

液体获取装置金属筛网内饱和液氢芯吸性能研究

马原¹, 雷刚², 徐元元², 谢福寿¹, 厉彦忠^{1,2}
(1. 西安交通大学制冷与低温工程研究所, 710049, 西安;
2. 航天低温推进剂技术国家重点实验室, 100028, 北京)

摘要: 为了研究筛网通道式液体获取装置(LAD)对低温液氢推进剂的芯吸管理性能,采用绝热连续多孔介质模型,构建了计入筛网固体与周围气相环境热影响的蒸发修正芯吸模型,并采用液氮过热芯吸实验数据对构建的模型进行了有效性验证。针对常重力竖直芯吸过程,计算获得了绝热、过热条件下 3 种编织密度(200×1 400、325×2 300 和 510×3 600)的荷兰斜纹筛网(DTW)内饱和液氢芯吸速度和芯吸高度的变化,并对比分析了筛网与气相环境过热度对低温芯吸性能的影响规律。结果表明:绝热条件下,筛网编织密度越小,芯吸速度越大,而最大芯吸高度越小;经丝方向芯吸性能始终优于纬丝方向;液氢芯吸过程的热敏感性极强,芯吸速度和最大芯吸高度均随过热度增大而显著衰减,筛网越密性能衰减幅度越大;气相环境过热度对液氢芯吸性能起决定性影响,低温下筛网固体自身的热影响相对微弱。

关键词: 液体获取装置;金属筛网;芯吸性能;液氢

中图分类号: TK121 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202010015 **文章编号:** 0253-987X(2020)10-0124-07



Wicking Performance of Saturated Liquid Hydrogen Within
Metallic Screens of Liquid Acquisition Devices

MA Yuan¹, LEI Gang², XU Yuanyuan², XIE Fushou¹, LI Yanzhong^{1,2}
(1. Institute of Refrigerating and Cryogenic Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. State Key Laboratory of Technologies in Space Cryogenic Propellants, Beijing 100028, China)

Abstract: A modified evaporative wicking model based on the isothermal porous-continuum model is proposed to investigate the liquid wicking management performance of screen channel liquid acquisition devices (LADs) for cryogenic liquid hydrogen propellant. The model takes the thermal effects of both the solid screen and the vapor environment into account and is verified by the liquid nitrogen data of a superheated wicking experiment. For the vertical wicking processes with normal gravity, the development information of wicking velocity and wicking height of saturated liquid hydrogen in Dutch Twill weaves (DTW) with three woven densities (200 × 1 400, 325 × 2 300 and 510 × 3 600) are obtained under isothermal and superheated conditions. The thermal effects of screen solid and gas region on the cryogenic wicking performance are compared. Results show that under isothermal condition, the sparser the screen density is, the higher the wicking velocity and the smaller the maximal wicking height become; the wicking performance in warp direction is always better than that in shute direction; the wicking processes

of liquid hydrogen has strong thermal sensitivity, both the wicking velocity and maximum wicking height remarkably decrease with the increase of superheating degree, and the degradation phenomenon is more significant within a finer mesh; the thermal effect of the gas environment plays a crucial role in the wicking performance of liquid hydrogen, while that of solid screen is very weak at the cryogenic temperature.

Keywords: liquid acquisition device (LAD); metallic screen; wicking performance; liquid hydrogen

液氢、液氧、液态甲烷等低温推进剂具有比冲高、推力大、无毒无污染等显著优势,已经成为未来大型空间任务的首选推进剂。目前各国在研的新型、超重型运载火箭,如重型猎鹰、太空发射系统、安加拉 A7P、“长征”九号等均采用了低温推进系统,以服务于未来登月、登火、土星木星探测等大型任务^[1]。然而,低温推进剂(特别是液氢)存在温度低、沸点低、表面张力小等特殊特性,给其在轨安全管理带来了一系列挑战^[2]。其中,发动机在轨点火、推进剂在轨传输等均需要单相液体推进剂的稳定供给。在轨环境下,重力作用明显削弱,推进剂贮箱内气相与液相无法根据密度差实现上气下液的稳定分层,液相在表面张力作用下具有依附于贮箱壁面和内部结构件表面的趋势,气液相分布具有很大的不确定性,气相区可能接触排液口导致带气排液,从而影响空间系统安全稳定工作甚至引发严重事故,因此必须采取推进剂管理技术对液相进行定位与获取。

对比现有可行的气液分离方案,筛网通道式液体获取装置(LAD)不需要消耗其他能量,能够有效结合毛细力与表面张力实现液体的持续获取,被认为是低温推进剂最理想的全液获取方法^[3]。图 1 为一种典型的筛网通道式 LAD 液体获取过程示意图。各通道在面对贮箱壁面侧安装有一层多孔筛网,该筛网由金属丝编织而成,具有大量微米级孔隙结构,能够依靠表面张力和毛细力芯吸液体。各通道在筛网孔隙被液体芯吸填充至饱和后形成封闭流道,在一定压差(不超过筛网泡破压力)驱动下,润湿的筛网仅允许液体进入集液通道对气相进行阻隔,

以实现液体的单相获取。可见,多孔金属筛网的液体芯吸特性是 LAD 实现和维持气液分离的关键。

Symons 以甲醇和乙醇为实验工质,对 13 种金属筛网的水平和竖直芯吸特性进行了常重力与微重力下的实验,结果显示,微重力下的芯吸过程具有与常重力下芯吸过程相似的规律^[4]。Dodge 等研究了异丙醇(IPA)在多种金属筛网内的水平和垂直芯吸特性,并通过对泡破压力的修正提出了毛细芯吸压力的概念^[5]。Fries 等采用液位观测法和质量测量法对 5 种常温流体沿荷兰斜纹筛网(DTW)编织密度 200×1 400 经纬丝方向的垂直芯吸特性进行了实验研究,通过调节实验腔开度对筛网内液体的蒸发速率进行控制,获得了蒸发作用对芯吸过程的影响规律,并在连续多孔介质模型的基础上引入了对蒸发作用的计算修正^[6]。Hastings 等测试了 IPA 和液氮在不同金属筛网中的芯吸性能,但并未给出详细的低温实验数据^[7]。Hartwig 等通过常温 IPA 水平芯吸实验,得到了 20 多种编织结构和编织密度的金属筛网的有效毛细直径,并与历史数据进行了对比^[8]。Ma 等通过常温绝热芯吸实验测量了 3 种 DTW 密度的多孔结构参数,并在低温液氮实验中发现过热环境下其芯吸性能显著衰减^[9-10]。

目前,筛网芯吸性能的研究仍主要集中于常温区,较少涉及低温流体(特别是液氢)。为了探究 LAD 金属筛网对低温推进剂的芯吸管理性能,本文以饱和液氢为研究对象,通过建立蒸发修正芯吸模型对不同 DTW 筛网密度和过热条件下的芯吸特性开展计算,可为 LAD 性能评估、设计优化以及空间低温系统方案设计提供理论依据和技术参考。

1 模型构建

1.1 绝热芯吸模型

对于绝热工况,通常将结构规则的金属筛网等效简化为一组毛细管束,采用连续多孔介质模型对液体芯吸过程进行数学描述。该模型的主要假设包括:①芯吸界面鲜明,即筛网润湿部分液相完全饱

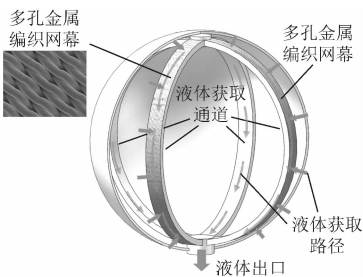


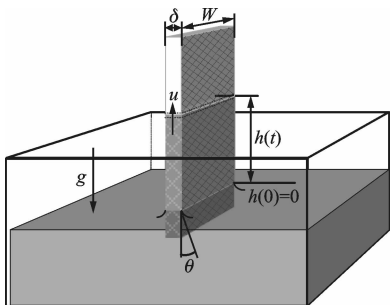
图 1 筛网通道式 LAD 液体获取过程示意

和,未润湿部分完全干燥;②金属筛网对流体不具有吸收性,润湿后不产生膨胀等变形;③筛网具有宏观均匀性,基本结构参数取体积平均值;④液体芯吸流动过程为层流流动^[6,11-12]。

金属筛网液体芯吸引流过程如图2所示,当筛网下端接触液体后,流体以渗流方式在筛网内向上芯吸浸润。液体芯吸界面上升运动的动量方程为

$$\frac{4\sigma\cos\theta}{D_c} = \rho gh + \frac{\mu\phi}{K}hu + \rho \frac{d}{dt}(hu) \quad (1)$$

式中: σ 为流体表面张力; θ 为接触角; D_c 为等效毛细直径; ρ 为流体密度; g 为重力加速度; h 为芯吸高度; μ 为动力黏性; ϕ 为孔隙率; K 为渗透率; u 为液体芯吸速度; t 为时间。式(1)等号左边代表毛细压力的芯吸作用,等号右边三项从左至右依次代表重力、黏性阻力和惯性作用。



δ —筛网厚度(m); W —筛网宽度(m)。

图2 金属筛网液体芯吸引流过程示意图

在重力作用下,液体芯吸高度存在一个最大值,由式(1)中毛细压力与重力的平衡得到

$$h_{\max} = \frac{4\sigma\cos\theta}{\rho g D_c} \quad (2)$$

对于尺寸很小的毛细管结构,入口区域的惯性力作用可以忽略不计^[13]。代入初始条件 $h(t=0)=0$ 求解得到芯吸液位高度随时间的变化关系为^[14]

$$t(h) = -\frac{\mu\phi}{\rho g K}h - \frac{4\sigma\cos\theta\mu\phi}{D_c\rho^2 g^2 K} \ln\left(1 - \frac{D_c\rho g}{4\sigma\cos\theta}h\right) \quad (3)$$

进一步忽略重力作用时,芯吸过程可以简化为

$$t(h) = \frac{\mu\phi}{8\sigma\cos\theta} \frac{D_c}{K} h^2 \quad (4)$$

1.2 蒸发修正芯吸模型的建立

面对低温流体几乎无法避免的相变换热问题,需在绝热模型的基础上引入对芯吸液体蒸发作用的补充修正。Fries等通过定义单位面积蒸发率实现了对液体蒸发作用的量化分析^[6],但该模型需要将实验测得的蒸发量作为计算输入参数,无法实现对未知工况的计算预测。Grebennyuk等提出了计入多孔介质固体热影响的解析计算模型,该模型虽能合

理预测三维结构多孔介质内的蒸发芯吸过程,但忽略了周围气相环境的热影响,无法准确预测具有二维结构特征的筛网芯吸过程^[14]。鉴于筛网厚度很薄,所能容纳的芯吸液体量十分有限,比表面积相比三维结构明显增大,因此筛网表面与气相环境的换热作用不可忽略。本文在前人研究的基础上,综合考虑过热筛网及过热气相环境对芯吸过程的热影响,构建了图3所示的金属筛网一维芯吸计算模型。

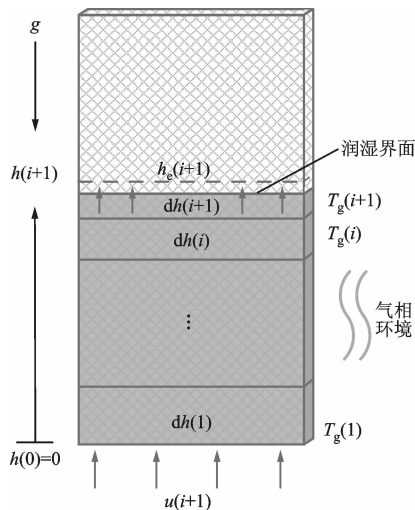


图3 金属筛网一维芯吸计算模型

针对固体筛网、筛网内芯吸液体和周围气相环境三个主要部分沿高度方向划分网格,采用集总参数法和准稳态理论针对每一个固、液、气单元建立质量与能量平衡关系。任意 i 时刻,筛网下端入口流速应该始终满足式(1),表示为

$$u(i) = \left[\frac{4\sigma\cos\theta}{D_c} - \rho gh(i) \right] \frac{K}{\mu\phi h(i)} \quad (5)$$

过热条件下,筛网内芯吸液体在固体筛网和周围气相环境的热影响下不断蒸发,导致一个时间步长的实际液位增长量 $dh(i+1)$ 小于 $u(i)dt$ 。定义蒸发引起的液位高度减少量为 $h_e(i+1)$,那么,整个系统在 $i+1$ 时刻应该满足的质量守恒关系为

$$u(i)dt\delta W\phi\rho = dh(i+1)\delta W\phi\rho + h_e(i+1)\delta W\phi\rho \quad (6)$$

在任一时间步长,筛网固体、周围气相对筛网内液体的总传热量应该等于蒸发液体吸收的总热量,即系统应该满足的能量平衡关系为

$$h_e(i+1)\delta W\phi\rho h_{fg} = Q_{sl}(i+1) + Q_{gl}(i+1) \quad (7)$$

式中: h_{fg} 为气化热; Q 为换热量;角标s、l、g分别为固相、液相、气相。在计算中,假设干燥部分筛网与周围气相具有相同温度,并忽略筛网纵向导热作用。鉴于多孔金属筛网的比表面积非常大,假设过热筛网区域在接触液体后能够立刻被低温液体冷却,瞬

间由初始较高温度 T_s 冷却至液体温度 T_l , 则 $i+1$ 时刻, 芯吸液体与过热筛网的换热量为

$$Q_{sl}(i+1)=dh(i+1)\delta W(1-\phi)\rho_sc_s[T_s(i+1)-T_l]$$

(8)

式中: c 为比热容。对于筛网与周围气相环境之间的换热, 作为大空间竖直平板自然对流换热问题进行分析计算, 并且假设芯吸过程中气相环境温度始终不变。在 $i+1$ 时刻, 周围气相与润湿筛网之间的总换热量为

$$Q_{gl}(i+1)=kA\Delta Tdt=k\cdot 2(\delta+W)h(i)(T_g-T_l)dt$$

(9)

$$k=Nu\lambda/l=C(Gr\cdot Pr)^n\lambda/l$$

(10)

式中: k 为自然对流换热系数; A 为换热面积; ΔT 为过热度(相对于饱和液体温度的温差); Nu 为努塞尔数; λ 为热导率; l 为特征长度; C 为经验系数; Gr 为格拉晓夫数; Pr 为普朗特数; n 为经验系数。根据参考文献[15], 当 $Gr\leq 1.43\times 10^4$ 时, 取 $C=0$; 当 $1.43\times 10^4\leq Gr<3\times 10^9$ 时, 取 $C=0.59, n=0.25$; 当 $3\times 10^9\leq Gr<2\times 10^{10}$ 时, 取 $C=0.029\ 2, n=0.39$; 当 $Gr\geq 2\times 10^{10}$ 时, 取 $C=0.11, n=1/3$ 。温差取气相环境与饱和液体之间的温差, 特征温度取 $(T_g-T_l)/2$, 特征长度取芯吸高度, 流体相关物性查询 NIST 数据库[16]。

表 3 饱和氮、氢热物性参数(101 325 Pa)[16]

流体	相态	T/K	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\mu/(\mu\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu/(\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	$\lambda/(\text{mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$c_p/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\alpha_v/(\text{m}\cdot\text{K}^{-1})$	$\sigma/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$	$h_{fg}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$
氮	液相	77.355	806.1	160.7	0.199	144.8	2.042	5.671	8.880	199.18
	气相		4.612	5.444	1.180	7.188	1.124	14.74		
氢	液相	20.271	70.83	13.50	0.191	100.6	9.729	16.71	1.930	446.07
	气相		1.339	0.990	0.740	16.70	12.03	63.69		

和等效毛细直径并不是各向同性的, 通常以正交的经丝和纬丝方向进行区分, 其中, 经丝方向是指液体芯吸方向与经丝平行。

图 4 给出了过热度梯度为 491.5 K/m 条件下, 液氮过热芯吸高度的实验值与蒸发模型预测值的对比。可以看出, 计算与实验获得的芯吸高度均呈现出先迅速增长后趋于稳定的发展过程。存在误差的主要原因一方面可能来自筛网孔隙率、渗透率等结构输入参数的测量误差, 另一方面可能是未考虑筛网导热及气相环境温度变化等简化假设引起的。总体上, 计算值与实验值具有相同的变化规律, 平均相对误差约为 6%, 可以认为本文提出的计入相变作

2 模型验证

目前, 尚鲜见有关液氢芯吸实验数据的报道, 本文采用文献[1]中的液氮过热芯吸实验对上述模型进行计算验证。实验样本采用不锈钢筛网 DTW, 编织密度为 $200\times 1\ 400$ 。筛网结构参数与热物性参数分别见表 1 和表 2[9-10]。常压饱和液氮热物性参数见表 3, 接触角取 0° [17]。DTW 筛网结构的渗透率

表 1 DTW 筛网结构参数[9]

筛网编织密度	方向	$\delta/\mu\text{m}$	ϕ	$D_e/\mu\text{m}$	$K/\mu\text{m}^2$
200×1 400	经丝	150	0.254	43.26	1.165
	纬丝			47.58	0.544
325×2 300	经丝	88	0.271	30.62	0.444
	纬丝			34.70	0.297
510×3 600	经丝	55	0.315	23.58	0.269
	纬丝			30.20	0.175

表 2 不锈钢筛网的热物性参数[10]

T/K	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
20		13.61	2.169
77	7 930	204.6	7.921
120		317.3	10.10

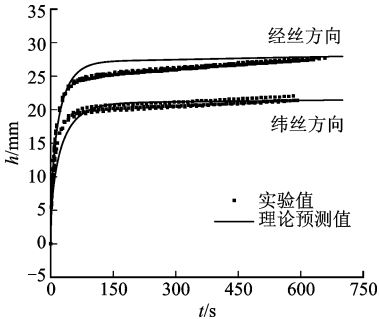


图 4 液氮过热芯吸高度的实验值和理论预测值对比

用的蒸发修正芯吸模型, 能够较为合理准确地预测过热条件下饱和和低温液体在多孔金属筛网内的芯吸过程。

3 结果分析与讨论

以编织密度为 $200\times 1\,400$ 、 $325\times 2\,300$ 、 $510\times 3\,600$ 的不锈钢 DTW 筛网为对象,以物性最为特殊的液氢推进剂液氢为工质,相关物性参数列于表 3。液氢与筛网表面接触角取 0° ^[17],重力加速度取地面重力加速度 9.81 m/s^2 。在评估芯吸性能时,芯吸速度和最大芯吸高度是两个核心性能参数。一般来说,芯吸速度和最大芯吸高度越大,芯吸性能越好。

3.1 液氢绝热竖直芯吸性能

表 4 列出了由式(2)计算得到的常压饱和液氢在各筛网结构内的最大芯吸液位高度。图 5 给出了不同筛网内芯吸液位高度随时间的变化。由于 $h_{\max}$ 附近芯吸速度十分缓慢,很难界定达到 $h_{\max}$ 的准确时间,因此本文统一取 99% $h_{\max}$ 对应时间为 $t_{\max}$ 。在图 5 中,为了更加直观地对比芯吸发展过程,仅展示了 $t_{\max}$ 内的计算数据。

表 4 液氢在不同筛网密度下最大芯吸高度

筛网编织密度	方向	$h_{\max}/\text{mm}$
$200\times 1\,400$	经丝方向	256.2
	纬丝方向	233.0
$325\times 2\,300$	经丝方向	362.8
	纬丝方向	320.2
$510\times 3\,600$	经丝方向	471.2
	纬丝方向	367.9

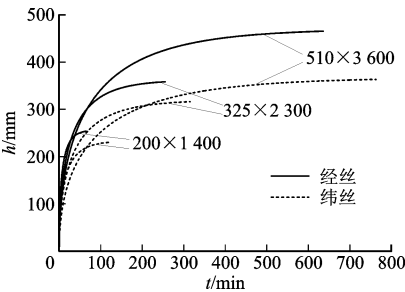


图 5 不同筛网内饱和液氢绝热芯吸液位高度随时间的变化

从图 5 可以看出,针对不同筛网编织密度和芯吸方向,6 组数据均呈现出相似的上凸曲线形状。芯吸液位高度始终在初期增长迅速,随后逐渐减缓并最终趋于稳定。对比不同筛网密度的芯吸数据发现,随着筛网密度增加,最大芯吸高度不断增大而初期芯吸速度逐渐降低。结合表 1,筛网密度越大,等效毛细直径越小,产生的芯吸压力越大,最大芯吸高度越高。然而,精密筛网的渗透率也相对更小,体现

出对芯吸流动更大的阻力,从而导致流体芯吸速度的降低。3 种密度的 DTW 在经丝方向达到最大芯吸高度 99%所需的时间分别在 64.5、255、636 min 左右,纬丝方向对应的时间分别为 126、316、737 min 左右。结合表 1 数据,3 种密度的 DTW 筛网均在经丝方向具有更小的等效毛细直径和更大的渗透率,表现为沿经丝方向的芯吸速度始终更大,且能够在更短的时间内达到更高的最大芯吸高度,呈现出优于纬丝方向的芯吸性能。

3.2 液氢过热竖直芯吸性能

图 6 给出了不同过热度条件下,饱和液氢在 DTW 密度 $200\times 1\,400$ 内沿经丝方向的芯吸高度变化。可以看出,液氢芯吸过程对过热度十分敏感,仅在 0.1 K 过热度下,最大芯吸高度由绝热条件下的 256 mm 迅速衰减至不到 140 mm,衰减幅度接近 46%;随着过热度的增加,芯吸过程将在更短的时间内达到稳定,且最大芯吸高度更低。在 DTW 密度 $200\times 1\,400$ 纬丝方向,以及 $325\times 2\,300$ 和 $510\times 3\,600$ 经、纬丝方向的其他 5 组芯吸计算数据,均呈现与图 6 相似的发展规律。

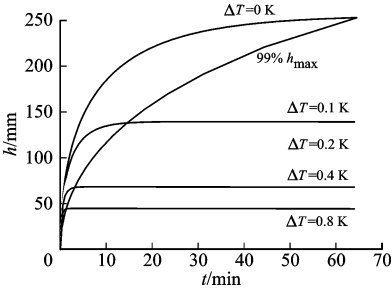


图 6 不同过热度下液氢蒸发芯吸高度变化

图 7 为饱和液氢在 3 种筛网密度最大芯吸高度随过热度的变化。当过热度为 0~0.1 K 时,即由绝热条件转变为过热条件的过程中,最大芯吸高度显著衰减。随后,过热度水平的等差增长所引起的最大芯吸高度的衰减相对平缓。

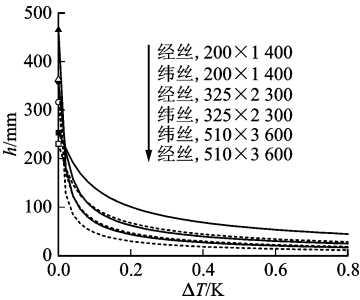


图 7 最大芯吸高度随过热度的变化规律

对比 3 种 DTW 筛网编织密度不同方向的过热

芯吸特性发现,经丝方向的最大芯吸高度始终高于纬丝方向,且在相同过热度下的衰减更小。对比不同筛网内沿相同方向的芯吸数据发现,随着筛网密度的增加,相同过热度变化引起的芯吸性能衰减更加显著。也就是说,较粗筛网的芯吸性能对过热度条件具有更稳定的适应性,通常具有更好的过热芯吸性能。相对于绝热工况,过热度为 0.8 K 时,6 组数据的最大芯吸高度衰减幅度均超过了 80%;DTW 密度 200×1 400 经丝方向的衰减幅度最小,约为 82.3%;DTW 密度 510×3 600 纬丝方向的衰减幅度最大,超过 96.8%。造成这一现象的主要原因是,虽然 DTW 510×3 600 最密,等效毛细直径最小,所产生的芯吸动力最强,体现为绝热条件下最优的最大芯吸高度,但是,筛网越密所采用的金属丝径越细,DTW 510×3 600 厚度仅为 DTW 密度 200×1 400 的 1/3 左右(见表 1),单位高度内饱和芯吸液体量明显减小,更容易在热影响下蒸干,对热影响的敏感性更大。

3.3 筛网与气相环境热影响分析

过热条件下筛网内芯吸液体受到的热影响主要来自两部分:筛网固体结构和气相环境。图 8 给出了过热度 0.1 K,饱和液氢沿 DTW 200×1 400 经丝方向芯吸过程中的换热量。可以看出,芯吸液体与筛网的换热量始终远远低于与气相环境的换热,在初期换热强度最大,随后迅速衰减至 0。这主要是因为,金属筛网厚度很薄,且在液氢温区的比热容很小,所储存的热量十分有限,所以与低温芯吸液体换热后,将被迅速冷却至液体温度而不再对芯吸过程产生热影响。

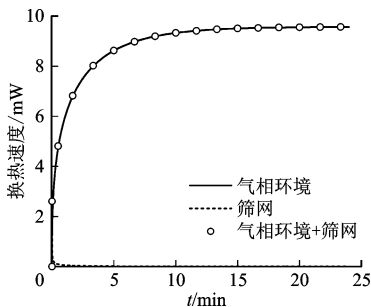


图 8 气相环境与筛网过热度 0.1 K 对芯吸过程的热影响对比

图 9 给出了在气相环境温度与液相饱和温度相同,仅筛网处于过热条件的设计工况下,饱和液氢沿 DTW 200×1 400 经丝方向的芯吸过程曲线。可以看出,过热度为 1 K 时的芯吸曲线十分接近绝热工况,过热度 10 K 所引起的芯吸性能偏差也十分有

限,进一步说明了筛网过热度对芯吸过程的热影响相对很小。不同过热度下芯吸均能达到绝热工况对应的最大芯吸高度,只是达到该值的时间随着过热度的增加而延长。也就是说,过热筛网的热影响仅能引起芯吸速度的降低,而不会改变芯吸过程的最终状态,与图 8 的换热分析一致。

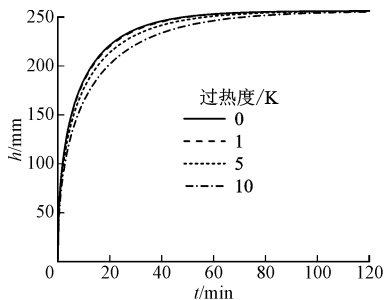


图 9 筛网过热度对芯吸过程影响情况

当气相与筛网具有相同的过热条件(如 0.1 K)时,过热度引起的芯吸性能显著衰减主要取决于气相环境的热影响(见图 6 和图 9),图 8 中总换热和气相环境换热基本一致的数据也能够验证这一规律。另外,图 8 显示,在芯吸过程达到稳定时,筛网传热作用为,总换热等于气相环境的换热。也就是说,蒸发芯吸所能达到的最大芯吸高度只受到气相环境的热影响。当芯吸压力与重力作用、气相热影响相平衡时,即筛网下端液体入口流量与气相热影响引起的筛网内芯吸液体蒸发速率相等时,芯吸高度达到稳定。结合式(1)(7)和(9),蒸发芯吸过程的最大芯吸高度可以通过式(11)计算。

$$\left(\frac{4\sigma\cos\theta}{D_c} - \rho g h_{\max} \right) \frac{K}{\mu\phi h_{\max}} \delta W \phi \rho = \frac{k \cdot 2(\delta + W) h_{\max} \Delta T}{h_{ig}} \quad (11)$$

当过热度为 0 时,式(11)则转化为绝热工况对应的最大芯吸高度计算式(2)。

4 结 论

(1)经过液氮过热芯吸实验数据验证,本文提出的计入筛网固体与周围气相环境热影响的蒸发修正芯吸模型能够对多孔筛网内低温流体芯吸过程进行合理预测,平均相对误差不超过 10%,为 LAD 性能分析与设计优化提供了理论支持。

(2)绝热条件下,针对 DTW 200×1 400、325×2 300 和 510×3 600 密度的筛网,筛网越密,渗透率和等效毛细直径越小,表现为芯吸速度的降低和最大芯吸高度的增大。沿经丝方向的芯吸速度和最大

芯吸高度始终大于纬丝方向,体现出更好的芯吸性能,建议 LAD 筛网以经丝方向沿通道轴线布置。

(3)过热条件下,芯吸速度和最大芯吸高度均明显衰减,且筛网越密衰减幅度越大。相同过热度条件下,筛网结构自身的热影响十分有限,芯吸性能几乎只取决于气相环境的热影响。在 LAD 设计校核时,需要重点考虑贮箱内气枕区域的热条件。

(4)芯吸速度受气相和筛网过热度的综合影响,最大芯吸高度仅取决于气相环境的热影响。式(11)可对过热条件下筛网内最大芯吸高度进行计算预测,可用于快速预估不同流体、筛网结构、过热度 and 重力水平下筛网内最大芯吸高度。

参考文献:

- [1] 秦旭东, 容易, 王小军, 等. 基于划代研究的中国运载火箭未来发展趋势分析 [J]. 导弹与航天运载技术, 2014, 1: 1-5.
QIN Xudong, RONG Yi, WANG Xiaojun, et al. Development tendency analysis based on the research of Chinese launch vehicles generation [J]. Missiles and Space Vehicles, 2014, 1: 1-5.
- [2] 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 refilling technologies and schemes of cryogenic propellants [J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(3): 245-252.
- [3] 马原, 陈虹, 邢科伟, 等. 低温推进剂筛网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 on performance of screen channel liquid acquisition device for cryogenic propellants [J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(3): 1-7.
- [4] SYMONS E P. Wicking of liquids in screens[R/OL]. (1974-05-01) [2020-01-30]. <http://www.nttrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.nttrs.nasa.gov/19740013824.pdf>.
- [5] DODGE F T. The new “dynamic behavior of liquids in moving containers” [M]. Antonio, Texas, USA: Southwest Research Institute, 2000: 97-104.
- [6] FRIES N, ODIC K, CONRATH M, et al. The effect of evaporation on the wicking of liquids into a metallic weave [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 321(1): 118.
- [7] HASTINGS L J, BOLSHINSKIY L G, SCHUNK R G, et al. Thermal integration of a liquid acquisition device into a cryogenic feed system[R/OL]. (2011-11-01) [2020-01-30]. <http://www.nttrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.nttrs.nasa.gov/20110023649.pdf>.
- [8] HARTWIG J, DARR S. Influential factors for liquid acquisition device screen selection for cryogenic propulsion systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 66(1): 548-562.
- [9] 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.
- [10] MA Yuan, ZIMNIK D, DREYER M, et al. Investigation on cryo-wicking 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.
- [11] MASOODI R, PILLAI K M. Wicking in porous materials: traditional and modern modeling approaches [M]. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2012: 31-130.
- [12] DULLIEN F A L. Porous media: fluid transport and pore structure [M]. San Diego, USA: Academic Press, 2012: 6-20.
- [13] FRIES N, DREYER M. The transition from inertial to viscous flow in capillary rise [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 327(1): 125-128.
- [14] GREBENYUK Y, DREYER M E. Wicking of liquid nitrogen into superheated porous structures [J]. Cryogenics, 2016, 78: 27-39.
- [15] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 267-271.
- [16] NIST Chemistry WebBook. NIST standard reference database number 69 [DB/OL]. (2011-01-01) [2019-08-23]. <http://www.webbook.nist.gov/chemistry/>.
- [17] 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.

(编辑 亢列梅)