

非牛顿流体流态判别方法的研究 *

刘崇建 * * 刘孝良
(西南石油学院)

柳 世 杰
(四川石油管理局井下作业处)

刘崇建等. 非牛顿流体流态判别方法的研究. 天然气工业, 2001; 21 (4) : 49~52

摘 要 正确判别和选择非牛顿流体泥浆、水泥浆的流动状态, 对优选钻井水力参数, 避免两相流体作垂直运动时的界面相互掺混作用是非常有意义的。本研究在分析现有方法存在问题的基础上, 从判别流态的基本概念出发, 应用流道上的平均视粘度, 建立了幂律流体判别流态的新方法。该方法包括流体在管内或环空流动时, 平均视粘度、雷诺数等参数的表达式及平均视粘度在截面所处的位置。将方法与幂律流体常用的流态判别方法、局部扰动流态判别方法对比, 并进行试验验证, 说明文中提出的方法含义清楚, 符合实际, 具有适应范围较宽的特点。

主题词 钻井参数 非牛顿流体 流体流动 差别方法 研究

问题的提出

目前, 判别非牛顿流体状态的方法, 一般均以雷诺数的大小作为依据。所采用的计算方法仍按牛顿液体流动时, 雷诺数与摩擦系数的关系, 确定出非牛顿流体雷诺数的表达式。由于多数泥浆和水泥浆能较好地符合幂律模型, 因此进一步研究其流变规律和流态判别是非常有意义的。按照常用方法, 幂律流体在管内或环空流动时, 其有关参量关系为^[1,2]:

管内:

$$f_t = \frac{16}{Re_t} \quad Re_t = \frac{8^{1-n} \rho d_t^n v^{2-n}}{K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n} \quad (1)$$

环空:

$$f_a = \frac{24}{Re_a} \quad Re_t = \frac{12^{1-n} \rho (D-d)^n v^{2-n}}{K \left(\frac{2n+1}{3n} \right)^n} \quad (2)$$

很明显, 常用方法及有关表达式存在以下主要问题:

- (1) 非牛顿流体雷诺数与摩擦的关系并不一定按式(1)、(2)的线性规律变化。
- (2) 非牛顿流体雷诺数的表达式含义不清, 不是根据雷诺数的基本定义, 惯性力与粘滞力之比出发, 推导出相关公式。
- (3) 按上述方法判断流动状况与实际情况有较

大出入。

分析说明, 从判别流态的基本概念及实验方法着手, 研究非牛顿流体的流态判别, 建立新的非牛顿流体流态判别模型是非常必要的。

幂律流体新的流态判别模型

液体流态判别的最基本关系是按惯性力与粘滞力之比来确定, 其表达式为:

$$Re = \frac{\rho d_t v}{\eta} \quad (3)$$

对牛顿液体而言, 视粘度 η 为一常量, 而非牛顿流体 η 却是变数, 随剪切速率的增加而减少。在管内或环空中, 流体在流道中心 η 最大, 管壁却最小。因此计算非牛顿流体的雷诺数时, 如何合理的取 η 值, 就成为一个必需解决的问题。如取管中心的视粘度作为计算依据, 非牛顿流体就很不容易出现紊流, 而用边壁的视粘度作为计算依据, 则流体就容易出现紊流。常用的流态判别方法回避了这个问题, 推导出了式(1)、(2)的有关关系。另外还有一种判别非牛顿流体流态的方法, 即采用局部扰动理论和分层雷诺数的概念^[3,4], 求出幂律流体在流道中最易失稳的位置 x_L 。

$$x_L = \left(\frac{1}{n+2} \right)^{\frac{n}{n+1}} R_t \quad (\text{管内}) \quad (4)$$

* 本文为中国石油天然气集团公司“九五”重点科技攻关项目“四川地区复杂地质条件深井、超深井钻井技术”(编号 960024) 中国井技术研究的部分内容。

* * 刘崇建, 简介见本刊 2001 年第 2 期。地址: (637001) 四川省南充市。电话: (0817) 2642913。

$$x_L = \left[\frac{1}{n+2} \right]^{\frac{n}{n+1}} \left(\frac{R-r}{2} \right) \quad (\text{环空}) \quad (5)$$

根据其失稳位置,可以求出幂律流体相对应的视粘度和雷诺数的表达式。

下面采用流道截面上的平均视粘度,建立幂律流体新的流态判别模型(简称平均法),并与常用的流态判别模型(简称常用法)、局部失稳流态判别模型(简称局部法)进行比较,从而得出较为合理的结果。

幂律流体的本构方程为:

$$\tau = K \gamma^n \quad (6)$$

该流体在管道任意位置的视粘度为:

$$\begin{aligned} \eta_x &= \frac{\tau_x}{\gamma_x} = K \gamma_x^{n-1} \\ &= K \frac{8v}{d_t} \frac{3n+1}{4n} \frac{x^{1-\frac{1}{n}}}{R_t^{1-\frac{1}{n}}} \end{aligned} \quad (7)$$

任意位置 x 处(图1)的剪切速率 γ_x 为:

$$\gamma_x = \frac{8v}{d_t} \frac{3n+1}{4n} \frac{x^{\frac{1}{n}}}{R_t^{\frac{1}{n}}} \quad (8)$$

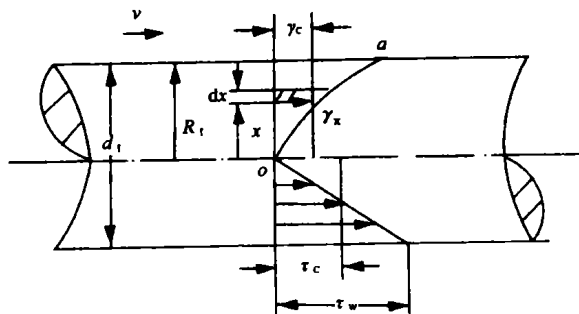


图1 剪切速率及剪切应力在流道中的变化情况

剪切速率沿管半径变化曲线 α 所包含的面积 S 为:

$$S = \int \gamma_x dx = \frac{1+3n}{1+n} v \quad (9)$$

平均剪切速率:

$$\gamma_c = \frac{1+3n}{1+n} \frac{v}{R_t} \quad (10)$$

平均剪切应力:

$$\tau_c = \frac{\tau_w}{2} = \frac{K}{2} \left(\frac{8v}{d_t} \frac{3n+1}{4n} \right)^n \quad (11)$$

则幂律流体在管道上的平均视粘度为:

$$\eta_c = \frac{\eta_k}{\gamma_c} = K \left(\frac{1+n}{2n} \right) \left(\frac{8v}{d_t} \frac{3n+1}{4n} \right)^{n-1} \quad (12)$$

将式(12)与式(7)进行比较,可得出平均视粘度

相当于管内截面上实际视粘度的位置为:

$$x_{Ct} = \left[\frac{1+n}{2n} \right]^{\frac{n}{n-1}} R_t \quad (13)$$

将式(12)代入式(3)得:

$$Re_{Ct} = \frac{8^{1-\frac{n}{n-1}} \rho d_t^n v^{2-\frac{n}{n-1}}}{2K \frac{1+n}{1+3n} \frac{3n+1}{4n}} \quad (14)$$

如将常用法的雷诺数表达式采用视粘度表示,则视粘度及其相应的位置分别为:

$$\eta_{ut} = K \frac{3n+1}{4n} \frac{8v}{d_t} \frac{3n+1}{4n} \frac{x^{1-\frac{1}{n}}}{R_t^{1-\frac{1}{n}}} \quad (15)$$

$$x_{ut} = \frac{3n+1}{4n} \frac{x^{1-\frac{1}{n}}}{R_t^{1-\frac{1}{n}}} \quad (16)$$

同样将局部扰动失稳位置代入式(7)和式(3),可得出局部法的视粘度与雷诺数的表达式。

$$\eta_{Lt} = K \left[\frac{1}{n+2} \right]^{\frac{n-1}{n+1}} \left(\frac{8v}{d_t} \frac{3n+1}{4n} \right)^{n-1} \quad (17)$$

$$Re_{Lt} = \frac{8^{1-\frac{n}{n-1}} \rho d_t^n v^{2-\frac{n}{n-1}}}{K \left[\frac{1}{n+2} \right]^{\frac{n-1}{n+1}} \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^{n-1}} \quad (18)$$

不难看出,

$$x_{Ct} < x_{Lt} < x_{ut}$$

$$\eta_{Ct} > \eta_{Lt} > \eta_{ut}$$

$$Re_{Ct} < Re_{Lt} < Re_{ut}$$

即按平均法计算雷诺数时,视粘度位置偏向于管壁中心,数值较大,计算雷诺数偏小,所达到紊流时的临界流速偏大,能有效地反映管道整个截面流态的变化。

采用上述方法,同样可以得出幂律流体在同心环空中流动时的有关参量计算式。

平均视粘度法:

环空截面任意位置的视粘度、剪切速率分别为:

$$\eta_x = K \left(\frac{12v}{D-d} \frac{2n+1}{3n} \right)^{n-1} \frac{x^{1-\frac{1}{n}}}{\left(\frac{R-r}{2} \right)^{1-\frac{1}{n}}} \quad (19)$$

$$\gamma_x = \frac{12v}{D-d} \frac{2n+1}{3n} \frac{x^{\frac{1}{n}}}{\left(\frac{R-r}{2} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (20)$$

平均剪切速率、平均剪切应力及平均视粘度分别为:

$$\gamma_{Ca} = \left(\frac{12v}{D-d} \frac{2n+1}{3n} \right) \frac{n}{1+n} \quad (21)$$

$$\tau_{Ca} = \frac{\tau_w}{2} = \frac{K}{2} \left(\frac{12v}{D-d} \frac{2n+1}{3n} \right)^n \quad (22)$$

$$\eta_{Ca} = K \frac{1+n}{2n} \left(\frac{12v}{D-d} \frac{2n+1}{3n} \right)^{n-1} \quad (23)$$

平均视粘度所处的位置与雷诺数表达式分别为:

$$x_{Ca} = \left(\frac{1+n}{2n} \right)^{\frac{n}{n-1}} \left(\frac{R-r}{2} \right) \quad (24)$$

$$Re_{Ca} = \frac{\rho(D-d)v}{\eta_{Ca}} = \frac{12^{1-n} \rho(D-d)^n v^{2-n}}{1.5 K \frac{1+n}{1+2n} \frac{2n+1}{3n}} \quad (25)$$

常规法:

$$x_{ua} = \frac{2n+1}{3n} \frac{n-1}{2} \frac{R-r}{2} \quad (26)$$

$$\eta_{ua} = K \frac{2n+1}{3n} \frac{12v}{D-d} \frac{2n+1}{3n}^{n-1} \quad (27)$$

$$Re_{ua} = \frac{\rho v(D-d)}{\eta_{ua}} = \frac{12^{1-n} \rho(D-d)^n v^{2-n}}{K \frac{2n+1}{3n}} \quad (28)$$

局部挠动法:

$$x_{La} = \left(\frac{1}{n+2} \right)^{\frac{n}{n+1}} \left(\frac{R-r}{2} \right) \quad (29)$$

$$\eta_{La} = K \left(\frac{1}{n+2} \right)^{\frac{n+1}{n+1}} \left(\frac{12v}{D-d} \frac{2n+1}{3n} \right)^{n-1} \quad (30)$$

$$Re_{La} = \frac{\rho D v}{\eta_{La}} = \frac{12^{1-n} \rho(D-d)^n v^{2-n}}{K \left(\frac{1}{n+2} \right)^{\frac{n+1}{n+1}} \left(\frac{2n+1}{3n} \right)^{n-1}} \quad (31)$$

实验结果与理论计算的比较和分析

图 2~图 4 为 7 种不同性能的流体在管内流动时,压降与流速的实测曲线。曲线的转折点为流态的转变位置,即转折点前流体的流态为层流,转折点之后,流体为紊流。转折点的流速为流体实测临界流速。

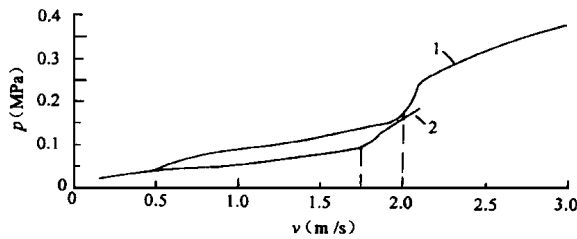


图 2 流体压降与流速的实测曲线

注:1 为泥浆; $\rho_m = 1.04 \text{ g/cm}^3$; $n = 0.453$; $K = 0.289 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$;
2 为泥浆; $\rho_m = 1.06 \text{ g/cm}^3$; $n = 0.628$; $K = 0.112 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$

表 1~表 4 列出了幂律流体在不同临界雷诺数情况下^[6],常规法、局部挠动法及平均视粘度法所计算的临界流速与实测临界流速的比较数值表和相

对误差。

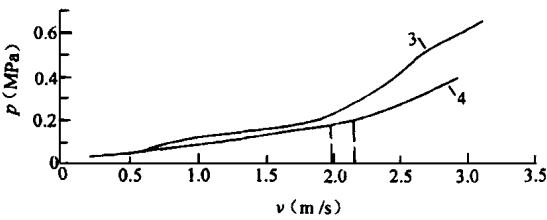


图 3 流体压降与流速的实测曲线

注:3 为泥浆(加钛铁矿); $\rho_m = 1.30 \text{ g/cm}^3$; $n = 0.848$; $K = 0.052 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$;

4 为泥浆; $\rho_m = 1.03 \text{ g/cm}^3$; $n = 0.37$; $K = 0.759 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$

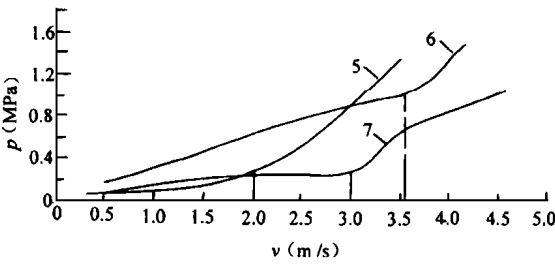


图 4 流体压降与流速的实测曲线

注:5 为水泥浆; $\rho_c = 1.92 \text{ g/cm}^3$; $n = 0.76$; $K = 0.277 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$;

6 为水泥浆; $\rho_c = 1.88 \text{ g/cm}^3$; $n = 0.963$; $K = 0.050 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$;

7 为泥浆(加钛铁矿); $\rho_m = 1.10 \text{ g/cm}^3$; $n = 0.705$; $K = 0.170 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$

表 1 幂律流体流态差别方法的比较

试验号	1				2			
临界雷诺数	2 100		3 470~1 370 <i>n</i>		2 100		3 470~1 370 <i>n</i>	
临界流速 (m/s)	实 测 值							
	2				1.75			
	计算值	相对误差 (%)	计算值	相对误差 (%)	计算值	相对误差 (%)	计算值	相对误差 (%)
常规法	1.53	- 23.5	1.74	- 13	1.21	- 30.9	1.42	- 18.9
局部法	1.65	- 17.5	1.87	- 6.5	1.31	- 25.1	1.54	- 12
平均法	1.63	- 18.5	1.85	- 7.5	1.32	- 24.6	1.55	- 11.4

表 2 幂律流体流态判别方法的比较

试验号	3				4			
临界雷诺数	2 100		3 470~1 370 <i>n</i>		2 100		3 470~1 370 <i>n</i>	
临界流速 (m/s)	实 测 值							
	1.97				2.15			
	计算值	相对误差 (%)	计算值	相对误差 (%)	计算值	相对误差 (%)	计算值	相对误差 (%)
常规法	1.63	- 17.3	1.77	- 10.2	1.54	- 28.4	1.90	- 11.6
局部法	1.70	- 13.7	1.84	- 6.6	1.61	- 25.1	1.98	- 7.9
平均法	1.69	- 14.2	1.83	- 7.1	1.81	- 15.8	2.23	3.7

表3 幂律流体流态判别方法的比较

试验号	5				6			
临界雷诺数	2 100		3 470~1 370 n		2 100		3 470~1 370 n	
临界流速 (m/s)	实 测 值							
	3.54				2.0			
	计算值	相对误差 (%)	计算值	相对误差 (%)	计算值	相对误差 (%)	计算值	相对误差 (%)
常规法	2.94	- 17.0	3.31	- 6.5	2.19	- 9.5	2.24	12
局部法	3.13	- 11.6	3.52	- 0.6	2.21	- 10.5	2.26	13
平均法	3.11	- 12.1	3.50	- 1.0	2.21	- 10.5	2.26	13

表4 幂律流体流态判别方法的比较

试验号	7				7 组试验数据平均			
临界雷诺数	2 100		3 470~1 370 n		2 100		3 470~1 370 n	
临界流速 (m/s)	实 测 值							
	3.0							
	计算值	相对误差 (%)	计算值	相对误差 (%)	相对误差 (%)		相对误差 (%)	
常规法	2.30	- 22.7	2.66	- 11.3	20.8		11.93	
局部法	2.49	- 17	2.85	- 5.0	17.2		7.37	
平均法	2.49	- 17	2.85	- 5.0	16.1		6.96	

从表1~表4可知:①采用牛顿流体的临界雷诺数2 100,计算非牛顿流体的临界流速,其平均相对误差为16%~21%,有的高达30%,而选用不同 n 值的临界雷诺数计算临界流速,其平均相对误差仅只有7%~12%。②在合理的选定临界雷诺数的情况下,采用平均粘度计算临界流速,其平均相对误差小于7%,一般都小于10%,而局部挠动法计算的临界流速,相对误差却略有偏大。常规法计算流体的临界流速,相对误差较大,一般在15%以上。③当流体的流性指数接近于1时,采用三种方法判别流体

的流动状态,其临界流速的误差基本接近。
上述分析表明,根据幂律流体 $Re_k = 3\,470 \sim 1\,370\,n$ 的关系确定临界雷诺数,计算平均视粘度下的雷诺数及临界流速,是判别非牛顿流体流态的较好方法。

符 号 说 明

$d_t(R_t)$ 为管径或管半径,cm; τ_x 为流道中任意位置的剪切应力,0.1 Pa; $D(R)$ 为环空外管直径或半径,cm; τ_w 为管壁剪切应力,0.1 Pa; $d(r)$ 为环空内管直径或半径,cm; γ_x 为流道中任意位置剪切速率, S^{-1} ; v 为平均流速,cm/s; n 为流体的流性指数,无因次; ρ 为流体密度,g/cm³; K 为流体的稠度系数,0.1 Pa s ^{n} ; η 为视粘度,0.1 Pa s; Re_c 为流体的计算雷诺数,无因次; x 为管内或环空离中心的任意位置,cm; Re_k 为流体的临界雷诺数,无因次。

下标: a 为环空; t 为管子; u 为常规法; L 为局部法; C 为平均法。

参 考 文 献

1 陈家琅主编. 水力学. 北京:石油工业出版社,1985
2 刘希圣主编. 钻井工艺原理(中册钻井技术). 北京:石油工业出版社,1988
3 刘崇建,刘绘新. 关于判别液体流态准数 Z 值的讨论. 西南石油学院学报,1981;(2)
4 岳湘安,陈家琅. 非牛顿流体流动的稳定参数及其应用. 水动力学研究与进展,1987;2(3):114
5 刘崇建,刘孝良等. 注水泥流变性设计. 北京:石油工业出版社,1993:3~5
6 Erik B Nelson. Well Cementing. Amsterdam - Oxford - New York - Tokyo,1990

(收稿日期 2001 - 01 - 16 编辑 钟水清)

多孔聚合物水泥材料防砂技术

我国长期以来研究和应用了一些防砂技术,并取得了一定成果,但基本上是使用各种结构的过滤器和合成树脂加固井壁。实践表明,各种结构的过滤器减少了射孔井段的渗滤面积,容易压实堵塞,防砂周期短,而且不能防止油气层结构被破坏;合成树脂虽能加固疏松岩石,但加固物质本身的渗透率和流道尺寸不能调节,还可能堵塞并降低油层的渗透率。多孔聚合物水泥材料防砂是一项既能调节渗流流道横截面积尺寸和渗透率,又能加固油层井壁、提高防砂效果和防砂周期、保证油气井长期稳定的新技术。其原理是以有机收敛材料为基础,加入某些可溶固相物和不溶固相物配制成水泥浆,将它注入射孔孔眼和出砂形成的岩石孔洞,候凝固化形成水泥石;水泥石的初始渗透率不高,随后经油气井产液中的水溶解其中的可溶固相物,增加孔隙,提高渗透率。

(钟水清 摘)

SUBJECT HEADINGS: Carbonate rock, Reserve calculation, Well logging, Formation testing, Lateral, Predication, Sichuan Basin, East

Sima Liqiang (senior engineer), graduated in well logging from the University of Petroleum in 1983 and published about 20 articles. Now he is engaged in on-the-spot work, management and logging research work. Add: Dashiba, Jiangbei District, Chongqing (400021), China Tel: (023) 67401049

ESTABLISHMENT OF RESERVOIR ROCK PERMEABILITY ESTIMATING MODEL

Liao Mingguang, Li Shilun, Fu Xiaowen and Tan Dehui (Department of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum Institute). *NATURAL GAS IND.* v. 21, no. 4, pp. 45 ~ 48, 7/ 25/ 2001. (ISSN 1000 - 0976; **In Chinese**)

ABSTRACT: The pore throat size and distribution of reservoir rock may be characterized by capillary pressure curve. In regard to porous reservoir, rock absolute permeability is mainly depended on the distribution of pore throats. Through analyzing the mercury injection capillary pressure data on 393 sandstone samples collected from Tuha Oil Field, Liaohe Oil Field and Shengli Oil Field as well as the Xinchang gas field in Deyang, Sichuan, and on 257 carbonate rock samples from the Middle gas field in Shaanganning Basin and from Canada, it is found that the capillary pressure curve of reservoir rock shows a distinct hyperbola under log-log coordinate, being only determined by three parameters, i. e. P_d , S_b and pore throat geometrical factor (F_g); the apex of hyperbola represents such a state while the effective pore volume controlling fluid flow has been completely occupied by non-wetting phase in rock system; and the magnitude of reservoir rock absolute permeability can be determined by the position-shape parameter or apex parameter of the hyperbola. The rock absolute permeability estimating models for sandstone reservoir rock and porous carbonate reservoir rock are successfully established by use of the position-shape parameter and the apex parameter respectively in the paper, and their reliability is verified by a great number of measured data.

SUBJECT HEADINGS: Analog, Estimate, Absolute permeability, Reservoir, Capillary pressure, Hyperbolic function

Liao Mingguang (Doctor), born in 1967, is mainly engaged in the teaching and research on reservoir geology. Add: No. 30, Youyuan Road, Nanchong, Sichuan (637001), China Tel: (0817) 2643231

A STUDY OF THE FLOW PATTERN DISCRIMINANT METHOD FOR NON-NEWTONIAN FLUID

Liu Chongjian and Liu Xiaoliang (Southwest Petroleum Institute) and Liu Shijie (Downhole Operation Department of SPA). *NATURAL GAS IND.* v. 21, no. 4, pp. 49 ~ 52, 7/ 25/ 2001. (ISSN 1000 - 0976; **In Chinese**)

ABSTRACT: It is very significant for optimizing drilling hydraulic parameters and avoiding the inter-blending between the interfaces of two-phase fluid moving vertically to correctly discriminate and choose the flow pattern of non-Newtonian fluid mud and slurry. On the basis of analyzing the problems in existing methods and in light of the basic conception of discriminating flow pattern, a new method of discriminating flow pattern for power-law fluid was set up by use of the average apparent viscosity along flow path. This method includes the expressions of the parameters as average apparent viscosity and Reynolds number, etc., and the position of the average apparent viscosity at the section, when the fluid moves in pipeline and annular space. In comparison with the flow pattern discriminant method commonly used for power-law fluid and with local disturbance flow pattern discriminant method, the new method verified by testing is of the properties as clear meaning, conforming to reality and a wider application scope.

SUBJECT HEADINGS: Drilling parameter, Non-Newtonian fluid, Fluid flow, Discriminant method, Research

Liu Chongjian's introduction: See v. 21, no. 2, 2001. Add: Nanchong, Sichuan (637001), China Tel: (0817) 2642913

INFLUENCE OF BOND CEMENT PROPERTY ON CASING EXTERNAL COLLAPSE LOAD

Guo Wencai (Northwest Sichuan Field District of SPA) and Liu Huixin (Southwest Petroleum Institute). *NATURAL GAS IND.* v. 21, no. 4, pp. 53 ~ 54, 7/ 25/ 2001. (ISSN 1000 - 0976; **In Chinese**)

ABSTRACT: Formation external collapse load is transferred to the casing through bond cement. The law of the influence of bond cement property on external collapse load transfer reveals the relation between both of them. On the basis of elastic body thick-walled cylinder deformation equation and of introducing an external collapse load transfer coefficient k , a discussion on the