

文章编号:1001-4888(2006)03-0351-06

## 封隔器卡瓦接触应力研究<sup>\*</sup>

王 迪<sup>1</sup>, 何世平<sup>\*\*1</sup>, 张 煦<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学 力学和机械工程系, 安徽 合肥 230027; 2. 上海 711 研究所, 上海市 200090)

**摘要:** 封隔器上的卡瓦锚定后起到支撑封隔器、锁定胶皮筒的作用, 其性能好坏直接影响到油井的产量和生产安全。卡瓦与套管间的咬合力分布决定了封隔器在使用中的成败。咬合力的分布是否合理, 将直接关系到套管的损伤程度及卡瓦的寿命。文中同时应用有限元法和三维光弹性技术对封隔器卡瓦进行了接触应力分析, 介绍了实验模型的建立和实验步骤以及计算模型的建立和边界条件的考虑, 比较了数值计算与三维光弹性实验的结果, 分析了造成误差的原因。实验应力分析结果为有限元计算模型的建立及边界条件的确定提供了重要的实验保证。研究工作获得了一些重要的结果, 为封隔器卡瓦的优化设计提供了相关的参数。

**关键词:** 接触应力; 卡瓦; 数值计算; 三维光弹性法

**中图分类号:** TH741      **文献标识码:** A

### 0 引言

封隔器是油田开发中实施机械采油、分层注水、分层压裂或酸化、机械卡堵水等注采工艺作业的主要井下工具之一。封隔器上的卡瓦锚定后起到支撑封隔器、锁定胶皮筒的作用, 其性能好坏直接影响到油井的产量和生产安全。在胀卡力相同的情况下, 卡瓦与套管间的咬合力分布决定了封隔器在施工和使用中的成败。咬合力的分布是否合理, 将直接关系到套管的损伤程度及卡瓦的寿命, 影响到采油或注水工艺的实施以及油井的二次作业。

影响卡瓦与套管间咬合力分布的因素很多, 如卡瓦咬合齿型的几何形状及尺寸, 卡瓦的结构、材料及加工精度等。因此, 对封隔器卡瓦进行应力分析, 研究卡瓦与套管间咬合力的分布规律, 对于封隔器卡瓦的优化设计具有重要的指导意义。

不少文献对卡瓦式封隔器的结构设计或受力状态进行了分析研究<sup>[1-4]</sup>。文献[2]应用静力等效方法, 对卡瓦式封隔器坐封后套管的双向应力进行了计算, 分析了套管内外压差对套管强度的影响。文献[3]对封隔器卡瓦损伤套管的情况进行了实验模拟, 把卡瓦安装在模拟实验装置中, 通过在套管壁周围分布位移传感器, 测得卡瓦锚定后切入套管壁的深度, 判断卡瓦对套管的损伤程度。文献[4]对卡瓦与套管的咬合力进行了实验与计算的混合研究, 设计了实验模拟装置, 使用电测方法测量了胀卡时套管外表面的应变, 结合有限元计算, 获得了卡瓦各咬合齿对套管咬合力的分布。

封隔器卡瓦在锚定时, 是通过机械或压力差的作用使上下锥体同时挤压卡瓦, 使卡瓦与套筒接触, 从而在卡瓦齿上及套筒上形成非常复杂的接触应力。对接触问题无论是进行数值分析还是进行实验测量, 都有相当的难度, 因而对卡瓦与套管之间的接触应力进行实验测量或数值分析很有意义。

本文应用三维光弹性技术对封隔器卡瓦进行了模拟实验应力分析, 同时应用有限元方法进行了数值计算分析。实验应力分析结果为有限元计算模型的建立及边界条件的确定提供了重要的实验保证。

\* 收稿日期: 2005-05-27; 修订日期: 2006-02-16

\*\* 通讯作者: 何世平(1943—), 男, 本科, 教授。主要研究方向: 激光全息、激光散斑、干涉云纹等现代光测技术及其应用。

研究工作获得了一些重要的结果,可为封隔器卡瓦的优化设计提供相关的参数。

## 1 力学模型的建立

卡瓦封隔器的实际结构是比较复杂的,由相当多的零件构成,但在卡瓦封隔器的锚定过程中真正起到传递载荷,并承担载荷的主要零构件还是锥体、卡瓦及套管等。为了便于实验模拟及数值计算,同时又能分析清楚卡瓦及套管在锚定过程中所承受的应力分布,尤其是卡瓦与套管之间咬合力的分布规律,为卡瓦的优化设计提供理论及实验依据,本文对卡瓦封隔器的实际结构进行了简化,建立了相应的力学模型。该力学模型由主要的传递载荷及承担载荷的零构件组成,忽略了对力学分析影响很小的零构件,但是零构件的几何形状及尺寸、材料、加工工艺都与实际的卡瓦封隔器相同。

## 2 三维光弹模拟实验

### 2.1 光弹模型制作

图1是根据卡瓦封隔器力学模型设计的光弹实验模型装配图,光弹实验模型的几何尺寸为卡瓦封隔器实际尺寸的二分之一。卡瓦在上下两个锥体的轴向挤压力作用下沿径向移动,但受制于套筒,形成卡瓦齿面与套筒内侧壁的接触挤压。图2是实际使用中常用的45°和60°两种不同齿形卡瓦的剖面图。

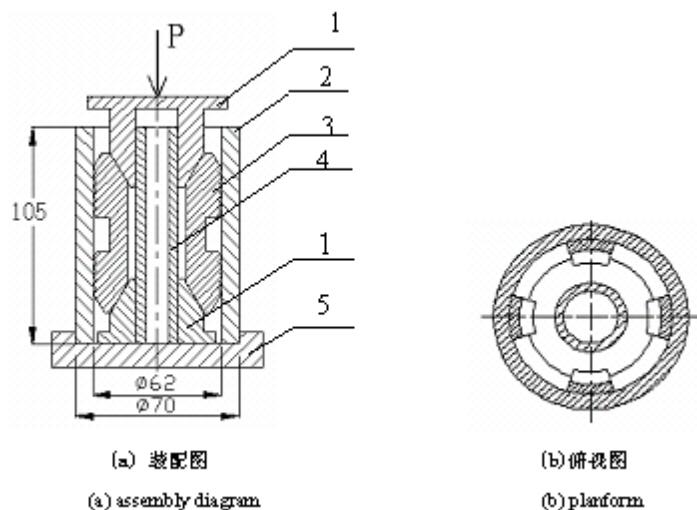


图1 卡瓦封隔器实验模型(1. 锥体 2. 套管 3. 卡瓦 4. 中心管 5. 底座)

Fig. 1 Slip experimental model(1. Cone 2. Sleeve 3. Slip 4. Central tube 5. Base)

对于应力分析部件及影响应力分析的部件,如锥体、套管及卡瓦,使用光弹材料制作;对非研究部位,如中心管、底座,采用其它非光弹性材料加工制成。

光弹材料由618#环氧树脂(液态)、顺丁烯二酸酐(固化剂)、邻苯二甲酸二丁脂(增塑剂)三种成份构成,三者的合成比例依次为100:30:5。首先将环氧树脂混合液经过高温二次固化制成环氧树脂棒,再经过严格的机械加工制成相应的零件,最后装配成光弹实验模型。为了对模型材料的条纹值进行标定,利用完全相同的棒材加工了光弹圆盘。

### 2.2 光弹冻结实验

为了确定光弹实验载荷的大小,首先应用有限元法对实际构件进行初步估算,再利用模型材料条纹估计值、允许的条纹级数及相似关系,同时考虑到实际加载时摩擦力的影响,最后确定轴向加载载荷为 $P^M=50(N)$ 。将三维光弹性实验模型和用于材料条纹值标定的小圆盘一起放进炉中,按预定值加载,并按相应的工艺曲线进行高温冻结实验。

### 2.3 光弹模型的切片处理

按照常规的模型材料条纹值的标定处理方法,获得标定结果为 $0.3 \times 10^3 N/m$ 条。

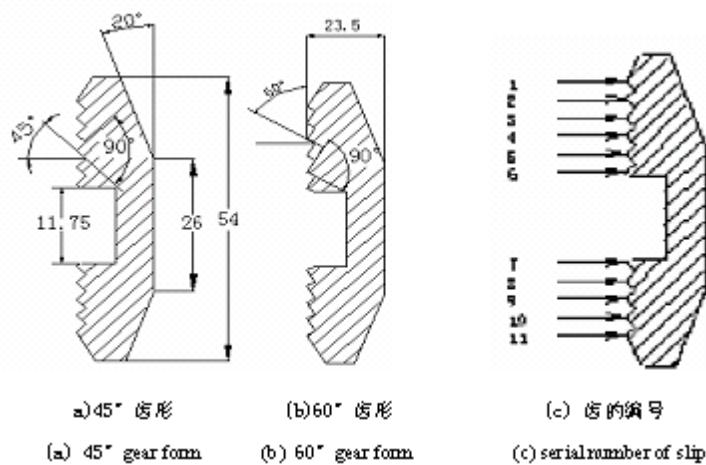


图2 两种不同齿形卡瓦剖面图

Fig. 2 Profile of two gear form slips

由于套管很薄,在冻结前卡瓦齿面与套管内表面能很好接触。但在轴向力的作用下,使得非均匀受力的套管在周向变成非圆形状(如图3(a)所示),从而使卡瓦的同一个齿面的中部与套管内表面的接触不是很充分甚至不接触(见图3(b))。通过对冻结模型上压痕的测量可知,卡瓦齿面与套管内表面的平均接触宽度约为1.05mm。

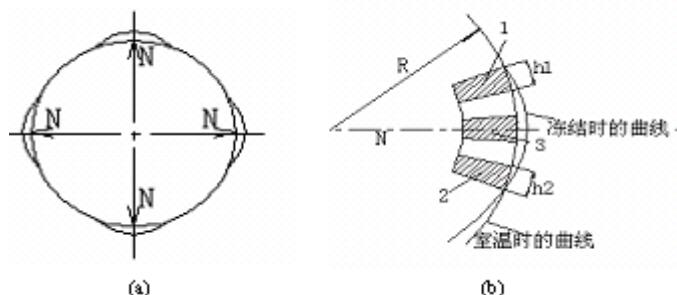


图3 卡瓦齿面与套管内表面的接触状况示意图

Fig. 3 Sketch map of contact situation between slip and sleeve

考虑到卡瓦齿面与套管内表面的接触状况,每一个卡瓦光弹模型均沿轴向、在卡瓦的两端及中间部位切割三条切片。将光弹冻结模型的切片放到光弹仪中进行分析,可以获得如图4、图5所示的光弹模型切片的等色条纹图。

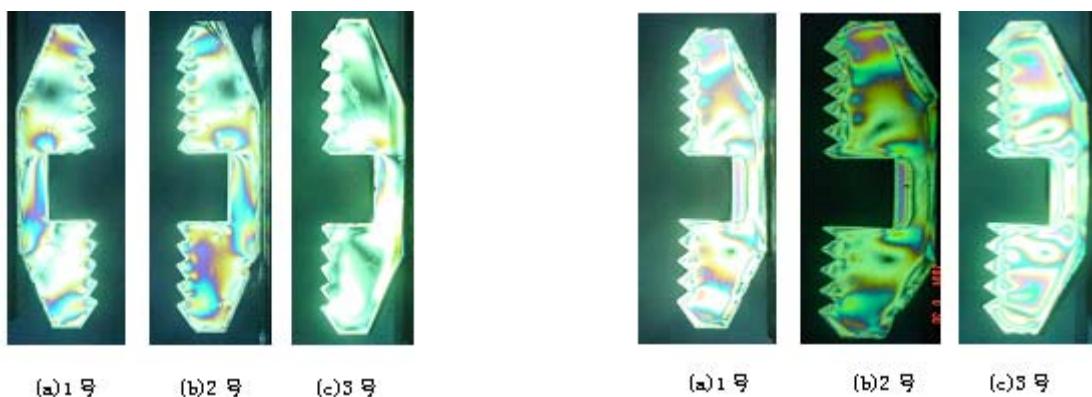


图4 齿形为60°的卡瓦光弹切片的等色线图

Fig. 4 Isochromatic pattern of 60° slip photoelastic slice

图5 齿形为45°的卡瓦光弹切片的等色线图

Fig. 5 Isochromatic pattern of 45° slip photoelastic slice

由三维光弹性原理可知,所得到的等色条纹级数  $n$  与切片剖面内的主应力差或次主应力差有如下关系:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = nf/t \quad (1)$$

式中,  $\sigma_1$  及  $\sigma_2$  为光线照射点位置上的两个主应力(若切片剖面为主应力平面)或次主应力;  $f$  为光弹材料条纹值;  $t$  为模型切片厚度。

### 3 数值计算分析

#### 3.1 计算模型

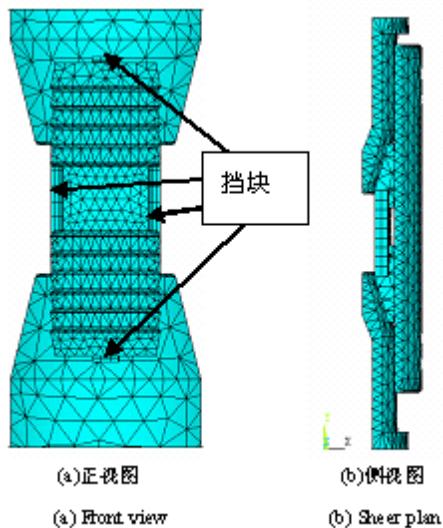


图 6 卡瓦的网格划分示意图

Fig. 6 Sketch map of meshed slip

根据第2节所建的卡瓦封隔器的力学模型,在ANSYS中建立了相应的有限元计算模型。

因为接触问题的计算过于复杂,为便于计算分析的顺利进行,在计算模型的建立过程中采取了如下几项措施:

1)考虑到卡瓦封隔器装置的对称性,计算模型仅对称地取了卡瓦力学模型的1/4。

2)考虑到中心管、护套、底座等零件对卡瓦与套管之间的接触应力分析没有多大影响,在计算模型中忽略了这些对接触应力分析无关的零构件。

3)卡瓦套对卡瓦与套管之间的接触应力分析同样没有多大影响,但是卡瓦套的存在会制约卡瓦的活动范围。因此,建模时在卡瓦的四周用4个挡块来制约卡瓦的活动,以减少无关的计算工作量,见图6(a)。

所建计算模型及网格划分示意图如图6所示。

#### 3.2 载荷与约束条件

根据卡瓦的实际工作状况,对于计算模型的边界条件作如下处理:

- 1)上锥体受中心管限制只能沿着轴向平移,在径向和周向受约束;
- 2)四块挡块被固定,用来代替卡瓦套对卡瓦进行约束;
- 3)由于计算模型只是实际结构的1/4,所以套管侧剖面的法向位移被约束;
- 4)套管底面的法向位移被约束,下锥体的底面被固定。

按照卡瓦的实际受载状况,在上锥体的上底面加2吨的法向压力。

根据所建计算模型、边界条件以及施加的载荷,应用ANSYS关于面一面接触问题的计算分析软件,对卡瓦封隔器进行数值计算。

在三维光弹模拟实验中,锥体与卡瓦之间的摩擦系数约为0.28,所以在计算中也将摩擦系数设为 $f=0.28$ 。弹性模量 $E=200\text{GPa}$ ,泊松比 $\mu=0.3$ 。

#### 3.3 卡瓦齿尖尖角的处理

在建立有限元计算模型时,对于如何处理卡瓦齿尖的尖角成为一个计算难点。若将卡瓦齿尖的尖角作为几何尖角来考虑,则会计算出明显不合理的计算结果。若将卡瓦齿尖的尖角作为圆角来考虑,则该圆角取多大合适?经过与实验结果的反复比较,若取卡瓦齿尖的曲率半径为0.2mm时,计算结果比较合理,且与实验结果最接近。

### 4 数值计算与实验模拟结果的比较

为了比较三维光弹模拟实验和数值计算的结果,文中首先利用相似关系将三维光弹实验结果转换成真实构件中的数据。

考虑到接触应力的困难在于应力分离,本文只利用光弹模型的等色条纹的级数,不进行应力分离。为了便于三维光弹实验和数值计算结果的比较,文中将与光弹切片相对应的剖面内的计算应力转换成次主应力差值,求出卡瓦各齿尖处的次主应力差值,再与光弹模型的实验结果进行比较,两种结果的比较如表1及表2所示。

表1 卡瓦( $45^\circ$ )齿尖计算结果和实验结果的比较Tab. 1 The comparison of computed result and experimental result of  $45^\circ$  slip

齿顶号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
实验值(MPa)	275	200	118	100	88	33	13	50	88	130	200
计算值 $f=0.28$ (MPa)	268	222	115	96	80	89	71	101	137	149	196

表2 卡瓦( $60^\circ$ )齿尖计算结果和实验结果的比较Tab. 2 The comparison of computed result and experimental result of  $60^\circ$  slip

齿顶号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
实验值(MPa)	180	150	90	80	55	25	70	85	95	150	233
计算值 $f=0.28$ (MPa)	201	162	90	98	75	62	84	120	130	174	254

注:表中各齿牙的编号见图2(c)。

由表1及表2数值计算结果与三维光弹实验结果的比较可以发现,除去卡瓦中部齿尖处的次主应力差值相差比较大以外,其余齿尖处的次主应力差值比较一致,尤其是卡瓦上、下两端齿尖处的次主应力差值非常接近。数值计算结果与光弹实验结果的差异,在相当程度上是由于卡瓦齿尖变形大,造成接触面与实际情况有出入,从而产生了实验误差。

## 5 结论及讨论

实验研究结果表明,三维光弹模拟实验可以用于卡瓦与套管之间接触应力的分析研究,对于构件内部应力的分析以及接触应力的分析,三维光弹模拟实验无疑是理想的实验检测技术。

光弹性实验是用构件模型进行的模拟实验,因此必然存在着多种因素引起的实验误差,尤其是三维光弹实验还需要进行切片分析,其误差可能更大。但是光弹实验获得的应力分布规律是完全可靠的,何况对于构件内部应力及接触应力的分布,除了三维光弹性模拟实验以外,还没有理想的检测技术。

三维光弹性模拟实验结果表明:对于卡瓦同一个齿的齿尖应力分布主要在齿面的两侧,中间部位基本不接触,所以接触应力很小。这表明卡瓦齿面与套管内表面的接触不均匀,在卡瓦的优化设计时应该充分考虑这一点。实验结果还表明:在同一轴向剖面内,卡瓦上下两端齿尖的应力比靠近结合部区域的应力大得多,这说明结合部太弱,在进行卡瓦结构的优化设计时也应充分考虑这一点,尽量加强卡瓦中间结合部的强度。

数值计算模拟结果表明,ANSYS关于面-面接触问题的计算分析软件能够用于卡瓦与套管之间接触应力的计算分析,由于计算软件已经相当成熟,所以数值计算方法是各类构件进行应力分析的理想手段。但是,在对卡瓦封隔器进行应力分析时,必须处理好卡瓦齿尖的形状及锥体与卡瓦之间的摩擦系数。然而对于一个具体的卡瓦,应该如何确定齿尖的曲率半径R,以及如何确定锥体与卡瓦之间的摩擦系数,单靠数值计算是难以解决的问题。

由数值计算与三维光弹实验结果的比较可知,两种结果相当吻合,其应力分布规律也比较一致,表明文中对计算模型及边界条件的考虑是比较合理的。但由两种结果的比较发现,两者之间还是存在着一定的差别,尤其是卡瓦中部齿尖处。造成这种差别的原因有多种,无论是数值计算,还是光弹实验,都会引起一定的误差。

对于数值计算,造成误差的原因可能有:计算模型与真实构件之间的差异、约束条件与实际情况的

差异、网格的划分不够密等。还有,数值计算是按照弹性问题来计算卡瓦与套管之间的接触应力的,但实际上齿尖部位的应力肯定会超过弹性范围。

对于三维光弹性模拟实验,造成误差的原因可能来源于模型制作、实验模拟、相似模拟等方面,尤其是在光弹模型的切片过程中,切片位置的准确程度、条纹读数的精度等也会引进一定的实验误差。

衷心感谢瞿志豪教授、张劲博士、吴恩成高工等对本文工作给予的指导和帮助。

#### 参考文献:

- [1] 黎文才,张胭脂等. ZYT441-114 桶式卡瓦封隔器的研制[J]. 石油机械,2001,29(4):36~37( Li Wencai, Zhang Yanzhi, et al. A barrel-type slip packer. China Petroleum Machinery, 2001,29(4):36~37(in Chinese))
- [2] 刘占广. 卡瓦式封隔器在井下的受力分析[J]. 石油钻采工艺,1994,16(5):53~59 ( Liu Zhanguang. Analysis on the downhole stress of slip supported packer. Oil Drilling & Production Technology, 1994, 16 (5): 53 ~ 59 (in Chinese))
- [3] 刘天良,谢洪德等. 封隔器卡瓦损伤套管的模拟试验研究[J]. 石油矿场机械,2001,30(2):49~51(Liu Tianliang, Simulation Test of Contact Stress for Packing Element to Casing. Fault-Block Oil And Gas Field, 2001,30(2):49~51 (in Chinese))
- [4] 邵立国,岳澄等. 卡瓦与套管咬合力的实验与计算混合研究[J]. 力学与实践,1998,20(2):37~38 ( Shao Liguo, Yue Cheng, et al. Mixed methods of experimental and numerical calculation for study of clenching power between slip and casing. Mechanics And Engineering,1988,20(2): 37~38(in Chinese))

## A Study on Contact Stress of Packer Slip

WANG Di<sup>1</sup>, HE Shi-ping<sup>1</sup>, ZHANG Xi<sup>2</sup>

(1. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Anhui Hefei, 230027, China;

2. Shanghai Institute of 711, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** The slips in the packer is for supporting packer and for locking rubber after anchoring. The capability of the slips influences directly on oil well yield and productive safety. Distribution of occlusive force between slip and sleeve is a key for success of packer in engineering application. The rational distribution of occlusive force is related to the damage level of sleeve and lifespan of slip. In this article, the finite-element method and 3-D photoelastic technique were both performed to analyze the contact stress of the packer slip. The formation of the experimental model, experimental procedure, the formation of calculation model and the consideration of boundary conditions were presented. The numerical results were compared with the experiment data of 3-D photoelastic model and the induced error is analyzed. The results of experimental stress analysis offer important assurance for construction of finite element model and confirmation of boundary conditions. Some important results are gained from present study and some correlative parameters are provided for optimum design of the packer slip.

**Key words:** contact stress; slip; numerical calculation; 3-D photoelastic method