

2006年用户年会论文

# 复杂井况下套管的可靠性分析与数值模拟

[高进伟1 闫相祯 1,2 杨秀娟 2]

[1 中国石油大学(华东)研究生院,257061;2 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 257061]

- [摘要] 鉴于油气井套管的安全可靠性问题,通过对套管、水泥环及地层岩石的几何尺寸和力学性能以 及套管载荷的随机性分析,提出了以概率论为基础的套管可靠性分析这一概念。运用 ANSYS 软件平台建立了"套管一水泥环一岩石"三层结构的三维有限元模型,并结合基于 Monte-Carlo 的 Latin Hypercube 随机模拟方法构建了套管的可靠性计算模型。分析了各种影响因素的随机 性对套管可靠性的影响规律,并对实际工程中的套管进行了可靠性计算。研究结果表明,各种 因素的随机性均能够降低套管的可靠性,但影响情况存在较大差异。对于明显降低套管可靠性 的影响因素,需要严格控制其随机性。
- [关键词] 套管; 可靠性; 数值模拟; 蒙特卡罗法

# Reliability Analysis and Numerical Simulation of Casing in Complicated Wells

[GAO Jin-wei<sup>1</sup> YAN Xiang-zhen<sup>1,2</sup> YANG Xiu-juan<sup>2</sup>]

- [1 Graduate School, China University of Petroleum, 257061; 2 College of Transport & Storage and Civil Engineering, China University of Petroleum, 257061]
  - [ Abstract ] Aiming at the problem of safety and reliability of casing in oil wells and gas wells, the randomness of geometric dimensions and mechanical properties of casing, cement ring and rock were discussed. The reliability analysis of casing based on probability theory is defined. The three-dimensional finite element model of three-layer structure of casing, cement ring and rock was founded utilizing ANSYS. The reliability model of casing was established by means of Latin Hypercube stochastic simulation method based on Monte-Carlo method. The influences of the randomness of every factor on casing reliability were analyzed. And the casing reliability in factual engineering was worked out. The results of research indicate that, the randomness of every factor can reduce the casing reliability, but the influences are various. The randomness of the factors that reduce markedly the casing reliability must be controlled strictly.

[Keyword] casing; reliability; Monte-Carlo method; numerical simulation



### 1 前言

由于套管在油气井中的重要作用,随着井下工况的愈加复杂,越来越严重的套管损坏 已经成为制约我国东西部油田,乃至世界各油田持续稳定发展的一大重要因素。如何有效 分析套管损坏的多种复杂因素,为套管的安全可靠性提供科学的设计计算依据,进而为稳 定油气田开发提供有效保障已经成为石油科技工作者的一项艰巨任务。

目前,套管强度设计主要采用以安全系数为代表的传统设计方法,这些计算方法多以 各种参量的名义值作为计算数据,以安全系数作为判断其可靠性的主要依据。事实上,套 管柱在井下的受力情况异常复杂,不确定因素较多。如主要通过试验手段获得的套管属性 参数(如几何尺寸、力学性能等)、套管承受的各种载荷(如各种内外压力、轴向力、地 震载荷等)在很大程度上是一个随机值,服从一定的分布规律。因此,以安全系数法为代 表的传统套管强度计算方法已无法准确地计算复杂井况下套管的应力状态,更无法掌握各 种因素的随机性对套管安全性的影响程度,从而科学地分析复杂井况下套管的安全可靠性。 这就在根源上为套管的大量损坏埋下了重大隐患。

针对复杂井况下套管载荷和自身属性参数的复杂性和随机性,笔者提出了复杂井况下 套管的可靠性分析这一概念,旨在通过比较完善的结构可靠性理论,借助于 ANSYS 平台 的三维有限元结构分析和随机有限元模拟技术,建立复杂井况下"套管-水泥环-地层岩石" 三层结构的载荷-应力-强度的可靠性模型,进行套管的可靠性分析,确定各种随机参量对套 管可靠度的影响程度,为深入开展复杂井况下套管的安全与可靠性研究奠定基础。

### 2 套管-水泥环-岩石结构的力学模型

固井之后,套管、水泥环和地层岩石由内到外顺序固结在一起,因此可以将其视为整体结构,所受载荷主要包括地层岩石的地应力、外挤压力、内压力和轴向力,其结构和基本受力状态如图1所示。



#### 图1 套管-水泥环-地层岩石的三层结构与受力状态



#### 2006年用户年会论文

在上述结构中,套管、水泥环为轴对称结构。由于地层岩石的尺寸远远大于套管和水泥环,只要取足够大的尺寸,几何形状的差异对套管的计算结果无过大影响。本文将地层岩石视为面对称的立方体形。同时,由于套管、水泥环和地层岩石的几何结构和载荷均呈平面对称,因此,在ANSYS中只需要建立四分之一模型即可,以便减小计算量,加快计算速度。此外,本文将套管、水泥环和地层岩石视为均匀、各向同性的线弹性体,套管破坏符合密赛斯准则。这在工程领域是合理、适用的。据此,所建立的套管-水泥环-地层岩石的三维有限元模型如图2所示。



(a) 模型整体结构



#### 图 2 套管-水泥环-地层岩石的三维有限元模型

### 3 随机参量的概率分布与参数统计

如前所述,套管承受的各种载荷及自身属性参数都具有一定的随机性,服从一定的分布规律。大量的统计分析表明,在结构强度分析中,结构尺寸、材料力学性能和大部分载荷均服从正态分布<sup>[1]</sup>。如套管承受的轴向力、内压、部分外挤压力、温度载荷,以及材料的密度、几何尺寸和管材强度等,对应的概率密度函数和对应的变差系数分别为<sup>[2]</sup>:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} exp\left[-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right]$$
(1)

$$Cov = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \tag{2}$$

式中, x 为随机变量,这里指实际结构几何尺寸力学性能和载荷等参量;  $\mu_x$  为随机变量的均值;  $\sigma_x$  为随机变量的标准差。

由地震、地质构造变动引起的地层滑移和断层复活对套管产生的非均匀外挤压力与频率的关系一般被认为服从威布尔分布<sup>[3]</sup>,其概率密度和对应的数字特征分别为<sup>[4]</sup>:



2006年用户年会论文

$$f(x) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^{m-1} exp\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^{m}\right] \quad x \ge \gamma, \quad \exists \quad m, \eta > 0$$
(3)

$$\mu_x = \gamma + \eta \Gamma \left( 1 + \frac{1}{m} \right) \tag{4}$$

$$\sigma_x = \sqrt{\eta^2 \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) \right\} - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right)}$$
(5)

式中, m为威布尔指数; η为威布尔特征值; γ为随机变量的下限。

文献<sup>[5]</sup>通过对 5 个生产厂家的 2000 根不同钢级的 API 套管进行统计测试,给出了 API 套管几何尺寸和管材力学性能的分布参数见表 1。对于套管载荷的随机性,文献<sup>[5]</sup>指出,套管载荷的随机性取决于油气井的类型、地质复杂程度、工程因素和技术水平等。该文献同时给出了不同井况下反映随机性的载荷变差系数(见表 2)。

套管的部分属性参量	屈服强度 $S_0$ (MPa)	弹性模量 <i>E</i> (GPa)	泊松比 <i>V</i>	外径 <i>D</i> (mm)	壁厚 <i>t</i> (mm)
均值 $\mu_x$ 与 API 值之比	1.090	1.000	1.000	1.003	1.000
变差系数 Cov	0.022	0.035	0.025	0.002	0.031
分布类型	正 态	正态	正 态	正 态	正 态

表1 API 套管部分属性的随机分布参数

表 2 不同井况下套管的内外压力变差系数

油气井类型	生产井	探  并
下套管过程	0.03~0.04	0.15~0.21
钻井过程	0.02~0.04	0.10~0.22
开发过程	0.02~0.04	0.10~0.21

## 4 复杂井况下套管的可靠性分析

4.1 套管可靠性的理论模型



2006年用户年会论文

根据图 2 所示的套管-水泥环-地层岩石结构的三维有限元模型,可以方便地求得套管在 给定井况下的各种应力和应变。由于本文套管破坏是建立在密赛斯准则地基础上的,因此 只需求得套管的最大等效应力 *S* 即可,此时有极限状态方程:

$$Z = S_0 - S$$

(6)

式中, Z 为套管可靠性的状态值(Z 大于 0 说明套管没有失效, Z 小于 0 说明套管发 生失效, Z 等于 0 时, 即为套管不发生对应形式失效的极限状态); S<sub>0</sub>即为套管管材的屈 服强度, MPa; S 为给定井况下套管的最大等效应力, MPa。

在套管管材屈服强度分布规律和分布参数确定的情况下,若已知套管最大等效应力的 随机分布情况,则可通过下式求得套管的可靠度<sup>[4]</sup>:

$$R = P(Z > 0) \times 100\% = \int_{-\infty}^{+\infty} g(S_0) \left[ \int_{-\infty}^{S_0} f(S) dS \right] dS_0 \times 100\%$$
(7)

式中, *R* 为套管的可靠度, %; *P*( $\bullet$ )为事件概率; *f*( $\bullet$ )、g( $\bullet$ )分别为套管屈服强度和应力的概率密度函数。

### 4.2 套管的可靠性数值模拟

由于上述 *S* 为各种载荷、套管和水泥环几何尺寸和力学性能等多个参量的函数,其关系复杂,难以理论求得 *S* 的分布规律和相应的分布参数。在此情况下,ANSYS 的 Probabilistic Design 随机有限元数值模拟模块为套管可靠性的求解提供了一条便捷、有效的途径。



图 3 Latin Hypercube 法模拟精度的收敛性

笔者采用的是基于 Monte-Carlo 的 Latin Hypercube 法, Latin Hypercube 法与直接 Monte-Carlo 法相比更为先进和有效,因为前者具有一个样本"记忆器",可以避免相同样 本(即聚类样本)的重复出现。因此,在同样的模拟精度要求下,Latin Hypercube 法较直 接 Monte-Carlo 法可以节约模拟次数。Latin Hypercube 法的模拟次数可以通过设定的模拟均 值误差和标准差误差进行自适应控制,其控制方式如下<sup>[6]</sup>:



2006年用户年会论文

$$\frac{|\mu(i) - \mu(i - check)|}{\mu(i)} \le \mu_{acc}$$

$$\frac{|\sigma(i) - \sigma(i - check)|}{(i)} \le \sigma_{acc}$$
(8)

 $\sigma(i)$ 式中, $\mu_{acc}$ 、 $\sigma_{acc}$ 分别为设定的均值和标准差模拟精度; $\mu(i)$ 、 $\sigma(i)$ 分别为模拟i次

时得到的模拟均值和标准差; check 为模拟检验次数; i 为模拟次数,  $i = n \bullet check$ ,  $n = 2,3,4,\cdots$ 。

本文采用较长的模拟次数对套管可靠度进行随机模拟发现,当模拟次数超过 2000 次 后,其模拟收敛性已非常好,其模拟均值和标准差与精确值已极其接近,误差均小于 0.001 (如图 3),完全可以满足本文的计算要求。图 3 中蓝色曲线为模拟值,红色曲线分别为 上下偏差(97.5%的置信度)。因此,本文采用的模拟次数设定为不少于 2000 次。

### 4.3 套管可靠性的影响因素分析

显然,套管的可靠性取决于套管、水泥环的几何尺寸、力学性能和载荷,其中,套管的屈服强度和等效应力将最终影响套管的可靠性。上述参量的随机性将严重影响套管的可 靠性。图 4 为模拟得出的套管应力和管材屈服强度的随机性对套管可靠性的影响情况。图 中 *Cov*<sub>s0</sub> 为套管屈服强度的变差系数,*Cov*<sub>s</sub> 为套管等效应力的变差系数。



图 4 屈服强度和等效应力的随机性对套管可靠性的影响

### 5 套管可靠性实例计算分析

某油井生产层段的生产套管尺寸为 7"×0.54"(177.8mm×13.7mm),材料为 N80,固井水泥环名义厚度,地层为疏松砂岩,套管承受有轴向拉力,内压力和外挤压力及非均匀地应力等,具体参数见表 3 和表 4,其他参数见表 1。



2006年用户年会论文

由于地层岩石的几何尺寸远远大于套管和水泥环,其随机性对套管的可靠性影响较小,本文不对其讨论。

	壁厚 <i>t</i> (mn	n)	弹性模量 $E$ (GPa)		 泊松比 <i>V</i>				
4 19 —	均值	变差系数	均值	变差系数	均值	变差系数			
套 管	13.7	0.025	207 0.035		0.30	0.025			
水泥环	19.05	0.100		0.050	0.15	0.030			
地层岩石 –		_	19.3	0.040	0.38	0.030			
表 4   套管载荷参数									
****	轴向拉力 F	内压力 $P_i$	外挤压力 $P_{o}$		非均匀地应力(MPa)				
<b></b>	(kN) (MPa)		(MPa)		$\sigma_{x}$	$\sigma_{y}$			
均值	3	11.26		17	34.2	22.6			
变差系数	0.03	0.03		0.035	0.04	0.04			
分布规律	正态	正态		正态	正态	正态			





图 5 套管可靠性状态值的概率密度曲线



图 5 为模拟得出的套管可靠性状态值 Z 的概率密度柱状图(蓝色)和拟合曲线(红色)。 由图可知,套管的可靠性函数仍基本服从正态分布,同时得到其可靠度为 80.94%。

表 5 为套管载荷及自身属性参数等因素对套管可靠性的影响程度(以置信度 97.5%计算),下标"<sub>Ca</sub>"代表套管,"<sub>Ce</sub>"代表水泥环。表中数值的绝对值表示相应因素对套管 可靠性影响程度的大小,正负号代表该因素对套管的可靠性起正面作用还是负面作用。从 表中可以看出,非均匀地应力对套管可靠性的影响程度最大,严重降低套管的可靠性;套 管的壁厚对其可靠性的影响较其外径大,且提高套管的可靠性,而套管外径却降低其可靠 性;外挤压力对套管可靠性的影响远远大于内压;水泥环弹性模量对套管可靠性的影响较 大,且提高套管的可靠性;水泥环厚度、岩石力学性能对套管可靠性影响较小。

表5 各因素对套管可靠性的影响	J情况
-----------------	-----

因素	$\sigma_x$	$S_0$	$\sigma_y$	$P_{o}$	t <sub>Ca</sub>	D	$E_{\rm Ca}$	$E_{\rm Ce}$	F	$\nu_{\rm Ca}$	$P_{\rm i}$	其他
影响	0.700	0 526	0.265	0 122	0.080	0.076	0.012	0.005	0.002	0.001	0.001	泪小
系数	-0.709	0.320	-0.303	-0.125	0.089	-0.070	0.013	0.005	-0.002	0.001	-0.001	112/11

### 6 结论

以弹性力学为基础,以结构可靠性理论和有限元方法建立的套管可靠性分析方法,通 过 ANSYS 的随机有限元数值模拟,分析了复杂井况下套管的可靠性及影响因素。通过上 述工作,可以得出如下结论:基于 ANSYS 的 Probabilistic Design 随机有限元数值模拟模块 为结构可靠性分析提供了一条便捷、有效的途径;套管的可靠性分析方法与传统方法相比, 计算评价结果更加全面、科学;计算所得的套管可靠度结果具有较高的可信度,能够为科 学、全面地进行套管分析、设计提供了一定的计算依据。

#### [参考文献]

- [1] 张骏华. 结构可靠性设计与分析[M]. 北京: 宇航出版社, 1989.
- [2] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社, 1989.
- [3] 范琦. 地震震级和地震间隔时间的统计分布研究[J]. 西北地震学报, 2001, 23 (1): 7~12.
- [4] 刘惟信. 机械可靠性设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

[5] Adams A J, Parfitt S H L, Reeves T B, et al. Casing system risk analysis using structural reliability [R], SPE/IADC 25693, 1993: 169~178.

[6] Ansys Incorporated. Ansys Release Document [M]. Ansys Help.

#### 作者简介



2006年用户年会论文

高进伟(1978-),男(汉),河南省新郑人,现为中国石油大学(华东)在读博士研究生,主要从事油气工程力学等方面的研究。

通讯单位:中国石油大学(华东)211 工程办公室

通讯地址:中国石油大学(华东)211 工程办公室 闫相祯(收)

邮编: 257061

电话: 0546-8392356 或 0546-8391820

Email:yanxz@hdpu.edu.cn