

# 液化石油气铁路罐车损伤分析

班 涛 (甘肃省特种设备检验检测研究院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 液化石油气铁路罐车的应用越来越广泛, 导致超期服役的罐车也越来越多。本文通过无损检测、厚度测量等手段对超期服役的液化石油气铁路罐车的罐体损伤进行分析。结果表明: 由于使用时间的累积, 钢内部缺陷处氢原子浓度升高, 氢分压升高, 引起焊缝热影响区及钢材内部产生了鼓包分层, 并且一些局部的鼓包发生了扩展使相邻的鼓包连接在一起形成了类似台阶状的裂纹。鼓包分层和类似台阶状的裂纹都是湿硫化氢破坏引起的罐体局部损伤的表现形式, 其损伤机理是氢鼓包和氢致开裂。

**关键词:** 铁路罐车; 无损检测; 氢鼓包; 氢致开裂

液化石油气的运输方式主要有铁路罐车、汽车罐车运输以及管道输送。由于铁路罐车具有运输快、载重量大及成本低等优点, 使其在诸多运输途径中占有重要地位。但随着罐车数量的增加和市场需求, 越来越多的服役罐车已达到了使用年限。随着服役时间的增加, 以及罐车在低温、高温不同自然环境中的往复运行, 其损伤会不断的累积, 潜在的风险也就会不断增大。因而发现潜在的风险、消除隐患是罐车定期检验中的重要任务。

## 1 液化石油气的主要成分

液化石油气是在石油炼制过程中, 作为副产品产生的以丙烷和丁烷为主要成分的碳氢化合物, 无色无味、不溶于水, 其主要的组分如表 1。由于原油的成分及炼油工艺的不同, 液化石油气中会不同程度的含有  $H_2S$ 、硫化物、氯化物等杂质, 这些杂质的存在对罐车的安全运行有很大的威胁。

表 1 液化石油气的主要组分 (体积百分数)

$H_2$	$CH_4$	$C_2H_6$	$C_2H_4$	$C_3H_8$	$C_3H_6$	$C_4H_{10}$	$C_4H_8$	其他
5~6	10	3~5	3	16~20	6~11	42~46	5~12	5~12

## 2 液化石油气罐车的损伤模式

### 2.1 罐车的基本参数

液化石油气铁路罐车的罐体普遍采用低合金钢 16MnR 制造, 其罐体上的焊接接头均为双面焊全焊透的结构, 常见罐体的基本设计参数如表 2。为了保证罐体在设计使用年限内有足够的强度, 腐蚀裕量一般都为 2mm (也有设计为 1mm); 为了减轻、消除应力腐蚀, 罐体在焊接完毕后都会进行整体消应力热处理。液化石油气铁路罐车罐体上的安全阀、紧急切断阀、压力表、温度计、液位计等附件均在罐体的正上方, 在罐体底部没有任何附件。

表 2 基本设计参数

厚度	设计压力	设计温度	设计寿命

22/24	2.2MPa	50℃	20 年
20/22	2.16MPa		

### 2.2 罐体的损伤模式

对于液化石油气铁路罐车常见的损伤模式主要是: 腐蚀减薄、环境开裂及机械损伤。

腐蚀减薄是  $H_2S$  水溶液和潮湿空气对罐体内、外壁产生腐蚀, 从而是罐体壁厚减薄, 是非常缓慢的过程, 在定期检验中可通过测厚的方法发现与监测。

机械损伤主要是罐内压力过高而引起的罐体变形, 这与罐体的充满率、安全阀的整定压力以及温度等诸多因素有关。当罐内充装液化石油气超过规定的充满率时, 温度升高、安全阀失效或整定压力过高都会引起罐体变形, 但只要按照有关国家标准要求进行合理的充装、检验, 发生的机械损伤的可能性很小。

低合金钢制造的液化石油气铁路罐车的损伤主要是由湿硫化氢引起的破坏。在湿硫化氢环境中, 罐体的损伤形式主要有氢鼓包、氢致开裂、应力导向开裂及硫化物应力腐蚀开裂。氢鼓包和氢致开裂都是腐蚀产生的氢原子扩散进入钢中, 在不连续的区域聚集, 形成氢分子, 导致局部氢分压高于材料的屈服强度, 使材料产生局部永久性变形、开裂, 与应力关系不大。而应力导向开裂和硫化物应力腐蚀开裂不仅与 H 有关, 还与应力有关, 只有存在应力 (外加压力、焊接残余应力) 的作用时才能发生。从以上看出, 无论那种损伤形式都与氢原子、焊接缺陷和材料缺陷密切相关。湿硫化氢破坏不是突然发生的, 而是一个很缓慢的过程。罐体产生轻微的损伤时不易被发现, 但随着运行周期的增长, 损伤会不断地累积, 损伤累积到一定程度时会导致罐体失效或发生事故。

### 3 液化石油气罐车检验

数据测量与整理:

本文针对于某公司一台使用多年的液化石油气铁路罐车, 按照《压力容器定期检验规则》和《移动式压力

容器安全技术监察规程》的要求进行了检验。对罐体内所有的焊接接头先进行 100% 表面磁粉检测,未发现缺陷。在确定没有表面缺陷影响后续的无损检测时,用超声波斜探头对所有的对接接头进行 100% 单面双侧扫查,在检测一条环向焊接接头时,在罐体底部焊缝热影响区发现了缺陷,按 NB/T47013-2015 标准的规定,此缺陷是允许存在。但用超声波测厚仪以此位置为中心向周边区域扩大逐点测量时,发现面积大约为 100×100mm 范围内多数位置出现了壁厚严重减薄,但壁厚减薄区域在罐体内外表面都没有任何异样,测量减薄位置的部分数据如表 3。对部分减薄位置的测量数据进行空间位置拟合,得到的示意图如图 1。

表 3 测量数据

a	2.1	b	5.4	c	6.7
d	4.6	f	5.7	g	3.7
f	4.2	h	9.7	i	10.1
j	6.5	k	5.2	l	4.9

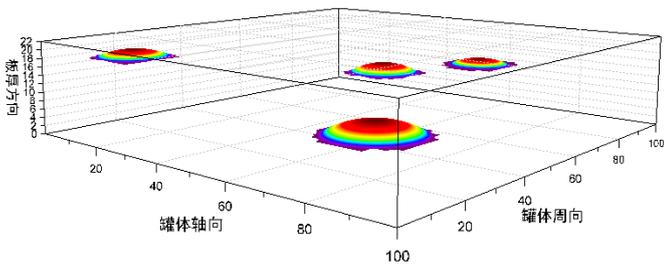


图 1 空间示意图

为了更清楚、明确的了解缺陷的性质,在缺陷存在的区域沿罐体轴向取一条路径  $f_1$ ,并测量路径上各点厚度值,路径示意图如图 2,以焊缝边缘为零点,路径各点测厚值如图 3。



图 2 测量路径图

#### 4 结果分析

从表 3 的数据可以看出,此区域测量的数据远小于设计厚度,并且测量值具有很大的分散性,说明材料的

内部具有不连续的分层。这是因为液化石油气中含有的  $H_2S$  水溶液会对罐体表面产生腐蚀,腐蚀产生的氢原子向材料内部扩散,在缺陷处聚集结合成氢分子,导致氢分压升高使材料产生永久性变形,从而在材料内部产生轻微的鼓包分层,但鼓包比较轻微,所以在罐体表面没有出现异常。

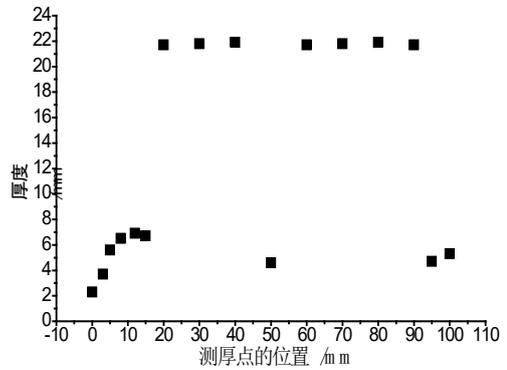


图 3 路径上测厚图

从路径测量的散点图图 3 可以看出,虽然在整条路径上测量值不具有连续性,有鼓包分层缺陷的特征,但局部一些数据具有连续性,有连续性特征的数值分两部分,其中一部分数值略小于罐体设计厚度,而另一部分数值远小于设计厚度。略小于罐体设计厚度的连续数据是正常的均匀腐蚀引起,在罐体设计时已经考虑该因素,不影响罐体的使用。数值远小于罐体设计厚度的这部分连续数据具有线性特征,说明局部小的鼓包分层在内应力的作用下发生了扩展,相邻的鼓包已经连接在一起,形成了类似台阶状的裂纹,这是湿硫化氢引起的损伤,其损伤形式主要是氢致开裂。

#### 5 结论

- ①罐体焊缝热影响区和材料内部都产生了轻微的鼓包缺陷,并且鼓包在板厚方向上分布的深度不同;
- ②有些局部的内部鼓包在内应力的作用下发生了扩展,使相邻的鼓包连接在一起形成类似台阶状的裂纹;
- ③此液化石油气铁路罐车的损伤机理是湿硫化氢破坏,其损伤形态主要是氢鼓包和氢致开裂。

#### 参考文献:

- [1] 张应力. 液化石油气储运与管理 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2007:1-15.
- [2] 王春生. 液化气铁路罐车安全运输研究 [J]. 兰州交通大学学报, 2007(01):120-123.
- [3] 海涛. 铁路危险货物罐车运输安全理论及关键技术研究 [J]. 北京交通大学博士学位论文, 2010.
- [4] 张学元, 杜元龙, 郑立群. 16Mn 钢在  $H_2S$  溶液中的脆断敏感性 [J]. 材料保护, 1998, 1(31):3-5.
- [5] GB/T 30579-2014. 承压设备损伤模式识别 [S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2014.