

# 长输管道失效故障树分析

廖柯熹\*

(西南石油学院研究生院)

姚安林 张淮鑫

(西南石油学院)

廖柯熹 姚安林等:长输管道失效故障树分析,油气储运,2001,20(1) 27~30。

**摘 要** 长输管道在使用过程中受到杂质、应力、腐蚀介质等的作用,致使部分管段早期损坏,严重影响了管道的使用寿命。综合分析了引起管道发生失效的各个因素,建立了以管道失效为顶事件的原油管道失效故障树。通过对故障树的分析,求出故障树的各阶最小割集,并确定了长输管道的主要失效形式,提出了提高管道可靠性的措施。

**主题词** 管道 失效 可靠性 故障树分析

## 一、前 言

长输管道在运行过程中,受到内外腐蚀、工况条件变化、外界干扰以及第三方破坏的影响,致使部分管段发生失效,这直接影响着原油的生产和管道的使用寿命。大量现场调查结果表明,管道发生失效的主要形式为开裂和穿孔。导致管道发生失效的因素众多,应对长输管道系统进行可靠性分析,找出管道的主要失效形式、失效机理,进而在管道的生产、使用中采取相应的措施以提高长输管道的可靠性和使用寿命。故障树分析作为工程系统可靠性分析与评价的有效方法<sup>[1]</sup>,为长输管道失效分析提供了一种有效手段,该方法具有简明、直观、灵活的特点,适于工程中管道的失效分析。

## 二、故障树分析方法

故障树分析(Failure Tree Analysis)是从分析失效因果关系中的“顶部”开始直到“底部”事件,由果到因,自上而下进行分析。一个故障树就是一个逻辑图,该逻辑图描绘了事件之间发生的次序。通过故障树分析可确定系统的薄弱环节<sup>[2]</sup>。

故障树的结构函数可用最小割集进行有效描述,其结构函数一般分为或门和与门故障树结构函

数。与门、或门故障树结构函数为:

$$Y^{and} = \prod_{i=1}^n x_i(t) \quad (1)$$

$$Y^{or} = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - x_i(t)] \quad (2)$$

式中, $x_i(t)$ 为底事件*i*在时刻*t*所处的状态。如果底事件*i*在时刻*t*发生, $x_i(t)=1$ ;如果底事件*i*在时刻*t*不发生,则 $x_i(t)=0$ 。同理,顶事件的状态必然是底事件向量 $X(t)=\{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$ 的函数。

原油管道的失效故障树分析就是要找出长输原油管道失效故障树的最小割集,对导致管道发生失效的各因素进行分析。为提高原油长输管道的可靠性提供分析手段。

## 三、原油长输管道故障树的建立

根据顶事件确定原则,故障树的顶事件为“原油长输管道失效”。引起的最直接原因主要为穿孔与开裂,任一因素出现则将导致管道发生失效。同样以这两个因素为次顶事件,对相应的原因进行分析,共考虑了 47 个基本影响因素,建立了原油长输管道失效故障树,其结构如图 1 所示。

图中各符号代表相应的事件,见表 1。

表 1 基本事件的符号

符号	事 件	符号	事 件	符号	事 件
P	管道失效	f <sub>2</sub>	管材抗腐蚀性差	f <sub>26</sub>	管道衬里脱落
A <sub>1</sub>	管道穿孔	f <sub>3</sub>	管道强度设计不合理	f <sub>27</sub>	管道清管效果差
A <sub>2</sub>	管道开裂	f <sub>4</sub>	管道上方存在违章建筑物	f <sub>28</sub>	管沟质量差
B <sub>1</sub>	腐蚀严重	f <sub>5</sub>	管道附近土层运移	f <sub>29</sub>	管道焊接方法不当
B <sub>2</sub>	管道存在缺陷	f <sub>6</sub>	管道标志桩不明	f <sub>30</sub>	焊接材料不合格
B <sub>3</sub>	管道承压能力低	f <sub>7</sub>	沿线压管严重	f <sub>31</sub>	管段表面预处理质量差
B <sub>4</sub>	管道腐蚀开裂	f <sub>8</sub>	管道上方违章施工	f <sub>32</sub>	管段焊缝表面有气孔
C <sub>1</sub>	管道外腐蚀	f <sub>9</sub>	外界较大作用力	f <sub>33</sub>	管段未焊透部分过大
C <sub>2</sub>	管道内腐蚀	f <sub>10</sub>	管道内应力较大	f <sub>34</sub>	焊接区域渗碳严重
C <sub>3</sub>	管道存在施工缺陷	f <sub>11</sub>	土壤根茎穿透防腐层	f <sub>35</sub>	焊接区域存在过热组织
C <sub>4</sub>	管道存在初始缺陷	f <sub>12</sub>	土壤中含有硫化物	f <sub>36</sub>	焊接区域存在显微裂纹
C <sub>5</sub>	管道存在裂纹	f <sub>13</sub>	土壤含盐量高	f <sub>37</sub>	焊缝表面有夹渣
C <sub>6</sub>	管材力学性能差	f <sub>14</sub>	土壤 pH 值低	f <sub>38</sub>	管段焊后未清渣
D <sub>1</sub>	管道内腐蚀环境	f <sub>15</sub>	土壤中含有 SRB	f <sub>39</sub>	管道安装质量差
D <sub>2</sub>	管道应力腐蚀严重	f <sub>16</sub>	土壤氧化还原电位高	f <sub>40</sub>	管材含有杂质
E <sub>1</sub>	第三方破坏严重	f <sub>17</sub>	土壤含水率高	f <sub>41</sub>	管材金相组织不均匀
E <sub>2</sub>	土壤腐蚀	f <sub>18</sub>	阴极保护失效	f <sub>42</sub>	管材晶粒粗大
E <sub>3</sub>	管道外防腐蚀措施	f <sub>19</sub>	防腐绝缘层老化	f <sub>43</sub>	管材选择不当
E <sub>4</sub>	管道内防腐措施	f <sub>20</sub>	原油含有硫化氢	f <sub>44</sub>	管材加工质量差
E <sub>5</sub>	输送介质含酸性物质	f <sub>21</sub>	原油含有 O <sub>2</sub>	f <sub>45</sub>	管段存在残余应力
E <sub>6</sub>	管道焊接	f <sub>22</sub>	原油含有 CO <sub>2</sub>	f <sub>46</sub>	管段存在应力集中
E <sub>7</sub>	管材存在缺陷	f <sub>23</sub>	原油中含水	f <sub>47</sub>	管材机械性能差
E <sub>8</sub>	管道承载大	f <sub>24</sub>	缓蚀剂失效		
f <sub>1</sub>	管道结蜡严重憋压	f <sub>25</sub>	管道内涂层变薄		

## 四、天然气管道故障树分析

### 1、最小割集

采用“自上而下”的代换方法求出故障树的所有最小割集,将故障树转化为等效的布尔代数方程<sup>[1]</sup>:

$$P = B_1 + B_2 \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 P = & \sum_{i=1}^{10} f_i + \sum_{j=28}^{44} f_j + f_{19} + f_{28} + f_{47} \\
 & + (f_{18} + f_{19}) \times \sum_{l=11}^{17} f_l + f_{23} \times \sum_{n=20}^{22} f_n \\
 & \times (f_9 + f_{10} + f_{45} + f_{46}) + f_2 \\
 & \times f_{23} \times \left( \sum_{p=20}^{22} f_p \times \sum_{q=24}^{27} f_q \right) \quad (4)
 \end{aligned}$$

由式(3)和式(4)可知,天然气管道失效故障树由 67 个各阶最小割集组成,一阶最小割集 29 个,二

阶最小割集 14 个,三阶最小割集 12 个,四阶最小割集 12 个。29 个一阶最小割集直接影响着系统的可靠性,为系统中的薄弱环节,要提高管道的可靠性与使用寿命,应首先从这 29 个一阶最小割集着手。

### 2、失效概率

由式(1)和式(2)可得顶事件发生的概率,用  $p_i$  表示底事件  $i$  发生的概率, $C_i$  表示第  $i$  个最小割集, $N$  为最小割集的个数,有:

$$Y = 1 - \prod_{i=1}^N \left( 1 - \prod_{R \in C_i} p_R \right) \quad (5)$$

原油长输管道失效故障树中  $N=67$ ,由现场收集管道发生失效的概率数据,由式(5)可确定顶事件发生失效的概率。

### 3、主要影响因素与改善措施

对原油长输管道故障树和式(4)进行分析,可以

发现引起管道失效的主要原因,并采取相应的处理措施。

(1)第三方破坏 包括人为破坏和自然灾害破坏。如管道上方的违章构筑物,在管道上方进行违章施工,以及水流对管沟、管道的长期冲刷,管道附近土层的运移等都可能引起管道发生失效。应对管道及管道标志物进行定期检测。

(2)严重腐蚀 严重腐蚀包括外腐蚀和内腐蚀两个方面。外腐蚀主要由土壤腐蚀、防腐绝缘覆盖层失效和外防腐失效引起。内腐蚀主要由输送介质中的硫化物、酸性介质引起。严重腐蚀导致防腐绝缘覆盖层失效、管壁减薄、管道穿孔、甚至发生管道开裂。应对外防腐、脱水与缓蚀剂实际效果进行定期检测与分析,并选择合适类型的清管器进行定期清管。

(3)管材缺陷 包括管材初始缺陷和安装缺陷。初始缺陷主要由于管材在制造加工、运输不当造成的。而安装缺陷是在管段的安装施工过程中形成的,如管道壁厚不均、椭圆度、防腐绝缘覆盖层质量差、特别是焊接水平和焊接质量差。管材缺陷将导致管道整体强度降低,直接影响着管道运行的可靠性。应加强管材质量检查,提高制造工艺水平。建立严格的

施工质量检测制度,选择合适的焊接工艺。

## 五、结 论

由天然气管道故障树的分析得出如下结论。

(1)故障树分析方法具有直观、简明的特点,是进行管道可靠性分析的有效方法。

(2)管道失效故障树一共考虑了 47 个基本事件,通过故障树分析确定了管道运行管理中的薄弱环节。

(3)对故障树的进一步分析确定了影响管道发生失效的主要因素,提出了相应的改善措施,为预防或减少管道发生失效提供了帮助。

### 参 考 文 献

1. 刘清友 陈 浩:套管的失效分析,西南石油学报,1999。
2. 陈 琳 王国丽等:抽油泵故障树分析,石油学报,1995,(3)。
3. 纪永波:油气集输管道防止硫化物应力开裂的方法,油气田地面建设,1997,(5)。

(收稿日期:2000-07-11)

编辑:张彦敏

## 《石油地球物理勘探》是您最可信赖的朋友

《石油地球物理勘探》是中国石油天然气集团公司委托石油地球物理勘探局主办的一份石油物探方面的综合性科技期刊(1966年创刊)。主要报道内容有:石油地球物理勘探方法的新理论、新成果,各种勘探数据处理技术,地震地质解释及油气藏的综合评价技术,油田勘探与开发、地球物理测井、物探仪器装备的应用改进与维护、地面测量及计算机应用等领域的技术和国内外相关技术发展动态及学术活动等。

本刊发行范围广:国内包括中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团公司、中国海洋石油总公司、中国新星石油公司及其所属油田(厂矿)的物探公司、处理中心,国土资源部的相关部门,所有石油、地质类院校及一些设置了与本刊内容相关专业的院校,中国科学院等涉及地球物理勘探领域的科研院所;国外则远达欧美(如美国、加拿大、俄罗斯)和日本等。同时,本刊被国内外许多著名检索刊物或数据库(如SCI, EI, BIG, PA等)收录,在国内外勘探地球物理界有着广泛的影响,是中国最具有权威的地球物理刊物之一。

《石油地球物理勘探》积 30 余年办刊经验,有一批高素质的编辑出版人员,刊物质量不断提高,内容丰富,印制考究,装帧精美,曾获省部级以上奖励 20 余次。尤其是在 1992 年 1996 年蝉联国家科委、新闻出版署、中共中央宣传部联合颁发的全国科技期刊评比一等奖;1999 年荣获首届国家期刊奖。

本刊为双月刊,逢双月 15 日出版,16 开本,约 130 页。附有精美的彩色(黑白)广告。

无论您是想获得勘探地球物理方面的最新信息,还是想宣传、推广您的新技术和新产品,本刊是您的首选载体,也是您最可信赖的合作伙伴。

通讯地址:河北省涿州市 11 信箱石油学会《石油地球物理勘探》编辑部

电 话:(0312)3822282 3822804 或(010)69211234-22282 22804

传 真:(010)69211663 邮 编:072751