

文章编号: 1673-5005 (2009) 01-0115-05

# 盐岩地层套管蠕变荷载试验及其数值分析

张金成<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 中原油田钻井工程技术研究院, 河南 濮阳 457001)

**摘要:** 中原油田在钻遇盐岩层的油水井中, 某些区块套管的损坏率高达 65%, 盐岩层蠕变是套管损坏的一个重要原因。通过对 6 块盐岩岩心进行地下条件的蠕变模拟试验, 得出了盐岩层的蠕变规律和特征参数, 建立了套管承受外载的有限元计算模型, 并编制了计算程序。利用所编制的软件对中原油田某口井的套管蠕变载荷进行了数值模拟计算。结果表明, 作用在套管上的径向载荷与相位角和蠕变时间有关, 并且蠕变条件下套管的最大载荷超过原地应力 10% 左右。

**关键词:** 盐岩层; 套管; 套管外载; 蠕变规律; 数值模拟

**中图分类号:** TU 457 **文献标识码:** A

## Casing load creep test under gypsum formation and its numerical simulation analysis

ZHANG Jin-cheng<sup>1,2</sup>

(1. *Mechanics Institute of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*

*2. Drilling Engineering Research Institute in Zhongyuan Oilfield, Puyang 457001, China)*

**Abstract:** In the gypsum formation, 65 percent of wells appear casing failure, which shows that gypsum creep is an important reason for casing failure in Zhongyuan Oilfield. The creep experiments were carried out using six cores under simulated formation condition to find the casing failure mechanism in gypsum formation. The creep rule and the characteristic parameters of the gypsum formation were obtained from the experiments. According to the test results, the finite element model for casings load calculation was established, and the calculation software was also compiled. Using the software, the casing load of one well was calculated in gypsum formation. The results show that the casing radial load has a relationship with phase angle and creep time, and the maximum load is 10% greater than the stress in situ.

**Key words:** gypsum formation; casing failure; casing load; creep rule; numerical simulation

近年来中原油田由于主力油层的进一步水淹, 大批油井综合含水上升, 相当多的油水井套管损坏, 极大地影响了油田的开发生产。据不完全统计, 在钻遇盐岩层的油水井中, 套管的损坏率高达 65%, 盐岩层是中原油田套管损坏的最主要原因<sup>[1]</sup>。笔者通过理论分析和试验探讨盐岩层套管损坏的机理, 为套管损坏井的治理和预防提供依据。

## 1 试验

盐岩典型的应力-应变曲线具有明显的非线性。

随着温度的升高, 变形将明显增大, 屈服应力、强度、弹性模量均降低; 随着围压的增加, 变形将减小, 强度、弹性模量和泊松比均增加; 随着应变率的增加, 同一应力条件下的变形将减小, 强度增加。在盐岩的力学性质中, 时间是一个重要参数。对盐岩流变特性的研究一般要通过蠕变试验来实现。蠕变是指在恒定载荷作用下, 试件的变形随时间增加而变化的现象。它由 3 部分组成: 瞬态蠕变、稳态蠕变以及加速蠕变。对盐岩这类延性材料, 主要表现为瞬态蠕变、稳态蠕变两个阶段, 而稳态蠕变阶段持续的时

收稿日期: 2008 - 06 - 16

基金项目: 中国石油化工股份有限公司项目 (P00007)

作者简介: 张金成 (1963 - ), 男 (汉族), 河南社旗人, 教授级高级工程师, 博士研究生, 从事钻井工程技术研究和管理工作。

间比较长。因此找出由瞬态到稳态、由稳态到加速蠕变的转变位置具有实际意义。

为了分析计算盐岩蠕变对套管产生的外载,就必须了解地下盐岩蠕变的特性,掌握其流变本构关系。由于石油工程中所遇到的盐岩地层深埋在地下几千米,不可能进行现场试验,只能对取自现场的岩心在模拟地下条件下进行蠕变试验。

为了在一块岩样上获得更多的试验数据,本研究采用了多级加载的方法,轴向应力分为 1~5 级<sup>[2]</sup>(应力值大小视具体情况而定)。

试验中用到的盐岩岩心取自中原油田 3 034~3 040.5 m 深处,属于同一层位的盐岩。由于取自现场的岩心形状不规则,不能直接用于试验,需在室内重新加工。室内岩心柱加工过程是先用金刚石取心钻头在现场岩心上套取一个 25 mm 的圆柱形试样,然后将圆柱形试样的两端车平、磨光,使岩样的长径比为 1.8~2.0。取心在常温下进行,由于盐岩强度低,易溶于水,在取心过程中用煤油作为冷却循环介质,以防岩心性质发生变化。

### 1.1 试验装置

试验装置如图 1 所示。主要由轴向恒压系统、围压恒压系统和位移测量显示系统组成。

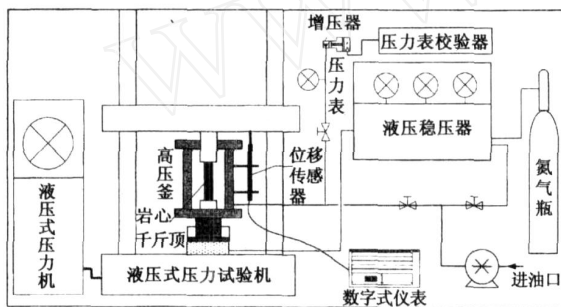


图 1 试验装置结构

Fig 1 Structure of experimental devices

轴向恒压系统是给岩样施加恒定轴向载荷的试验单元。加压系统由千斤顶、液压稳压器和电动油泵组成。液压稳压器的恒压是通过蓄能器、电接点压力表及电动油泵组成的恒压系统来完成的。

围压恒压模块是给岩样施加恒定围压的试验装置。它由压力表校验器及附属配件改装而成,能够精确地控制围压的大小。

位移测量采用 MDA-5 直位移传感器来完成,显示系统采用天辰 XSD 多通道数字式仪表。

### 1.2 试验方案

选取文 13-367 井的岩心,共制备了 6 个试验岩样,盐岩蠕变试验方案见表 1。

表 1 盐岩蠕变试验方案

Table 1 Creep test programs for gypsum core

岩心编号	井深 H/km	长度 L/mm	围压 $p_1$ /MPa	轴压 $p_2$ /MPa	备注
2-1	3.0357	49.4	15	16-24-32	阶梯加载
1-3	3.0349	48.3	15	32	
4-1	3.0373	49.7	10	32	
6-1	3.0405	50.3	12	24-32	阶梯加载
5-1	3.0389	49.0	10	28.8	
5-2	3.0364	49.7	10	25.6-28.8-32-35.2-38.4	阶梯加载

阶梯加载蠕变试验不仅可以研究稳态蠕变速率的变化规律,还可以从单一试件得到更多的试验数据,这对试验周期长、岩心数量较少的岩石流变性质研究有重大意义。由于本研究中的岩心数量很少,所以对 3 块岩心采用了阶梯加载法。试验时,首先以尽可能快的速度施加围压,然后施加轴向压力,并保持不变。同时监测、记录轴向和周向应变。当蠕变曲线达到稳态时,轴向应力增加到下一级,开始下一级蠕变试验。

### 1.3 试验结果

试验结果如图 2 所示。由图 2 可以看出:

(1)在盐岩的压缩试验中,瞬时应变和蠕变应变都存在。岩石采用三轴试验,围压一定,蠕变应变由应力差(即偏应力)所决定。蠕变速率随偏应力的增加有明显的升高。

(2)在整个蠕变过程中,瞬态蠕变在很短时间内即结束,稳态蠕变的时间在整个蠕变过程中占有较大比例。

(3)稳定蠕变速率随着偏应力的增加而不断增加,且轴向偏应力成倍增大时,稳态应变速率并不呈线性增加。

(4)载荷卸载后,应变有微小的恢复,而大部分应变不可恢复。

### 1.4 蠕变曲线方程

盐岩的流变特性基本符合时间指数函数的形式,利用理论蠕变方程来拟合试验曲线,从而确定此盐岩的稳态蠕变速率<sup>[3]</sup>。蠕变方程设为

$$= c_1 + c_2 t + c_3 e^{c_4 t} \quad (1)$$

其中,  $c_1, c_2, c_3, c_4$  为待定系数。

利用式(1)对试验曲线进行非线性拟合处理,步骤如下:

(1)线性化。将式(1)用泰勒公式展开,并只取线性项。

(2)给定一组初始值,代入方程进行迭代回归,直至达到误差允许的范围。

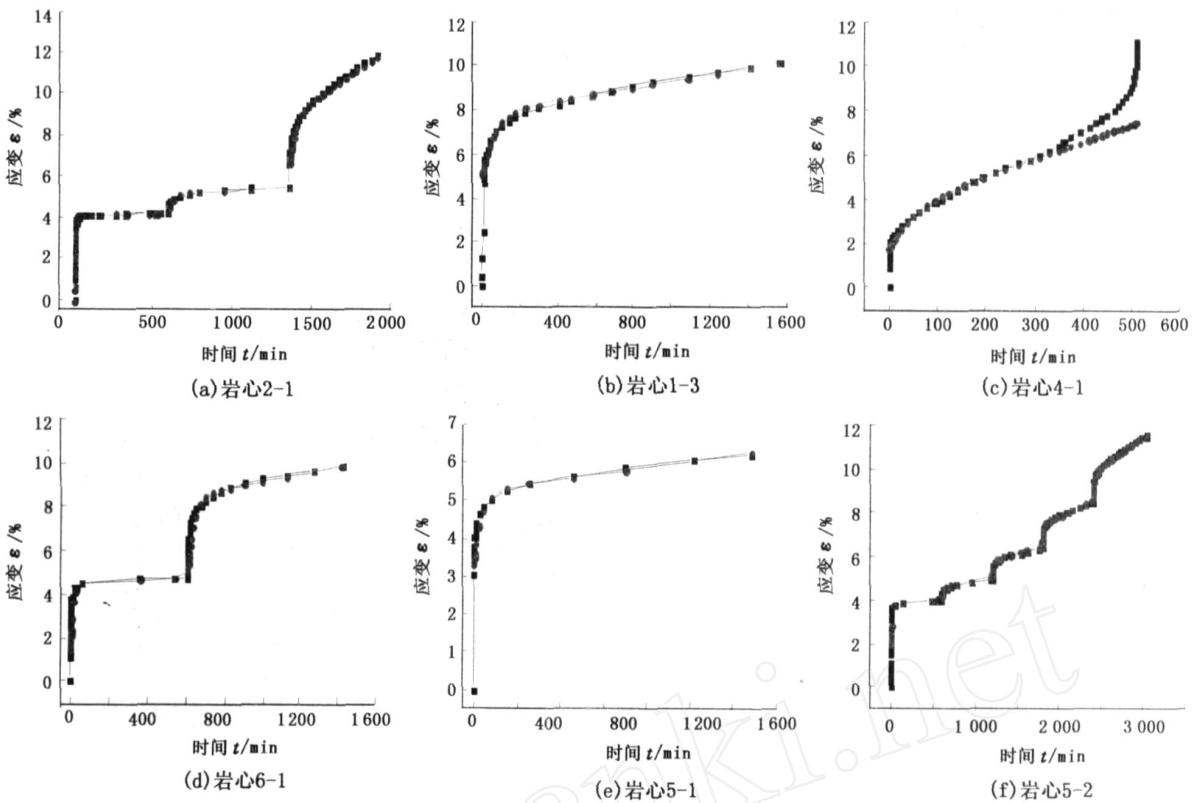


图 2 不同岩心的试验拟合曲线

Fig 2 Fitting curves for different rock cores

对盐岩的试验数据利用 Heard 蠕变模式进行非线性回归, 所得蠕变参数见表 2。通过蠕变曲线得到的 6 块岩心平均弹性模量和泊松比也列表 2。

表 2 拟合试验曲线中各蠕变系数及岩心弹性模量和泊松比

Table 2 Creep parameters from different fitting curves and Young modulus, Poisson ratio of rock cores

岩心编号	轴压 $p_2 / \text{MPa}$	$c_1$	$c_2 \times 10^8$	$c_3$	$c_4$	弹性模量 $E / \text{GPa}$	泊松比 $\mu$
16	4.085	2.65	-4.2429	-0.27813			
2-1	24	5.148	62.1	-0.7829	-0.02878	9.69	0.295
32	9.061	86.6	-2.3784	-0.02987			
1-3	32	7.864	24.1	-2.7746	-0.0155	9.95	0.303
4-1	32	3.559	12.6	-1.8489	-0.01975	9.42	0.287
6-1	24	4.545	4.95	-1.1323	-0.0812		
32	8.456	28.8	-3.3903	-0.0308		9.51	0.290
5-1	28.8	5.246	13.1	-1.9035	-0.0267	9.68	0.295
25.6	3.825	6.43	-1.8554	-0.0870			
28.8	4.632	10.8	-0.4992	-0.0326			
5-2	32	5.819	1.88	-0.7041	-0.0608	9.47	0.287
35.2	7.477	3.01	-0.9684	-0.1040			
38.4	9.816	4.63	-1.199	-0.0610			

对表 2 中的岩心弹性模量和泊松比取平均值, 可以得到: 弹性模量  $E = 9.63 \text{ GPa}$ ; 泊松比为 0.393。

## 2 套管外载计算方法

盐岩流变性试验的目的在于找出盐岩的蠕变本构关系, 为计算套管的岩压外载提供所需要的参数和依据。由于盐岩具有流变性质, 在地应力作用下向井内流动, 当盐岩流动受到套管的阻碍而不能进行时, 对套管产生外挤力 (岩压外载)。用传统的解析法来求解这种流变学问题时, 由于无法考虑盐岩的非线性流变特性, 导致计算十分繁琐, 为此采用有限元法求解这种非线性粘弹性问题。

### 2.1 计算模型

采用粘性初应变法计算均匀或非均匀地应力作用下盐岩产生的套管岩压外载。为了使问题简化, 做如下假设<sup>[4-6]</sup>: 地层水平, 且为均质宏观各向同性的连续介质, 按平面应变考虑; 静水压力不引起盐岩的蠕变, 即蠕变过程中体积蠕变为零; 地层钻开后, 围岩卸载产生应力重分布, 随后产生粘性应变, 即在地层还没有产生粘性应变时, 套管已下入并封固好, 并以此作为时间坐标的零点; 按常规的套管设计方法, 当水泥凝固时, 套管的初始外载等于套管外的泥浆液柱压力  $p_1$ , 即在  $t = 0$  时刻的套管岩压外载  $p_r(0) = p_1$ 。不考虑水泥环的作用, 认为地层直接与

套管接触,且两者不能互相滑动。

所建有限元计算模型见图 3。

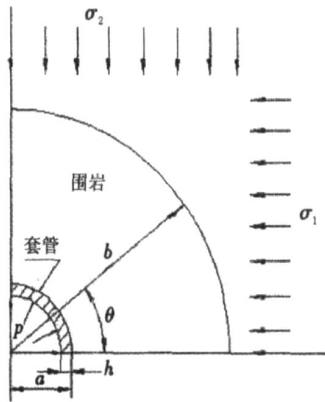


图 3 套管外载有限元计算模型

Fig 3 Finite element model for casing loads calculation

依据所建模型,编制了计算盐岩层套管岩压外载

的软件。

### 2.2 计算实例

对中原油田某口井进行了计算。计算参数为:最小水平主应力 67.5 MPa,最大水平主应力 72.5 MPa;套管外径 139.7 mm,内径 118.9 mm,弹性模量 210 GPa,泊松比 0.3;地层温度 120 ;盐岩的弹性模量 9.63 GPa,泊松比 0.293(由前面试验得到的盐岩特征参数)。计算结果见图 4、5。

分析结果发现,作用在套管上的径向载荷与角度(以最大地应力  $\sigma_H$  方向作为  $\theta=0$  的方向)和蠕变时间有关。径向载荷的分布不再均匀,最大载荷出现在  $\theta=90$  的方向上,即在最小地应力方向;最小载荷出现在  $\theta=0$  方向,即最大地应力方向。随着蠕变时间的延长,套管载荷都是先增大,达到最大之后减小,最后达到一个稳定载荷。从数值上看,蠕变条件下套管的最大载荷超过原地应力 10%左右。

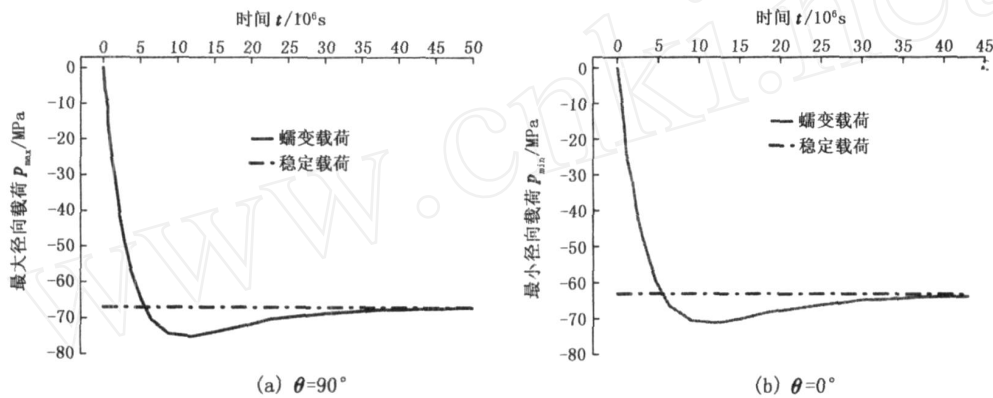


图 4 套管最大载荷随时间的变化规律

Fig 4 Changing rule of maximal casing load at different time

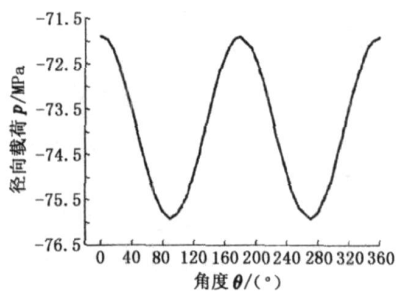


图 5 最大径向载荷随套管位置的变化规律

Fig 5 Changing rule of maximal radical load in different casing position

## 3 结论

(1)得到了不同条件下的蠕变速率及盐岩蠕变本构关系;稳定速率随着轴向应力的增加而不断增加,且轴向应力成倍增大时,稳态应变速率并不呈线性增加。

(2)作用在套管上的径向载荷与角度和蠕变时间有关,并且蠕变条件下套管的最大载荷超过原地应力 10%左右。

### 参考文献:

[1] 王德良. 中原油田套管损坏原因分析及预防 [J]. 石油钻探技术, 2003, 31 (2): 36-38  
WANG De-liang Reasons and analysis of casing damage in Zhongyuan Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31 (2): 36-38

[2] 曾义金, 杨春和. 深井石油套管盐膏层挤压应力计算研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (4): 393-396  
ZENG Yi-jin, YANG Chun-he Numerical analysis of creep pressing stress of casing in deep salt rock stratum [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (4): 393-396

[3] 汪荣鑫. 数理统计 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986

- [4] 张效羽. 套管有限元计算的若干问题分析 [J]. 天然气工业, 2001, 21 (1): 62-65.  
ZHANG Xiao-yu. Analysis of some problems in casing calculation by finite element method [J]. Natural Gas Industry, 2001, 21 (1): 62-65.
- [5] 何开平, 张良万, 张正禄, 等. 盐层蠕变粘弹性流体模型及有限元分析 [J]. 石油学报, 2002, 23 (3): 102-106.  
HE Kai-ping, ZHANG Liang-wan, ZHANG Zheng-lu, et al. Viscous and elastic flow module for gypseous salt creep and finite element analyses [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23 (3): 102-106.
- [6] 杨春和. 深层岩石本构关系及其在石油钻井工程中的应用研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (10): 1678-1682.  
YANG Chun-he. Constitutive relationship of deep salt rock and its application to petroleum drilling engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (10): 1678-1682.

(编辑 沈玉英)

(上接第 111 页)

## 参考文献:

- [1] 陆先亮, 吕广忠, 栾志安, 等. 纳米聚硅材料在低渗透油田中的应用 [J]. 石油勘探与开发, 2003, 30 (6): 110-122.  
LU Xian-liang, LÜ Guang-zhong, LUAN Zhi-an, et al. Application of polysilicon in low permeability oil field [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30 (6): 110-122.
- [2] 苏咸涛, 闫军, 吕广忠, 等. 纳米聚硅材料在油田开发中的应用 [J]. 石油钻采工艺, 2002, 24 (3): 48-51.  
SU Xian-tao, YAN Jun, LÜ Guang-zhong, et al. Application of nanometer polysilicon in oil field development [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2002, 24 (3): 48-51.
- [3] 狄勤丰, 顾春元, 施利毅, 等. 疏水性纳米  $\text{SiO}_2$  增注剂的降压作用机理 [J]. 钻采工艺, 2007 (4): 91-94.  
DI QIN-feng, GU Chun-yuan, SHI Li-yi, et al. Pressure drop mechanism of enhancing water injection technology with hydrophobicity nanometer  $\text{SiO}_2$  [J]. Drilling & Production Technology, 2007 (4): 91-94.
- [4] GU Chun-yuan, DI QIN-feng, FANG Hai-ping. Slip velocity model of porous walls absorbed by hydrophobic nanomaterial  $\text{SiO}_2$  [J]. Journal of Hydrodynamics, 2007 (3): 365-371.
- [5] LI DING, DI QIN-feng, LI JING-yuan, et al. Large slip length over a nanopatterned surface [J]. Chinese Physics Letter, 2007, 24 (4): 1021-1024.
- [6] 吴非, 狄勤丰, 顾春元, 等. 疏水纳米  $\text{SiO}_2$  降低岩心流动阻力效果的室内实验研究 [J]. 钻采工艺, 2008, 31 (2): 102-112.  
WU Fei, DI QIN-feng, GU Chun-yuan, et al. Experimental study on the reduction of flowing resistance through rock microchannel with nanoparticles  $\text{SiO}_2$  adsorbing method [J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31 (2): 102-112.
- [7] HO Chih-ming, TAI Yu-chong. Micro-electro-mechanical-systems (MEMS) and fluid flows [J]. Annu Rev Fluid Mech, 1998, 30: 579-612.
- [8] GDRDANO N, CHENG J-T. Microfluid mechanics: progress and opportunities [J]. J Phy: Condens Matter, 2001, 13: 271-295.
- [9] GRANICK S, ZHU X, HYUNJUNG L. Slippery questions about complex fluids flowing past solids [J]. Nature Materials, 2003, 2: 221-227.
- [10] THOMPSON P A, TROIAN S M. A general boundary condition for liquid flow at solid surfaces [J]. Nature, 1997, 389: 360-362.
- [11] CHOI Chang-hwan, JOHAN K A, WESTN, et al. Apparent slip flows in hydrophilic and hydrophobic microchannels [J]. Physics of Fluids, 2003, 15 (10): 2898-2902.
- [12] CU I Hai-hang, LI Zhan-hua. Flow characteristics of liquids in microtubes driven by a high pressure [J]. Physics of Fluids, 2004, 16: 1803-1810.

(编辑 沈玉英)

(上接第 114 页)

- [8] 李兰冬, 章福祥, 关乃佳, 等. 金属-ZSM-5/堇青石整体式催化剂上稀燃汽车尾气的净化 [J]. 催化学报, 2006, 27 (1): 41-44.  
LI Lan-dong, ZHANG Fu-xiang, GUAN Nai-jia, et al. Metal-ZSM-5/Cordierite monolithic catalysts for purifying lean-burn engine exhaust [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2006, 27 (1): 41-44.
- [9] STEPHEN James Comelius. Modeling and control of automotive catalysts [D]. Cambridge: University of Cambridge, 2001.
- [10] LI Lan-dong, CHEN Ji-xin, ZHANG Shu-juan, et al. Selective catalytic reduction of nitrogen oxides from exhaust of lean burn engine over in-situ synthesized Cu-ZSM-5/Cordierite [J]. Environment Science Technology, 2005, 39: 2841-2847.
- [11] 冯洪庆. 465 汽油机稀薄燃烧及  $\text{NO}_x$  排放催化控制研究 [D]. 天津: 天津大学机械学院, 2003.

(编辑 沈玉英)