

文章编号: 0253-2697(2002)03-0086-05

输油管道参数的统计分析与安全评定

帅 健 许 葵

(石油大学机电学院 北京昌平 102249)

摘要: 为了确保管道的结构完整性, 对一条含裂纹输油管道的失效概率进行了评定。分析了这条输管道的主要结构与力学参数, 确定了这些参数的概率特征。对管道上的表面半椭圆裂纹, 利用失效评定图方法建立了管道断裂失效的极限状态函数, 用 Monte Carlo 模拟方法求解失效概率。通过随机抽样计算, 在失效评定图上直观地显示了评定点的随机分布情况, 得到了管道母材和焊缝的失效概率, 并表明了影响失效概率的敏感性因素。所提出的方法适用于油气管道的安全评定, 具有工程实用价值。

关键词: 输油管道; 裂纹; 失效概率; 统计分析; 安全评定; 状态函数

中图分类号: TE78 文献标识码: A

断裂是油气输送管道的主要失效形式, 而引起管道断裂的主要原因是管道中存在各种形式的结构和材料缺陷。一旦发现了管道上出现了裂纹, 为了确保管道的安全性, 应对管道断裂失效的可能性进行评估。管道评定的主要内容之一是确定管道的安全裕度, 由于概率性的评估方法恰当地考虑了相关因素的不确定性, 从方法上来讲更具合理性^[1]。为了得到各项参数的概率特征, 应对相关数据进行统计分析。依据概率断裂力学的方法, 评定管道的安全性。

1 管道结构与力学参数的统计分析

埋地管道的结构与材料力学数据常常具有较大的随机性和分散性。为了正确处理这些数据, 以反映客观事物的必然规律, 必须借助统计分析方法, 从试验和检测数据可以得到参数的统计分布和分布参数, 分析方法和步骤如下: ①确定平均值; ②估算标准差; ③确定分布类型, 将观测值由小到大顺序排列, 并分组作出直方图, 确定分布类型, 或由经验判定; ④参数估计, 根据观测数据来估计分布模型中的未知参数(待定参数), 两种最常用的方法是矩法和最大似然法; ⑤分布检验, 检验的方法很多, 主要应用柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫检验(K-S 检验)法。

K-S 检验是将观测值的累计频数与假设的分布函数相比较, 如其偏差超过一定限度, 则认为假设有误。设 $S_n(x)$ 是 n 个样本数据的分段累积频率, $F(x)$ 是假想的分布函数, 从理论上讲, $S_n(x)$ 与 $F(x)$ 的最大差距 $D_n = \max |F(x) - S_n(x)|$ 为一随机变量, 对于规定的置信水平 α , K-S 检验定义了 D_n 的临界值 $D_{n, \alpha}$ 。不同 α 和 n 值对应的 $D_{n, \alpha}$ 值可以查专用表^[2]。K-S 检验法的检验标准为: 在 $D_n < D_{n, \alpha}$ 时, 则接受假设的分布函数; 在 $D_n > D_{n, \alpha}$ 时, 则拒绝假设的分布函数。

影响管道断裂失效的主要结构与力学参数有管道壁厚、断裂韧性、屈服极限和抗拉强度等。按上述方法确定参数的概率特征, 最后进行 K-S 假设检验。

1.1 管道的壁厚

管道的壁厚选定为正态分布, 根据从管道上一段管子的测量数据, 确定壁厚的均值为 6.078mm, 变异系数为 0.011。作出分段累积频率 $S_n(x)$ 与正态分布函数 $F(x)$ 的曲线(如图 1), 在 95% 的置信水平下, K-S 检验

基金项目: 中国石油天然气集团公司石油中青年创新基金项目(CX1998-27)。

作者简介: 帅健, 男, 1963 年 8 月生, 1982 年毕业于武汉化工学院化机专业, 现为石油大学(北京)机电学院教授、博士生导师, 从事工程力学和油气管道和储罐强度的科研与教学。

结果为 $0.2821 < 0.331$, 由此可见, 壁厚服从正态分布。

1.2 断裂韧性

断裂韧性的分布类型一般推荐使用威布尔分布, 其均值和方差用 J 积分试验数据回归得到, 如表 1 所示。

表 1 管道的 J 积分试验数据回归结果

Table 1 Regress results of pipe J integral experiment

取材部位	回归结果				J 积分(kN/m)			断裂韧性 MPa \sqrt{m}	变异系数
	β_0	β_1	δ_{max}	r	J_{IC}	$(J_{IC})_{min}$	$(J_{IC})_{max}$		
母材	74.37	571.74	22.78	0.9438	118.06	81.90	154.22	163.46	0.31
焊缝	46.03	702.73	20.22	0.9351	79.38	44.51	114.26	134.05	0.44

注: 其中 β_0, β_1 分别为线性回归方程系数; δ_{max} 为回归方程的带宽; r 为相关系数。

1.3 屈服极限与抗拉强度

对不同管段的屈服极限 σ_s 与抗拉强度 σ_b 的试验数据进行了正态分布的假设检验, 结果见图 2。

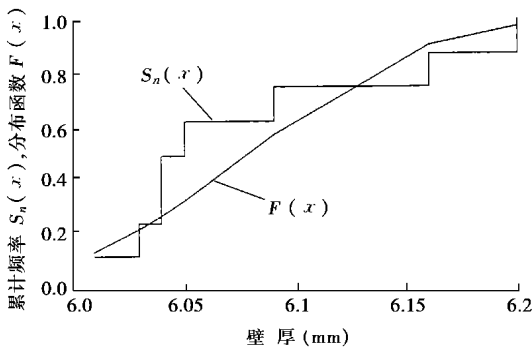


图 1 管道壁厚正态分布的 K-S 检验

Fig. 1 K-S statistical check about pipe thickness

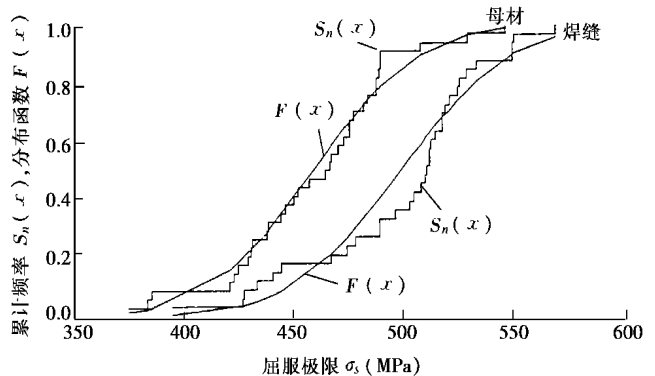


图 2 屈服极限正态分布的 K-S 检验结果

Fig. 2 K-S statistical check results of yield stress

由图 2 可见, 母材和焊缝的屈服极限 σ_s 的分段累计频率 $S_n(x)$ 与正态分布函数 $F(x)$ 的曲线较为接近。统计特征值和 K-S 检验结果见表 2, 在 95% 的置信水平下, 符合正态分布。

表 2 屈服极限的 K-S 检验结果

Table 2 K-S statistical check results of yield limit

取材部位	屈服极限 均值(MPa)	变异系数	K-S 检验	数据数
母材	458.4	0.08	$0.1170 < 0.1766$	34
焊缝	489.7	0.07	$0.1781 < 0.1792$	32

图 3 是母材和焊缝的抗拉强度 σ_b 的分段累计频率 $S_n(x)$ 与正态分布函数 $F(x)$ 的曲线的比较, 表 3 列出了统计特征值和 K-S 检验结果, 在 95% 的置信水平下, 母材的抗拉强度 σ_b 不符合正态分布, 而焊缝的抗拉强度 σ_b 符合正态分布。

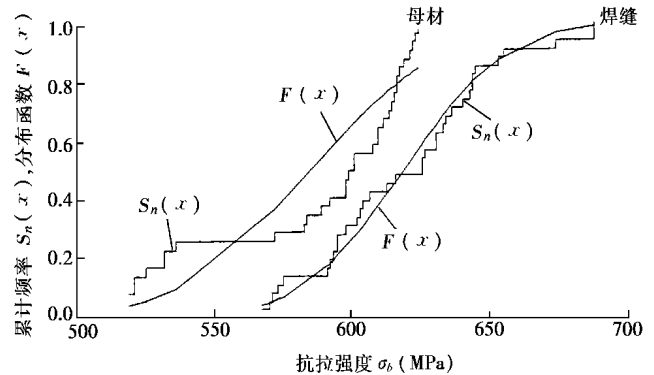


图 3 抗拉强度正态分布的 K-S 检验结果

Fig. 3 K-S statistical check results of tensile strength

2 断裂失效概率

失效评定图方法在油气管道的安全评定中应用广泛, 这种图分别以韧性比 K_r 为纵坐标和载荷比 L_r 为横坐标。它们的定义如下:

$$K_r = K_I / K_{IC}, \quad L_r = p / p_0 = \sigma / \sigma_0 \quad (1)$$

表 3 抗拉强度的 K-S 检验结果

Table 3 K-S statistical check results of tensile strength

材料	σ_b 均值(MPa)	变异系数	K-S 检验	数据数
母材	584.7	0.07	$0.2201 > 0.1766$	34
焊缝	619.8	0.05	$0.0976 < 0.1741$	33

式中 K_I 为管道裂纹尖端线弹性应力强度因子; K_{IC} 为材料的断裂韧性; p (或 σ) 为外加载荷; p_0 (或 σ_0) 为塑性失稳极限载荷。

在失效评定图坐标中, 由失效评定曲线围成安全区。若评定点落在曲线之外, 可以判定管道失效。以 R6 通用方法为例^[3], 失效评定曲线方程为

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

按照可靠性的基本理论, 极限状态函数可以写成

$$G(L_r, K_r) = f(L_r) - K_r = (1 - 0.14L_r^2)[0.3 + 0.7\exp(-0.65L_r^6)] - K_r \quad (3)$$

因此, 可以定义失效概率为

$$P_f = P(G < 0) \quad (4)$$

由于管壁上主要应力是管内压力引起的环向应力, 因此对于管道断裂来说, 最重要的就是轴向裂纹。实际情况多为未穿透的表面裂纹, 规则化为表面半椭圆裂纹。筒形管壁上轴向表面半椭圆裂纹的应力强度因子 K_I 的计算公式为

$$K_I = \frac{pR}{t} \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F\left(\frac{a}{l}, \frac{a}{t}, \frac{R}{t}, \varphi\right) \quad (5)$$

式中 a 为椭圆裂纹深度, m; l 为裂纹半长, m; t 为管子壁厚, m; R 为管子外半径, m; p 为管内压力, MPa; φ 为裂纹角度; Q 为椭圆裂纹的形状参数; F 是表面裂纹的边界修正参数^[4]。

对于含内表面半椭圆裂纹的管道, 塑性失稳极限载荷 p_0 的表达式为

$$p_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \frac{(t - a^*)}{R} \quad (6)$$

对于外表面半椭圆裂纹

$$p_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \frac{(t - a^*)}{R_i} \quad (7)$$

其中 R_i 为管子内半径。 a^* 的表达式为^[5]

$$a^* = \frac{a[1 - (1 + l^2/2t^2)^{-1/2}]}{[1 - a/t(1 + l^2/2t^2)^{-1/2}]} \quad (8)$$

3 Monte-Carlo 模拟方法

由于影响管道裂纹断裂的因素较多, 宜采用 Monte-Carlo 模拟的方法计算管道裂纹的断裂失效概率。这种方法对每一个随机变量进行随机抽样, 将一组抽样值代入功能函数, 得到功能函数的取值。例如, 如果基本变量有分布函数 $F_i(x)$, 由于 $F_i(x)$ 为区间上的一个数, 将其与产生的随机数相对应, 即令

$$F_i(x) = \eta_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

η_i 是由 Monte-Carlo 法产生的随机序列中的一个数, 这样有

$$x = F_i^{-1}(\eta_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

对每一个随机变量按相同方法抽样, 可以得到一组随机变量的抽样值。将这组值代入式(3)所示的极限状态函数 $G(L_r, K_r)$, 便得出极限状态函数的一个取值。若该值小于零, 则在计算程序中记入一次极限状态函数的实现; 若大于零, 则不记入。这样, 在计算机中就完成了一次预定的计算, 再对另一个随机数重复进行这些计算, 直到完成为止。假设计算机中进行的总循环数为 n 次, 得到 $G \leq 0$ 的次数为 m 次, 只要 n 足够大, 便可以得出管道的失效概率为

$$P_f = \frac{m}{n} \quad (11)$$

4 管道失效概率评定

该输油管道在经过多次水压试验和复修以后, 基本上可以排除深度大于 2.3mm 的裂纹存在的可能性。因

此, 管道完整性评定的具体内容是, 确定存在深度小于 2.3mm 表面裂纹的情况下管道的断裂失效概率。

除前述统计分析得到的数据外, 该管道的其余参数为: 管径 377mm, 操作压力 5.8MPa。由于管道上裂纹分布的详细情况未知, 按照文献推荐, 管道上裂纹深度的概率分布确定为对数正态分布^[6], 裂纹深度的平均值定为 2.3mm。并且裂纹长度远大于深度, 即按长裂纹考虑(这样的考虑是足够保守的)。按上述评定方法分别对管道母材和焊缝的断裂失效概率进行了模拟计算, 图 4 和图 5 是抽样次数为 10000 次时评定点的随机分布图。当各参数取均值时, 相当于确定性方法的评定结果, 评定点的坐标分别为: 母材(0.74, 0.18), 焊缝(0.69, 0.22)。失效评定曲线将评定图分成失效区和可靠区两部分, 落在失效评定曲线以外的点表示失效。图 5 中落在失效评定曲线以外的点明显多于图 4, 这表明焊缝的失效概率明显高于母材, 其原因是由于焊缝材料的断裂韧性较低, 且分散程度较高。图 5 中模拟点的分布区域基本沿纵轴方向, 表示焊缝的失效概率对纵坐标 K_r 敏感。纵坐标只与材料断裂韧性及裂纹的应力强度因子有关, 因此, 必须通过提高材料断裂韧性和减小裂纹深度等方法提高可靠性。

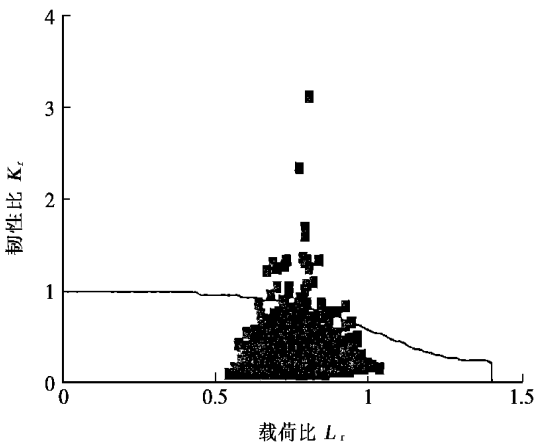


图 4 母材失效概率的 Monte-Carlo 模拟结果

Fig.4 Simulation of the failure probability of pipe body with Monte-Carlo method

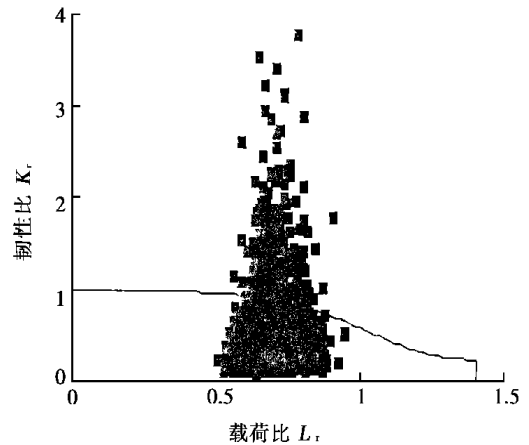


图 5 焊缝失效概率的 Monte-Carlo 模拟结果

Fig.5 Simulation of the failure probability of weld seams with Monte-Carlo method

Monte-Carlo 模拟次数越多, 计算结果的精确度越高。一般规律是失效概率值越低, 模拟次数就必须越多。表 4 是不同模拟次数时的失效概率计算结果。从中可以看出, 当模拟的次数达到 10000 次后, 所得结果足够精确。

将所得到的失效概率与目标安全水平比较。目标安全水平定义为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。安全目标的准确确定, 是确保管道安全运行的关键。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^[7] 在海洋管线工程中所建议的目标失效概率, 服役极限状态每公里为 0.01~0.001。表 4 中的焊缝失效概率与这个目标失效概率处于相同数量级, 而母材的失效概率更低, 因此, 所评定的管道的可靠性基本符合要求。

表 4 模拟次数与失效概率的关系

Table 4 Relation between failure probability and the number of simulation

模拟次数	失效概率 P_f	
	母 材	焊 缝
5000	0.003	0.0248
10000	0.0034	0.0266
25000	0.0036	0.02676
50000	0.0037	0.02568

5 结 论

(1) 对输油管道的结构与力学数据进行统计分析, 可以较好地得到各参数的概率描述。

(2) 管道失效概率的 Monte-Carlo 模拟, 可以在失效评定图上直观地给出评定点的随机分布情况, 并可以判定影响失效概率的敏感因素, 从而提出合理的改进方法。

(3) 概率性的评估方法恰当地考虑了相关因素的不确定性,评定的结果也是可信的。

(4) 上述方法适用于油气管道的安全评定,具有工程实用价值。

参 考 文 献

- [1] 帅健,等.埋地输油管道的断裂失效概率评估[J].石油大学学报(自然科学版),2001,25(2):87~90.
- [2] 茆诗松,王玲玲.可靠性统计[M].上海:华东师范大学出版社,1984:345~349.
- [3] Assessment of the integrity of structures containing defects[S].CEGB R/H/R6-Revision 3,1988.
- [4] Bloom J M. Extensions of the failure assessment diagram approach—semi-elliptical flaw in pressurized cylinder[J]. ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 1985, 107: 25~29.
- [5] Bloom J M. Extensions of the failure assessment diagram approach—semi-elliptical flaw in pressurized cylinders—part II [J]. ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 1986, 108: 485~489.
- [6] Bruckner A Munz D. A statistic model of crack formation in welds[J]. Engineering Fracture Mechanics 1984, 19(2): 287~294.
- [7] 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[C]. OMAE-Volume V, Pipeline Technology, ASME 1997: 71~77.

(收稿日期 2001-04-02 改回日期 2001-07-16

编辑 张君娥)

中国石油天然气集团公司排名世界石油前 10 强

据报道,日前国家统计局按照国际遭到综合指标排序,中国石油天然气集团公司在世界 50 家大石油公司中列第 10 位。

中国石油天然气集团公司是国内最大的石油、天然气生产和销售企业,原油年产能力 11000 万 t,天然气年产能力 180 亿 m^3 ,分别占全国的 68%和 67%,其中石油产量在世界大石油公司中居第 7 位;拥有一加工能力 1.07 亿 t,2000 年实际加工原油 8300 万 t,生产成品油 5000 万 t,生产乙烯 150t,分别占全国的 42.4%、41.4%和 32%;资产总额 6565 亿元,2000 年实现利润 600 亿元。

据悉,中国石油集团公司正在积极组织实施“十五”计划,在今后 5 年间将重点抓好油气开发、炼油化工优化升级、输油气管道建设、市场网络建设、海外项目开发、工程技术服务改组改造、技术创新与人才开发、企业改革、企业管理、企业文化建设等“十大”工程。在油气勘探开发方面,将继续实施“稳定东部,发展西部”的工作方针,重点抓好陕甘宁地区、准噶尔盆地和松辽盆地南部等三大战略接替地区的石油勘探开发工作,争取得到 2005 年包括国外合作区块的份额油产量在内,原油产量达到 12000t,比目前增加 1000 万 t;同时,以“西气东输”为契机,进一步加大天然气的勘探开发力度,重点开发建设塔里木、陕甘宁、四川和柴达木四大气区,争取得到“十五”末天然气产量比目前翻一番,达到 340 亿 m^3 。在炼油化工方面,“十五”期间将重点加快建立和完善四个大型炼油基地,尽快形成润滑油、石蜡、高等级道路沥青三大优势产品生产中心;努力形成几个各具特色的大型石化基地。在输油气管道建设方面,“十五”期间计划建成 5 条油气长输管道,包括塔里木—上海、青海涩北、甘肃兰州、重庆忠县、湖北武汉和陕京复线 4 条输气管道,以及兰州、成都、重庆的成品油管道,总长度超过 8000km;积极准备建设俄罗斯至中国东北的天然气及原油管道工程,形成横跨东西、纵贯南北、连接海外的输油、输气干线管网。通过实施“十大”工程中国石油天然气集团公司的主营业务将更加突出,内部管理更加科学,科技创新能力和企业盈利能力将进一步加强,争取在不远的将来进入世界跨国公司的前列。

摘自《石油综合信息》

and then the oil reservoir pressure will be reduced, so pressure sensitivity hurt to formation will unavoidable. Eventually, effect of permeability loss on low permeability oil field developing is strong. Research result shows due to existence of pressure-sensitive effect, formation permeability value nearby well wall is only around the 45% of that in feed flow border. When formation pressure drops by 5 MPa, output will drop by 13% around.

Key words: low permeability; oilfield development; pressure-sensitive effect; formation pressure

PRODUCTION PERFORMANCE ANALYSIS ON HORIZONTAL WELLS WITH VARIABLE PRODUCTION INDEX

ZHOU Sheng-tian, et al. (*University of Petroleum, China, Dongying 257061, China*) ACTA 2002, 23(3): 77 ~ 80

Abstract: The hypothesis of constant specific Production Index (PI) by Dikken is extended to that piece-wise constant (variable PI) for horizontal well. A segmented well model is presented. The numerical method for this new model is proposed, and a computer program is made. The cross-sectional flow rate, influx along the horizontal well and the pressure distribution of two examples are calculated. The design for perforation distribution and density of horizontal section in horizontal well can be optimized using the present model in reference to different reservoir situations. This model may provide a theoretical foundation for analyzing the optimal performance in horizontal well.

Key words: horizontal well; production index; draw down; piece-section constant; production performance analysis

PETROLEUM ENGINEERING

DEVELOPMENT OF DRILLING AND COMPLETION TECHNOLOGY OF COAL-BED METHANE WELLS IN CHINA

ZHENG Yi, HUANG Hong-chun (*Completion Technology Research Development, Langfang of Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Langfang 065007, China*) ACTA 2002, 23(3): 81 ~ 85

Abstract: The developing situation of drilling and completion technology in coal-bed methane wells in last decade in our country is reviewed. The successful technology and the research results of coal-bed methane obtained in America are summarized. Some problems about existing technology and the main factors restricting coal-bed methane development in China are discussed in the view of drill and completion engineering. Some technique difficulties, the thoughts and relative measures for solving the problems in drilling and completion of coal-bed methane wells in China under the condition of coal-bed with low pressure, low permeability, gas saturated and other special physical properties are proposed.

Key words: coal-bed methane; drilling; completion; situation; measure

STATISTICAL ANALYSIS OF PARAMETERS AND SAFETY ASSESSMENT OF OIL PIPELINE

SHUAI Jian, XU Kui (*University of Petroleum, China, Beijing 102249, China*) ACTA 2002, 23(3): 86 ~ 90

Abstract: The assessment of failure probability for an oil pipeline containing cracks is made in order to assure safety of the pipeline. The probabilistic characteristics of the structural and mechanical parameters of the pipeline are re-

sonably determined by means of statistical analysis on these parameters. For the surface semi-elliptical crack existing in pipe, some limit state function expressions about pipeline fracture failure are established with the failure assessment diagram technique. The failure probability is solved by Monte-Carlo simulation. The random distribution of the assessment points in failure assessment diagram for oil pipeline is directly demonstrated with random sampling computation. Then failure probabilities of the pipe body and weld seams are determined, and the sensitive factors to failure probability are illustrated. The method presented above can be used in safety assessment of oil and gas pipelines and has a certain reference value in engineering practice.

Key words: oil pipeline; statistical analysis; crack; failure probability; safety assessment; state function

EXPERIMENTAL RESEARCH AND APPLICATION OF FRACTURE—CONTROLLED FRACTURING TECHNOLOGY

GUO Da-li, et al. (*Southwest Petroleum Institute, Nanchong 637001, China*) ACTA 2002, 23(3): 91 ~94

Abstract: In order to quantitatively analyze and numerically simulate the fracture-height controlled fracturing technology, researches on this technology are conducted in laboratory. Slurry and diverting agent as well as their optimum combination and obstacle effects are determined. A matched equation for describing the relationship between pressure drop in barriers and sand ratio in diverting agent is put forward. On the basis of these results, the optimum models and their solution of numerical simulation and project design of fracture-height-controlled fracturing are given. According to temperature-field models for wellbore and fracture, 3D fracture propagation model and optimum design method for fracturing parameters, a fracture-height controlled fracturing design software is developed. The field application of the technology is made. A good result is obtained.

Key words: fracture technology; fracture height; experimental research; numerical simulation; optimum design; field application

MECHANISM OF CONTROLLING BOREHOLE TRAJECTORY WITH CLOSE—LOOP ADJUSTABLE STABILIZER AT DOWNHOLE

YU Zhi-qing (*Xi'an Petroleum Institute, Xi'an 710065, China*) ACTA 2002, 23(3): 95 ~97

Abstract: The closed-loop control of the well trajectory at downhole is the most advanced technology in domestic and overseas' drilling engineering. The technology of extended-reach well has become a main focus in the drilling technology of the petroleum industry in the world. It is necessary to depend on the control technology of borehole trajectory to drill the extended-reach well successfully. A closed-loop adjustable stabilizer at downhole is developed. The structure and principle of operation of the stabilizer, and method for controlling borehole trajectory with the close-loop adjustable stabilizer at downhole are described in detail. The close-loop adjustable stabilizer at downhole has been used in oilfield. It may provide an effective way for drilling of the extended-reach well, especially for the offshore-drilling, enhancing the rate of penetration and reducing the drilling cost.

Key words: adjustable stabilizer; extended-reach well; drilling technology; downhole closed-loop; borehole trajectory; control technique