

◀ 学术争鸣 ▶

doi:10. 3969/j. issn. 1001-0890. 2013. 06. 003

关于内外压力对油井管柱轴向力和 稳定性影响问题的讨论

韩志勇

(中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛 266580)

摘 要:文献[1]对 A. Lubinski 和 H. B. Woods 等人建立的判别油井管柱稳定性的传统理论提出了不同看法,并认为传统理论的判别方法和公式是错误的。笔者认真学习和研究了文献[1],发现有些说法与历史事实不符,有些说法是对传统理论的误解,还发现文献[1]给出的“真实模型”不够真实,而且理论推导过程中存在着一个明显的漏洞——在计算轴向力时没有计算下端面上的液压力。详细论述了传统理论的历史发展过程,从原理和应用两方面讲述了传统理论的正确性,并对文献[1]推导过程中的明显漏洞进行了分析。分析认为:文献[1]对“虚力”和乌兹模型的否定都是站不住脚的;对传统的油井管柱稳定性判别方法和判别公式的否定也是不正确的。文献[1]不承认“虚力”的存在,因而无法正确处理下端面上的液压力,这是其推导过程中出现偏差的根本原因。

关键词:油井 管柱 轴向应力 稳定性 乌兹模型 虚力

中图分类号:TE21 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2013)06-0012-07

Discussion on Effects of Internal and External Pressure on Axial Force and Stability of Pipe String in Oil Wells

Han Zhiyong

(School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China)

Abstract: Reference[1] raised objection to the traditional theory of determining pipe stability established by A. Lubinski and H. B. Woods etc, and reached the conclusion that the determining method and formulas of traditional theory were improper. Looking into reference[1] carefully, the author found that some wordings of reference[1] are inconsistent with the historical facts and it has some misunderstandings to the traditional theory, the actual model proposed in it is not real enough, and an apparent error exists in the derivation, i. e. the pressure force on the lower end face of the tube has not been included in calculating the axial force. After analyzing the historical development process of the traditional theory, the paper confirms the correctness of the traditional theory and its application, and analyzes the apparent error in the derivation of reference[1]. It is concluded that the denying of fictitious force, Woods Model, traditional method and formulas for calculating stability of pipe string in oil wells does not hold water. Not recognizing the existence of fictitious force in reference[1], the hydraulic pressure on the lower end of the pipe would not be nable to be handled correctly, that is the root cause of error in its derivation process.

Key words: oil well; pipe string; axial stress; stability; Woods Model; fictitious force

文献[1]认为传统的油井管柱稳定性判别方法和判别公式是错误的,而且否定 A. Lubinski(以下简称 Lubinski)提出、并经过国内外众多学者发展和完善的“虚力”等概念,否定 H. B. Woods(以下简称 Woods)提出的研究内外压力对管柱稳定性影响

收稿日期:2013-05-24;改回日期:2013-11-11。

作者简介:韩志勇(1937—),男,陕西蓝田人,1962年毕业于北京石油学院油井工程专业,教授,博士生导师,主要从事钻井力学、定向钻井理论与技术方面的研究。系本刊顾问。

联系方式:hzy308@163.com。

的力学模型(乌兹模型)。然后,文献[1]给出了自己的所谓“真实模型”,并推导了判别油井管柱稳定性的“等效轴向力”计算公式。究竟应该如何判别油井管柱的稳定性?这是油井管柱力学的基本问题之一,也是油井管柱力学诞生 60 余年来经常争论的问题。该问题不仅是理论问题,还是非常现实的实际问题。20 世纪 80 年代,我国钻井学术界曾就该问题开展过讨论,但只是各抒己见,不了了之。现在,文献[1]又提出了该问题,因此笔者针对文献[1]的观点提出了自己的看法,与文献[1]的作者商榷,也希望我国钻井学术界同仁关心此事,参与讨论。

1 “虚力”概念从提出到完善的过程

文献[1]开篇即称:“Lubinski 用能量原理定义了一个虚构力”,但这句话只说对了一半,“虚力”的确是 Lubinski 首先提出的,但不是用能量原理定义的。Lubinski 第一次提出“虚力”的概念,是在 1956 年 10 月美国洛杉矶石油分会年会上发表的一篇文章中,1957 年该论文在期刊上正式发表^[2]。当时, Lubinski 为了研究抽油井油管柱在内压作用下发生严重屈曲的现象,提出了一个两端由活塞堵口的受内压管子模型,如图 1 所示。两活塞之间用一杆件或软绳连接,从而可防止活塞被液压力挤脱。当管内液压力达到一定值时,管子就会出现屈曲。

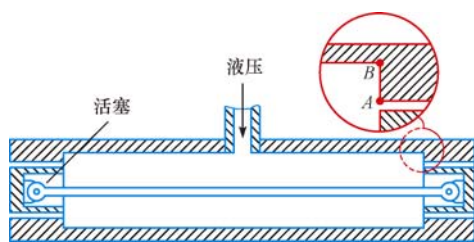


图 1 活塞封闭并承受内压的管子模型

Fig. 1 Pipe model subjected to internal pressure closed by piston

通常认为,只有在受到轴向压力时管子才可能发生屈曲。可是该模型中管子并未承受任何轴向压力,管内液压力在轴向的作用,一部分作用在活塞上,另一部分作用在管内的环形台肩(图 1 中的 AB 所示)上,而环形台肩上的作用力是轴向拉力,都不可能管子造成轴向压力。Lubinski 认为,管子在管内液压的作用下,就好像受到了一个巨大的轴向压力,如同在管子两端存在着一个“柱载荷(column load)” F_x (见图 2),其大小正好等于管内液压力乘以活塞面积。由于该柱载荷并非真实存在的轴向

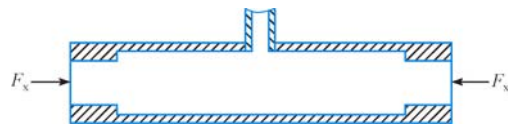


图 2 内压的屈曲效应

Fig. 2 Buckling effect of internal pressure

力,所以 Lubinski 将其命名为“虚力(fictitious force)”。此即“虚力”概念的首次提出。1962 年, Lubinski 在文献[3]中进一步阐述了“虚力”概念,还提出“真实存在力(actually existing force)”的概念。

显然, Lubinski 并非利用能量原理提出“虚力”,但利用能量原理研究内外液压力对管柱稳定性影响的,确有人在,他就是后来长期与 Lubinski 合作的 Woods。在 1951 年讨论 Klinkenberg 论文^[4]的会上, Woods 做了书面发言,提出了著名的乌兹模型。Woods 的书面发言随文献[4]一起发表了^[5],但 Woods 并未提出“虚力”概念,而是利用能量原理推导出了与 Klinkenberg 类似的判别中性点的公式,根据中性点的位置即可判断管柱的屈曲稳定性。

从文献[1]引用的参考文献可以看出,他获取的传统理论关于油井管柱稳定性的信息,基本上都来自中文文献,这是其信息不准确的主要原因。他引用的唯一一篇英文文献,是 1987 年出版的 Lubinski 论文集集中的一篇会议论文,该论文最早公开发表于 1951 年^[6]。Lubinski 在该论文中非常精辟地论述了油井管柱发生屈曲的临界条件,有力批驳了当时流行于美国油田现场的一种错误概念:油井管柱轴向“受压则屈曲,受拉则伸直”。可是该论文中并没有定义“虚构力”。而且,值得注意的是,就在该论文的引言中, Lubinski 明确说:“采用严格的静力平衡法,而不是能量法,……,有意思的是,两种完全不同的方法却精确地得到了相同的结果”。显然,文献[1]的作者对此内容疏于阅读了。

需要说明的是,“虚力”概念从提出到完善,有个发展过程。Lubinski 发现并提出了“虚力”,这是他的重大功绩;但他对“虚力”的定义,是不够严格的。他说“虚力” F_x 的大小正好等于活塞面积 A_i 乘以管内压力 p_i ,即 $F_x = A_i p_i$ 。根据这个定义,“虚力”的数值随着活塞面积的变化而变化:当 $A_i = A_s$ 时“虚力”最大,即 $F_x = A_s p_i$;而当 $A_i = 0$ 时“虚力”最小,即 $F_x = 0$ 。这就使人感到“虚力”存在不确定性,时有时无,难以捉摸。

之后,许多学者^[7-13]进行了探讨研究。如果把 Lubinski 定义的“虚力”表达式进行如下变换: $F_x = A_i p_i = (A_i - A_{AB}) p_i = A_i p_i - A_{AB} p_i$,就会发现式中

的 $A_{AB} p_i$ 是内压作用于环形台肩面积 A_{AB} 上的轴向拉力,此力一点也不虚,属于真实轴向力。显然, Lubinski 定义的“虚力”中,包含了真实轴向力。而 $A_i p_i$ 才是真正的“虚力”。

考虑到内压引起的“虚力”的作用效果,同时考虑管外压力的作用,正确的“虚力”表达式应该是 $F_x = p_o A_o - p_i A_i$ (p_o 为管外压力, A_o 为管断面的外圆面积)。为了不与 Lubinski 的“虚力”定义相冲突,后来学者使用了不同的术语,如“稳定载荷”^[8]、“稳定力”^[9,12-13]、“屈曲力”^[9],等等。尽管不同学者使用的术语不同,但其计算公式都是相同的。

还有一个长期困扰人们的问题是:为什么会有“虚力”?人们都知道,只有在液压环境下才会有“虚力”,没有液压是不会有“虚力”的。但是,液压是怎样产生“虚力”的?“虚力”的实质是什么? Lubinski 未回答,之后的许多涉及“虚力”及其应用的论文^[7-13],也都没有回答这些问题。20 世纪 80 年代,笔者曾发表论文^[14-15]探讨“虚力”的本质,但因思路不对而犯了错误。1995 年,笔者发表了《垂直井眼内钻柱轴向力的计算及强度校核问题研究》^[16],第一次根据三轴应力强度理论推导出了“虚力”和有效轴向力的计算公式,揭示了“虚力”的本质,证明了 $F_x = p_o A_o - p_i A_i$ 是名副其实的“虚力”。至此,“虚力”和有效轴向力不再是人为定义的术语,而是经过严格数学力学推导的物理量。此后,笔者又发表了多篇涉及“虚力”及其应用的论文^[17-26]和论著^[27]。可是,文献[1]都没有引用这些文献。

2 文献[1]的“真实模型”不真实

文献[1]中说:“两端导向力学模型与井下管柱的情况不符”。从文献[1]给出的“两端导向力学模型”的图形(见原文中图 1)以及对该模型的描述看,实际上指的是乌兹模型。文献[1]在否定乌兹模型之后,给出了自己的所谓“真实模型”,如图 3 所示。但笔者认为,文献[1]给出的“真实模型”并不真实。

1) 文献[1]说:“实际油井中,一是管柱悬挂,二是管柱两端固定”。在文献[1]看来,油井管柱只有 2 种模型,不是自由悬挂就是两端固定,这显然是不全面的。真实的油井管柱远不止这 2 种类型。笔者至少可以列出如图 4 所示的 6 种模型(图中, p_p 为来自地层的压力, kPa; γ_i, γ_o 分别为管内外流体的重率, kN/m³), 6 种模型的描述及其适用的油井管柱类型见表 1。

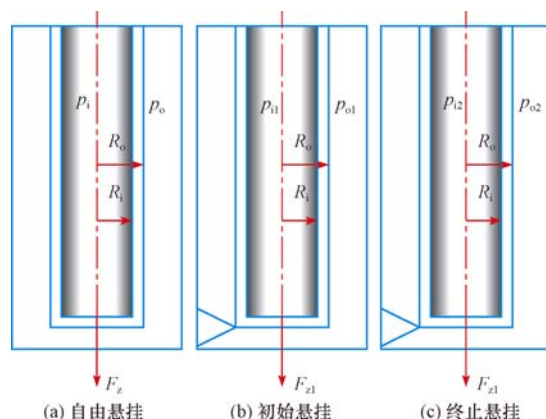


图 3 文献[1]给出的“真实模型”

Fig. 3 “Actual model” given by reference [1]

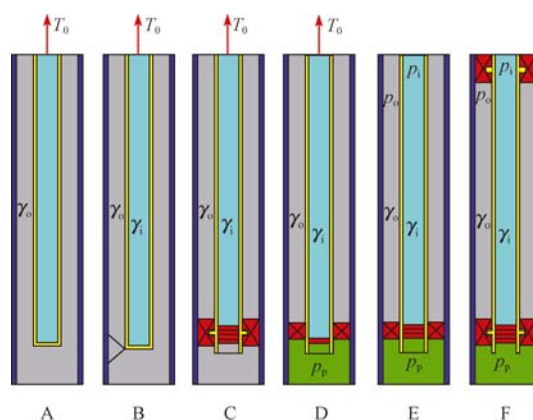


图 4 6 种油井管柱模型

Fig. 4 Six models of pipe string in oil wells

表 1 6 种管柱模型描述

Table 1 Description on six models of pipe string

模型代号	模型描述	适用的油井管柱类型
A	上端悬挂, 下端自由	正常作业的钻柱; 下入过程中的套管柱; 起下过程中的油管柱
B	上端悬挂, 下端固定, 但管内外液压仍可作用于底端面上	键槽卡钻或压差卡钻后仍可循环钻井液的钻柱
C	上端悬挂, 下端固定, 且管内外液压不能作用于底端面上	沉砂卡钻或井塌卡钻后的钻柱; 固井之后井口尚未装定的套管柱
D	上端悬挂, 下端内外封堵, 但管柱仍可轴向伸缩	中途测试钻柱
E	上端固定, 下端内外封堵, 但管柱仍可轴向伸缩	管外有封隔器, 管内有抽油泵, 没有用张力锚固定的抽油井油管柱
F	上端固定, 下端内外封堵并固定	已用张力锚固定的抽油井油管柱; 井口装定之后的套管柱

2) 文献[1]给出了两端固定模型, 并说这种下端固定“相当于水泥封固或卡瓦固定”。实际的套管

柱下端被水泥封固后,下端已经处在水泥石里面,管外的液压力不可能再进入到管柱下端面。但图 3(b)、图 3(c)中,管外的液压仍然可以作用于底端面上,这不符合套管柱固井后的真实情况。

3) 文献[1]说:图 3(b)中,管子悬挂,内压力为 p_{i1} ,外压力为 p_{o1} ,在管子下端受真实轴向拉力 F_{z1} 的作用,加上负后,在底端固定(相当于用水泥封固或卡瓦固定)。该说法不符合实际。

从实际的施工过程看,固井完成后套管柱的下端首先被固定,然后再进行井口装定(上端固定)。在固井之前和固井过程中,并没有给下端施加“真实轴向拉力 F_{z1} ”,而是在井口装定时,要在上端施加一个“装定力”。所以,两端固定模型实际上已知的是上端的“装定力”,并不是下端的轴向拉力。

而且,笔者有个疑问:在套管柱固井之前,用什麼办法在下端施加“真实轴向拉力”呢?又怎么知道该真实轴向拉力的大小?若在实验室,可在其下端挂一重物测量,但在井下这是无法操作的。

综上所述,文献[1]的“真实模型”并不真实。

另外,文献[1]对乌兹模型的否定也是不恰当的。乌兹模型的原图见图 5^[5]。在 Woods 之前,人们都是把管柱放在一个统一的液压环境中,管内壁、管外壁和管端受到的液压力都来自同一个压力系统,而且同时存在管柱和钻井液的重力作用。这样,管内外液压力对管柱稳定性的影响,与管柱的重力、钻井液的重力以及管端的液压力交织在一起,给研究带来较大难度。

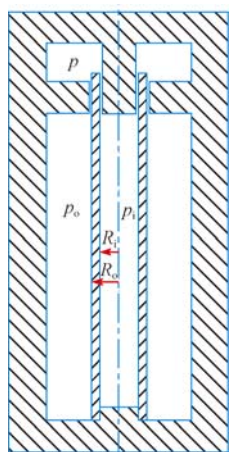


图 5 乌兹模型原图

Fig. 5 Original figure of Woods Model

乌兹模型可以分别给管内壁、管外壁和管端部施加不同的液压力。由于模型高度很小,液柱压力与施加的液压力相比,小到可以忽略;管柱的重力也

可以忽略。这就使问题得以简单化,非常有利于分别研究管内压、管外压和管端部压力的影响。乌兹模型是一个重大创新,受到学术界的推崇和赞赏,成为油井管柱力学研究的典范。

乌兹模型是一个理论研究模型。Woods 利用能量法(功能原理)推导出了作用于管内、外壁和端部表面上的液压力,对管柱稳定性影响的关系式,见式(1)~(3)。

稳定平衡时:

$$\sigma_a > \frac{\sigma_i + \sigma_r}{2} \quad (1)$$

中性平衡时:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_i + \sigma_r}{2} \quad (2)$$

不稳定平衡时:

$$\sigma_a < \frac{\sigma_i + \sigma_r}{2} \quad (3)$$

式中: σ_a 为由管端液压力 p 引起的轴向应力, kPa; σ_r, σ_i 分别为由管内外液压力 p_i 和 p_o 引起的管柱断面上的径向应力和周向应力, kPa。其中:

$$\frac{\sigma_i + \sigma_r}{2} = - \frac{p_o A_o - p_i A_i}{A} \quad (4)$$

式中: A 为管断面的截面积, m^2 。

式(4)实际为内外液压引起的虚应力 σ_x , σ_a 为端部液压引起的真实轴向应力,但当时 Woods 并没有使用“虚应力”和“真实轴向应力”等术语。20 世纪 60—80 年代,众多学者^[7-12]逐渐把 Woods 的公式与 Lubinski 的虚力概念结合起来,形成了判断管柱稳定性的经典公式,见式(5)~(7)。

稳定平衡时:

$$\sigma_e = \sigma_a + \sigma_x > 0 \text{ 或 } F_e = F_a + F_x > 0 \quad (5)$$

中性平衡时:

$$\sigma_e = \sigma_a + \sigma_x = 0 \text{ 或 } F_e = F_a + F_x = 0 \quad (6)$$

不稳定平衡时:

$$\sigma_e = \sigma_a + \sigma_x < 0 \text{ 或 } F_e = F_a + F_x < 0 \quad (7)$$

式中: σ_e 为有效轴向应力, kPa; F_e 为有效轴向力, kN; F_a 为真实轴向力, kN。

乌兹模型还是一个试验研究模型。Woods 用橡胶管作为管柱,端部用黄铜管连接并密封,上端腔室与大气连通,可以认为 $\sigma_a = 0$ 。根据管柱尺寸进行理论计算,当 $p_i : p_o = 16 : 9$ 时,管柱处于中性稳定状态。尽管由于密封处巨大的摩擦力使试验有一定误差,但试验中还是观察到:当外压超过内压的一半时,管柱始终伸直不屈曲;当外压减小到等于内压一半时,管子开始发生屈曲。试验结果有力证明了理

论推导的正确性。

显然,乌兹模型的初衷并不是要模拟某种具体的管柱,但得出的结论却可以适用于所有管柱。

3 传统的稳定性判别公式完全正确

文献[1]中讲:“对于自由悬挂管柱,无论加多大内压,只要材料不屈服,管柱只会伸长和变粗,而不会屈曲”,“而根据传统理论的判别公式判断则会屈曲”。由此证明传统理论的判别式“都是错误的”。

文献[1]显然对传统理论有误解,他获得的关于传统理论的信息是不准确的。事实上,根据传统理论的判别式,无论管内外液压力如何变化,自由悬挂管柱都不会发生屈曲。下面,笔者先简述一下传统理论的管柱稳定性判别式和判别方法。

传统理论根据有效轴向力来判别管柱的屈曲稳定性,有效轴向力的计算式为:

$$F_e = F_a + F_x = F_a + p_o A_o - p_i A_i \quad (8)$$

只要 $F_e \geq 0$,则管柱稳定,不会发生屈曲;如果 $F_e < 0$,则管柱不稳定,有可能发生屈曲。

对于图 3(a)的自由悬挂下端堵口管柱,在下端外力 F_z 等于 0 的情况下,并且不考虑管柱自身的重力和钻井液的重力,只研究内外液压力 p_i 和 p_o 对管柱稳定性的影响。根据管柱所受外力可计算出任意断面 M-M 上的 F_a 和 F_x 。如图 6 所示,管柱轴向所受的外力只有作用于底端面内外的液压力,则断面上 $F_a = p_i A_i - p_o A_o$ 。

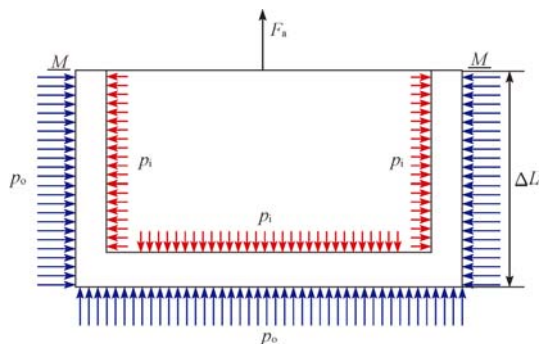


图 6 真实轴向力计算示例

Fig. 6 Calculation of actual axial force

根据传统理论,作用于管内壁和管外壁的液压力在管子断面引起的 $F_x = p_o A_o - p_i A_i$ 。

将上述 F_a 和 F_x 的表达式代入式(8),可求得任意断面上 $F_e = 0$ 。所以,不管内外液压力如何变化,任意断面的有效轴向力都等于 0,管柱都不可能

出现屈曲失稳。

显然,文献[1]对传统理论的否定,是不正确的。实际上,并不是传统理论错了,而是文献[1]错了。文献[1]没有搞明白传统理论中有效轴向力和真实轴向力的含义。在他引用的传统理论公式 $F_b = F_z + p_o A_o - p_i A_i$ 中,称 F_z 是真实轴向力,但他实际指的却是作用于下端的外力,混淆了内力和外力。看到公式中内压 p_i 的前面是负号,就认为在 $F_z = 0$ 情况下,内压增大,有效轴向力 F_b 必然减小,管柱必然会出现屈曲。试想想,如果传统理论的错误如此明显,为什么几十年来,无数专家学者潜心研究和应用,竟然都没有发现呢?

4 正确处理下端面液压力是关键

文献[1]说:在真实模型图 3(a)中,管柱悬挂内压力为 p_i ,外压力为 p_o ,管柱下端受真实轴向拉力 F_z 的作用,则用于管柱稳定性分析的等效轴向力 $F_a = F_z$ 。这段叙述有什么问题呢?众所周知,在管柱下端内外面还有液压力,如图 6 所示。这是实实在在的外力,它引起的轴向力为 $p_i A_i - p_o A_o$ 。可是,文献[1]却没有计算这个轴向力。为什么不计算这部分轴向力?文献[1]没有作任何解释。

接下来文献[1]又说:图 3(b)中,管子悬挂,内压力为 p_{i1} ,外压力为 p_{o1} ,在管子下端受真实轴向拉力 F_{z1} 的作用,加上负后,在底端固定(相当于用水泥封固或卡瓦固定),则用于管柱稳定性分析的等效轴向力 $F_{a1} = F_{z1}$ 。显然,这里又没有计算下端面上的液压力。为什么呢?也没有作任何解释。

没有计算下端面上的液压力,这是文献[1]理论推导过程中的一个明显漏洞。正确处理下端面的液压力,这是液压环境下油井管柱力学的核心问题,是获得正确研究结论的关键。那么,传统理论是怎样处理下端面液压力的呢?传统理论认为,由于液压力的存在,油井管柱的任意断面上都存在着两种轴向力:真实轴向力和有效轴向力。同时,在任意断面上还存在着“虚力”。三者都是内力,三者之间的关系可以表示为:有效轴向力 = 真实轴向力 + “虚力”^[16,27]。

真实轴向力是根据所有的外力,利用静力平衡原理计算的该断面上的轴向力。“虚力”是根据作用于该断面处的内外液压力计算的,其计算公式是 $F_x = p_o A_o - p_i A_i$ 。对于最简单的上端悬挂下端自由管柱,真实轴向力就等于采用“压力面积法”计算

的轴向力;有效轴向力就等于采用“浮力系数法”计算的轴向力。在油井管柱力学领域,曾经长期存在着2种轴向力的争论。正是由于发现了“虚力”,建立了正确的“虚力”表达式,并找到了三者间的关系式,才彻底平息了该争论。

传统理论处理下端面液压力的方法,是明明白白地进行计算(如图6所示),先计算真实轴向力 $F_a = F_z + p_i A_i - p_o A_o$ 。然后再计算断面上的“虚力” $F_x = p_o A_o - p_i A_i$,则有效轴向力 $F_e = F_a + F_x = F_z$ 。

传统理论根据真实轴向力和虚力最后计算的有效轴向力等于 F_z ,文献[1]没有计算端面液压力得到的等效轴向力也等于 F_z ,二者完全相同。既然如此,文献[1]的做法岂不是既正确又简单呢?回答是否定的。实际上,文献[1]的做法与传统理论毫无共同之处,是错误的,有以下3点原因:

1) 传统理论严格按照力学原理计算,清楚地知道为什么有效轴向力中没有了下端面液压力引起的轴向力;而文献[1]的推导不严格,存在着明显漏洞。

2) 图3(a)模型中的液压环境是油井管柱的一个特例, p_i 和 p_o 为非梯度压力,从井口到井底没有变化。仅仅在这个特例中,任意断面上的“虚力”与下端面液压力引起的轴向力,正好“大小相等,方向相反”,才在有效轴向力计算中完全消失了。所以,仅在这个特例下,文献[1]的等效轴向力与传统理论的有效轴向力才正好相等。但是,在真实的井眼中,管柱内外通常都有液柱压力,液柱压力是梯度分布的。该情况下,只有最低断面上的“虚力”与端面液压力引起的轴向力“大小相等,方向相反”。对于其他所有断面,都不可能“大小相等,方向相反”。要知道,判别管柱的稳定性,并非只判别最低断面,常常要判别失稳的管柱有多长、中性点在何处、不能仅仅计算最低断面的有效轴向力,而应该可以计算任意断面的有效轴向力。所以,在液柱压力的作用下,文献[1]的做法就不灵了。

3) 图3(a)模型中的管柱为下端自由的悬吊管柱,作用于内壁面和内端面上的压力是同一个内压系统,作用于外壁面和外端面上的压力是同一个外压系统。即使考虑了液柱压力,也只是油井管柱的一种液压环境。实际油井管柱的液压环境还有很多类型(如图4中所列)。对于图4中的C、D、E和F管柱,端部的液压力与下端自由管柱完全不同,而“虚力”的计算公式却是不变的。显然,对于所有这些管柱,文献[1]的做法也必然导致错

误结果。

文献[1]不承认“虚力”的存在,不懂得区别2种轴向力,因而不可能正确处理下端面上的液压力,这是该研究出现偏差的根本原因。

5 结束语

针对文献[1]的观点,有针对性地提出了不同的看法,认为关于A. Lubinski用能量原理定义了一个“虚构力”的说法是不符合事实的;文献[1]给出的“真实模型”不够真实,否定“虚力”、否定乌兹模型、否定传统理论也都不正确;文献[1]在其理论推导中不够严谨,在计算轴向力时没有计算底端面上的液压力,存在着明显的漏洞。科学研究是人类认识客观世界的一种途经,需经过艰难过程,犯错误是难免的,出现不同的学术观点也是必然的。学术观点不同,必然引起学术争论。正常的学术争论,可以明辨是非。笔者在谈论别人观点的同时,也把自己的观点(当然可能有错误观点)暴露无遗。笔者衷心希望文献[1]作者和学界同仁以及广大读者,共同讨论研究,坚持真理,修正错误。

参 考 文 献

References

- [1] 李子丰. 内外压力对油井管柱等效轴向力和稳定性的影响[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2011, 35(1): 65-67.
Li Zifeng. Influence of internal and external pressures on equivalent axis force and stability of pipe string in oil wells[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2011, 35(1): 65-67.
- [2] Lubinski A, Blenkarn K A. Buckling of tubing in pumping wells, its effects and means for controlling it[J]. Petroleum Transactions, AIME, 1957, 210: 73-88.
- [3] Lubinski A, Althouse W S, Logan J L. Helical buckling of tubing sealed in packers[J]. JPT, 1962, 14(6): 655-670.
- [4] Klinkenberg A. The neutral zones in drill pipe and casing and their significance in relation to buckling and collapse[J]. Drilling & Production Practice, 1951: 64-79.
- [5] Woods H B. Contribution to discussion of the paper by Klinkenberg A[J]//Klinkenberg A. The neutral zones in drill pipe and casing and their significance in relation to buckling and collapse. Drilling & Production Practice, 1951: 76-79.
- [6] Lubinski A. Influence of tension and compression on straightness and buckling of tubular goods in oil wells[J]. Trans. ASME, 1951, 31(4): 31-56.
- [7] Lubinski A. Influence of neutral axial stress on yield and collapse of pipe[J]. AIME Transactions, 1975(5): 400-406.
- [8] Chesney A J, Jr, Garcia J. Load and stability analysis of tubular

- strings[C]//Paper No. 69-PET-15 presented at the ASME Petroleum Mechanical Engineering Conference, Tulsa, Okla, 1969:21-25.
- [9] Goins W C. Better understanding prevents tubular buckling problems; part 1: buckling tendency, causes and resulting problems are described[J]. World Oil, 1980(1):101-105.
- [10] Kendall H A. How buoyancy affects drill-string behavior[J]. Oil and Gas Journal, May 20, 1978:151-157.
- [11] Hammerlindl D J. Basic fluid and pressure forces on oilwell tubulars[J]. Journal of Petroleum Technology, 1980, 30(1): 153-159.
- [12] Patillo P D, Randall B V. Two unresolved problems in well-bore hydrostatics; part 1: determination of the neutral point in a drill string [J]. Petroleum Engineer International, July, 1980:24-32.
- [13] Patillo P D. Reaffirming the API drill-string axial design equation[J]. Petroleum Engineering International, 1988: 35-37.
- [14] 韩志勇, 高德利. 关于钻柱稳定力等问题的探讨[J]. 石油钻采工艺, 1986, 8(5):9-16, 25.
Han Zhiyong, Gao Deli. Discuss on drill-string stable force and so on[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1986, 8(5):9-16, 25.
- [15] 高德利, 韩志勇. 弹性钻柱两个特殊点的意义及计算方法[J]. 华东石油学院学报:自然科学版, 1987, 11(1):19-27.
Gao Deli, Han Zhiyong. The definition of two special points of drill string and calculation methods[J]. Journal of East-China Petroleum Institute; Edition of Natural Science, 1987, 11(1):19-27.
- [16] 韩志勇. 垂直井眼内钻柱轴向力的计算及强度校核问题研究[J]. 石油钻探技术, 1995, 23(增刊1):8-13.
Han Zhiyong. Study on axial force calculation and strength check of drill string in vertical holes[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1995, 23(supplement 1):8-13.
- [17] 韩志勇. 倾斜井眼内钻柱的轴向力计算和强度校核[J]. 石油钻探技术, 1995, 23(增刊1):14-18.
Han Zhiyong. Study on axial force calculation and strength check of drill string in inclined holes[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1995, 23(supplement 1):14-18.
- [18] 韩志勇. 弯曲井眼内钻柱的轴向力计算和强度校核[J]. 石油钻探技术, 1996, 24(1):7-12.
Han Zhiyong. Study on axial force calculation and strength check of drill string in curved holes[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1996, 24(1):7-12.
- [19] 韩志勇. 关于钻柱上虚应力等问题的讨论[C]//石油大学(华东)青年科学技术协会. 石油科技发展与研究. 东营:石油大学出版社, 1996:98-101.
Han Zhiyong. Discussing on the problems of fictitious stress in the drill string[C]//Young Men's Association for Science and Technology of University of Petroleum (Huadong). Development & Research of Petroleum Technology. Dongying: Petroleum University Press, 1996:98-101.
- [20] 韩志勇. 循环条件下钻柱的轴向力计算和强度校核[J]. 石油大学学报:自然科学版, 1997, 21(2):29-32, 42.
Han Zhiyong. Calculating of axial force and strength testing for drill string under the circulating conditions[J]. Journal of the University of Petroleum, China; Edition of Natural Science, 1997, 21(2):29-32, 42.
- [21] 韩志勇. 钻柱强度计算新方法[J]. 石油大学学报:自然科学版, 1998, 22(3):39-42, 46.
Han Zhiyong. A new method of calculating strength of drill stem[J]. Journal of the University of Petroleum, China; Edition of Natural Science, 1998, 22(3):39-42, 46.
- [22] 韩志勇. 组合载荷下套管柱强度计算的三向应力圆理论[J]. 石油钻探技术, 2002, 30(4):1-5.
Han Zhiyong. Using tri-axial stress circle to design casing strength under combined loads[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2002, 30(4):1-5.
- [23] 韩志勇. 关于套管柱三轴抗挤强度设计问题的讨论[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2004, 28(5):43-48.
Han Zhiyong. Discussion on the new design standard for tri-axial stress anti-collapse strength of casing string[J]. Journal of the University of Petroleum, China; Edition of Natural Science, 2004, 28(5):43-48.
- [24] 韩志勇. 对我国《套管柱强度设计方法》标准的疑问[J]. 石油钻探技术, 2004, 32(5):1-5.
Han Zhiyong. Discussion on the revised standard: design method for casing string strength [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004, 32(5):1-5.
- [25] 韩志勇. 我国套管柱强度设计需要解决的几个重要问题[C]//苏义脑, 徐鸣雨. 钻井基础理论研究和前沿技术开发新进展. 北京:石油工业出版社, 2005:156-162.
Han Zhiyong. Some important problems needed solve of casing strength design in our country[C]//Su Yinao, Xu Mingyu. Drilling basic theory research & new progress of top technique development. Beijing:Petroleum Industry Press, 2005:156-162.
- [26] 韩志勇. 关于有效应力圆理论的讨论[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(5):1-4.
Han Zhiyong. Discussion on the effective-stress-circle theory [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(5):1-4.
- [27] 韩志勇. 液压环境下的油井管柱力学[M]. 北京:石油工业出版社, 2011:105-107, 111-121.
Han Zhiyong. Mechanics of tubular string in oil wells subjected hydraulic pressure[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011:105-107, 111-121.

[编辑 令文学]