

机坪加油管道阴极保护设计方案选择

王国强（北京中航油工程建设有限公司，北京 100012）

摘要：随着国内民航业的迅速发展，国内大中型民用运输机场普遍采用机坪加油管道供油。管道出现电化学腐蚀而泄漏穿孔会导致油料泄漏，造成巨大损失。本文通过选取三处机场作为案例介绍了目前常用的阴极保护方法及其设计方案，并提出了机坪加油管道阴极保护系统选择的建议

关键词：机场；机坪加油管道；牺牲阳极；深井阳极；柔性阳极

随着国内民航业的迅速发展，国内大中型民用运输机场普遍采用机坪加油管道供油。机坪加油管道作为为飞机输送“血液”的通道，其能否安全、稳定运行决定着机场是否能够正常运行。在管道运行过程中受环境的作用，随着时间的延长而逐渐受到损毁或性能下降。若没有设置阴极保护系统，会导致管道出现电化学腐蚀而泄漏穿孔。由于机坪管道敷设于机场道面下，若发生管道泄漏，不仅会影响机场正常运行，而且在抢修时也需要破除道面，浪费大量的人力和物力。所以，机坪管道设置阴极保护系统至关重要。

1 阴极保护方法介绍^[1-5]

1.1 牺牲阳极保护法

牺牲阳极保护法是以原电池的原理为依据来防止金属发生腐蚀。该方法中的保护极需要选择还原性较强的金属，将其与被保护的金属连接在一起组成原电池，原电池负极处还原性较强的金属就会发生氧化反应，逐渐被消耗牺牲，这样就可以保护正极处被保护的金属免于腐蚀。

1.2 强制电流法

强制电流法其原理是将被保护金属与外加电流负极相连，由外部电源提供保护电流，以降低腐蚀速率。外部电源通过埋地的辅助阳极将保护电流引入地下，通过土壤提供给被保护金属，被保护金属在大地电池中仍为阴极，其表面只发生还原反应，不会再发生金属离子的氧化反应，使被保护金属腐蚀受到抑制。强制电流法系统由辅助电极、参比电极、直流电源、辅助阳极地床和相关的连接电缆所组成。辅助阳极地床根据埋设形式有浅埋阳极地床、深井阳极地床及柔性阳极地床。

1.2.1 浅埋阳极地床

浅埋阳极地床，一般埋设深度为1~5m。浅埋阳极又可分为立式和水平式两种。立式阳极地床是将一根或多根阳极垂直埋入地下，阳极间用扁钢连接。水平式阳极地床是以水平方式将阳极埋入地层中。

1.2.2 深井阳极地床

若周围环境受限或者地床周边有其他金属构筑物对阳极地床存在干扰和屏蔽时，应采用深井阳极。根据阳极地床的埋设深度不同可分为次深、中深和深三种。

1.2.3 柔性阳极地床

柔性阳极是柔软、长线形的辅助阳极，因其机械强

度柔软而称为柔性阳极，其种类主要包括导电聚合物阳极、金属氧化物 MMO 阳极以及铂铌合金阳极 3 种。柔性阳极应与管道同沟敷设，安装在管沟底部与管底平行位置并尽量靠近管沟边缘，根据规范要求，应保证阳极与管道水平距离不小于 300mm。

1.3 牺牲阳极保护法与强制电流法对比

牺牲阳极保护法与强制电流法两种保护方式各有优缺点，在选择采用哪种阴极保护方法时应综合考虑工程所在地的环境、有无可利用的电源、工程规模及工程投资等因素。两种保护方式优缺点详见下表。

表 1 牺牲阳极保护法与强制电流法优缺点对比

方法	优点	缺点
牺牲阳极保护法	1、不需要外部电源提供电流；2、对周边建构筑物的干扰非常小；3、安装后不需要维护，基本没有维护费用；4、对于较小的工程更经济。	1、输出电流较低，且输出电流没法调节；2、不适用于土壤电阻率高的环境；3、达到使用寿命后不宜更换。
强制电流保护法	1、输出电流可以根据需要调节；2、同时适用于土壤电阻率高和电阻率低的环境；3、可通过智能测试桩远传信号，实现远程监控；4、对于较大的工程更经济。	1、需要外部电源提供电流；2、对周边建构筑物会有一定的干扰；3、投入使用后，需要后期维护。

2 各类阴极保护方法在机坪管道的应用

2.1 牺牲阳极法在 A 机场机坪加油管道的应用

牺牲阳极法在早期机坪加油管道建设中应用较多，由于机坪加油管道位于机场道面下，在达到使用寿命后不可能破除道面对阳极进行更换，所以目前设计基本不再采用牺牲阳极法这种阴极保护方式。此种方式目前多用于某些机场按照机场规划需要提前在某区域预埋机坪加油管道但不投入使用的情况。

2.1.1 A 机场项目概况

A 机场先前没有机坪加油管道系统，根据机场规划，后期整个机场需要设置机坪加油管道系统。因机场需要提前在某区域建设机坪，为避免后期建设机坪加油管道时破除机场道面，需要提前在该区域预埋机坪加油管道。由于后期整体建设机坪加油管道时间存在不确定性，所以该段管道采用牺牲阳极法对管道临时保护。

2.1.2 设计方案

A 机场本次共新建 DN300 机坪加油管道约 1500m，

双管敷设。本次设计在管道沿线共设置3组牺牲阳极, 每组设3支11kg镁阳极。镁阳极技术参数如下: 重量: 11kg, 管道保护电位: -0.85V , 阳极电化学特性: 开路电位 -1.55V , 阳极填料包(重量比): 膨润土20%; 石膏粉75%; 工业硫酸钠5%。每组牺牲阳极距管道中心1.5m, 与管道平行敷设; 每支镁阳极间距3m布置。同时, 在两管道间用电缆跨接, 保证双管同时收到保护。在管道沿线设置了2组电位测试桩, 电位测试桩使用硫酸铜参比电极测量。电缆与管道连接, 均采用铝热焊接方式, 焊接完成后焊接点必须作严格的防腐绝缘。

2.2 深井阳极在B机场机坪加油管道的应用

2.2.1 B机场项目概况

B机场新建DN300机坪加油管道9.3km, 管道外防腐除采用3PE(三层结构的聚乙烯)加强级防腐层。

2.2.2 保护准则

机坪加油管道阴极保护原则为消除土壤IR降的前提下, 管/地电位相对于饱和Cu/CuSO₄参比电极达到 -0.85V 与 -1.2V 之间, 相对高纯锌参比电极达到 $+0.25\text{V}$ 与 -1.0V 之间。

2.2.3 总体方案设计

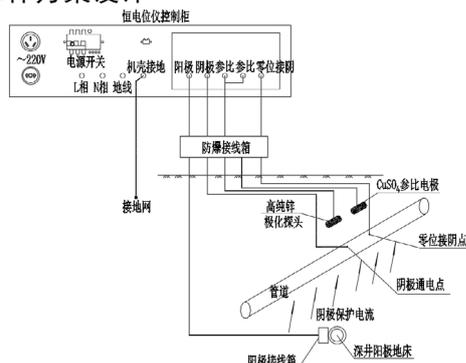


图1 深井阳极阴极保护系统图

强制电流阴极保护系统由辅助阳极地床和阴极保护电源组成。本方案辅助阳极地床采用深井阳极, 保护原理详见图1。另外, 考虑到今后管道运营数字化、智能化的需要, 阴极保护电源设备和电位采集桩均具备信号传输功能。因此, 阴极保护系统能够实现在线监测及自动调控功能, 并设置了配套的阴极保护管理软件。本次设计共设置1座阴极保护站: 位于航空加油站。阴极保护设备全部采用阴保电源一体机, 其中含两台恒电位仪和一台控制台, 两台恒电位仪相互备用, 控制台包含阴保数据传输接口。

2.2.4 设计参数

阳极床处土壤电阻率: $50\Omega \cdot \text{m}$; 钢管电阻率: $0.23\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$; 覆盖层电阻率: 3PE取 $1000000\Omega \cdot \text{m}^2$; 管道自然电位: -0.55V (CSE); 管道最小保护电位: -0.85V (CSE), $+0.25\text{V}$ (高纯锌参比); 保护电流密度: $0.4\text{mA}/\text{m}^2$ (综合考虑到机坪加油管道中各种井体存在漏电的可能和管道防腐层后期老化, 适当增大保护电流密度); 最大保护电位: -1.20V (CSE), -0.10V (高纯锌参比)。

2.2.5 设计计算

①阴保站保护面积: $S = \sum \pi DL$, 通过计算保护面积为 9460m^2 ;

②总的需求保护电流: $I_{\text{总}} = \sum S \times i$, 通过计算总的需求保护电流为 3.79A ;

③单侧保护长度计算:

$$2L = \sqrt{\frac{8\Delta V_L}{\pi I_s R'}}$$

其中:

$$R' = \frac{\rho_T}{\pi(D - \delta)\delta}$$

式中: L 为单侧保护长度, ΔV_L 为通电点最大保护电位与最小保护电位之差, D 为管道外径, I_s 为保护电流密度, R' 为管道线电阻, ρ_T 为钢管电阻率, 取 $0.23\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, δ 为管道壁厚。将参数代入, 通过计算DN300管道单侧保护长度 7.71km 。根据保护半径核算, 1座阴极保护站可以保护机坪全部管道;

④每个阴极保护站设置1个深井阳极地床, 深井阳极地床深度 54m , 成孔直径 $\Phi 300\text{mm}$, 阳极地床设置13支MMO辅助阳极, 阳极非活性区深度 15m 。采用 $\Phi 25 \times 1000\text{mm}$ MMO阳极, 阳极间距约 3m 。每支阳极接地电阻通过计算为 8.07Ω 。13支阳极并联总接地电阻通过计算为 1.1Ω ;

⑤电源设备输出电压: $V = I_w (R_a + R_c + R_L) + V_r$, 其中, R_a 为阳极床接地电阻, R_c 为阳极土壤过度电阻, R_L 为导线电阻, $R_c + R_L$ 一般考虑为 1Ω , V_r 为阳极地床的反电动势取 2V , 通过计算电源设备输出电压为 9.96V 。考虑后期发展预留, 本期恒电位仪规格选用 $45\text{V}/20\text{A}$ 。

2.2.6 测试系统设置

为便于阴极保护的日常管理, 管道沿线每隔 1km 左右设置1支阴极保护电位采集桩, 采集桩中信号采集仪采用物联网卡传输信号, 采用锂电池供电, 以便在日常管理中对全线阴极保护效果进行监测。为准确测试管道电位, 管道沿线每支测试桩处理设硫酸铜长效参比电极1支, 阴保站恒电位仪处同时设置饱和硫酸铜参比电极和高纯锌氯化探头各1支。

2.2.7 干扰防护

由于管道容易遭受杂散电流的干扰。本次设计在每处电位测试桩处采用新型极性排流器和大型排流地床的排流保护措施。排流地床一方面用于排出杂散电流, 一方面用于管道的防雷防静电接地。同时为防止杂散电流从排流床流入管道, 在排流阳极和管道间串入新型极性排流器。同时牺牲阳极排流地床在管道埋地未投入使用前, 还可作为临时阴极保护用来保护埋地管道。

由于有双管管道同沟敷设, 为避免管道间的电位差产生相互干扰, 同沟敷设的管道需要设置均压电缆。均压电缆设置在电位测试桩处。

2.2.8 电绝缘

因为机坪加油管道会分别与机场油库和航空加油站

内的工艺管线相连, 为避免机坪加油管道阴极保护电流通过机场油库或航空加油站内接地金属漏失, 影响阴极保护的效果, 管道与航空加油站和油库里的管道连接处均设置了绝缘接头。

2.3 柔性阳极在 C 机场机坪加油管道的应用

2.3.1 C 机场机场项目概况

C 机场新建 DN500 机坪加油管道 11.5km, DN300 机坪加油管道 9km, 管道外防腐除采用 3PE (三层结构的聚乙烯) 加强级防腐层。

2.3.2 保护准则

机坪加油管道阴极保护原则为在消除土壤 IR 降的前提下, 管道阴极保护电位 (即管/地界面极化电位, 下同) 应为 -850mV (CSE) 或更负, 阴极保护状态下管道的极限保护电位不能比 -1200mV (CSE) 更负。在厌氧菌或者 SRB 及其他有害菌土壤环境中, 管道阴极保护电位应为 -950mV (CSE) 或更负。

2.3.3 总体方案设计

C 机场机坪加油管线保护总长度约 20.5km, 管道规格较多, 管线距离较长, 并呈不对称、不均匀网状分布; 本机场建设有城市轨道交通, 不可避免的会对机坪加油管道产生杂散电流干扰; 另外考虑到加油栓井、高低点井等机坪管网附属设施与管道不能实现绝缘。综合以上因素, 为加强保护效果, 新建机坪加油管道采用外加电流阴极保护。为了解决:

- ①阳极地床气阻随时间延长, 电阻率增大;
- ②输出电流分布不均匀, 保护电位分布不均匀;
- ③复杂管网区域内屏蔽和相互干扰等问题, 本次设计辅助阳极采用 MMO/Ti 柔性阳极。保护原理详见图 2。

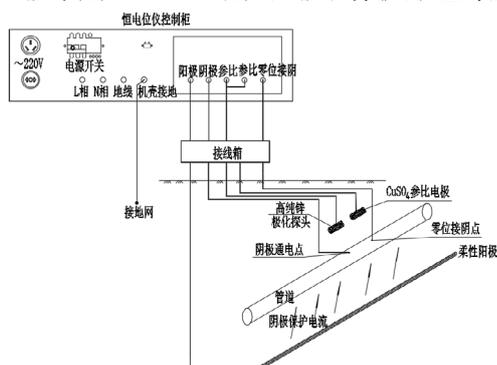


图 2 柔性阳极阴极保护系统图

本次设计共设置 4 座阴极保护站, 分别位于本次新建的第二机场油库和第二航空加油站及两处电气现场设备箱附近。阴极保护设备全部采用阴保电源一体机, 其中含两台恒电位仪和一台控制台, 两台恒电位仪相互备用, 控制台包含阴保数据传输接口。

2.3.4 设计参数

阳极床处土壤电阻率: $60\Omega \cdot \text{m}$; 钢管电阻率: $0.23\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$; 覆盖层电阻率: 3PE 取 $1000000\Omega \cdot \text{m}^2$; 管道自然电位: -0.55V (CSE); 管道最小保护电位: -0.85V (CSE); 保护电流密度: $0.4\text{mA}/\text{m}^2$ (综合考虑到机坪加油管道中各种井体存在漏电的可能和管道防腐

层后期老化, 适当增大保护电流密度); 最大保护电位: -1.20V (CSE)。

2.3.5 设计计算

阴极保护站计算过程同深井阳极设计计算一致, 此处不再赘述。通过计算阴保站保护面积为 27457.15m^2 , 总的需求保护电流为 10.99A , 电源设备输出电压为 5.2V 。考虑后期扩建, 恒电位仪规格选用 $30\text{V}/30\text{A}$ 。

2.3.6 阴保数据在线监测及控制系统

阴极保护在线监测系统由工控机、显示器、信号转换器、信号采集仪、电缆、配套软件等组成; 工控机、显示器等设备设置在航空加油站; 本次共设置了 16 套电位测试桩, 4 套电位采集桩, 每处电位采集桩下都设置了一套信号采集仪, 输出 $4\text{--}20\text{mA}$ 电流信号, 通过通讯电缆传送至航空加油站工控机, 经过信号转换器、配套软件分析测量得到的数据, 判断恒电位仪输出电流是否满足管道保护电位要求, 否则将通过通讯信号对恒电位仪输出数据进行调控。

2.3.7 其他设置

与 B 机场类似, 为避免杂散电流干扰设置了大型排流地床, 为避免管道间的电位差产生相互干扰, 同沟敷设的管道设置均压电缆。为避免保护电流漏失, 机坪加油管道与航空加油站和油库里的管道连接处均设置了绝缘接头。

3 结论与建议

①对于机坪加油管道, 因其所处位置特殊, 强制电流法是保护管道的最佳选择;

②柔性阳极很好的解决了深井阳极: a. 气阻随时间延长, 电阻率增大; b. 输出电流分布不均匀, 保护电位分布不均匀; c. 复杂管网区域内屏蔽和相互干扰等问题。对于大中型机场的机坪加油管道可以考虑采用柔性阳极阴极保护方式;

③机坪加油管道采用何种阴极保护方式, 还需要结合机场环境, 充分考虑投资、施工难易程度等方面选择最优方案。

参考文献:

- [1] 刘晓蕾. 强制电流阴极保护在民用运输机场机坪供油工程中的应用 [J]. 现代盐化工, 2020,47(5):73-74.
- [2] 马占全. 柔性阳极的应用 [J]. 油气田地面工程, 2012,31(9):85.
- [3] 贾猛. 牺牲阳极保护法在天然气管道防腐中的应用分析 [J]. 全面腐蚀控制, 2020,34(8):47-48.
- [4] 蒋文勇. 阴极保护在防重庆钢质埋地天然气管道腐蚀上的运用 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [5] 郑海岩. 应用均压线连接对多条管道实施强制电流阴极保护 [J]. 全面腐蚀控制, 2018,32(9):39-41.

作者简介:

王国强 (1990-), 男, 民族: 汉, 籍贯: 山东青州, 学历: 硕士研究生, 现有职称: 中级工程师, 研究方向: 油气储运。