

液氢-固空颗粒管流电荷积累与颗粒运动规律研究

李卓伦¹, 王磊¹, 雷刚², 陈强², 马原¹, 厉彦忠¹

(1. 西安交通大学制冷与低温工程系, 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: 为揭示液氢管流静电产生机理与积累规律,以液氢流-固空颗粒二元体系为对象,选择OpenFOAM开源软件,通过添加固空颗粒受力模型、摩擦起电模型、低电导率流体起电模型、颗粒带电模型等,实现了仿真软件的功能拓展。通过耦合多相质点网格法满足了液固两相流场-电场的耦合求解。数值仿真了固空颗粒在带电液氢管流中的电荷积累过程,探讨了固空颗粒粒径、空气含量对管流系统电量积累的影响。研究结果发现,当液氢流速为3 m/s时,纯液氢饱和电荷密度约 1.358×10^{-7} C/m³,而固空颗粒引起的电荷密度较之高3个数量级。相较于纯液氢管流,含固空颗粒的液氢管流静电风险更大。当固空粒径为0.1 mm时,大部分固空颗粒带电量在 3.16×10^{-12} ~ 1.58×10^{-11} C之间;增大粒径或减少空气含量均会造成带电颗粒占比增加,颗粒平均电量增加。研究工作对液氢管路系统设计与安全防护应具有理论指导意义。

关键词: 液氢管流;固空颗粒;电荷积累;数值模拟

中图分类号: V434 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202308006 **文章编号:** 0253-987X(2023)08-0055-11

Study on Charge Accumulation of Solid Air Particles in Liquid Hydrogen Pipe Flow and Particles Movement Performance

LI Zhuolun¹, WANG Lei¹, LEI Gang², CHEN Qiang², MA Yuan¹, LI Yanzhong¹

(1. Institute of Refrigeration 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: To reveal the charge formation mechanism and accumulation behaviors in a liquid hydrogen flow condition, the binary system of solid air particles in liquid hydrogen pipe flow was taken as the object, and the open source software platform OpenFOAM was adopted. Several additional functions, including force model on the solid particles, electrification model by LH₂-wall friction, low-conductivity fluid charge model and particle charge model, were established and incorporated into the software platform to extend its predictive abilities. With the multi-phase particle-in-cell (MP-PIC) method, the coupled calculation of liquid-solid two-phase flow field and electric field was reached. Based on this extended-function software, the charge accumulation in the LH₂ flow event with solid air particles was simulated, and the influences of particle size and air amount on charge accumulation performance were analyzed. The results show that the charge density in a pure LH₂ flow event is about 1.358×10^{-7} C/m³ when the flow rate is 3 m/s, while the charge density in a solid air particle existence case is higher than this value by three orders of

magnitude. Therefore, the charge risk in the solid air particle existence case is greater than that in a pure liquid hydrogen flow condition. Most solid air particles, with a diameter of 0.1 mm, have the charge amount of about 3.16×10^{-12} C to 1.58×10^{-11} C. Increasing the particle size or decreasing the air content in the system increases the proportion of charged particles, as well as the average particle electric quantity. The present study is of theoretically instructive significance to the design and safety protection of liquid hydrogen pipeline systems.

Keywords: liquid hydrogen pipe flow; solid air particle; charge accumulation; numerical simulation

液氢在航天与氢能领域发挥着重要作用。但是,液氢属易燃易爆介质,管道传输时可产生数千伏特静电场^[1]。在液氢储存与传输系统中,气体置换不充分或泄露可能造成空气渗入^[2]。空气在液氢中的溶解度极小,且液氢温度远低于空气凝固温度,因此液氢管路中极易沉积固空(固氧)颗粒^[3]。固空颗粒运动会产生电荷积累,与液氢静电一起造成系统的安全隐患^[4-5]。已有学者从实验与事故分析层面探索了液氢爆炸原因^[6-7],但静电的形成机制鲜有报道。面对未来液氢大规模应用需求,有必要针对含固空颗粒的液氢管流静电积聚规律开展研究,以期指导液氢系统的安全管控。

液氢管流静电的准确预测需建立在固液两相流传输特性与静电积累规律的基础之上。在固液两相流仿真领域,欧拉-拉格朗日法框架下的离散颗粒模型应用广泛^[8-9],但该方法对算力消耗极大。为此,Andrews等^[10]基于单向流求解方法PIC^[11],提出了MP-PIC算法,并通过优化阻力项的求解函数,保证了高颗粒雷诺数(10^5)下模拟结果与实验数据的一致性,使固液两相流的预测准确性与效率获得提升。宋梓枫^[12]将MP-PIC模型应用于水平稀相气力输送管道工况,对压降的预测误差控制在8%以内。

学者们已对静电产生机理开展了相关研究。针对液体与壁面摩擦起电,董巨辉等^[13-14]开展了理论预测,发现当液氢管流处于层流时,电荷密度约为 1×10^{-6} C/m³。涂俞明^[15]提出了一种变压器油流静电带电计算模型并开展实验,为油流静电带电计算奠定了基础。在颗粒碰撞起电方面,已有研究表明,颗粒碰撞频率影响电荷积累程度,且电荷量与碰撞次数呈指数关系^[16-19]。Matasusyama等^[20]提出了电荷弛豫理论,认为不同材料物体接触时,二者表面发生电荷转移,当两物体分离时,在分离空隙发生微小放电,残余电荷随物体分离且附着在表面。可以看出,低温介质层流与低电导率液体起电机理已有研究,但实际中,液氢传输大多处于湍流流态,目前

的研究主要是在层流模型基础上,通过修正对湍流工况开展近似求解^[21]。固空颗粒起电方面,因物性及工况特殊性,采用有效功函数法分析固空带电极律存在较大不确定性^[22]。电荷弛豫理论多用于非金属材料起电研究,但对实验参数有较强的依赖性。

综上所述可知,国内外学者对液氢输送管道内静电积累仍处于探索阶段,尚缺乏可靠的理论支撑,开展精细的实验研究面临成本高、安全隐患大等挑战。仿真工作面临两相流模型在液氢温区少有应用、两相流与静电作用耦合研究不深入、湍流液氢带电量无法确定、固空颗粒物性缺失、起电机理未知等诸多难题。为此,本文就带固空颗粒的液氢管流静电规律开展仿真预示,通过静电模型的重构实现仿真平台功能拓展,实现固液两相流与静电规律耦合求解。通过研究,揭示该过程中静电积累规律,为液氢系统的安全管理提供理论指导。

1 液氢-固空管道传输模型

含固空颗粒的液氢管路传输时,将发生液氢冲刷管壁起电与颗粒碰撞起电两种作用,其中,管路系统的静电积累与固空颗粒运动密切相关。本文选择开源仿真软件OpenFOAM对液固两相流与静电积累规律开展仿真预示。对于固液两相流问题,仿真模型构建的重点是确定固空颗粒的受力关系;针对电荷积累,重点解决两相流场-电场的耦合求解难题;针对固空颗粒起电,则需考虑颗粒与金属壁面碰撞时的接触形式。

1.1 物理对象

本文研究对象如图1所示。其中,液氢管道内径为 D ,管长为 L 。携带球形固空颗粒的液氢自管道入口以流速 u_1 流入,从右侧出口排出。固空颗粒直径为 d_p ,速度为 u_p 。颗粒在液氢中所受合力为 F_s ,固空颗粒带电量、单位体积液氢电荷量(体电荷密度)分别为 q 、 ρ_c 。

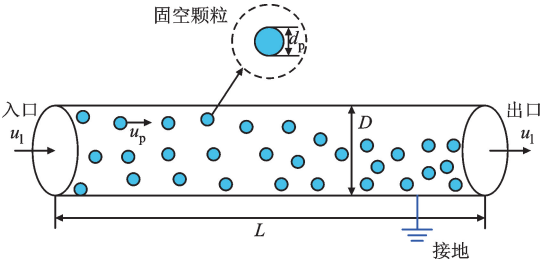


图 1 携带固空颗粒的液氢管路输送示意
Fig. 1 Schematic diagram of liquid hydrogen-solid air particle pipeline transfer process

1.2 固-液两相流模型

固空颗粒在液氢流中的受力模型如图 2 所示。文献[23]表明,颗粒间静电力对稀相简单管路中固液两相流动的影响甚微,且静电力的引入不利于计算收敛,故忽略带电颗粒间静电力作用。颗粒所受合力的数学模型为

$$\mathbf{F}_{\Sigma} = \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_p + \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_{\text{DEP}} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{F}_d$ 为曳引力,表征流体与颗粒间相互作用; $\mathbf{F}_g$ 为颗粒所受重力; $\mathbf{F}_c$ 为固相应力,反映颗粒接触时的受力; $\mathbf{F}_p$ 为压差力; $\mathbf{F}_e$ 为带电颗粒所受电场力; $\mathbf{F}_{\text{DEP}}$ 为介电泳力。上述力的单位均为 N。

将液氢与固态空气相关物性参数代入不同受力模型,并结合颗粒运动形式,可得出颗粒受力关系。对多颗粒或颗粒群体系, $\mathbf{F}_d$ 依据 Wen-Yu 曳力模型[24]计算确定,曳力系数由 Schiller-Naumann 模型[25]确定。 $\mathbf{F}_c$ 由 Snider 修正模型[26]求解。 $\mathbf{F}_d$ 、 $\mathbf{F}_g$ 、 $\mathbf{F}_c$ 、 $\mathbf{F}_p$ 可在 OpenFOAM 软件中通过设置 MP-PIC 求解器实现。

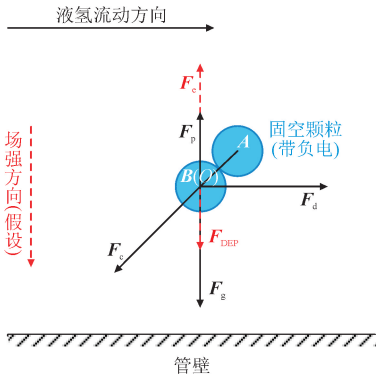


图 2 固空颗粒受力示意
Fig. 2 Schematic diagram of particle mechanical model in liquid hydrogen flow

颗粒所受电场力为

$$\mathbf{F}_e = q\mathbf{E}_e \quad (2)$$

式中: $\mathbf{E}_e$ 为电场强度, V/m。电场强度、体电荷密度与电势间满足

$$\mathbf{E}_e = -\nabla\varphi_e \quad (3)$$

$$\nabla^2\varphi_e = -\frac{\rho_e}{\epsilon_1\epsilon_0} \quad (4)$$

式中: φ_e 为管内电势, V; ϵ_1 为流体相对介电常数; ϵ_0 为真空介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m。

为确定管内电场分布,本文取壁面电势为基准,令其为 0 ($\varphi_e|_{r=R} = 0$),根据式(3)、(4)可求解场强。

中性颗粒在电场中受到极化,表面产生感应电荷,进而对颗粒产生介电泳力。对于球形颗粒, $\mathbf{F}_{\text{DEP}}$ 计算[27]如下

$$\mathbf{F}_{\text{DEP}} = \frac{1}{2}\pi d_p^3\epsilon_1\epsilon_0\frac{\sigma_p - \sigma_l}{\sigma_p + 2\sigma_l}\nabla E_e^2 \quad (5)$$

式中 σ_p 、 σ_l 分别为颗粒电导率与流体电导率, S/m。仿真中, $\mathbf{F}_e$ 与 $\mathbf{F}_{\text{DEP}}$ 通过编程植入软件予以考虑。

1.3 液氢起电模型

为确定液氢带电程度,选用 Walmsley 与 Woodford[28-29]提出的无量纲参数($K_1 \sim K_4$)对液氢的电荷密度进行求解,各参量物理意义如表 1 所示。其中: K_1 表征液体导电能力,与物性有关; K_2 、 K_3 取值分别为 31.6 与 0.031 6; $K_4 = 0.5$ 。将液氢的电导率、相对介电常数、密度以及黏度等代入表 2 中的关系式,即可计算出液氢的电荷密度,具体推导详见文献[27]。其中: R 为管路半径; k_e 为玻尔兹曼常数,取 1.38×10^{-23} J/K; e 为电子电量,取 1.6×10^{-19} C。

表 1 液氢起电模型无量纲参数[29]

Table 1 Dimensionless parameters in liquid hydrogen electrification model[29]		
无量纲数	表达式	物理意义
K_1	$\sigma_l R^2 / \epsilon_1 \epsilon_0 (D_+ + D_-)$	扩散时间与弛豫时间之比
K_2	$K_- R / (D_+ + D_-)$	负离子扩散时间与壁面吸收时间之比
K_3	$K_+ R / (D_+ + D_-)$	正离子扩散时间与壁面吸收时间之比
K_4	$D_- / (D_- + D_+)$	负离子的迁移数
Δ	$79 Re^{-0.875} Sc^{-0.25}$	边界层厚度与管径之比
Re	$\rho_l u_l D / \mu_l$	惯性力与黏性力之比
Sc	$\mu_l / \rho_l D_d$	运动黏性系数与扩散系数之比

表 2 电荷密度与无量纲参数关系^[29]

Table 2 Relationship between charge density and dimensionless parameters^[29]

取值范围	电荷密度近似关系式
$\sqrt{K_1\Delta}\ll 1$	$\frac{\epsilon_1\epsilon_0k_eT}{eR^2}\left(\frac{K_1}{2}\right)^2$
$K_1\ll\sqrt{K_2K_3}$	$\left[\left \frac{1}{K_2}-\frac{1}{K_3}\right +\frac{\Delta(2K_4-1)}{K_4(1-K_4)}\right]$
$\sqrt{K_1\Delta}\ll 1$	$\frac{\epsilon_1\epsilon_0k_eTK_1}{eR^2}\sqrt{K_2K_3}$
$K_1\gg\sqrt{K_2K_3}$	$\left[\left \frac{1}{K_2}-\frac{1}{K_3}\right +\frac{\Delta(2K_4-1)}{K_4(1-K_4)}\right]$
$\sqrt{K_1\Delta}\ll 1$	$0.0125C_1\frac{\epsilon_1\epsilon_0k_eT}{eR^2}Sc^{0.25}Re^{0.875}$
$\sqrt{K_1\Delta}\ll 1$	

1.4 颗粒起电模型

假设所有固空颗粒尺寸与组分相同,根据双极电荷电原理^[17,30],尺寸与组分相同的颗粒间极难产生电荷转移,故本文在考虑颗粒碰撞时,忽略二者间电荷转移,仅考虑颗粒-壁面碰撞起电。

图 3 描述了颗粒与壁面碰撞产生电荷积累过程。中性颗粒与壁面碰撞后,在接触区产生电荷积累,并在接触区达到饱和;当颗粒脱离壁面后,接触区所积累的电荷在整个颗粒表面重新分配直至均匀;当颗粒整体电荷未达到饱和时,颗粒与壁面的二次接触重复之前电荷产生与重新分配过程,直至达到饱和;饱和后的颗粒与壁面的碰撞不再获得电量。相较于前次碰撞,第二次碰撞增加的电荷减少,表现为电荷积累速率随碰撞次数逐渐放缓。

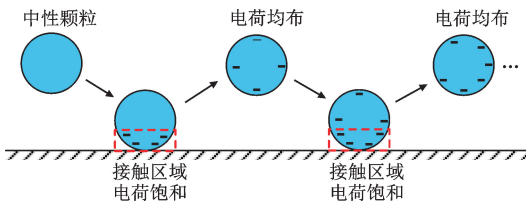


图 3 颗粒-壁面碰撞中电荷积累过程

Fig. 3 Charge accumulation in the particle-wall collision process

颗粒饱和电荷量关系式为

$$q_{\infty} = \epsilon_1\epsilon_0EA_p \quad (6)$$

式中: q_{∞} 为带电颗粒饱和带电量, C; E 为流体击穿场强, V/m; A_p 为颗粒表面积, m^2 。

假设颗粒每次与壁面碰撞时,颗粒均获得接触区域所能携带的最大电量,其数学描述为

$$\Delta q = \sigma_{\infty}A'_c \quad (7)$$

式中: σ_{∞} 为颗粒饱和电荷密度, C/m^2 , 物理意义为颗粒携带饱和电量时单位表面电荷量; Δq 为颗粒单次碰撞获得的电量, C; A'_c 为有效接触面积, m^2 , 表示单次碰撞中颗粒能够携带电荷的表面积。 A'_c 定义^[31]如下

$$A'_c = \alpha A_c \left(1 - \frac{A_N}{A_p}\right) \quad (8)$$

式中: A_c 为颗粒与壁面无滚动弹性碰撞时的接触面积, m^2 , 给定固空密度、弹性模量、泊松比等物性后, 根据赫兹接触理论计算^[32]; A_N 为颗粒已带电荷表面面积, m^2 ; α 为滚动因子, 描述颗粒与壁面接触时由于滚动而增加的接触面积, 与颗粒切向速度近似成正比, 本文取 $\alpha = 100$ ^[31]。

1.5 求解思路

在 OpenFOAM 软件中, 原有 MP-PIC 求解器仅能模拟固液两相流, 无法耦合静电场作用。为实现含颗粒液氢管流静电规律的预示, 需对模型做必要功能拓展, 具体过程如图 4 所示。需要说明的是, 本文所构建模型在前期做了大量的试算, 发现当过程持续 25 s 后, 携带不同电量的颗粒占管内总颗粒

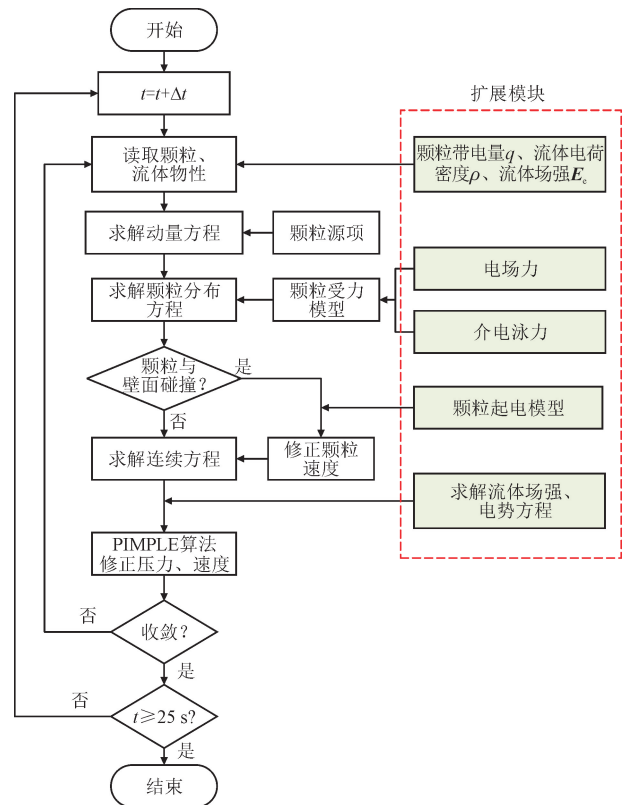


图 4 固液两相流-静电耦合求解框图

Fig. 4 Coupling solution flow chart for solid-liquid two-phase flow and electrostatic process

数的比例均达到稳定,表明系统达到稳态。故在后续仿真中,均取仿真时间为 25 s。软件中需要开展模型扩展的部分包括:固空颗粒与液氢物性添加,颗粒电场力引入,颗粒起电模型构建,液氢起电模型构建,等。编程时,将电场求解器 electrostaticFoam 与 MPPICInterFoam 求解器结合,式(3)、(4)通过程序实现液氢电势与场强求解。

在颗粒参数文件中,编程定义颗粒带电量与带电面积。当颗粒运动至壁面时,调用头文件中颗粒轴向与径向分速度求得颗粒与壁面接触面积,进而求解单次碰撞电量增加量。为实现固空颗粒所受电场作用,在颗粒受力文件中定义电场力与介电泳力,调取头文件中液氢内部电场及颗粒带电量参数计算出受力。

2 模型验证及参数选取

因液氢介质特殊性,目前尚未见液氢-固空颗粒或基于其他低温工质的静电实验报道。为开展模型验证,遴选了与液氢-固空物性接近的实验工况。其中,空气黏度与液氢相似,聚合物颗粒与固空密度相近,因此本文选取空气-聚合物颗粒实验数据验证所建立的两相流模型。同时,选择与液氢电导率相似的甲苯实验数据,验证液氢带电模型。

2.1 无静电模型验证

选择文献[12,33]工况对所构建的固液两相流模型开展对比校验。该实验中,携带球形塑料颗粒的空气在水平玻璃管中运动。

采用本文模型对该过程开展了仿真预示,对比结果如图 5 所示,其中,横坐标负载率表示两相流中固体与流体质量流量之比。由图可知,本文所构建模型在预测两相流时具有较高的预测精度,相对误差如表 3 所示。

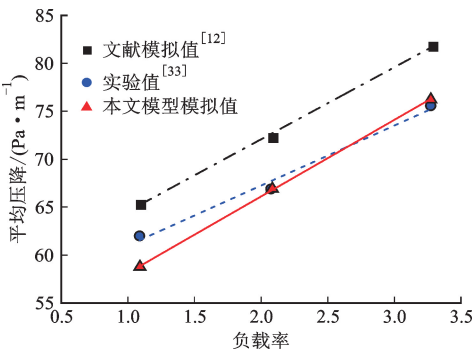


图 5 管路压降随负载率变化关系的对比
Fig. 5 Comparison of pressure drop with load rate variation

表 3 本文模型与文献模型预测精度对比

Table 3 Relative errors by different models		
负载率	文献[12]平均 压降误差/%	本文平均 压降误差/%
1.1	5.63	5.26
2.1	8.19	0.04
3.3	8.30	0.88

2.2 静电模型验证

选择甲苯管流电荷积累随入口 Re 的变化验证所构建的流体起电模型,预测结果与文献[29]模拟结果对比如图 6 所示。其中, i/q 为无量纲电荷密度。由图可得,本文模型在预测管流静电时具有较高精度。

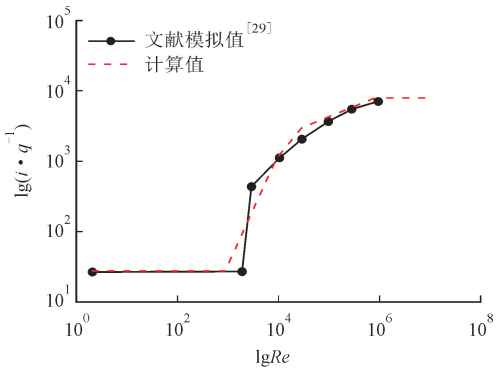


图 6 甲苯管流静电积累预测结果的对比
Fig. 6 Comparison of prediction results for electrostatic accumulation of toluene tube flow

2.3 工况设置

后续计算中,假设初始时刻管内充满均匀带电液氢,颗粒在入口截面随机分布,并以恒定体积分数进入管道,忽略颗粒与液氢间热量交换。颗粒以一定速度随液氢注入管道,与壁面碰撞产生电荷积累。

选取文献[34]中液氢管流工况开展仿真研究,参数取值如表 4 所示。根据文献[35]的实验数据可知,液氢中含固分数($m_{\text{air}}/m_{\text{H}_2}$, m_{air} 为液氢中空气质量, m_{H_2} 为液氢总质量)约为 9.05×10^{-6} 。进一步分析可知,当液氢流速为 3 m/s 时,每秒约有 2×10^5 个直径为 0.1 mm 的固空颗粒进入管路。

图 7 展示了所建立的液氢管路网格模型。其中,采用 4 个 16×16 的扇形网格及一个 16×16 的正方形网格对圆管横截面进行网格划分,沿管长方向设置 200 个网格,网格总数为 256 000。

表 4 本文模拟参数取值

Table 4 Values of simulation parameters in the present study

参数	数值
管路直径 D/m	0.07
管长 L/m	10
固空颗粒密度 $\rho_p/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 104.8
负载率	1.4×10^{-4} [35]
管内压力 p/MPa	0.6
液氢温度 T/K	20
液氢密度 $\rho_l/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	71.76
液氢流速 $u_l/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	3
重力加速度 $g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	9.81
法向恢复系数 e_n	0.99
切向衰减系数 e_t	0.01
颗粒粒径 d_p/mm	0.1
液氢相对介电常数 ϵ_l	1.233 9
液氢电导率 $\sigma_l/(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	10^{-15}
固空相对介电常数 ϵ_p	2.7

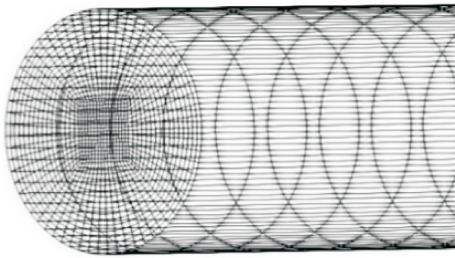


图 7 液氢管道模型网格示意

Fig. 7 Schematic diagram of liquid hydrogen pipeline grid model

为验证网格构建的合理性,在表 4 工况下,进一步建立了加密网格、疏松网格开展对比较验。根据液氢出口速度、颗粒出口速度、首个颗粒逸出管道时间评价网格模型的有效性,如表 5 所示。综合考虑运算精度与效率,选择网格数为 256 000 的模型开展后续仿真预示。

表 5 网格无关性验证

Table 5 Grid independence verification

网格数 $/10^3$	液氢速度 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	液氢速度相对 误差 $\text{\%}$	颗粒速度 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	颗粒速度相对 误差 $\text{\%}$	逸出时间/s	逸出时间相对 误差 $\text{\%}$
64	3.607	1.55	3.804	1.71	2.786	0
256	3.664		3.870		2.786	
512	3.664	0	3.877	0.16	2.790	0.14

3 结果与讨论

3.1 液氢管流静电累积

当液氢流速为 3 m/s 时,由表 2 所列公式解得纯液氢饱和和电荷密度约为 $1.358\times 10^{-7}\text{ C}/\text{m}^3$ 。以管路中心截面为例,沿管径方向的电势与电场强度分布如图 8 所示。可以看出,管内最大电场强度为 217.6 V/m,该值远小于同条件下液氢击穿电场强度($6.9\times 10^7\text{ V}/\text{m}$ [36])。因此,纯液氢流动不易产生静电诱发的爆炸风险。

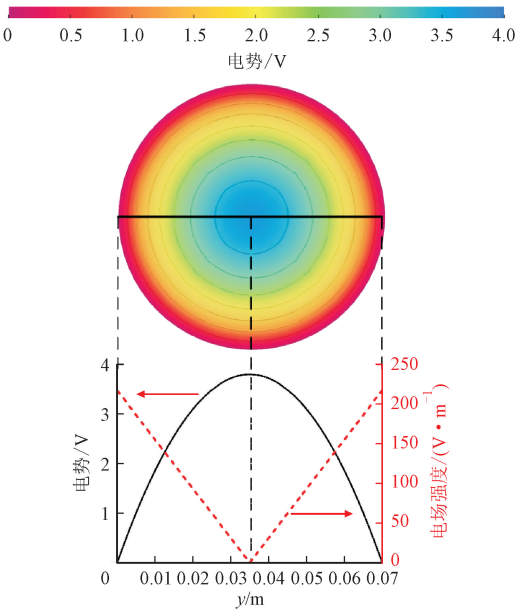


图 8 纯液氢管路电势与场强分布规律

Fig. 8 Electrical potential and field strength distribution of pure liquid hydrogen pipeline

将带电颗粒数占总颗粒数的比例定义为 γ ,图 9 展示了携带不同极性固空颗粒的液氢管流达到稳态时,不同带电量颗粒数占总颗粒数的比例关系。可

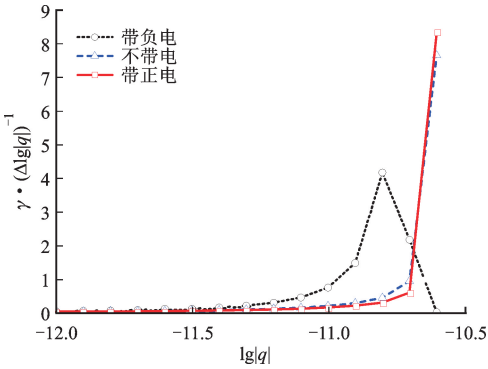


图 9 稳态下管内不同极性颗粒电荷分布及数量比例

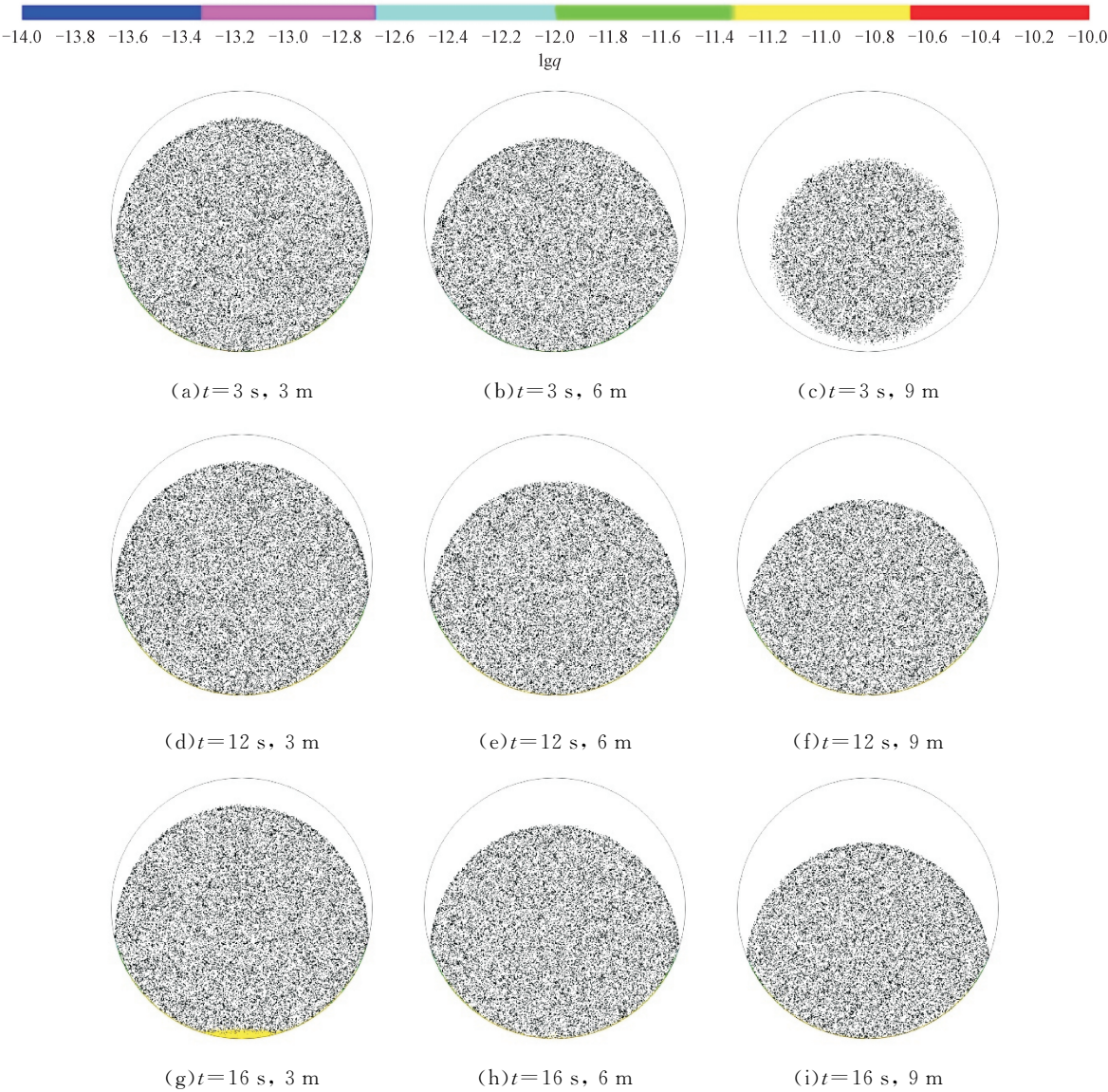
Fig. 9 Charge distribution and number proportion of particles with different polar under steady state

以看出,颗粒带电极性影响颗粒的带电量分布。当固空颗粒带负电时,所受电场力与重力方向相反,在电场力作用下带电颗粒沉积趋势减弱,颗粒电量分布更分散。当颗粒携带正电,与液氢极性相同时,理论上电场力作用下颗粒向壁面靠近,更易沉积于底部。但实际中,即使颗粒仅受重力作用,也会在管路底部大量沉积,颗粒的堆积直接阻碍后续颗粒接触壁面与积累电荷。因此,当颗粒带正电时,颗粒电量分布与不带电时基本相同。

需要说明的是,固空颗粒实际的电极性暂无相关数据。通常,非金属绝缘颗粒与金属碰撞中倾向于接收电子^[37],故本文视固空颗粒携带负电。带电颗粒的电荷量集中在 1.58×10^{-11} C 附近,电量低于 3.16×10^{-12} C 的颗粒极少,可忽略不计。另外,将所有颗粒电量之和与管路总体积相比,可知稳态下单位体积液氢内固空颗粒的电荷量约为 $4.1 \times$

10^{-4} C/m³,将其定义为单位体积带电量。对比可知,含固空颗粒工况下单位体积电量相较于纯液氢工况大 3 个数量级。因此,含固空液氢管流相较于纯液氢流动的静电问题更严重,需给予更多关注。

取距离管路入口 3、6、9 m 截面分别代表上、中、下游,3 个截面处的颗粒电量分布如图 10 所示。图中,不同颜色代表颗粒电荷量所属区间,不带电颗粒以黑色表示。可以看出, $t=3$ s 时,上、中游均有颗粒沉积,下游颗粒仍在管路主流区,未见明显沉积。随着时间推移,下游颗粒开始沉积,各流段颗粒带电量均有所升高,上游最先形成电荷集中区域,中、下游颗粒也逐渐带电,最终均呈现黄色区包裹红色区域的分布特征,各流段电量分布趋于一致。在图 10 所示工况中,颗粒静电均集中于管路底部。因此,需重点关注管路底部的静电安全,避免电荷在此处的积聚。



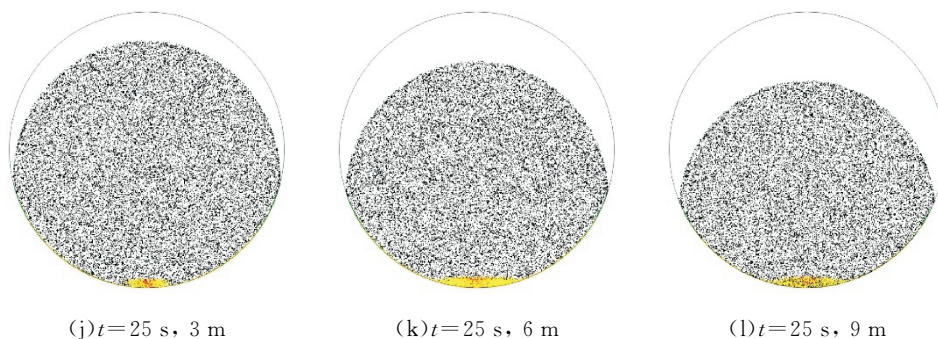


图 10 不同截面处固空颗粒静电分布

Fig. 10 Electrostatic distribution of solid air particles at different sections

3.2 粒径影响

由式(6)、(7)可知,颗粒饱和电量与其尺寸密切相关,且颗粒单次碰撞增加的电荷量与接触面积成正比,而接触面积与颗粒尺寸具有一定相关性,故有必要分析颗粒尺寸对静电积累的影响。假设液氢中空气含量一定,在固空直径为 0.1 mm 的基础上,进一步选取粒径为 0.05、0.2 mm 工况开展对比分析。稳态时,不同粒径下带电颗粒占总颗粒数的比例及单位体积带电量如图 11 所示。可以看出,随着粒径增大,带电颗粒比例上升,单位体积带电量增加,当粒径为 0.2 mm 时,近 90% 颗粒带电,单位体积带电量约为 $7.57 \times 10^{-4} \text{ C/m}^3$,相比于粒径为 0.1 mm 颗粒工况,单位体积电量增加了 1.8 倍。原因有二:一是液氢中空气含量一定时,入射粒子数与颗粒粒径的 3 次方呈反比,粒径增大使粒子数迅速减少,相应地,颗粒与壁面接触几率增大,更易获得电量;二是随着粒径增大,颗粒受重力影响更大,更易在管路底部与壁面碰撞带电。

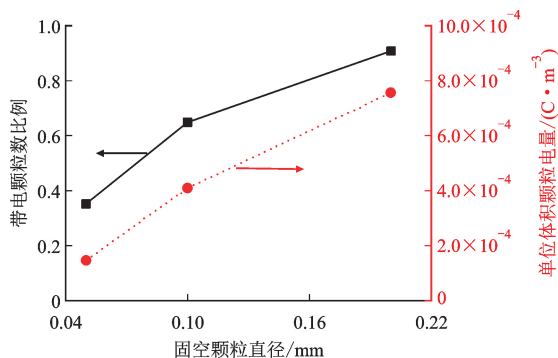


图 11 带电颗粒比例、单位体积颗粒电量与粒径关系

Fig. 11 Variation of charged particles ratio and particle charge per unit volume with particle size

不同粒径下带电颗粒的电量分布如图 12 所示。可以看出,随着粒径增大,与壁面碰撞面积增大,带电量相应升高。大尺寸颗粒携带电荷能力较高,受重力影响较大,更易与壁面碰撞,携带高电荷的颗粒比例增加,电荷分布更为密集。综上可知,大尺寸固空颗粒的静电积累更为严重,对管路安全运输的威胁更大。

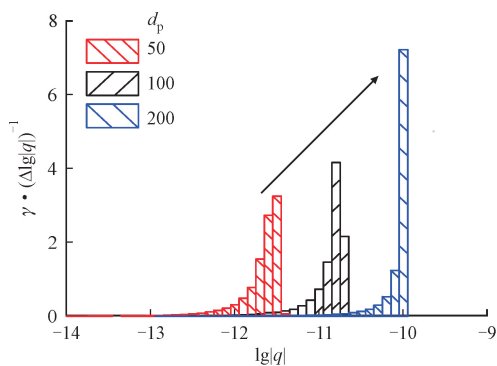


图 12 不同粒径下颗粒电荷分布及数量比例

Fig. 12 Charge distribution and number ratio of particles at different particle sizes

3.3 空气含量影响

令文献[12]中的空气含量(固氧与液氢流量之比,本文取 1.4×10^{-4})为 S ,预测 0.1S 与 10S 条件下带电颗粒比例与单位体积带电量,结果如图 13 所示。可以看出,随着液氢中空气含量升高,单位时间入射粒子数增加,然而壁面沉积区域有限,大量颗粒难以与壁面发生碰撞,因此随着液氢中含空气量升高,带电颗粒比例降低。空气含量的升高使得单位时间入射系统的粒子数增加,单位体积带电量随之升高。

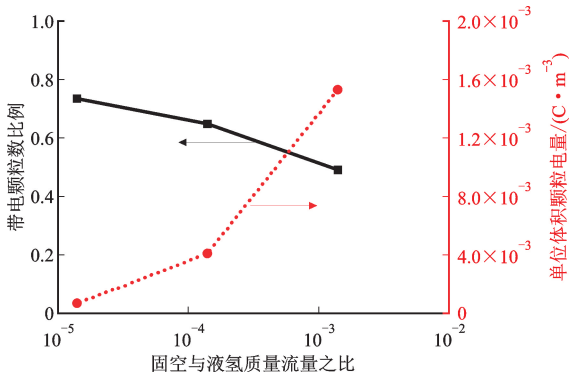


图 13 带电颗粒比例、单位体积颗粒电量与空气含量关系
Fig. 13 Variation of charged particles ratio and particle charge per unit volume with air content

图 13 表明,如果从平均电量的角度出发,适当降低液氢含空量可减少管内静电积累,但系统是否安全往往是由大电量颗粒决定。图 14 展示了不同空气含量下带电颗粒电量分布及对应的颗粒比例。取各图像中颗粒数比例最大值对应电量作为颗粒平均电量。可见,低含空气量下,固空颗粒平均电量较大,电荷分布更密集。随着空气量增加,电荷分布趋于分散,电荷集中区域前移一段距离后维持稳定。这是因为当空气量较少时,壁面暴露区域大,颗粒与壁面充分接触,积累电量较高。随着颗粒浓度升高,壁面沉积颗粒数逐渐趋于饱和,颗粒碰撞几率减少,带电量相应降低。

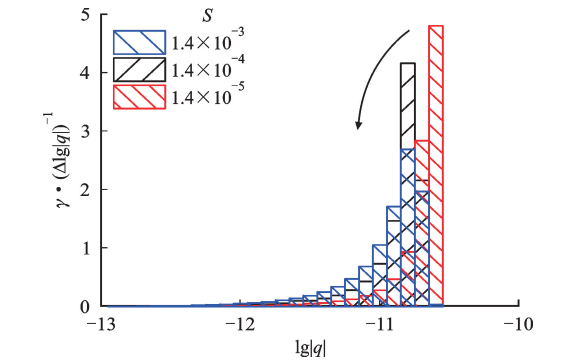


图 14 不同空气含量下颗粒电荷分布及数量比例
Fig. 14 Charge distribution and number ratio of particles at different air content

由上述结果可知,若从高电量判据出发,液氢中更多的空气量造成系统静电安全性提高,但空气量增加使得液氢中氧浓度更高,爆炸隐患随之提高。因此,在低含空量的液氢管流中应密切关注固空颗粒的静电积累,确保管路充分接地,及时将电荷

引出。

4 结 论

本文在 OpenFOAM 软件中将 MP-PIC 求解器与电场求解器结合,添加颗粒受力模型、液氢带电模型与颗粒电荷累积模型,实现了液固两相流与静电积累规律的耦合求解,并基于该扩展模型,对带固空颗粒的液氢管流静电积累规律开展了理论预测,获得结论如下。

- (1)液氢管流中存在固空颗粒会导致静电积聚水平显著增加。当纯液氢管流流速为 3 m/s 时,稳态时饱和电荷密度约 $1.358 \times 10^{-7} \text{ C/m}^3$;当液氢中携带固空颗粒时,产生的电荷密度会增大 3 个量级。
- (2)当固空粒径为 0.1 mm 时,固空颗粒电荷量集中位于 $3.16 \times 10^{-12} \sim 1.58 \times 10^{-11} \text{ C}$ 之间,管道上游颗粒最先产生电荷积累,系统稳定后各区域电量趋于一致。管路底部静电积累严重。
- (3)液氢中空气量一定时,固空颗粒粒径增加,带电颗粒比例升高,颗粒平均电量升高,电荷分布区域更为密集,当粒径为 0.2 mm 时,约有 90% 的固空颗粒携带电荷,减小进入系统的颗粒尺寸能够防止电荷大量累积。
- (4)当固空颗粒尺寸不变时,随着空气量减少,带电颗粒比例增加,单位体积内颗粒电量降低,电荷分布区域更密集,当含空气量进一步减少时,颗粒平均电量升高。

参考文献:

[1] 于国贤. 液氢生产中爆炸原因的探讨 [J]. 低温工程, 1982(3): 23-30.
YU Guoxian. Discussion on the cause of explosion in liquid hydrogen production [J]. Cryogenics, 1982(3): 23-30.

[2] USTOLIN F, PALTRINIERI N, BERTO F. Loss of integrity of hydrogen technologies: a critical review [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45 (43): 23809-23840.

[3] 刘海生, 刘玉涛, 丘小林. 液氢中固空沉积形式的理论研究 [C]//第十一届全国低温工程大会论文集. 北京:中国制冷学会,2013: 26-29.

[4] MERILO E G, GROETHE M A, ADAMO R C, et al. Self-ignition of hydrogen releases through electrostatic discharge induced by entrained particulates [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37 (22): 17561-17570.

- [5] 刘均涛, 范邦强. 液氢的静电危险性和防消静电技术综述 [J]. 低温工程, 1980(1): 54-68.
LIU Juntao, FAN Bangqiang. A review of electrostatic hazard and antistatic technology of liquid hydrogen [J]. Cryogenics, 1980(1): 54-68.
- [6] AZIZ M. Liquid hydrogen: a review on liquefaction, storage, transportation, and safety [J]. Energies, 2021, 14(18): 5917.
- [7] LOWESMITH B J, HANKINSON G, CHYNOWETH S. Safety issues of the liquefaction, storage and transportation of liquid hydrogen: an analysis of incidents and HAZIDS [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(35): 20516-20521.
- [8] 赵云华, 何玉荣, 陆慧林, 等. 提升管内气固两相双组分颗粒流动的离散颗粒硬球模型的模拟 [J]. 化工学报, 2007, 58(3): 608-616.
ZHAO Yunhua, HE Yurong, LU Huilin, et al. Numerical simulation of flow behavior of gas-solid binary of particles in riser with hard-sphere discrete particle model [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2007, 58(3): 608-616.
- [9] 杨星, 郝子晗, 丰镇平. 考虑进口旋流的涡轮静叶流动传热的颗粒物沉积效应 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(7): 61-70.
YANG Xing, HAO Zihan, FENG Zhenping. Particle deposition effect of the flow and heat transfer in a turbine vane passage with inlet swirl [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(7): 61-70.
- [10] ANDREWS M J, O'ROURKE P J. The multiphase particle-in-cell (MP-PIC) method for dense particulate flows [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1996, 22(2): 379-402.
- [11] O'ROURKE P J, BRACKBILL J U, LARROUTOU B. On particle-grid interpolation and calculating chemistry in particle-in-cell methods [J]. Journal of Computational Physics, 1993, 109(1): 37-52.
- [12] 宋梓枫. 水平气固两相流动的模拟研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所), 2021.
- [13] 董巨辉, 黄永华. 低温流体输运过程中的静电积聚和抑制方法 [J]. 低温工程, 2014(2): 36-42.
DONG Juhui, HUANG Yonghua. Static electricity accumulation and suppression method in cryogenic fluids transfer [J]. Cryogenics, 2014(2): 36-42.
- [14] 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.
- [15] 涂俞明. 超高压变压器油流静电带电的计算模型及实验研究 [D]. 北京: 清华大学, 1998.
- [16] 房佳. 颗粒静电发生的机理研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- [17] 葛世铁. 气相法流化床反应器中聚烯烃颗粒的静电发生机制 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [18] 谭震. 流化床中颗粒静电特性及对流动特性的影响机制 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [19] 王世浩. 典型粉体颗粒静电起电特性研究 [D]. 山东东营: 中国石油大学(华东), 2017.
- [20] MATSUSYAMA T, YAMAMOTO H. Impact charging of particulate materials [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(7): 2230-2238.
- [21] 韩毅, 黄永华, 董巨辉, 等. 绝缘性流体管内流动时静电电荷密度计算 [J]. 制冷技术, 2016, 36(2): 1-6, 45.
HAN Yi, HUANG Yonghua, DONG Juhui, et al. Calculation of electrostatic charge density of insulating fluids flowing in pipes [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2016, 36(2): 1-6, 45.
- [22] DAVIES D K. Charge generation on dielectric surfaces [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 1969, 2(11): 1533.
- [23] 李俊杰. 基于CFD-DEM方法的管道带电颗粒流气力输送模拟 [D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [24] WEN C Y, YU Y H. Mechanics of fluidization [J]. Chemical Engineering Progress Symposium Series, 1966, 62: 100-111.
- [25] VISURI O, WIERINK G A, ALOPAEUS V. Investigation of drag models in CFD modeling and comparison to experiments of liquid-solid fluidized systems [J]. International Journal of Mineral Processing, 2012, 104-105: 58-70.
- [26] SNIDER D M. An incompressible three-dimensional multiphase particle-in-cell model for dense particle flows [J]. Journal of Computational Physics, 2001, 170(2): 523-549.
- [27] LORENZ M, WEBER A P, BAUNE M, et al. Aerosol classification by dielectrophoresis: a theoretical study on spherical particles [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 10617.
- [28] WALMSLEY H L, WOODFORD G. The generation of electric currents by the laminar flow of dielectric liquids [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 1981, 14(10): 1761.
- [29] 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.
- [30] BAYTEKIN H T, PATASHINSKI A Z, BRANICKI M, et al. The mosaic of surface charge in contact elec-

- trification [J]. Science, 2011, 333(6040): 308-312.
- [31] KOREVAAR M W. Particles in charge : an experimental and numerical study on the tribo-electric charging of pneumatically conveyed powders [D]. Eindhoven, Netherlands: Technische Universiteit Eindhoven, 2016.
- [32] JOHNSON K L. Contact mechanics [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1987.
- [33] TSUJI Y, MORIKAWA Y. LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a horizontal pipe [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1982, 120: 385-409.
- [34] 韩战秀,王海峰,李艳侠. 液氢加注管道设计研究 [J]. 航天器环境工程, 2009, 26(6): 561-564.
- HAN Zhanxiu, WANG Haifeng, LI Yanxia. Design of liquid hydrogen injection tubes [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(6): 561-564.
- [35] 冯庆祥. 固氧在液氢中的行为特性及液氢生产的安全问题 [J]. 低温与特气, 1998(1): 57-64.
- FENG Qingxiang. Behavior of solid oxygen in liquid hydrogen and safety issues in liquid hydrogen production [J]. Low Temperature and Specialty Gases, 1998 (1): 57-64.
- [36] 桂林电器科学研究所. 低温电工绝缘 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [37] YOSHIDA M, II N, SHIMOSAKA A, et al. Experimental and theoretical approaches to charging behavior of polymer particles [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(7): 2239-2248.

(编辑 陶晴)