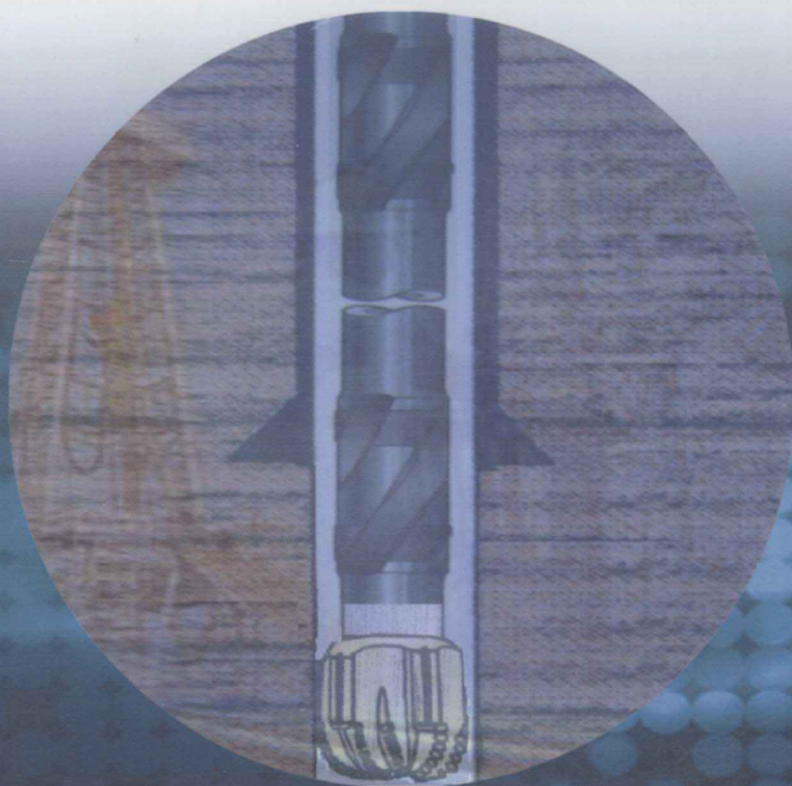


# 液压环境下的 油井管柱力学

韩志勇 著



石油工业出版社



**韩志勇**，男，汉族，中国石油大学（华东）石油工程学院教授、博导，1937年生于陕西省蓝田县，1962年毕业于北京石油学院油井工程专业，同年留校任教。主要研究方向是油气钻井力学和定向钻井理论与技术等。曾荣获省部级科技进步特等奖、重大科技成果奖、科技进步一等奖、教学成果一等奖等多项奖项，并荣获省部级优秀教师、优秀共产党员、模范共产党员等称号，1993年起享受国务院“政府特殊津贴”。

策划：张 镇 责任编辑：王金凤 封面设计：赛维钰 责任校对：王 蕾

ISBN 978-7-5021-8294-6



9 787502 182946 >

定价：80.00 元

# 液压环境下的油井管柱力学

韩志勇 著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书在总结前人研究成果的基础上,分别对各种液压环境、各种管柱结构、各种轨迹的井眼以及循环条件、非梯度压力、非浮体管柱等进行了详细的受力分析,推导了一些新公式,提出了新观点,得出了新结论,并将这些成果应用于套管柱强度设计中。

本书适合从事油井管柱力学研究的相关人员参考,也可供石油工程相关专业院校师生参考阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

液压环境下的油井管柱力学/韩志勇著.  
北京:石油工业出版社,2011.5  
ISBN 978-7-5021-8294-6

- I. 液…
- II. 韩…
- III. 油气钻井-井下管柱-动力学-研究
- IV. TE931

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 026770 号

---

出版发行:石油工业出版社  
(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)  
网 址:www.petropub.com.cn  
编辑部:(010)64523537 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店  
印 刷:北京华正印刷有限公司

---

2011 年 5 月第 1 版 2011 年 5 月第 1 次印刷  
787 × 1092 毫米 开本:1/16 印张:20  
字数:507 千字 印数:1—1000 册

---

定价:80.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

## 导 读 意 见

为了节省读者的时间,针对不同读者,作者提出如下建议:

如果您是一位年轻读者,例如大学生、研究生等,或者对油井管柱力学有关问题了解较少,建议您最好从头到尾逐章逐节地阅读。

如果您对油井管柱力学有关问题已经了解较多,只是想看看本书作者有什么新的研究成果,建议您先阅读第三章的第十节。如果对该节内容有疑义,再从第三章的第一节向后阅读。

如果您仅仅对第四章套管柱强度设计理论和方法有兴趣,建议您最好先阅读第三章的第十节,然后再阅读第四章。

如果您是一位钻井专家或管柱力学专家,笔者恳请您从头到尾阅读本书,以便发现和指出本书中存在的问题,并提出您的意见。

# 序

本书作者希望我为本书写序,我欣然同意。

我认识作者是在50年前他上大学期间,那时他是我的学生。在做大学毕业论文时,他就显露出勤于钻研、喜欢搞理论研究和公式推导的特点。毕业留校后成为我的同事,长期和我在一个教研室,从事教学、科研、教材编写等工作,各方面都做出了喜人的成绩。改革开放之后,我们一起连续参加了三个五年计划的国家重点科技攻关项目的研究。他在定向钻井理论与技术方面的研究成果是众所周知的。在油井管柱力学方面,特别是关于液压环境对管柱受力的影响方面,写过一些很有独特见解的论文。但是,关于这个命题能够写成一本几十万字的专著来,这是我没有想到的,因为这个课题并不是很大。当我阅读了《液压环境下油井管柱力学》书稿的主要内容之后,我的感受是:震惊、欣喜和赞赏。

令人震惊的是,关于液压对管柱受力影响这个问题,在历史上有过如此激烈的争论,而且这种争论时起时伏,延续至今。在我国学术界和工程界,这个争论实际上是存在的,但长期以来却没有引起我们的重视。

令人欣喜的是,作者在书中把这个争论的方方面面摆在了我们的面前,使我们了解了60多年来这场争论的过程和全貌,使我们看到这场争论的实质和意义。他敲起了重锤响鼓,让我们重视这个争论。“液压对油井管柱受力的影响”这个课题,不仅是油井管柱力学的一个重要部分,而且是非常重要的基础内容。

更令人欣喜的是,作者对此问题的研究已经达到了相当的广度和深度。从广度看,书中第二章专门介绍了60多年来前人的研究成果。虽然前人的论文早已发表,但由于语言的障碍和资料获取的渠道等原因,我国读者很难对此问题有一个全面的了解。书中对前人研究成果进行了集中的、系统的介绍,这是很难得的。第三章讲述作者自己的研究成果,更是范围广泛:从液压环境看,有管内外液体重率相等、不相等、分段不相等,有静液柱压力、循环压力、非梯度压力等;从管柱组合看,有单一管柱、复合管柱、非浮体管柱等;从井眼轨迹看,有垂直井眼,倾斜井眼、定向井井眼等。从研究深度看,书中给出的三个最重要的公式,以及提出的套管柱强度设计的新理论、新方法,都已超越前人,具有非常重要的理论价值和应用价值,这些都值得我国学术界和工程界认真讨论和研究。

我的赞赏是多方面的。

首先,我赞赏作者实事求是的态度。对前人的研究成果,它既给予充分的尊重和高度评价,彰显他们的历史功绩,但又不迷信和盲从,敢于指出他们研究中的缺点和不足,甚至是错误。这种实事求是的态度,还表现在对待自己的错误上。在学术著作中,用整整一节专门写自己犯过的错误,这是非常少见的。公开地承认错误,批判自己的错误,这是需要足够勇气的。在科学研究中,不犯错误是不可能的,关键在于能够认识错误,改正错误。从错误中学习,这也是一个重要的学习方法。这种态度也体现了对读者负责的态度。

我还赞赏作者敢于争论的学风。书中明确指出,在我国钻井学术界存在着一些似是而非的观点,在石油工程设计中存在着一些不正确的做法,而且作者以争论的姿态明确地摆出了自己的观点。这就形成了针锋相对之势。第二章中每一节都有“本节评注”,既肯定前人的成果,又指出前人的不足。在全书中我们还可以看到大量的以“讨论”方式出现的对不同观点的

争论。学术问题是需要争论的,科学问题只有在争论中才能明辨是非。我们的学术界应该鼓励和提倡这种勇于争论、追求真理的风气。

我也赞赏作者处处为读者着想的写作风格。在书中,他对鲁宾斯基处处为读者着想的良苦用心大加赞颂,他自己又何尝不是这样呢。在进行理论分析和公式推导中,总是从基础理论和基本原理出发。对于重要的公式,他总是给出详细的推导过程。为使读者易于理解,书中的叙述总是采取由易到难、由简到繁、由浅入深,层层剥离,步步深入。一些疑难问题的解决,往往需要巧妙的思路。作者总是从思路讲起,并采用讲课的口吻进行阐述,循循善诱,娓娓道来。他讲理论总是与工程实践相结合,书中不仅有大量的计算例题,而且还对许多工程实际问题给出新的解释或新的结论。

我更赞赏作者的创新精神和实干精神。创新是一个民族的灵魂,当然也是科学技术研究者的灵魂。在书中我们会看到大量的新内容:新概念、新观点、新理论、新公式等。特别是液压影响下管柱力学的三个最重要的公式,具有突出的创新性。这是油井管柱力学的最新成果,不仅具有重要的理论意义,而且必将广泛地应用于实际的工程计算中。书中的另一个亮点,是关于套管柱强度设计理论和方法问题的研究。不仅指出目前套管柱强度设计中存在的问题,而且提出了解决的对策。不仅提出了“有效应力圆理论”,而且推导了全套的计算公式。当然,创新并不是信手拈来,一蹴而就。创新是需要灵感的,而灵感并不是凭空出现的。只有在大量积累的基础上,经过长期的深思熟虑之后,才可能出现创新灵感,找到那张可以一指捅破的窗户纸,拿到那把能打开厚重城门的钥匙。作者从20世纪80年代初开始,抓住这个课题,30年不放手,不断地从失败与错误中站起来,终于达到了这个高度。所以,创新不仅需要巨大的勇气,而且需要废寝忘食、呕心沥血的艰辛劳动,需要有顽强的实干精神。

这本书很值得每一位从事石油工程的人员阅读和学习。面对书中提出的各种问题,每一位从事石油工程特别是钻井工程的技术人员,都需要想一想:“我是什么观点,我有什么看法?”

最后,从认识规律来讲,书中提出的大量新概念、新理论、新方法和新公式等,不可能没有错误,不可能都是完全正确的。这本书的公开出版,正如作者在前言中所希望的,可以起到“一石激起千层浪”的效果和“抛砖引玉”的作用。书中的每一部分内容,都可以成为大家讨论、争论的话题。我衷心地期望大家都来关心这个课题,推动我们的学术研究更加繁荣。

中国石油大学教授、  
博士生导师

刘希圣  
2010.11.17  
于北京

# 前 言

油井管柱包括钻柱、套管柱和油管柱。

本书名为《液压环境下的油井管柱力学》，重点研究液压对油井管柱受力的影响。液压对油井管柱受力的影响，最终将影响油井管柱的稳定性和强度特性。所以，本书研究的主要内容是：在各种液压环境下，油井管柱的稳定性分析和强度计算；或者说，是研究各种液压环境对油井管柱的稳定性和强度的影响。

乍一看，这个内容似乎很简单。但实际上却相当复杂而且很容易搞错。关于液压环境如何影响管柱的受力和稳定性问题，在钻井学术史上曾经引发过激烈而长期的争论。几十年来，经过许多专家学者的潜心研究，取得了重大的成果，许多问题已经得到解决。但是有些深层次的问题仍研究得很不够。到目前为止，在国内外石油钻井学术界和工业界，仍然存在着一些似是而非的认识和观点。在工程设计计算中，仍存在着一些不正确的做法。在我们的一些大学教材、技术手册、专业标准、专著论文等中，许多不正确的内容还有待纠正。

笔者第一次遇到液压对油井管柱受力影响的困惑问题，是在 20 世纪 80 年代初。当时在为本科生讲授“钻柱”一章时，在备课中发现钻柱轴向力的计算有两种方法，即压力面积法和浮力系数法。两种方法计算的轴向力不相等。一个困惑不解的问题摆在面前：哪种方法是正确的？一时无法回答这个问题。查阅可能找到的文献资料，均得不到解答。出于教学的需要和兴趣爱好，笔者开始了这方面的学习和研究。

经过一段时间的学习和研究，对一些问题形成了自己的观点，并将之充实到课堂教学的内容中。80 年代中期，适逢我国钻井学术界开展关于“中性点”等问题的讨论，于是将自己的一些心得和看法，写成了一篇论文，于 1986 年发表出来。但不久就发现自己的有些观点是不正确的（详见本书第一章第三节）。接着就有人发表论文提出质疑。正当为自己的论文有“创新性”提法而沾沾自喜时，却发现论文是有错误的，这个打击是可想而知的，于是下决心继续研究。

又经过了大约 10 年的学习和研究，对一些问题，认为自己的观点可以自圆其说了。在 90 年代中后期，将有关研究成果进行了整理，连续发表了 5 篇论文。以这 5 篇论文为初步框架，以“液压对油井管柱受力的影响”为题目，充实到“油井管柱力学”课程中。可是不久就发现还有许多问题没有解决，有些内容没有说清楚，有些理论推导过程甚至是错误的。但这时基本的研究思路和方法已经形成，初步的框架已经有了，只要认识错误，修正错误，继续努力，就会走向正确，就会有新的进展。

从 21 世纪开始，在继续研究“液压对油井管柱受力的影响”的有关原理问题的同时，将目光投向了套管柱强度设计方法方面。当时主要思考的一个问题是：为什么钻柱轴向力的计算国内外都采用浮力系数法，而套管柱强度设计中轴向力的计算国外都采用压力面积法？搞明白这个问题并不容易。因为这个问题涉及现行套管柱强度设计理论的建立过程。由于之前对套管柱的问题了解得太少，只得从头学起，有些问题需要追根溯源，查阅早期文献资料。

经过一段时间的学习和研究，发现我国现行的套管柱强度设计方法中，有许多做法是不正确的，是自相矛盾的。于是，从 2000 年开始，陆续发表了 5 篇关于套管柱强度设计问题的论文。对于套管柱强度设计的传统理论和传统做法来说，我的这些论文显然是“叛逆性”的。



上述论文发表后,又发现有些观点有错误。随后,有的学者发表了不同的看法和批评意见。有些批评意见是正确的,有些则是不正确的。

一个偶然的时机,触发了写《液压环境下的油井管柱力学》的想法。那是2003年,某杂志转来一篇论文,要求笔者给予评审。论文的核心观点是:钻井液的压力可能导致钻铤发生屈曲,从而导致井斜。这个观点显然是错误的,是历史上早已被否定的观点,因而其结论也是不正确的。在编辑人员的帮助下,笔者和该论文作者见了面并交换了意见,达成了共识。但这件事发人深思。该论文提出的问题,乃是60多年前曾经在钻井学术界引发激烈争论的问题。虽然众多的前辈发表了论文,还有笔者20世纪90年代的论文,都讲述过这个问题,本以为问题已经解决了,可是还会有人提出来(由于该论文未能发表,征得原作者同意,本书以“附录”的方式摘录了该论文,供读者参考)。联想到在教学课堂上,每当提出液压环境对管柱受力影响的一些问题进行讨论时,几乎所有的学生都感到茫然、困惑,不能正确地回答。这种情况表明,需要写一本全面地、详细地阐述液压对油井管柱受力影响的书。

写这样的一本书谈何容易!遇到的最大困难是国外文献资料的获取。虽然在众多朋友的帮助下,获得了不少文献资料,但仍有许多资料未能得到。经过几年的艰辛努力,本书终于写成了。但这仅仅是笔者一段时间的研究成果,即使是在本书编写过程中,也是不断地有新的认识、新的公式推导,并且经过多次修改。所以,错误一定是难免的。之所以敢于拿出来出版,也是希望本书能起到“一石激起千层浪”的效果和“抛砖引玉”的作用,引起我国钻井学术界的进一步研究和讨论。

在本书撰写过程中,得到了许多人的帮助。借本书出版之际,我要首先感谢我的老师刘希圣教授多年来对我的教诲和鼓励,并感谢他热情地为本书写序。还要感谢中国石油大学(华东)石油工程学院的领导和老师们在我退休之后的十余年来对我的关心和支持。

感谢所有曾经听过我的“油井管柱力学”课的学生。正是经过这门课的多次教学实践,与同学们共同探讨,教学相长,才使得研究内容不断深入,认识不断深化。还要感谢胜利油田工程处的张桂林处长和胜利油田钻井研究院的高级工程师高兴坤等,他们常常为我答疑解惑,使我了解到现场的实际做法。

感谢远在他乡的张建国同志,在英文资料的获取方面给予了大力帮助。感谢中国石化石油工程技术研究院首席专家刘修善教授对本书出版的支持。

石油工业出版社对本书给予了出版基金资助,出版社的编辑和有关评审专家对本书提出了非常宝贵的修改意见,笔者在此表示衷心的感谢。

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	(1)
第一节 60年前引发的争论 .....	(1)
第二节 关于浮力问题的讨论 .....	(7)
第三节 本人曾经犯过的错误 .....	(17)
附录一 关于浮力问题的似是而非观点(摘录) .....	(23)
附录二 《浅析钻井过程中浮力对井斜的影响》(摘录) .....	(24)
参考文献 .....	(28)
<b>第二章 前人研究中的是与非</b> .....	(30)
第一节 汉陡门:液压环境下杆柱屈曲的临界条件 .....	(30)
第二节 豪金斯:液压环境下管柱轴向应力的实验测量 .....	(33)
第三节 霍尔姆奎斯特:静液压力对管柱屈曲的影响 .....	(35)
第四节 鲁宾斯基:钻柱屈曲的临界钻压 .....	(38)
第五节 克林肯伯格:两个中性区及其意义 .....	(47)
第六节 乌兹:管子的屈曲稳定性模型 .....	(52)
第七节 鲁宾斯基:管柱屈曲的临界条件 .....	(54)
第八节 鲁宾斯基:虚力与真实力概念的提出 .....	(66)
第九节 鲁宾斯基:中性轴向应力与塑性圆理论 .....	(76)
第十节 汉默林陡:中性点的通用公式 .....	(84)
第十一节 稳定载荷与稳定力的概念 .....	(89)
第十二节 有效轴向力与真实轴向力 .....	(91)
第十三节 阿德诺埃:广义浮力系数 .....	(97)
参考文献 .....	(103)
<b>第三章 液压影响下的三个最重要公式</b> .....	(105)
第一节 液压环境下管柱屈曲的条件 .....	(105)
第二节 垂直井眼内管柱的受力分析 .....	(111)
第三节 倾斜井眼内管柱的受力分析 .....	(121)
第四节 截断体液压力合力的处理方法 .....	(128)
第五节 定向井管柱的受力分析 .....	(134)
第六节 循环条件下管柱的受力分析 .....	(147)
第七节 非梯度压力对管柱受力的影响 .....	(156)
第八节 管柱在井下实际长度的计算 .....	(171)
第九节 非浮体管柱的受力分析 .....	(180)
第十节 本章总结与问题讨论 .....	(198)

附录 浮力系数计算公式的证明 .....	(207)
参考文献 .....	(211)
<b>第四章 套管柱强度设计理论和方法研究 .....</b>	<b>(213)</b>
第一节 概述 .....	(213)
第二节 现行的套管柱组合强度设计理论 .....	(215)
第三节 组合强度设计的有效应力圆理论 .....	(237)
第四节 套管柱强度设计存在的问题及对策 .....	(259)
第五节 套管柱井口装定的设计计算 .....	(277)
参考文献 .....	(298)
符号说明 .....	(300)
后记 .....	(308)

# 第一章 绪 论

## 第一节 60年前引发的争论

60年前,美国钻井学术界引发了一场围绕钻柱浮力问题的争论。这场争论的余波,至今尚未平息。本书的绪论,就从讲述这场争论开始。

### 一、争论的起源

20世纪40年代,世界石油钻井技术开始走向科学化阶段。科学化进程的标志之一,就是人们对井下频繁出现的钻杆疲劳破坏进行调查和研究,寻找科学解释和预防方法。

因为疲劳破坏必然在钻杆上存在交变应力。出现交变应力有两种可能:一种是由于钻杆承受了压应力而失稳弯曲,在旋转钻进过程中出现弯曲交变应力;另一种是钻柱上既不受拉也不受压的中性应力面处在钻杆上,在钻进过程中,中性应力面的上下跳动在钻杆上引起拉压交变应力。为了保护钻杆,有人提出应该使用足够多的钻铤,确保钻杆不承受压应力,并确保中性应力面落在钻铤上。但是,究竟应该使用多少钻铤才足够呢?回答这个问题的关键,在于对钻柱的轴向力进行计算。正是在对钻柱进行轴向力计算时,出现了问题,发生了分歧。

在争论之前,现场的工程技术人员根据钻压大小和钻铤在钻井液中的浮重<sup>●</sup>来计算钻铤的需要长度。需要的钻铤长度不随井深的增加而增长。

1946年,法国人本哈德(J. P. Bernhard),第一个发表论文<sup>[15]</sup>,对现场的做法提出异议。他认为作用于钻柱最底端的液压力随着井深增加而增大,所以需要的钻铤长度也应该随着井深的增加而增长。

1948年,H. de Wilde提出了类似的观点<sup>[16]</sup>。

1949年,John M. Pane发表了《20000英尺钻井的装备与技术的研究》论文<sup>[17]</sup>。豪金斯和拉芒特(Merray F. Howkins, Norman Lamont)发表了《钻柱轴向应力分析》的论文<sup>[18]</sup>。他们都得出了与本哈德同样的结论。

这种观点在豪金斯论文<sup>[18]</sup>中表达得最为完整,其主要观点有如下两点。

(1) 钻柱底面上的液压力,随着井眼深度的增加而增大。所以随着井深的增大,中性应力面将向上移动,可能导致钻杆受压。随着受压段钻杆长度的增长,下部钻杆将发生屈曲。这将导致钻杆出现疲劳破坏而失效。

(2) 为了避免钻杆的疲劳破坏,应该控制中性应力面的位置,使之处在钻铤上。所以随着井深的加深,应增加钻铤长度。论文以4½in钻杆配合6in钻铤为例,豪金斯得出了一个粗略的规律:井眼每加深1000ft,钻铤应增加30ft多一点。

豪金斯等人观点的核心是液柱压力可能导致钻柱发生屈曲。

豪金斯的观点在当时具有广泛的代表性。关于液柱压力能否导致钻柱屈曲的争论在此之

---

● 浮重一词在国内较为流行,国外有人称为有效重力。考虑到较为流行这个因素,本书多数情况下使用浮重一词,有时从力的角度称为浮重力。

前早就存在。豪金斯的论文是以辩论的姿态出现的,代表了相当多人的观点。

但是,另一部分人坚持认为现场原来的做法是正确的,认为钻铤的使用长度与井深没有关系。这部分人以霍尔姆奎斯特和鲁宾斯基等为主要代表。

就这样,围绕着钻铤长度的计算问题,形成了两派观点。

两派观点的第一次面对面公开交锋,是在1949年对豪金斯论文的专家讨论会上。所有发言者都对豪金斯关于静液柱压力可能导致管柱屈曲的观点,持反对态度。豪金斯在自己的论文中说,自己的观点与 Grant 和 Texter 论文<sup>[19]</sup>的观点一致。可是,具有讽刺意味的是,论文[19]的作者之一 H. G. Texter 首先站出来发言,明确表示不同意豪金斯关于液柱压力具有使下部钻柱发生屈曲趋势的观点。换句话说,不同意作者在论文中说的“要保持钻杆不受压,每增加1000ft井深,需要增加30ft多点的钻铤长度”。讨论会上的重头戏,是著名的力学专家霍尔姆奎斯特的长篇发言,详细论证了静液压力不可能导致钻柱屈曲的原因(霍尔姆奎斯特发言的主要内容,将在本书第二章中详细介绍)。

两派观点的争论,就此展开。

## 二、主要的争论点

为使读者先对争论的问题有个基本的了解,我们先根据后来的争论情况,梳理一下主要的争论点。为了便于理解,给出一个例题计算进行对照。如图1-1-1所示,管外径0.127m,内径0.1086m,钻井液密度1.2kg/L, A—A断面距离底面100m。

争论点1:如何计算钻井液对管柱的浮力?

(1)一部分人认为,根据流体静力学原理,钻井液的浮力等于钻井液作用于所有与液体接触的钻柱表面上的液压力的合力。由于井眼垂直,作用于钻柱内外侧表面上的液压力互相平衡并抵消,只剩下作用于钻柱底端面上的液压力。所以,作用于钻柱上的浮力,是一个集中力,并且集中作用于钻柱的底端面上。浮力的大小等于作用于底端面上的液压力(压强)乘以钻柱底端面的面积。根据例题条件,底端面上的液压力为:

$$p_d = \frac{3000 \times 1.2 \times 1000 \times 9.80665}{10^6} = 35.30394 \text{MPa}$$

底端面积为:  $A = \frac{\pi}{4}(0.127^2 - 0.1086^2) = 0.00340473 \text{m}^2$

则浮力为:  $B = p_d A = 120.20047 \text{kN}$

如果假想从A—A断面处把钻柱分开,对于图1-1-1右面的分离体而言,作用于底端面上的浮力仍然是120.20047kN。

为了叙述方便,以下文中把这部分人称为“前部分人”。

(2)另一部分人则认为,根据阿基米德原理,浮力等于物体排开液体的重力。对于整体钻柱来讲,其体积为:

$$V = \frac{\pi}{4}(0.127^2 - 0.1086^2) \times 3000 = 10.21419737 \text{m}^3$$

钻井液的重率为:

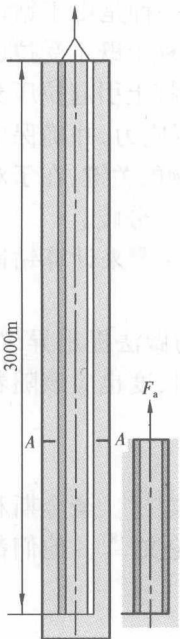


图1-1-1  
例题用图

$$\gamma_y = 1.2 \times 9.80665 = 11.76798 \text{ kN/m}^3$$

则整体钻柱的浮力为:

$$B = V \cdot \gamma_y = 120.20047 \text{ kN}$$

显然,就钻柱整体而言,这个计算结果与前部分人的结果相等。但是,这部分人认为,浮力不是集中力,浮力乃是分布力,沿着钻柱长度分布。各部分钻柱,排开液体的体积不同,受到的浮力就不同。对于图 1-1-1 中右边的分离体而言,其体积为:

$$V_1 = \frac{\pi}{4} (0.127^2 - 0.1086^2) \times 100 = 0.34047325 \text{ m}^3$$

它所受到的浮力应该等于该分离体排开的液体重力,即:

$$B_1 = V_1 \cdot \gamma_y = 0.34047325 \times 11.76798 = 4.00668234 \text{ kN}$$

为了叙述方便,以下文中把这部分人称为“后部分人”。

争论点 2: 如何计算任意断面的轴向力?

假想从 A—A 断面处把钻柱分开,把下半截分离体作为研究对象,建立力学平衡关系式,即可求得 A—A 断面上的轴向力  $F_a$ 。但是由于对分离体上浮力的计算方法不同,计算轴向力的方法也就不同。

如图 1-1-2 所示,分离体钻柱在空气中的重力为:

$$W_1 = V_1 \cdot \gamma_s = 0.34047325 \times 7.85 \times 9.80665 = 26.21038033 \text{ kN}$$

(1) 前部分人给出的分离体受力模型,如图 1-1-2(a) 所示,可得如下力学平衡式:

$$F_a = A_p \cdot \Delta D_1 \cdot \gamma_s - B \quad (1-1-1)$$

式中  $A_p$ ——钻杆截面积;

$\Delta D_1$ ——自管柱下端算起的计算断面的高度;

$\gamma_s$ ——钢材的重率。

根据例题给定的数据,可得:

$$F_a = W_1 - B = 26.21038033 - 120.2004703 = -93.99008997 \text{ kN}$$

由于式中的浮力  $B$  是根据底端面上的压力乘以面积得到的,所以这种计算轴向力的方法被称为压力面积法。

(2) 后部分人给出的分离体受力模型,如图 1-1-2(b) 所示,得到的力学平衡式为:

$$F_a = W_1 - B_1 = A \cdot \Delta D_1 \cdot \gamma_s - A \cdot \Delta D_1 \cdot \gamma_y = A \cdot \Delta D_1 \cdot \gamma_s \left( 1 - \frac{\gamma_y}{\gamma_s} \right) = W_1 \cdot K_f$$

$$F_a = A \cdot \Delta D_1 \cdot \gamma_s \cdot K_f \quad (1-1-2)$$

式中  $K_f$ ——浮力系数,  $K_f = 1 - \frac{\gamma_y}{\gamma_s}$ 。

$$F_a = W_1 \cdot K_f = 26.21038033 \times \left( 1 - \frac{1.2}{7.85} \right) = 22.20369799 \text{ kN}$$

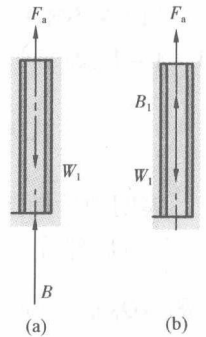


图 1-1-2 两种轴向力计算方法

$$\text{由于 } F_a = W_1 - B_1 = V_1 \cdot \gamma_s - V_1 \cdot \gamma_y = V_1 \cdot \gamma_s \left( 1 - \frac{\gamma_y}{\gamma_s} \right) = W_1 \cdot K_f$$

由公式可看出,钻柱任意断面上的轴向力等于该断面以下钻柱在空气中的重力乘以浮力系数。所以这种计算轴向力的方法被称为浮力系数法。

显然,计算钻柱轴向力有两种方法:前部分人采用压力面积法,后部分人采用浮力系数法。这两种方法计算的轴向力有很大差别,不仅数值大小差别很大,而且前者是负值,是压力,后者却是正值,是拉力。

争论点3:如何计算管柱上的中性点位置?

由于钻柱的靠下部分要承受来自钻井液压力的作用,在施加钻压以后还要承受来自井底的反作用力,从而处在受压状态,而靠上部分则处在受拉状态。这样在钻柱上必然存在一个“既不受压也不受拉”的断面,当初人们称为中性面(neutral plane)。由于轴向力计算方法不同,所以中性面的位置也就不同。

(1)在不施加钻压的情况下,前部分人主张的中性面,距离钻柱底端的高度,可令公式(1-1-1)等于0,求解式中的 $\Delta D_1$ 而得到。令 $F_a = A \cdot \Delta D_1 \cdot \gamma_s - B = 0$ ,则:

$$\Delta D_1 = \frac{B}{A \cdot \gamma_s} = \frac{120.2004703}{0.00340473 \times 7.85 \times 9.80665} = 458.5987261 \text{ m}$$

表明中性面距离管柱底端的高度为458.5987261m。

(2)后部分人主张的中性面,在不施加钻压的情况下,可令公式(1-1-2)等于0,求解式中的 $\Delta D_1$ 而得到。令 $F_a = A \cdot \Delta D_1 \cdot \gamma_s \left( 1 - \frac{\gamma_y}{\gamma_s} \right) = 0$ 。显然, $\Delta D_1 = \frac{0}{A \cdot \gamma_s \cdot K_f} = 0$ 。表明中性面就在管柱的底端面上。

如果施加钻压 $W_p = 100 \text{ kN}$ 后,中性点位置的计算如下。

前部分人计算的中性点高度为:

$$\Delta D_1 = \frac{B + W_p}{A \cdot \gamma_s} = \frac{120.2004703 + 100}{0.00340473 \times 7.85 \times 9.80665} = 840.1269555 \text{ m}$$

后部分人计算的中性点高度为:

$$\Delta D_1 = \frac{100}{A \cdot \gamma_s \cdot K_f} = \frac{100}{0.00340473 \times 7.85 \times 9.80665 \times 0.84713376} = 450.3754288 \text{ m}$$

显然,不管是否施加钻压,两种方法计算的中性面位置,都有很大的差别。

争论点4:浮力能否引起钻柱屈曲?

在争论点3中,当没有施加钻压时,前部分人认为由于钻井液的浮力作用,在管柱上存在一个中性面。中性面以下管柱承受压应力,以上则承受拉应力。现在的问题是,中性面以下承受压应力的管柱是否可能发生失稳屈曲?

对此问题的回答有两种。

(1)前部分人认为,中性面以下的压应力来自作用于管柱底端面上的液压力,对于垂直井来说,该液压力乃是集中力,其效应与钻压是相同的,如果该液压力过大,必然引起管柱失稳屈曲。

(2)后部分人则认为,浮力只能使钻柱的重力减轻,不会导致钻柱屈曲失稳。只有钻压过

大才可能引起管柱失稳屈曲。

两种回答都需要能够使对方完全信服的科学证明。这正是钻井科学化要解决的问题。于是引起了后来许多人进行研究,试图给出正确的解释。

争论点 5:如何计算需要的钻铤长度?

前述的争论点 4 是个非常重要的问题。之所以重要,是因为对此问题的回答,将在钻井工程实践中,给出差别巨大的不同做法。

(1)前部分人认为,既然浮力有可能引起管柱发生屈曲,那么屈曲后的管柱将会承受弯曲应力,在钻柱旋转时就会变成交变的弯曲应力,就会导致钻柱发生疲劳破坏。在 20 世纪 40 年代出现的大量钻杆疲劳破坏,人们正在寻找原因。为了防止钻杆发生疲劳破坏,就必须避免钻杆受压。这就需要在钻柱上增加足够数量的钻铤,使中性面落在钻铤上。这种观点认为,钻铤长度的确定,既要考虑钻压,还要考虑钻井液的浮力。钻铤长度的计算公式应该是:

$$L_c \geq \frac{W_p + B}{A_c \gamma_s} \quad (1-1-3)$$

式中  $B$ ——整体钻柱所受到的浮力;

$A_c$ ——钻铤截面积。

设钻柱总长度为  $L$ ,整体钻柱所受到的浮力  $B$  可用下式计算:

$$B = (L - L_c)A_p \gamma_y + L_c A_c \gamma_y \quad (1-1-4)$$

将式(1-1-4)代入式(1-1-3)中,可解出钻铤长度  $L_c$ :

$$L_c = \frac{L + \frac{W_p}{A_p \gamma_y}}{\frac{A_c}{A_p} \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_y} - 1 \right) + 1} \quad (1-1-5)$$

假如使用 7in 钻铤,外径  $\phi 178\text{mm}$ ,内径  $\phi 57\text{mm}$ 。钻压为 100kN。

$$\text{钻铤截面积: } A_c = \frac{\pi}{4} (0.178^2 - 0.057^2) = 0.0223328\text{m}^2$$

$$\text{钻杆截面积: } A_p = \frac{\pi}{4} (0.127^2 - 0.1086^2) = 0.00304047\text{m}^2$$

$$\text{则: } L_c = \frac{3000 + \frac{100}{0.00304047 \times 1.2 \times 9.80665}}{\frac{0.0223328}{0.00304047} \times \left( \frac{7.85}{1.2} - 1 \right) + 1} = 147.1445910\text{m}$$

(2)按照后部分人的观点,静液柱压力不会引起钻柱屈曲,在确定钻铤长度时就没有必要考虑静液柱压力的影响,只考虑钻压就足够了。钻铤长度的计算公式应该是:

$$L_c \geq \frac{W_p}{q_c K_f} \quad (1-1-6)$$

式中,  $q_c = A_c \cdot \gamma_s = 0.0223328 \times 7.85 \times 9.80665 = 1.71922813\text{kN/m}$

$$K_f = 1 - \frac{\gamma_y}{\gamma_s} = 1 - \frac{1.2}{7.85} = 0.84713376$$



$$\text{则: } L_c \geq \frac{100}{1.711922813 \times 0.84713376} = 68.66169227 \text{ m}$$

显然,这两种方法计算的钻铤长度相差很大。在工业界形成无所适从的局面。究竟哪一派观点是正确的?必须从实践和理论两个方面,给予正确的回答。

### 三、争论的持久性和反复性

就在豪金斯和拉芒特论文发表后的讨论会上,霍尔姆奎斯特做了长篇发言,对豪金斯的观点进行了有力的驳斥。

接下来,是鲁宾斯基、克林肯伯格等人连续发表的重要论文<sup>[20,21]</sup>,从理论上论证了自己观点的正确。他们的观点得到了许多现场工程技术人员的支持。

很快,这场争论就平息了下去。关于钻铤长度的计算方法,基本上取得了共识。霍尔姆奎斯特和鲁宾斯基等人的观点占据了上风。支持豪金斯观点的论文,很少再出现了。据文献[22]介绍,本哈德在1950年发表论文,批判了自己以前的观点。1951年在讨论克林肯伯格的论文<sup>[21]</sup>时,豪金斯在发言中也承认自己的关于钻铤长度的观点是不正确的。

但是,这场争论的暂时平息,并不意味着所有的问题都已经解决。恰恰相反,这场争论仅仅是关于液压环境对油井管柱受力影响等问题进行研究的开始,只是一个序幕而已。需要研究解决的问题还很多。

(1)关于浮力能否导致钻柱屈曲的问题,很多人是依据直觉或者常识进行判断的,并不一定能从原理上说清楚。浮力能否导致钻柱屈曲?或者浮力是不是影响管柱屈曲的因素之一?这需从理论上做出正确的回答。另外,关于浮力的概念、关于中性面(点)的概念、关于两种轴向力的计算方法问题等,都存在着巨大的分歧,需从理论上予以澄清。

(2)在上述的争论点中存在着一些看似矛盾的现象,令人难以解释。

① 有的问题,原理是正确的,得出的结论却不符合实际。例如,计算任意断面轴向力的压力面积法,是流体力学的基本方法,原理是正确的,可是用压力面积法计算的轴向力、中性面位置,以及据此位置计算的钻铤需要长度,却被认为是不正确的。这令许多人难以理解。

② 有的观点,原理上并不正确,可是得出的结论却得到现场实践的认可。例如,计算任意断面轴向力的浮力系数法,实际上认为钻柱每一部分的重力都同时被浮力减轻了,似乎该方法认为钻柱的浮力是分布力,是沿着钻柱长度均匀分布的。这显然不符合流体静力学原理。可是用此方法计算的轴向力、中性面位置和需要的钻铤长度,恰恰被现场实践证明是正确的。这也令许多人大感不解。

(3)在实践应用方面,早期的争论仅仅涉及钻铤的使用长度。并且仅仅涉及简单的液压环境和简单的管柱结构。后来随着钻井技术的发展和研究的深入,涉及了更复杂的研究条件。

① 更复杂的液压环境:管内外液体密度不相等,甚至分段不相等;除了静液柱压力外,还有非梯度压力、循环流动压力等。

② 更复杂的管柱结构:除单一管柱外,还有复合管柱、两端固定的管柱、带封隔器的管柱等。

③ 更复杂的井眼轨迹:除垂直井外,还有定向井、水平井、大位移井,以及三维多目标井等。

④ 在工程应用方面,除了钻铤长度计算外,还涉及管柱摩阻摩扭计算、管柱的强度计算、套管柱强度设计和套管装定等问题。

(4)随着时间的推移,争论显现出起伏性和反复性。早期争论时的一些错误观点和理论,