

网幕通道式液体获取装置水平出流性能研究

张悦, 马原, 王云龙, 厉彦忠, 王磊, 谢福寿

(西安交通大学制冷与低温工程系, 710049, 西安)

摘要: 为研究网幕通道式液体获取装置水平出流性能,以矩形多孔网幕通道为对象,构建基于体积流量边界的水平出流模型,并搭建实验平台,对网幕阻力系数与出流过程网幕两侧压差分布进行测试。研究了水平出流过程网幕穿透压损与局部流量等参数的沿程变化规律,对比分析了网幕选型与通道尺寸对装置出流性能的影响。结果表明:模型预测结果与文中实验数据吻合良好,平均相对误差为3.5%;网幕穿透压损与局部取液量均沿流动方向逐渐增大,且不均匀性随流量增大而加剧,通道出口处网幕穿透压损取得最大值,具有最大的泡破风险;相同流量下,细孔网幕通道出流均匀性更高,针对低流量与高流量工况,分别采用粗孔和细孔网幕时泡破风险更低;通道质量一定时,减小长宽比,有利于穿透压损和流量均匀分布,同等质量增量下增加通道宽度更有利于降低穿透压损。

关键词: 阻力系数;液体获取装置;多孔网幕;出流性能

中图分类号: V19 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202411019 **文章编号:** 0253-987X(2024)11-0196-10

Research on Horizontal Outflow Performance of Screen Channel Liquid Acquisition Devices

ZHANG Yue, MA Yuan, WANG Yunlong, LI Yanzhong, WANG Lei, XIE Fushou

(Department of Refrigeration and Cryogenics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To investigate the horizontal outflow performance of the screen channel liquid acquisition device (LAD), a horizontal outflow model based on volumetric flow rate boundary conditions is developed using a rectangular LAD. An experimental platform is set up to measure the screen resistance coefficient and the pressure difference distribution on both sides of the screen during the outflow process. The variation patterns along the flow path of parameters such as the flow-through-screen (FTS) pressure drop and local flow rate during the horizontal outflow process of the screen are explored. Furthermore, the influence of screen selection and channel dimensions on the outflow performance of the device is compared and analyzed. The findings indicate that the model's predictions align well with the experimental data presented in this paper, with an average relative error of 3.5%. The FTS pressure drop and local flow rate increase gradually along the flow direction, with the non-uniformity intensifying with increasing flow rate. The FTS pressure drop peaks at the outlet of the channel, posing the highest risk of bubble rupture. When the flow rates are the same, the fine screen channel demonstrates higher flow uniformity. Under low and high flow rate conditions, using coarse and fine screen respectively can mitigate the risk of bubble

收稿日期: 2024-03-13。 作者简介: 张悦(1999—),女,硕士生;马原(通信作者),女,副教授,硕士生导师。

基金

项目: 国家自然科学基金资助项目(52332012)。

网络出版时间: 2024-06-12

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20240612.1417.002>

rupture. When the channel mass is constant, reducing the aspect ratio is conducive to reducing FTS pressure drop and achieving a more uniform flow distribution. Increasing the channel width under the same mass increment proves more effective in reducing the FTS pressure drop.

Keywords: risistance coefficient; liquid acquisition devices; porous screen; outflow performance

液氢、液氧等低温推进剂具有比冲高、推力大、无毒性等优势,在载人航天、深空探测等领域应用前景广阔^[1]。但是,低温推进剂低沸点、低表面张力系数的特性为其在轨管理带来巨大挑战^[2]。推进剂在轨传输加注和发动机二次点火等过程均需要稳定获取单相液体推进剂,亟需解决微重力下气液分离的难题^[3]。网幕通道式液体获取装置(LAD)能够充分利用表面张力与毛细作用,成为最有望大规模应用于低温推进剂的在轨取液^[4]。

图 1 是一种典型的网幕通道式 LAD 结构,核心部件是通道一面覆盖的多孔金属编织网幕,能够依靠毛细作用引流液体、阻隔气体。当在轨任务需要获取单相推进剂时,通过贮箱增压或使用液体泵在贮箱与通道间建立压差,驱使液体沿网幕内毛细孔隙进入通道流向出口,而气体则在网幕内液膜表面张力的作用下被隔绝在外,实现纯液相的获取。

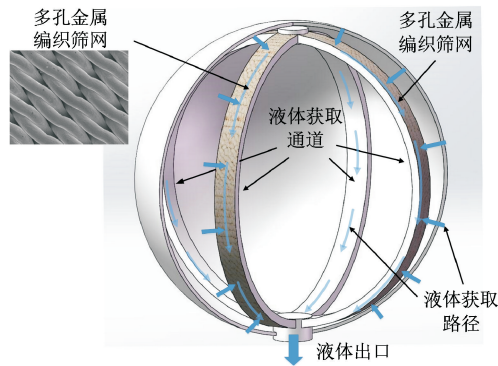


图 1 网幕通道式液体获取装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the screen channel LAD

国内外研究学者针对 LAD 的关键部件——多孔金属网幕已经开展了较为充分的研究,基本掌握了网幕内液体芯吸^[5-6]、泡破压差^[7-9]、网幕穿透压损(ΔP_{FTS})^[10-13]等方面的参数特性及影响因素。近年来,研究者们开始聚焦于网幕通道整体工作性能的系统级研究。文献[14-15]采用计算流体动力学(CFD)技术,对单通道取液过程进行了仿真计算,得到了特定工况下网幕通道出流速度、压力分布模式等数据,但由于工况参数范围有限,并未作普适性的理论分析与解释。文献[16-17]先后建立了单通道

出流过程的一维与二维数学模型,对比分析了液体穿透网幕的速度分布均匀性假设对通道出流性能的影响,并进行了以蒸馏水为工质的验证实验。NASA 格林研究中心开展了 LAD 单通道液氢出流可视化测试,实现了液氢的单相传输,但并未获得出流过程压力分布等细节数据^[18]。

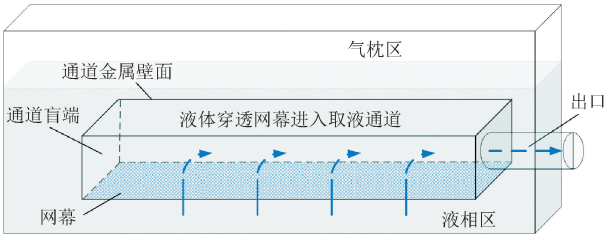
国内方面,上海交通大学通过粒子图像测速技术,获得了网幕通道垂直取液过程的流体速度分布特性,并开展了液氮温区垂直取液过程的有效性验证实验,但并未关注出流过程取液通道内外的压力分布规律^[19-20]。文献[21-23]在网幕芯吸和泡破性能的理论实验研究基础上,建立了压差驱动边界的网幕通道出流模型,重点研究了网幕浸液工况对 LAD 出流性能的影响,并提出了网幕通道结构的优化方案^[24-25],但相关结论尚缺乏实验数据的验证支持。

综上,鉴于现有研究并未充分掌握网幕通道出流过程的特性规律,本文针对 LAD 单通道结构,构建基于体积流量边界的网幕通道水平出流模型,计算预测液体出流过程通道内速度与压力沿程分布规律,并对网幕穿透压损的沿程分布开展实验测试验证。在此基础上,进一步对比分析了不同结构参数对取液性能的影响,为网幕通道式 LAD 的设计和优化提供理论支持。

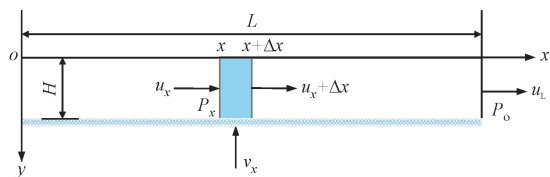
1 网幕通道水平出流模型

1.1 物理模型

图 2(a)展示了网幕通道式 LAD 单通道结构及其水平出流过程的示意。通道主体由通道出口、盲端、金属壁面和多孔网幕组成。以泵驱取液过程为例,贮箱内液体在泵的驱动下穿透网幕进入取液通道,在通道内压力梯度的作用下流向出口,实现取液出流。



(a)网幕通道式液体获取装置水平出流过程



(b)网幕通道式液体获取装置模型简图

图 2 网幕通道式液体获取装置模型图

Fig. 2 Model diagram of the screen channel LAD

以图 2(a)所示的矩形截面直通道为对象建立直角坐标系,坐标原点位于通道盲端, x 、 y 、 z 轴分别沿通道长度 L 、高度 H 和宽度 W 方向,网幕布置于 $y = H$ 处。对集液通道出流过程的数学描述做以下简化假设:

- (1)流动是稳态的,流体的物性参数不变;
- (2)宽度(即 z 轴)方向的流动可忽略不计,横向速度、压力等数据在每一个横截面均匀分布;
- (3)忽略重力作用;
- (4)忽略通道壁面的摩擦阻力影响;
- (5)网幕完全浸泡在液体中,与气体无接触。

1.2 控制方程

根据假设(2),将出流过程简化,如图 2(b)所示。取长度为 Δx 、高度为 H 的微元体,根据质量守恒定理,流出液体量等于穿透网幕由通道外部进入的液体量和上游汇入液体量之和

$$\rho u_x H = \rho v_x \Delta x = \rho u_{x+\Delta x} H \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; u_x 、 v_x 分别代表 x 位置处沿 x 轴和 $-y$ 轴方向速度。 Δt 时间内进入微元的液体,其 x 方向的动量增量应等于微元左右两侧压力的冲量之和,满足动量守恒

$$\rho v_x \Delta x u_{x+\Delta x} \Delta t + \rho u_x H (u_{x+\Delta x} - u_x) \Delta t = (P_x - P_{x+\Delta x}) H \Delta t \quad (2)$$

式中: P_x 、 $P_{x+\Delta x}$ 分别为微元体左右侧的压力, x 处压力 P_x 主要取决于贮箱压力 P_u 和网幕当地穿透压损 $\Delta P_{\text{FTS},x}$

$$P_x = P_u - \Delta P_{\text{FTS},x} \quad (3)$$

根据 Armour 和 Cannon 模型^[10],穿透压损可表示为

$$\Delta P_{\text{FTS},x} = C_1 \mu v_x + C_2 \rho v_x^2 \quad (4)$$

式中: C_1 和 C_2 分别为黏性、惯性阻力系数,由网幕结构决定; μ 为流体黏度。

联立式(1)~式(4),对 u_x 、 v_x 做泰勒展开并略去高阶项,可得二阶非线性常微分方程

$$2\rho u_x \frac{du_x}{dx} = HC_1 \mu \frac{d^2 u_x}{dx^2} + 2H^2 C_2 \rho \frac{du_x}{dx} \frac{d^2 u_x}{dx^2} \quad (5)$$

在通道的盲端(即 $x=0$ 处),由于液体无法横向穿透金属壁面,故在该处的横向速度为0,即

$$u_0 = 0 \quad (6)$$

在给定取液率 Q 时,通道盲端与出口侧分别满足取液率边界条件如下

$$\begin{cases} u_x = 0, & x = 0 \\ u_x = \frac{Q}{WH}, & x = L \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(5),采用打靶法、四阶-五阶变步长龙格库塔法和弦截法,可求解得到穿透压损沿网幕平面的分布规律以及压力、流量沿通道出流方向的分布规律。

2 实验测试系统

2.1 系统组成

为得到网幕通道出流过程中网幕穿透压损的沿程分布,验证本文建立模型的准确性,搭建了如图3所示的实验系统。系统主要由水箱、进出液管段、循环泵、待测样件、压差传感器、流量计和数据采集系统构成。水箱尺寸为 $900 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$,顶部开口便于实验样件的放置及管路元件的安装。

实验分为网幕阻力系数测定与集液通道水平出流两部分。网幕阻力系数测定实验通过测量网幕流速与 ΔP_{FTS} 的关系,拟合得到网幕阻力系数,为式(5)提供输入参数;网幕通道水平出流实验则用于获取出流过程网幕两侧压差的沿程分布。

阻力系数实验装置如图3样件1所示,实验管路上共设置有两个法兰,用于夹持网幕,法兰内径为 50 mm 。在被测网幕上游安装孔隙更细的滤网,以防实验过程中杂质堵塞被测网幕,在两侧设置引压管,测量网幕两侧压差。采用的压差传感器(美国HOFFER)量程为 8000 Pa ,精度为 0.1% 。

图3样件2展示了网幕通道水平出流装置的组成,样件主体是由3面不锈钢金属壁面与一层金属网幕构成的矩形通道,通道内尺寸为 $465 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。网幕通道正面(装配网幕的一侧)朝下水平放置在箱体内,由支撑结构固定,网幕通道与箱体底面间距约 35 mm 。网幕朝下安装一方面可以避免实验箱体中的固体杂质集聚到网幕上方造成堵塞,另一方面可以避免取液装置内部的气体附着于网幕下方,影响出流过程网幕穿透压损的测量精度。沿网幕通道背面长度方向等距开设了8个压力测点,测点间距为 60 mm 。8台压差传感器的负极通过测压管分别连接到取液装置的8个测压孔,正极则通过汇流排连接至通道外的公共压力参考点。将压差传感器沿出口方向分别编号为1~8,其中1号压差计量程为 1000 Pa ,2、3号量程为 1500 Pa ,4、5号量程为 2000 Pa ,6、7号量程为 2500 Pa ,8号

量程为 3 000 Pa,8 台压差计精度均为 0.25%。流量测量采用液体涡轮流量计(安徽聚杰公司生产),量程为 0.1~0.6 m³/h,精度为 1%。数据采集仪的型号为 Keithley DAQ6510,采集频率为 3 Hz。

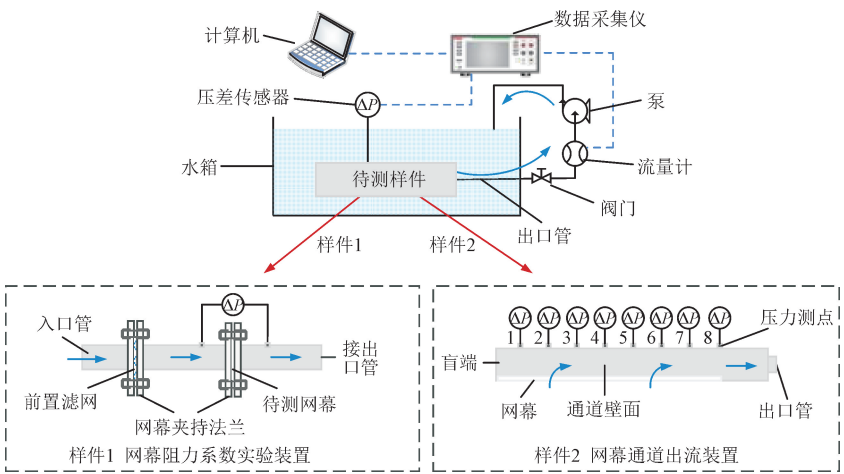


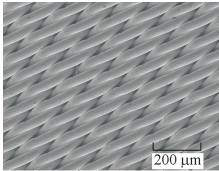
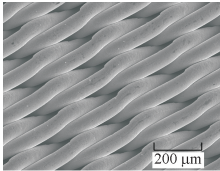
图 3 实验系统示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the experimental system

2.2 样件参数及实验工质

实验使用的网幕为荷兰斜纹(DTW)编织网幕,选取了 DTW200×1 400 和 DTW325×2 300 两种编织密度的网幕样本,其中 325×2 300 表示经线数密度为每英寸(2.54 cm)325 根,纬线数密度为每英寸(2.54 cm)2 300 根。两种规格的网幕参数与扫描电镜图像列于表 1。待测网幕先经无水乙醇和去离子水在超声波清洗仪中清洗并干燥后再进行装配,对网幕的清洗有助于去除网幕表面和孔隙中的杂质,防止杂质堵塞网幕从而对测量产生影响。

水平出流实验中所用的网幕样本总长为 600 mm、宽度为 30 mm。为避免出口效应影响,通道出口附近 135 mm 焊接有不锈钢片,使得网幕实际有效长度 L 为 465 mm。网幕经清洗并干燥后由密封胶与通道间形成密封。由于密封胶具有流动性,对网幕有效流通面积有一定影响,实际有效尺寸如表 1 所示,其中 d_w 为径丝直径, d_s 为纬丝直径。

表 1 网幕样件规格参数表
Table 1 Parameters of screen samples

图像及参数	DTW325×2 300	DTW200×1 400
电镜图像 (SEM)		
$d_w/\mu\text{m}$	35.0	50.0
$d_s/\mu\text{m}$	25.0	32.0
有效面积/mm ²	465×30	465×27

实验采用的液体工质为蒸馏水。由于实验过程中涉及网幕及样件的更换,多次实验的环境温度存在变化,表 2 列出了各组实验温度对应的蒸馏水物性参数,实验压力始终为常压 0.1 MPa。需要说明的是,由于低温下网幕结构的变化可忽略不计^[11],针对同一网幕通道结构,不同流体的绝热出流特性都应满足 2.1 小节中出流模型的数学描述。也就是说,常温与低温流体虽然存在密度和黏性等物性差异,但这些差异主要体现在具体特性参数的数值差异,并不会引起出流性能规律的改变。因此,得到的水实验验证计算模型,理论上可以进一步应用于低温推进剂等其他流体的出流性能预测。

表 2 实验条件下蒸馏水的物性参数(0.1 MPa)
Table 2 Physical properties of distilled water(0.1 MPa)

工质	温度/K	密度/(kg·m ⁻³)	黏度/(μPa·s)
蒸馏水	290.0	998.21	1 005.3
	287.3	999.23	1 163.6
	284.0	999.62	1 274.6

3 结果分析与讨论

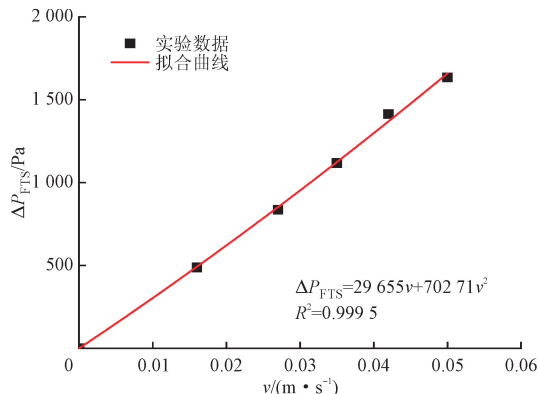
3.1 阻力系数测定与拟合

采用图 3 中样品 1 所示的实验装置对 DTW200×1 400 与 DTW325×2 300 两种网幕分别进行了阻力系数测定实验,以获得式(5)的输入参数。实验测试温度为 290.0 K。图 4 展示了两网幕在不同工况下穿透速度与穿透压损的对应关系,图中的穿透压损 ΔP_{FTS} 由压差传感器直接测得,穿透速度 v 根

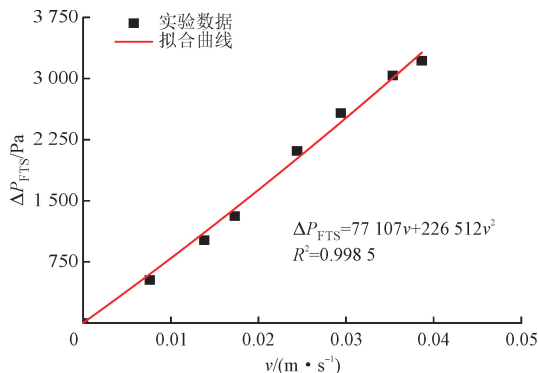
据流量计所测得的出流流量 Q 与实验管道的内径 d 由下式换算得到

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (8)$$

对照式(4)与实验数据拟合得到的曲线方程,即可获得阻力系数 C_1 与 C_i 。



(a) DTW200×1400



(b) DTW325×2300

图 4 阻力系数实验数据及拟合曲线

Fig. 4 Experimental data and fitted curves for resistance coefficients

针对 DTW200×1400 型网幕,根据图 4(a)中实验数据拟合得到的曲线方程为

$$\Delta P_{\text{FTS}} = 29\,655v + 70\,271v^2 \quad (9)$$

拟合优度 R^2 为 0.999 5,根据式(4),代入表 2 所列蒸馏水物性参数,可计算得出所采用的 DTW200×1400 网幕样本黏性阻力系数 C_1 为 $2.95 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$,惯性阻力系数 C_i 为 70.4。

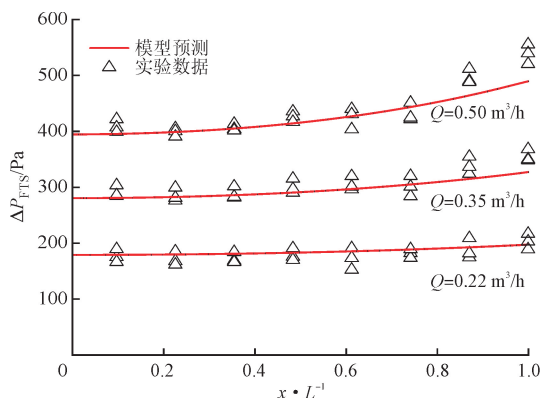
对于 DTW325×2300 型网幕,根据图 4(b)中实验数据拟合得到的曲线方程为

$$\Delta P_{\text{FTS}} = 77\,107v + 226\,512v^2 \quad (10)$$

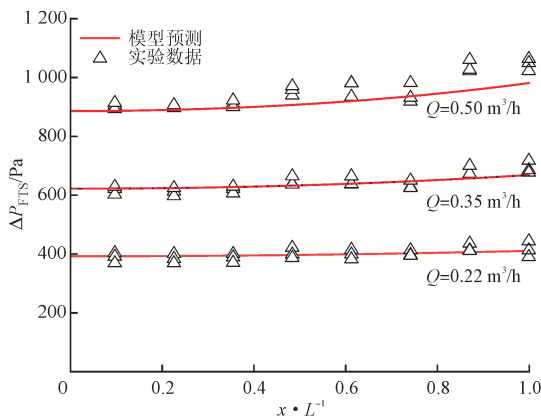
拟合优度 R^2 为 0.998 5,同理可计算得到采用的 DTW325×2300 型网幕样本的黏性阻力系数 C_1 为 $7.67 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$,惯性阻力系数 C_i 为 226.9。

3.2 穿透压损计算结果与实验数据的对比

为测量网幕通道出流过程沿程的穿透压损分布,采用图 3 中样件 2 所示的实验装置,在 0.22、0.35 和 0.5 m^3/h 出流量下,分别对 DTW200×1400 与 DTW325×2300 两种网幕进行了水平出流实验。实验测试温度分别为 284.0 K 与 287.3 K,每种工况进行 3 次重复性测量。根据实验所对应的工况参数,将穿透压损的实验数据与本文所建立数学模型的预测值进行了对比,结果如图 5 所示。由图可知,在 3 种不同的流量下,实验数据的变化趋势与理论预测值基本吻合,平均相对误差为 3.5%,最大相对误差不超过 13.4%,验证了模型的准确性。



(a) DTW200×1400



(b) DTW325×2300

图 5 不同流量下网幕平面穿透压损沿程分布情况

Fig. 5 Distribution of pressure drop along the screen at different flow rates

由图 5 可知,两种网幕对应的穿透压损基本遵循沿出流方向递增的趋势,装置穿透压损的最大值在通道出口($x/L=1$)附近。考虑到网幕的阻力损失不能超过泡破压差,因此通道出口处泡破失效风险最高。流量越大,穿透压损沿程递增的趋势越显著,网幕的阻力损失也越大。这表明,在大流量下更需要注意网幕通道出口附近的压损变化。因此,在

进行网幕通道 LAD 设计时,需要着重考虑通道出口处的压力损失,结合最大压降与泡破压差对装置可以正常运行的流量工况范围进行约束。

3.3 网幕平面液体获取流量沿程分布

由于实验测试仅能获取网幕两侧压差的沿程分布情况,为进一步探究网幕平面液体获取流量的分布规律,采用前文所提出的、已经获得实验验证的出流模型对取液率 Q 分别为 0.22、0.35、0.5 m^3/h 工况下的局部流量分布进行计算,通道尺寸参数与实验保持一致。

图 6 给出了网幕平面局部取液流量 q 的分布情况。从中可以看出,网幕通道取液过程中流体并非均匀地进入网幕,而是沿着通道出口方向递增,与网幕穿透压损的沿程分布规律相一致。对比图中 3 种工况结果可知,当总取液率 Q 越大时,流量在整个网幕上分布的均匀性越差。对比不同网幕的结果可以看出,在总流量相同时,DTW200×1 400 局部流量沿程分布的均匀性相比于 DTW325×2 300 而言更差,尤其是流量较大时,采用较粗网幕的集液通道内流量的沿程不均匀性更加明显。例如,当总流量为 0.5 m^3/h 时,DTW325×2 300 出口处局部流量为 0.013 4 m^3/h ,与盲端处的 0.0121 m^3/h 相比差别较小,而 DTW200×1 400 在出口处为 0.014 6 m^3/h ,盲端处仅为 0.011 6 m^3/h ,局部流量相对于出口处衰减了 20.5%。

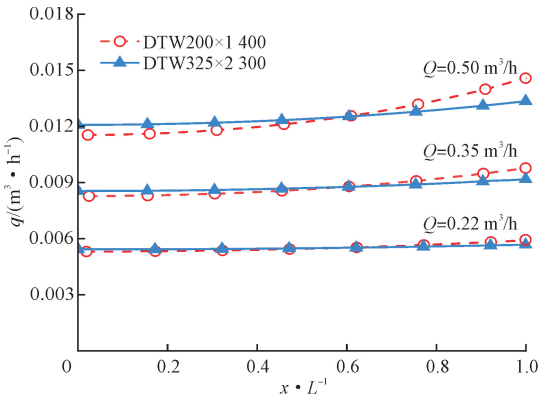


图 6 不同工况下局部流量分布情况

Fig. 6 Local flow distribution under different operating conditions

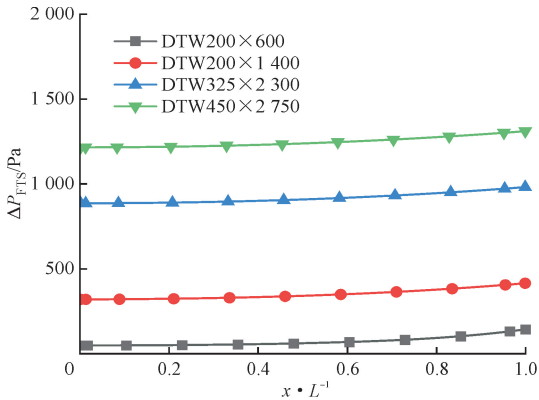
3.4 网幕选型与通道尺寸

由于实验样件结构的局限性,采用本文所提出的模型,进一步研究了不同网幕选型与通道尺寸对出流性能的影响。

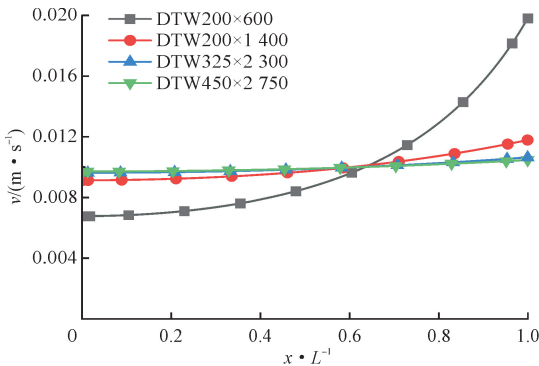
图 7 给出了采用 4 种不同编织密度的网幕在取

液率 $Q=0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时的取液性能对比。通道尺寸与实验样件一致,DTW200×600 的 $C_1=5.94\times10^6 \text{ m}^{-1}$, $C_t=15.1$;DTW450×2 750 的 $C_1=1.07\times10^8 \text{ m}^{-1}$, $C_t=70$ ^[26]。

由图 7(a)可知,当取液率一定时,越细的网幕具有越大的 ΔP_{FTS} ,这显然是由于细孔网幕孔径更小,阻力系数更大。同时,细孔网幕泡破压差也越高,即穿透压损的安全边界也越高。在网幕选型时,为综合权衡泡破压差和穿透压损的影响,此前的研究通常以网幕的临界流速(穿透压损等于泡破压差时对应的流速)为判据,评估不同网幕的临界取液率^[27]。然而,此评价方法是基于网幕穿透压损及穿透流速沿程分布均匀的假设,据此得到的通道临界流率实际上是出口处的穿透速度与网幕总面积的乘积。如图 7(b)所示,网幕通道实际出流过程中穿透速度的沿程分布并不均匀,这将导致该方法计算获得的临界流率偏大。特别是较粗网幕,其穿透速度的沿程变化更加明显,在选型设计时也会更大程度地高估取液性能。



(a)不同网幕穿透压损沿程分布



(b)不同网幕穿透速度沿程分布

图 7 网幕选型对出流性能的影响

Fig. 7 Effect of screen selection on outflow performances

由此,本文提出了以穿透压损 ΔP_{FTS} 与泡破压差 ΔP_{BP} 的比值来衡量泡破风险的评价方法。其中,

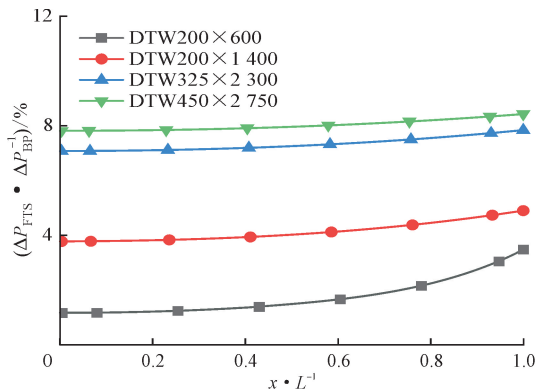
泡破压差 ΔP_{BP} 的计算公式如下

$$\Delta P_{BP} = \frac{4\gamma\cos\theta_c}{D_p} \quad (11)$$

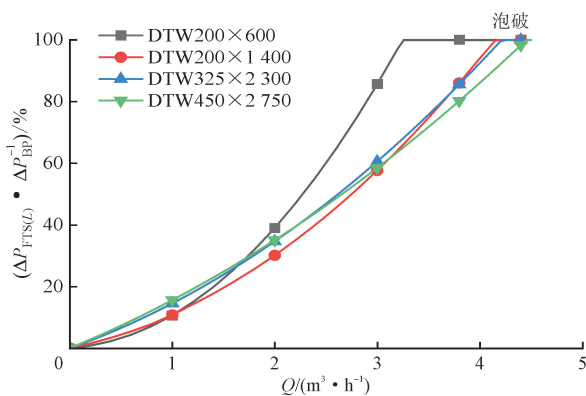
式中: γ 为流体表面张力; θ_c 为接触角; D_p 为网幕孔隙等效直径。蒸馏水的表面张力取 70 mN/m, 与不锈钢表面的接触角约为 49.5° [28]。DTW200×600、DTW200×1 400、DTW325×2 300、DTW450×2 750 的孔隙等效直径分别取 44.76、21.73、14.79、11.83 μm [5], 计算预估得到的 4 种网幕在蒸馏水环境的泡破压力分别为 4 107、8 468、12 441、15 554 Pa。

以 $Q=0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 的工况为例, 如图 8(a) 所示, 4 种网幕的泡破风险均沿流动方向增加, 在出口处取得最大值。越粗的网幕泡破风险增长幅度越大, 以 DTW200×600 为例, 其出口处的泡破风险相对盲端增大了 2.3%, 而 DTW450×2 750 出口处的泡破风险仅增长了 0.6%。由于 ΔP_{FTS} 随取液率增大而增大, 泡破风险也会受到取液率的影响。图 8(b) 给出了不同网幕通道的最大泡破风险率 (即 $\Delta P_{FTS(L)}/\Delta P_{BP}$) 随取液率 Q 的变化关系, $\Delta P_{FTS(L)}$ 为通道出口处的穿透压损。可见, 随着 Q 的增大, 4 种网幕通道的泡破风险均增大, 直至泡破发生。 $\Delta P_{FTS(L)}/\Delta P_{BP}$ 为 100% 时对应的流量即为网幕通道的极限取液率。流量较低时, 细孔网幕具有更高的泡破风险; 随着流量的增加, 粗孔网幕的泡破风险增长更快, 将更早发生泡破, 这是因为泡破风险由 ΔP_{FTS} 和 ΔP_{BP} 共同主导。在低流量下, 细孔网幕更高的阻力系数占主导作用, 导致其泡破风险偏高; 在高流量下, 粗孔网幕更低的 ΔP_{BP} 意味着更低的安全边界, 导致其泡破风险更高。

除了网幕选型, 通道尺寸的改变也会使出流性能有所影响, 但改变通道尺寸的同时也会改变装置的总质量, 这将影响到装置的经济性。通道所用的金属壁面板材质量可表示为



(a) 定流量下泡破风险沿程分布



(b) 泡破风险随取液率变化情况

图 8 不同网幕的泡破风险

Fig. 8 Risk of bubble breakage for different screens

$$m_{LAD} = (2H + W)L\rho_m\delta \quad (12)$$

式中: ρ_m 为金属板材的密度; δ 为板材厚度。由于材质一定, 其 ρ_m 、 δ 均为定值, 因此可以用 $(2H + W)L$ 来表征通道质量的大小。

以 DTW325×2 300 为例, 取液率取 $Q = 0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。首先研究通道长度、宽度和高度对取液性能的影响。单独改变一个参数势必会带来通道质量的改变, 以实验样件尺寸参数为基准, 控制通道质量的增量一致, 改变通道任一尺寸参数所带来的影响如图 9 所示。横坐标的通道面积 $(2H + W)L$ 可以表征通道质量大小, 纵坐标 $\Delta P_{FTS(L)}$ 是通道出口处的穿透压损, 也是通道全程 ΔP_{FTS} 的最大值。由图 9 可知, 出流量一定时, 增大通道的长度、宽度、高度均能减小 ΔP_{FTS} , 但对 ΔP_{FTS} 的削减能力不同。在通道质量增量一致时, 增大通道的宽度能够更显著地降低 ΔP_{FTS} , 更有利于降低泡破风险。

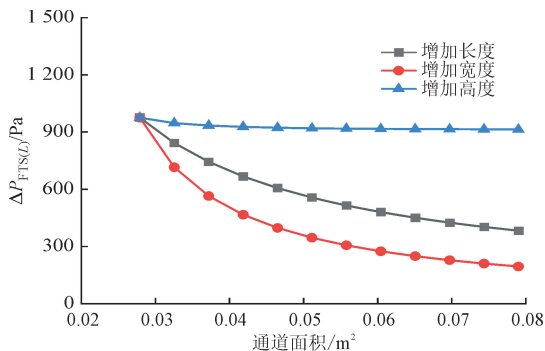


图 9 改变单一通道尺寸对穿透压损的影响

Fig. 9 Effect of changing individual dimensions on pressure drop

进一步, 若装置的设计质量已经确定, 以实验样件尺寸参数为基准, 在保持样件总质量和网幕有效

面积不变的前提下,计算分析不同样件尺寸对取液性能的影响。表 3 给出了 5 种符合要求的样件尺寸,按照宽度由小到大的顺序依次编号为 1~5,图 10 给出了这 5 种尺寸所对应的穿透压损分布情况。

表 3 定质量和网幕面积时 5 种不同的样件尺寸
Table 3 Five different sizes for constant mass and screen area

样件编号	长度/mm	宽度/mm	高度/mm
1	697.50	20.00	10.00
2	465.00	30.00	15.00
3	348.75	40.00	20.00
4	279.00	50.00	25.00
5	232.50	60.00	30.00

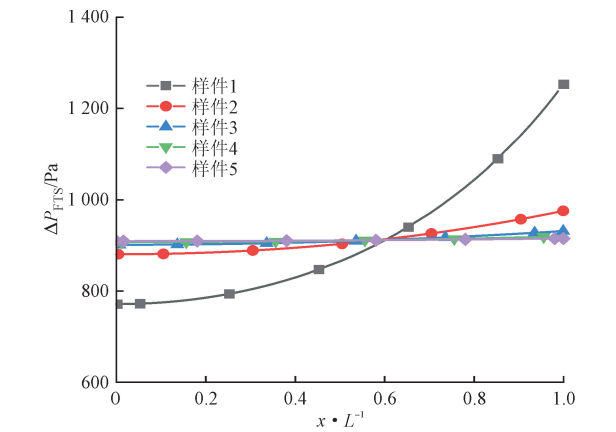


图 10 通道尺寸对取液性能的影响

Fig. 10 Effect of channel size on liquid acquisition performance

图 10 表明,通道越长、宽度越窄、高度越小时,穿透压损的分布越不均匀,且出口处的 $\Delta P_{\text{FTS}(L)}$ 越大。当通道的总质量一定时,在网幕有效流通面积不变的情况下,减小长宽比有利于降低穿透压损。另一方面,针对同一种网幕类型,阻力系数相同,穿透压损的分布趋势即可代表穿透速度的分布趋势,可见降低通道长度、增加宽度和高度更有利于流量的均匀分布。然而,在微重力情况下,贮箱内液体分布不均匀,为使网幕更大程度接触液体,通道长度也不宜过短。因此,在通道结构设计时,应结合实际任务工况条件,在保证液体获取率的情况下尽可能减小通道长度。

4 结 论

为研究网幕通道式液体获取装置水平出流性能,本文构建了一种基于体积流量边界的水平出流

模型,并通过实验验证了模型的准确性,在理论和实验研究基础上给出了网幕通道式 LAD 设计和优化建议,得到主要结论如下。

(1)本文提出的水平出流模型与实验数据的平均相对误差为 3.5%,经验证能够准确预测网幕通道出流过程网幕穿透压损和取液流量的沿程分布特性,为 LAD 的设计与优化提供理论支持。

(2)通道集液出流过程中,网幕穿透压损与取液流量并非沿程均匀分布,而是沿流动方向逐渐增大。总取液量越大时,不均匀性越显著。

(3)提出了以穿透压损与泡破压差比值为指标的泡破风险评价方法。通道出口始终为泡破风险最大位置。低流量下,粗孔网幕通道泡破风险更小,但取液均匀性较差。高流量下,细孔网幕通道的泡破风险较小,且有利于均匀取液。

(4)在保持通道质量和网幕流通面积不变的前提下,减小通道长宽比可以提高穿透压损与流量分布的均匀性,有利于降低泡破风险。若需扩大通道尺寸,同等的质量增量下增加宽度更有利于降低网幕穿透压损。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 马原,陈虹,邢科伟,等. 低温推进剂网幕通道式液体获取装置性能研究进展 [J]. 制冷学报, 2019, 40(3): 1-7.
MA Yuan, CHEN Hong, XING Kewei, et al. Review of screen channel liquid acquisition device for cryogenic propellants [J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(3): 1-7.

[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] 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] ZHU Qingchun, JIANG Yuting, ZHANG Peng, et al. Liquid wicking flow characteristics in metallic screens with various weave densities [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2022, 58(5): 719-734.
- [7] 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.
- [8] HARTWIG J W. Screen channel liquid acquisition device bubble point tests in liquid nitrogen [J]. *Cryogenics*, 2016, 74: 95-105.
- [9] 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.
- [10] ARMOUR J C, CANNON J N. Fluid flow through woven screens [J]. *AIChE Journal*, 1968, 14(3): 415-420.
- [11] 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.
- [12] 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 and Superconductivity*, 2021, 49(7): 38-44.
- [13] 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.
- [14] 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]. *International Journal of Physical and Mathematical Sciences*, 2009, 3(10): 782-787.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [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] 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.
- [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.
- [20] 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[J/OL]. *航空动力学报*. (2023-11-01)[2024-01-2]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20220304>.
WANG Ye, YANG Guang, JIN Xin, et al. Cryogenic experimental study on the phase separation performance of screen channel liquid acquisition device[J/OL]. *Journal of Aerospace Power*. (2023-11-01)[2024-01-22]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20220304>
- [21] 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.
- [22] 马原, 雷刚, 徐元元, 等. 液体获取装置金属筛网内饱和液氢芯吸性能研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(10): 124-130.
MA Yuan, LEI Gang, XU Yuanyuan, et al. Wicking performance of saturated liquid hydrogen within metallic screens of liquid acquisition devices [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(10): 124-130.
- [23] 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.

(下转第 216 页)

- on Energy Conversion, 1993, 8(1): 92-99.
- [18] WANG Shuang, RUAN Xinbo, HE Yuying, et al. Small-signal impedance modeling and analysis of variable-frequency AC three-stage generator for more electric aircraft [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 206-216.
- [19] AREERAK K N, WU T, BOZHKO S V, et al. Aircraft power system stability study including effect of voltage control and actuators dynamic [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(4): 2574-2589.
- [20] JATSKEVICH J, PEKAREK S D, DAVOUDI A. Parametric average-value model of synchronous machine-rectifier systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1): 9-18.
- [21] JATSKEVICH J, PEKAREK S D, DAVOUDI A. Fast procedure for constructing an accurate dynamic average-value model of synchronous machine-rectifier systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(2): 435-441.
- [22] GIACOMUZZI S, DE CARNE G, PUGLIESE S, et al. Synchronization of low voltage grids fed by smart and conventional transformers [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 2941-2951.
- [23] SPARN B, KRISHNAMURTHY D, PRATT A, et al. Hardware-in-the-loop (HIL) simulations for smart grid impact studies [C]//2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 8586357.
- [24] 邵玉龙. 电动汽车 BMS 关键技术研究及硬件在环测试系统构建 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [25] 王喆. 电传动履带车辆机电联合制动控制策略与试验技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [26] 宋世欣. 分布式驱动电动汽车控制策略及硬件在环实验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 204 页)

- 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.
- [24] LI Jian, MA Yuan, LI Yanzhong, et al. The impact of vapor blockage on the outflow rate of screen channel liquid acquisition devices [J]. Micromachines, 2022, 13(2): 322.
- [25] LI Jian, LI Yanzhong, MA Yuan, et al. Performance analysis and improved design of screen channel liquid acquisition device for hydrogen [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(56): 23856-23870.
- [26] DARR S R. Hydrodynamic model of screen channel liquid acquisition devices for in-space cryogenic propellant management [D]. Gainesville, USA: University of Florida, 2016.
- [27] 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.
- [28] HARTWIG J W, MANNJ A Jr. A predictive bubble point pressure model for porous liquid acquisition device screens [J]. Journal of Porous Media, 2014, 17(7): 587-600.

(编辑 杜秀杰)