

文章编号:0253-2697(2000)01-0096-06

## 浅海井口抗冰装置结构计算的有限单元法

段梦兰<sup>1</sup> 陈文森<sup>2</sup> 陈德春<sup>2</sup> 陈莹<sup>2</sup> 王维明<sup>3</sup>

(1. 中国船级社,北京:100006; 2. 辽河油田 钻采工艺研究院,辽宁盘锦 124011; 3. 中国科学院 力学研究所,北京 100083)

**摘要:**对辽东湾浅海单井井口保护装置采用隔水套管直接抗冰的可行性进行了研究。采用多种三维混合单元建立了一典型井口装置的有限元计算模型,该模型利用有限差分的原理真实地反映了地层对结构的约束。计算结果表明,在辽东湾浅海的60cm单层平整冰作用下,结构的位移和应力都在许可范围之内,最大位移为结构的顶部,最大应力发生在隔水套管与表层套管的上部连接环板上,而隔水套管内加固的水泥层对增加结构的强度、抵抗外载荷的作用起了不可忽视的作用。计算结果和现场两年多的应用表明,用增厚的隔水套管直接抗冰是可行的。

**关键词:**井口装置;隔水套管;海冰;有限元;有限差分法

**中图分类号:**TE853 **文献标识码:**A

## 1 引言

由于辽河油田地处辽东湾北部,冬季冰情严重,冰冻时间长,冰对海洋结构物的作用相当突出,特别是近年发生的井口被冰摧毁的事故引起了油田和其它浅海油田的高度重视,其中对井口保护各油田均采取了许多不同的抗冰措施,如在井口周围打保护桩、在隔水套管外设置一层保护套管(中间浇筑水泥)、用简易导管架保护井口等等,但这些做法代价高昂、工艺繁琐、施工困难、工期长、工作量大,为此,我们提出用增厚的隔水套管取代特殊的井口保护装置,用它直接抗冰。为了研究隔水套管直接抗冰的可能性,我们开展了本文的工作。

## 2 结构与尺寸

图1为辽河油田典型的浅海井口装置(没有特殊的井口保护装置),本文的研究就是要最外层的隔水套管直接抵抗冰力、起到保护井口的作用。考虑到井口要求、套管加工工艺和能轧制的钢板厚度等因素,本次计算将隔水套管外径定为635mm、壁厚设计为50mm。

## 3 环境载荷及其计算

不考虑地震,海洋结构承受的环境载荷主要来自风、浪、流和海水。对于辽河油田的井口装置,在冰区环境中,相对于冰载荷,风、浪、流的作用可忽略不计,即海冰是唯一的控制载荷。所以做结构强度计算时只需考虑冰载荷的作用。

冰对结构的作用是一个相当复杂的过程,其对结构作用力的大小即冰力计算就提出过许多不同的计算方法和公式。对我国浅海固定设施的冰载荷进行具体分析,就单桩结构,对比国内外公布的十多个冰力计算公式,提出挤压冰对垂直结构的水平作用力按下式计算

$$F = ImkDH\sigma_c \quad (1)$$

式中  $F$  为水平冰载荷,kN; $I$  为局部挤压系数,按下式取值:当  $1 < D/H \leq 6$  时,  $I = (1 + 5H/D)^{1/2}$ , 当  $D/H =$

**作者简介:**段梦兰,男,1966年2月生。1993年于石油大学(北京)获博士学位。现为中国船级社科研中心研究员。通讯处:北京东黄城根南街40号。

1 时,  $I=2.5$ , 当  $d/H=0.1$  时,  $I=4.0$ , 当  $0.1 < D/H < 1.0$  时,  $I$  在  $4.0 \sim 2.5$  之间线性插值;  $m$  为结构形状系数: 当结构水平截面为方形时,  $m=1.0$ , 圆形时,  $m=0.9$ ;  $k$  为接触系数, 其值与冰的性质、运动速度、结构物的形状和尺寸有关, 一般取值范围在  $0.4 \sim 0.7$  之间, 若无具体数值, 建议选用  $k=0.45$ ;  $D$  为冰与结构接触面的投影宽度,  $m$ ;  $H$  为冰的厚度,  $m$ ;  $\sigma_c$  为冰的单轴抗压强度, MPa。

我国海洋石油总公司和前西德合作, 经过大量的现场冰力调查与实测, 总结出适合我国渤海湾地区的冰力计算公式, 即单层平整冰对圆柱结构的作用力计算公式

$$F = 0.5\sigma_c D^{0.5} H^{1.1} \quad (2)$$

式中  $F$  为冰力, kN;  $D$  为桩径, cm;  $H$  为冰厚, cm;  $\sigma_c$  为单轴抗压强度, MPa。

本次计算采用公式(2), 取厚度  $H=60$ cm 的单层平整冰, 作用在距离泥面 5m 的位置。其单轴抗压强度  $\sigma_c$  为 2.15MPa, 取  $D=63.5$ cm,  $H=60$ cm,  $\sigma_c=21.5$ MPa, 代入上式得到  $F=774.0$ kN。

#### 4 地层反力

对于海洋结构, 除了风、浪、流和海冰、地震等环境载荷对它作用之外, 还要受到地层对它的约束反力, 这种约束反力必须通过桩腿与地层相互作用的分析 and 计算才能得出。

海底地层与桩腿相互作用是海洋结构动力分析的一个特殊问题之一。一种比较普遍的工程处理方法就是将桩腿泥线以下部分作为一个等效单元, 该单元直径和壁厚等同于原桩腿的尺寸, 而长度为原桩腿外径的若干倍, 其倍数取决于海底地层的性质, 在不知地层条件时一般取 6 倍桩径, 该值也适合于我国海域, 等效以后的这个单元末端用固结的方式加以约束(6 个自由度方向全约束)。这种方法叫做等效桩原理。

本次计算采用一种更加精确的处理方法, 即地层与结构相互作用分析的有限差分法, 这种方法的物理和数学意义都很明确, 比较真实地反映了桩腿和地层的相互作用, 且方法较为简便, 便于工程应用。

设桩腿插入地层的深度为  $z$ , 受到风、浪、流、冰等载荷的水平作用, 于是在桩腿的每一个截面都要产生弯矩和外载作用方向上的变形, 地层抵抗这种变形所产生的反力与地层类型、桩腿性能(主要是其机械性能)、变形大小及插入地层的深度等因素有关, 可以表示为

$$p = -E(y, z)y \quad (3)$$

式中  $p$  为分布的地层反作用力;  $y$  是桩腿外载方向的弯曲变形;  $z$  为桩腿插入地层的深度;  $E$  是地层的弹性模量, 它是地层变形  $y$  和地层深度  $z$  的函数。

根据梁的弯曲理论, 桩腿的变形微分方程为

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dz^4} = p \quad (4)$$

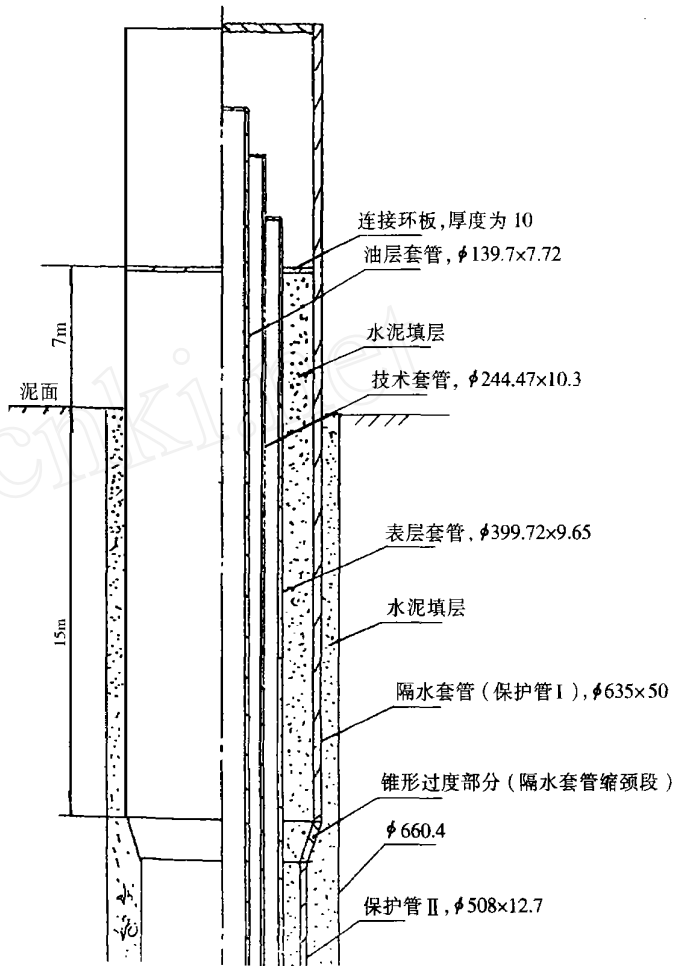


图 1 井口装置示意图

Fig.1 Schematic show of the wellhead protector system

式中  $E_p, I_p$  分别为桩腿的弹性模量和截面极惯矩。由式(3)、(4)得到

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dz^4} + E(y, z)y = 0 \quad (5)$$

求解上式的最大困难在于地层的弹性模量  $E(y, z)$ , 它既随桩的变形量  $y$  而变又受地层深度  $z$  的控制。但对许多地层类型,  $E$  值受变形的影响可以忽略, 从而可表示为

$$E = kz \quad (6)$$

$k$  为常数, 从而可以比较容易地求解式(5)(可得到解析解)。

在没有确定所要计算的地层是否具有式(6)所示的弹性模量之前, 先不作这一假设, 而仍然将式(5)作为桩腿与地层相互作用的基本控制方程, 并用有限差分的方法求解。

有限差分方法是一种数值计算方法, 对于梁和长柱, 既使是在变截面和不规则的分布截荷等情况, 也可以很方便地应用这种方法。下面先说明该方法的基本公式, 然后用它来求解地层与桩腿相互作用的控制方程。

设有一  $z$  的函数  $y(z)$ , 用图 2 的曲线表示, 则  $y(z)$  的一阶导数和二阶导数分别为

$$\frac{dy}{dz} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta y}{\Delta z} \right), \quad \frac{d^2 y}{dz^2} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta}{\Delta z} \left( \frac{\Delta y}{\Delta z} \right) \right)$$

若不取  $\Delta z \rightarrow 0$ , 而取  $\Delta z = h$  的有限长, 则有

$$\frac{dy}{dz} \approx \frac{1}{h} (y_{n+1} - y_n) = \frac{1}{2h} (y_{n+1} - y_{n-1}) \quad (7)$$

$$\frac{d^2 y}{dz^2} \approx \frac{1}{h} \left( \frac{y_{n+1} - y_n}{h} - \frac{y_n - y_{n-1}}{h} \right) = \frac{1}{h^2} (y_{n+1} - 2y_n + y_{n-1}) \quad (8)$$

令  $\frac{d^2 y}{dz^2} = r$ , 则  $r_{n+1} \approx \frac{1}{h^2} (y_{n+2} - 2y_{n+1} + y_n)$ ,  $r_{n-1} \approx \frac{1}{h^2} (y_n - 2y_{n-1} + y_{n-2})$ , 于是有

$$\frac{d^3 y}{dz^3} = \frac{dr}{dz} \approx \frac{1}{2h^3} (y_{n+2} - 2y_{n+1} + 2y_{n-1} - y_{n-2}) \quad (9)$$

$$\frac{d^4 y}{dz^4} = \frac{d^2 r}{dz^2} \approx \frac{1}{h^2} (r_{n+1} - 2r_n + r_{n-1}) = \frac{1}{h^4} (y_{n+2} - 4y_{n+1} + 6y_n - 4y_{n-1} + y_{n-2}) \quad (10)$$

如图 3, 将插入地层深度  $L$  的桩腿离散为  $n$  个单元, 每个单元长  $\delta (\delta = \frac{L}{n})$ , 则根据图 3 和式(10), 改写式(8), 经整理得

$$y_{i-2} - 4y_{i-1} + \left[ 6 + \frac{E_i L^4}{E_p I_p n^4} \right] y_i + 4y_{i+1} + y_{i+2} = 0 \quad (11)$$

式(11)的递推关系沿桩腿的离散点  $2 \sim n$  形成  $n-1$  个方程。

桩腿的边界条件产生四个附加方程, 桩腿与海底交接面剪力和弯矩分别为

$$F = E_p I_p \frac{d^3 y}{dz^3} \quad \text{或} \quad -y_{-2} + 2y_{-1} - 2y_2 + y_3 = \frac{FL^3}{E_p I_p n^3} \quad (12)$$

$$M = E_p I_p \frac{d^2 y}{dz^2} \quad \text{或} \quad y_2 - 2y_1 + y_{-1} = \frac{ML^2}{E_p I_p n^2} \quad (13)$$

桩腿末端的剪力和弯矩为零

$$E_p I_p \frac{d^3 y}{dz^3} = 0 \quad \text{或} \quad -y_{n-1} + 2y_n - 2y_{n+2} + y_{n+3} = 0 \quad (14)$$

$$M = E_p I_p \frac{d^2 y}{dz^2} \quad \text{或} \quad y_n - 2y_{n+1} + y_{n+2} = 0 \quad (15)$$

此外, 水平方向剪力和弯矩建立两个平衡方程, 这样使方程总数达到  $(n+5)$  个, 可以得到桩腿弯形的  $n+5$  个值和相应的地基反力。当然, 这  $n+5$  个值中, 在  $-2, -1, n+2$  和  $n+3$  四个点上的值仅仅用于检查公式中数值计算的精度, 不具备任何物理上的含义。

通过地基反力值和桩的变形量(挠度)即可获得该处相应的弹簧系数,从而将地层对桩的作用简化为一系  
列不同弹性系数弹簧的作用。

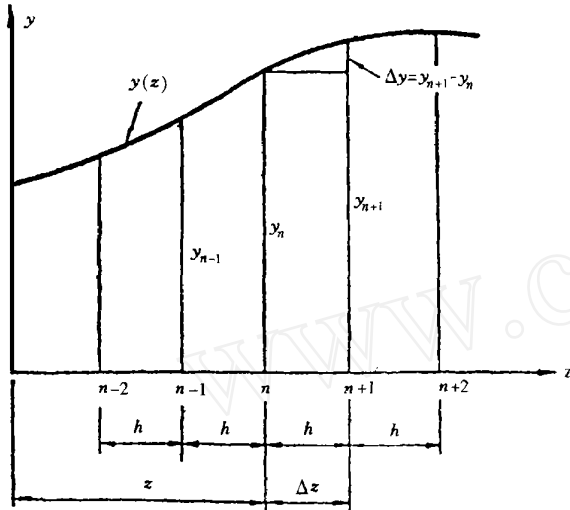


图 2 有限差分法的数学描述

Fig. 2 Mathematical description of finite difference method

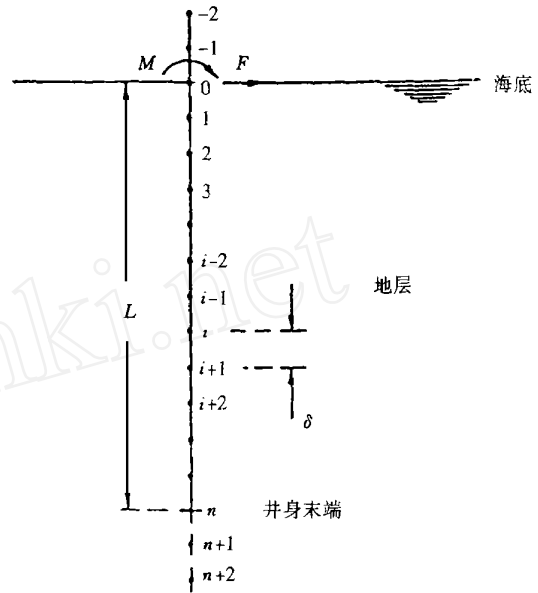


图 3 油井井身结构的有限差分分析

Fig. 3 Finite difference analysis of the well bore

### 5 结构的有限元计算模型

浅海的井口装置是一个多层的套管组合体,且其中在井眼与外层保护套管之间以及保护管与表层套管(或  
隔水套管)之间充填水泥,这种不同介质的夹层结构给有限元建模和结构计算带来了很大的困难,在以往的计  
算中,往往只是简单地将其简化成梁结构的有限元模型,而且也不考虑水泥填料的影响以及连接环板的作用,  
因此,计算结果的可靠性很难保证,特别是局部的高应力区未能得到反映,这样的简化和简单计算,可能给井口  
保护装置带来严重的后果。

表 1 结构材料常数

Table 1 Properties of materials

材质	弹性模量(N/m <sup>2</sup> )	泊松比	比重(kg/m <sup>3</sup> )
管材	$2.1 \times 10^{11}$	0.3	7850
水泥填料	$3.6 \times 10^{10}$	0.13	2125

为了反映结构各部分的真实应力状况,本次计  
算忠实于真实结构,建模时不作任何简化,即将整个  
结构划分成多种材质、多种单元组合的有限单元模  
型,具体单元划分如下。各层套管使用板单元离散  
化,共有 930 个板单元(包括四节点和三节点板单  
元),水泥填料部分使用三维块体单元离散化,共有

单元 660 个(为八节点等参单元),考虑到地层侧向反力作用在外围边界,设置了边界单元 84 个。为了使三维  
块体单元与板单元很好地联接起来,共设置了连接单元 605 个(为空间梁单元),并对梁单元采用了自由度释  
放技术以保证单元间的协调性。由于结构及受力的对称性,实际计算可取结构的一半。结构计算中所取的材  
料性能常数如表 1。

### 6 计算结果与分析

本次计算着重考察了结构的位移和应力,计算了所有单元节点的应力和位移。

## 6.1 结构位移

由于结构的刚度较大,整个装置的位移和变形不是很厉害,其最大位移发生在顶部,为 2.46mm。在冰载作用部位,最大位移为 1.18mm。

## 6.2 应力状况

结构的应力状况是评价强度的依据,本文提交的结果为各单元的主应力,可以直接和材料的强度限进行对比。

### 6.2.1 最大应力

通过计算,发现各套管(板单元)的应力均不是很大,水泥环(块体单元)的应力更小,对整个结构来说,局部的最大应力出现在隔水套管与表层套管的上部连接环板上,具体部位在连接环板与隔水套管的结合处。该连接环板的单元号是 741~750(板单元),最大应力在单元 742、743,其值为 97.0MPa。

### 6.2.2 隔水套管的应力状况

隔水套管同时起保护井口的作用,整个装置在海冰作用下的安全完全取决于它的强度,因此,隔水套管的应力状况是结构强度分析必不可少的部分。下面分别考察隔水套管的几个主要和重要部位,即泥面以下的缩颈部分(板单元 161~320)、紧靠泥面的泥面以上部分(板单元 561~600)、冰力作用部位及其附近区域(板单元 601~800)、套管顶部(板单元 801~930)。

首先考察套管泥面以下缩颈段的应力。计算显示,该处的最大应力才 6.0MPa,即使加上该处的应力集中,该段也不会出现强度破坏,所以不用担心该段由于缩劲出现应力集中而有可能发生失效,也不用担心在冰的静力作用下因泥面处的弯矩大而在该处折断,但在动冰力作用下,该处因弯矩大而会产生比较大的交变应力,是疲劳部位之一。隔水套管的最大应力发生在冰力作用部位,最大应力达 56.0MPa,如果结构被推倒,它是最可能的位置。至于套管顶部,即单元 801~930 段,应力都很小,最大值才 8.0MPa。

### 6.2.3 水泥填层的应力状况

水泥填层有两处,其一连接隔水套管和表层套管,不妨称之为内层水泥,其二固结隔水套管于地层,称之为外层水泥。由于水泥填层是整个结构典型部位之一,又是不同于钢材(套管)的非金属材料,且也是结构的重要承力构件,因此对它进行单独分析。由于水泥填层比较厚,在做有限元模拟时采用的是三维八节点等参体单元,考察外层水泥的应力分布,其最大应力为 14.0MPa,在单元 325 处。相对来说,内层水泥的应力要大一些,从单元 341~380 所在水泥段的应力分布来看,其最大应力为 36.11MPa,处于第 361 号单元上。由此可见,内层水泥对增加结构的强度、抵抗外载荷的作用起了不可忽视的作用。从而也说明,以往结构建模中去掉、忽略或简化起很大承载作用的水泥层是不科学、不可取的做法。那样得到的结果无疑会偏大,设计出来的结构过于保守,造成材料、加工工艺和施工等方面不必要的浪费。

## 6.3 现场应用结果

依据本文的工作,我们对辽东湾海南区块的 2 口井于 1996 年实施了用增厚隔水套管直接抗冰的井口保护,该 2 口井的井口装置经历 3 个冬天冰的作用安全无恙,效果良好,2 口井就为辽河油田浅海创造了上百万元的经济效益。

## 7 结论与建议

通过计算及对计算结果的分析,初步得出了以下结论及有关建议:

1. 由于在泥面以下 20m 范围内地层还是软沙层,结构模型选在该处固结会使计算出的位移比实际位移小,但应力会偏大一些,建议以后的计算中将嵌固点选到硬或坚硬地层。考虑到那样做会极大地增大结构的自

由度,计算量会成倍增加,建议将整个结构分成两个子结构处理。作为隔水套管抗冰可能性研究的强度计算,目前本文的处理是能够满足要求的。如做结构设计,则应按上述建议的做法处理泥面以下的结构模型。

2. 结构建模应根据实际的夹层结构,结合各层的具体要求,用不同的合适的单元来完成,并必须处理好各层之间的连接及相应的单元。将这种实际的夹层结构简化成一种单一的管柱结构来建模,不仅得不到结构局部的应力状况,而且得出的结果不能真实反映结构的特性。此外,水泥层对结构的强度有很大的作用,建模时(特别是用来做结构设计的模型)不能忽略或做简化处理。

3. 整个结构的薄弱部位位于隔水套管与表层套管连接的环向连接板上,考虑该处的应力集中,其与隔水套管连接的部位可能会屈服,结构的破坏会于这里开始,建议对该处进行局部加强,特别是要采取措施降低那里的应力集中,如圆弧过度、提高焊接和施工质量等等。

4. 作为起抗冰作用的隔水套管,其整体强度是足够的,但其高应力区在冰力作用区段,如果结构被冰推倒,折断的位置肯定会发生在这里。因此建议在制造工艺许可的情况下对这一段加强,如增大壁厚等。

5. 总括起来,用增厚的隔水套管来抗冰是可行的,但做结构设计时必须做详细的强度计算,并采取相应的措施。

本次计算还是一项初步的工作,只是做了一次隔水套管抗冰可行性的强度计算,并且由于问题的性质也作了一些简单处理,建议今后作为一项技术做全面和细致的工作,包括:(1)完善泥面以下的结构模型,在下部结构与地层相互作用方面作进一步的工作;(2)作为结构设计,进行多种可能结构型式的计算,并根据冰力大小和冰作用部位来优选结构型式;(3)对于一定的结构型式,计算出冰力大小、冰力作用部位与隔水套管外径和壁厚四者之间的相关关系;(4)形成一个专门的计算软件,采用人机对话的方式,能够根据设计冰况和地层条件迅速设计出井口结构。

#### 参 考 文 献

- [1] Braja M. Das, Principles of foundation engineering [M]. Wadsworth, Inc., Belmont, California, 1984.
- [2] Thomas H. Dawson, Offshore structural engineering [M]. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA, 1983.
- [3] 段梦兰, 李啸. 滩海固定设施的海冰条件与冰载荷[M]. 北京: 中国船级社, 1996.
- [4] API RP2N. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore structures in ice environments [S]. 1<sup>st</sup> Edition, June 1988.

(收稿日期 1998-10-16 修订日期 1999-02-15 编辑 张君娥)

ZHAO Hong-ji et al (*Daqing Petroleum Institute*)

In order to improve the operating life of prick valve of high reciprocating pump, the design method for the valve is studied by combining FEM and structural optimization. The method for element mesh, load calculation, boundary condition determination are presented. A model is established in which the maximum stress on the prick surface of the valve is used as an objective function and the restrain conditions are fixed by considering of the strength and dimension of the valve. A calculation example shows that, the maximum stress at the prick surface of the valve and the valve seat is effectively decreased.

**Key words:** reciprocating pump; valve; structure; finite element; analysis; optimization design

FINITE ELEMENT METHOD FOR STRUCTURAL ANALYSIS OF WELLHEAD PROTECTOR SYSTEM IN ICE LOADING ACTA 2000, 21(1): 96~ 101

DUAN Meng-lan et al (*China Classification Society*)

Design of wellhead protector system against ice loading is an important problem in oil development in shallow waters in Liaodongwan, Bohai Gulf. To investigate the stress state of the developed protector system using the riser to directly resist ice loading, types of joint three dimension finite elements and many boundary elements are used to model the layers of steel pipes and cement or concrete to establish the FE structural model of the system. The constraint conditions of the soil deposits to the structures are modeled by finite difference method. An ice sheet of 60mm thickness in extreme conditions is supposed to act on the thickened riser. The detailed analysis of stresses and displacements of the structure shows that the maximum displacement is at the top of the structure and the maximum stress in the top round plate connecting the riser and the outmost casing, with all the displacements and stresses in the system being in the allowed ranges. It is seen that the cemented concrete layers between the casings take very active part in increasing the strength of the structure.

**Key words:** wellhead protector system; riser; sea ice; finite element; boundary element; finite difference method

MOLECULAR WEIGHT OPTIMIZATION FOR POLYMER FLOODING ACTA 2000, 21(1): 102~ 106

CHENG Jie-cheng et al (*Petroleum Administrative Bureau, Daqing*)

By using polymers having different molecular weight and cores with different pore size taken from reservoirs in Daqing Oil Field, many core floods have been performed. The behaviors of both solution and propagation in porous media, such as viscosity of polymer solution, resistance and residual resistance factor, incremental oil recovery and mechanical degradation, have been studied as a factor of molecular weight. The injectivity has been studied as a mutual factor of pore size of core and molecular weight. The results show that all those parameters in terms of viscosity of polymer solution, resistance and residual resistance factor, incremental oil recovery and mechanical degradation increase as molecular weight increases. The remaining viscosity of the polymer solution is higher though the polymer with higher molecular weight has bigger viscosity loss caused by mechanical degradation under conditions of Daqing Oil Field. The results also show that no plugging occur in a core when the mid-value of pore radius is over 5 times of the gyration-radius of molecules in the polymer solution. Field results of polymer flooding performed in similar geological and operational conditions indicate that the polymer flooding with higher molecular weight has better response and the polymer produced from producers has higher remaining viscosity and molecular weight than those with lower molecular weight.

**Key words:** polymer; molecular weight; flooding; mechanical degradation viscosity