

# 基于 Kriging 模型的特殊螺纹油管 and 套管接头密封可靠性分析

刘文红<sup>1</sup>, 林凯<sup>1</sup>, 冯耀荣<sup>1</sup>, 王鹏<sup>1</sup>, 谢俊峰<sup>2</sup>, 杨向同<sup>2</sup>

(1. 中国石油集团石油管工程技术研究院石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室, 陕西西安 710077; 2. 中国石油股份有限公司塔里木油田分公司, 新疆库尔勒 841000)

**摘要:**以某型特殊螺纹接头为分析对象,建立该特殊螺纹密封可靠性功能函数,通过有限元方法对螺纹接头进行载荷包络线试验仿真,确定载荷包络线试验中螺纹接头密封失效的最危险载荷点。基于该最危险载荷点,通过随机化影响特殊螺纹密封性能的11个参量,利用 Kriging 代理模型对螺纹接头进行可靠性分析,确定其在载荷包络线试验中最危险载荷点下的密封可靠度。结果表明:基于 Kriging 模型的密封可靠性分析是评价特殊螺纹接头密封性能的一种有效方法,能够满足工程应用的需要,可用于特殊螺纹接头的设计、优化和选用。

**关键词:**特殊螺纹接头; 密封; 可靠性; 有限元; Kriging 模型

**中图分类号:** TE 925 **文献标志码:** A

**引用格式:** 刘文红, 林凯, 冯耀荣, 等. 基于 Kriging 模型的特殊螺纹油管和套管接头密封可靠性分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(3): 163-169.

LIU Wenhong, LIN Kai, FENG Yaorong, et al. Analysis of sealing reliability for premium connection casing and tubing based on Kriging model[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(3): 163-169.

## Analysis of sealing reliability for premium connection casing and tubing based on Kriging model

LIU Wenhong<sup>1</sup>, LIN Kai<sup>1</sup>, FENG Yaorong<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>1</sup>, XIE Junfeng<sup>2</sup>, YANG Xiangtong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Performance and Structure Safety for Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials in CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710077, China;  
2. Tarim Oil Field Branch of PetroChina, Korla 841000, China)

**Abstract:** Taking a type of casing premium connection as the analysis object, a function was constructed to evaluate the sealing reliability of the connection, and the load envelope was simulated by using the finite element method. The worst sealing point of the connection was determined during the sealing failure test. Based on the most dangerous load point during the load envelope test, by randomizing effect of the premium connection sealing performance of 11 parameters, the sealing reliability of the casing premium connection was assessed during the test of load envelope using the Kriging surrogate model. The sealing reliability of the connection at the worst load point was obtained. The results show that the Kriging model is an effective method in the evaluation of premium connection sealing reliability based on performance, and it can satisfy the need of engineering application, which is used for the design, optimization and selection of casing and tubing premium connections.

**Keywords:** premium connection; sealing; reliability; finite element analysis; Kriging model

随着油气勘探中高温高压井、深井超深井以及复杂腐蚀环境油气井的深入开发,井下环境不断恶

化,复杂油气田勘探开发对油气井管柱完整性和安全可靠性提出了更高要求。套管柱和油管柱是井完

收稿日期:2016-01-08

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05020-003);中国石油天然气集团公司科学技术项目(2011A-4208,2014A-4214)

作者简介:刘文红(1972-),男,高级工程师,博士,博士后,研究方向为石油管材失效分析、油气井管柱完整性等。E-mail:liuwenhong001@cnpc.com.cn;wh-liu@163.com。

整性的重要屏障,螺纹和钢级的选择是保证油气井管柱完整性的关键<sup>[1]</sup>。特殊螺纹接头的设计克服了 API 螺纹接头的固有缺陷,通过独立的密封面及扭矩台肩实现多级密封<sup>[2]</sup>,因此具有更好的密封性能。特殊螺纹接头密封能力与接头的设计与公差控制、材料性能波动以及井下工况变化(如井深、温度、井型以及地层移动)密切相关。由于材料的塑性、螺纹结构复杂接触以及载荷边界条件变化带来的多重非线性效应,难以用显性方程或解析解描述接头密封完整性问题。有必要采用基于有限元数值模拟的隐式极限状态方程进行特殊螺纹接头密封可靠性分析。目前对特殊螺纹接头密封性能的研究大多基于接头参数为名义值,这种确定性的密封性能研究方法未考虑接头几何参数、材料和载荷等的不确定性,往往会得到过于保守的结果,比如检测合格的特殊螺纹接头在井下使用一段时间后,仍然有泄漏发生<sup>[3-5]</sup>。从可靠性角度来研究特殊螺纹接头密封性能是保证油气井管柱完整性的有效途径之一。笔者以某型特殊螺纹接头为分析对象,建立该特殊螺纹密封可靠性功能函数,通过有限元分析手段对该螺纹接头进行载荷包络线试验仿真,确定载荷包络线试验中螺纹接头密封失效的最危险载荷点。利用 Kriging 代理模型对该螺纹接头进行可靠性分析。

## 1 特殊螺纹接头密封可靠性功能函数

功能函数一般也称为极限状态函数,一般定义为响应量  $r$  与其临界值  $r_c$  之差。功能函数等于零的方程,即

$$g = r - r_c = 0. \quad (1)$$

称为极限状态方程,是失效状态和安全状态之间的区分。

参考 ISO 13679:2002,在特殊螺纹接头密封性能分析中忽略扭矩台肩的密封能力,所以接头的密封能力取决于密封面区域接触压力及其分布,可以将连接接头密封能力的极限状态函数定义为

$$g_{\text{sealing}} = r_s - r_{sc}. \quad (2)$$

式中,  $r_s$  为接头的密封能力,表示为接触压力的函数;  $r_{sc}$  为抵抗泄漏的密封能力临界值。

Murtagian<sup>[6]</sup>通过实物试验和数值模拟提出了一种加权的密封接触强度  $W_a$  评估螺纹接头的密封性能,表示为

$$W_a = L p_c^n \text{ 或 } W_a = \int_0^L p_c^n(l) dl. \quad (3)$$

式中,  $p_c(l)$  为密封接触压力;  $l$  为密封长度;  $n$  为相

关性指数,当有螺纹密封脂时,  $n = 1.2$ ; 无螺纹密封脂时,  $n = 1.4$ 。

密封接触强度  $W_a$  表示密封接触面抵抗流体泄漏的能力,其主要影响因素为密封面接触压力和接触长度。

在高温高压下油套管螺纹接头抵抗泄漏的密封能力临界值定义为

$$W_{ac} = 0.01 (p_{\text{gas}} / p_{\text{atm}})^{0.838}. \quad (4)$$

式中,  $p_{\text{gas}}$  为管体内的压力;  $p_{\text{atm}}$  为大气压力。

将连接接头密封能力的功能函数表示为

$$g_{\text{sealing}} = W_a - W_{ac}. \quad (5)$$

当  $g_{\text{sealing}} > 0$  时,特殊螺纹接头密封可靠;  $g_{\text{sealing}} < 0$  时,密封失效;  $g_{\text{sealing}} = 0$  时,特殊螺纹接头处于临界密封状态。

## 2 特殊螺纹接头密封性能有限元分析

### 2.1 螺纹接头有限元模型

由于特殊螺纹接头所承受的机紧过盈和轴向拉伸载荷都是轴对称的,而且特殊接头螺纹升角小于  $2^\circ$ ,所以对特殊螺纹接头的有限元分析采用二维模型,能够满足工程需要。在特殊螺纹接头的二维仿真分析中,采用  $\Phi 177.8 \text{ mm} \times 9.19 \text{ mm}$  的某特殊螺纹接头,图 1 所示为该型特殊螺纹接头二维几何模型及有限元模型整体网格。

对于该型特殊螺纹接头,钢级为 P110,弹性模量为 206.84 GPa,泊松比为 0.3,屈服强度为 861.875 MPa。对于特殊螺纹接头的接触属性,设置接触面的接触关系为无摩擦接触,因为无摩擦滑移,比较均匀,易收敛,算法采用改进的拉格朗日法以满足收敛速度与求解精度的需要。

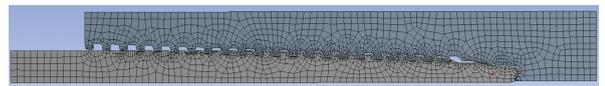


图 1 某型特殊螺纹接头二维模型及有限元模型整体网格

Fig. 1 Two dimensional model and finite element model of a type of casing premium connection

选用的特殊螺纹接头的最佳上扣扭矩为 13.7 kN·m。内压和外压以及轴向载荷根据 ISO 13679:2002 确定<sup>[7]</sup>。对于特殊螺纹接头二维模型上扣扭矩的施加,主要是通过设置螺纹接触的过盈量实现:首先预设置一定的过盈量,计算出此过盈量下的接触压力,根据接触压力推算出此过盈量下的上扣扭矩,然后与给定的上扣扭矩对比,若满足一定的误差要求,则认为此过盈量即为施加该上扣扭矩所需过

盈量,若与给定的上扣扭矩相差较大,则继续调整设置的过盈量直至满足误差要求。

模型在公称尺寸下对过盈量不断调整,对于最佳上扣扭矩,设置螺纹牙轴向过盈量为 0.223 mm,径向过盈量为 0.154 mm。按过盈量设置可以计算出上扣后螺纹接头的 Mises 应力分布,见图 2。不考虑螺纹升角的影响,与上扣扭矩相平衡的反扭矩由接触面上的环向摩擦反力提供。

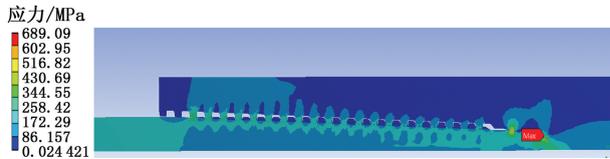


图 2 标准上扣扭矩下螺纹接头 Mises 应力分布

Fig.2 Mises stress distribution of casing premium connection under standard make-up torque

根据接触面上各螺纹牙以及密封面和扭矩台肩的接触压力和半径,可得出近似的上扣扭矩为

$$M_{opt} = \sum \mu F_i R_i = 13\,506 \text{ (N} \cdot \text{m)}. \quad (6)$$

摩擦系数  $\mu$  取 0.02<sup>[3]</sup>。分析接触压力计算结果,螺纹啮合部分两端的接触压力较大,最大接触压力产生于密封面处。

## 2.2 载荷包络线试验仿真结果分析

对于特殊螺纹接头的载荷包络线试验,ISO 13679:2002 中已做了相关的规定。特殊螺纹的设计必须满足载荷包络线国际标准中的相关要求,即所有试验样本必须成功完成所有的系列载荷试验而未发生泄漏,系列载荷试验主要包括 A 系列、B 系列以及 C 系列载荷试验,试验目的主要是在保证安全的前提下使特殊螺纹接头承受尽可能高的载荷和复合载荷,其载荷路径的计算可通过 ISO 13679:2002<sup>[7]</sup> 确定。

### 2.2.1 A 系列载荷试验

A 系列试验载荷主要是室温下的压力和轴向力测试,共包含 14 个载荷点,各载荷点的轴向力、内压和外压见表 1。

逐一将载荷点施加给模型,计算每种载荷工况下的螺纹接头接触压力分布,在得到了 A 系列试验的接触压力分布后,分别根据式(3)和(4)确定了各载荷点密封接触强度和临界密封接触强度如表 2 所示。

### 2.2.2 无弯曲的 B 系列载荷试验

无弯曲的 B 系列试验的载荷路径共包含 8 个载荷点,其轴向力、内压和外压见表 3。逐一将载荷点施加给模型,计算每种载荷工况下无弯曲的接触压力分布。在得到了无弯曲 B 系列试验的接触压

力分布后,得到密封接触强度和临界密封接触强度如表 4 所示。

表 1 某型特殊螺纹接头 A 系列试验各载荷点数值

Table 1 Load points value for A series test on a special premium connection

载荷点	轴向力/kN	内压/MPa	外压/MPa
1	3507.4	0	0
2	3507.4	54.88	0
3	2953.6	65.17	0
4	1846	68.6	0
5	0	65.17	0
6	-1230.6	45.73	0
7	-2461.33	22.86	0
8	-3507.4	0	0
9	-3507.4	0	0
10	-3507.4	0	28.6
11	-1846	0	28.6
12	0	0	28.6
13	1230	0	25
14	2461	0	21.45

表 2 某型特殊螺纹接头 A 系列载荷点对应的密封接触强度和临界密封接触强度

Table 2 Contact strength and critical contact strength of A series load point test on a special premium connection

载荷点	密封接触强度 $W_a$	临界密封接触强度 $W_{ac}$
1	22.16	0
2	26.81	1.96
3	28.51	2.26
4	29.54	2.36
5	31.16	2.26
6	27.34	1.68
7	24.25	0.94
8	20.34	0
9	20.34	0
10	17.41	1.14
11	17.01	1.14
12	14.82	1.14
13	12.82	1.01
14	13.89	0.89

表 3 某型特殊螺纹接头无弯曲的 B 系列试验各载荷点数值

Table 3 Load points value for B series test without bending on a special premium connection

载荷点	轴向力/kN	内压/MPa	外压/MPa
1	3507.4	0	0
2	3507.4	48.02	0
3	2953.6	54.88	0
4	1107.6	65.17	0
5	0	61.74	0
6	-1230.6	45.73	0
7	-2461.33	27.44	0
8	-3507.6	0	0

### 2.2.3 常温下 C 系列试验

根据 ISO 13679:2002 确定常温下 C 系列试验的载荷路径,包含 5 个载荷点,表 5 为轴向力和压

力。表6为各载荷点下密封接触强度和临界密封接触强度。

表4 某型特殊螺纹接头无弯曲的B系列载荷点对应密封接触强度和临界密封接触强度

**Table 4 Contact strength and critical contact strength of B series load point test on a special premium connection  $m \cdot \text{MPa}^{1.4}$**

载荷点	密封接触强度 $W_a$	临界密封接触强度 $W_{ac}$
1	22.16	0
2	25.78	1.75
3	26.95	1.99
4	28.45	2.26
5	28.20	2.16
6	27.34	1.68
7	23.34	1.10
8	20.34	0

表5 某型特殊螺纹接头C系列试验常温下的各载荷点数值

Table 5 Load points value for C series test at room temperature on a special premium connection

载荷点	轴向力/kN	内压/MPa	外压/MPa
1	2953.58	54.88	0
2	2680.20	0	0
3	3747.18	10.98	0
4	458.00	54.88	0
5	239.26	10.976	0

表6 某型特殊螺纹接头常温下的C系列试验各载荷点密封接触强度和临界密封接触强度

Table 6 Contact strength and critical contact strength of C series load point test at room temperature on a special premium connection  $m \cdot \text{MPa}^{1.4}$

载荷点	密封接触强度 $W_a$	临界密封接触强度 $W_{ac}$
1	26.99	1.96
2	22.06	0
3	19.14	0.05
4	27.92	1.96
5	19.12	0.05

3种载荷工况中,A系列载荷为螺纹接头实际使用中常用的载荷系列,因此,以A系列载荷的仿真结果为典型案例进行可靠性仿真分析。A系列载荷中,从载荷包络线试验27个试验载荷点的密封接触强度与临界密封接触强度之差  $W_a - W_{ac}$  来看(图3),A系列试验的载荷点5的值最高,说明在此载荷点下该特殊螺纹接头的密封性能最好,不容易发生泄漏,而A系列试验的载荷点13的  $W_a - W_{ac}$  最低,说明在此载荷点下该特殊螺纹接头的密封性能最差。选取最危险的载荷点13作为后续的密封可靠性分析中对应的载荷点。

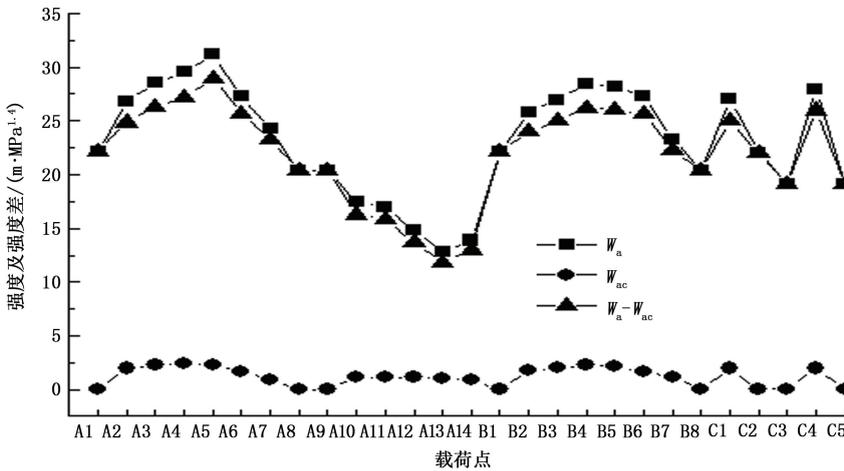


图3 载荷包络线试验各载荷点对应密封接触强度和临界密封接触强度

Fig. 3 Load envelope test of each load point corresponding to seal contact strength and critical seal contact strength

### 3 基于Kriging代理模型的密封可靠度计算

Kriging模型能利用有限的样本信息预测整个设计空间的响应值,同时模型的有效性并不依赖于随机误差的存在,是一种非常具有“统计性”的近似

技术。

通过对Kriging模型、径向基函数模型和支持向量机代理模型进行比较<sup>[8-9]</sup>,Kriging模型在概率工程设计中对无论是构建代理模型还是灵敏度分析,都是较好的方法。相比于其他传统的插值技术,Kriging模型有两方面优点<sup>[9]</sup>:一是以已知信息的动

态构造为基础,即只使用估计点附近的某些信息,而不是所有的信息对未知信息进行模拟。二是同时具有局部和全局的统计特性,可以分析已知信息的趋势和动态。在特殊螺纹接头的密封可靠性研究中采用 Kriging 代理模型。

Kriging 模型<sup>[9]</sup>可以表示为

$$\hat{y}(x) = f^T(x)\beta + Z(x). \quad (7)$$

式中,  $f(x)$  为基函数列向量;  $\beta$  为回归函数列矩阵;  $f^T(x)\beta$  为多项式部分,代表全局统计特性。

$Z(x)$  表示局部偏差,一般采用均值为 0,方差为  $\sigma_z^2$ ,协方差非 0 的高斯平稳随机过程,  $Z(x)$  的协方差矩阵可以表示为

$$\text{cov}[Z(x_i), Z(x_j)] = \sigma_z^2 R[R(x_i, x_j)], i, j = 1, 2, \dots, n_s. \quad (8)$$

表 7 各个随机变量分布类型及参数

Table 7 Distribution types and parameters of each random variable

随机变量	分布类型	分布参数
管体内径	均匀分布	U(159.42, 160.2171)
密封面干涉量	管体密封面外径	正态分布 N(170.00, 0.01667)
	接箍密封面内径	正态分布 N(169.50, 0.01667)
接头干涉量	外螺纹中径	正态分布 N(176.64, 0.01667)
	内螺纹中径	正态分布 N(176.64, 0.01667)
屈服强度	正态分布	N(861.875, 34.55)
管体锥度	威布尔分布	W(0.0705, 2.1961)
接箍锥度	正态分布	N(0.0625, 0.000833)
上扣扭矩	正态分布	N(13700, 466.6670)
管体密封面锥度	正态分布	N(0.1667, 0.001667)
接箍密封面锥度	正态分布	N(0.0833, 0.000833)

在构建 Kriging 模型前,必须通过确定性试验获得一定数量的已知信息。必须在密封性影响参量的设计空间抽取一定数量的样本点。在可靠性分析中,使用效果比较好的用于构建 Kriging 模型的抽样方法为拉丁超立方抽样方法(LHS)。该方法可以控制样本点的位置,避免样本点的小邻域堆积问题并且所得样本点可以代表设计空间中的所有部分。

### 3.1.2 Kriging 代理模型的建立与验证

利用拉丁超立方抽样(LHS)<sup>[10-11]</sup>,样本数取 100,在 Matlab 中编写相应程序即可得到 100 组拉丁超立方样本数据,对 100 组样本进行确定性试验,将样本数据逐一赋予有限元模型,对特殊螺纹接头进行设置材料属性、划分网格、接触属性以及设置边界条件等一系列操作后,提交计算后利用 ANSYS 软件的强大求解功能,求解出每个样本对应的特殊螺纹密封面上的接触压力,进而利用式(3)得到各个样本对应的响应值,即密封接触强度,如图 4 所示。最后根据这 100 组样本值及各样本对应的响应值,

式中,  $n_s$  为样本数;  $R$  为相关矩阵;  $R(x_i, x_j)$  为任意两个样本点  $x_i$  和  $x_j$  之间的相关函数,相关函数常选取为高斯函数。

## 3.1 Kriging 代理模型构建

### 3.1.1 影响参量及抽样方法

影响特殊螺纹接头密封性能的因素可分为 3 类,即几何参数、材料参数和扭矩参数。由于加工误差的存在,使得特殊螺纹接头的几何参数和材料参数等不完全等于理论值,具有随机性,且服从一定分布;同时由于配合误差的存在,特殊螺纹接头的上扣扭矩也不能完全保证为最佳扭矩。以上因素的存在使得特殊螺纹接头的密封性能存在随机性,即密封可靠性问题。选取了 11 个对特殊螺纹密封性能影响最大的参量作为密封可靠性影响参量,见表 7。

调用 Matlab 工具箱 DACE 建立 Kriging 代理模型。

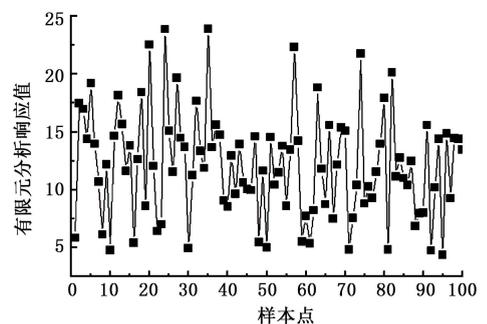


图 4 某型特殊螺纹接头密封性影响参量的各样本点及对应响应值

Fig. 4 Sample points and corresponding response values of influence parameters of a type of premium connection

为了测试所建立的 Kriging 近似模型的有效性及准确程度,在变量的取值空间范围内,随机抽取了 11 个样本点,分别通过有限元分析确定了响应值,并与建立的 Kriging 代理模型计算的响应值进行了对比,对比结果如表 8 所示。若模型在精度检验中

不满足要求,可以通过增加构建 Kriging 的样本数来改变模型,直至满足要求为止。当获得满足精度的

Kriging 代理模型后,就可以通过代理模型来代替有限元仿真来计算密封响应值。

表 8 Kriging 模型计算结果与有限元结果对比

Table 8 Comparison of Kriging model calculation results with FEM results

样本点	管体内径	密封面干涉量		螺纹干涉量		屈服强度	管体锥度	接箍锥度	上扣扭矩	管体密封面锥度	接箍密封面锥度	有限元响应值	Kriging 响应值	误差/%
		管体密封面外径	接箍密封面内径	外螺纹中径	内螺纹中径									
1	159.8861	169.9811	169.4914	176.6809	176.6508	805.9319	0.0641	0.0622	13648.17359	0.166301285	0.082768683	12.0882	11.8595	1.89
2	160.0650	169.9973	169.5192	176.6323	176.6274	889.3787	0.0621	0.0626	12669.68469	0.167764816	0.083675292	7.2295	7.5491	4.42
3	159.6730	169.9904	169.4934	176.6620	176.6693	868.3103	0.0613	0.0622	12982.94966	0.165219635	0.084404855	10.8041	11.2576	4.19
4	159.5277	169.9857	169.4716	176.6481	176.6403	928.6544	0.0651	0.0622	13674.44763	0.165601938	0.083346321	12.7072	13.6053	7.07
5	159.8378	169.9864	169.5087	176.6340	176.6561	877.1256	0.0638	0.0628	13941.63683	0.166424002	0.082652797	12.1482	12.4017	2.09
6	159.4602	170.0072	169.4955	176.6592	176.6584	855.0763	0.0616	0.0622	13289.77138	0.164885202	0.083868535	8.6035	8.9712	4.27
7	159.6418	169.9902	169.5161	176.6411	176.6310	854.3454	0.0642	0.0633	13088.06994	0.168193128	0.082571320	8.1305	7.5540	7.09
8	159.6968	169.9942	169.4698	176.6458	176.6220	874.5946	0.0612	0.0620	13496.88992	0.165060526	0.083502128	10.7125	11.4304	6.70
9	160.1069	170.0119	169.4938	176.6231	176.6196	886.4184	0.0634	0.0624	13302.79626	0.166086168	0.083887862	6.4797	6.6468	2.58
10	159.6631	169.9905	169.5047	176.6310	176.6499	927.3524	0.0633	0.0625	13080.05987	0.170273706	0.082217973	13.8991	13.1703	5.24
11	159.9232	170.0268	169.5090	176.6413	176.6297	867.019	0.0660	0.0623	13954.79169	0.166639635	0.083285725	17.9626	18.5376	3.20

注:表中,外径、内径、螺纹中径和锥度单位均为 mm,屈服强度单位为 MPa,上扣扭矩单位为 N·m。

从表 8 可以看出,确定性有限元试验得到的样本响应值与 Kriging 代理模型得到的样本响应值达到了较好的一致性,最大误差控制在 7.1% 之内,满足工程需要,证明所建立的 Kriging 代理模型可以用于特殊螺纹接头的密封可靠性分析。

### 3.2 某型特殊螺纹接头密封可靠度计算

应用 Monte Carlo 根据各变量的分布再次进行大量抽样,样本数选择为 1 000 000,将抽样得到的变量数据代入已构建的 Kriging 代理模型,调用 predictor 函数预测各样本点所对应的密封接触强度响应值,再与临界密封强度值进行比较,即可得到密封可靠性功能函数(5)取值并判断该样本点是否密封失效。运行相应的用于特殊螺纹接头的密封可靠度计算 Matlab 程序,计算结果表明在 1 000 000 个样本中有 18 个功能函数  $g_{sealing} < 0$ ,即在 1000 000 个样本中有 18 个样本点不满足密封要求。故该特殊螺纹接头的密封可靠度为

$$R = 1 - \frac{18}{1\,000\,000} = 0.999\,982. \quad (9)$$

该特殊螺纹接头在 ISO 13679:2002 载荷包络线试验密封失效最危险点下的密封可靠度为 0.999982。

## 4 结 论

(1)建立的某特殊螺纹接头密封可靠性功能函数确定了载荷包络线试验中螺纹接头密封失效的最危险载荷点。

(2)利用 Kriging 代理模型对选定的特殊螺纹接头进行的可靠性分析确定了其在载荷包络线试验

中最危险载荷点下的密封可靠度。

(3)基于 Kriging 模型的密封可靠性分析是评价特殊螺纹接头密封性能的一种有效方法,能够满足工程应用的需要,可用于特殊螺纹接头的设计、优化和选用。

### 参考文献:

[1] 冯耀荣,韩礼红,张福祥,等. 油气井管柱完整性技术研究进展与展望[J]. 天然气工业,2014, 34(11):73-81.  
FENG Yaorong, HAN Lihong, ZHANG Fuxiang, et al. Research progress and prospect of oil and gas well tubing string integrity technology [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(11):73-81.

[2] 许志倩,闫相祯,杨秀娟. 特殊螺纹套管接头连接性能的安全可靠性分析[J]. 北京科技大学学报, 2011,33(9):1146-1153.  
XU Zhiqian, YAN Xiangzhen, YANG Xiujuan. Safety reliability analysis of connection capability of non-API casing connection joints [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011,33(9):1146-1153.

[3] 窦益华,许爱荣,张国政,等. 螺纹参数公差对油管螺纹连接强度的影响分析[J]. 石油机械,2007,35(1):13-15.  
DU Yihua, XU Airong, ZHANG Guozheng, et al. Analysis of effect of thread parameter tolerances on connecting strength of tubing threads[J]. China Petroleum Machinery, 2007,35(1):13-15.

[4] XIE Jueren, RONG Feng, THOMAS D. Methodology for reliability-based design and assessment of tubular connec-

- tion sealability in HPHT wells [C]. Xi'an: OCTGTS, 2014.
- [5] 申昭熙,王鹏,李磊,等.特殊螺纹接头密封可靠性数值分析[J].石油矿场机械,2012,41(1):10-13.  
SHEN Zhaoxi, WANG Peng, LI Lei, et al. Simulation calculation analysis of seal reliability of premium thread connection[J]. Oil Field Equipment, 2012, 41(1): 10-13.
- [6] MURTAGIAN G R, FANELLI V, VILLASANTE J A, et al. Sealability of stationary metal-to-metal seals [J]. Journal of Tribology, 2004, 126(3): 591-596.
- [7] Petroleum and Natural Gas Industries. Procedures for testing casing and tubing connection ISO 13679:2002[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2002.
- [8] HEMALATHA S, RATNA B C. Meta models for variable importance decomposition with applications to probabilistic engineering design[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 57(3): 996-1007.
- [9] 许志倩,闫相祯,杨秀娟,等.复杂井况下油井套管柱的系统可靠性计算[J].中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(4):125-129.  
XU Zhiqian, YAN Xiangzhen, YANG Xiujuan, et al. Calculation of casing system reliability in complex well condition[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science). 2009, 33(4): 125-129.
- [10] 张崎.基于 Kriging 方法的结构可靠性分析及优化设计[D].大连:大连理工大学,2005.  
ZHANG Qi. Structural reliability analysis and optimization design based on Kriging method [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [11] 游海龙,贾新章,张小波,等. Kriging 插值与拉丁超立方试验相结合构造电路元模型[J].系统仿真学报,2005,17(11):2752-2755.  
YOU Hailong, JIA Xinzhang, ZHANG Xiaobo, et al. Constructing circuit meta model using Kriging interpolation integrated with Latin hypercube sampling experiment [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(11): 2752-2755.

(编辑 沈玉英)