

液氢管路输运中静电积聚机理与 电流密度分布特征研究

孙文豪¹, 刘红宝², 王磊¹, 卿子友², 李卓伦¹, 马原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. 上海宇航系统工程研究所, 201109, 上海)

摘要: 针对液氢管路输运过程中, 静电积聚机理及电流密度分布特征不明而导致的安全风险评估挑战, 通过数值模拟方法, 揭示该过程的静电积聚规律。通过构建流场、电荷场、静电场等多物理场耦合仿真模型, 研究了管内近壁区域速度、电荷密度、电流密度等分布特性。通过定义电流密度边界层, 分析了其厚度变化规律及影响因素。与实验结果对比, 所建立模型误差小于 4.14%。研究表明: 由于双电层的存在, 近壁面和主流区电荷密度呈现显著差异。在液氢管流电流密度构成中, 相较于传导项和扩散项, 对流项贡献占主导, 且电流密度在发展过程中存在分层现象并呈现由厚减薄的演化规律。液氢中, 根据双电层各结构和速度边界层各结构厚度相对大小的依次增大, 可分为紧密层、层流底层、扩散层和湍流边界层。此外, 静电势在管道中心轴线处最大, 越接近壁面其梯度越大, 电场强度也越大; 在更长管道中, 中心轴线处的静电势呈线性增长。该研究可对液氢管路输运系统的优化与安全防护提供理论支撑。

关键词: 液氢管路输运; 静电积聚; 电流密度边界层; 数值模拟

中图分类号: V511 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202606018 **文章编号:** 0253-987X(2026)06-0213-10

Study of the Mechanism of Electrostatic Accumulation and Current Density Distribution Characteristics During Liquid Hydrogen Pipeline Transportation

SUN Wenhao¹, LIU Hongbao², WANG Lei¹, QING Ziyu², LI Zhuolun¹,
MA Yuan¹, LI Yanzhong¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

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

Abstract: To address safety risk assessment challenges arising from unclear mechanisms of electrostatic accumulation and undefined current density distribution characteristics during liquid hydrogen pipeline transportation, the laws of electrostatic accumulation during transportation were revealed by numerical simulation. A multiphysics coupling simulation model comprising the flow field, charge field, and electrostatic field was established to explore distribution characteristics of velocity, charge density, and current density of the near-wall region inside the pipe. A current density boundary layer was defined to analyze its thickness variation law and influencing factors.

收稿日期: 2025-09-12。 作者简介: 孙文豪(1997—), 男, 硕士生; 王磊(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 装备预先研究专用技术资助项目(3050608)。

网络出版时间: 2025-12-31

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20251231.0908.002>

Validation against experimental data indicated that the error of the established model was less than 4.14%. The study results showed that, owing to the presence of an electric double layer, charge densities in the near-wall region and the main flow region differed markedly. In the composition of current density in the liquid hydrogen pipe flow, the convective term was shown to dominate over the conductive and diffusive terms, and a layered distribution of current density was observed during development, characterized by progressive thinning of the layer. During liquid hydrogen flow, there included a compact layer, a laminar sublayer, a diffusion layer, and a turbulent boundary layer based on the principle that the relative thicknesses of the structures for the electric double layer and the velocity boundary layer grow in order. Besides, electrostatic potential was found to be maximal at the central axis of the pipeline and its gradient (hence electric field intensity) increased toward the wall; the electrostatic potential at the central axis of longer pipelines exhibited linear growth. The study is expected to provide theoretical support for optimization and safety protection of liquid hydrogen pipeline transportation systems.

Keywords: liquid hydrogen pipeline transportation; electrostatic accumulation; current density boundary layer; numerical simulation

液氢具有能量密度高、燃烧特性好等优势^[1],在航空、航天、能源等领域应用广泛。为了实现液氢的安全输运,相关标准对液氢流速进行了严格限制^[2]。分析认为:液氢输运过程中的静电积聚可能是限制液氢高速传输的主控机制之一。此外,液氢极低的电导率,会造成电荷不易在液氢中扩散,从而形成电荷积聚,产生潜在的静电放电危害。将来,提高输氢速度是减小输氢管路尺寸、实现管路紧凑化、提高加氢流量的主要途径。为了促进液氢的安全高效输运,迫切需要掌握液氢管内流动电气化的内在机理和流动静电的电荷输运机制。

在液氢管流输运、转注和长期贮存中,因静电引发的安全问题多有报道^[3],但目前对其放电条件、流动静电安全边界的研究相对较少。学者们主要以常温绝缘油、烃类液体为研究对象,进行了较为系统的流动静电分析。法国学者 Touchard 等^[4]通过对管路壁面电位的测量,将电位波动与流体域荷电演化特征相联系,建立了两者间的相关关系。研究表明:管壁的电位波动是压力波动对固液界面双电层扰动的一种宏观表征。这为评估介电流体流动荷电现象提供了实用性指标。Touchard 等^[5]还将固-液界面处流动带电现象归结为管壁发生的腐蚀电化学反应,并计算了从管壁到液体的净电荷通量。该模型有助于揭示起电机理。另外,基于壁面腐蚀理论,Touchard 等^[6]将模型拓展到湍流工况,分析了湍流中电荷的行为特征。随后,以烃类液体为对象,提出了适用于低温工质液化天然气和液氮的流动静电积聚模型^[7]。然而,针对液氢的模型验证未取得预期

效果^[8],该结果也表明了液氢流动静电问题的特殊性。Cabaleiro 等^[9]、Leblanc 等^[10]基于壁面腐蚀模型,对常温烃类介电流体通过不同管路结构的流动荷电量、电荷密度等计算模型进行了验证和优化。Calero 等^[11]提出了流体流动带电问题的计算框架。在此基础上,通过直接数值模拟^[12]、大涡模拟^[13]方法研究了湍流强度对带电粒子输运、电荷量的影响,并讨论了电荷积聚过程的演变特征。Zmarzly^[14]针对绝缘流体流动中的过充电现象给出了电荷分布结构,并推导了层流和湍流中,冲流电流、电荷密度径向分布解析式。在绝缘油管内的流动冲流电流实验中^[15],受限于测量探头尺寸,虽无法验证近壁处的过充电现象,但证明了冲流电流径向分布的明显差异性。随后,在对圆管内湍流流动带电研究中^[16],给出了层流底层、缓冲层和湍流层内电流分布的解析式。该模型与先前实验结果较为一致,但未明确壁面处电流密度的急剧变化及突变的原因。国内学者也对燃油、绝缘油等工质的流动静电问题开展了初步研究^[17-19]。以双电层理论为基础,通过解析求解、数值模拟等手段,探讨了不同流态下,电荷密度、冲流电流的分布规律,但对电流密度不均匀分布未给予足够关注。也有学者对包括液氢在内的多种低温工质的流动电荷分布、冲流电流等展开了分析和讨论^[20-21]。需要说明的是,相较于油品,液氢极低的电导率和较小的运动黏度,将导致静电荷的不均匀分布更为剧烈。这也致使以冲流电流表征整个流域内的静电强度将有失偏颇。当液氢荷载固空、固氧杂质时,流动静电危险性将进一步增大^[22-23]。

综上所述,已有学者开始关注液氢管流静电问题,并从双电层、速度边界层等角度出发,对液氢管流静电的电流密度分布开展了分析讨论,但对多场耦合作用中电流密度的演化规律关注不足。理论建模与数值仿真等方法在常温流体静电研究中获得了成功应用,但欠缺针对液氢等特殊低温流体管流静电机制与规律的研究结论。为此,本文聚焦于液氢管路传输中,静电积聚的特殊规律,重点分析近壁处双电层、速度边界层对电荷输运行行为的耦合作用。通过对速度、电荷密度分布的解析,研究电流密度不均匀分布的成因和演化规律。本文研究工作可对液氢管路传输结构设计与安全防护提供理论支撑。

1 数值模型建立

液氢管流中,因流体与壁面摩擦,以及固-液界面处,两种材料间的物性差异,会产生荷电现象,即流体或壁面带电现象。本文针对液氢输运中,静电的产生和积聚过程,建立流场-电荷场-静电场多物理场耦合仿真模型,并展开静电积聚与分布的仿真预测研究。

1.1 液氢流动荷电模型

液氢在管内的流动采用连续方程与动量方程进行描述,其表达式为

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

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u}$ 为速度矢量; ρ 为液氢密度; p 为液氢压力; ν 为液氢运动黏度; $\mathbf{f}$ 为体积力,包括重力和由感应电场施加的洛伦兹力。在水平管流中,与流体的黏性力相比,重力可忽略;洛伦兹力在德拜长度达到管道半径尺度时才予以考虑,故电磁效应也可忽略。因此,本文研究中,假设 $\mathbf{f} = 0$ 。

电荷守恒方程表达式为

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{J} = \rho_e \mathbf{u} - D \nabla \rho_e + \sigma \mathbf{E} \quad (4)$$

式中: ρ_e 为电荷密度; $\mathbf{J}$ 为电流密度; σ 和 $\mathbf{E}$ 分别为液氢的电导率和电场强度; D 为扩散系数。式(4)描述了电流密度的构成,将电荷的平均漂移速度,即电荷宏观上定向移动速度等效为流体输运速度。电流密度在稀物质传递前提下由3部分组成,包括对流项、扩散项和传导项。将式(4)代入式(3),对定常不可压缩流动,可得表达式为

$$\mathbf{u} \cdot \nabla \rho_e - \nabla \cdot (D \nabla \rho_e) + \nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}) = 0 \quad (5)$$

静电学中,根据高斯定理可得表达式为

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}) = \rho_e \quad (6)$$

式中: ϵ_0 和 ϵ_r 分别为真空介电常数和液氢相对介电常数。其中, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$, 在无外界高压电场时,流体介电常数可取定值。

通过场强和电势的关系,可得泊松方程为

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (\nabla \varphi) = -\frac{\rho_e}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (8)$$

式中: φ 为静电势。

结合式(5)、(7)、(8),可得绝缘流体稳定流动时的电荷守恒方程为

$$\mathbf{u} \cdot \nabla \rho_e - \nabla \cdot (D \nabla \rho_e) + \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon_r} \rho_e = 0 \quad (9)$$

$$D_m = \kappa \frac{k_B T}{e_0} \quad (10)$$

式中: D_m 为分子扩散系数; κ 为离子迁移率; k_B 为玻尔兹曼常数, 设为 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为温度; $e_0 = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$, 为元电荷。

扩散系数的表达式为

$$D = D_m + D_t \quad (11)$$

式中: D_t 为湍流扩散系数。

电导率计算式为

$$\sigma = \frac{2c_0 e_0 F D_m}{k_B T} \quad (12)$$

式中: c_0 是电中性时流体中电荷的体积摩尔分数; F 为法拉第常数, 值为 $96485.34 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

1.2 壁面起电模型

将流动引起的壁面电荷分离现象比拟为一种壁面放电反应,其表达式为

$$\left. \frac{\partial \rho_e}{\partial r} \right|_w = C_f \frac{F c_0}{\delta_d} \quad (13)$$

式中: r 管道半径; C_f 为修正壁面材料、粗糙度等因素所提出的修正因子; δ_d 为扩散层厚度; $\left. \frac{\partial \rho_e}{\partial r} \right|_w$ 为壁面处电荷密度径向梯度。其中, δ_d 的表达式为

$$\delta_d = \frac{d_h}{Nu} \quad (14)$$

式中: d_h 为水力直径, $d_h = 2r$; Nu 为努塞尔数, Nu 可由传质关联式给出。

Deissler^[24] 基于充分发展假设进行了高施密特数 Sc 下传热传质关联式的修订, Koszman 等^[25] 在此基础上对高、低电导率这2种情况下的适用性进行了讨论,并给出 $Nu = 0.0223 Re^{7/8} Sc^{1/4}$ 。考虑低温流体在流动发展阶段,速度、黏度等对静电荷运输的影响,本文采纳 Walmsley^[26] 对 Koszman 模型的

分析,对速度相关项,即雷诺数指数进行参数化处理。因此,低电导率下 Nu 的关联式为

$$Nu = 0.022 3 Re^n Sc^{1/4} \quad (15)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (16)$$

式中: Re 为雷诺数; Sc 为施密特数; 系数 n 根据实验确定,与流体种类相关,取值范围为 $0 \sim 1.25$ 。

1.3 模型设置

本文选取长度分别为 1 m 和 20 m , 半径为 10 mm 的水平管道为对象,探究液氢管流静电积聚规律。液氢相关物性参数见表1所示。本文采用 COMSOL Multiphysics 软件建立输氢管路的二维轴对称模型;对流场采用雷诺时均形式下的 $k-\omega$ 模型。计算中,该湍流模型可通过近壁面网格的加密,直接积分到壁面,从而实现精确解析速度边界层的目的。

表1 液氢相关物性参数

Table 1 Relevant physical property parameters of liquid hydrogen

参数	数值
流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	70.899 ^①
运动黏度/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	$1.909 7 \times 10^{-7}$ ①
相对介电常数	1.230 7 ^①
电导率/($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	4.988×10^{-18} ②
离子迁移率/($\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	7.00×10^{-7} ②
温度/K	20.324 ^①

①来自 NIST-REFPROP 数据库^[27]。

②引自文献^[21]。

由式(16)可知, Sc 为运动黏度与分子扩散系数之比。当流动为层流时,该系数变化范围较宽。当流动为湍流时,定义为 Sc_{tf} 。由于湍流脉动在动量交换和物质交换中起主导作用,故在湍流相关研究中取值在 $0.5 \sim 1$ 之间。在 $k-\omega$ 模型中,有如下关系

$$\nu_t = \frac{k}{\omega} \quad (17)$$

$$Sc_{\text{tf}} = \frac{\nu_t}{D_t} \quad (18)$$

式中: k 为湍动能; ω 为比耗散率; ν_t 为湍流运动黏度。

湍流扩散系数多以半经验公式,根据距离壁面的高度,按分段形式给出^[4,17]。由于相关的模型仅描述了充分发展流动时的湍流扩散系数分布,且在分段点处存在不连续和不可导的情况,导致对液氢流动荷电过程发展的描述存在局限性。流动起电过程中,在流动未充分发展阶段,固-液壁面处和主流

区因扰动使得电荷的扩散和输运显著。仿真中令 $Sc = 1$,即以 ν_t 代替 D_t 描述流动荷电过程中扩散作用。将 1 m 长管道等距分为 10 段,图1展示了该仿真工况中,湍流运动黏度的发展过程。由图可知,湍流运动黏度可分为入口段和发展段,并在相对较短的距离内达到稳定分布。贴近壁面处存在因黏性导致的层流底层,湍流运动黏度接近趋近于 0 ,这与层流底层中,电荷扩散是由分子扩散作用为主导相契合。同时,湍流运动黏度在层流和湍流过渡区迅速上升并在湍流核心区基本保持恒定,这与文献^[4]的半经验解析公式基本一致。

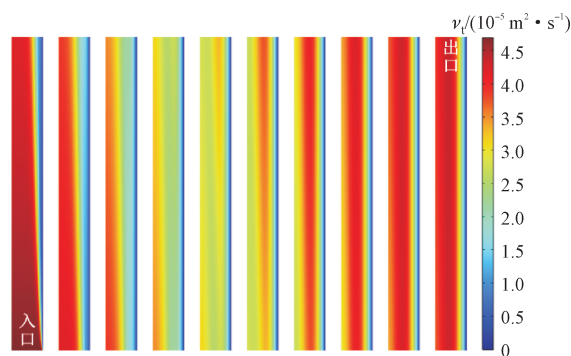


图1 湍流运动黏度的分布

Fig. 1 Turbulent kinematic viscosity distribution

1.4 边界条件设置

图2给出了流场、电荷场和静电场的边界条件。图中: L 为管道长度; $\mathbf{u}_{\text{in}}$ 为入口速度矢量; $\rho_{e,\text{in}}$ 为入口电荷密度; p_{out} 为出口压力; p_0 为大气压; $\mathbf{u}_w$ 为壁面处速度矢量; φ_w 为壁面处的电势; $\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\text{in}}$ 为入口法向电势; $\frac{\partial \rho_e}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\text{out}}$ 为出口法向电荷密度; $\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\text{out}}$ 为出口法向电势。

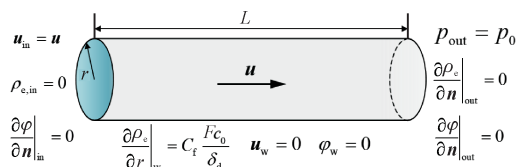


图2 仿真模型边界条件设置

Fig. 2 Boundary condition settings of the simulation model

由图可知,对于流场,采用速度入口和压力出口边界,并设置抑制回流约束;壁面为无滑移边界 ($\mathbf{u}_w = 0$),并采取网格逐步加密,以期实现对近壁面处的精确解析。对电荷场,入口为零电荷密度,出口设置为无扩散通量;壁面基于起电模型设置为第二类边界条件。对于静电场,入口和出口设置为 0 电势梯度,壁面设置接地条件 ($\varphi_w = 0$)。

1.5 模型验证

在管道长度为1 m、半径为10 mm、流速为1 m/s的工况中,对整个管路内的流体计算域采用矩形网格,并径向设置网格过渡区以对近壁区网格实现逐步加密,并通过电荷密度评价网格无关性,结果如图3所示。由图可知,采用网格数为 26.25×10^4 的模型可以满足要求。

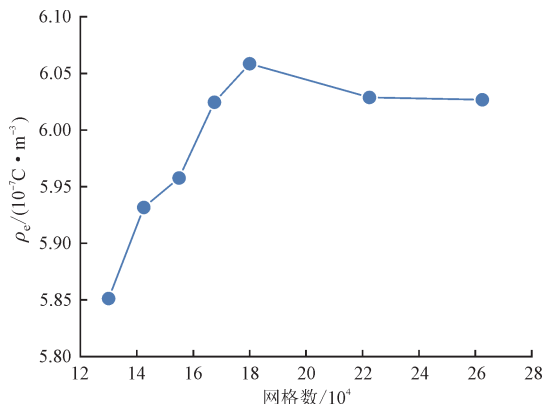


图3 网格无关性验证

Fig. 3 Mesh independence verification

针对液氢管流静电积聚模型,本文选用前期已开展的液氢流动静电实验数据作为验证依据^[28],对比结果如图4所示。文献[28]中的实验报道了液氢在管径为4 mm、长度为1 m的水平管道中,不同流速下的电荷密度测量值。经验证,仿真结果相较于实验最大误差为4.14%,故本文所构建模型能够表征液氢流动静电积聚规律。

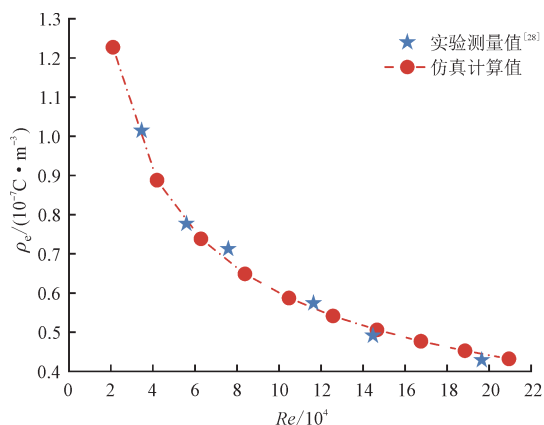


图4 液氢流动静电积聚数值模型验证

Fig. 4 Validation of numerical model for electrostatic accumulation in liquid hydrogen flow

2 结果与讨论

2.1 速度和电荷密度分布

图5展示了不同位置处截面速度的径向分布。

其中, x 表示沿管路的轴向取截面的不同位置。由图可知,速度自壁面处开始逐渐增长,在边界层内,速度梯度显著大于主流区。由于图中近壁面速度近似线性分布,故认为液氢湍流流动中的层流底层速度可获得精确计算。另外,从图中可知,在 $x=0.5$ m处及之后的截面速度分布趋于一致,可认为从该位置开始,管内速度已得到充分发展。

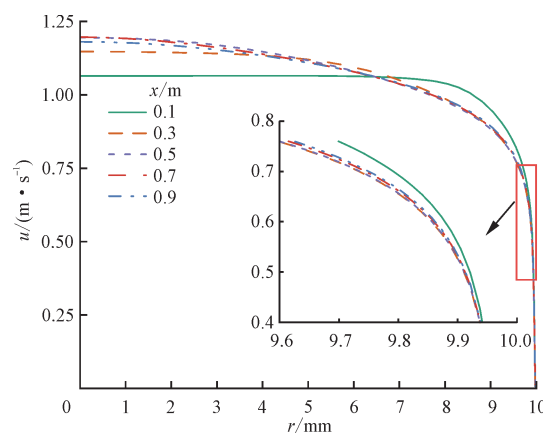


图5 不同位置处截面的速度

Fig. 5 Velocity of cross-sections at different positions

不同位置处截面电荷密度沿径向的分布如图6所示。可以看出,在同一截面内,固-液界面处由摩擦等作用产生电荷源头,其电荷密度在流动初始阶段显著高于主流区,分别在 10^{-7} 和 10^{-9} $\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$ 量级。当固液界面的两种材料确定后,稳态情况下,双电层的相对厚度也就由该两种材料的物性确定,故不同截面电荷密度在近壁面处呈现集中分布。

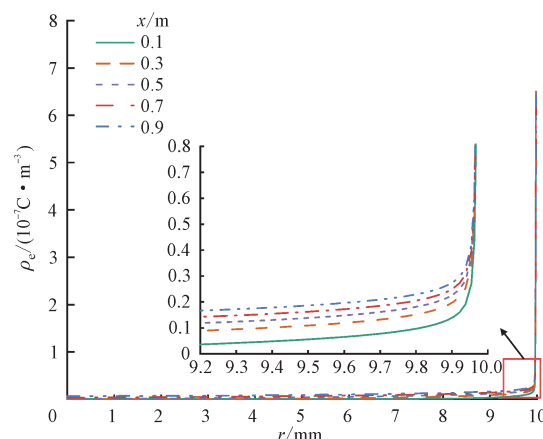


图6 不同位置处截面的电荷密度

Fig. 6 Charge density of cross-sections at different positions

尽管壁面处电荷密度呈现出几乎重叠的分布,但下游壁面的电荷密度仍高于上游壁面的电荷密度,这是因为电荷随流动向下游积聚。此外,更高的电荷密度为电荷的传导提供了可能。液氢虽电导率极低,但相对于主流区,近壁处的电荷传导作用仍相对更高。近壁面处的双电层极薄,电荷在该尺度下的运动由分子扩散作用主导。对于主流区,虽电荷密度相对较低,但由局部放大图可知,随流动的进行,电荷不断向下游累积。若管道足够长,电荷密度在轴向会得到充分发展,电荷将在下游的不断累积中达到饱和。

2.2 电流密度分布与发展

电流密度描述了单位截面内的电流强度,可反应导体内部电荷定向运动的强度和方向。电流密度在稀物质传递下由 3 部分组成,分别为对流项、扩散项和传导项,其表达式为

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_{\text{conv}} + \mathbf{J}_{\text{diff}} + \mathbf{J}_{\text{cond}} = u\rho_e - D\nabla\rho_e - \sigma\nabla\varphi \quad (19)$$

式中: $\mathbf{J}_{\text{conv}}$ 、 $\mathbf{J}_{\text{diff}}$ 、 $\mathbf{J}_{\text{cond}}$ 分别为电流密度的对流项、扩散项和传导项。

2.2.1 传导项

为清晰探究流动静电过程中,电荷运动的竞争机制,对 3 种作用分别讨论。传导项电流密度分布如图 7 所示。因液氢电导率极低,传导作用对于电流密度的贡献相较于其他 2 种机制存在显著差别。其总体数量级更低,最小值为 $4.5 \times 10^{-20} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$,最大值为 $3.0 \times 10^{-17} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

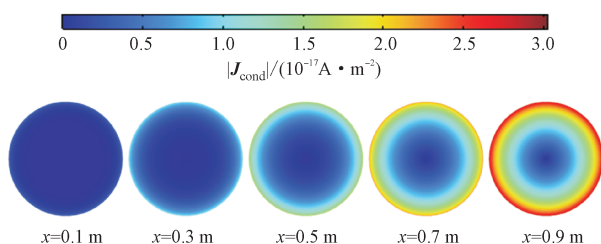


图 7 不同位置处截面的传导项电流密度分布

Fig. 7 Current density distribution of conduction term of cross-sections at different positions

由图 7 可知,近壁面双电层的存在使得传导作用在该区域相较于主流区更为明显。由于黏性底层对流动的滞止作用,在黏性底层内,电荷的输运则需要依靠扩散和传导 2 种作用。初始时刻,由于电荷密度低,主要依靠扩散迁移,传导则伴随着电荷的积聚而逐渐发展。这也是液氢流动静电过程需要较长距离来满足发展的原因。随着电荷在下游的不断积聚,电荷不均匀分布也必然导致液氢的电导率发生

变化,即从均匀电导率演变为非均匀电导率。传导作用也将近壁面甚至更长管道的下游主流区得到强化,成为冲流电流达到饱和的条件之一,即电荷在近壁面与主流区之间、流体域与壁面之间达到传导平衡。

2.2.2 扩散项

扩散项电流密度分布如图 8 所示,其贡献相较于传导项更大。从各截面的径向来,近壁面区域仍占据主导,这与电荷密度的不均匀分布直接相关;从轴向来看,扩散项电流密度逐渐向中心轴线增长,最小为 $2.5 \times 10^{-15} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$,最大为 $8.3 \times 10^{-11} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。可以预见,在更长的管道中,中心轴线处必将受到扩散作用的显著影响。随着静电积聚效应的持续,电荷达到扩散作用下的平衡,同样也是冲流电流达到饱和的条件之一,即径向、轴向上将不存在电荷密度梯度。对于电荷扩散的输运作用,在下游可分为双电层区域内主导的分子扩散和主流区主导的湍流扩散。根据双电层理论,斯特恩双电层模型由贴壁处的紧密层和扩散层组成。扩散层内,电荷通过分子扩散作用参与径向和轴向的扩散迁移。从扩散层迁移出的电荷,由于湍流扩散作用相较于分子扩散作用而言强度更高,电荷迅速扩散到主流区。在流动静电发生的初期,对于电荷的输运机制,扩散作用作为连接微观和宏观的桥梁,使得电荷在短时间内得以在更广泛的区域内运动。扩散作用成为电荷下一步参与对流输运的前提条件。

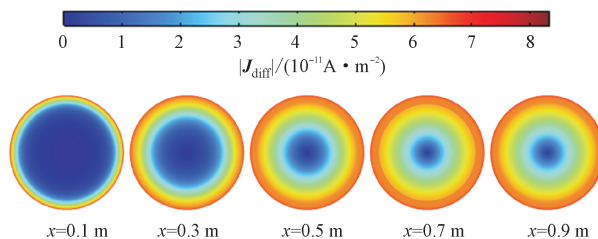


图 8 不同位置处截面的扩散项电流密度分布

Fig. 8 Current density distribution of diffusion term of cross-sections at different positions

2.2.3 对流项

通过扩散作用被运出黏性底层直至主流区的电荷,将进一步通过对流作用成为电流密度的主要贡献项,其分布如图 9 所示。不同截面电流密度随电荷的不断积聚,在 0.8 m 长的距离内,电流密度由 $10^{-13} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 迅速增长到 $10^{-8} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$,增长率达到 $10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^{-3}$ 。从分布云图可知,相比于对流项,传导项、扩散项对整体电流密度的贡献可忽略。因此,在后续讨论中,将不再区分总电流密度和对流电流密度。在同一截面中,流动主体区的

电流密度自壁面到中心逐渐降低。靠近壁面位置的电流密度则出现了明显的分层现象,本文将其命名为电流密度边界层。考虑电流密度对流项的构成,可从电荷双电层和速度边界层的发展得到解释。

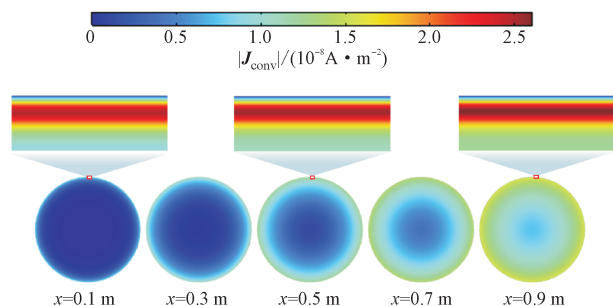


图9 不同位置处截面的对流项电流密度分布

Fig. 9 Current density distribution of convective term of cross-sections at different positions

以 $x=0.5$ m 位置处的截面为参考,电流密度沿截面的径向发展如图 10 所示。图中分布曲线自壁面开始出现 3 个明显的转个点,紧贴壁面的转折点 1 为电流密度边界层中的峰值区域,这是由黏性底层对速度的滞止作用所形成。虽然电荷在壁面处有显著积累,但电流密度却随速度的增加从 0 开始增长。待突破黏性底层后,速度的增长开始变缓,电荷密度仍保持急剧下降,故转折点 1 之后电流密度开始下降。据此,可推断液氢管流中,黏性底层厚度小于双电层厚度。相反,若双电层厚度更小,电荷将难以突破黏性底层,迁移到主流区则需要更长距离。虽然从流体边界层和经典双电层理论中可分别对黏性底层、双电层的厚度进行量化估计,然而本研究依托电流密度演化规律,直接实现了对耦合中的黏性底层和双电层相对厚度的分析。

在远离壁面的过程中,随着电荷密度的降低,电流密度下降至转折点 2。在转折点 2 之后,由于双电层的突破,电荷密度在径向上的变化率显著降低,速度边界层梯度的增长优势再次占据主导,电流密度从而再次呈现上涨的态势。据此可知,双电层厚度相较于速度边界层厚度更小。

转折点 3 处,在突破速度边界层后,速度的增长率变小。在主流区,由于湍流对电荷的扰动作用,径向上的电荷密度随着远离壁面而进一步降低,但由于其下降率大于速度的增长率,故电流密度在转折点 3 之后再次缓慢下降。

Zmarzly^[16] 根据所提出的湍流带电模型,也报道了类似的电流密度分布,且模型与实验符合良好。

综上所述,各转折点均受电荷密度发展的影响,据此可推测,若有足够长的发展距离,电荷随着流动持续向下游累积,将逐渐取代速度的主导作用。

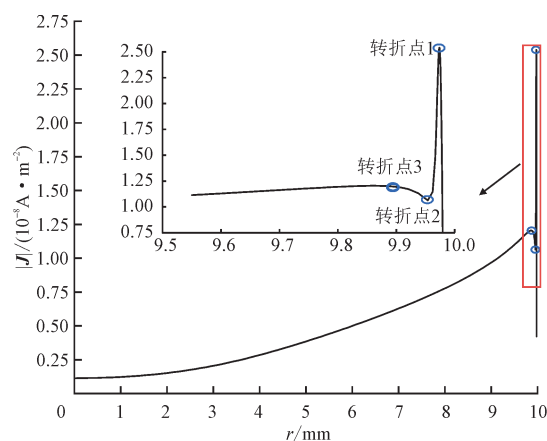


图10 $x=0.5$ m 位置处截面的电流密度径向分布

Fig. 10 Radial distribution of current density of cross-sections at the position of $x=0.5$ m

保持其他设置不变,仅增加管道长度。在对长度为 20 m 的管道进行计算后,分别选取 0.5、10、19.5 m 位置处的截面,探究其电流密度在更长管道中的发展情况,结果如图 11 所示。随着流动的持续,电流密度径向分布曲线中的转折点将完全消失,即主流区的电流密度将因电荷在下游的积聚而高于壁面区域。此时,电流密度的边界层得到完全发展,由初始的明显分层到此时的消失。不同于速度边界层和双电层伴随流动的全周期,该电流密度边界层可归结为一种入口效应。从静电积聚的过程来看,电流密度边界层的发展需要经过一定的距离,且因工质特性而有所不同。如图 11 所示,在半径为 10 mm 的管道中,流速为 1 m/s 的液氢,其电流密度边界层的发展需要 20 m 左右。

电流密度边界层的形成与速度边界层、双电层密切相关。据此可推断,在流动静电的发展过程中,电流密度边界层的存在是必然的。图 12 为电流密度边界层的发展过程。图中, δ_c 为电流密度边界层的最大厚度; δ 为电流密度边界层的厚度; x_c 为电流密度边界层临界发展距离,由流动和荷电两方面共同决定。由图可知,在流动的初始时刻,电流密度边界层最厚,随着流动的进行,厚度逐渐变薄,直到完全消失。此外,因黏性底层的滞止作用,电流密度近壁面底层将持续存在更长距离,该底层的演变将由电荷输运机制中的传导和扩散作用决定。

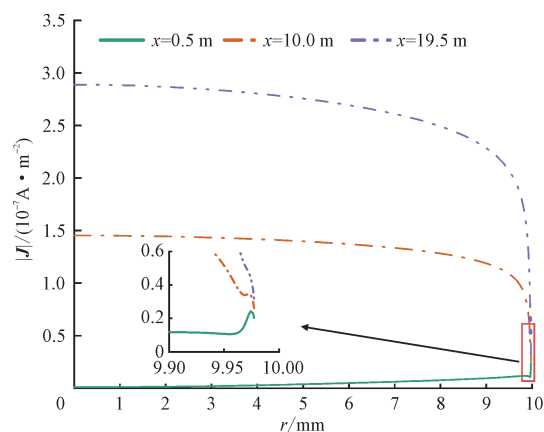


图 11 20 m 管道中不同位置处截面的电流密度径向分布

Fig. 11 Radial distribution of density of cross-sections at different positions in a 20-meter-long pipe

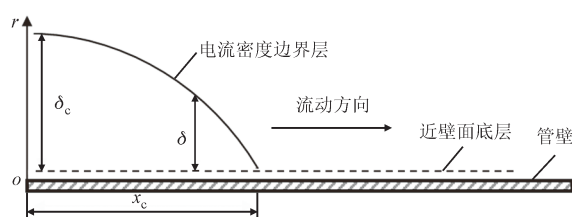


图 12 电流密度边界层示意图

Fig. 12 Schematic diagram of current density boundary layer

2.3 静电势发展

各截面静电势分布如图 13 所示。在流体域中，同一截面中心轴线处的电势最高，但近壁面电势梯度更大。对于不同截面，下游的静电势则逐渐增大。由式(7)可知，静电势梯度反应了电场强度的大小。选取 $x = 0.9$ m 处的截面，其场强分布如图 14 所示。

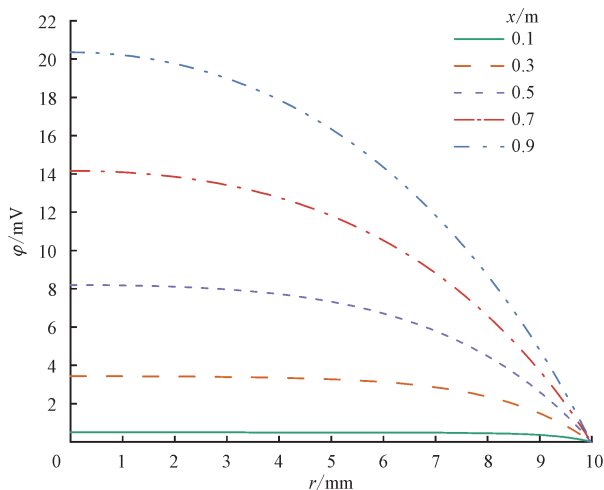


图 13 不同位置处截面的静电势

Fig. 13 Electrostatic potential of cross-sections at different positions

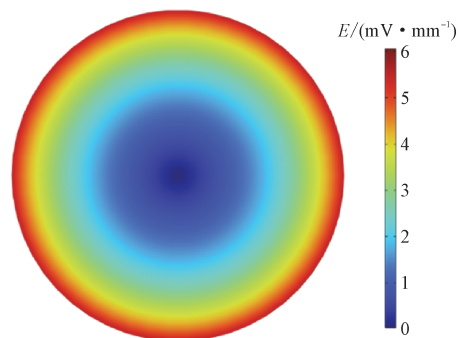
图 14 $x=0.9$ m 位置处截面的电场强度

Fig. 14 Electric field intensity of cross-sections at the position of $x=0.9$ m

由图 14 可知，电场强度呈现中间低四周高的分布形态，其最小值为 $0.306 \mu\text{V} \cdot \text{mm}^{-1}$ ，最大值为 $6.07 \text{ mV} \cdot \text{mm}^{-1}$ ，径向增长近 200 倍。李卓伦等^[22]在直径为 70 mm、管长为 10 m、液氢流速为 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的仿真工况中，报道了相同的场强分布，其最大电场强度为 $217.6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

图 15 展示了更长管道中心轴线处，静电势的发展情况。由图可知，入口处静电势的增长相对缓慢，之后则线性增大，并未见饱和趋势。在稳态研究中，静电势的线性增长说明各截面电荷转移平稳且速率相对一致。增长速率由静电荷累积的速率决定，主要取决于液氢的流速和壁面起电速率。

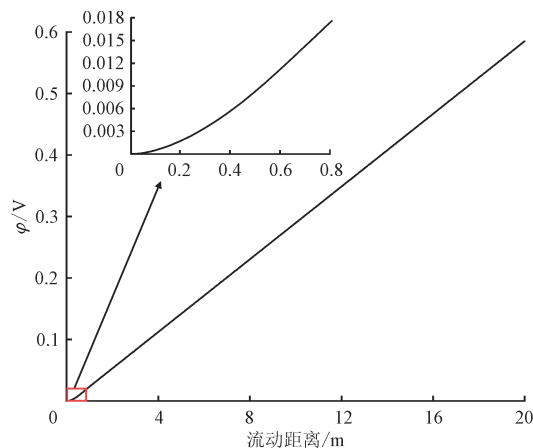


图 15 20 m 长的管道中心轴线处的静电势

Fig. 15 Electrostatic potential at the central axis of the 20 m long pipe

3 结 论

本文基于 COMSOL Multiphysics 软件，建立了液氢管流起电与静电积聚预测模型，实现了对液氢流动静电过程中流场、电荷场、静电场的耦合求解。

通过对液氢管流静电积累规律的计算预测,得到如下结论。

(1)液氢速度和电荷密度在近壁面呈现相反的变化趋势。由于双电层的存在,近壁面和主流区电荷密度呈明显不均匀分布,分别在 $10^{-7} \text{ C} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $10^{-9} \text{ C} \cdot \text{m}^{-3}$ 量级。

(2)液氢电流密度的传导项、扩散项和对流项对总体电流密度的贡献差距较大,以对流项为主,最大值在 $10^{-8} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 量级。在管内不同空间位置,扩散和对流在电荷输运中起重要作用。

(3)在流动静电的发展初期,因双电层和速度边界层,电流密度存在显著的分层现象。电流密度边界层在入口处最厚,随着流动发展逐渐减少直至消失,其发展距离在 20 m 左右。受黏性底层滞止作用,近壁面底层则在更长距离内存在。

(4)静电势在管道中心轴线处最大,接近壁面的过程中快速降至 0。距壁面越近电场强度越大,径向增长近 200 倍。随着流动距离延长和电荷积聚,中心轴线处静电势呈线性增长。

准确评估液氢管流静电积聚诱发的安全风险,除了揭示静电积聚规律,还需要确认液氢系统最小点火能的临界边界,其也是判定静电风险的重要因素。因此,未来开展液氢系统静电积聚风险的评估时,需要引入静电点火能的影响。

参考文献:

- [1] DAWOOD F, ANDA M, SHAFIULLAH G M. Hydrogen production for energy: an overview [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(7): 3847-3869.
- [2] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 氢气站设计规范: GB 50177—2005 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2005.
- [3] SCHIAROLI A, CLAUSSNER L, CAMPARI A, et al. A comprehensive review on liquid hydrogen transfer operations and safety considerations for mobile applications [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 107: 164-182.
- [4] TOUCHARD G, WATANABE S. Fluctuations of potential induced by turbulent flows of dielectric liquids through metallic pipes [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, 29(3): 645-649.
- [5] TOUCHARD G G, PATZEK T W, RADKE C J. A physicochemical explanation for flow electrification in low-conductivity liquids in contact with a corroding wall [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(5): 1051-1057.
- [6] TOUCHARD G. Flow electrification of liquids [J]. Journal of Electrostatics, 2001, 51: 440-447.
- [7] TOUCHARD G. Turbulent flow electrification with hydrocarbon liquids, liquid hydrogen, liquefied natural gas (LNG) and liquid nitrogen: part I three different models [J]. International Journal of Plasma Environmental Science and Technology, 2021, 15(2): e02012.
- [8] TOUCHARD G. Turbulent flow electrification with hydrocarbon liquids, liquid hydrogen, liquefied natural gas (LNG) and liquid nitrogen: part II experiments and comparison with different models [J]. International Journal of Plasma Environmental Science and Technology, 2021, 15(2): e02013.
- [9] CABALEIRO J M, PAILLAT T, ARTANA G, et al. Flow electrification in turbulent flows of liquids: comparison of two models for one specific case [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(5): 5235-5238.
- [10] LEBLANC P, CABALEIRO J M, PAILLAT T, et al. Impact of the laminar flow on the electrical double layer development [J]. Journal of Electrostatics, 2017, 88: 76-80.
- [11] CALERO M, GROSSHANS H, PAPALEXANDRIS M V. A computational framework for electrification of liquid flows [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2022, 74: 104637.
- [12] CALERO M, GROSSHANS H, PAPALEXANDRIS M V. Electrification in turbulent channel flows of liquid dielectrics [J]. Physics of Fluids, 2023, 35(4): 045119.
- [13] CALERO M, GROSSHANS H, PAPALEXANDRIS M V. Large eddy simulations of electrification of liquid dielectrics in channel flow [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2024, 92: 105465.
- [14] ZMARZLY D. Streaming electrification current density distribution inside pipes assuming overcharged boundary layer [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(2): 372-376.
- [15] ZMARZLY D, BOCZAR T. Measurements of distribution of streaming electrification current inside a pipe [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(6): 1681-1685.
- [16] ZMARZLY D. Streaming electrification current model in a round pipe in turbulent regime [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(5): 1497-1509.

- [17] 王菊芬, 孟浩龙. 输油管道内油流带电电流的计算 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(5): 131-135.
WANG Jufen, MENG Haolong. Calculation of oil flow electrification current in pipeline [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(5): 131-135.
- [18] 杨士亮, 杨宏伟, 高昊鹏, 等. 非金属管道输油过程中抗静电问题研究 [J]. 广州化工, 2013, 41(19): 32-33.
YANG Shiliang, YANG Hongwei, GAO Haopeng, et al. Study on the antistatic in the course of the oil transfer by non-metal pipe [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2013, 41(19): 32-33.
- [19] 田强, 周绍骑, 刘凯, 等. 流速对管输油品静电的影响 [J]. 油气储运, 2013, 32(2): 203-206.
TIAN Qiang, ZHOU Shaoqi, LIU Kai, et al. Impact of flow rate on the static electricity of products in pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(2): 203-206.
- [20] 董巨辉. 液氢流体输送和贮存静电积聚特性研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [21] LIU Bowen, LI Yanzhong, WANG Lei. Flow electrification characteristics of liquid hydrogen in pipe flow [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(48): 18526-18539.
- [22] 李卓伦, 王磊, 雷刚, 等. 液氢-固空颗粒管流电荷积累与颗粒运动规律研究 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(8): 55-65.
LI Zhuolun, WANG Lei, LEI Gang, et al. Study on charge accumulation of solid air particles in liquid hydrogen pipe flow and particles movement performance [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(8): 55-65.
- [23] LIU Bowen, LI Yanzhong, WANG Lei, et al. Contact electrification characteristics of solid oxygen particle-laden flows in liquid hydrogen transportation [J]. Powder Technology, 2024, 446: 120173.
- [24] DEISSLER R G. Analysis of turbulent heat transfer, mass transfer, and friction in smooth tubes at high Prandtl and Schmidt numbers [EB/OL]. (1955-01-01) [2025-08-15]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930092221>.
- [25] KOSZMAN I, GAVIS J. Development of charge in low-conductivity liquids flowing past surfaces; engineering predictions from the theory developed for tube flow [J]. Chemical Engineering Science, 1962, 17(12): 1013-1022.
- [26] WALMSLEY H L. The generation of electric currents by the turbulent flow of dielectric liquids: I long pipes [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 1982, 15(10): 1907-1934.
- [27] LEMMON E W, HUBER M L, MCLINDEN M O. NIST standard reference database 23: reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP, version 9.1 [EB/OL]. (2013-05-7) [2025-08-19]. <https://www.nist.gov/publications/nist-standard-reference-database-23-reference-fluid-thermodynamic-and-transport>.
- [28] 孙文豪, 王磊, 马原, 等. 液氢管流静电积聚规律的实验研究 [J]. 制冷学报, 2025, 46(5): 24-31.
SUN Wenhao, WANG Lei, MA Yuan, et al. Experimental study on electrostatic accumulation mechanism in liquid hydrogen pipe flow [J]. Journal of Refrigeration, 2025, 46(5): 24-31.

(编辑 刘懿莹)