

含固氧颗粒的液氢传输管路中静电积聚仿真研究

田雪皓¹, 刘柏文¹, 王磊¹, 马原¹, 厉彦忠¹, 雷刚², 陈强²

(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: 为探究含固态氧颗粒的液氢管道传输中静电积聚规律, 基于 COMSOL Multiphysics 软件, 开展了液氢-固氧体系荷电规律仿真预示。采用拉格朗日颗粒轨道法与计算流体动力学分别描述连续液氢流与离散固氧颗粒的运动, 采用 Materials Studio 软件计算获得固氧电学性质, 并通过电容器法描述固氧颗粒碰撞起电规律, 实现固液两相流与静电场的耦合求解。仿真结果发现, 当液氢流速为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 固氧颗粒粒径为 $1000 \mu\text{m}$ 时, 固氧颗粒比电荷达 $10 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$, 颗粒饱和电量约为 84 pC , 两相流电荷密度为 $2.84 \times 10^{-4} \text{ C} \cdot \text{m}^{-3}$, 较纯液氢流静电大 8 个量级。随着颗粒-壁面碰撞次数增多, 颗粒荷电量趋于饱和。管流参数对荷电规律影响显著, 颗粒比电荷随颗粒质量流量增加略有降低, 随管长增加和管径减小而增大, 随液氢流速增加呈现先减小后增大的趋势, 即存在极小值。颗粒物性也会对荷电量产生影响, 颗粒比电荷随粒径增大存在极小值和极大值, 颗粒杨氏模量、电阻率、密度等也对荷电规律具有一定影响。研究工作可为液氢传输系统设计与安全防护提供理论支撑。

关键词: 液氢; 固氧颗粒; 电荷演化; 静电积聚

中图分类号: V434 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202402012 **文章编号:** 0253-987X(2024)02-0116-11

Simulation Study of Electrostatic Accumulation in Liquid Hydrogen Transmission Pipeline Containing Solid Oxygen Particles

TIAN Xuehao¹, LIU Bowen¹, WANG Lei¹, MA Yuan¹,

LI Yanzhong¹, LEI Gang², CHEN Qiang²

(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: In order to explore the law of electrostatic accumulation in liquid hydrogen transmission pipeline containing solid oxygen particles, the simulation of charging law of liquid hydrogen-solid oxygen system is carried out using COMSOL Multiphysics software. Lagrange particle orbit method and computational fluid dynamics are used to describe the motion of continuous liquid hydrogen flow and discrete solid oxygen particles, respectively. Materials Studio software is used to calculate the electrical properties of solid oxygen particles and the electricity-generating law of solid oxygen particles is described by capacitor method to realize the coupling solution of solid-liquid two-phase flow and electrostatic field. The simulation results show that when the flow rate of

liquid hydrogen is $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and the particle size of solid oxygen is $1\,000 \mu\text{m}$, the specific charge of solid oxygen particles reaches $10 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$; the saturation charge of particles is about 84 pC ; the charge density of two-phase flow is $2.84 \times 10^{-4} \text{ C} \cdot \text{m}^{-3}$, which is 8 orders of magnitude larger than that of pure liquid hydrogen flow. With the increase of particle-wall collisions, the particle charge tends to be saturated. The parameters of pipe flow have significant influence on the charging law. The particle specific charge decreases slightly with the increase of particle mass flow rate, increases with the increase of tube length and the decrease of tube diameter. The particle specific charge decreases first and then increases with the increase of liquid hydrogen flow rate, so there is a minimum value. The particle property also has an effect on the charged energy. The particle specific charge has minimum and maximum value with the increase of particle size, and the particle Young's modulus, resistivity and density also have a certain effect on the charging law. The research work can provide theoretical support for the design and safety protection of liquid hydrogen transmission system.

Keywords: liquid hydrogen; solid oxygen particles; charge evolution; static accumulation

液氢具有高比冲、无污染等特点,在航天和能源领域的应用日益广泛^[1]。但是,液氢易燃易爆且高度电绝缘,在输送过程中易产生静电起电,造成安全隐患^[2]。同时,液氢作为深冷介质,其工作温度远低于空气凝固点。在进行液氢加注、排空等操作时,空气易渗入并形成固空颗粒^[3]。由于氮在液氢中的溶解度更高,积累的固空多为富氧或固氧颗粒^[4-5]。固体颗粒与管壁碰撞产生静电电荷,即摩擦荷电。当电荷累积到一定程度时,可能导致火花放电引发爆炸^[6-7],若固空颗粒中氧比例较高,甚至可能发生爆炸^[8-9]。因此,明确固空颗粒在液氢管流中的静电积聚规律与边界对液氢输送系统的静电防护尤为重要。

目前,液氢的静电特性已引起学者关注。Cassutt等^[10]通过实验证明了液氢在储存和输运中会产生显著的静电积聚,且液氢极低的电导率导致电荷难以耗散。Liu等^[11]建立了电场与流场耦合理论模型,仿真得到液氢中电荷密度约为 $10^{-12} \text{ C} \cdot \text{m}^{-3}$ 。携带固空颗粒的液氢管流中,固液两相流动特性对研究静电积聚具有重要影响。目前,固-液两相流的研究对象包括工业领域的管道流、流化床等,常用数值方法有连续法和离散法^[12]。其中,连续法较典型的为双流体模型,而离散法则包括拉格朗日颗粒轨道(Lagrangian particle tracking, LPT)方法和离散单元法(discrete element method, DEM)^[12]。在研究稀疏颗粒的运动,即颗粒相体积分数小于5%时,多采用LPT方法^[12]。在处理密相颗粒运动时,通常采用DEM方法。Tsuiji等^[13]利用LPT法对提升管内颗粒的聚团行为进行了研究,并与Tsuo等^[14]用双流体模型得到的结果做了对比,结果表明:两种

模型得到的气体速度等影响因素对模拟结果的影响趋势相同,但LPT法得到的结果中颗粒聚团更频繁,更符合实际过程。上述方法对相间耦合作用和颗粒间作用均有相关描述,但要实现对颗粒荷电的仿真预示仍面临较大挑战^[15]。

摩擦荷电的本质是两种不同材料接触表面电荷的转移,包括电子、离子和材料转移等^[16]。对于气力输送过程中的颗粒荷电问题,Harper^[17]指明,因材料功函数的不同而产生的接触电势差是电荷转移的驱动力。Murata^[18]、Mehrani等^[19]提出了光电发射、表面态等不同的荷电机理。但是,在颗粒碰撞与分离过程中,电荷传递微观过程与荷电机理仍不明确。电子转移机制认为,金属间的接触荷电理论与费米能级和功函数相关,电子通过量子力学的隧道效应进行转移,金属-绝缘体的荷电理论与绝缘材料的等效功函数有关,但绝缘体间的荷电理论尚无定论。离子和材料转移机制分别认为,物质表面水分子层中的离子和物体碰撞摩擦造成的表面磨损导致了电荷交换^[16,20]。根据电荷交换载体不同,所建立的荷电模型包括:电容器模型^[16],外加电场下的电荷转移模型^[21],水合离子电荷转移模型^[22]和表面状态模型等^[16]。微观尺度的研究有助于揭示电荷的内在转移规律,完善颗粒荷电机理,而宏观尺度的研究对颗粒流动带电行为的监测和控制具有价值。两相流动中颗粒群的电荷积聚过程并非单颗粒碰撞的简单叠加,流场不仅起到动力源作用,也通过双向耦合影响颗粒行为,使颗粒群的荷电过程更为复杂。在实验层面,Watano^[23]发现,随着输送气流速度增加,颗粒电荷在达到饱和前会持续增加,而Nifuku

等^[24]的结果显示,颗粒比电荷(单位质量颗粒带电量)随流速增加存在极值。实验结果的不可重复性归因于颗粒电荷对环境因素的敏感性,实验初始和边界条件难以控制。在理论层面,Tanoue 等^[25]的结果显示,颗粒电荷随 Re 增加而减少,但 Grosshans 等^[26]的结论与之相反,说明不同荷电模型对应的电荷交换载体对荷电过程的影响不同。Lim 等^[27]发现,静电力对颗粒行为的影响不大,而 Grosshans 等^[28]的研究表明,静电力主导颗粒的涡旋运动。Li 等^[29]的结果显示, St 数高的颗粒更易受到静电的影响。理论计算结果同样不具备广泛的一致性,这是因为单个荷电模型无法涵盖所有作为电荷交换的载体,潜在的荷电机理仍没有被完全揭示。其中,由电容器模型得到的理论数据与实验的验证性较好,也被多数学者采纳。

两相流动电荷积聚研究中,对于液氢这种低黏度、低密度、低电导率的低温流体研究较少,固氧/固空颗粒等低温物质的电学性质难以测量,而液氢加注工艺流程的静电防护对运行安全性尤为重要。因此,研究低温液氢中固氧颗粒在输送过程中产生静电的积聚效应及分布特点,建立静电积聚的数理模型,并获得定量的积聚规律特性,为提出抑制或消除管内颗粒静电积聚的方法和措施提供理论依据,减小由于颗粒输运过程中静电积聚产生的危险性,对于控制监测颗粒电荷积聚具有重要指导作用。本文研究湍流、颗粒和管道间复杂的相互作用及液氢管路静电积聚规律与边界,通过参数化研究分析固氧颗粒电荷演化过程的积聚效应以及电荷积聚的影响因素和分布规律。

1 数值模型建立

本文建立了拉格朗日颗粒轨道法与计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)的耦合模型,并采用电容器模型对液氢管路中固氧颗粒的起电过程开展仿真研究。含固氧颗粒的液氢管内固液两相流物理模型示意图如图 1 所示。其中,水平传输管长为 L ,半径为 R ,液氢携带固氧颗粒以流速 u_{inlet} 流入,从右侧排出。固氧颗粒速度为 u_p ,带电量为 Q 。

1.1 流体-颗粒动力学模型

将液氢视为不可压连续介质。在欧拉坐标系框架下,采用 Navier-Stokes 方程描述液氢流动过程,并通过相间相互作用与颗粒相耦合。由于液氢管路中渗入空气量较少,固氧颗粒量较少^[5],颗粒体积分数与流体相比可忽略,因此在控制方程中不引入颗

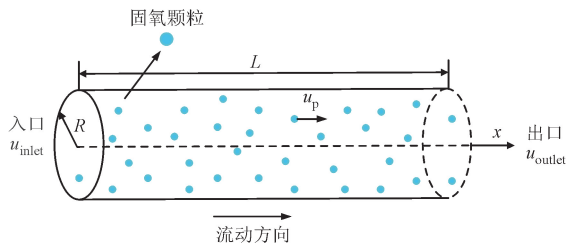


图 1 含固氧颗粒的液氢管流示意

Fig. 1 Schematic diagram of liquid hydrogen pipe flow with solid oxygen particles

粒相体积分数。流体质量和动量方程表示为

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

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

式中: $\mathbf{u}$ 、 p 、 ρ 、 ν 、 $\mathbf{F}_s$ 分别为流体速度、压力、密度、运动黏度和颗粒对流体体积力。

假设颗粒由相同材料、刚性、单分散、单组分的稀疏球形颗粒组成,选用 LPT 法对固液两相流开展仿真^[12]。其中,每一个固氧颗粒均可被示为一个质点,运动方程通过牛顿第二定律^[30]得出

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{f}_g + \mathbf{f}_{coll} + \sum \mathbf{f}_p \quad (3)$$

式中: $\mathbf{f}_g$ 、 $\mathbf{f}_{coll}$ 分别表示由重力和碰撞引起的加速度; $\sum \mathbf{f}_p$ 包括颗粒所受曳力、浮力、静电力、压力梯度力、虚拟质量力、Saffman 力、Basset 力等引起的加速度,但与颗粒本身惯性相比,静电力、Basset 力对颗粒行为的影响很小,通常可以忽略^[30]。

单个固氧颗粒所受曳力^[26]为

$$\mathbf{f}_{fd} = -\frac{3\rho}{8\rho_p r_p} C_d |\mathbf{u}_{rel}| \mathbf{u}_{rel} \quad (4)$$

式中: C_d 为曳力系数; $\mathbf{u}_{rel}$ 表示滑移速度。曳力系数与颗粒雷诺数 $Re_p = 2|\mathbf{u}_{rel}|r_p/\nu$ 的关系^[26] (r_p 为颗粒半径)如下

$$C_d = \begin{cases} \frac{4}{Re_p} (6 + Re_p^{2/3}), & Re_p \leq 1000 \\ 0.424, & Re_p > 1000 \end{cases} \quad (5)$$

颗粒间碰撞为完全弹性碰撞,不考虑碰撞造成的速度、能量损失。颗粒与壁面间是不完全弹性碰撞,碰撞后颗粒法向速度改变

$$u'_{p,n} = -k_e u_{p,n} \quad (6)$$

式中: k_e 为恢复系数。

1.2 颗粒荷电模型

对于金属-绝缘体碰撞,通常采用电容器模型^[16]。该模型假设电子转移是电荷交换的主要方式,并将颗粒与壁面的接触区视为电容器,如图 2 所示。

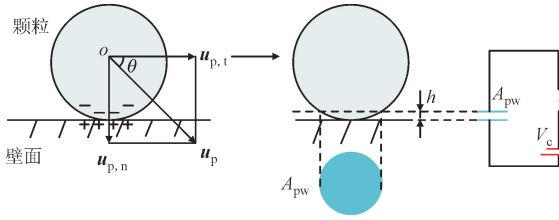


图2 粒壁碰撞示意

Fig. 2 Schematic diagram of particle-wall collision

电容器模型采用接触体表面功函数差 V_c 驱动电子转移,与接触体几何因素相关的电容间隙 h 由电子转移的临界距离决定,接触面积 A_{pw} 用于计算电荷交换面积以及接触电容。颗粒与壁面分离后,得到电子的颗粒带负电,交换的电荷从碰撞区域均匀扩散至整个颗粒表面。液氢管路中固氧颗粒与管壁的碰撞视为金属-绝缘体碰撞,并且液氢系统温度恒定为 20 K,温度对材料物性及电荷交换的影响可忽略^[16]。因此,本文可采用电容器模型计算两相流中颗粒的电荷积聚。

固液两相输送过程发生两类电荷交换,包括颗粒间碰撞引起的电荷扩散和颗粒-壁面碰撞引发的电荷转移。颗粒 i 和颗粒 j 接触期间,各自电荷交换量 ΔQ_i 和 ΔQ_j ^[26] 为

$$\Delta Q_i = \frac{C_i C_j}{C_i + C_j} \left(\frac{Q_j}{C_j} - \frac{Q_i}{C_i} \right) (1 - e^{-\Delta t_{pp}/\tau_{pp}}) = -\Delta Q_j \quad (7)$$

式中: C_i 、 C_j 、 τ_{pp} 、 Δt_{pp} 分别为颗粒 i 、 j 的电容、颗粒电荷弛豫时间和接触时间,可按照下列公式确定

$$C_i = 4\pi\epsilon_0 r_{p,i} \quad (8)$$

$$\tau_{pp} = \frac{C_i C_j}{C_i + C_j} \frac{r_{p,i} + r_{p,j}}{A_{ij}} \varphi_p \quad (9)$$

$$\Delta t_{pp} = \frac{2.94}{|u_{p,ij}|} \alpha_{ij} \quad (10)$$

$$A_{ij} = \pi \frac{r_{p,i} r_{p,j}}{r_{p,i} + r_{p,j}} \alpha_{ij} \quad (11)$$

$$\alpha_{ij} =$$

$$r_{p,i} r_{p,j} \left(\frac{5}{8} \pi \rho_p (1 + k_e) |u_{p,ij}|^2 \frac{\sqrt{r_{p,i} + r_{p,j}}}{r_{p,i}^3 + r_{p,j}^3} \frac{1 - v_p^2}{E_p} \right)^{2/5} \quad (12)$$

其中, ϵ_0 为真空介电常数, A_{ij} 为颗粒接触面积, φ_p 为颗粒电阻率, $u_{p,ij}$ 为颗粒间相对速度, α_{ij} 为颗粒接触系数, v_p 和 E_p 分别表示颗粒泊松比和杨氏模量。

有别于颗粒间碰撞,颗粒与壁面碰撞的电荷交换量 ΔQ_{pw} 由动态电荷转移 ΔQ_c 和预电荷贡献 ΔQ_t 组成^[26,31], ΔQ_c 和 ΔQ_t 分别与材料和颗粒电荷有关。

ΔQ_{pw} 的定义为

$$\Delta Q_{pw} = \Delta Q_c + \Delta Q_t \quad (13)$$

$$\Delta Q_c = CV_c (1 - e^{-\Delta t_{pw}/\tau_{pw}}) \quad (14)$$

$$\Delta Q_t = \frac{1}{4} \frac{\alpha_{pw} Q}{r_p} \quad (15)$$

式中: C 、 V_c 、 Δt_{pw} 、 τ_{pw} 和 α_{pw} 分别为接触电容、接触电位差、粒壁接触时间、电荷弛豫时间和碰撞系数,可按照下列公式确定

$$C = \frac{\epsilon_0 A_{pw}}{h} \quad (16)$$

$$\Delta t_{pw} = \frac{2.94}{|u_p|} \alpha_{pw} \quad (17)$$

$$\tau_{pw} = \epsilon \epsilon_0 \varphi_p \quad (18)$$

$$\alpha_{pw} = r_p \left(\frac{5}{8} \pi \rho_p (1 + k_e) |u_p|^2 \cdot \left(\frac{1 - v_p^2}{E_p} + \frac{1 - v_w^2}{E_w} \right) \right)^{2/5} \quad (19)$$

$$A_{pw} = \pi r_p \alpha_{pw} \quad (20)$$

其中, A_{pw} 为接触面积, v_w 和 E_w 分别为壁面泊松比和杨氏模量, ϵ 为壁面相对介电常数。

颗粒间相互碰撞不会产生新的电荷,仅会交换原有电荷;颗粒与壁面碰撞产生新的电荷,并且由于颗粒-流体、流体-壁面之间的电荷交换可忽略,粒-壁碰撞也是固液两相流中颗粒带电的唯一来源^[32]。

粒壁间电荷交换由不同材料间的接触电位差 V_c 驱动^[16],其表达式为

$$V_c = V_p - V_w - \frac{2h}{\pi \epsilon_0 d_p^2} Q \quad (21)$$

式中: V_p 、 V_w 分别为颗粒和壁面材料的表面功函数,等号右侧第 3 项表示由颗粒荷电后引起的附加电势差。

颗粒和壁面材料的功函数决定了电荷积聚程度。功函数是将电子从固体内部转移到表面外一点所需的最小能量。对于固氧颗粒,可利用 Materials Studio 软件计算其物性。本文通过比较固氧晶体费米能级与远离晶体表面的静电势计算固氧功函数。由于固氧凝固后随温度降低形成不同的晶体结构,导致晶格参数($a \sim V_m$)发生改变,本文根据表 1 数据构建 20 K 液氢系统中固氧 α -O₂ 晶胞^[33]。由于功函数对晶体结构和表面取向具有较大依赖性,首先需要依据能量守恒对固氧晶胞进行分子、几何优化以忽略晶体表面松弛的影响。随后,切割晶胞形成单面分子层并构建间隔 20×10^{-10} m 真空层的堆积阵列,以忽略真空层两侧分子层的静电相互作用。

最后,根据堆积体系静电势的空间分布可得到固氧 $\alpha\text{-O}_2$ 的功函数约 6.37 eV。此外,本文通过上述方法得到金属铬 Cr 的功函数为 4.46 eV,与标准值 (4.5 eV) 的误差不到 1%。因此,该方法能够准确计算材料功函数。

表 1 20 K 下固氧 $\alpha\text{-O}_2$ 的晶胞结构^[33]

Table 1 Cell structure of solid oxygen $\alpha\text{-O}_2$ at 20 K ^[33]	
晶格参数	数值
晶格常数 $a/\text{Å}$	5.389
晶格常数 $b/\text{Å}$	3.426
晶格常数 $c/\text{Å}$	4.247
晶轴夹角 $\beta/^\circ$	117.780
摩尔体积 $V_{\text{m}}/(\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1})$	20.890

1.3 模型设置

本文取管长为 2 m、管径为 10 mm 的水平管为参考工况,研究含固氧颗粒液氢管流的静电积聚规律。采用 COMSOL Multiphysics 软件建立水平管三维模型。设置速度入口、压力出口,无滑移壁面边界条件,管壁接地以导出壁面电荷,该处理不影响颗粒电荷积聚饱和值。颗粒以与流体相同速度注入,颗粒数由颗粒质量确定。

在固液两相流模拟中,时间步长 Δt_p 通常取 Rayleigh 时间步长 Δt_R 的 10%~40% 以满足精度要求^[34]。本文采用 Rayleigh 时间步长的 30%,即 8×10^{-7} s 进行仿真计算。其中,Rayleigh 时间步长根据最小颗粒尺寸计算,计算公式为

$$\Delta t_R = \frac{\pi r_p}{0.163 v_p + 0.8766 \sqrt{\frac{\rho_p}{G_p}}} \quad (22)$$

式中: G_p 为颗粒剪切模量。

1.4 模型验证

本文建立了网格单元数分别为 21 万、84 万、119 万和 166 万的 4 套模型,根据颗粒比电荷 Q^{sc} 和平均冲击电荷 ΔQ_{pw} (电荷交换量) 评价网格的适用性,结果如图 3 所示。可以看出,采用 119 万网格单元模型满足要求。

图 4 给出了单个聚四氟乙烯 (PTFE) 颗粒与黄铜板碰撞带电过程预测结果,并与 Grosshans 等^[35] 和 Matsuyama 等^[36] 的数据进行了比较。图 4(a) 显示了颗粒电荷 Q 和冲击电荷 ΔQ_{pw} 的演变过程,平均误差分别为 1.59%、4.76%。图 4(b) 显示了冲击电荷 ΔQ_{pw} 随颗粒初始电荷的变化规律,计算结果遵循 Matsuyama 等^[36] 提出的线性曲线,与实验数据的平均误差为 13.18%。

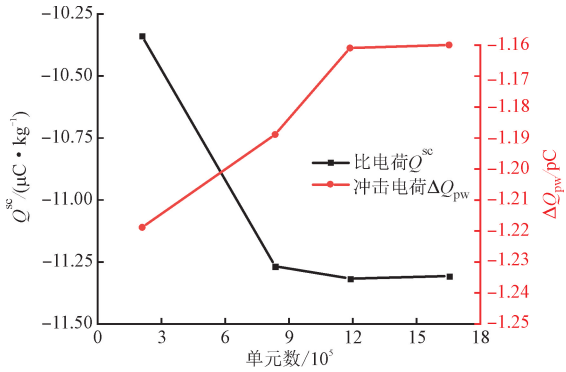
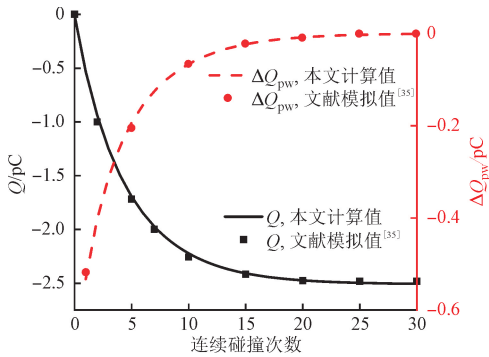
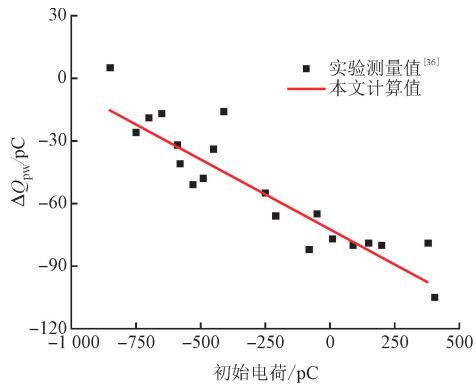


图 3 网格数对数值计算结果的影响
Fig. 3 Influence of grid number on numerical results



(a) 颗粒电荷和冲击电荷的演变过程



(b) 初始电荷对冲击电荷的影响

图 4 单颗粒模型的验证

Fig. 4 Verification of the single particle model

针对固液两相流电荷积聚,本文选用 Watano^[23] 数据作为比较依据,结果如图 5 所示,研究对象为气力输运水平管道中 2.5 g 聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 颗粒的电荷积聚过程,颗粒带负电。可以看出,颗粒比电荷 Q^{sc} 随 Re 增加存在极大值。数据平均误差为 7.22%,最大误差为 18.40%。综合来看,本文所构建模型能够表征固氧颗粒的电荷积聚规律。

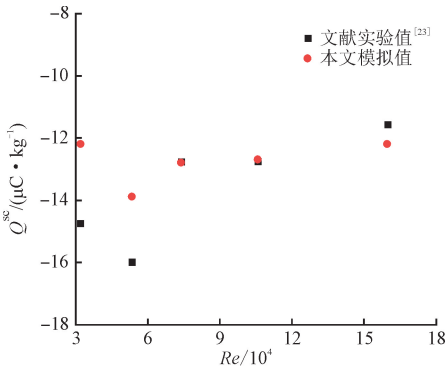


图 5 颗粒比电荷随雷诺数的变化规律
Fig. 5 Variation of particle specific charge with Re

2 结果与讨论

本文模拟流体相为液氢、固体相为 α -O₂ 的固氧颗粒,温度为 20 K。表 2 提供了用于模拟含稀相固氧颗粒的液氢水平管参数。由于颗粒表面电位极性不确定,本节颗粒电荷以绝对值给出^[35]。其次,本研究中颗粒相体积分数最大值为 4.9%,小于 5%,满足 LPT 法的使用条件^[12]。

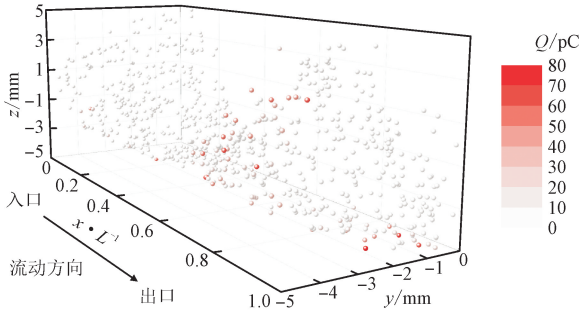
表 2 模拟所用的含稀相固氧颗粒的液氢水平管参数
Table 2 Parameters of liquid hydrogen horizontal tube with dilute solid oxygen particles used in simulation

模拟参数	数值
管道长度 L/m	2 ^[35]
管道内径 D/mm	10
液氢流速 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	10
固氧颗粒粒径 $d_p/\mu\text{m}$	1 000
颗粒质量流量 $q_{\text{mp}}/(\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$	10
流体密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	70.899 ^[11]
流体运动黏度 $\nu/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	1.948×10^{-7} ^[11]
颗粒泊松比 ν_p	0.392
颗粒杨氏模量 E_p/Pa	1.924×10^9
颗粒剪切模量 G_p/Pa	6.912×10^8 ^[33]
颗粒密度 $\rho_p/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 531 ^[33]
颗粒功函数 V_p/eV	6.37
颗粒电阻率 $\varphi_p/(\Omega \cdot \text{m})$	1.2×10^9 ^[33]
恢复系数 k_e	0.95
电容间隙 h/m	1×10^{-10} ^[26]
管道泊松比 ν_w	0.28 ^[26]
管道杨氏模量 E_w/Pa	1×10^9 ^[26]
管道功函数 V_w/eV	4.51
管道相对介电常数 ϵ	5 ^[26]
真空介电常数 $\epsilon_0/(\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$	8.854×10^{-12}

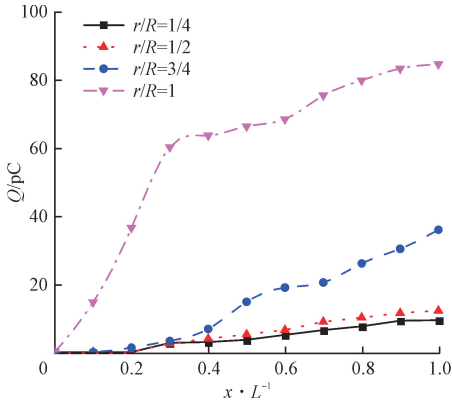
2.1 固液两相流动电荷积累效应

图 6(a)展示了带电颗粒在液氢管流中的分布。可以看出,进口处多数颗粒不带电,经过与壁面碰撞

起电和颗粒间电荷交换后,出口处带电颗粒增多,带电量增强。图 6(b)展示了不同位置 4 个径向截面的颗粒电荷分布,图中 r 为颗粒距管道中心轴的距离, R 为管道半径。可以看出,壁面区域颗粒电荷远高于流动核心区域,并通过颗粒间碰撞向核心区传递电荷,且随着流动距离增加,整体带电量上升。此外,颗粒电荷随流动距离增加逐渐达到饱和,近壁区的颗粒由于频繁的粒壁碰撞率先饱和。由图 6(b)可知,固氧颗粒积聚饱和电荷量约为 84 pC。



(a)带电颗粒几何分布



(b)颗粒电荷随径向分布情况

图 6 液氢管流中固氧颗粒的电荷分布
Fig. 6 Charge distribution of solid oxygen particles in liquid hydrogen tube flow

当液氢流速为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,大部分颗粒携带电荷较少,液氢管流中稀相固氧颗粒的平均电荷 Q^w 约为 10 pC。将稳态下管内颗粒电量和与管路总体积相比^[37]可知,单位体积液氢中固氧颗粒电荷量为 $2.84 \times 10^{-4} \text{ C} \cdot \text{m}^{-3}$,较纯液氢大 8 个数量级^[11]。因此,含固氧颗粒液氢管流的静电防护面临更严峻的挑战。

静电电荷随时间和位移不断积累^[38],当出口颗粒总电荷 Q_{out} 达到安全阈值时,可能引发静电危害。图 7 展示了不同管长的出口电荷 Q_{out} 随时间变化规律。可以看出,出口电荷 Q_{out} 随颗粒群的流动逐渐增加并趋于稳定。管道越长,粒壁碰撞次数越多,出口电荷 Q_{out} 越大,稳定后的出口总电荷 Q_{out} 分别约

为 551、1 204、2 233 pC,与管长近似成正比。因此,长管道的安全威胁更大。另外,曲线在入口段的斜率较小,这是由于颗粒释放后需经历随机扩散才能与壁面碰撞。

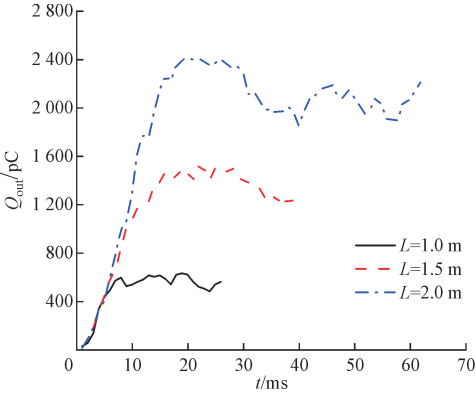


图 7 不同管长的出口电荷随时间变化规律

Fig. 7 The change of outlet charge of different tube lengths with time

2.2 固液两相电荷积聚影响因素

图 8 显示了出口比电荷 Q^{sc} 、平均冲击电荷 ΔQ_{pw} 、出口粒子平均电荷 Q^{av} 、出口电流 I_{out} 4 种统计参数随固氧粒径的变化规律。可以看出,随着粒径增大,颗粒电荷 Q^{av} 和冲击电荷 ΔQ_{pw} 增大,比电荷 Q^{sc} 和电流 I_{out} 存在极小值和极大值。由图可知,颗粒电荷 Q^{av} 对粒径非常敏感,且随着粒径增加,颗粒电荷增长趋势加快。由式(17)、(20)可知,粒径与接触面积、时间正相关,故冲击电荷 ΔQ_{pw} 和颗粒电荷 Q^{av} 随粒径增大而增大。同时,当颗粒质量流量一定时,粒子数随粒径增大逐渐减少,所以比电荷 Q^{sc} 和电流 I_{out} 存在极小值和极大值。比电荷 Q^{sc} 的极小值、极大值分别为 11.29、12.12 $\mu C \cdot kg^{-1}$,电流 I_{out} 的极小值、极大值分别为 0.54、0.76 μA 。此外,静电危害通常源于颗粒放电能量过高^[39],所以静电安

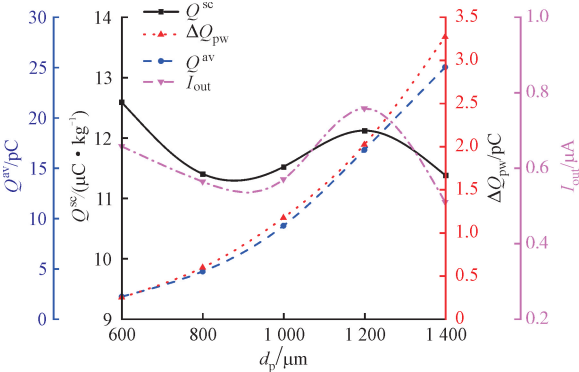


图 8 粒径对电荷积聚的影响

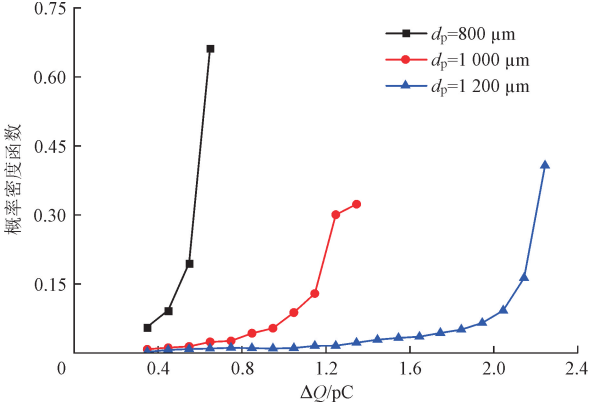
Fig. 8 Effect of particle diameter on charge accumulation

全性往往由颗粒电荷 Q^{av} 决定。综上可知,大尺寸固氧颗粒电荷 Q^{av} 更大,建议通过布置滤网减小颗粒粒径的方法提高运行安全性。

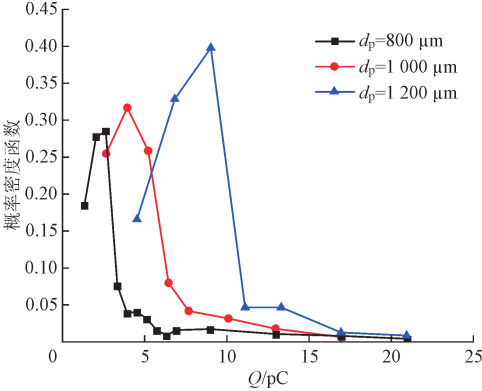
图 9 展示了沿程冲击电荷 ΔQ (即整个管道内粒壁碰撞所产生的电荷交换)和颗粒出口电荷 Q 的概率密度函数(probability density function,PDF)。PDF 反映了所求数值统计次数与总数的比值。

图 9(a)为沿程冲击电荷 ΔQ 的概率密度分布。可以看出,每条曲线均呈现左低右高的趋势,且粒径增大,曲线右移。据图 4(a)可知,冲击电荷随碰撞次数增多逐渐降低。所以,图 9(a)中每条曲线右侧较大的冲击电荷对应初期碰撞所发生的电荷交换,左侧则对应后期碰撞。并且,限于管长,粒壁碰撞大多属于初期碰撞,故曲线右侧 PDF 更大。同时,粒径越大,接触面积、时间越大,冲击电荷越大,曲线越接近右侧。

图 9(b)为出口电荷 Q 的概率密度分布。可以看出,曲线存在波峰,且粒径增大,波峰右移,即颗粒电荷 Q^{av} 增大,与图 8 趋势相符。并且,限于管长,颗粒普遍发生 0~20 次碰撞,如图 10 所示,使得大多颗粒电荷处于相同范围,故图 9(b)存在波峰。



(a)沿程冲击电荷的概率密度分布



(b)颗粒出口电荷的概率密度分布

图 9 粒径对电荷分布的影响

Fig. 9 Effect of particle diameter on charge distribution

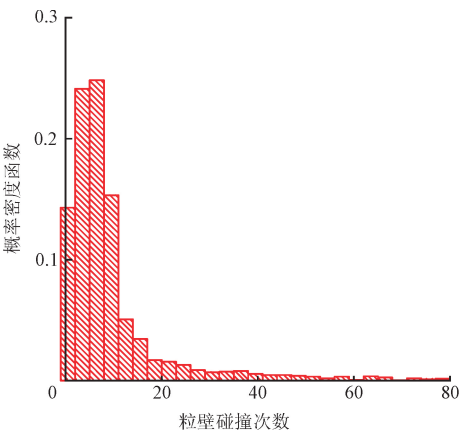


图 10 粒壁碰撞次数直方图

Fig. 10 Histogram of the number of grain wall collisions

图 11 显示了 4 种统计参数随颗粒质量流量的变化规律。可以看出,随着颗粒质量流量增加,比电荷 Q^{sc} 和颗粒电荷 Q^{av} 略有减小,这是由于粒子数增多导致颗粒间碰撞更频繁,颗粒轨迹被限制,难以与壁面碰撞。同时,平均冲击电荷 ΔQ_{pw} 几乎不变,因为粒子数增加不会影响碰撞剧烈程度。另外,出口电流 I_{out} 增加与单位体积粒子数的变化有关。综上可知,需做好防漏和静电防护,密切关注固氧颗粒的形成与电荷积聚。

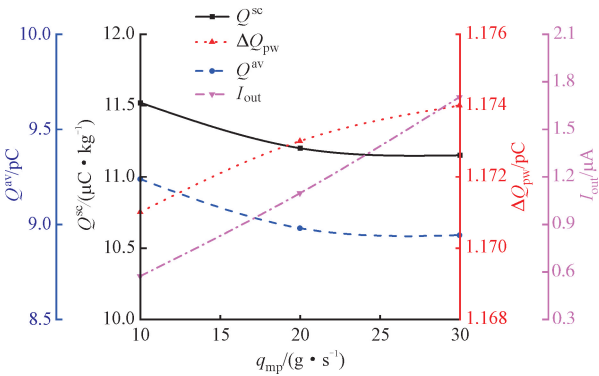


图 11 颗粒质量流量对电荷积聚的影响

Fig. 11 Effect of particle mass flow on charge accumulation

图 12 显示了 4 种统计参数随管长的变化规律。可以看出,随着管长增加,比电荷 Q^{sc} 、颗粒电荷 Q^{av} 和出口电流 I_{out} 逐渐增大,且增幅逐渐降低,与图 4(a) 趋势类似。随着粒壁碰撞次数增多,颗粒电荷逐渐饱和,冲击电荷 ΔQ_{pw} 降低。因此,长管道电荷积聚更为严重。为提高运行安全性,实现降低颗粒电荷 Q^{av} 的目的,可增设导电银网、接地线等装置导出电荷,以降低导电装置间的管道长度。

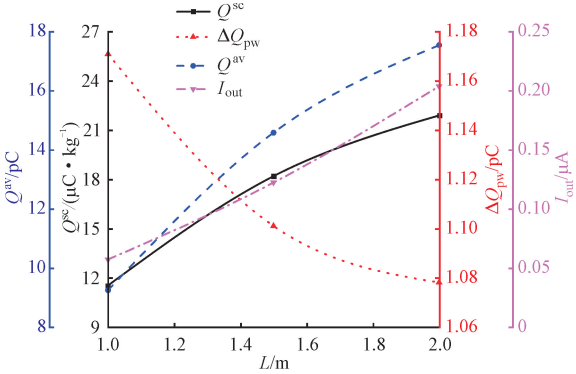


图 12 管长对电荷积聚的影响

Fig. 12 Effect of tube length on charge accumulation

图 13 显示了 4 种统计参数随管径的变化规律。可以看出,随着管径增加,比电荷 Q^{sc} 、颗粒电荷 Q^{av} 和出口电流 I_{out} 减小,平均冲击电荷 ΔQ_{pw} 基本不变。根据理论分析可知,随着管径增加,颗粒由于重力沉降并与壁面碰撞的速度增大,冲击电荷随之增大,但粒壁碰撞概率和电荷交换次数随之降低。然而,图 13 显示冲击电荷变化并不大。这是由于本文采用的电容器模型中,冲击电荷仅取决于颗粒速度。颗粒轴向速度远大于径向速度,沉降带来的影响可忽略。因此,管径对碰撞速度的影响较小,管径主要通过碰撞次数影响电荷积聚。

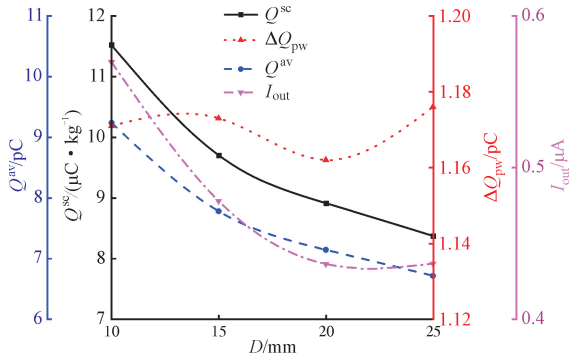


图 13 管径对电荷积聚的影响

Fig. 13 Effect of pipe diameter on charge accumulation

图 14 显示了 4 种统计参数随流速的变化规律。可以看出,随着流速增加,比电荷 Q^{sc} 和颗粒电荷 Q^{av} 存在极小值,冲击电荷 ΔQ_{pw} 单调增加,出口电流 I_{out} 单调减小。当流速从 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增至 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,粒壁碰撞更剧烈,颗粒电荷 Q^{av} 增加;流速降至 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,颗粒在管道内停留时间和碰撞次数增多,颗粒电荷 Q^{av} 同样增加。因此,颗粒电荷 Q^{av} 和比电荷 Q^{sc} 随流速增加存在极小值,分别为 9.15 pC 、 $11.41 \text{ } \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。此外,出口电流 $I_{out} = nqv_0s$,其中, n 、 q 、 v_0 、 s 分别指单位体积粒子数、颗粒电荷、颗粒

粒速度及管道截面积。当颗粒质量流量一定时,随着流速增加,颗粒群更分散, n 值降低,出口电流 I_{out} 随之降低。

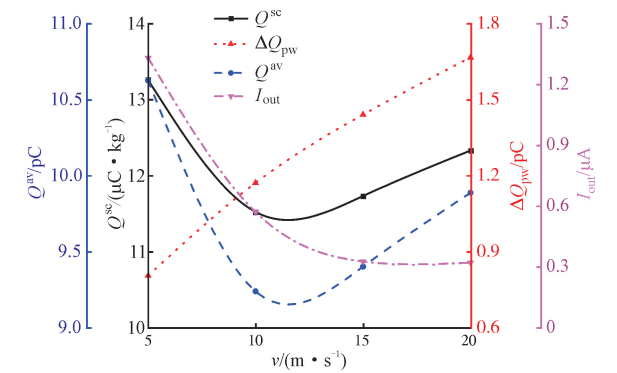


图 14 流速对电荷积聚的影响

Fig. 14 Effect of velocity on charge accumulation

表 3 展示了颗粒物性对电荷积聚规律的影响。通过静电模型可以推断,杨氏模量 E_p 、电阻率 φ_p 、密度 ρ_p 对荷电过程影响最大。当杨氏模量增大时,材料形变减小,接触时间缩短,颗粒电荷降低;当电阻率增大时,电荷交换受到抑制,颗粒电荷降低;当密度增大时,颗粒由于重力作用与壁面的碰撞更剧烈,颗粒电荷增大。PTFE、固氧、PMMA 的杨氏模量和电阻率依次增大,密度依次减小,能够对上述分析进行验证。表 3 中的模拟结果显示,颗粒电荷随杨氏模量、电阻率的增加和密度的降低逐渐减少,与上述分析完全相符。

表 3 颗粒物性对电荷积聚的影响

Table 3 Effect of particle property on charge accumulation

颗粒	$Q^{sc}/(\mu\text{C}\cdot\text{kg}^{-1})$	Q^{av}/pC	$\Delta Q_{pw}/\text{pC}$	$I_{out}/\mu\text{A}$
PMMA	3.23	1.84	0.23	0.17
固氧	11.52	9.24	1.17	0.57
PTFE	497.72	562.91	76.27	21.33

3 结 论

本文针对含固氧颗粒的液氢管路中静电积聚规律及影响因素开展了仿真预示,所得结论如下。

(1)在固氧颗粒-壁面的碰撞与分离过程中,电荷传递的微观过程是电子在接触电势差驱动下进行转移。在液氢流速为 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的工况下,液氢管流中稀相固氧 $\alpha\text{-O}_2$ 颗粒的积聚比电荷 Q^{sc} 约为 $10\text{ }\mu\text{C}\cdot\text{kg}^{-1}$,颗粒电荷 Q^{av} 约为 10 pC ,出口电流 I_{out} 约为 $0.5\text{ }\mu\text{A}$ 。同时,两相流的电荷密度为

$2.84\times 10^{-4}\text{ C}\cdot\text{m}^{-3}$,较纯液氢流大 8 个量级。

(2)固液两相流动中,电荷积累效应包括颗粒电荷随时间和位移的变化规律。管道出口处的颗粒总电荷 Q_{out} 随颗粒群的流动逐渐增加并趋于稳定。另外,壁面区域的颗粒电荷远高于流动核心区,并通过颗粒间碰撞向核心区传递电荷。颗粒电荷随流动距离增加逐渐饱和,在固氧颗粒粒径为 $1\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$ 的工况下,颗粒积聚饱和电量约为 84 pC 。

(3)当颗粒质量流量一定时,比电荷 Q^{sc} 随着粒径的增加存在极小、大值,分别为 $11.29,12.12\text{ }\mu\text{C}\cdot\text{kg}^{-1}$;当粒径一定时,比电荷 Q^{sc} 随着颗粒质量流量的增加略有降低;当颗粒物性一定时,比电荷 Q^{sc} 随管长增加和管径降低逐渐增大,且随流速的增加存在极小值,为 $11.41\text{ }\mu\text{C}\cdot\text{kg}^{-1}$;颗粒物性对电荷积聚的影响主要体现在颗粒杨氏模量、电阻率和密度上。

参考文献:

[1] 王磊, 厉彦忠, 李翠, 等. 火箭发动机液氢预冷回路非稳态传热特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(5): 120-124.
WANG Lei, LI Yanzhong, LI Cui, et al. Study on unsteady heat transfer characteristic of liquid hydrogen precooling loop of rocket engine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(5): 120-124.

[2] IMAMURA T, MOGI T, WADA Y. Control of the ignition possibility of hydrogen by electrostatic discharge at a ventilation duct outlet [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(6): 2815-2823.

[3] 余炳延, 苏嘉南, 安刚. 液氢容器复温周期确定方法研究 [J]. 低温与超导, 2019, 47(1): 21-25.
YU Bingyan, SU Jianan, AN Gang. Theoretical analysis on reheating cycle of liquid hydrogen container [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2019, 47(1): 21-25.

[4] 苏嘉南, 刘海生, 安刚. 液氢储罐固态空气沉积试验研究 [J]. 低温与超导, 2018, 46(9): 34-38.
SU Jianan, LIU Haisheng, AN Gang. Experimental study on sedimentary solid air in liquid hydrogen storage tank [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2018, 46(9): 34-38.

[5] 梁鸽, 王磊, 上官石, 等. 液氢中空气溶解度预测及氮-氧存在模式研究 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(4): 162-170.
LIANG Ge, WANG Lei, SHANGGUAN Shi, et al. Prediction on solubility of air in liquid hydrogen and existing modes of nitrogen and oxygen components [J].

- Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(4): 162-170.
- [6] GLOR M. Ignition hazard due to static electricity in particulate processes [J]. Powder Technology, 2003, 135-136: 223-233.
- [7] SHINBROT T. Granular electrostatics: progress and outstanding questions [J]. The European Physical Journal Special Topics, 2014, 223(11): 2241-2252.
- [8] GLOR M. Hazards due to electrostatic charging of powders [J]. Journal of Electrostatics, 1985, 16(2/3): 175-191.
- [9] 刘海生, 张震, 邱小林, 等. 液氢中固空沉积形式的试验研究 [J]. 低温工程, 2015(1): 13-16.
- LIU Haisheng, ZHANG Zhen, QIU Xiaolin, et al. Experimental study of sedimentary formation of solid air in liquid hydrogen [J]. Cryogenics, 2015(1): 13-16.
- [10] CASSUTT L, BIRON D, VONNEGUT B. Electrostatic hazards associated with the transfer and storage of liquid hydrogen [C]//Advances in Cryogenic Engineering. Boston, MA: Springer US, 1962: 327-335.
- [11] 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.
- [12] 张政, 谢灼利. 流体-固体两相流的数值模拟 [J]. 化工学报, 2001, 52(1): 1-12.
- ZHANG Zheng, XIE Zhuoli. Numerical simulation of fluid-solid two-phase flows [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2001, 52(1): 1-12.
- [13] TSUJI Y, TANAKA T, YONEMURA S. Cluster patterns in circulating fluidized beds predicted by numerical simulation (discrete particle model versus two-fluid model) [J]. Powder Technology, 1998, 95(3): 254-264.
- [14] TSUO Y P, GIDASPOW D. Computation of flow patterns in circulating fluidized beds [J]. AIChE Journal, 1990, 36(6): 885-896.
- [15] 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: 9-66.
- [16] MATSUSAKA S, MARUYAMA H, MATSUYAMA T, et al. Triboelectric charging of powders: a review [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(22): 5781-5807.
- [17] HARPER W R. The Volta effect as a cause of static electrification [J]. Proceedings of the Royal Society of London: Series A Mathematical and Physical Sciences, 1951, 205(1080): 83-103.
- [18] MURATA Y. Photoelectric emission and contact charging of some synthetic high polymers [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1979, 18(1): 1.
- [19] MEHRANI P, BI H T, GRACE J R. Bench-scale tests to determine mechanisms of charge generation due to particle-particle and particle-wall contact in binary systems of fine and coarse particles [J]. Powder Technology, 2007, 173(2): 73-81.
- [20] 韩春. 单颗粒碰撞荷电特性研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021: 14-22.
- [21] HU W, XIE L, ZHENG X. Contact charging of silica glass particles in a single collision [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(11): 114107.
- [22] GU Zhaolin, WEI Wei, SU Junwei, et al. The role of water content in triboelectric charging of wind-blown sand [J]. Scientific Reports, 2013, 3(1): 1337.
- [23] WATANO S. Mechanism and control of electrification in pneumatic conveying of powders [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(7): 2271-2278.
- [24] NIFUKU M, KATOH H. A study on the static electrification of powders during pneumatic transportation and the ignition of dust cloud [J]. Powder Technology, 2003, 135-136: 234-242.
- [25] TANOUE K I, TANAKA H, KITANO H, et al. Numerical simulation of tribo-electrification of particles in a gas-solids two-phase flow [J]. Powder Technology, 2001, 118(1/2): 121-129.
- [26] GROSSHANS H, PAPALEXANDRIS M V. Large eddy simulation of triboelectric charging in pneumatic powder transport [J]. Powder Technology, 2016, 301: 1008-1015.
- [27] LIM E W C, YAO Jun, ZHAO Yanlin. Electrostatic effects in pneumatic transport of granular materials [C]//International Journal of Modern Physics: Conference Series. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2012: 351-361.
- [28] GROSSHANS H, BISSINGER C, CALERO M, et al. The effect of electrostatic charges on particle-laden duct flows [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2021, 909: A21.
- [29] LI Jinzhui, YAO Jun, ZHAO Yanlin, et al. Large eddy simulation of electrostatic effect on particle transport in particle-laden turbulent pipe flows [J]. Journal of Electrostatics, 2021, 109: 103542.
- [30] 郑晨晨. 海泡石矿粉气固混合器结构改进及其内部两相流动特性研究 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2020: 35-42.
- [31] JOHN W, REISCHL G, DEVOR W. Charge transfer

- to metal surfaces from bouncing aerosol particles [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1980, 11(2): 115-138.
- [32] WANG Zhonglin, WANG A C. On the origin of contact-electrification [J]. *Materials Today*, 2019, 30: 34-51.
- [33] FREIMAN Y A, JODL H J. Solid oxygen [J]. *Physics Reports*, 2004, 401(1/2/3/4): 1-228.
- [34] RAMÍREZ-ARAGÓN C, ORDIERES-MERÉ J, ALBA-ELÍAS F, et al. Comparison of cohesive models in EDEM and LIGGGHTS for simulating powder compaction [J]. *Materials*, 2018, 11(11): 2341.
- [35] GROSSHANS H, PAPALEXANDRIS M V. Numerical study of the influence of the powder and pipe properties on electrical charging during pneumatic conveying [J]. *Powder Technology*, 2017, 315: 227-235.
- [36] MATSUYAMA T, YAMAMOTO H. Electrification of single polymer particles by successive impacts with metal targets [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1995, 31(6): 1441-1445.
- [37] 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.
- [38] CERESIAT L, GROSSHANS H, PAPALEXANDRIS M V. Powder electrification during pneumatic transport: the role of the particle properties and flow rates [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2019, 58: 60-69.
- [39] 库士虎. 聚乙烯粉体输送系统静电危险性分析及安全防护 [D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2010: 1-10.
- (编辑 陶晴)