

基于失效评定图的油气管线可靠性分析*

帅 健* * 辛艳霞
(石油大学·北京)

帅 健等. 基于失效评定图的油气管线可靠性分析. 天然气工业, 2002; 22(2): 83~ 86

摘 要 由于失效评定图能反映油气管道断裂的不同形态, 所以基于失效评定图的可靠性分析能确定油气管道的弹性断裂失效概率。文章介绍采用可靠性指标评定管线的安全状况, 提出了可靠性指标的计算方法, 研究了可靠性指标的影响因素及变化规律。提出了失效评定图中的等可靠性指标线的概念, 并根据油气管线工程的目标安全性水平, 在失效评定图中作出了相应的等可靠性指标线, 从而可以根据评定点在失效评定图中的位置, 迅速确定管线的安全水平。

主题词 管道 失效评定图 可靠性 断裂 安全 评价

基于失效评定图的可靠性分析

失效评定图分别以无量纲数 S_r (或 L_r)、 K_r 为横坐标和纵坐标, 由失效评定曲线围成安全区。在油气管道的断裂分析中, 常采用两种通用形式的失效评定曲线, 分别为:

①PD6493 的失效评定曲线^[1], 横坐标为 S_r , 其表达式为:

$$f(S_r) = \frac{S_r}{\sqrt{\frac{8}{\pi^2} \ln \sec \left(\frac{\pi}{2} S_r \right)}} \tag{1}$$

成功应用的重要条件。平湖凝析气管道几年来的平稳运行也得益于比较合理的工艺配套。为使该管道运行更为可靠, 将完善相应的运行监控软件和生产监控系统, 力求及时、准确预测管路温降、水化物生成条件、持液情况。在确保可靠运行的基础上, 进一步实现运行参数优化, 降低生产成本。

参 考 文 献

1 [美] 佩德森 K S 等主编, 郭天民等译. 石油与天然气的性质. 北京: 中国石化出版社, 1992

2 Dukler E, Brauner Maron. A Physical Model for Predicting Minimum Stable Slug Length. Chemical Engineering Science, 1985; (0): 1379~ 1385

②R6 选择一给出的通用形式的评定曲线^[2], 横坐标为 L_r , 其表达式为:

$$f(L_r) = (1 - 0.14L_r^2) / [0.3 + 0.7 \exp(-0.65L_r^6)] \tag{2}$$

设 S_r (或 L_r) 服从正态分布, 其平均值为 μ_{S_r} 、变异系数为 σ_{S_r} (或平均值为 μ_{L_r} 、变异系数为 σ_{L_r}); K_r 服从正态分布, 其平均值为 μ_{K_r} 、变异系数为 σ_{K_r} , 并且 S_r (或 L_r) 和 K_r 无关。

根据可靠性工程的一般理论, 极限状态函数 $G(S_r, K_r)$ 为:

3 Jepson Sun. Slug Flow Characteristics and Their Effect on Corrosion Rates in Horizontal Oil and Gas Pipelines. SPE24787, 1992

4 Fairhurst C P. Pigging for Multi-Phase Flow Pipelines. 4th International Conference on Multi-Phase Flow, the Holiday Inn, Aberdeen, 10~ 12th February, 1988

5 Barkan, Sheinin. A General Technique for the Calculation of Formation Conditions of Natural Gas Hydrates. Fluid Phase Equilibria, Jan., 1993: 111~ 136

(收稿日期 2001- 09- 26 编辑 申红涛)

* 本论文受到 1998 年原中国石油天然气总公司石油中青年创新基金的资助, 项目编号 CX1998- 27。

* * 帅健, 1963 年生, 教授, 博士; 1982 年毕业于武汉化工学院, 现在石油大学(北京) 从事工程力学与油气管道、储罐强度方面的教学与科研工作。地址: (102200) 北京昌平石油大学。电话: (010) 89733271。

$$G = f(S_r) - K_r \quad (3)$$

式中: $f(S_r)$ 或 $f(L_r)$ 为失效评定曲线。将 $S_r - K_r$ 坐标系变换为标准正态坐标系 $Z_1 - Z_2$, 为此, 令

$$Z_1 = \frac{S_r - \mu_{S_r}}{\mu_{S_r} \mu_{S_r}} \quad (4)$$

$$Z_2 = \frac{K_r - \mu_{K_r}}{\mu_{K_r} \mu_{K_r}} \quad (5)$$

再令 $G(Z_1, Z_2) = 0$ (6)

式(6)即为标准坐标系中的极限状态曲线, 根据可靠性指标的几何意义^[3], 可靠性指标为原点到极限状态曲线的最短距离, 由此可计算出可靠性指标 β :

$$\beta(Z_1, Z_2) = \min_{(Z_1, Z_2) \in \partial \omega} \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2} \quad (7)$$

所以, 求可靠性指标 β , 实质上是有约束条件的两变量数学规划问题, 目标函数为式(7), 约束条件为式(6)。由式(3)可解出:

$$Z_2 = \frac{f(S_r) - \mu_{K_r}}{\mu_{K_r} \mu_{K_r}} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7), 即转化为无约束条件的单变量数学规划问题, 自变量为 Z_1 , 目标函数为:

$$\beta(Z_1) = \min \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2} \quad (9)$$

应用 Fibonacci 法^[4]求解式(9)。

根据可靠性指标, 失效概率 P_f 可以表示如下

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (10)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态函数。

可靠性指标的影响因素分析

由以上的分析可知, 在基于失效评定图的可靠性分析中, 可靠性指标 β 取决于 S_r (或 L_r)、 K_r 的均值和变异系数, 对一组确定的 μ_{S_r} 、 μ_{K_r} 、 μ_{S_r} 、 μ_{K_r} 或 μ_{L_r} 、 μ_{K_r} 、 μ_{L_r} 、 μ_{K_r} , 有确定的 β 值。同时, 在不同的情况下, 各个因素对可靠性的影响是不一样的, 参数敏感性分析的目的在于得到对可靠性影响最大的几个参量, 从而抓住控制失效的主要问题。为了进行参数敏感性分析, 定义敏感系数^[3]

$$\alpha_1 = Z'_1 / \beta \quad \alpha_2 = Z'_2 / \beta \quad (11)$$

α_1 、 α_2 都是小于 1 的数, 当 α_1 较大时, 表明 β 值对 S_r (或 L_r) 的变化较敏感, 而当 α_2 较大时, 表明 β 值对 K_r 的变化较敏感。

以 PD6493 的失效评定曲线为例, 图 1(a) 是当 $\mu_{K_r} = 0.5$ 时, 敏感系数 α_1 、 α_2 随 S_r 的均值 μ_{S_r} 的变化, 从图中可以看出, 当 μ_{S_r} 较小时, 即评定点靠近

K_r 轴时, α_1 较小, α_2 较大, 表明 β 值对 K_r 的变化较敏感, 安全状态由 K_r 控制; 而当 μ_{S_r} 较大时, 即评定点靠近 L_r 轴时, α_1 较大, α_2 较小, 表明 β 值对 S_r 的变化较敏感, 安全状态由 S_r 控制; 在其余的区域中, α_1 和 α_2 大小相当, 表明安全状态由 S_r 、 K_r 联合控制。图 1(b) 是 $\mu_{S_r} = 0.5$ 时, 敏感系数 α_1 、 α_2 随 μ_{K_r} 的变化, 当 $\mu_{K_r} > 0.5$ 时, 敏感系数 α_2 接近于 1, 表示 β 值对 K_r 敏感, 而当 $\mu_{K_r} < 0.5$ 时, 敏感系数 $\alpha_1 > \alpha_2$ 。

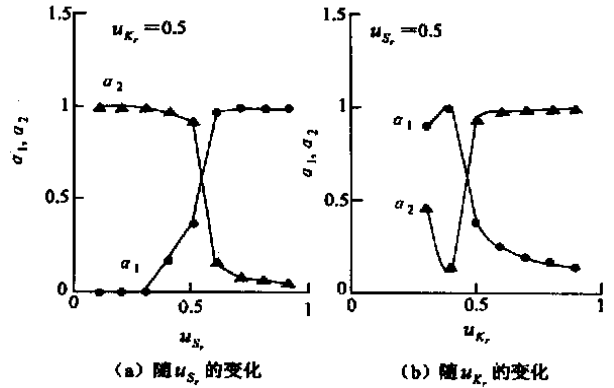


图 1 敏感系数随 μ_{S_r} 、 μ_{K_r} 的变化

图 2 表明了敏感系数 α_1 、 α_2 随变异系数 μ_{S_r} 的变化。在图 2(a) 中, $\mu_{K_r} = 0.1$, 两条曲线在约 $\mu_{S_r} = 0.1$ 处相交, 而图 2(b) 中, $\mu_{K_r} = 0.3$, 两条曲线在约 $\mu_{S_r} = 0.3$ 处相交, 表明如果 μ_{S_r} 大于 μ_{K_r} , 则 β 值对 S_r 的变化较敏感, 反之亦然。

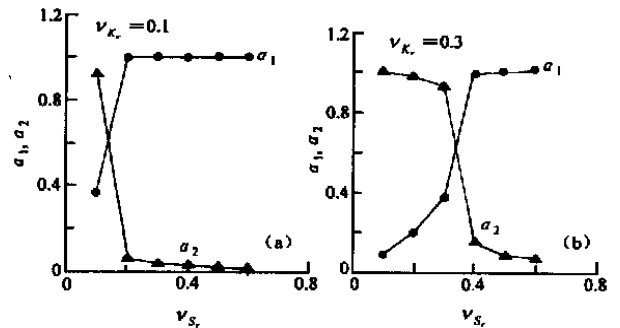


图 2 敏感系数随 μ_{S_r} 的变化

图 3 表明了可靠性指数 β 随 S_r 、 K_r 的均值 μ_{S_r} 和 μ_{K_r} 以及变异系数 μ_{S_r} 和 μ_{K_r} 的变化, 由图可知, 在其它条件不变时, 随着 μ_{S_r} 和 μ_{K_r} 以及 μ_{S_r} 和 μ_{K_r} 的增加, β 值减小, 这是因为均值 μ_{S_r} 和 μ_{K_r} 加大, 表明评定点愈靠近评定曲线, 安全裕度减小; 而随 μ_{S_r} 和 μ_{K_r} 的增

加,即 S_r 、 K_r 的分散性的增加,按照可靠性理论,安全状态变差。因此, β 是 u_r 、 u_{K_r} 、 μ_{S_r} 和 μ_{K_r} 的单调递减函数。

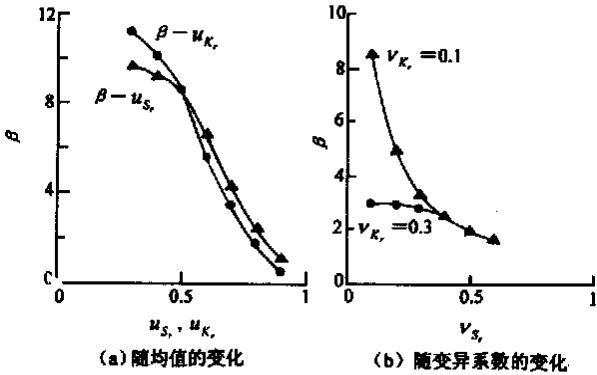


图 3 可靠性指标随均值、变异系数的变化

失效评定图中的等可靠性指标线

由上述对可靠性指标 β 的分析可知,一组 u_r 、 u_{K_r} 、 μ_{S_r} 和 μ_{K_r} 对应着唯一的 β 值,同理,一组 β 、 μ_{S_r} 、 u_r 、 u_{K_r} 也对应着唯一的 μ_{K_r} ,如果保持 u_r 和 u_{K_r} 不变,让 μ_{S_r} 、 μ_{K_r} 变化,可以得到对应着 β 的一系列 (μ_{S_r} 、 μ_{K_r}) 值,将这一系列的 (μ_{S_r} 、 μ_{K_r}) 值连接起来,可以画出在失效评定图上的等可靠性指标线。

为了判断管道结构的可靠性是否符合要求,失效概率应该和目标安全水平比较,目标安全水平定义为一个可接受的最大失效概率,它是一个与管道安全程度的概率描述紧密联系的名义参考值。合适安全目标的确定,是确保管道安全运行的关键问题。迄今为止,我国尚未颁布油气管道安全水平的概率值,参照由 Sotberge 等人^[5]在海洋管道建设中所建议的大多数极限状态下的目标失效概率范围为 $10^{-2} \sim 10^{-5}$,对应的失效概率的不同数量级 ($P_f = 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$),选取不同的 β 值 ($\beta = 1.28, 2.33, 3.09, 3.71, 4.26$),分别采用 PD6493 的评定曲线和 R6 通用曲线,作出失效评定图中的等可靠性指标线如图 4 和图 5,图中 $u_r = u_{K_r} = 0.1$ 。根据评定点 (S_r, K_r) 或 (L_r, K_r) 在图 4 或图 5 中的位置,可以迅速判断含裂纹管道的安全性,例如,当评定点位于 $\beta = 4.26$ 的等可靠性指标线范围内,其可靠性指标大于 4.26 (失效概率小于 10^{-5}),安全性很好,可以放心使用;当评定点位于 $\beta = 2.33$ 和 $\beta = 3.71$ 的等可靠性指标线之间时,失效概率为 $10^{-2} \sim 10^{-4}$,安全性较好,也可以放心使用或根据管线实际

情况适当加强管理;当评定点位于 $\beta = 1.28$ 和 $\beta = 2.33$ 的等可靠性指标线之间时,失效概率为 $10^{-1} \sim 10^{-2}$,安全性不是很好,可以在一定的限制条件下使用;当评定点位于 $\beta = 1.28$ 和 $\beta = 0$ 的等可靠性之间时,其可靠性指标小于 1.28,失效概率大于 10^{-1} ,安全性较差,考虑维修或采取其它措施提高管道的可靠性;当评定点位于 $\beta = 0$ 的等可靠性指标线范围以外时,其可靠性指标小于 0,安全性很差,不能使用或应该报废。因此,可以应用图 4 或图 5 来迅速估计含缺陷管线的可靠性指标和安全性,从而为油气管线是否免于检验、检测周期的长短等提供科学的依

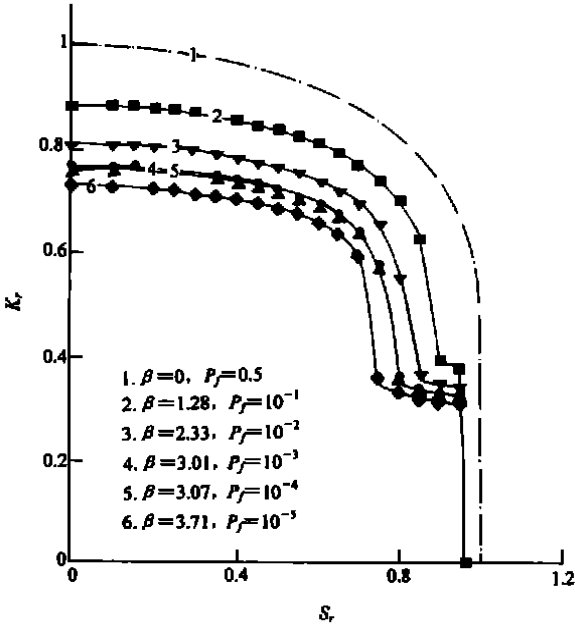


图 4 等可靠性指标线(PD6493 评定曲线)

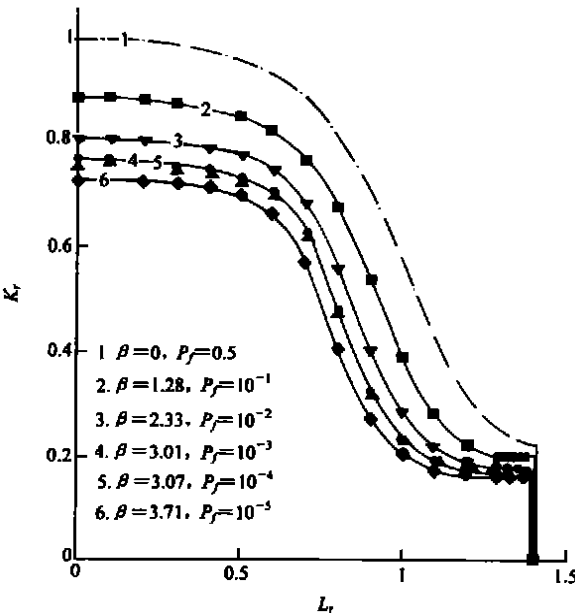


图 5 等可靠性指标线(R6 通用评定曲线)

混凝沉降—微电解—氧化—吸附法 处理高 COD_{Cr} 气田水^{*}

蒋珍菊^{**} 赵立志 曾志农 陈洪
(西南石油学院)

蒋珍菊等. 混凝沉降—微电解—氧化—吸附法处理高 COD_G 气田水. 天然气工业, 2002; 22(2): 86~ 89

摘 要 气田水矿化度通常为几万至十余万 mg/L, COD_{Cr} 值一般在 500 mg/L 左右, 由于采气过程中各种油田化学剂的使用, 可使 COD_{Cr} 值高达数千 mg/L。文章以川中角 53 井气田水为研究对象, 实验研究了高 COD_{Cr} 值气田水的处理方法, 首次将微电解技术用于气田水的处理, 采用混凝沉降—微电解—氧化—吸附工艺处理高 COD_{Cr} 值气田水, 并筛选出最佳工艺条件。实验结果表明, 该法可使原水 COD_{Cr} 值从 1 567 mg/L 降至 150 mg/L 以下, 出水各项指标均达到排放标准。

主题词 气田水 污水处理 混凝 电解 氧化反应 吸附

实验部分

1. 气田水水质特征^[1]

实验采用的是川中油气公司角 53 井气田水, 测量水质指标的实验方法按照《四川油气田环境检测

分析方法》进行。该气田水主要污染指标如表 1 所示。

由表 1 可知, 除硫化物外, 该气田水的各项指标均已超标, 以 COD_{Cr} 最为明显。根据经验得知, 在处理 COD_{Cr} 过程中, 其他指标均可以不同程度除去, 一

据。

结 论

本文基于失效评定图技术, 提出了管线的可靠性分析方法。通过本文的分析, 可以得出以下结论:

(1) 在失效评定图中, 当评定点靠近 S_r 轴时, β 值对 S_r 的变化较敏感, 安全状态由 S_r 控制。当评定点靠近 K_r 轴时, β 值对 K_r 的变化较敏感, 安全状态由 K_r 控制; 在 S_r 和 K_r 相当时, 安全状态由 S_r 、 K_r 联合控制。

(2) 可靠性指标 β 是评定图横坐标和纵坐标的均值与方差的的单调递减函数。

(3) 通过失效评定图中的等可靠性指标线, 可以迅速估计管线的可靠性指标和安全性, 从而为管线是否免于检验、检测周期的长短等提供科学的依据。

参 考 文 献

- 1 BSI: PD6493, Guidance on Methods of Assessing the Assessing the Acceptability of Flaw in Fusion Welded Structures, British Standards Institute, 1991
- 2 Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, CEGB R/H/ R6- Revision 3, 1988
- 3 Ditlesen O, Madsen H. O. Structural Reliability Methods. Wilwy, Newyork, 1996
- 4 魏权龄. 数学规划引论. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1991
- 5 Torbjorn Sotberg, Torgeir Moan, Roberto Bruschi, Guoyang Jiao, Kim J Mork. The Superb Project: Recommended Target Safety Levels for Limit State Based Design of Offshore Pipelines, 1997 OMAE- Volume V, Pipeline Technology, ASME 1997

(收稿日期 2001- 10- 25 编辑 申红涛)

^{*} 本文系中国石油天然气集团公司“九五”科技工程(部 208)资助项目。
^{**} 蒋珍菊, 女, 1974 年生; 1997 年毕业于四川师范学院化学系, 现为西南石油学院在读博士, 从事油气田废水处理及油田用新型高分子研究工作。地址: (637001) 四川省南充市。电话: (0817) 2642544。

the East China Sea for a long time. Add: No. 1225, Shangcheng Road, New Pudong District, Shanghai (200120) , China Tel: (021)68763242- 1947

.....

MIXED PHASE TRANSPORTATION IN CONDENSATE GAS PIPELINE

Guo Kuichang (Shanghai Oil and Gas Corporation). *NATURAL GAS IND.* v. 22, no. 2, pp. 79~ 83, 3/ 25/ 2002. (ISSN1000- 0976; In Chinese)

ABSTRACT: Condensate gas is a multicomponent gas mixture and mainly composed of saturated hydrocarbons. The condensation and retrograde condensation phenomena caused by the change in temperature and pressure along pipeline are obvious in the process transportation, which makes the mixed phase transportation in condensate gas pipeline being different from the single phase transportation in gas or liquid pipeline. The pipeline transportation methods may be divided into gas-liquid mixed flow and gas-liquid separated flow. The former has many advantages as less investment and shorter time-limit, it is necessary, however, to solve some technical problems, as the decrease in pipeline transmission capacity and the slug treatment, caused by the accumulation of condensed liquid; and the latter is to separate condensate gas first, then to transport natural gas and condensed liquid respectively, the fluid in pipeline being a single-phase flow. The gas-liquid separated flow may be subdivided into dual pipeline transportation and batch transportation and the gas-liquid mixed flow is a special case of multiphase flow transportation. By taking the Pinghu oil and gas field, where the multiphase flow technology has been adopted for transporting condensate gas in the submarine gas pipelines, as an example, the relation among pressure drop, throughput rate and liquid holdup in condensate gas multiphase transportation pipeline is analyzed in the paper, and it is pointed out that to predict the pipeline temperature dropping value is a necessary condition of safety in operation. Through analyzing the running circumstances of the condensate gas pipelines in Pinghu oil and gas field, it is emphasized that to form a complete technological system is an important condition of applying the multiphase flow techniques successfully.

SUBJECT HEADINGS: East China Sea, Pinghu, Oil and gas field, Condensate gas, Pipeline transportation, Characteristic, Mixed transportation

Guo Kuichang (*professorial senior engineer*), born in 1942, is the chief engineer of the Shanghai Oil and Gas Corporation

now. Add: No. 336, Jiangning Road, Shanghai (200041) , China Tel: (021) 62555078

.....

RELIABILITY ANALYSIS OF OIL AND GAS PIPELINES ON THE BASIS OF FAILURE ASSESSMENT DIAGRAM

Shuai Jian and Xin Yanxia (University of Petroleum, Beijing). *NATURAL GAS IND.* v. 22, no. 2, pp. 83 ~ 86, 3/ 25/ 2002. (ISSN1000- 0976; In Chinese)

ABSTRACT: Because the failure assessment diagram can reflect various oil and gas pipeline fracture shapes, the elastoplastic fracture failure probability of oil and gas pipelines can be determined through reliability analysis on the basis of the diagram. In the paper, adopting reliability index to assess pipeline safety condition is introduced; the calculation method of the reliability index is proposed; the influence factors and change law of the reliability index are discussed; and a concept of equal-reliability index curve on the failure assessment diagram is put forward. According to the target safety levels of pipeline engineering, relevant equal-reliability index curves may be plotted on the failure assessment diagram, thus determining rapidly the safety level of a pipeline in light of the position of assessed point on the failure assessment diagram.

SUBJECT HEADINGS: Pipeline, Failure assessment diagram, Reliability, Fracture, Safety, Evaluation

Shuai Jian (*Doctor, professor*), born in 1963, graduated from the Wuhan College of Chemical Engineering in 1982. Now he is engaged in the teaching and research on engineering mechanics, oil and gas pipeline and storage tank strengths. Add: Changping, Beijing (102200), China Tel: (010) 89733271

.....

DISPOSING OF HIGH COD_{Cr} GAS FIELD WATER WITH THE PROCESS OF COAGULATING SEDIMENTATION-MICROELECTROLYSIS OXIDATION-ADSORPTION

Jiang Zhenju, Zhao Lizhi, Zeng Zhinong and Chen Hong (Southwest Petroleum Institute). *NATURAL GAS IND.* v. 22, no. 2, pp. 86~ 89, 3/ 25/ 2002. (ISSN1000- 0976; In Chinese)

ABSTRACT: The salinities of gas field water are commonly