

# 卡瓦与套管咬合力的实验与计算混合研究

邵立国 岳澄 王燕群

王鹏林

(天津大学机械学院力学系,天津 300072) (天津理工学院机械系,天津 300380)

邹华民 张全胜 郝金克 叶金胜

(胜利油田管理局采油工艺研究院,东营 257000)

**摘要** 利用模拟装置实现了卡瓦与套管在地面上的实验,使用电测的方法测量胀卡时套管外表面的应变。由实验数据获得计算网格节点处的应变,同时利用单位咬合力作用套管的有限元结果进行数值法计算,获得卡瓦各咬合齿对套管咬合力的分布,为卡瓦的优化设计提供了可靠数据。

**关键词** 锚定装置,卡瓦,套管,混合法

## 1 引言

锚定装置在采油工艺中起着重要的作用,它的性能好坏直接影响油井的产量和生产安全。锚定装置质量优劣的关键零件是卡瓦(图 1),在胀卡力相同的情况下,卡瓦与套管间咬合力的分布决定了锚定装置在施工和使用中的成功与失败。影响卡瓦和套管间咬合力分布的因素很多,包括设计卡瓦咬合齿型几何形状和几何尺寸、材料的选择、机械加工精度等因素,为了提高锚定装置的质量,提高卡瓦的设计水平,有必要对正在使用和新设计的锚定装置中卡瓦与套管间的咬合力分布情况进行模拟研究。为此研制、开发了卡瓦与套管咬合力的实验装置,通过实验和数值计算相结合的方法获取卡瓦咬合齿与套管间直径方向上的咬合力分布情况。

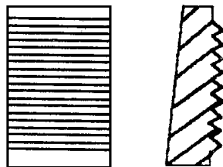


图 1 卡瓦结构示意图

## 2 实验装置

实验装置简图如图 2 所示。机架 1 固定套管 3 的一个端面,套管的另一端面处于无约束自由状态,下油缸 2 的支承盘在实验前处于上终点,上油缸 7 的活塞杆带动锚定装置开始向下移动,当锚定装置与支承盘接触后,楔形体 5 由于上油缸的活塞杆继续向下移

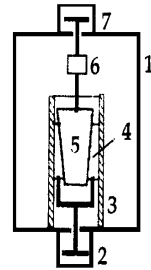


图 2 实验装置简图

动使卡瓦 4 逐渐胀开直至作用套管 3 的内表面,此时下油缸 2 自动下行撤去支承,锚定装置悬垂在套管中间而下端无支承(卡瓦实验位置应保证套管固定端对实验区域的测量影响小于 1%)。上油缸继续下行,卡瓦咬合齿与套管间的咬合力逐渐增加,拉压力传感器 6 随时测量胀卡力的大小,当传感器测量的压力值达到预先设定的胀卡力时,上油缸立刻停止工作。由于楔形体与卡瓦的斜面角度设计成摩擦自锁角度,所以卡瓦作用套管的咬合力在测试过程中是恒定不变的。由于实际的锚定装置机械加工和装配精度、套管为热轧成型等不能保证精密的圆周度因素的影响,致使卡瓦上的咬合齿的顶端不可能完全与套管接触,即使同一咬合齿也是局部与套管接触,使我们研究的问题变得极其复杂。另外,由于套管内表面不可能粘贴应变片,以及卡瓦的咬合齿沿套管的圆周方向作用于套管。因此,在实际测试中我们选择了套管的外表面粘贴应变片的测试方案,仅测量圆周方向上的应变即可,同时要求保证有足够的测点进行曲线拟合运算(测点数一定确保数值计算精度,提供可靠的运算初值),应变片的粘贴位置如图 3 所示。虽然是在常温中进行测试,但为了减少套管的更换,对应变片进行了防护处理。在实际测试中我们取  $N = 8, L = 30 \text{ mm}, M = 12, A = 30^\circ$ 。

开始实验时首先进行无载荷情况下的应变测量,当达到预设胀卡力时再进行具有载荷时的应变测量,对应测点的应变值实施相减,可获得预定胀卡力时的

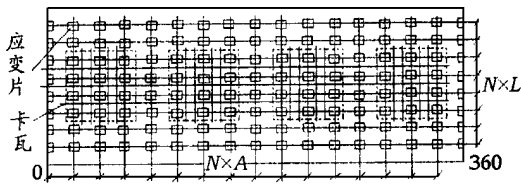


图3 套管表面粘贴应变片、卡瓦及计算网格节点的展开示意图

卡瓦咬合齿作用套管其外表面产生的应变。为了进行数值计算,需要对测量的应变进行预处理,利用曲线拟合的数值方法,获得每个卡瓦咬合齿对应套管横截面上的应变分布情况。然后,按数值计算要求划分的网格节点计算节点(图3)上的应变,为数值计算做好准备。

### 3 数值分析

由测试和预处理得到的套管外表面网格节点上的应变可知,套管的变形处于线弹性小变形范围内,并且载荷与变形成正比的关系。因此,在计算时可以利用叠加原理,数值计算的区域是卡瓦对套管作用区域,按预处理实验数据时采用细分的网格节点进行数值计算,即网格间距采用相邻咬合齿齿顶距离为边长的正方形网格。为了简化计算和尽快处理实验数据,在卡瓦作用套管区域内取任意一点为中心,长度等于正方形网格边长,在套管内壁上作用单位均匀分布的咬合力(线载荷),用通用有限元程序计算出套管各网格节点上的应变值 $\epsilon_{ij}$ (计算约束条件与实验条件相同:即薄壁圆筒一端自由,一端固定),作为已知的数据库参与以后处理实验数据的数值计算,由于对称性数据库仅存储 $1/4$ 网格节点的应变即可。

对于任意节点设其节点号为 $mn$ ,该节点处的应变是卡瓦咬合齿对套管作用的咬合力在该节点处产生的应变叠加结果,即

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N F_{ij} (E_{mn})_{ij} = \epsilon_{mn} \quad (1)$$

式中, $(E_{mn})_{ij}$ 表示以节点号 $ij$ 为中心,长度等于网格间距的均匀单位咬合力作用时对节点号 $mn$ 产生的应变,这些数据可由数据库提取; $F_{ij}$ 表示以节点 $ij$ 为中心,长度等于网格间距的实际作用的咬合力(其数值是单位咬合力的倍数)。由式(1)我们得到以节点咬合力 $F_{ij}$ 为变量的线性方程组

$$[E][F] = [\epsilon] \quad (2)$$

式中, $[E]$ 表示各节点上咬合力对某一节点产生的应变矩阵; $[F]$ 表示节点上咬合力的列阵; $[\epsilon]$ 表示各节

点总的应变列阵。在实际测量中各节点的应变 $\epsilon_{mn}$ 总是带有测量随机误差,设测量误差为 $W_{mn}$ ,则式(2)可写成带有测量误差的线性方程组

$$[E][F] - [\epsilon] = [W] \quad (3)$$

式中, $[W]$ 表示测量误差的列阵。利用最小二乘法解式(3),则可以获得偏差最小的卡瓦咬合齿作用于套管上的咬合力。图4给出了经实验和计算后得到的5.5套管机械式锚定装置的卡瓦各咬合齿与套管间的咬合力分布(胀卡力为80 kN)。

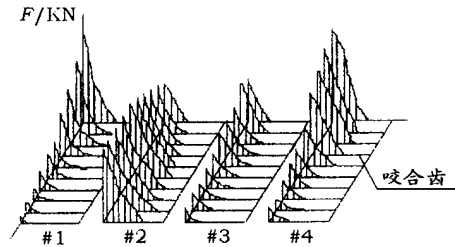


图4 卡瓦与套管间的咬合力的分布展开图

### 4 结论

利用实验和数值计算相结合的混合方法,使本来复杂的问题得到简化处理,获得了卡瓦对套管的咬合力分布。在计算中利用了最小二乘法,使获得的卡瓦与套管间的咬合力误差最小。通过实验和计算证明:锚定装置加工精度(与椭圆度有关的精度)和套管椭圆度等因素对咬合力的分布影响较大,即使同一套管和锚定装置相对位置不同时,得到卡瓦咬合力分布也不尽相同(套管各截面的椭圆度不同)。若适当减小卡瓦的工作面积,相同加工精度的条件下,不但有利于减轻锚定装置的重量,并能改善卡瓦作用套管咬合力分布的均匀性。若热处理后进行精加工,这样不但可以保证加工精度,又可以保证卡瓦咬合齿具有足够的硬度,同时对石油套管的椭圆度提出严格要求,这些对咬合力分布的均匀性也是有利的。

### 参考文献

- 1 杨乃霆. 电阻应变测量原理与技术. 北京:科学出版社, 1982
- 2 G. 斯特朗, G.J. 费克斯著. 崔俊芝, 宫著铭译. 有限元分析. 北京:科学出版社, 1983
- 3 王龙浦. 弹性理论. 北京:科学出版社, 1978

### MIXED METHODS OF EXPERIMENTAL AND NUMERICAL