

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

张悦, 马原, 王云龙, 厉彦忠

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为研究安装于低温推进剂贮箱内的网幕通道式液体获取装置(SCLAD)取液性能的规律, 针对液氢贮箱, 建立了结合贮箱壁面的网幕集液通道三维出流模型。采用多孔阶跃模型描述网幕穿透压损特性, 对集液通道取液过程中速度、压力分布进行计算, 得到了壁面距离、通道宽度、通道弯曲程度等因素对 SCLAD 取液性能的影响规律。结果表明: 贮箱壁面的存在使得网幕外侧压力产生损失, 外侧压降沿流动方向增大, 从而影响通道上、下游流速分布及取液效果; 改变壁面距离 d 和通道宽度 W 均会影响装置取液性能, W/d 越大, 通道外侧压损越大, 泡破风险更低, 也有利于促进通道上游取液而减损通道下游取液效果, 但 W/d 过大会降低总取液量, W/d 取 10 左右能达到最佳取液效果; 无重力时, 通道的弯曲程度几乎不影响取液性能, 重力存在时, 弯曲通道对取液的影响程度取决于加速度方向上的有效长度 h_g , h_g 越小的通道具有更好的取液稳定性。

关键词: 低温推进剂; 液体获取装置; 网幕集液通道; 壁面距离; 取液性能

中图分类号: V19 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202507006 **文章编号:** 0253-987X(2025)07-0056-10

Study on the Effect of Channel Configuration on the Liquid Acquisition Performance of Screen Channel Liquid Acquisition Devices

ZHANG Yue, MA Yuan, WANG Yunlong, LI Yanzhong

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To investigate the liquid acquisition performance of the screen channel liquid acquisition devices (SCLADs) installed in cryogenic propellant storage tanks, a three-dimensional outflow model of a screen collection channel integrated with the tank wall is established for liquid hydrogen tanks. The porous step model is employed to describe the pressure loss characteristics of the screen penetration. The velocity and pressure distributions during the liquid acquisition process are calculated, revealing the influence of wall distance, channel width, and channel curvature on the SCLAD's performance. The results show that the presence of the tank wall induces pressure loss on the outer side of the screen, with the pressure drop increasing along the flow direction, thereby affecting the velocity distribution and liquid acquisition efficiency in the upstream and downstream sections of the channel. Variations in the wall distance (d) and channel width (W) both impact the device's performance. A higher W/d ratio increases the pressure loss on the outer side of the channel, reducing bubble breakthrough risk and enhancing upstream liquid acquisition

while slightly compromising downstream performance. However, an excessively large W/d ratio decreases the total liquid acquisition volume, with an optimal W/d ratio of around 10 for maximum efficiency. In the absence of gravity, channel curvature has negligible effects on liquid acquisition. In the presence of gravity, the influence of curved channels depends on the effective length h_g in the direction of acceleration, with smaller h_g values yielding better acquisition stability.

Keywords: cryogenic propellant; liquid acquisition device; screen liquid collection channel; wall distance; liquid acquisition performance

液氢、液氧等低温推进剂具有高比冲、大推力、无毒无污染等优势,成为实现深空高效运输的首选推进剂,已经成功应用于土星 5 号、半人马上面级等航天器中^[1],但其低沸点、低表面张力的特性也给低温推进剂在轨管理带来巨大挑战^[2]。在微重力环境下,贮箱内推进剂气液相的不均匀分布使得推进剂在轨传输存在夹气输液的风险,可能引起发动机失效或推进剂在轨补加失败,因此亟待解决气液分离问题^[3]。

网幕通道式液体获取装置(SCLAD)对推进剂蒸发敏感度低,结合毛细作用弥补了低温推进剂表面张力小的缺陷,不消耗多余能量,最有望大规模用于低温推进剂的在轨全液获取^[4]。SCLAD 的核心部件是集液通道在贮箱内壁面侧安装的一层由金属丝编织而成的网幕。网幕是多孔结构,依靠毛细作用引流液体,气体被网幕微孔内液膜的表面张力阻隔在外,从而实现推进剂的气液分离^[5]。

限制气体进入网幕通道的能力主要体现为网幕的泡破压差(Δp_{BP})^[6],即气体首次穿透网幕时网幕两侧所对应的压差,国内外学者已经开展了大量常温^[7]、低温^[8-9]实验,研究其基本特性规律。在安全压差下取液传输,液体流经网幕的穿透压损(Δp_{FTS})是决定装置取液性能的重要参数。Armour 和 Cannon^[10]将网幕阻力简化为黏性阻力和惯性阻力之和,提出了穿透压损预测模型,并通过实验数据拟合给出两个阻力修正系数 α 、 β 。后续的研究者充分关注了不同网幕之间的差异性,通过实验研究、数值模拟等手段得到了不同网幕专用的 α 、 β ^[11-14]。

近年来,研究者们开始聚焦于集液通道整体出流性能。Hartwig 和 Darr 等^[15-16]先后建立了单通道出流过程的一维与二维数学模型,并进行了以蒸馏水为工质的验证实验,但该模型无法反映贮箱系统因素的影响。在低温实验方面,Hartwig 等^[17]采用液氢为工质,开展了单通道低温出流可视化测试,成功利用 SCLAD 实现了对液氢的单相传输,但定量数据十分有限。Mcquillen 和 Chato 等^[18-19]采用计算流体动力学(CFD)方法,对单通道取液过程进

行了仿真计算,得到了网幕通道不同淹没工况下的流动性能,但只对特定工况进行了模拟分析。国内方面,原宇琦等^[20]以液氮为工质,通过对单通道 CFD 仿真,对比分析了不同低温流体、质量流量对通道流动的影响规律。王峥等^[21]通过粒子图像测速技术获得了网幕通道取液过程的速度分布特性。王晔等^[22]开展液氮温区网幕通道的相分离实验,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。本文作者团队建立了压差驱动与泵驱动边界的网幕通道出流模型^[23],开展了水平出流验证实验,并进一步计算研究了网幕通道在堵塞工况下的出流性能规律,提出了网幕通道结构的优化设计方案^[23-25]。

综上,现有关于 SCLAD 的研究多集中于多孔网幕部件的局部特性,有关集液通道出流性能的研究也多针对独立的直通道结构,并未考虑贮箱结构对装置工作性能的影响。因此,本文从 SCLAD 工程应用的角度出发,采用 CFD 方法针对液氢贮箱内集液通道结构建立三维出流模型,对通道宽度、通道壁面距离以及通道弯曲程度等因素对网幕通道取液能力和泡破安全性的影响开展仿真研究,为 SCLAD 的结构设计、安装布置、性能优化和工程应用提供理论依据和技术参考。

1 模型建立与数值方法

1.1 物理模型

为充分利用贮箱壁面结构,同时为了避免高温增压气体对网幕表面的热冲击,通常将集液通道的网幕面贴近贮箱内壁面放置。工程应用的低温贮箱多为柱段结合椭球封头的结构形式,如图 1(a)所示,贮箱内的网幕通道可分为直段和弯曲段两种典型结构。为研究通道尺寸和壁面距离的影响,取集液通道直通道段及对应的局部贮箱建立模型,主要尺寸如图 1(b)所示,网幕并非完全覆盖至出口,在出口前设置一段 200 mm 四面封闭的管段用于流动充分发展,网幕面与贮箱壁面间距为 d 。贮箱中的液体推进剂在压差驱动下通过壁面间隙穿透网幕孔隙进入通道,并沿通道流至出口完成取液,如图 1(b)

中蓝色箭头所示。另一方面,为研究网幕通道弯曲程度对取液性能的影响,取网幕通道弯曲段及对应贮箱区域建立模型,如图 1(c)所示,保持网幕通道内流道的长宽高尺寸始终为 $800 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,分别建立不同弯曲程度的网幕通道模型。网幕与贮箱壁面间的间距恒为 2 mm ,贮箱液面淹没过通道盲端的高度为 200 mm 。

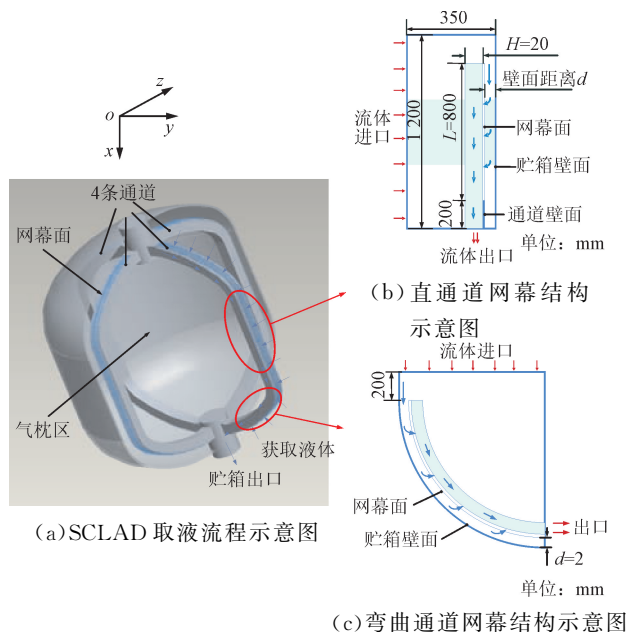


图 1 网幕通道式液体获取装置几何模型

Fig. 1 Geometry of the screen channel liquid acquisition device

1.2 控制方程与多孔阶跃模型

假设集液通道完全浸没在液体中,忽略流动过程的温度和能量变化,则出流过程可简化为单相液体的稳态纯流动问题。流动过程满足连续性方程

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; $\mathbf{u}$ 为速度矢量。

基于 Ansys Fluent 软件,采用标准 $k-\omega$ 模型描述存在狭缝、曲率的通道内外流体湍流行为。贮箱壁面及集液通道壁面采用无滑移固壁边界,流体进出口均设置为压力边界,压力耦合采用二阶方法,动量项采用二阶迎风格式,湍流动能及比耗散率均采用一阶迎风格式。工质采用 20 K 、 0.3 MPa 的过冷液氢(密度 $\rho = 71.54 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,黏度 $\mu = 14.14 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$),物性参数设置为定值。

金属网幕具有多孔介质的基本特性,但由于其厚度非常薄(小于 1 mm),同时求解宏观贮箱尺度与网幕微观结构内的流动特征会面临计算精度与计算效率的矛盾。为提高计算经济性,本文在求解集液通道宏观出流特性时不再考虑流体沿网幕厚度方向

的流动差异,将多孔网幕简化为一层阻力边界。使用多孔阶跃模型描述流体穿过网幕的流动压降特性,并以阻力源项的形式加载于动量方程中

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{S} \quad (2)$$

式中: t 为时间; p 为压力; μ 为流体的动力黏度; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; $\mathbf{S}$ 为多孔网幕对流体的阻力源项,由黏性阻力项和惯性阻力项组成。

根据多孔阶跃模型,集液通道出流过程中垂直于网幕平面方向(即 y 坐标方向)的压力梯度可写为

$$\frac{dp}{dy} = \frac{\mu v}{\alpha} + \frac{C_2 \rho v^2}{2} \quad (3)$$

式中: α 为面渗透率, C_2 为压力跃迁系数,分别反映了黏性阻力项和惯性阻力项; v 为液体流速。假设压力梯度沿厚度方向恒定,则流过网幕的压降为

$$\Delta p_{\text{FTS}} = \left(\frac{\mu v}{\alpha} + \frac{C_2 \rho v^2}{2} \right) \delta \quad (4)$$

式中: δ 为网幕厚度。

多孔阶跃模型是一种一维简化模型,需要通过合理设置面渗透率 α 和压力跃迁系数 C_2 反映网幕流动压降关系。根据 Armour 和 Cannon 的模型^[10],液体穿透网幕的压降还可以表示为

$$\Delta p_{\text{FTS}} = C_1 \mu v + C_i \rho v^2 \quad (5)$$

式中: C_1 、 C_i 分别为黏性阻力系数和惯性阻力系数,均与网幕结构有关,可以通过流动阻力实验测量获得。结合式(3)~(5),可以由 C_1 和 C_i 计算获得 α 和 C_2

$$\alpha = \frac{\delta}{C_1} \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{2C_i}{\delta} \quad (7)$$

本文计算的集液通道选取具有更强低温流体蓄流能力的荷兰斜纹(DTW)编织网幕,采用 DTW200×1400 型号,其主要结构参数见表 1。其中, δ 、 C_1 和 C_i 由作者团队此前开展的流动阻力实验所得^[23], α 和 C_2 由式(6)、(7)计算所得。

表 1 DTW200×1400 主要结构参数

Table 1 Main structural parameters of DTW200×1400

δ/m	C_1/m^{-1}	C_i	α/m^2	C_2/m^{-1}
1.14×10^{-4}	2.95×10^7	70.4	3.86×10^{-12}	1 235 087.72

1.3 网格无关性验证

为验证网格精度,针对进出口驱动压差 Δp_d 为 240 Pa 的工况进行网格无关性验证计算,其中壁面距离 $d = 5 \text{ mm}$,通道宽度 $W = 20 \text{ mm}$ 。图 2 给出了 5 种不同的网格数量下网幕通道的出口流量 q_m 的变化。从图 2 中可以看出,网格数量较小时出口流

量的结果变化较大,当网格数量从 49 万增大到 127 万时,出口流量的数值趋于稳定,相对变化率仅为 0.03%。综合计算的准确性和计算时间,最终选取 49 万网格所对应的网格尺寸进行计算。

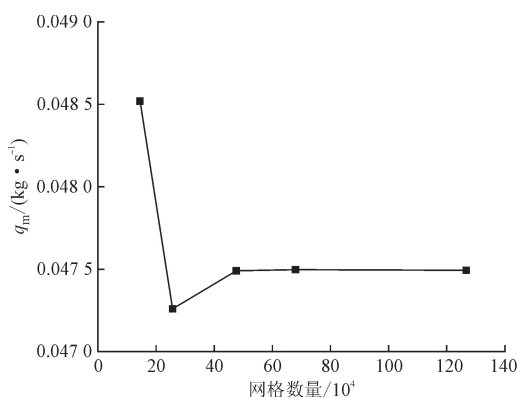


图 2 网格无关性验证

Fig. 2 Mesh independence validation

1.4 模型验证

为验证模型设置的准确性,取作者团队所开展的以蒸馏水为工质的集液通道水平出流实验结果^[23]为对照,开展验证计算。根据表 2 列出的实验工况参数进行建模设置,图 3 给出了对应工况的模拟结果与实验数据对比情况。数值模型计算得到穿透压损与实验数据的变化规律一致,最大误差为 5.5%,平均误差为 3.1%,验证了本文模型的正确性和准确性。

表 2 文献[23]实验工况参数

Table 2 Experimental parameters from Ref. [23]

工质密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	工质黏度 $\mu / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	通道 尺寸/mm	网幕流通 尺寸/mm
999.23	$1\,163.6 \times 10^{-6}$	$600 \times 30 \times 15$	465×30

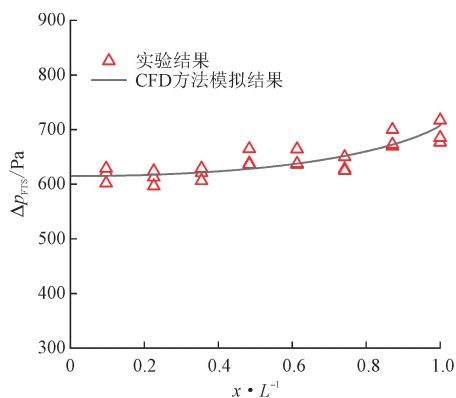


图 3 CFD 方法模拟结果与实验结果的对比

Fig. 3 Comparison of simulation results of CFD method with experimental results

2 结果与讨论

2.1 壁面对通道取液性能的影响

为研究实际运行中贮箱壁面对 SCLAD 取液性能的影响,以 $d=2\text{ mm}$ 为例,在无重力工况下对比研究有、无贮箱壁面时的取液情况。 Δp_d 取 360 Pa,约为泡破压差的 90%,以液氢为工质时 DTW200 $\times$ 1400 的 Δp_{BP} 为 395 Pa^[26]。

图 4(a)和图 4(b)分别展示了有、无贮箱壁面时的压力和速度云图(白色虚线为网幕位置)。由图 4(a)可知:当不存在贮箱壁面时,网幕外侧压力几乎不变;存在贮箱壁面时,由于壁面的黏性损失,外侧压力在网幕末端附近略有降低。内侧压力均由于液体流经网幕的穿透压损沿程降低。在网幕末端与通道金属壁面交接处,通道内由于涡流产生了局部负压。由图 4(b)速度云图可知,无壁面时网幕外侧速度基本不变,通道内的速度由于沿程不断有液体穿透网幕进入通道逐渐增大。有壁面时通道上游内侧速度略高于无壁面情况,但下游流速则明显低于无壁面情况。这是由于,当贮箱内的液体进入网幕与贮箱壁面间的狭缝流道时,流通面积变小流速提升,同时增加了局部流阻。但是,这部分压力损失是在通道外部,流速的提前增大对进入通道的流体起到了一定的整流作用,也改变了通道网幕面的整体沿程压力分布,使得上游网幕内侧流速略有增大,下游因网幕末端产生的黏性损失而流速相对较低。随着流动的充分发展,有壁面工况在出口处的流速增大且更为均匀。通道出口流速可以反映装置的取液流量大小,这意味着壁面对装置的取液流量会产生影响。

图 5 给出了网幕内、外两侧压力和穿透压损的沿程分布情况,网幕外侧和内侧的压力分别用 p_{out} 、 p_{in} 表示,二者之差即为穿透压损 Δp_{FTS} 。由于存在贮箱壁面, p_{out} 相较于无壁面工况有一定程度的衰减,且沿流动方向衰减程度逐渐加剧,在网幕末端附近产生的压损最大。这是因为,壁面存在所带来的黏性损失随速度变化,狭缝内的流速沿程增大,使得网幕末端附近局部压损最高。在 $d=2\text{ mm}$ 时,相较于无壁面工况 p_{out} 的最大局部损失达到 8.1%。对比穿透压损的沿程分布可知,有壁面时通道上游的 Δp_{FTS} 高于无壁面工况,在通道中下游相对降低,但在网幕末端又高于无壁面工况。越高的 Δp_{FTS} 意味着更高的泡破风险,从装置安全性考虑,贮箱壁面的存在会在一定程度上提升 SCLAD 的泡破风险。

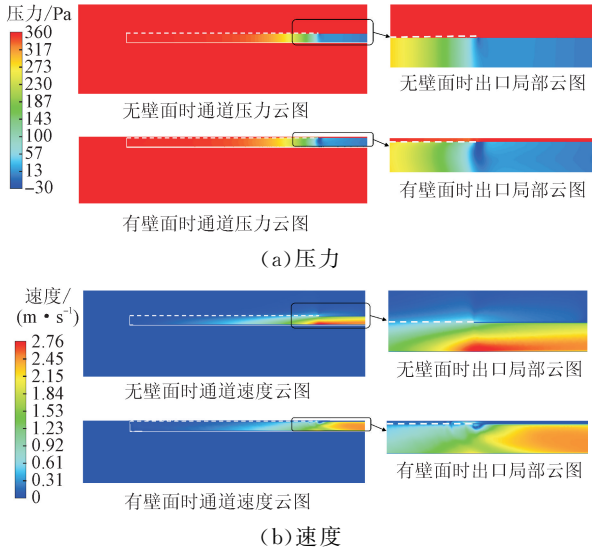


图4 网幕内、外侧压力和速度云图

Fig. 4 Pressure and velocity clouds on the inner and outer sides of the screen

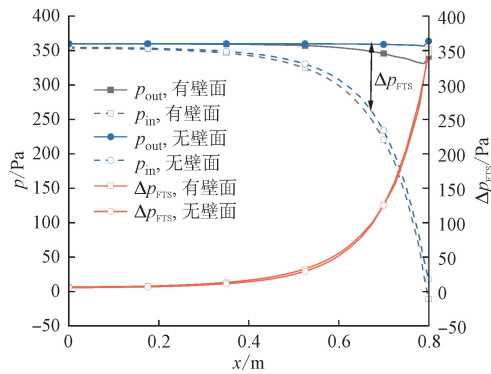


图5 网幕内、外侧压力和穿透压损的沿程分布

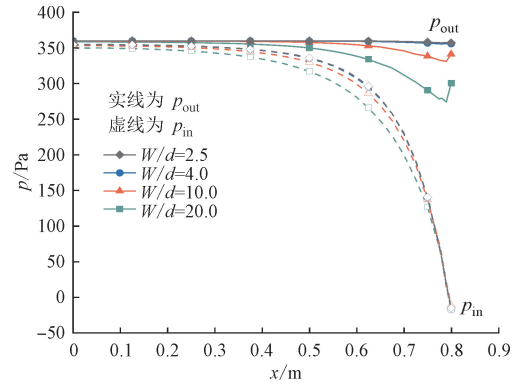
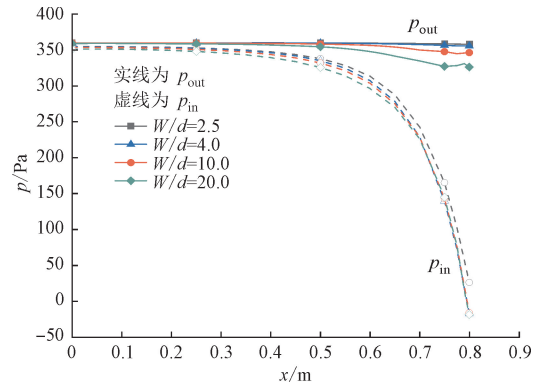
Fig. 5 Distribution of pressure on the inner and outer sides of the screen and FTS pressure drop

2.2 网幕通道安装最佳壁面距离

鉴于有贮箱壁面存在对集液通道压力、速度、泡破风险及取液流量均有不同程度的影响。为探究贮箱内网幕通道的最佳布置位置,考虑通道宽度 W 和壁面距离 d 两个因素的共同影响,通过改变二者之比 W/d ,研究网幕通道的布置位置对取液性能的影响。

图6(a)和图6(b)分别给出了 W 恒为 20 mm 和 d 恒为 5 mm 时 4 种 W/d 下网幕内外两侧压力沿程分布情况,进出口压差 Δp_d 为 360 Pa。由图 6 可知:随着 d 减小或 W 增大,即增大 W/d , p_{out} 表现出一定程度的衰减,沿出口方向衰减程度加剧,且 W/d 越大, p_{out} 损失越严重; p_{in} 随 W/d 的增大略有降低,但在网幕末端均趋近于 0。在同等 W/d 下,较之增大 W ,减小 d 所带来的外侧压降损失更大,以

$W/d=20$ 的工况为例,增大 W 至 W/d 为 20 时, p_{out} 最大压力损失为 9.3%,而减小 d 时 p_{out} 最大压力损失为 23.8%。这意味着相对于通道宽度,壁面距离对网幕压力分布的影响更为敏感。

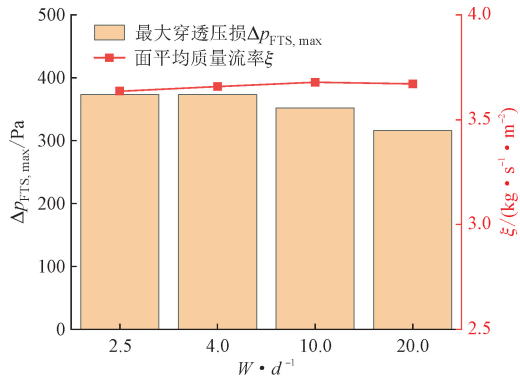
(a) $W=20$ mm 时单独改变 d (b) $d=5$ mm 时单独改变 W 图6 不同 W/d 对网幕两侧压力沿程分布的影响Fig. 6 Effect of different W/d on pressure distribution on both sides of the screen

对 SCLAD 取液性能的影响主要从安全性和取液能力两方面分析。为满足 SCLAD 有效单相取液的安全性,通道任意位置的 Δp_{FTS} 不能高于泡破压差 Δp_{BP} ,即满足 $\Delta p_{FTS, \max} < \Delta p_{BP}$,其中 $\Delta p_{FTS, \max}$ 代表网幕通道穿透压损最大值,其所在之处是网幕泡破风险最高位置。装置的取液能力可用出口流量 q_m 衡量,但由于改变 W 的同时也将改变网幕面积 S , q_m 作为衡量指标已不再适用,因此定义面平均质量流率 ξ 来衡量取液能力

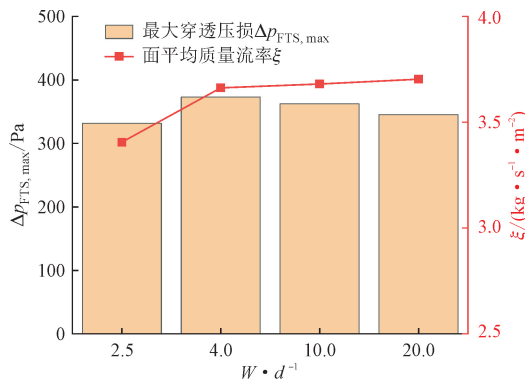
$$\xi = \frac{q_m}{S} \quad (8)$$

图 7 给出了不同 W/d 对应的 $\Delta p_{FTS, \max}$ 和 ξ 。从中可知,无论减小 d 或增大 W , $\Delta p_{FTS, \max}$ 均呈现随 W/d 增大而逐渐降低的趋势,即增大 W/d 有利于降低装置的泡破风险。结合图 6 可知,这是由于 W/d 越大,网幕末端 p_{out} 的损失越大,而 p_{in} 变化较小,导

致二者之差 Δp_{FTS} 明显降低。值得注意的是,当通道过窄(即图 7(b) 中 $W/d = 2.5$) 时, $\Delta p_{\text{FTS}, \max}$ 也较低,这是由于通道过窄时 p_{in} 相对较高,从而降低了二者之差。从取液能力的角度考虑,图 7 表明无论减小 d 或增大 W , W/d 从 2.5 增大至 10 时, ξ 呈现增长趋势,但 W/d 大于 10 后, ξ 增长受限,甚至呈现降低趋势,如图 7(a) 所示,这意味着在一定范围内增大 W/d 可以提高装置取液能力。在本例中,减小 d 时, ξ 的变化幅度均在 2% 以内,即 ξ 受 d 的影响较小;增大 W 使 W/d 从 2.5 提升到 10 时, ξ 增长了 8.1%。这反映了相对于 d , W 对取液流量的影响更显著。



(a) $W = 20$ mm 时单独改变 d



(b) $d = 5$ mm 时单独改变 W

图 7 W/d 对装置取液性能的影响

Fig. 7 Effect of W/d on performance of device liquid acquisition

为明确通道布置位置对网幕通道取液能力的影响机制,需进一步分析不同 W/d 下集液通道穿透速度的分布规律。用液体垂直于网幕方向(y 方向)流入通道的穿透速度 v_s 来表征穿透网幕沿程进入通道的局部流量,将 v_s 沿宽度方向求平均后得到穿透速度沿流动方向的分布情况。改变 W 和改变 d 对通道取液效果的影响机制类似,以 $W = 20$ mm 的通道为例进行说明,图 8 给出了 W/d 为 2.5 和 10 的穿透速度分布对比。由图可知, v_s 并非均匀分布, v_s 在两

种 W/d 下均沿流动方向(长度方向)逐渐增大。 W/d 较大时,通道上游具有更高的 v_s , W/d 较小时,在网幕末端具有更大的 v_s 。这是由于 W/d 较大时,网幕末端附近外侧局部压损较大,在通道下游表现出对取液的减损效果;但另一方面,较小的 W/d 使得网幕与壁面间隙内液体的流速增大,增加了上游液体的 v_s ,表现出对取液量的提升效果。总的来说,较大的 W/d 促进网幕通道上游的取液而削减了下游的取液,对总流量的影响需要综合考虑二者的大小。

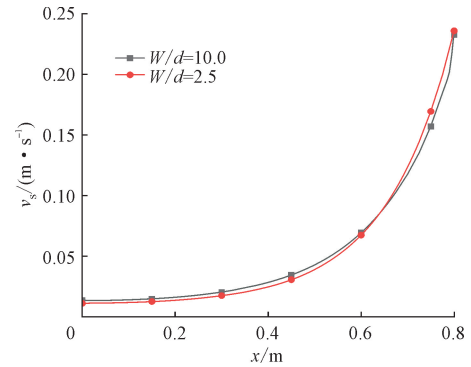
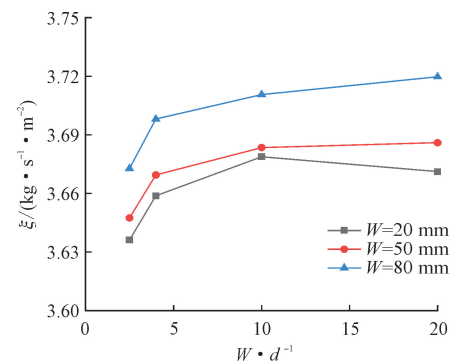


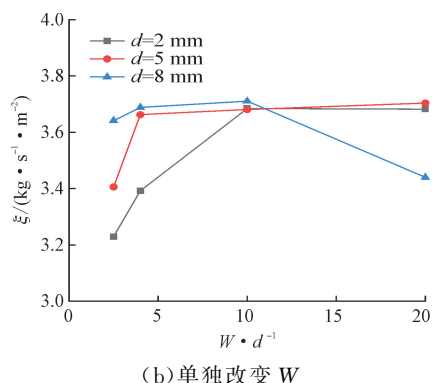
图 8 W/d 对网幕穿透速度的影响规律

Fig. 8 Effect of W/d on the flow through screen velocity

为界定通道取液性能的最佳 W/d 范围,分别在多种工况下单独改变 d 和单独改变 W ,研究 W/d 对取液能力的影响。图 9(a) 和图 9(b) 分别显示了 3 种恒定 W 和 d 下分别改变另一参数所带来的面平均质量流率变化。从中可知,在一定范围内增大 W/d 可以有效提升 ξ ,增强取液能力。当 W/d 大于 10 后,增大 W/d 所带来的取液提升已十分有限,甚至当 d 过小或 W 过大时,可能会因网幕末端的局部压降过大从而减损取液。如图 9(b) 中 $d = 8$ mm、 $W/d = 20$ 、 $\Delta p_d = 360$ Pa 的情况,此时通道宽度已达到 160 mm,网幕末端外侧局部压降加剧,使得下游取液减损效果已无法被上游增益效果抵消。因此,综合考虑泡破风险和取液能力, W/d 保持在 10 左右最佳。



(a) 单独改变 d

图9 不同 W/d 对取液能力的影响Fig. 9 Effect of different W/d on flow rate

2.3 通道弯曲程度对通道取液性能的影响

在实际工程中,网幕通道随贮箱形状具有弯曲段,为探究通道弯曲程度对 SCLAD 取液性能的影响,在保证网幕通道尺寸不变的情况下,建立了3种不同弯曲程度的通道模型。流体进口始终为通道盲端上方 200 mm 处,进出口压差 Δp_d 取 360 Pa。结合典型深空探测任务的加速度条件,以零重力和火星重力($3.73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)为例,对比了3种结构分别在重力加速度为 0、 3.73 、 $-3.73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 情况下的压力和流量变化,其中负号代表加速度方向与 x 轴相反。

图 10 展示了不同通道结构下的压力云图。由图 10(a)可知,无重力加速度下3种结构通道内外压力分布几乎一致。通道外侧压力基本与给定入口压力保持一致,通道内的压力则由于液体穿透网幕产生的穿透压损而减小。图 10(b)、(c)表明:当有重力加速度时,通道外的压力沿加速度方向逐渐增加,表现出分层现象,从而使得通道内部压力也随之变化。

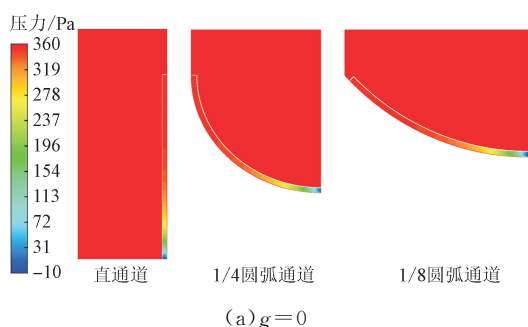
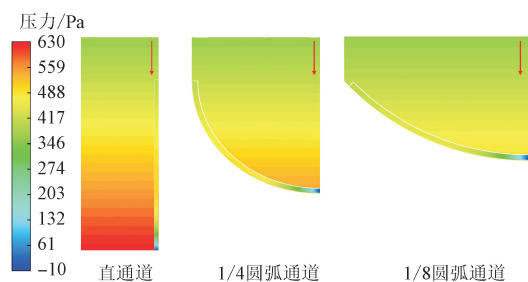
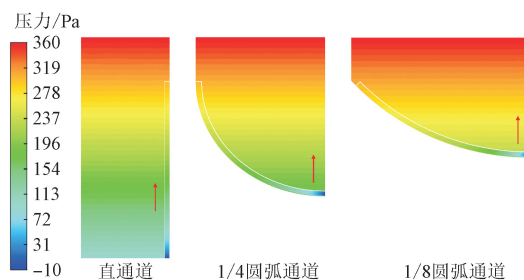
(a) $g=0$ (b) $g=3.73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (c) $g=-3.73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

图 10 不同通道结构下的压力云图

Fig. 10 Pressure clouds with different channel structures

图 11 展示了不同通道弯曲结构下网幕内外压力及穿透压损的沿程变化趋势,横坐标 L_n/L 为归一化长度,即网幕上任一点 n 距离网幕盲端的长度 L_n 与网幕总长 L 之比,当 n 位于通道盲端时 L_n/L 为 0,在通道出口则为 1。由图 11(a)可知,无重力加速度时,网幕内外侧压力几乎不受通道弯曲度的影响,只在通道出口处 p_{out} 呈现出一定衰减,这是由于贮箱壁面所产生的黏性损失,当通道弯曲程度越大时,壁面影响产生的压损也越显著。当重力加速度及其分量与流动方向相反时,如图 11(b)所示, p_{out} 逐渐减小,在出口附近局部压损加剧; p_{in} 主要由 p_{out} 和 Δp_{FTS} 决定,在通道出口处均趋近于 0。当重力加速度及其分量与流动方向相同时,如图 11(c)所示, p_{out} 逐渐增大,只在出口处受壁面影响存在一定削减; p_{in} 受重力加速度影响先沿加速度方向呈递增趋势,随着沿程穿透压损加剧, p_{in} 又逐渐降低,在通道出口处均趋近于 0。当有重力加速度时,无论正反,通道内、外压力均受弯曲程度影响,当通道长度在加速度方向的有效长度越大时, p_{out} 的变化也越大。重力加速度所带来的压力变化会直接影响到 Δp_{FTS} ,进而影响装置取液。从安全性讲,通道内、外侧压力的变化会使得 Δp_{FTS} 发生变化,对装置的泡破风险产生影响。如图 11(d)所示,在无重力时, Δp_{FTS} 受装置弯曲程度影响较小,即通道弯曲程度在无重力下几乎不改变网幕通道单相取液的安全性。当重力加速度及其分量与流动方向相反时,见图 11(e), Δp_{FTS} 较之无重力情况减小,在直通道下减小了 74.9%,泡破风险最低;在 1/8 圆弧通道下减小的程度最低,为 39.3%。反之,当重力加速度及其分量与流动方向相同时,见图 11(f),通道内外侧压差增大,相较于无重力工况,直通道的 Δp_{FTS} 增加了 69.6%,而 1/8 圆弧通道仅增加了 37.5%。

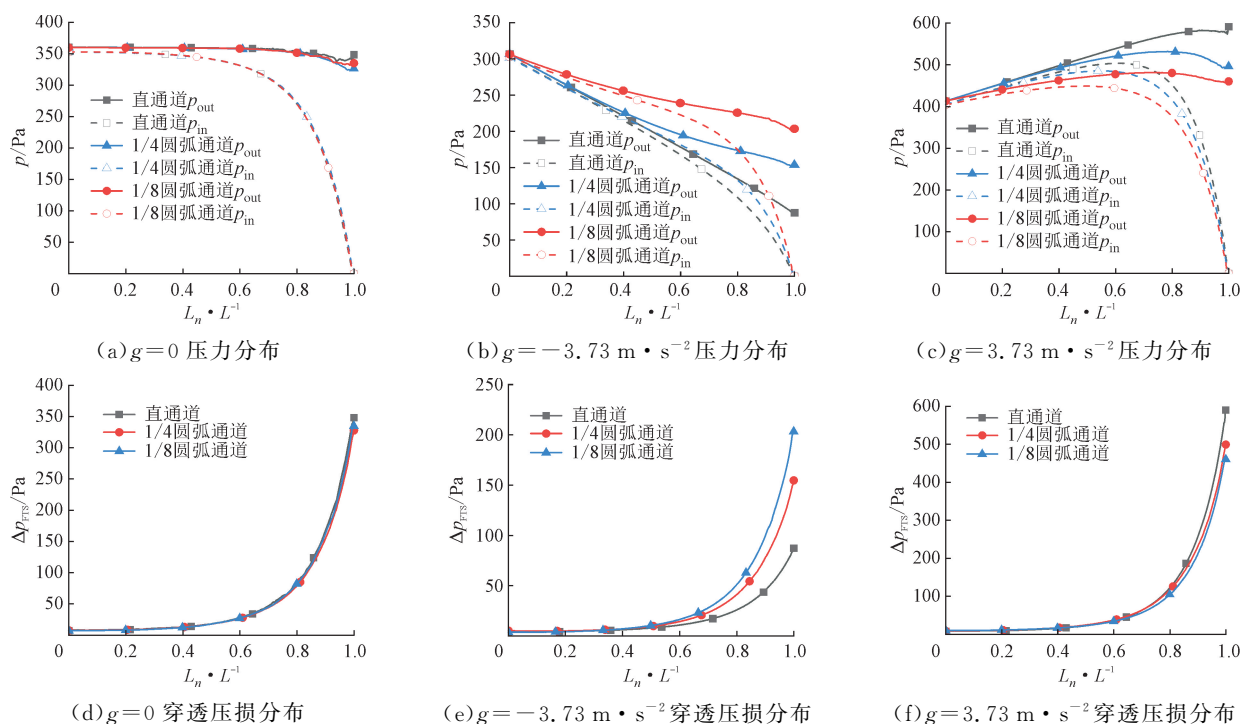


图 11 不同重力下通道结构对压力影响

Fig. 11 Effect of channel structure on pressure under different gravities

图 12 体现了通道的弯曲程度对取液能力的影响,在无重力条件下,通道的弯曲程度几乎不影响出口流量。当存在重力加速度时,重力所造成的液柱静压会根据加速度方向起到促进或抑制取液的效果。当重力加速度及其分量方向与流动方向一致时(即图中 $g=3.73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$),液体静压相当于在给定的驱动压差 Δp_d 基础上附加的压差增量以促进取液;反之,当重力加速度及其分量方向与流动方向相反时(即图中 $g=-3.73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$),给定的驱动压差 Δp_d 的一部分用于抵消静压,剩余的压差才会用于驱动取液,造成取液能力下降。静压 $\rho g h_g$ 对取液促进或减损的程度是由通道在加速度方向上的有效长度 h_g 决定,显然直通道具有最大的 h_g , 因此带来取液改变效果也最为显著。

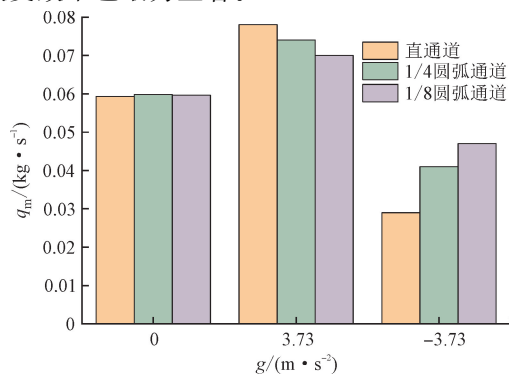


图 12 通道结构对出口流量的影响

Fig. 12 Effect of channel structure on outlet flow rate

表 3 给出了不同结构的网幕通道在不同重力下出口流量相对于无重力时的相对增长率,负号代表相对于无重力时的流量降低。从中可以看出,在同样的重力加速度下,直通道能带来的取液增量最高,达 31.5%,但其在反向加速度下取液量衰减也最为显著,高达 51.1%;对于 1/8 圆弧通道,其在不同方向加速下取液率的相对变化情况均较小,具有更好的取液稳定性。因此,在保证通道达到设计流量的基础上,弯曲程度更小(即 h_g 更小)的通道具有更好的取液稳定性。

表 3 不同网幕通道在不同重力下流量变化情况

Table 3 Variation of flow rate under different gravities for different screen channels

重力加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	出口流量相对于无重力时的增长率/%		
	直通道	1/4 圆弧通道	1/8 圆弧通道
3.73	31.5	23.7	17.4
-3.73	-51.1	-31.4	-21.1

3 结 论

为解决 SCLAD 在实际工程应用中的布置安装与设计优化问题,本文通过构建结合贮箱壁面结构的单根网幕集液通道出流三维模型,对不同贮箱壁面距离、通道宽度、通道弯曲程度下的 SCLAD 取液性能开展仿真研究,主要结论如下。

(1) 贮箱壁面会导致集液通道网幕外侧产生额外的局部压力损失,最大可达到8%以上。同时,贮箱壁面还改变了网幕穿透速度的沿程分布,使得网幕的穿透速度相较于无壁面工况在通道上游提升而下游降低,增大了上游的取液流量而下游取液受到减损,同时提升了网幕末端的泡破风险。

(2) 网幕与贮箱壁面间距 d 越小或网幕宽度 W 越大,即 W/d 越大时,网幕外侧的压力损失越大,在一定程度上降低了网幕通道的泡破风险,同时增加了网幕上游的取液效果而降低下游的取液效果, W/d 在小范围增长时,有利于提升总取液量。

(3) 继续增大 W 或减小 d ,使得 W/d 过大时,装置的取液流量不再增长,甚至呈现降低趋势。为获得网幕通道的最佳取液性能,在本文计算工况下, SCLAD 在贮箱内距离内壁面的最佳安装位置建议取 $W/d = 10$ 左右。在网幕通道的设计和优化过程中,需要充分考虑贮箱壁面距离与通道宽度之间的关系,通过合理设计通道尺寸、布置通道位置来实现取液性能的优化提升。

(4) 针对本文的研究对象和计算工况,在无重力加速度下,通道的弯曲程度几乎不影响取液性能;在有重力加速度下,当加速度及其分量与流动方向一致时,泡破风险提高但取液量增加,反之则降低泡破风险但取液流量减少。弯曲通道对取液的影响程度取决于加速度方向上的有效长度 h_g , h_g 越小的通道具有更好的取液稳定性。为提升网幕通道在面对不利加速度工况下的取液稳定性,建议在 SCLAD 弯曲段设计过程中,尽量减小其弯曲程度(即 h_g 更小)。

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, 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.
- [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] 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.
- [6] HARTWIG J W, KAMOTANI Y. The static reseal pressure model for cryogenic screen channel liquid acquisition devices [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 99: 31-43.
- [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] HARTWIG J, MCQUILLEN J, JURNS J. Screen channel liquid-acquisition-device bubble point tests in liquid oxygen [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2015, 29(2): 353-363.
- [9] HARTWIG J W. Screen channel liquid acquisition device bubble point tests in liquid nitrogen [J]. Cryogenics, 2016, 74: 95-105.
- [10] ARMOUR J C, CANNON J N. Fluid flow through woven screens [J]. AIChE Journal, 1968, 14(3): 415-420.
- [11] COSTA S C, BARRUTIA H, ESNAOLA J A, et al. Numerical study of the pressure drop phenomena in wound woven wire matrix of a Stirling regenerator [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 67: 57-65.
- [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 & Superconductivity, 2021, 49(7): 38-44.

- [13] WU W T, LIU J F, LI W J, et al. Measurement and correlation of hydraulic resistance of flow through woven metal screens [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(14): 3008-3017.
- [14] AZIZI F. On the pressure drop of fluids through woven screen meshes [J]. *Chemical Engineering Science*, 2019, 207: 464-478.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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 Engineering, Mathematical and Physical Sciences*, 2009, 3(10): 883-888.
- [20] 原宇琦, 朱建炳, 于斌, 等. 空间液氮气液分离装置流阻特性及数值模拟 [J]. *真空与低温*, 2024, 30(2): 221-227.
- YUAN Yuqi, ZHU Jianbing, YU Bin, et al. Analysis and numerical simulation of liquid krypton flow resistance in membrane channel gas-liquid acquisition device [J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2024, 30(2): 221-227.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [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] 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.

(编辑 杜秀杰)