

油品输送过程静电风险监测技术与应用

刘全桢^{1,2*}, 高鑫^{1,2}, 李亮亮^{1,2}, 李义鹏^{1,2}, 孙立富^{1,2}

1 中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院, 青岛 266071

2 化学品安全控制国家重点实验室, 青岛 266071

* 通信作者, liuqz.qday@sinopec.com

收稿日期: 2016-11-15

摘要 本文分析了近年来连续发生的数起油品静电燃爆事故, 对比了目前国内外油品静电风险防控措施。通过对油品静电现场测试以及各类特性参数分析, 验证目前油品静电风险防控措施的有效性, 在此基础上研究了油品静电在线监测技术, 并对油品静电监测设备的应用情况进行介绍, 提出油品静电燃爆危险性防控的新方法。

关键词 油品输送; 静电风险; 燃爆; 在线监测

0 引言

汽油、柴油等易燃易爆油品, 在卸油和加油等作业过程中极易发生火灾、爆炸事故, 造成较大的经济损失和人员伤亡^[1-4]。据美国石油设备协会(PEI)统计, 在2000年至2004年期间, 美国161起加油站火灾事故中, 有78起是由静电导致的。在我国, 加油、卸油环节静电燃爆事故也时有发生。2000年9月, 湖北某加油站卸油过程中因静电引发爆炸; 2001年6月, 广东韶关某加油站将胶管直接插入量油孔喷溅式卸油, 产生大量静电并引发火灾; 2004年1月, 某加油站一摩托车加油, 加油枪喷嘴靠近油箱口时发生静电放电, 导致油箱口冒出火苗; 2005年1月, 南京一加油站卸油过程中静电引燃油蒸气导致爆炸事故发生; 2011年河北廊坊一加油站在卸油结束前, 控油根处发生静电引燃事故。

1 油品静电起电

1.1 油品输送过程的静电起电

液相与气相或与固相的交界面上, 由于电荷分布不均匀, 在交界面处会形成极性相反的偶电层。当液体在介质管道中因压力差而流动时, 偶电层外层离子上的电荷被冲刷下来随液体做定向运动, 形成冲流电流, 冲流电流使介质中的电荷密度逐渐增大。冲流电流的大小与油品静电带电量直接相关, 田强推导了涵盖油品温度 T 、管道半径 a 、油品介电常数 ϵ 、离子迁移率 μ 、油品质量密度 ρ 等因素的无限长管输油品饱和冲流电流 I_{∞} (A)简化计算公式^[5]:

$$I_{\infty} = A_r \frac{2\pi U_m^{n+5/4} a^{9/4} \rho^{1/4} \epsilon^{-\frac{3W_{\mu}}{4kT}}}{T \mu_0^{1/4} \sigma_0} \quad (1)$$

式中: A_r 和 n 是与管壁粗糙程度和物化性质有关的修正系数; U_m 为油品平均流速, m/s; W_{μ} 是离子迁移率的活化能, J; k 为玻尔兹曼常数; σ_0 和 μ_0 分别为离子迁移率和油品电导率的温度函数关系式系数。可以看

引用格式: 刘全桢, 高鑫, 李亮亮, 李义鹏, 孙立富. 油品输送过程静电风险监测技术与应用. 石油科学通报, 2016, 03: 471-476

LIU Quanzhen, GAO Xin, LI Liangliang, LI Yipeng, SUN Lifu. Application of electrostatic safety monitoring techniques for oil transporting processes. Petroleum Science Bulletin, 2016, 03: 471-476. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.043

出在加油站管线固定时,管输油品静电带电量主要取决于油品流速。

1.2 液体流动起电的影响因素

液体流动起电的影响因素很多,如液体速度、管路长度、液体内的杂质、液体电导率、管道材质及管壁粗糙程度、液体流动状态等^[6-9]。而且影响因素一般都不是单向的,如管路长度在一定范围内对静电起电有影响,超过一定长度液体静电会达到饱和值,不随管路长度的变化而变化。轻质油品的离子来源主要是杂质,微量杂质会导致油品静电起电大幅增加,但是也不是杂质越多越容易起电,杂质过多导致电导率较大时,静电电量并不过高。电导率过低、过高时不易产生静电积聚现象。

2 油品静电安全要求

2.1 国外油品静电的主要安全要求

API RP2003《防止静电、闪电和杂散电流引燃的措施》4.5.2对储油罐静电电荷的控制进行了规定,当储罐的蒸汽空间中可能含有易燃混合物(中等蒸汽压产品、被高蒸汽压液体污染的低蒸汽压产品、包含未溶解的氢气或从处理工程中产生的轻碳氢化合物的低蒸汽压产品、或转换装载),必须采取以下保护措施:限制填充线和入射液流的填充速度1 m/s直到填充管在油中的浸没深度为2倍管径或达到61 cm(取二者较小值)。使用内浮顶储罐(内部或者开顶),要遵守1 m/s的极限速度直到顶浮起来。在静电积累并且含有诸如水滴等分散相物质的情况下,禁止通过吹压机吹扫管线,入口速度在整个填充过程中应限制在1 m/s。为了使电荷量最小,一些操作者在最初注油速率完成以后限制最大注油速率。通常使用的最大注油速率在7~10 m/s之间。

NFPA77-2000《关于处理防静电措施的建议》的7.5.2.1条款中规定,在罐体注入初期,应限制流速以减少液体翻滚和动荡。在液体没达到2倍的管径或0.6 m时,流速要控制在1 m/s。因为较低的流速可以保证液体底部的水分沉淀,否则,水分及杂质的混入将显著地提升液体起电趋势。体积大于50 m³的储罐,无论是装不导电液体还是电导率未知的液体,当液面高于输入管口时,可将流速提升至7 m/s。不导电液体罐装过程中,当混有水分时,流速应限制在1 m/s。

BS 5958-2-1998《静电控制 特殊工艺的推荐做法》中规定在油罐装料时,灌入电导率 ≤ 50 pS/m的油料时,速度应不超过1 m/s,直到入口被淹没。在有第二种不能混合的相时,应保持1 m/s的输入速度。

2.2 国内油品静电的主要安全要求

GB12158-2006《防止静电事故通用导则》中对烃类液体灌装时的流速进行了详细的要求。灌装铁路罐车时,液体在鹤管内的容许流速按下式计算: $v \times D \leq 0.8$;灌装汽车罐车时,液体在鹤管内的容许流速按下式计算: $v \times D \leq 0.5$,式中 v —流速; D —鹤管内径。采用顶部进油时,则其注油管宜伸入罐内离罐底不大于200 mm处。在注油管未浸入液面前,其流速应限制在1 m/s以内。当管道内明显存在第二物相时,其流速应限制在1 m/s以内。

GB13348-2009《液体石油产品静电安全规程》第三章预防静电危害的基本方法中规定,应控制油品处于安全流速范围内。当管道内明显存在不相容的第二相时,其流速应限制在1 m/s以内。对于电导率低于50 pS/m的油品,在注入口未浸没前,初始流速不应大于1 m/s,当注入口浸没200 mm后,可逐步提高流速,但最大流速不应大于7 m/s。如果采用其他有效防静电措施(如防静电添加剂、静电消除器等),可不受上述限制。

2.3 油品静电安全要求的不足

目前国内外相关标准规范对油品静电的主要要求表现为对流速、流量的要求,但是目前液体的最大输入速度还不能精确的确定,安全阈值的确定大多还是依赖经验。

液体静电的影响因素众多,单一用流速、流量进行安全管理已经显现出一些问题。比如说安全流速下依然有静电事故发生,同时流速的限制也制约了生产效率。

2.4 油品静电安全监测

目前,国内外油品静电的检测,主要检测带电油品的静电电位。这种检测存在难于实现在线监测、安全控制略显滞后、易受周围构件、环境、分布电容影响等问题。由于电荷密度更能反映油品带电的本质,而且受周围条件的影响较小,所以选择电荷密度作为油品静电在线监测参数是可行的。

3 油品静电在线监测系统

3.1 油品静电电荷密度监测原理

管道内的油品流动一般为湍流，油品电荷分布可视为均匀。由于管线长度远大于管道内径，因此可以将管道内油品看成无限长带电圆柱体，设油品的电荷密度为 ρ ，则管线横断面上的电位分布满足：

$$V_r = \int_r^{r_0} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (2)$$

式中： V_r 为管线断面内半径为 r 处的电位，V； E 为管线内电场强度，V/m； r_0 为管线半径(内径)，m； r 为管线断面内任一点到圆心的距离，m。

金属管道因接地，其电位为零，式(2)中的电场强度可由下式(高斯定理)求得：

$$\iint \varepsilon \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int \rho dv \quad (3)$$

式中： ρ 为管线内液体空间电荷密度，C/m³； $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ 为油品介电常数，F/m。

由(2)(3)可求得管线断面上的电位分布为：

$$V_r = \frac{\rho}{4\varepsilon} (r_0^2 - r^2) = \frac{\rho r_0^2}{4\varepsilon} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) \quad (4)$$

亦即：

$$V_r = \rho \left[\frac{r_0^2}{4\varepsilon} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) \right] \quad (5)$$

$$\text{令 } \left[\frac{r_0^2}{4\varepsilon} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) \right] = \beta \quad (6)$$

$$\text{则 } V_r = \rho\beta \quad (7)$$

一般测量管内中心处的电位。这时 $r=0$ ，由(5)可知：

$$\beta = \frac{r_0^2}{4\varepsilon} = \beta_0 \quad (8)$$

则管内中心电位 V_0 与 ρ 有如下关系：

$$V_0 = \beta_0 \rho \quad (9)$$

$$\text{由此得到： } \rho = \frac{V_0}{\beta_0} \quad (10)$$

3.2 管道内油品电荷密度测量

为了测量管内中心电位，特设计了一种杆球传感器，示意图见图1。基于杆球传感器，开发了油品静电监测仪。如图1所示，整个静电监测仪通过法兰接入输油管道，杆球传感器的直杆部分通过绝缘密封组固定在连接孔上，球头部分置于管道中央，当液体在管道内流动时，与管道绝缘的杆球被充电，电位逐渐升高，并开始向管壁泄漏。当充电电流等于泄漏电流，达到充放电平衡时，杆球电位达到稳定值。油品的带电信息进一步被采集、放大。

静电监测仪经特殊防爆设计，符合GB 3836.1-2010《爆炸性环境 第1部分：设备 通用要求》和GB 3836.4-2010《爆炸性环境 第4部分：由本质安全型“i”保护的 设备》防爆标准要求。

3.3 油品静电在线监测系统实验

试验系统：试验设备包括带油气回收功能的静电监测仪、法拉第筒、ME284 数字电荷量表、MLA900 电导率仪和温湿度计等。

油品电荷密度测试如图2所示：带油气回收功能的静电监测仪(含油气回收管线)，直接安装于油气回收胶管和加油枪之间，测试加油枪前端油流电荷密度；法拉第筒、ME284 数字电荷量表测量加油枪口油流电荷密度。

对比表1中的数据可知，静电监测仪测试数据在数值上与法拉第筒测试的体电荷密度数值基本一致。说明静电监测仪可以对油流体电荷密度进行检测，可应用于管输油品的静电体密度变化的监测。

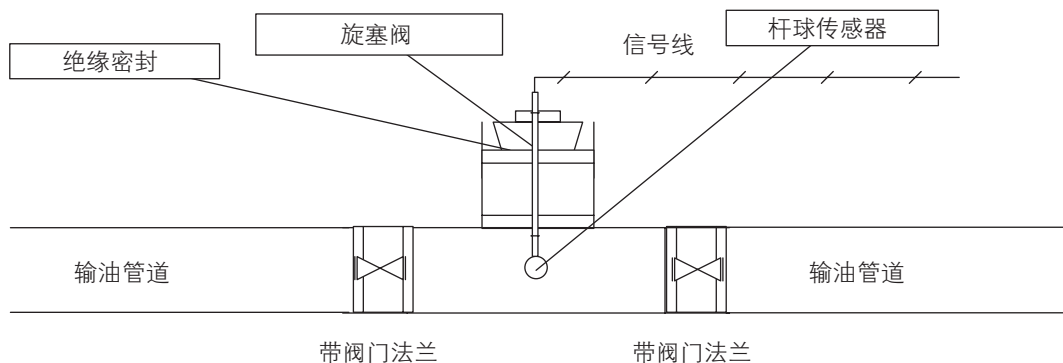


图1 杆球传感器示意图

Fig. 1 Schematic of rod ball sensor

4 加油站油品静电监测应用及分析

4.1 加油站静电安全监测

在全国各地选取了7个地区的加油站,开展管输

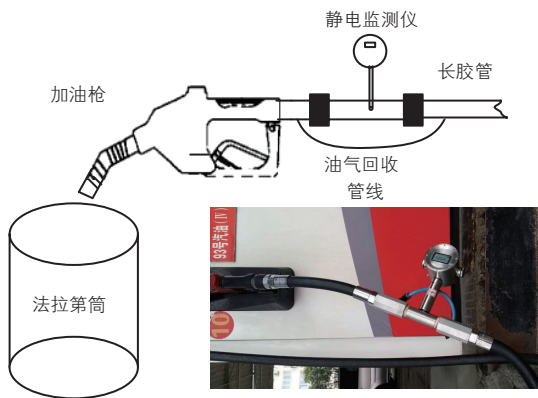


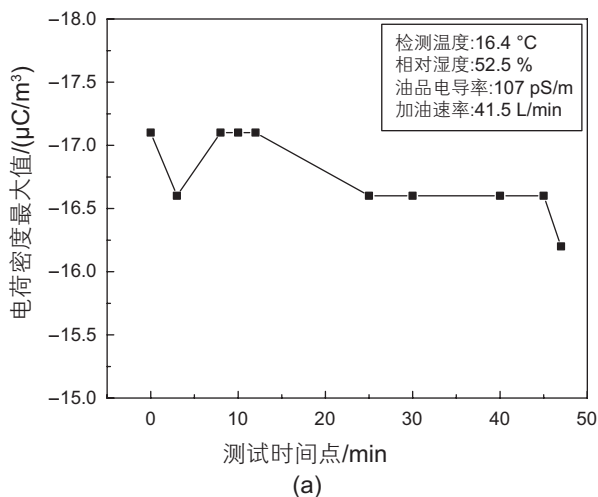
图2 加油过程油品电荷密度对比测试示意图

Fig. 2 Schematic of testing oil electrostatic charge density before and after the self-closing oil filler

表1 加油枪前后油品电荷密度测试结果

Table 1 Oil electrostatic charge density before and after the self-closing oil filler

序号	静电监测仪测试/($\mu\text{C}/\text{m}^3$)	法拉第筒测试/($\mu\text{C}/\text{m}^3$)
1	-25.6	-28.5
2	-31.0	-33.3
3	-29.3	-29.8
4	-28.7	-29.1



(a)

油品静电在线监测试验。加油站检测站点分布及现场测试方式分别如表2和图3所示。

4.2 数据分析

共计完成45站次的测试,收集了大量测试数据,选取两个典型加油站测试数据见图4。加油站加油设

表2 加油站静电测试站点分布

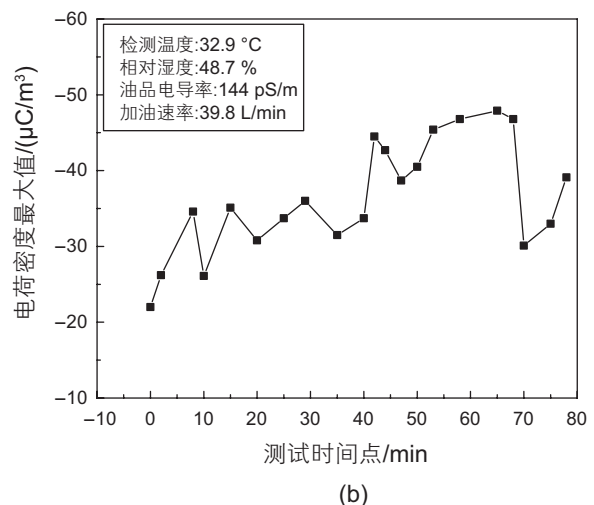
Table 2 The distribution of measured gas stations

地点	秋季	冬季
青岛	8 站次	1 站次
佛山	4 站次	/
广州	/	4 站次
杭州	4 站次	4 站次
西安	4 站次	4 站次
太原	/	4 站次
哈尔滨	4 站次	4 站次



图3 加油站油品电荷密度现场测试图

Fig. 3 Photograph of measuring the oil charge density at gas stations



(b)

图4 加油站油品电荷密度测试曲线

Fig. 4 The oil charge density that measured while filling oils

备通过跨接、接地、控制流速等措施,可以将油品电荷密度控制在较低的水平,如图4a所示。但是部分加油站使用了绝缘胶管或者精细滤芯,油品静电量较大(图4b)^[7]。由测试数据可知,有9站次加油站在测试试验中出现了油品电荷密度超过 $30\ \mu\text{C}/\text{m}^3$ 的现象,存在较大的静电风险。

5 结束语

(1)目前国内外油品静电安全管理多注重流速和流量的控制,但多起事故的发生表明,单一的流速和流

量的要求无法满足安全管理的需要。

(2)通过试验研究发现,基于高斯定理设计的油品静电监测仪可以实现油品管线电荷密度的在线监测。

(3)通过加油站现场测试应用,发现在安全流速的情况下,管线内的静电电荷密度依然存在过高的情况。

(4)基于管输油流体电荷密度监测技术,建立油流静电在线监测与联锁控制系统,在加油站油流静电起电突然加大的情况下采取停止装卸等控制措施,避免油品静电燃爆事故的发生,是油品静电安全监管的发展方向。

参考文献

- [1] HEARN G L, PIDOLL U, SMALLWOOD J M, et al. An assessment of electrostatic ignition hazards associated with fuel flow through plastic pipes at roadside filling stations[J]. *Journal of Electrostatics*, 2012, 70(2): 179-183.
- [2] 王振中, 张卫华, 吴锋棒. 自助加油站典型静电事故案例分析及防范措施[J]. *中国安全生产科学技术*, 2013, 7(9): 169-173. [WANG Z Z, ZHANG W H, WU F B. Analysis and preventive measures on typical electrostatic accidents cases of self-service refueling stations[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2013, 7(9): 169-173.]
- [3] WALMSLEY L. Electrostatic ignition hazards with plastic pipes at petrol stations[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2012, 25(2): 263-273.
- [4] 王浩, 江田汉, 周建新. 城市加油站火灾风险分级研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2013, 6(9): 149-154. [WANG H, JIANG T H, ZHOU J X. Research on fire risk rank of city gas station[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2013, 6(9): 149-154.]
- [5] 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(02): 203-206. [TIAN Q, ZHOU S Q, LIU K, et al. Impact of flow rate on the static electricity of products in pipelining[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2013, 32(02): 203-206.]
- [6] 李义鹏, 刘全桢, 孙立富, 等. 油罐车卸油前静置时间试验[J]. *油气储运*, 2015, 10(34): 1 077-1 079. [LI Y P, LIU Q Z, SUN L F, et al. Tests for holding time before unloading of oil tanker[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2015, 10(34): 1 077-1 079.]
- [7] 张云朋. 加油机滤芯对油品静电起电的影响[J]. *安全、健康和环境*, 2015, 24(5): 37-39. [ZHANG Y P. The influence of filtrates for fuel dispensers on electrostatic performance of product oil[J]. *Safety Health and Environment*, 2015, 24(5): 37-39.]
- [8] 李义鹏, 孟鹤, 孙立富, 等. 大型车辆加油过程静电危险因素的分析及试验研究[J]. *石油库与加油站*, 2015, 24(1): 15-17. [LI Y P, MENG H, SUN L F, et al. Analysis on electrostatic risk factors of large vehicle refueling process[J]. *Oil Depot and Gas Station*, 2015, 24(1): 15-17.]
- [9] 孟鹤, 李义鹏, 刘全桢, 等. 油品装卸过程静电特性研究[J]. *安全、健康和环境*, 2014, 14(11): 20-22. [MENG H, LI Y P, LIU Q Z, et al. Study on static properties during loading and unloading of oils[J]. *Safety Health and Environment*, 2014, 14(11): 20-22.]

Application of electrostatic safety monitoring techniques for oil transporting processes

LIU Quanzhen^{1,2}, GAO Xin^{1,2}, LI Liangliang^{1,2}, LI Yipeng^{1,2}, SUN Lifu^{1,2}

1 SINOPEC Research Institute of Safety Engineering, Qingdao 266071, China

2 State Key Laboratory of Safety and Control for Chemicals, Qingdao 266071, China

Abstract This paper analyzes cases of typical fire and explosion hazards from oil-flow static electricity during oil unloading and refueling processes to study electrostatic risk prevention and control measures. In order to test the effectiveness of the electrostatic risk prevention and control measures, an on-line static electricity monitoring instrument was designed and used to measure the oil charge density at gas stations. The test results showed that through establishing oil-flow charge

monitoring at gas stations based on electrostatic monitoring technology, blast accidents caused by static electricity could be avoided effectively.

Keywords oil transportation; electrostatic risk; explosion; on-line monitoring

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.043

(编辑 马桂霞)