

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.02.019

大型机载油箱电位分布与静电击穿仿真研究

刘豪正^{1,2}, 刘 祎³, 高经诚¹, 郭晨阳¹, 范菊莉¹, 冯诗愚¹

(1. 南京航空航天大学航空学院, 南京 210016; 2. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610073;
3. 航空工业金城南京机电液压工程研究中心, 南京 211106)

摘要: 低导电性的航空燃油在流经管路阀门等结构时会带有一定量的静电荷, 这些静电荷最终会汇入燃油油箱。对于载油量较大的不规则飞机油箱, 静电规律的数值计算与试验测量均不便展开。本文采用数值仿真软件 COMSOL Multiphysics 对油箱在充油过程中静电电位分布、静电放电电位和静电打火能进行仿真计算, 并且对油位高度以及初始电荷密度对油箱静电放电及打火可能性的影响进行研究。通过计算充油过程中产生静电放电所需的最小击穿电压和产生静电带有的能量, 对油箱内电位是否会引起静电击穿和引燃油箱内混合气体进行分析, 为静电引起的油箱爆炸的风险评估提供了一种新思路。

关键词: 人机与环境工程; 静电放电; 帕邢定律; 飞机油箱; 航空安全

中图分类号: V228.1⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2024)02-0358-06

Simulation Study on Potential Distribution and Electrostatic Breakdown of Large Airborne Fuel Tank

LIU Haozheng^{1,2}, LIU Yi³, GAO Jingcheng¹, GUO Chenyang¹, FAN Juli¹, FENG Shiyu¹

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd, Chengdu 610073, China;
3. AVIC Jincheng Nanjing Engineering Institute of Aircraft System, Nanjing 211106, China)

Abstract: Aviation fuel with low conductivity will carry a certain amount of static charges when flowing through pipelines and other structures. These static charges will eventually flow into the fuel tank. It is inconvenient to carry out the numerical calculation and experimental measurement of the static electricity in the irregular fuel tank with large fuel load. The simulation software COMSOL Multiphysics is used to calculate the electrostatic potential distribution, electrostatic discharge potential and electrostatic ignition energy during the oil charging process. The effects of oil level height and initial charge density on the electrostatic discharge and ignition possibility of oil tank are studied. By calculating the minimum breakdown voltage required for generating electrostatic discharge during oil charging and the energy carried by electrostatic, we can analyze whether the potential in the oil tank will cause an electrostatic breakdown and ignite the mixed gas in the oil tank in this way. The study provides a new idea for the risk assessment of oil tank explosion caused by static electricity.

Key words: human and environmental engineering; electrostatic discharge; Paschen's law; fuel tanks; aviation safety

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国民用航空局民航联合研究基金(U1933121); 中央高校基本科研业务费专项资金; 江苏高校优势学科建设工程。

收稿日期: 2023-03-11; **修订日期:** 2023-07-22

通信作者: 范菊莉, 女, 副教授, E-mail: fjli@nuaa.edu.cn。

引用格式: 刘豪正, 刘祎, 高经诚, 等. 大型机载油箱电位分布与静电击穿仿真研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(2): 358-363. LIU Haozheng, LIU Yi, GAO Jingcheng, et al. Simulation study on potential distribution and electrostatic breakdown of large airborne fuel tank[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(2): 358-363.

航空燃料的主要成分为碳氢化合物,是一种低导电率的绝缘流体,燃油内部常常混有一定量的杂质,在输送或者储存的过程中会同管壁、阀门和喷口等部件的表面互相摩擦,产生静电荷。此外,破碎、掺杂、感应以及极化等多种效应也会导致静电荷的产生。燃油本身为低导电性,使电荷无法很好地逸散,大量带电的燃油充入飞机油箱,油箱与燃油间就产生了电势差。如果燃油表面与油箱顶部间的场强达到一定的程度,二者之间发生放电现象,就有可能点燃间隙间混有气态燃油的气体,引发爆炸^[1-2]。

关于储油箱内静电荷积聚可以使电势差达到多高,且能否最终引发爆炸这一问题,已有一些实验与研究。Asano^[3]采用贝塞尔函数求解了静电电势的解析解,计算确定了充满带电液体的圆柱形储罐中最大电位及电场的静电势;Kędzia等^[4]对平行罐和椭球罐电场展开计算;Clermont等^[5]分析了矩形油箱内电荷弛豫的理论,提出了带电燃油注入复合材料油箱产生电荷和电荷弛豫的研究方法;李向明等^[6]利用微机电系统(Micro electro-mechanical system, MEMS)技术对加油过程中管路和油箱内的静电电位进行了测量;王要森等^[7]对航空燃油循环加油系统产生的油面静电电压进行实验测量;董巨辉等^[8]对不同油品与液氢在圆柱形储油罐内的静电电位进行数值计算,得到储罐内气液界面最大电位,并研究了油罐径高比、油品种类等对其影响;赵继飞等^[9]通过实验测量得到相对湿度温度等因素对油面最高静电电位影响;刘超卓等^[10]采用有限差分法计算圆柱形储油罐内电位分布;石日昕^[11]给出了油箱产生放电与爆炸所需的电势差与点火能的推算表明,电位差达到20 kV以上就会发生放电现象,若其能量大于油料最小点火能0.2 mJ或燃油蒸汽在空气中浓度在极限爆炸范围内就会引爆油箱。

目前对相关问题的研究集中在:(1)对管路及油箱中静电产生机理展开研究,并分析起电电位的影响因素;(2)分析静电积聚所造成的危害,提出相应的防护措施;(3)带有一定量静电荷的燃油储存在圆柱形油罐内时,其电位分布、影响因素等问题,由于储油容器内多相介质共存,该类静电场问题不适用解析求解,需借助数值计算方法展开模拟研究^[12];(4)分析满足静电放电及静电打火的条件,研究相关计算方法。

目前计算与实验均针对圆柱形储油罐内静电分布展开,而很多飞机机翼主油箱以及中央油箱形状并不规则,对不规则油箱内电位分布研究空缺;

该条件下的数值计算不便,通常采用有限差分法和分离变量的计算方法并不适用于不规则油箱;目前主要研究针对的储油罐载油量较低,而大型客机通常载油量巨大,以波音737-700为例^[13],可搭载26 036 L燃油,实际飞机油箱内搭载大量燃油时产生的电势差及放电产生的点火能可达多大值,还未给出计算。

本文针对非柱型油箱,采用数值仿真软件COMSOL Multiphysics,建立了简化的飞机主油箱载有带电燃油时的静电电位模型;模拟随储油量上升静电电位的变化;分析了油箱箱体与油面小间隙情况下的静电放电规律与发生打火的可能性。最终得到了不同载油量下,非圆柱油箱内的电位分布情况、不同初始电荷密度对电位及静电放电产生的影响,分析了继续的静电产生放电可用于点火的能量。可据此判断流入燃油的初始电荷密度,及油箱储油规模是否有引发爆炸的风险,从而采取相应措施,达到防爆的目的。

1 油箱内静电场仿真

1.1 模型验证

为验证使用COMSOL进行模拟仿真的可行性,建立如图1圆柱形油罐模型。

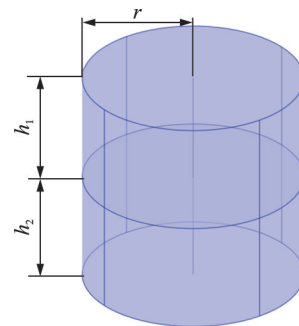


图1 圆柱形油罐模型

Fig.1 Cylindrical oil tank model

图中 r 为油罐半径, h_1 为气体高度, h_2 为燃油高度,使 $r=h_1=h_2=1$ m,初始电荷密度 $\rho=1.0\times 10^{-6}$ C/m³。静电模型满足静电场泊松方程式(1)与拉普拉斯方程式(2),即

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (1)$$

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2)$$

式中: V 为静电势; ρ 为自由电荷密度; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为相对介电常数。

储油罐接地,罐体边界电势设置为0;油气交界面满足电势连续条件。设置燃油内电荷密度及燃油、空气的介电常数。绘制细化的静电场场控制

网格。COMSOL采用自适应求解器算法对局部范围进行网格细化,计算得到油箱内电位值沿油罐高度方向电位值,如图2所示。计算得到电势值随油箱高度变化范围与董巨辉等^[8]使用贝塞尔函数方法求解得到的结果相一致。

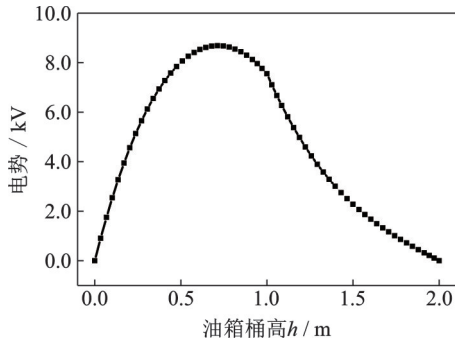


图2 圆柱形储油罐电位分布

Fig.2 Potential distribution of cylindrical storage tanks

1.2 飞机油箱内静电场仿真

以此为依据,采用COMSOL对飞机油箱内电位分布进行计算。建立如图3所示模型,为飞机油箱简化模型及模型俯视图,油箱模型底面积为 12.5 m^2 ,高度为 1 m ,模型最大储油量为 $12\ 500\text{ L}$ 。

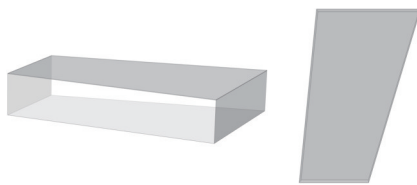


图3 油箱模型

Fig.3 Fuel tank model

确定汇入油箱的初始电流大小即可得到油箱内燃油电荷密度,此前已有人针对管内冲流电流大小进行计算或试验测量^[14-15],基于其研究所得管内冲流电流大小值,可计算得到不同条件下流经圆管的燃油带有的电荷密度,表达式为

$$I = \rho v S \quad (3)$$

式中: I 为电流大小; ρ 为电荷密度; v 为流速; S 为管截面积。通过计算可确定电荷密度量级在 $5 \times 10^{-4}\text{ C/m}^3$ 至 $1 \times 10^{-6}\text{ C/m}^3$ 之间,本文即取此量级之间6个值作为初始电荷密度,来研究不同电荷密度下,燃油油面最大电位以及油箱内最大电位随油面高度的变化规律。

金属油箱导电率较高,且与飞机其他部件连接,电荷会很快逸散,可将边界电势设置为0。同时假定气液界面不存在电荷,交界处满足电势连续条件。从燃油高度 0.01 m 起,依次计算油箱内电位分布情况,并以 0.07 m 为增量提高油箱内燃油液面高度重复计算,直至燃油充满油箱。

1.3 静电场仿真结果

仿真结果如图4和图5所示,油箱内与油气交界面上最大电位随储油量的增加而增加,在达到最大值后油面最大电位有显著下降,而燃油最大电位略微降低,出现这一结果的原因是油箱箱体结构为金属,其电导率远高于低导电性的燃油,油箱箱体上的电荷会较快地逸散掉,可以视为接地条件,在燃油逐渐充满油箱的过程中,如果油面与箱体间隙较小,电位就会有所下降。

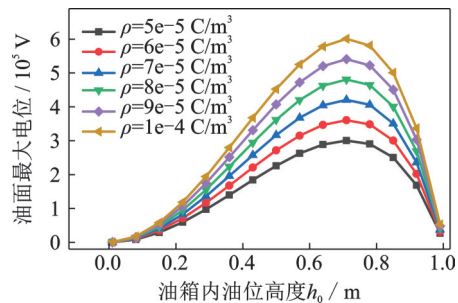


图4 油面最大电位与燃油带有电荷密度关系

Fig.4 Relationship between maximum potential of oil surface and charge density of fuel

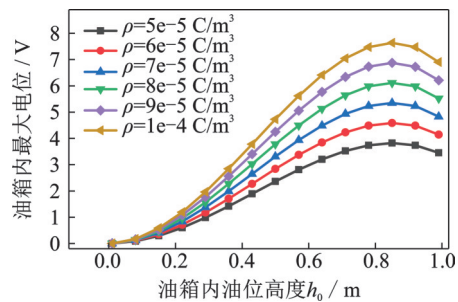


图5 油箱内最大电位与燃油电荷密度关系

Fig.5 Relationship between maximum potential in fuel tank and fuel charge density

在这一充油过程中,油面最大电位存在最大值,在燃油初始电荷密度达到 $1 \times 10^{-4}\text{ C/m}^3$ 时油气交界面上的最大电位可达 $5.81 \times 10^5\text{ V}$ 。

燃油与油箱内气体交界面上的电势最大值在油箱中心位置,绘制不同储油量下,油箱内垂直截面上的电场分布如图6、7所示。可见燃油表面中心区域的电场可视为匀强电场,方向由油面垂直指向油箱箱体顶部内表面。

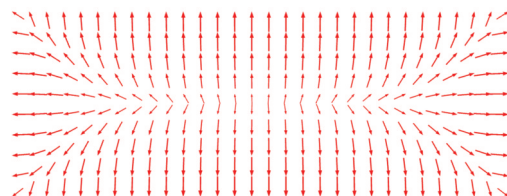


图6 油面高度为 0.99 m 时电场分布

Fig.6 Electric field distribution with oil level of 0.99 m

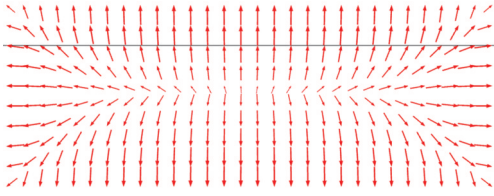


图 7 油面高度为 0.75 m 时电场分布
Fig.7 Electric field distribution with oil level of 0.75 m

2 静电放电与点火分析

2.1 放电及点火能数学模型

为分析在上述电场条件下,油面与箱体之间发生静电放电的可能性,需要得到给定电势差下最小放电电压。静电放电(Electrostatic discharge, ESD)击穿过程本身非常复杂。对于这一过程的具体研究主要依赖由实验值拟合的公式来计算。目前已经建立有相应的静电放电模型^[16],对于其主要研究理论有帕邢定律。帕邢定律用于计算低气压、匀强电场条件下的气体击穿电压,给定工况下受气体压力和空气间隙厚度影响,有

$$U_c = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln\left(\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right)} \quad (4)$$

式中: U_c 表示击穿电压; p 为间隙内气体压强; d 为两极间间隙厚度; A 、 B 为特征参数。在常温常压下, $A=1.5 \text{ m}/(\text{Torr}\cdot\text{m})$, $B=36 \text{ V}/(\text{mTorr}\cdot\text{m})$, $\gamma=0.02$ 。

同时文献[17-18]在对静电击穿特性的研究中给出了式(5)来计算气体最小击穿电压,有

$$U = 25.4d + 6.64\sqrt{d} \quad (5)$$

当电场强度高于介质抗电强度时,也只是存在发生静电击穿的可能,这一现象的具体发生还要同时受到多种条件的制约,而一旦发生静电击穿,也不是必定会引起油箱爆炸,还需要同时对静电放电能量是否满足间隙介质的点燃条件进行分析。

使用式(6)可以计算得到油面与箱体上表面两极间等效电容,即

$$C = \frac{\epsilon_r S_p}{4\pi kd} \quad (6)$$

式中: S_p 为平行电极面积; k 为静电力常量。

电场储存的理论能量计算公式为

$$E = 0.5CU^2 \quad (7)$$

式中 U 为两电极间电势差。在一定的放电条件下放出的实际电压与额定容量之间存在误差,这一误差受放电倍率、环境温度以及内阻阻值的影响,所以需要使用放电效率来对放电火花能进行修正^[19]。

同时由于电容器带有能量在理论上需要无穷长的时间才能释放掉,而可燃物被引燃则是瞬间完成的,那么这火花过程中有相当一部分的能量未得到利用,此外在静电击穿过程中具有一定的能量损耗,同时电极能量本身会发生消散^[20]。这些因素使得使用储存于电容的能量公式来计算得到的临界能量误差较大,张博等^[21]通过实验比对得到储存于电容的总能量有 91% 作用于欧姆损耗和能量损失。还有一部分的能量能起到加热混合物的作用,趋势混合气体的内能增加,参考实际放电能量可能只占其约 2%。因此实际点火花具有的能量应为

$$E = 0.5CU^2\eta \quad (8)$$

式中 η 为效率系数。

2.2 仿真结果与分析

根据经验公式及帕邢定律绘制发生击穿的最小电压曲线如图 8 所示。

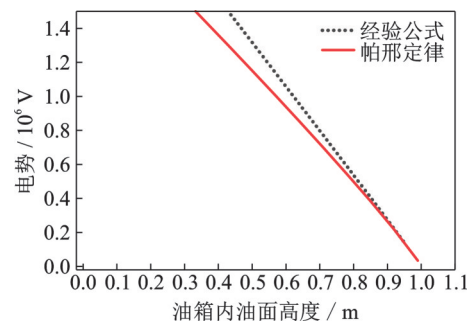


图 8 最小击穿电压随油面高度变化

Fig.8 Relationship between minimum breakdown voltage and oil level height

同加油过程中油箱内电位变化趋势相比较可以看出,虽然在油箱即将充满时油面的最大电位会有所下降,但同时满足击穿条件的最小电压也发生下降,静电击穿风险并不一定随电位降低而减小;而在油箱载油量较少时,由于间隙过大,发生击穿所需电压过高,在油面与顶部箱体间很难发生静电击穿,所以需要对比充油量较大的情况进行进一步研究。

假定油箱内为常温常压环境,充入气体为空气,在油面与箱体两极间存在或产生极小间隙,这时计算得到的油面最小放电电压。将其与不同初始电荷密度下的油面油箱最大电势差进行比较,结果如图 9 所示。由图示结果分析可知,当间隙小于 0.01 m 时,如果注入燃油的初始电荷密度为 $6 \times 10^{-5} \text{ C}/\text{m}^3$,这时油面电压小于满足静电放电的最小电压,不会发生击穿。而如果电荷密度大于 $7 \times 10^{-5} \text{ C}/\text{m}^3$,则油箱内部可能发生静电击穿。绘制

燃油初始电荷密度为 $7 \times 10^{-5} \text{ C/m}^3$ 时高油位(即有击穿风险)的静电火花能曲线如图10所示。由图10可以看出,在满足静电击穿电压的条件下,随击穿间隙减小,油面最大电位降低,发生静电击穿的电火花能由 152 mJ 降至不足 20 mJ 。如果静电火花能大于间隙内混合气体的最小点火能,就会可能发生由于静电打火引发的油箱爆炸事故。

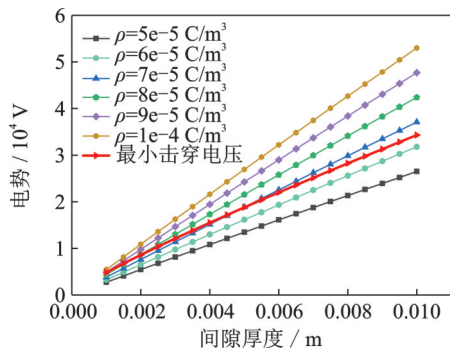


图9 不同电荷密度下油面最大电压与静电放电电压比较
Fig.9 Relationship between maximum voltage of oil surface and electrostatic discharge voltage under different charge densities

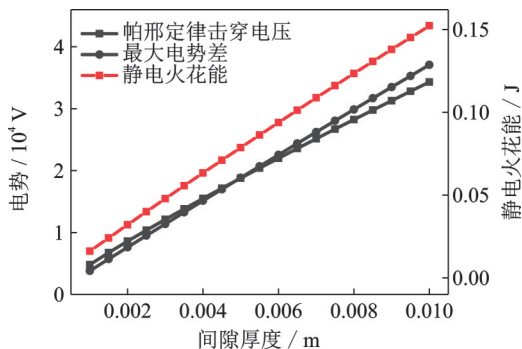


图10 高油位下静电火花能大小
Fig.10 Electrostatic spark energy at high oil level

不同初始电荷密度下的静电火花能曲线如图11所示。由图示可知,当初始电荷密度达到 $8 \times 10^{-5} \text{ C/m}^3$ 时,静电点火能就会超过 20 mJ 。

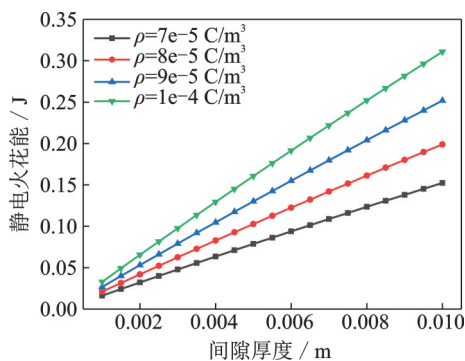


图11 不同电荷密度下静电火花能变化规律
Fig.11 Variation of electrostatic spark energy under different charge densities

3 结 论

对于大型客机油箱,由于其载油量更大,因此在向油箱内充油的过程中可能会产生更高的电位,使油面与箱体顶部间产生更大的电势差。

当油箱内油位较高且处于静态时,具有更高的击穿风险,低油位情况下虽然燃油表面与油箱间具有较大的电势差,但由于间隙过大,满足击穿条件的最小击穿电压很高,不足以产生击穿。在油即将充满油箱时,随油面间隙减小,最小击穿电压下降趋势较油面最大电位的下降趋势缓慢,当流入油箱的燃油电荷密度达到一定程度,就会有击穿风险。对于文中油箱结构,电荷密度达到 $7 \times 10^{-5} \text{ C/m}^3$ 时,就具有了发生静电击穿的可能。

静电放电产生的电火花能只有极小的一部分会作用于点火,因此即使发生静电放电现象,也不一定会导致油箱爆炸,存在随机性。对于文中油箱结构及假设条件下,当电荷密度达到 $8 \times 10^{-5} \text{ C/m}^3$ 时,击穿电流带有的能量已满足引发爆炸的条件。

针对本文研究提出以下建议:控制汇入油箱燃油的电荷密度是消除爆炸风险最有效的措施之一,较高的电荷密度会同时导致较高的击穿风险与较大的点火能;对于爆炸风险进行评估并抑制静电时,不能只观测燃油表面与油箱间具有最大电势差时这一状态,同时需保证在油箱内仅存极小空隙时的静电引燃隐患的排除。

参考文献:

- [1] 王小平,蒋红岩.飞机燃油箱的静电打火及防护[J].航空科学技术,2010(6):19-21.
WANG Xiaoping,JIANG Hongyan. Ignition of electrostatic discharge in aircraft fuel tank and its protection[J]. Aeronautical Science & Technology, 2010(6): 19-21.
- [2] 李林.大型民机复合材料整体油箱雷电、静电防护设计[J].民用飞机设计与研究,2019,132(1):35-39.
LI Lin. Protection design of lightning and static of composite integral fuel tank for large civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2019, 132(1): 35-39.
- [3] ASANO K. Electrostatic potential and field in a cylindrical tank containing charged liquid[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1977, 124(12): 1277-1281.
- [4] KĘDZIA J, LUKANISZYN M. Influence of the tank shape on the electrostatic field generated by spacecharge[J]. Archiv Für Elektrotechnik, 1992, 75(5): 383-386.
- [5] CLERMONT P D S, PAILLAT T, DUVAL Y, et al. Quantification of electrostatic charge generation and relaxation in composite aircraft fuel tanks[C]//Pro-

- ceedings of International Conference on Lightning & Static Electricity (ICOLSE 2015). [S.l.]: [s.n.], 2015: 99-106.
- [6] 李向明,李玉芳.基于MEMS技术的燃油静电测量技术研究[J].内燃机与配件,2020,304(4):253-255.
LI Xiangming, LI Yufang. Research on fuel electrostatic measurement technology based on MEMS technology[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020, 304(4): 253-255.
- [7] 王要森,曲芳,徐彬,等.航空燃油循环加油系统静电特性的试验研究[J].山东工业技术,2019,281(3):12.
WANG Yaosen, QU Fang, XU Bin, et al. Experimental study on electrostatic characteristics of aviation fuel circulation refueling system [J]. Shandong Industrial Technology, 2019, 281(3): 12.
- [8] 董巨辉,黄永华.低导电性油品及液氢流体在储罐内的静电电位计算[J].化工学报,2014,65(Z1):409-414.
DONG Juhui, HUANG Yonghua. Calculation of electrostatic potential of low conductivity hydrocarbon [J]. Ciesc Journal, 2014, 65(Z1): 409-414.
- [9] 赵继飞,苏扬,王海堂,等.温度湿度对储罐油面最高静电电位的影响[J].石油化工设备,2011(6):12-15.
ZHAO Jifei, SU Yang, WANG Haitang, et al. Study of the influence of temperature and humidity on the highest oil surface electrostatic potential of the oil tank [J]. Petro Chemical Equipment, 2011(6): 12-15.
- [10] 刘超卓,陈银吨,王殿生,等.储油罐静电电位的有限差分数值研究[J].石油化工设备,2010,39(5):5.
LIU Chaozhuo, CHEN Yindun, WANG Diansheng, et al. Numerical investigation of electrostatic potential in storage tank by finite difference method[J]. Petro Chemical Equipment, 2010, 39(5): 5.
- [11] 石日昕.飞机地面压力加油系统静电安全设计[J].价值工程,2012,31(24):42-43.
SHI Rixin. The design of electrostatic safety for aircraft ground pressure refueling system[J]. Value Engineering, 2012, 31(24): 42-43.
- [12] JONES R T, WILLIAMS T J, SHARKH S A. Assessment of industrial electrostatic hazards using finite element electric field analysis[J]. Journal of Electrostatics, 1997, 40: 449-454.
- [13] 杨春富.民用飞机设计参考机种之一——波音737-700双发涡扇旅客机[J].民用飞机设计与研究,1996(4):23-26.
YANG Chunfu. One of the reference models for civil aircraft design: Wave sound 737-700 twin engine turbofan passenger aircraft [J]. Civil Aircraft Design and Research, 1996(4): 23-26.
- [14] 王菊芬,蒲家宁,孟浩龙.紊流时输油管道油流静电带电计算研究[J].后勤工程学院学报,2005,21(4):63-68.
WANG Jufen, PU Jianing, MENG Haolong. A study on the calculation of electrification induced by turbulent flows in oil pipes [J]. Journal of Logistical Engineering University, 2005, 21(4): 63-68.
- [15] ZHU S, LIU L, SATOSHI T. Flow electrification of insulated liquid in metal pipes [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(6): 1115-1120.
- [16] 刘尚合,宋学君.静电及其研究进展[J].自然杂志,2007(2):63-68.
LIU Shanghe, SONG Xuejun. Progress in electrostatic and related research [J]. Journal of Nature, 2007(2): 63-68.
- [17] POMMERENKE D. ESD: Transient fields, arc simulation and rise time limit [J]. Journal of Electrostatics, 1995, 36(1): 31-54.
- [18] 原青云,刘尚合,张希军,等.空气静电放电若干特性分析[J].高电压技术,2009,35(8):1951-1956.
YUAN Qingyun, LIU Shanghe, ZHANG Xijun, et al. Analysis of characteristics of air electrostatic discharge [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 1951-1956.
- [19] 陈坤,张小良,陶光远,等.影响静电火花放电的因素[J].中国粉体技术,2021,27(5):1-10.
CHEN Kun, ZHANG Xiaoliang, TAO Guangyuan, et al. Influence factors of electrostatic spark discharge [J]. China Powder Science and Technology, 2021, 27(5): 1-10.
- [20] 张增亮,张景林,蔡康旭.最小点火能的影响因素及计算误差分析研究[J].中国安全科学学报,2004(5):88-91.
ZHANG Zengliang, ZHANG Jinglin, CAI Kangxu. Study on affecting factors of minimum ignition energy (MIE) and analysis on its calculation error [J]. China Safety Science Journal, 2004(5): 88-91.
- [21] 张博,白春华. $C_2H_2-O_2-Ar$ 混合气体爆轰特征参数研究[J].高压物理学报,2013,27(2):287-291.
ZHANG Bo, BAI Chunhua. Investigation on the characteristic detonation parameters of $C_2H_2O_2Ar$ mixtures [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(2): 287-291.