

埋地输气管道腐蚀失效故障树分析

易云兵, 姚安林

(西南石油学院 四川 成都 610500)

摘 要: 腐蚀是引起埋地输气管道泄漏和破裂的主要因素。针对引起埋地输气管道腐蚀失效的各个因素进行系统分析, 建立以埋地输气管道腐蚀失效为顶事件的埋地输气管道腐蚀失效故障树, 结合管道腐蚀破坏机理和故障树分析方法, 分析导致管道腐蚀产生的因素, 得到故障树的各阶最小割集和引起埋地输气管道发生腐蚀失效的主要因素, 并提出了相应的措施以提高埋地输气管道的可靠性。

关键词: 埋地输气管道; 腐蚀失效; 故障树分析

文章编号: 1006-5539(2005)05-0013-04

文献标识码: B

腐蚀是影响管道系统可靠性及使用寿命的关键因素。据美国国家安全输送局统计^[1], 美国 45% 管道损坏是由外壁腐蚀引起的, 而在美国输气干线和集气管线的泄漏事故中, 有 74% 是腐蚀造成的。腐蚀是引起埋地管道生产安全问题的主要原因。基于布尔代数和概率论的故障树分析理论作为工程系统可靠性分析与评价的有效方法, 具有简明、直观、灵活的特点, 本文对引起埋地输气管道腐蚀失效的各个因素进行系统分析, 建立以埋地输气管道腐蚀失效为顶事件的埋地输气管道腐蚀失效故障树, 结合管道腐蚀破坏机理, 分析导致管道腐蚀产生的因素, 得到影响埋地输气管道发生腐蚀失效的主要原因, 进而在管道的生产、设计和使用中采取相应的措施以提高管道的可靠性和使用寿命。

1 故障树分析方法

故障树的结构函数可用最小割集进行有效描述^[2~3], 其结构函数一般分为或门、与门两种情况。传统故障树分析中取事件的发生概率为精确值 p_i , 此时或门、与门故障树的结构函数分别为:

$$P_{OR} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \quad (1)$$

$$P_{AND} = \prod_{i=1}^n p_i \quad (2)$$

埋地输气管道腐蚀失效故障树分析就是要找出管道腐蚀失效故障树的最小割集, 对导致管道腐蚀失效的各因素进行分析, 为提高埋地输气管道的可靠性提供相应措施。

2 埋地输气管道故障树的建立

根据顶事件确定原则, 故障树的顶事件为埋地输气管道腐蚀失效, 引起埋地输气管道腐蚀失效的最直接原因事件有内腐蚀、外腐蚀、应力腐蚀和其他因素, 任一原因事件发生都将导致埋地输气管道发生腐蚀失效。同时, 以这四个原因事件为次顶事件, 对相应的原因进行分析考虑, 共有 66 个基本事件, 建立了埋地输气管道腐蚀失效故障树^[1~2, 4], 结构如图 1 所示, 图 1 中各符号所代表相应的事件, 见表 1。

3 埋地输气管道故障树分析

3.1 最小割集

在分析故障树时^[3], 需要求出其最小割集。设 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为表示底事件的状态变量, 取值为 0 或 1。 $x_i = 0$ 表示底事件 i 不发生, $x_i = 1$ 表示底事件 i 发生。割集 C 是故障树中底事件集合 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 的子集, 当这些底事件都发生时, 顶

收稿日期: 2004-06-23; 修回日期: 2004-09-13

作者简介: 易云兵(1979-), 男, 四川眉山人, 现攻读西南石油学院油气储运工程硕士学位, 主要研究方向为油气管道风险评价。电话: (028) 83033467。

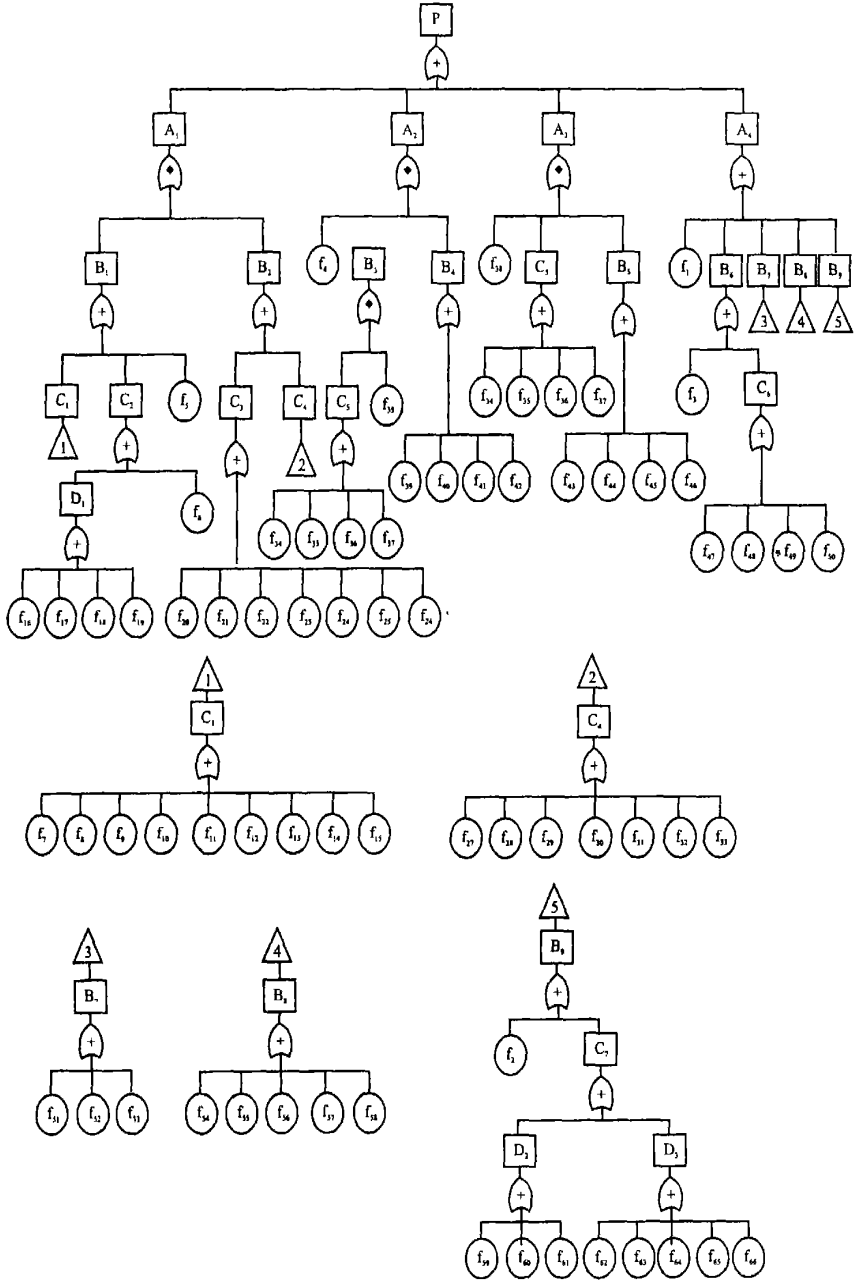


图 1 埋地输气管道腐蚀失效故障树

事件必然发生。若将割集中任意去掉其中一个底事件后， C 就不是割集了，这样的割集称为最小割集。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：

$$P = \sum_{i=5}^{19} f_i \times \sum_{j=20}^{33} f_j + \sum_{k=34}^{37} f_k \times f_{38} \times \sum_{l=39}^{42} f_l \times f_4 + \sum_{k=34}^{37} f_k \times f_{38} \times \sum_{m=43}^{46} f_m + \sum_{n=1}^3 f_n + \sum_{p=47}^{66} f_p \quad (3)$$

由(3)式可知，埋地输气管道腐蚀失效故障树由 23 个一阶最小割集、210 个二阶最小割集、16 个三阶最小割集和 16 个四阶最小割集组成。埋地输气管道腐蚀故障树中的 23 个一阶最小割集为系统中的薄弱环节，这是由于在通常情况下，割集阶数越少，其发生的可能性就越大。同时，在不同最小割集中重复出现次数越多的底事件越重要^[3,9]，所以重要底事件如 f_{34} , f_{35} , f_{36} , f_{37} 和 f_{38} 也应进行分析。

表 1 故障树事件符号

符号	事件	符号	事件	符号	事件
P	管道腐蚀失效	f ₇	土壤电阻率低	f ₃₇	天然气含有 Cl ⁻
A ₁	外腐蚀	f ₈	土壤含水率高	f ₃₈	天然气含有水
A ₂	内腐蚀	f ₉	土壤氧化还原电位高	f ₃₉	缓蚀剂失效
A ₃	应力腐蚀	f ₁₀	土壤含盐量高	f ₄₀	管道内涂层变薄
A ₄	其他因素	f ₁₁	土壤 pH 值低	f ₄₁	管道内涂层脱落
B ₁	管道外腐蚀因素	f ₁₂	土壤中含有 SRB	f ₄₂	管道清管效果差
B ₂	管道外防腐措施	f ₁₃	植物根茎穿透防腐层	f ₄₃	管段存在残余应力
B ₃	管道内腐蚀环境	f ₁₄	土壤中含有硫化物	f ₄₄	管段存在应力集中
B ₄	管道内防腐措施	f ₁₅	土壤有机质含量高	f ₄₅	外界作用力较大
B ₅	作用应力	f ₁₆	电缆接地装置杂散电流	f ₄₆	管道内应力较大
B ₆	管材情况	f ₁₇	电气化铁路杂散电流	f ₄₇	管材含有杂质
B ₇	管道设计质量	f ₁₈	电器接地漏电和感应电流	f ₄₈	管材金相组织不均匀
B ₈	管道施工质量	f ₁₉	其他杂散电流	f ₄₉	管材晶粒粗大
B ₉	管道检测维护质量	f ₂₀	阴极保护站间距过大	f ₅₀	管材选择不当
C ₁	土壤腐蚀	f ₂₁	保护电位低	f ₅₁	防腐措施不完善
C ₂	杂散电流腐蚀	f ₂₂	地床有杂散电流	f ₅₂	面漆设计不当
C ₃	阴极保护失效	f ₂₃	保护方式不当	f ₅₃	底漆设计不当
C ₄	防腐绝缘层老化	f ₂₄	保护材料失效	f ₅₄	防腐层施工受损
C ₅	介质腐蚀	f ₂₅	未考虑套管屏蔽作用	f ₅₅	面漆施工不当
C ₆	管材缺陷	f ₂₆	绝缘法兰接头两侧 10 m 内防腐层未特别加强保护	f ₅₆	底漆施工不当
C ₇	管道检测维护制度不健全	f ₂₇	防腐绝缘涂层机械性能差	f ₅₇	玻璃布包扎施工不当
D ₁	杂散电流干扰	f ₂₈	防腐绝缘涂层变薄	f ₅₈	焊接质量较差
D ₂	管理因素	f ₂₉	防腐绝缘涂层粘接力降低	f ₅₉	领导不重视
D ₃	日常检测维护	f ₃₀	防腐绝缘涂层脆性增加	f ₆₀	奖惩不力
f ₁	管道结构布局	f ₃₁	防腐绝缘涂层破损	f ₆₁	规章制度不健全
f ₂	无管道检测维护制度	f ₃₂	防腐绝缘涂层老化剥离	f ₆₂	员工责任心不强
f ₃	管材加工质量差	f ₃₃	防腐绝缘涂层下部积水	f ₆₃	不按时检测维护
f ₄	管材抗腐蚀性差	f ₃₄	天然气含有 CO ₂	f ₆₄	检测仪器失灵
f ₅	周围其他金属埋设物	f ₃₅	天然气含有 H ₂ S	f ₆₅	无检测仪器
f ₆	未采取有效措施	f ₃₆	天然气含有 SO ₂	f ₆₆	员工素质低

3. 2 失效概率

确定故障树顶事件的发生概率时,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, 则:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - \prod_{R \in C_i} p_R)$$

(4)

埋地输气管道腐蚀失效故障树的最小割集个数 $N = 265$, 从现场收集管道发生腐蚀失效的概率数据, 由 (4) 式可确定顶事件发生失效的概率。

3. 3 主要影响因素与改善措施

对埋地输气管道腐蚀故障树以及全部最小割集进行分析可知, 23 个一阶最小割集为系统中的薄弱

环节, 同时底事件 f_{34} , f_{35} , f_{36} , f_{37} 和 f_{38} 为故障树的重要底事件, 从而得到了引起埋地输气管道发生腐蚀失效的主要因素, 以便采取相应的处理措施提高管道的安全可靠性^[1~2]。其主要因素有:

a) 管材缺陷。由于管材缺陷的存在将导致管道整体强度降低, 为管道腐蚀的发生提供条件, 直接影响管道运行的可靠性。对于管材缺陷, 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, 严格遵守施工操作规范及有关技术标准, 避免在施工过程中由于外力造成管材缺陷。

b) 管道防腐设计缺陷。管道防腐设计缺陷将使管道防腐系统存在严重隐患, 导致管道发生腐蚀, 从而使整个防腐系统发生失效。对于管道防腐设计,

应进行现场调研,结合现场实际情况,由有一定设计经验的设计人员进行设计,并对设计进行严格的审核验收,尽量减少或避免管道防腐设计缺陷对管道防腐系统可靠性的影响。

c)管道施工缺陷。管道施工缺陷,如防腐层受损、玻璃布包扎不当和底漆面漆施工不当等因素将使管道防腐系统存在施工隐患,尤其是焊接质量较差将导致管道焊接缺陷,这些都将为管道腐蚀的发生提供条件。为尽量减少或避免施工缺陷对管道防腐系统的影响,应建立严格的施工质量检测制度,选择合适的焊接工艺,施工过程中严格遵守施工操作规范及有关技术标准,同时对管道施工进行第三方监督。

d)管道输送介质腐蚀环境。输气管道在水和酸性介质的共同作用下将形成管道输送介质腐蚀环境,从而导致管道内腐蚀和应力腐蚀的发生。要控制介质腐蚀环境的形成,应对天然气进行气质在线监测和腐蚀在线监测,及时了解气质变化情况和缓蚀剂保护效果,为制定控制方案提供准确的依据。

e)管理因素。对于埋地输气管道,应从以下几方面加强管理:管道公司实行严格的巡线和安全隐患处理制度,力图及早发现事故隐患,及早处理;定期对设备仪器进行检测维护,对员工定期进行培训,提高员工的技术水平;加强安全教育,提高安全意识;完善规章制度,建立健全安全责任制;建立完善

的管道事故预案和快速反应机制。

4 结 论

对埋地输气管道腐蚀失效故障树进行分析可得出如下结论:

a)故障树分析方法具有直观、简洁的特点,是分析埋地输气管道发生腐蚀失效的有效方法。

b)埋地输气管道腐蚀失效故障树一共考虑了66个基本事件,通过故障树分析明确了埋地输气管道有关腐蚀管理方面的薄弱环节。

c)对埋地输气管道腐蚀失效故障树进一步分析确定了导致埋地输气管道发生腐蚀失效的主要原因,从而提出相应的改善措施,为防范或减少埋地输气管道发生腐蚀失效进行指导。

参考文献:

- [1] 方华灿. 油气长输管线的安全可靠性分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002. 15-34.
- [2] 廖柯熹, 姚安林, 张淮鑫. 天然气管线失效故障树分析[J]. 天然气工业, 2001, 21(2): 94-96.
- [3] 郭波, 武小悦. 系统可靠性分析[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002. 75-84.
- [4] 余建星, 雷威. 埋地输油管道腐蚀风险分析方法研究[J]. 油气储运, 2001, 20(2): 5-12.
- [5] 居滋培. 可靠性工程[M]. 北京: 原子能出版社, 2000. 131-136.