增压气体温度对网幕通道式液体获取装置低温出流性能的影响研究

王云龙[1]，马原[1,2]，张荣达[1]，王康[1]，厉彦忠[1]
（1. 西安交通大学能源与动力工程学院，710049，西安；
2. 西安交通大学深低温技术与装备教育部重点实验室，710049，西安）

摘要：为揭示增压气体温度对器件级网幕通道式液体获取装置(SCLAD)低温出流性能的作用机制，基于透明玻璃真空杜瓦搭建了低温流体可视化实验系统，以液氮为工质，对配备两种规格荷兰斜纹编织(DTW)网幕(DTW200×1 400 与 DTW325×2 300)的 SCLAD 样件，开展了冷/常温氮气增压下的逆重力出流实验。结果表明：在冷/常温氮气增压下，当网幕局部暴露于气相的两相环境时，SCLAD 可以克服重力约束实现稳定的单相液体获取；在常温氮气增压下，剧烈热交换导致暴露网幕表面发生持续的蒸发-芯吸润湿循环，相分离稳定性显著下降，失效液位高度大幅增加；冷氮气工况的失效高度受穿透压损主导，随压力升高而增加，常温低压工况则由热扰动主导，低流速延长了增压气体在网幕表面的热作用时间，致使装置提前失效；相同增压压力下，常温氮气增压因界面波动与热损失，液体获取速率较冷氮气下降了 45.4%～68.6%；随着网幕编织密度增大，液体获取速率减小，冷氮气增压时相分离能力随之增强，而常温氮气增压时则因热交换时间延长而减弱。

关键词：液体获取装置；网幕通道；增压气体温度；出流性能；相分离
中图分类号：V19 **文献标志码**：A
DOI：10.7652/xjtuxb202611021 **文章编号**：0253-987X(2026)11-0236-09

Study on the Influence of Pressurant Gas Temperature on the Cryogenic Outflow Performance of Screen Channel Liquid Acquisition Devices

WANG Yunlong[1], MA Yuan[1,2], ZHANG Rongda[1], WANG Kang[1], LI Yanzhong[1]
(1. Department of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. MOE Key Laboratory of Cryogenic Technology and Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To reveal the underlying mechanism by which pressurant gas temperature affects the cryogenic outflow performance of device-level screen channel liquid acquisition devices (SCLADs), a cryogenic fluid visualization experimental system was built using a transparent glass vacuum Dewar. With liquid nitrogen as the working fluid, anti-gravity outflow experiments under cold and ambient-temperature nitrogen pressurization were conducted on SCLAD prototypes equipped with two types of Dutch twill weave screens (DTW200×1 400 and DTW325×2 300). The results show that under both cold and ambient temperature nitrogen pressurization, the SCLAD can overcome gravity constraints to achieve stable single-phase liquid acquisition in a two-phase environment where the

收稿日期：2026-03-16。 作者简介：王云龙(2001—)，男，硕士生；马原(通信作者)，女，副教授，博士生导师。 基金项目：国家自然科学基金资助项目(52476016)。
网络出版时间：2026-04-21 网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20260421.1430.005

screen is partially exposed to the gas phase. Under ambient-temperature nitrogen pressurization, intense heat exchange causes continuous evaporation-wicking-rewetting cycles on the exposed screen surface, significantly reducing phase separation stability and greatly increasing the failure liquid level. The failure height under cold nitrogen conditions is dominated by breakthrough pressure drop and increases with rising pressure. In contrast, ambient-temperature and low-pressure conditions are dominated by thermal disturbance; the low flow rate prolongs the thermal exposure time of the pressurant gas on the screen surface, leading to premature failure of the device. At the same pressurization level, the liquid acquisition rate under ambient-temperature nitrogen pressurization decreases by 45.4% to 68.6% compared to that under cold nitrogen due to interface fluctuations and heat losses. As the screen weave density increases, the liquid acquisition rate decreases. The phase separation capacity is enhanced under cold nitrogen pressurization, whereas it is weakened under ambient temperature nitrogen pressurization due to the prolonged heat exchange time.

Keywords: liquid acquisition device; screen channel; pressurant gas temperature; outflow performance; phase separation

液氢、液甲烷等低温推进剂因具有高比冲、无毒、无污染等优势，在可重复使用运载火箭与深空探测任务中展现出广阔的应用前景[1]。然而，在空间微重力环境中，表面张力占据主导地位，推进剂贮箱内易形成液相包裹气相的形态[2]。同时，在姿轨机动、外部扰动或空间热环境引起的相变作用下，贮箱内气液相分布趋于紊乱[3]，难以满足发动机对单相液体推进剂的稳定供应需求。网幕通道式液体获取装置(SCLAD)依靠毛细力和表面张力作用，可在较强加速度扰动条件下，长时间稳定获取较高流量的单相液体，且无需额外消耗能量，因而被视为低温流体在轨气液管理最具潜力的解决方案[4]。

SCLAD 主要由若干紧贴贮箱内壁布置的集液通道构成。各通道朝向贮箱内壁的一侧覆有 μm 级金属丝编织的多孔网幕，网幕与贮箱内壁之间保持一定间隙[5]。该间隙结构可在扰动条件下贮存液体推进剂，起到存留液体与缓冲作用。在工作时，增压驱使液体通过网幕进入集液通道，而气体则被网幕表面润湿液膜产生的毛细力阻隔，从而实现有效的气液分离。

网幕的气液分离能力主要由两个关键参数表征：泡破压差(Δp_{BP})和穿透压损(Δp_{FTS})。泡破压差是指气体无法穿透润湿网幕所能承受的最大压差，反映了网幕实现气液分离的极限能力[6]。穿透压损则表示液体穿过网幕时所产生的流动压降。研究人员已建立了二者的经验公式[7-8]，并进行了广泛的常温[9-10]和低温[11-13]实验研究。研究表明：泡破压差不仅取决于网幕结构参数和液体物性，还受气体增压速率[14]及增压气体温度[15]的影响；而穿透压损主要与网幕规格、液体物性及流速有关。

针对单根集液通道的出流过程，已有研究建立了较为完善的理论和模型。Darr 等[16]揭示了泡破压差与穿透压损对通道出流性能的矛盾影响，提出了网幕选取的指导方案。后续，Hartwig 等[17]和 Camarotti 等[18]开发了集液通道一维和二维出流模型。Wang 等[19]通过实验发现流体沿网幕通道流动的不均匀性，进而提出一种三维流场预测模型。Chato 等[20-21]通过三维仿真，分析了不同布置方向下集液通道内的沿程压力及流速分布。张悦等[22]通过实验研究了集液通道沿程压力及穿透压损的变化规律，并进一步结合壁面结构分析了集液通道内流体行为[23]，给出了通道设计建议。Ma 等[24]建立了全尺寸网幕通道式贮箱模型，探讨了微重力扰动条件对贮箱出流性能的影响。然而，上述研究均针对通道被液体完全浸没(全液出流)的理想工况，对于 SCLAD 在实际运行中可能出现的局部网幕暴露情形，其出流性能与气液分离能力的影响机制有待研究。

已有学者对集液通道相分离失效的临界条件与取液性能进行了初步探索。王晔等[25]研究了不同规格网幕的相分离失效临界压力和最大取液流量，但其结论基于固定的网幕暴露高度，未涵盖完整的动态出流过程。Hartwig 等[26]在液氢工质的倒置出流实验中发现，相分离失效主要受液体温度影响，液体过冷可提高装置性能。随后，其团队[27]在液氢贮箱内对 SCLAD 进行了出流测试，进一步确认单相取液失败主要受液体和增压气体温度影响，但该研究缺乏对出流过程的可视化观测。此外，Bisht 等[28]通过飞行实验、Shukla 等[29]通过落塔实验，均对集液通道的相分离和失效点进行了测试，然而这两项工作均局限于单根集液通道，且是在常温液体工质下完成的。

为探究适用于低温推进剂的器件级 SCLAD 在实际工况下的相分离与出流性能，本文设计并制造了一种典型的四通道半开放式 SCLAD 样品。基于透明玻璃真空杜瓦搭建实验系统，以液氮(LN_2)为工质，对配备两种规格荷兰斜纹编织(DTW)网幕的样品开展了不同温度氮气(GN_2)增压条件下的逆重力出流实验，观测并记录了在冷/常温氮气增压下单相液体稳定获取与获取失败的全过程。本文工作可为深入理解低温环境下器件级 SCLAD 的工作机制及增压气体温度对其性能的影响规律提供实验依据，进而推动 SCLAD 在低温推进剂管理系统中的工程应用。

1 低温流体传输与相分离测试系统

1.1 实验装置概述

低温流体传输与相分离测试系统实物图如图 1 所示，该系统由 5 个子系统构成，分别是实验杜瓦系统、真空泵送系统、工质供应系统、图像采集系统及数据采集系统。该系统可实现低温液氮流动和相分离过程同步可视化。

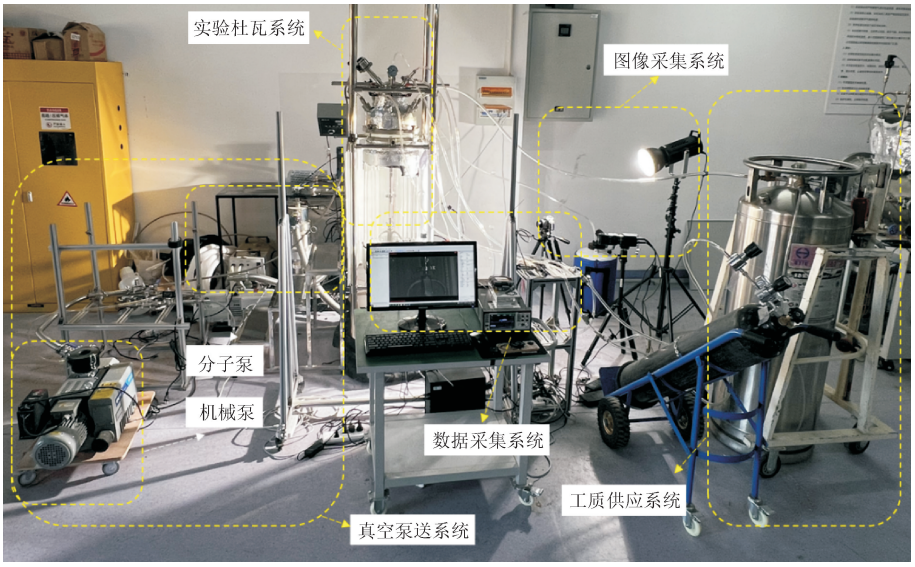
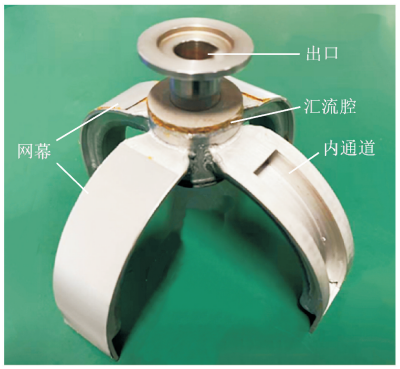


图 1 低温流体传输与相分离测试系统实物图

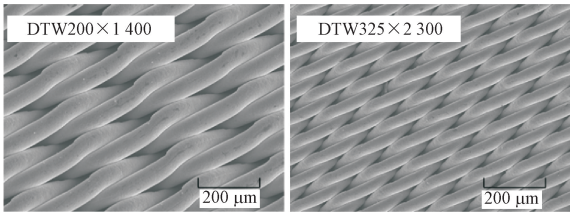
Fig. 1 Cryogenic fluid transmission and phase separation test system diagram

实验核心装置为一套四通道、半开放式式液体获取装置，整体采用不锈钢制造，具体结构如图 2(a) 所示。样机中央设有圆柱形汇流腔，用于汇集各通道液体，其内径为 35 mm，高 27 mm。4 个弧形通道周向均匀布置，半径为 60 mm，流道横截面宽 16 mm、深 10 mm。通道外侧开放并设有焊接边，用于粘贴金属网幕，其余三侧为封闭金属壁，以此构成确定的流动路径。出口管内径为16 mm，通过 KF 法兰与上端透明玻璃管连接，便于流动观测。

为直接观测液位下降时网幕暴露于气相环境下的界面行为，实验将通道倒置(即出口位于通道上方)，网幕通过低温胶粘贴于通道焊接边。由于编织密度差异会影响网幕泡破压力与穿透压损，因此本文选择两种常用于低温推进剂的代表性 DTW 网幕：编制密度较粗的 DTW200×1 400 与编织密度较细的 DTW325×2 300[16]。网幕扫描电镜图像见图 2(b)，详细规格参数见表 1。



(a)SCLAD 测试样机实物图



(b)网幕扫描电镜图

图 2 SCLAD 测试样机及网幕扫描电镜图

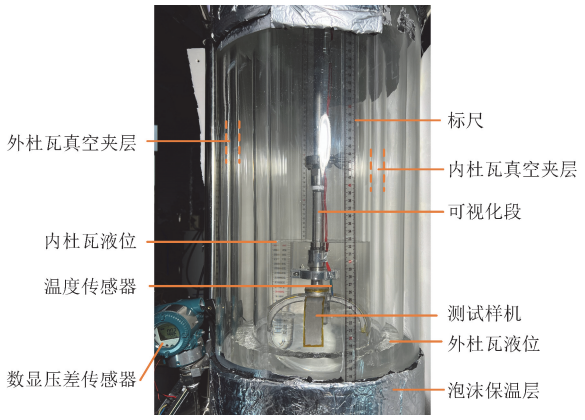
Fig. 2 SCLAD test sample and SEM image of the mesh screen

表 1　网幕结构参数

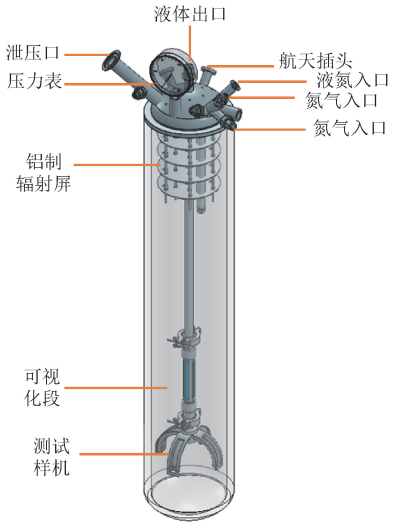
Table 1 Structural information of the tested screens

参数	DTW200×1 400	DTW325×2 300
经丝直径 d_w/μm	50	35
纬丝直径 d_s/μm	32	25
厚度 δ/μm	114	85
网幕有效面积 S/mm^2	16×81	16×81

实验在透明真空杜瓦内进行，其采用高硼硅玻璃制成的双层嵌套结构，如图 3(a)所示。内外杜瓦的真空夹套形成真空绝热层；同时，在内杜瓦容器上方安装了 5 层铝制辐射屏，以进一步抑制顶部的漏热。外层杜瓦腔在实验时灌注液氮，作为内杜瓦的主动冷屏，在保证全透明观测视野的同时实现良好绝热。内杜瓦内径为 168 mm、高度为 1.02 m、总容积约 23.4 L。测试样机通过 KF 法兰与一段内径 12 mm、长100 mm 的高硼硅玻璃可视化管相连，该管另一端则与焊接在内杜瓦顶法兰上的 10 mm 出口管相连，可视化管可用于观察相分离失效，如图 3(b)所示。



(a)实验杜瓦图



(b)内杜瓦及测试样机图

图 3　实验杜瓦系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental Dewar system

1.2　实验条件与测量方法

真空泵送系统由机械泵(双塔真空 STP-24B，抽气速率 6 L/s，极限压力 4×10^{-2} Pa)与分子泵(中科科仪 FF-160/620，抽气速率 600 L/s，极限压力 6×10^{-6} Pa) 组成两级泵组，用于维持杜瓦夹层的高真空绝热环境，确保绝热性能。此外，内外杜瓦内部的气氛置换亦通过机械泵完成。

工质供应系统独立配置，液氮由 175 L 储罐提供，冷氮气来自液氮罐内液氮的气化，温度 150 K；常温氮气则由 40 L 高压气瓶供给，温度 285 K，用于建立液氮实验环境、系统换气与增压控制。

数据采集系统是本实验获取可靠定量结果的关键。温度测量采用四线制 PT100 铂电阻传感器(LakeShore PT-111，精度±0.25 K)，布置于网幕附近，用于监测测试样品的局部热环境。压力通过两处传感器测量：内杜瓦气体入口处设置高精度数字压力传感器(横河 EJA50E，量程 0～0.2 MPa，精度 0.1%)，用于精确控制增压压力；外杜瓦气体出口处设置压力传感器(Sinomeasure，量程 0～0.2 MPa，精度 0.5 级)，用于监测系统背压。所有传感器信号由 KEITHLEY DAQ6510 数据采集仪同步记录，采样频率可调，通过计算机实时显示与存储。

由于玻璃杜瓦承压能力限制，为避免管路中安装传统流量计引入的额外流阻，实验采用间接流量测量方法：通过外杜瓦壁面垂直敷设的高精度标尺(量程 0～100 cm，分度 1 mm，精度±0.15 mm)人工读取液位随时间的变化，结合贮箱内径截面积，计算瞬时出流速率。图像采集由高速相机(千眼狼 M230M-256G，焦距 105 mm，最大光圈 2.8，采样率 1 000 帧/s)与全景相机(Nikon Zfc，Z DX 镜头，焦距16～50 mm，最大光圈 3.5～6.3，防抖)协同完成。高速相机主要用于捕捉网幕表面和可视化玻璃管内的瞬间气液相态，而全景相机负责监测实验杜瓦内部液氮液位的变化，并协助跟踪实验的整体进展。

1.3　实验流程及实验原理

为系统研究 SCLAD 在冷/常温氮气增压下的相分离失效过程，实验按以下流程开展：首先对样机及系统进行气密性检测，确保无泄漏；随后启动真空泵组将杜瓦夹层抽至高真空并维持，以隔绝环境漏热；接着通过多次“抽空-吹扫”循环置换腔内气氛，避免可凝气体干扰；完成上述准备后，先后向外层和内层杜瓦加注液氮至预设液位，静置约 30 min 使系统充分预冷；之后关闭泄压口，向内杜瓦气相区通入设定温度的氮气逐步增压驱动排液，通过透明玻璃管

实时观察流型。当首次观测到气泡进入出流管时判定为相分离失效点;单次测试后补充液氮至初始液位,调节压力重复测试以获取失效临界高度随压力的变化规律;实验结束后将残余液氮压排至回收罐。

实验系统取液工作原理基于压差驱动与毛细液封机制:在压差作用下,贮箱内液体穿过网幕进入获取通道,并在通道内压力梯度的推动下流向出口,完成取液出流。

为评估网幕在压差驱动下的液体供应能力,本实验测量了其液体获取速率,原理如图 4 所示。在密闭的杜瓦容器中,通过对气枕区施加一稳定驱动压力 Δp,在网幕两侧形成驱动压差,使液氮经由网幕进入样机并排出。当系统流动达到稳定状态后,测量液氮液面下降预定高度 Δh 所经历的时间间隔 Δt,即可计算出对应增压压力下的液体获取速率 G,公式为

$$G=\frac{\rho\pi R^2\Delta h}{S\Delta t} \tag{1}$$

式中:ρ 为液体密度;R 为内杜瓦半径 。

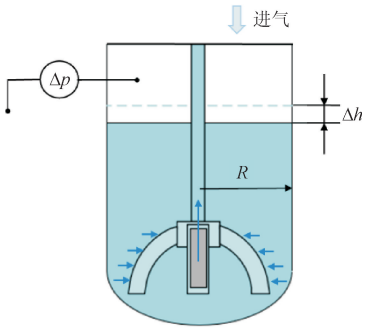


图 4 液体获取速率测量示意图

Fig. 4 Flow rate measurement schematic diagram

随着排液过程的进行,贮箱液位持续下降。当液位低于通道部分网幕区域时,网幕通道顶端总压损 Δp_{L}[25] 为

$$\Delta p_{\mathrm{L}}=\rho g h_{\mathrm{ex}}+\Delta p_{\mathrm{FTS}}+p_{\mathrm{f}}+p_{\mathrm{d}}+p_0 \tag{2}$$

式中:h_{ex} 表示网幕暴露于气相中的高度;p_{f} 指流体流经网幕通道产生的黏性压损;p_{d} 为伯努利效应引起的动压降;p_0 代表其他因素导致的压力损失;Δp_{FTS} 为穿透压损,公式[8] 为

$$\Delta p_{\mathrm{FTS}}=C_{\mathrm{l}}\mu v+C_{\mathrm{t}}\rho v^2 \tag{3}$$

其中,C_{l} 和 C_{t} 分别为黏性阻力系数和惯性阻力系数,由网幕自身结构决定,v 为流体穿过网幕的速度,μ 为流体黏度。第一项为黏性阻力项,第二项为惯性阻力项。该公式反映了穿透压损随流速增大而非线性增加的特性,是分析网幕出流性能的重要理论基础。

当 $\Delta p_{\mathrm{L}}<\Delta p_{\mathrm{BP}}$ 时,暴露于气相中的网幕仍能凭借毛细力维持局部液封,继续实现单相液体输出。当液位下降至临界高度时,作用于网幕两侧的气-液压差超过其泡破压力,气体突破网幕进入通道内部,此时气液分离失效,出流进入两相混合状态,如图 5 所示,图中 h_{sub} 为网幕淹没在液相中的高度,此时从可视化段可观察到第一个气泡出现。

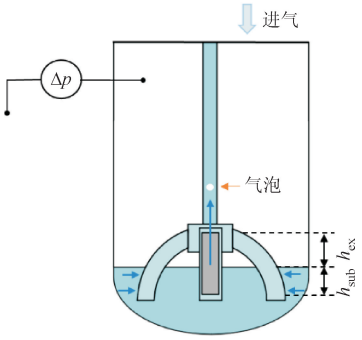


图 5 相分离失效原理图

Fig. 5 Separation failure schematic diagram

2 结果与讨论

2.1 泡破压差测试

为验证实验系统可靠性并确认网幕样品完好,在出流实验前,首先对静置于液氮中的两种网幕规格 SCLAD 进行了泡破压差测量。方法为:通过出口管向完全浸没的 SCLAD 内缓慢通入冷氮气增压,直至网幕表面首次出现连续气泡,记录此时增压压力及气泡产生位置与液面的垂直距离,计算泡破压差。

泡破压差实验结果与基于液氮表面张力及网幕几何参数的理论预测值[7] 对比如图 6 所示。DTW200×1 400 网幕 3 次测量的平均泡破压差为 1 737.93 Pa,与理论值的平均误差为 5.83%,最大误差为 9.24%;DTW325×2 300 网幕的平均泡破

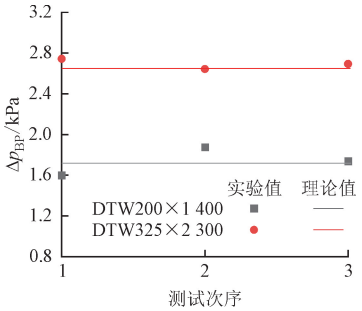


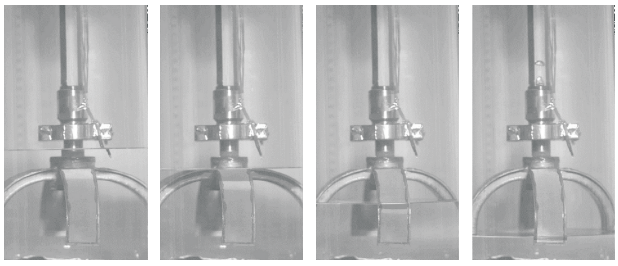
图 6 泡破压差理论预测值与实验测量值的对比

Fig. 6 Comparison between theoretical predicted values and experimental measured values of bubble pressure

压差为2 693.52 Pa，平均误差仅 1.82%，最大误差为 3.58%。测试结果表明，两组数据与理论预期吻合良好，误差均在可接受范围内，证明所用网幕无结构缺陷，且实验系统与测量装置工作正常，数据可靠，可用于后续出流实验。

2.2　不同增压温度下 SCLAD 出流过程

以冷氮气增压、增压压力 9.41 kPa、粘贴 DTW200×1 400 网幕为例，图 7 展示了液氮通过 SCLAD 样机出流的全过程，其中 t_0 为图 7(a)所示液位高度的时刻。当液位较高、装置处于全浸没状态时，如图 7(a)所示，仅单相液体通过网幕进入集液通道，出流管中始终保持单相液体流动。当液位逐渐下降至图 7(b)所示位置时，通道表面网幕即将暴露于气相环境。随着液位进一步降低，部分通道暴露于气相中，SCLAD 的工作环境由单相液态转变为气液两相，如图 7(c)所示。此阶段出流管仍为单相流动，表明暴露部分的网幕有效阻隔了气体侵入，液体通过仍被浸没的网幕区域持续进入通道，实现了单相液体的连续采集与输送。直至液位降至图 7(d)所示位置，玻璃管内开始出现气泡，表明气相已穿透网幕进入 SCLAD，标志单相液体采集失败。该现象是液位降低、网幕暴露高度增加，导致总压损超过网幕泡破压力所致，其关系与式(2)描述一致。

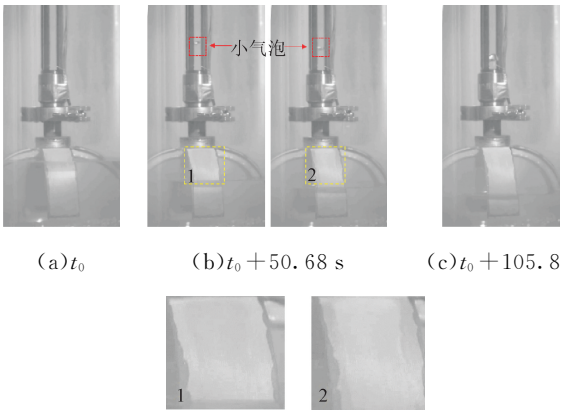


(a)t_0　(b)t_0+19 s　(c)t_0+45.1 s　(d)t_0+75.6 s

图 7　冷氮气增压下出流及相分离失效过程

Fig. 7　Outflow and phase separation failure process under cold nitrogen pressure

在增压压力为 8.61 kPa 时，网幕 DTW200×1 400 的常温氮气出流及相分离失效过程见图 8，可以观察到与冷氮气增压显著不同的相分离行为。当液位下降使网幕暴露于气相环境时，较高温度的氮气促使网幕表面液氮迅速蒸发；蒸发后，网幕凭借其自身较强的毛细力重新芯吸液氮进行润湿，高速相机图片上出现明显的明暗变化，如图 8(b)和图 8(d)中的图例 1、2 所示，该蒸发-芯吸润湿过程循环发生，仍能保持良好的气液分离能力。随着液位继续下降至图 8(b)位置，可视化段可观察到微小气泡，表明局部气液分离开始失效；但随后网幕的湿润再次暂时阻隔气体，直至液位降至图 8(d)时，较大气泡最终突破网幕进入通道，预示装置单相液体获取的彻底失败。相比冷氮气增压，相同增压条件下，常温氮气增压下的相分离失效发生位置明显较高，即更早地发生了失效。



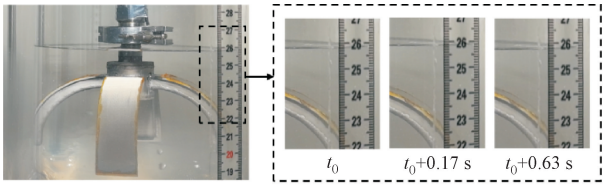
(a)t_0　(b)t_0+50.68 s　(c)t_0+105.8 s

(d)t_0+137.32 s

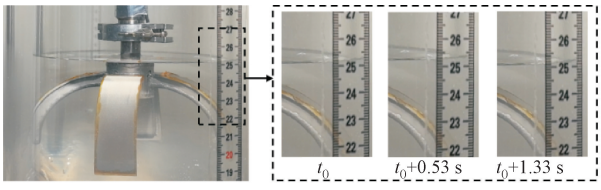
图 8　常温氮气增压下出流及相分离失效过程

Fig. 8　Outflow and phase separation failure process under normal temperature nitrogen

当常温氮气增压时，气液界面还伴随有显著波动。这是由于较高温度的氮气进入杜瓦后，与低温液氮发生强烈热交换，在界面附近引发持续的蒸发与冷凝过程。这种非平衡相变导致界面失稳并诱发波动，且波动幅度随增压压力的增大而增加，如图 9 所示。



(a)增压压力 8.61 kPa，DTW200×1 400 网幕



(b)增压压力 14.48 kPa，DTW200×1 400 网幕

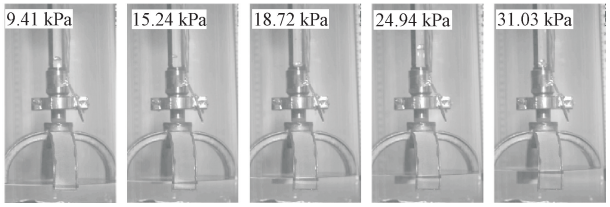
图 9　出流过程气液界面波动示意图

Fig. 9　Diagram of the gas-liquid interface during the outflow process

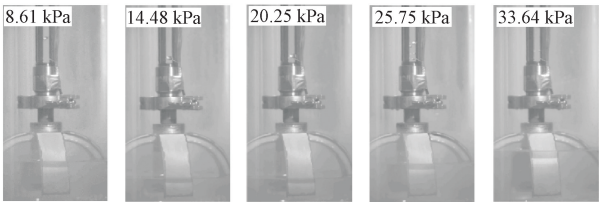
2.3　相分离失效临界液位高度

当采用冷氮气增压时，对于 DTW200×1 400

网幕，相分离失效的临界高度随增压压力增大而逐渐升高，如图 10(a)所示。这是由于在较高压力下，液体流速增大导致穿透压损上升，为维持总压损低于泡破压力，网幕允许的暴露高度相应减小，即临界失效位置向通道出口方向上移。然而，在常温氮气增压条件下，网幕的相分离高度变化偏离了上述规律。如图 10(b)所示，当增压压力低于 20 kPa 时，相分离失效高度随压力减小反而增大。这一反常现象可能归因于低压下液体流速较低，网幕暴露于常温氮气的时间延长，引发更显著的热扰动。网幕表面交替发生液体蒸发与毛细芯吸过程，使液膜稳定性下降，更易发生泡破，导致装置单相液体获取提前失效。



(a)冷氮气增压，DTW200×1 400 网幕



(b)常温氮气增压，DTW200×1 400 网幕

图 10 不同条件下相分离失效图

Fig. 10 Diagram of phase separation failure under different conditions

为进一步对比两种网幕在不同增压气体温度下的相分离性能，提取其失效液位高度随增压压力的变化规律，如图 11 所示。在相同冷氮气增压条件下，DTW325×2 300 网幕表现出更优的相分离能力，其失效临界高度低于 DTW200×1 400 网幕，即使在较高压力(约 20 kPa)下，失效点仍位于通道底部附近。这主要得益于其更精细的网孔结构所带来的更高泡破压差，使其在相同穿透压损下能耐受更大的暴露高度。然而在常温氮气增压条件下，这一规律发生逆转：DTW325×2 300 网幕的相分离失效高度反而高于 DTW200×1 400。这是由于细网幕流动阻力较大，导致出流速率较低，使得暴露于气相的网幕区域与常温氮气的热交换时间延长，热扰动加剧，从而诱发网幕提前失效。

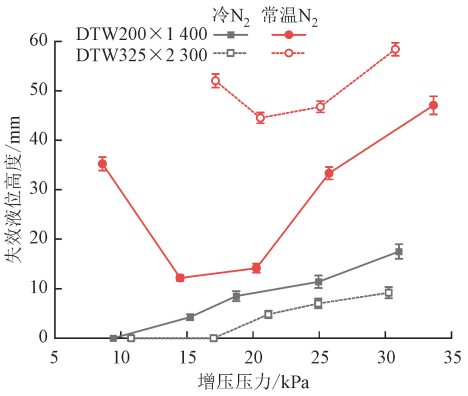


图 11 不同条件下相分离失效液位高度

Fig. 11 Liquid level height for phase separation failure under different conditions

2.4 液体获取速率

两种网幕通道在不同增压温度与压力下的液体获取速率如图 12 所示。对于两种网幕，液体获取速率均随增压压力升高而增加；在相同压力下，编织更密的网幕(DTW325×2 300)因其更高的流动阻力，获取速率较低，与文献[22]相符。然而，在相同增压条件下，常温氮气增压的液体获取速率较冷氮气增压下降 45.4%～68.6%。实验表明，常温氮气增压时不仅引起气液界面发生波动，也会导致液面下降速率减缓。该现象主要源于气液界面的非平衡相变：它不仅直接导致界面失稳、诱发波动，还通过升高气相区温度降低了有效驱动压差，从而显著制约液体获取速率。

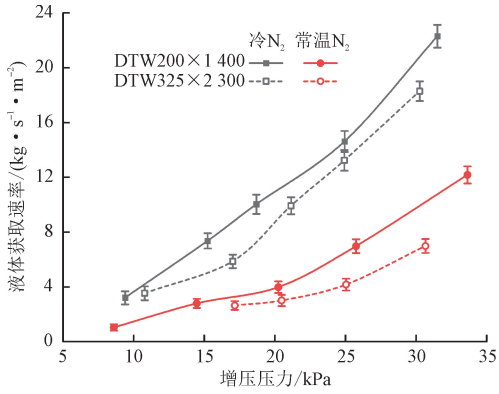


图 12 不同温度增压气体下液体获取速率

Fig. 12 Rate of liquid acquisition under different temperature and pressurized gas conditions

3 结论与展望

(1)SCLAD 在冷/常温氮气增压条件下，即使网幕部分暴露于气相区，仍可实现持续、稳定的单相

液体获取，验证了其在低温两相环境下实现气液分离与单相输运的可行性。但在常温氮气增压时，网幕表面因剧烈热交换发生反复的蒸发-芯吸过程，导致相分离失效液位高度显著增加，稳定性下降。

(2)冷与常温氮气增压导致相分离失效液位高度变化的机制迥异。冷氮气工况下，穿透压损占主导：随增压压力增大，液体流速升高，穿透压损增加，使得网幕允许的暴露高度减小，表现为失效液位高度随压力升高而增大。此外，网幕编织密度越高，其失效液位高度越低，气液分离能力越优。

(3)常温氮气增压下，失效液位高度随压力变化呈现先降低后升高的趋势。低压时，流速较低导致网幕暴露于热氮气的时间延长，热力失稳成为主导因素，使网幕在较高液位下即提前失效；随压力升高，流速加快，穿透压损占主导，失效液位高度转而随压力升高而增大。此外，网幕编织密度越高，流动阻力越大，出流速率越低，热交换时间延长，导致相分离失效液位高度显著增高。

(4)在相同增压压力下，常温氮气增压会导致界面波动与热交换损失，液体获取速率较冷氮气下降了 45.4%～68.6%，严重制约了系统的出流效率。

本文工作的主要局限性在于，受限于玻璃杜瓦的承压能力，实验压力范围并未覆盖航天实际工况，且实验测试网幕种类、工况范围有限。后续研究将基于本工作所获得的结果规律，设计开展更宽压力和温度范围、更多网幕种类的拓展实验，从而建立综合考虑温度、压力、网幕参数耦合的相分离失效定量模型。

参考文献：

[1] 马原，厉彦忠，王磊，等. 低温推进剂在轨加注技术与方案研究综述 [J]. 宇航学报，2016，37(3)：245-252.
Ma Yuan，Li Yanzhong，Wang Lei，et al. Review on on-orbit refueling techniques and schemes of cryogenic propellants [J]. Journal of Astronautics，2016，37(3)：245-252.

[2] 王云龙，马原，张荣达，等. 网幕通道式贮箱在轨重定位过程的蓄流稳定性研究 [J]. 西安交通大学学报，2025，59(8)：42-52.
Wang Yunlong，Ma Yuan，Zhang Rongda，et al. Study on the liquid retention stability during on-orbit reorientation process of screen channel tank [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University，2025，59(8)：42-52.

[3] 王磊，厉彦忠，张少华，等. 低温推进剂空间管理技术研究进展与展望 [J]. 宇航学报，2020，41(7)：978-988.
Wang Lei，Li Yanzhong，Zhang Shaohua，et al. Research progress and outlooks of cryogenic propellant space management technologies [J]. Journal of Astronautics，2020，41(7)：978-988.

[4] 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.

[5] Ma Yuan，Li Yanzhong，Wang Lei，et al. Investigation on isothermal wicking performance within metallic weaves for screen channel liquid acquisition devices (LADs) [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer，2019，135：392-402.

[6] Yaegers D A，Hartwig J W，Camarotti C，et al. Liquid nitrogen wicking rate experiments for screen channel liquid acquisition devices [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer，2023，145 (Part B)：106851.

[7] Hartwig J W，Mann J A Jr. A predictive bubble point pressure model for porous liquid acquisition device screens [J]. Journal of Porous Media，2014，17(7)：587-600.

[8] Armour J C，Cannon J N. Fluid flow through woven screens [J]. AIChE Journal，1968，14(3)：415-420.

[9] 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.

[10] 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.

[11] Hartwig J，Chato D，McQuillen J. Screen channel LAD bubble point tests in liquid hydrogen [J]. International Journal of Hydrogen Energy，2014，39(2)：853-861.

[12] Hartwig J W. Screen channel liquid acquisition device bubble point tests in liquid nitrogen [J]. Cryogenics，2016，74：95-105.

[13] 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.
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.

[14] 马原，孙靖阳，厉彦忠，等. 增压速率对多孔金属筛

网泡破压力影响的实验研究 [J]. 西安交通大学学报，2021，55(11)：192-198.
Ma Yuan，Sun Jingyang，Li Yanzhong，et al. Experimental study on the effects of pressurization rate on bubble point pressure of porous metallic screens [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University，2021，55(11)：192-198.

[15] Savas A J，Hartwig J W，Moder J P. Thermal analysis of a cryogenic liquid acquisition device under autogenous and non-condensable pressurization schemes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer，2014，74：403-413.

[16] Darr S，Hartwig J. Optimal liquid acquisition device screen weave for a liquid hydrogen fuel depot [J]. International Journal of Hydrogen Energy，2014，39(9)：4356-4366.

[17] Hartwig J W，Darr S R，McQuillen J B，et al. A steady state pressure drop model for screen channel liquid acquisition devices [J]. Cryogenics，2014，64：260-271.

[18] Camarotti C F，Hartwig J W，Wang H，et al. A transient hydrodynamic model of screen channel liquid acquisition devices for in-space cryogenic propellant management [J]. Physics of Fluids，2022，34(11)：117111.

[19] Wang Zheng，Yang Guang，Wang Ye，et al. A three-dimensional flow model of screen channel liquid acquisition devices for propellant management in microgravity [J]. NPJ Microgravity，2022，8(1)：28.

[20] 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 International Journal of Physical and Mathematical Sciences，2009，3(10)：782-787.

[21] 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.

[22] 张悦，马原，王云龙，等. 网幕通道式液体获取装置水平出流性能研究 [J]. 西安交通大学学报，2024，58(11)：196-204.
Zhang Yue，Ma Yuan，Wang Yunlong，et al. Research on horizontal outflow performance of screen channel liquid acquisition devices [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University，2024，58(11)：196-204.

[23] 张悦，马原，王云龙，等. 通道布置形式对网幕通道式液体获取装置取液性能的影响研究 [J]. 西安交通大学学报，2025，59(7)：56-65.
Zhang Yue，Ma Yuan，Wang Yunlong，et al. Study on the effect of channel configuration on the liquid acquisition performance of screen channel liquid acquisition devices [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University，2025，59(7)：56-65.

[24] Ma Yuan，Wang Yunlong，Zhang Rongda，et al. Numerical study on reorientation and outflow characteristics of a liquid hydrogen tank equipped with screen channel liquid acquisition device [J]. International Journal of Hydrogen Energy，2025，191：152239.

[25] 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)：246-253.
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)：246-253.

[26] 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.

[27] 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.

[28] Bisht K S，Dreyer M E. Phase separation in porous media integrated capillary channels [J]. Microgravity Science and Technology，2020，32(6)：1001-1018.

[29] Shukla P，Dreyer M E. Phase separation through screen channel liquid acquisition devices in microgravity [J]. Microgravity Science and Technology，2024，36(7)：1-23.

（编辑 亢列梅）