, 流动压损与泡破压力之间存在明显的博弈关系。这是因为理想的多孔网幕应同时具备较小的流动阻力与较大的泡破压力。然而, FTS 压降与泡破压力均与网幕孔径呈反比, 仅依靠网幕规格的变化无法同时满足 FTS 压降最小化和泡破压力最大化的要求。以本文实验中所选取的 3 种网幕规格为例, 网幕编织规格最松弛的 130 × 1 100 的泡破压力较小, 在较低的液体流量下网幕就发生了泡破失效,

其相分离效率较低。对于编织规格最紧密的网幕 $325 \times 2\,300$, 尽管其泡破压力显著高于其他网幕, 但是其流动阻力较大, 液体获取流量受限。而网幕 $203 \times 1\,600$ 平衡了流动阻力和泡破压力这两者的影响, 表现出了最好的液体获取性能。

暴露长度反映了网幕表面气体覆盖面积的影响, 实验结果表明, 液体获取流量随网幕表面气体覆盖率的增大而显著减小。以网幕 $203 \times 1\,600$ 为例, 当 $L_{\text{ex}}=0.05\text{ m}$ 时, 网幕暴露于气体区域的面积最小, 仅为 25%, 此时通道的最大液体获取流量为 $0.008\,3\text{ kg/s}$ 。而随着暴露长度的增加, 网幕的气体覆盖面积越来越大, 当 L_{ex} 降至 0.08 m 和 0.11 m 时, 网幕的气体覆盖率可达 40% 和 55%, 对应的通道临界液体获取流量显著降低至 $0.006\,5\text{ kg/s}$ 和 $0.003\,4\text{ kg/s}$, 降幅达 22% 和 59%。

考虑网幕的尺度扩展, 即在更大的有效流通面积下, 网幕通道能够实现的液体获取流量不仅与流通面积的大小有关, 还与气体覆盖面积比例、气体暴露区域产生的重力静压损等多项因素有关, 需结合实际应用进行分析。

总结而言, 综合考虑流动阻力和泡破压力后, 网幕 $203 \times 1\,600$ 可获取的液体流量最大, 其临界相分离性能最好。此外, 在通道相分离过程中, 网幕表面的气体覆盖率是影响临界液体获取流量的重要因素。

3.3 重力环境对通道相分离性能的影响

图 10 中展示了网幕通道在临界失效时测量的通道总压损与静压损占比。其中, 柱状图展示了不同规格网幕通道在不同暴露长度下的通道总压损, 散点展示了重力产生的静压损占总压损比例情况。地面常重力环境中, 液体由于密度差异沉底, 无法模拟微重力环境中气液两相混合的状态。因此, 地面实验采用液体“反重力”运输的形式来模拟网幕通道的相分离和液体输运过程。重力对相分离过程的影响主要体现在两个方面。一方面是重力对网幕通道内总压损的影响, 根据式(6), 在地面液体输运实验中重力产生的静压损 $\Delta p_g = \rho g L_{\text{ex}}$ 取决于网幕通道暴露在气体区域的长度。如图 10 所示, 对于每一种规格的网幕, 重力产生的静压损占比随通道暴露长度的增加而逐渐增加。可以看出, 常重力环境中重力产生的静压损成为影响网幕通道压降的重要因素, 尤其是对于液氮等表面张力较小的低温流体而言, 其临界泡破压力较小, 重力静压损占比可达 30% 以上。

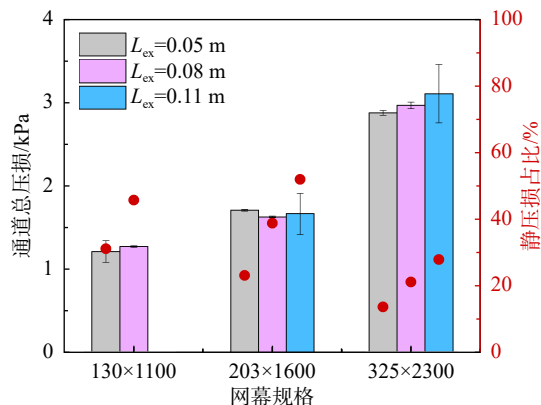


图 10 临界失效工况下不同规格网幕通道在不同暴露长度下的通道总压损与静压损占比

Fig. 10 Total pressure loss of the screen channel and the ratio of the hydrostatic pressure loss at the critical separation failure point evaluated for various screen samples and exposed length

另一方面是对气体覆盖面积的影响。在地面实验中气液两相分布主要受重力影响, 液相集中于贮箱底部, 液体只能通过浸没在液相区域的多孔网幕进入通道。而在微重力环境中, 液相倾向于沿多孔网幕和金属固壁面分布。因此在相同贮箱充注率条件下, 微重力环境中网幕通道的气体覆盖面积明显小于常重力环境。

综合考虑重力因素对通道总压损和气体覆盖面积的影响, 常重力环境下的液体获取过程会比在轨状态下的相分离过程更加恶劣。因此, 地面实验中针对网幕通道的研究结果也能够反映在轨微重力环境下的工作状态, 例如, 网幕规格对压降特性的影响规律以及网幕规格的选择方案能够指导实际的网幕通道设计、优化多孔网幕规格型号选择。然而, 对于在轨相分离效率的精确预测, 还需要通过开展微重力条件下的低温实验来进一步研究。

4 结 论

本文搭建了低温流体的液体输运实验系统, 模拟网幕通道的相分离过程, 研究了稳定相分离工况和临界相分离失效工况下的网幕通道总压损与液体获取流量, 分析了网幕规格、气体暴露长度和重力环境对通道相分离性能的影响, 主要结论如下:

1) 在总压损上, 网幕规格对通道部件总压损的影响规律与多孔网幕自身的 FTS 压降规律一致。在泡破失效阈值上, 多孔网幕的泡破压力研究结果能够反映网幕通道的极限工作特性。

2) 实验结果证明在多孔网幕规格的选择上, 流动压损与泡破压力存在博弈关系, 编织过于疏松或是过于紧密的网幕都无法达到较好的相分离效果。针对本文所选取的 3 种网幕样本, 网幕 $203 \times 1\ 600$ 的临界相分离性能最好。网幕表面的气体覆盖率也是重要影响因素, 通道的临界液体获取流量随网幕表面气体覆盖率的增大而显著减小。

3) 本文提供了不同规格的网幕通道在不同气体暴露长度下的低温实验数据, 能够用于网幕通道相分离性能的理论研究和模拟验证, 为微重力环境中的网幕通道式液体获取装置的相分离性能评估和网幕通道的选型优化提供指导。

参考文献:

- [1] WANG Bin, QIN Xujin, JIANG Wenbin, et al. Numerical simulation on interface evolution and pressurization behaviors in cryogenic propellant tank on orbit[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2020, 32(1): 59-68.
- [2] LI Zhangguo, ZHU Zhiqiang, LIU Qiusheng, et al. Simulating propellant reorientation of vehicle upper stage in microgravity environment[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2013, 25(4): 237-241.
- [3] HARTWIG J W. Propellant management devices for low-gravity fluid management: past, present, and future applications[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2017, 54(4): 808-824.
- [4] 王磊, 厉彦忠, 马原, 等. 液体推进剂在轨加注技术与加注方案[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(8): 2002-2009.
WANG Lei, LI Yanzhong, MA Yuan, et al. On-orbit refilling technologies and schemes of liquid propellant[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(8): 2002-2009. (in Chinese)
- [5] HARTWIG J, DARR S. Influential factors for liquid acquisition device screen selection for cryogenic propulsion systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 66(1/2): 548-562.
- [6] HARTWIG J W, KAMOTANI Y. The static bubble point pressure model for cryogenic screen channel liquid acquisition devices[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 101: 502-516.
- [7] CAMAROTTI C, DENG O, DARR S, et al. Room temperature bubble point, flow-through screen, and wicking experiments for screen channel liquid acquisition devices[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 149: 1170-1185.
- [8] DARR S R, HARTWIG J W, CHUNG J N. Flow-through-screen pressure drop model for screen channel liquid acquisition devices[J]. *Journal of Porous Media*, 2019, 22(9): 1177-1195.
- [9] WANG Ye, YANG Guang, HUANG Yiye, et al. Analytical model of flow-through-screen pressure drop for metal wire screens considering the effects of pore structures[J]. *Chemical Engineering Science*, 2021, 229: 116037.
- [10] WANG Ye, LIN Yilin, YANG Guang, et al. Flow physics of wicking into woven screens with hybrid micro-/nanoporous structures[J]. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2021, 37(7): 2289-2297.
- [11] 王晔, 张婉雨, 汪彬, 等. 多孔网幕泡破压力预测模型的建立及实验验证[J]. *化工学报*, 2022, 73(3): 1102-1110.
WANG Ye, ZHANG Wanyu, WANG Bin, et al. Analytical model of bubble point pressure for metal wire screens and experimental validation[J]. *CIESC Journal*, 2022, 73(3): 1102-1110. (in Chinese)
- [12] MA Yuan, ZIMNIK D, DREYER M, et al. Investigation on cryowicking performance within metallic weaves under superheated conditions for screen channel liquid acquisition devices (LADs)[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 141: 530-541.
- [13] ZHU Qingchun, GUO Weimin, ZHUAN Rui, et al. Cryogenic wicking of liquid nitrogen in the metallic screens with different weave densities[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 183: 122208.
- [14] 朱庆春, 周勇瑞, 蒋玉婷, 等. 推进剂液体获取装置中多孔筛网的阻力特性研究[J]. *低温与超导*, 2021, 49(7): 38-44, 73.
ZHU Qingchun, ZHOU Yongrui, JIANG Yuting, et al. Study on the flow resistance characteristics of porous screens for propellant liquid acquisition device[J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2021, 49(7): 38-44, 73. (in Chinese)
- [15] CHATO D J, MCQUILLEN J B, MOTIL B J, et al. CFD simulation of pressure drops in liquid acquisition device channel with sub-cooled oxygen[J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2009, 58: 146-151.
- [16] MCQUILLEN J B, CHATO D J, MOTIL B J, et al. Porous screen applied in liquid acquisition device channel and cfd simulation of flow in the channel[J]. *Journal of Porous Media*, 2012, 15(5): 429-437.
- [17] DARR S R, CAMAROTTI C F, HARTWIG J W, et al. Hydrodynamic model of screen channel liquid acquisition devices for in-space cryogenic propellant management[J]. *Physics of Fluids*, 2017, 29(1): 017101.
- [18] WANG Ye, WANG Zheng, CHENG Xin, et al. Pressure-driven phase separation based on modified porous mesh for liquid management in microgravity[J]. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2022, 38(9): 2919-2927.
- [19] 王峥, 王晔, 金鑫, 等. 网幕通道式液体获取装置的入口速度分布特性研究[J]. *真空与低温*, 2022, 28(5): 556-564.
WANG Zheng, WANG Ye, JIN Xin, et al. Investigation on the velocity distribution in screen-channel liquid acquisition device[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2022, 28(5): 556-564. (in Chinese)
- [20] HARTWIG J W, DARR S R, MEYERHOFER P, et al. EDU liquid acquisition device outflow tests in liquid hydrogen: experiments and analytical modeling[J]. *Cryogenics*, 2017, 87: 85-95.
- [21] HARTWIG J W, CHATO D J, MCQUILLEN J B, et al. Screen channel liquid acquisition device outflow tests in liquid hydrogen[J]. *Cryogenics*, 2014, 64: 295-306.
- [22] 刘畅, 肖泽宁, 胡声超, 等. 筛网通道液体获取装置压降模型及试验研究[J]. *导弹与航天运载技术*, 2021(1): 56-60.
LIU Chang, XIAO Zening, HU Shengchao, et al. Study on pressure drop model of screen channel liquid acquisition device[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2021(1): 56-60. (in Chinese)
- [23] HARTWIG J, MANN J A. Bubble point pressures of binary methanol/water mixtures in fine-mesh screens[J]. *AIChE Journal*, 2014, 60(2): 730-739.

(编辑: 张 雪)