

# 石油套管特殊螺纹接头的密封设计

高连新 金 焯

(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200030)

张居勤

(无锡西姆莱斯石油专用管制造有限公司 无锡 214028)

摘要：利用有限元技术和全尺寸试验相结合的方法，研究了石油套管特殊螺纹接头密封设计的方法。给出了设计石油套管特殊螺纹接头时，既能保证其密封性，又不至于发生粘结损坏的条件。最后利用数控机床加工出了这种接头，并进行了全尺寸评价试验，结果显示该接头的密封性能达到了设计目标，表明确定的特殊螺纹密封设计的方法是可行的。

关键词：套管接头 特殊螺纹 密封性能 有限元法 全尺寸试验

中图分类号：TE256.9

## 0 前言

套管柱是由一根根的石油套管通过螺纹连接起来的长达数千米的高压容器，较高的连接强度和较好的密封性能是对连接螺纹的基本要求。研究表明，螺纹连接处(即接头)是整个套管柱中最薄弱的环节，也是最容易损坏的部位，提高接头的连接质量一直是套管生产厂重点攻关的课题。目前的套管接头大多数采用 API 螺纹连接，由于结构设计的原因，这种螺纹存在很多缺陷，如连接强度低、密封性能差等，采用特殊螺纹代替 API 螺纹可以有效地克服这些缺陷，是公认的解决套管接头过早失效的最有效措施。关于 API 螺纹的研究已经很多<sup>[1,2]</sup>，而关于特殊螺纹的研究，目前还不多见，尤其是关于特殊螺纹设计方面的研究，在我国几乎为空白。作者最近成功开发出了一种特殊螺纹接头 - WSP-1T/C，已经通过了室内评价试验，并已在四川油田、南海西部、中原油田等的天然气井中使用。利用有限元分析和全尺寸试验技术，较系统地研究了这种特殊螺纹接头密封设计的方法。

## 1 套管接头的密封机理

与普通 API 接头相比，特殊螺纹接头最突出的优点是良好的密封性能，密封设计是特殊螺纹接头设计的难点和核心问题。而深入了解 API 螺纹和特殊螺纹各自的密封机理，是特殊螺纹接头密封设计

的出发点。对 API 圆螺纹来说，螺纹连接后在齿顶与齿底之间存在一条螺旋状的泄漏通道，见图 1a。对 API 偏梯形螺纹来说，见图 1b，螺旋形泄漏通道不仅存在于齿顶与齿底之间，而且存在于齿侧与齿侧之间。研究表明<sup>[3]</sup>，即使在加工公差为零的情况下，泄漏通道依然存在，说明泄漏通道的存在是 API 螺纹设计的固有缺陷。只有使用螺纹脂填充该通道，API 螺纹才能达到密封效果。但螺纹脂随着时间的推移，易于挥发和变质，使这种螺纹的密封可靠性大大降低。

特殊螺纹突破了 API 螺纹的设计框架，使密封功能不再通过螺纹配合实现，而是为此设计了专门的结构，一般为金属/金属密封结构，见图 1c。金属/金属密封结构的设计，将 API 螺纹的非接触式密封改进为接触式密封，密封能力显著增强。

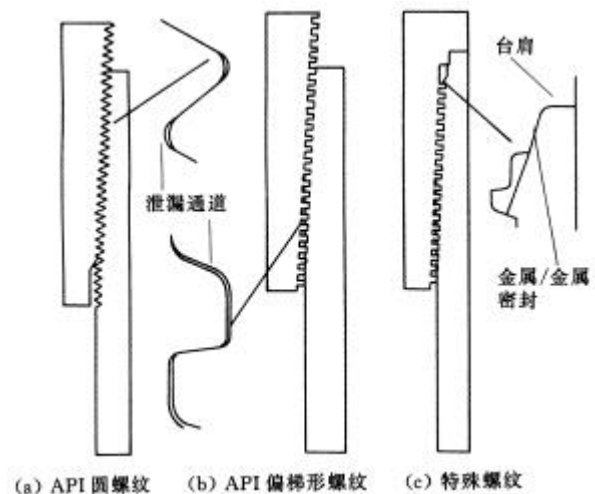


图 1 特殊螺纹和 API 螺纹的对比

一般认为，对于金属/金属密封结构来讲，防止流体泄漏的条件为密封面上的接触压力大于内部流

体的压力。许多 API 螺纹和特殊螺纹的研究者把这一条件作为密封设计的依据，美国石油学会在研究 API 螺纹的密封问题时，也是基于这一原则<sup>[4]</sup>。但是，上述密封判据是建立在密封面完全光滑的基础上的，实际上，由于加工的原因，密封面的光洁度只能维持在一定水平，不可能完全光滑。由于表面粗糙度，使得密封面配合后仍存在微小的间隙。根据流体力学，流体通过间隙时产生的局部阻力取决于间隙的截面积和泄漏路径的长度，可表示为

$$\Delta R \propto \Delta l / S$$

式中  $S$ ——间隙的截面积

$\Delta l$ ——泄漏路径的最小长度

显然，接触面上的接触压力越大，间隙的截面积就越小，若二者成比例变化，则

$$\Delta R \propto p_t \Delta l$$

式中  $p_t$ ——接触压力

也就是说，当气体或液体通过间隙时，产生的阻力是

$$\Delta R \propto \int p_t dl$$

该阻力相当于沿泄漏路径  $l$  累积的接触压力。因此，该接触面的临界密封压力  $p_{cr}$  可以表示为

$$p_{cr} = K \int p_t dl$$

式中  $K$ ——常数

因此，设计特殊螺纹接头的金属/金属密封结构时，从提高密封性的角度，应尽量满足 2 个条件：

接触压力尽可能大，以使泄漏路径的面积较小。

接触面积尽可能大，以使泄漏路径的长度较长。

同时加工时保证密封面的光洁度较高。

## 2 特殊螺纹接头的密封设计

### 2.1 基本方法

有限元法对分析具有复杂几何形状和复杂材料性能的对象具有很大的优势，对于结构复杂、变形往往超过弹性范围的套管螺纹接头来讲，有限元法是分析的理想工具。同时，为了验证有限元结果的准确性，全尺寸试验方法也是必要的。综合利用这两项技术，完成了特殊螺纹套管接头的密封设计。

特殊螺纹套管接头的分析是一个综合了材料非线性和边界条件非线性的弹塑性接触问题，其中接触分析是难点。采用直接约束法描述接触边界，其基本原理是，追踪物体的运动轨迹，一旦探测出发生接触，便将接触所需的运动约束(即法向无相对运动，切向可滑动)和结点力(法向压力和切向摩擦力)作为边界条件直接施加在产生接触的节点

上。这种方法不增加系统自由度数，可直接在接触边界上选定参与接触的单元，节点的载荷和位移按接触相容条件确定。计算时将外螺纹和内螺纹处理为两个接触体  $p$  和  $c$ ，有限元基本方程为

$$k_p u_p = F_{ep} + F_{tp}$$

$$k_c u_c = F_{ec} + F_{tc}$$

式中  $k_p, k_c$ ——外、内螺纹的刚度矩阵

$u_p, u_c$ ——位移矢量

$F_{tp}, F_{tc}$ ——接触力矢量

$F_{ep}, F_{ec}$ ——外力矢量

在图 2 所示的  $O'x'y'$  局部坐标系下， $A$  为接触点， $BC$  为接触段，接触点  $A$  的相容方程可描述为

$$\Delta v'_A = \frac{1}{2}(1-x_A)\Delta v'_B + \frac{1}{2}(1+x_A)\Delta v'_C$$

$$\sum_{i=1}^n F'_{ip} = \sum_{j=1}^m F'_{jc}$$

式中  $v'$ ——法向位移矢量

$F'_{ip}, F'_{jc}$ —— $p, c$  接触体上的接触反力

$n, m$ —— $p, c$  接触体上参与接触的节点个数

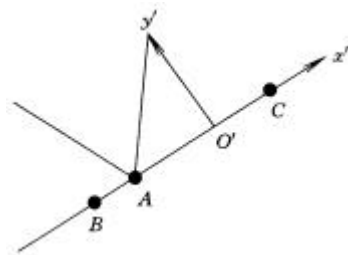


图 2 接触点与被接触段

建立有限元模型时，考虑到螺纹的螺旋升角很小，忽略其影响，将接头视为轴对称结构。计算时选用库仑摩擦模型来模拟螺纹牙与牙之间及金属/金属密封面之间的接触。摩擦因数与螺纹脂有关，一般为 0.015 ~ 0.025<sup>[5,6]</sup>，所计算的摩擦因数选为 0.02。选用大型非线性有限元分析软件 MSC/MARC 进行建模和分析。单元类型选择轴对称三节点单元，计算模型见图 3。

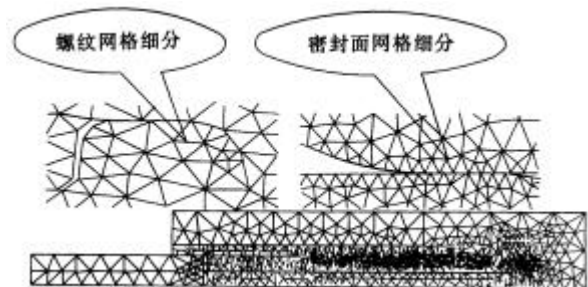


图 3 有限元计算模型

### 2.2 密封结构设计

目前国外特殊螺纹接头种类较多，由于设计的

出发点不同,加之专利的保护,使金属/金属密封结构也各不相同,但基本形式主要有锥面/锥面、锥面/球面、柱面/球面等几种,如图4所示。

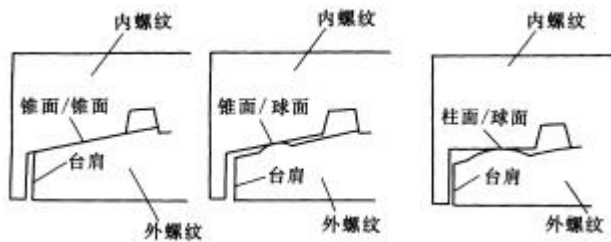


图4 主要密封结构形式

根据前面论述的密封机理,若选择锥面/锥面形式,则接触面积较大,在同样的接触压力下可获得较好的密封效果。但加工时对两个密封面的锥度要求高,锥度不匹配会使接触面积大大减小,进而降低其密封效果。若选择后两种形式,要获得同样的密封效果,则需要较高的接触压力。从现有的产品看,不论选择何种结构形式,只要使接触压力与接触面积之间能获得较好的平衡,都可以起到良好的密封效果。另外,对前两种密封结构来说,当接头受到轴向拉伸载荷后,接触压力会有所降低,从而使密封能力下降。而对柱面/球面结构,在拉伸载荷作用下,密封面仍能保持同样的接触压力,密封能力不下降。

在设计中,选择柱面/球面形式,不过外螺纹为柱面,内螺纹为球面,见图5。将密封球面设计在内螺纹内部,接头在使用过程中密封面不容易被碰坏,同时与现有的专利技术也不冲突。

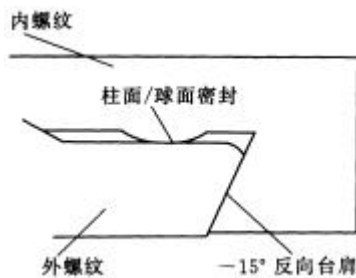


图5 本设计的密封结构

### 2.3 密封过盈量及公差范围确定

特殊螺纹接头的密封性能要由金属/金属密封结构承担,接头的粘结也主要发生在密封面上,因此,确定密封过盈量及加工公差时,要同时考虑接头的密封能力和耐粘结能力。从理论上讲,要做到这一点,应满足两个关系:密封面的应力状态小于材料的屈服强度。密封面的接触压力大于其可能承受的最大内压力。

利用有限元法,依据上述原则,即可以确定柱面/球面的密封过盈量及加工公差的范围。以 $f$

177.8 mm  $\times$  9.19 mm 的 N80 钢级套管为例,经反复试算,确定内螺纹密封球面的半径为  $R$ ,密封面的过盈量为  $d$ ,过盈量的公差范围为  $\pm 0.04$  mm。图6给出了装配后密封面上的接触压力分布。可见,接头拧紧后主密封的接触宽度较窄,约为 0.36 mm,最大接触压力产生于接触宽度的中心,基本上关于中心呈对称分布。在最大、名义和最小过盈量情况下,密封面的最大接触压力分别为 722 MPa、652 MPa 和 584 MPa,从理论上讲,这种套管可以密封住 500 MPa 以上的压力,该值远大于其可能承受的压力,因此具有良好的密封效果。而此时,密封面上的最大等效 VME 应力分别为 521 MPa、465 MPa 和 386 MPa,均低于材料的屈服强度,密封面未发生永久变形,可防止密封面发生粘结损坏,能满足油田多次使用的要求。

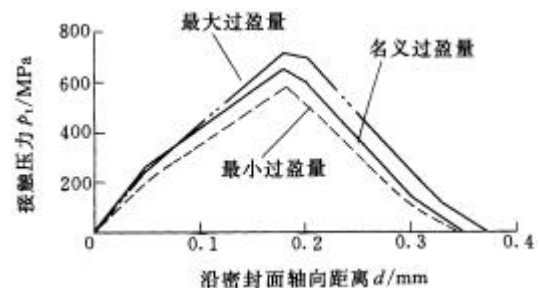


图6 锥面/球面上的接触压力分布

### 2.4 辅助密封设计

尽管金属/金属密封结构具有很高的密封可靠性,但由于套管为薄壁圆筒,密封面为一个圆周形曲面,该曲面上任何一点不连续都会造成密封失效。由于套管存在不圆与壁厚不均等问题,使金属/金属密封结构的密封可靠性下降。辅助密封结构的设计可以进一步提高接头的密封可靠性。

选择反向台肩作为辅助密封结构,见图5。与常用的直角台肩相比,反向台肩具有更好的密封效果。利用图3建立的有限元模型,最终确定反向台肩的角度为 $-15^\circ$ 。在这种情况下,接头装配后,反向台肩处可产生很高的接触压力。对 $f$ 177.8 mm  $\times$  9.19 mm 的 N80 钢级套管来说,此处的接触压力在 700 ~ 1 000 MPa 之间,可起到很好的密封效果。

与直角台肩相比,反向台肩在拉伸载荷下仍能保持较高的接触压力。而拉伸载荷是套管工作时最主要的载荷之一。利用有限元法,可模拟柱面/球面与 $-15^\circ$ 台肩上接触压力随拉伸载荷的变化。在装配后的接头上施加轴向拉伸载荷,载荷值为管体屈服强度的 10% ~ 80%,每间隔 10% 加载一次。此时,密封面处最大接触压力的变化见图7。可见,球面/柱面密封的接触压力基本不受轴向负荷的影响,而

-15°台肩在接头受轴向拉伸负荷后，其密封能力明显优于直角台肩。

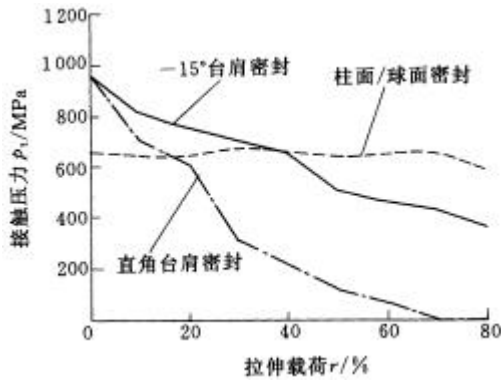


图7 主密封和台肩密封接触压力随轴向载荷的变化

因此，这种接头具有两级密封结构，主密封和辅助密封的接触压力很高。而且主密封接触压力基本上不受拉伸载荷的影响，辅助密封的接触压力受拉伸载荷的影响也相对较小，从而保证接头具有良好的密封性能。

### 3 全尺寸试验

在特殊螺纹接头的设计中，有限元法基本手段，而全尺寸试验是验证设计结果的重要步骤。利用专用数控机床，在 $f177.8\text{ mm} \times 9.19\text{ mm}$ 的N80钢级套管上加工出了这种特殊螺纹，选择3根试样共6组螺纹配合进行密封试验。试样的选择严格按照API RP 5C5<sup>[7]</sup>标准进行，使这6组螺纹配合包含了密封过盈量可能出现的各种情况，因此具有较好的代表性，试验时将试样分别编号为1Z、2Z、3Z。试验程序也根据API RP 5C5进行，所有试验项目在中国石油天然气集团公司石油管材研究所的全尺寸试验设备上完成。以干燥氮气模拟天然气，以水模拟石油，密封试验前先将试样在177℃温度下连续烘干24 h，以消除螺纹脂对密封的影响。泄漏检测用专用设备完成。主要试验项目及顺序为：螺纹参数检测，上扣试验，在177℃温度下烘干24 h，气密封试验，水密封试验。

试验结果表明，该接头的气密封能力达到了API RP 5C5的要求，最大试验压力达60 MPa。气密封试验后，利用清水为压力介质，对试样缓缓施加内压，最后试样均从管体破裂，而接头没有泄漏或损坏，说明其水密封压力超过了管体。图8为试验后试样的照片。

除此以外，该产品也在工厂内部也进行了大量的全尺寸模拟试验，并与同样规格和钢级的API螺纹(包括圆螺纹和偏梯形螺纹)套管进行了对比试

验。试验结果表明，特殊螺纹套管在密封性能，尤其是气密封性能方面具有很大的优势，远好于普通的API螺纹套管。目前该套管已经在我国的四川油田、南海西部油田等的天然气井中使用。使用结果表明，该新型套管达到了国外同类产品的水平。



图8 试样失效后的形貌

### 4 结论

(1) 特殊螺纹接头采用了与API接头完全不同的密封机理，密封性能不再由螺纹承担而是由金属/金属密封结构承担，因而具有良好的密封性能。

(2) 金属/金属密封结构形式的选择与过盈量的确定是特殊螺纹密封设计的关键。确定过盈量时应依据两个原则：密封面的接触压力尽可能大。密封面的应力状态低于材料的屈服强度。

(3) 台肩也可以起到很好的密封作用，其中反向台肩的辅助密封效果更好。

### 参 考 文 献

- 1 Wang L, Zang Y, Chen Z N, et al. Modal analysis of thread off failure of oil round thread casing connection. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2001, 8(4): 277 ~ 279
- 2 习俊通, 聂刚, 梅雪松, 等. 螺距误差对套管螺纹载荷传递特性的影响. 西安交通大学学报, 2000, 34(1): 46 ~ 49
- 3 高连新, 赵克枫, 宋治. 隔热管气密封性能的评价与泄漏原因分析. 石油机械, 1999, 27(2): 38 ~ 40, 47
- 4 America Petroleum Institute: BUL 5C3. Bulletin on Formulas and Calculations for Casing, Tubing, Drill Pipe, and Line Pipe properties. API, USA, 1994: 16 ~ 18

- 5 Kwon W Y, Klementich E F, Ko I K. An efficient and accurate model for the structural analysis of threaded tubular connections. SPE Production Engineering, 1990, 5(4) : 261 ~ 264
- 6 Michael J, Manuel A D. How to evaluate and select premium casing connections. IADC/SPE 35037, 1996
- 7 America Petroleum Institute : RP 5C5. Recommended Practice for Evaluation procedure for Casing and Tubing Connections. API, USA, 1990 : 9 ~ 14

## SEAL DESIGN OF PREMIUM THREADED CASING CONNECTIONS

Gao Lianxin Jin Ye

(School of Mechanical and Power Engineering,  
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Zhang Juqin

(Wuxi Seamless Oil Pipe Co. Ltd., Wuxi 214028)

**Abstract** : Seal design method of premium threaded casing connections is studied with finite element analysis and full-scale test. The criterions of seal design are presented that can keep the joint leak-tight as well as not damaging the seal surface. Furthermore, several new premium connections that designed according to this method were manufactured with numerical control machine tool. The full-scale test of these connections show that their seal property is very well. This indicated that the seal design method given is effective.

**Key words** : Casing connection Premium thread

Seal property Finite element method

Full-scale test

作者简介:高连新,男,1970年出生,博士研究生。主要研究方向为虚拟产品开发技术与有限元仿真。

E-mail : gaolianxin@163.com

## 《机械工程学报》荣获第三届国家期刊奖

在日前揭晓的国家新闻出版总署主办的第三届国家期刊奖评选结果中,《机械工程学报》从参评的近千种刊物中脱颖而出,在获奖的学术类期刊中名列前茅。

国家期刊奖,是一项在业内具有广泛影响、备受社会各界瞩目的政府奖。第三届国家期刊奖评选活动是新闻出版总署于2004年年底举办的,其宗旨是为了深入贯彻党的十六大和十六届三中、四中全会精神,进一步推动期刊出版事业繁荣发展。入围期刊名单于2004年12月21日通过初评产生,并在《中国新闻出版报》、《中国图书商报》和中国记者网上进行了一个月的公示,接受全社会的监督。这些参评期刊经过评选工作办公室的参评资格审查、出版规范审查、编校质量审查和广告内容审查后,由专家组和评选工作委员会进行了认真、严格的评选,最终评出获本届国家期刊奖的期刊。

参与本次评选活动的刊物种类多,质量高,实力强,能获得此奖的都是行业内具有权威性的名牌期刊。在参与评选的976种期刊中,仅有60种获得最终的大奖。《机械工程学报》在15种获奖的学术类期刊中名列前茅。这也是《机械工程学报》继1999年第一届、2003年第二届国家期刊奖获奖之后,又一次获此殊荣。

在国家新闻出版总署举办的颁奖典礼上,有关部门领导希望获奖期刊继续高举邓小平理论伟大旗帜,全面贯彻“三个代表”重要思想,在党的十六大和十六届三中、四中全会精神指引下,按照“三贴近”要求,坚持正确舆论导向,传播先进文化,充分发挥导向和示范作用,为推动我国期刊业健康繁荣发展做出更大的贡献。