

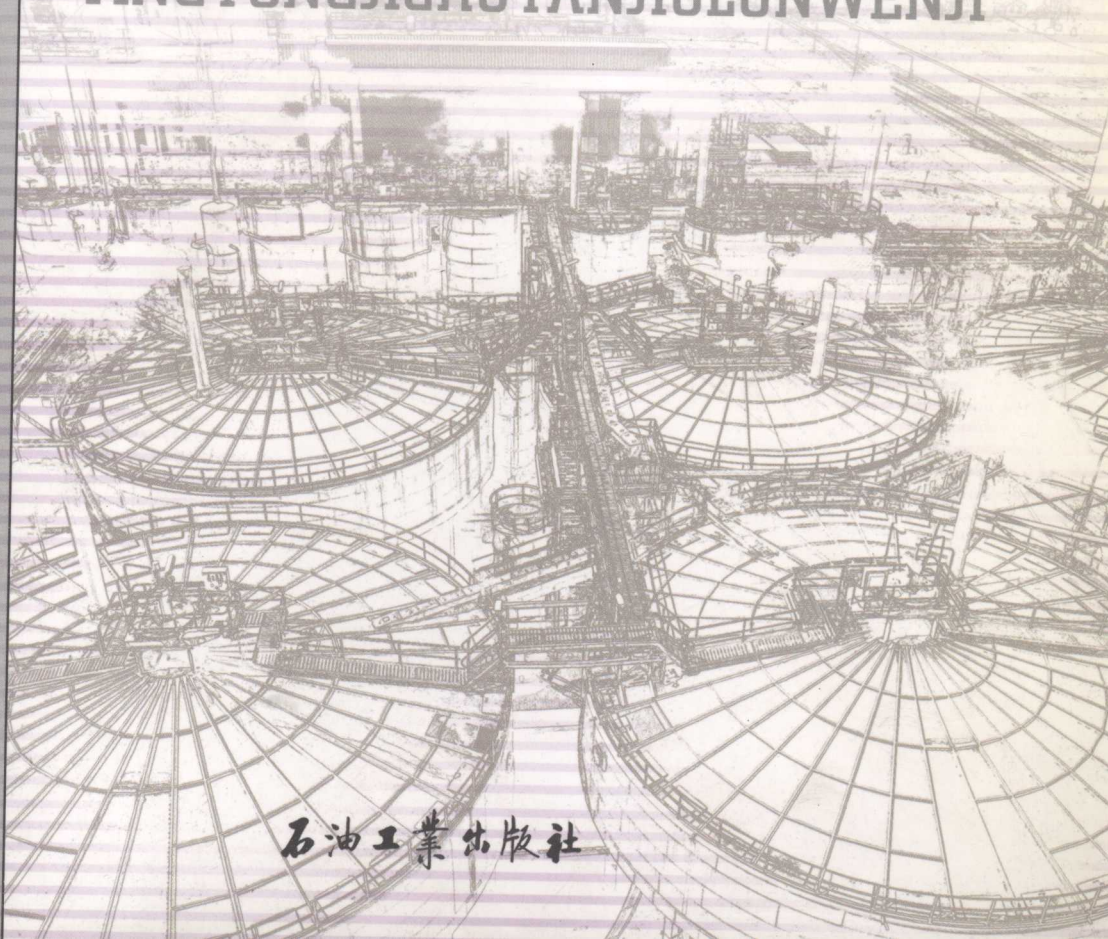
石油管工程 应用基础研究

(2000-2004)

论文集

中国石油天然气集团公司管材研究所 编
石油管力学和环境行为重点实验室

SHIYOUGUANGONGCHENG
YINGYONGJICHUYANJIULUNWENJI



石油工业出版社

石油管工程应用基础 研究论文集

(2000—2004)

中国石油天然气集团公司管材研究所
石油管力学和环境行为重点实验室

编

石油工业出版社

内 容 提 要

本论文集选编了中国石油天然气集团公司石油管力学与环境行为重点实验室 2000—2004 年期间所发表的关于石油管工程领域的部分优秀论文,包括石油管的力学行为、腐蚀与防护、安全评价与风险分析 4 部分。内容涉及石油管的断裂与疲劳、腐蚀与磨损、应力腐蚀与氢致开裂、管材选用与防护、计算机仿真以及含缺陷管安全可靠评价与剩余寿命预测、风险评价与预测等诸多方面的内容。论文集内容丰富、数据完整,工程性和专业性强,对研究和从事石油管工程的技术人员、学者和大专院校师生具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

石油管工程应用基础研究论文集:2000—2004/中国石油天然气集团公司管材研究所石油管力学和环境行为重点实验室编. —北京:石油工业出版社,2005. 9
ISBN 7-5021-5162-1

I. 石…

II. 中…

III. 石油管道—管道工程—文集

IV. TE973-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 086255 号

石油管工程应用基础研究论文集(2000—2004)

中国石油天然气集团公司管材研究所

石油管力学和环境行为重点实验室 编

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. cn

总 机:(010)64262233 发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技排版中心

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本:1/16 印张:36. 75

字数:936 千字

定价:150. 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

前 言

石油工业是大量使用石油管的工业。石油管在石油工业中的重要地位表现在:用量大、花钱多,节约开支、降低成本的潜力巨大;石油管的力学和环境行为对石油工业采用先进工艺和增产增收有重要影响;石油管的安全可靠性和使用寿命对石油工业关系重大。

中国石油天然气集团公司(以下简称集团公司)石油管力学和环境行为重点实验室(以下简称实验室)成立于1999年12月6日,是集团公司所属10个重点实验室之一,是集团公司石油管工程的科技创新基地。实验室依托集团公司管材研究所,主实验室下设3个研究室;另有3个研究室分别挂靠在石油大学(北京)、西南石油学院及四川石油管理局。

实验室按照“开放、流动、联合、竞争”的运行管理机制,围绕石油管的力学行为、石油管的环境行为和石油管失效诊断及预测预防等几个方面开展研究工作。近期研究重点包括:(1)我国西部油田深井、超深井开发过程中的钻柱和油、套管柱的力学行为研究,油田套管损坏机理及预防措施研究;(2)我国油气输送管线工程大口径、高性能输气钢管国产化技术及高压输气管线的断裂控制技术;(3)油井管和油气输送管的腐蚀与防护技术;(4)在役管线、储油罐、压力容器的安全和风险评估技术。

石油管力学和环境行为重点实验室自正式挂牌成立以来,在石油管的力学行为、石油管的环境行为和石油管失效诊断及预测预防3个方面均取得了较大的进展。

实验室在研项目包括国家“863”和“973”项目、国家自然科学基金项目、国家经贸委项目、集团公司应用基础研究项目、技术开发项目等各种项目数十项。2000年验收或鉴定项目5项,申报专利4项,研制软件6套,发表论文200多篇。近年来,实验室各项工作均取得了较大进展。实验室正逐步成为石油管力学和环境行为研发基地、人才培养基地和该领域学术交流基地,并力争在提高石油管服役的安全可靠性、延长使用寿命,最大限度地避免或减少失效事故,使集团公司的整体效益方面取得更大的成就。

本文集收集了实验室5年来正式发表和在重大国际、国内有关石油工业大型会议宣读的相关研究论文,包括油井管与管柱力学、油气输送管与管线力学、腐蚀与防护、失效分析预测与预防等方面,从一个侧面反映了实验室近期所取得的研究成果,内容相当丰富,希望对从事储运工程、钻井工程、炼化工程、材料工程等方面的工程技术人员、研究人员和管理人员有所帮助。希望各方面的读者都能继续关心和支持实验室的工作,愿集团公司石油管力学和环境行为重点实验室得到更大的发展,取得更大更多的成果,为石油工业做出更大的贡献。

由于我们水平有限,经验不足,加之时间仓促,错误和不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编者

2004年5月

目 录

油井管与管柱

底部钻具组合二维分析新方法	宋执武 高德利(3)
高温高压井测试油管轴向力的计算方法及其应用	高宝奎 高德利(9)
孕镶金刚石取心钻头各向异性的实验研究	吴村章 高德利(14)
非均匀外压下含磨损缺陷套管的挤毁极限载荷分析	李斌 杨智春 高智海(18)
塑性应变准则在油井出砂预测中的应用	练章华 杨龙 段永刚 刘向君 唐波(23)
射孔套管应力集中系数有限元分析	唐波 杨龙 练章华 黄生远 张平 杨军孝(27)
钻杆接头螺纹部位疲劳裂纹的超声波检测	巨西民 莫润阳(33)
油气井管柱的屈曲行为研究	高德利 刘凤梧 徐秉业(38)
提高 API 螺纹油管和套管密封性的措施	史交齐 林凯 解学东 罗卫国 乐静 孔寒冰(44)
螺旋焊管焊缝噉嘴极限高度的分析方法	赵新伟 罗金恒 路民旭 李鹤林 张田忠(47)
钻杆管体体积型缺陷的有限元分析	韩晓毅 张平生 刘玉标 申仲翰(52)
磨损对套管接头拉伸与内压强度的影响	杨龙 高智海 练章华 唐波 孟英峰(56)
套管内壁磨损对其抗挤毁性能影响的有限元分析	高连新 杨勇 张凤锐(61)
套管抗内压强度试验研究	吕拴录 宋治 韩勇 韩新利 史交齐 杨力能(67)
不同磷化工艺对套管螺纹粘着性能的影响	熊庆人 王长安(73)
API 钻具数字接头在我国推广应用情况调查分析	吕拴录(77)
特殊螺纹接头油、套管使用及展望	吕拴录 韩勇 赵克枫 宋治(83)
直接接触点聚焦纵波直探头设计中的问题	莫润阳 巨西民(89)
石油钻杆内壁体积型腐蚀缺陷的超声检测	巨西民 莫润阳(92)
深井、超深井套管特性分析	杨龙 林凯 韩勇 史交齐 宋延鹏 周建东(97)
膨胀套管计算机仿真分析	练章华 施太和 杨龙 高智海 董范 李渊 徐英 叶林祥(103)
套管内壁磨损对其抗内压性能的影响	杨龙 练章华 高智海 唐波 孟英峰(108)
油井管国产化的现状及其进一步国产化的建议	李平全 王世宏(112)
存在错边时焊缝余高的测量	李为卫 刘亚旭(117)
大直径钢管管端切斜测量方法	李为卫 刘亚旭 霍春勇(120)
螺旋缝埋弧焊管焊偏的判别及定量分析	史经建(123)

输送管与管线

高强度天然气输送管抗氢致开裂试验研究

.....	尹成先	兰新哲	刘伟	霍春勇	冯耀荣	(131)
X60 管线钢疲劳特性的研究	赵新伟	罗金恒	路民旭	李鹤林	(137)	
三种输送管疲劳裂纹扩展特性研究	熊庆人	庄传晶	冯耀荣	(142)		
00Cr20Ni18Mo6CuN 耐蚀不锈钢的特性及其焊接工艺	李为卫	刘亚旭	(147)			
西气东输工程用感应加热弯管技术条件探讨	刘伟	李国兴	冯耀荣	(152)		
西气东输感应加热弯管工艺参数的研究	余大涛	李为卫	霍春勇	高惠临	(156)	
西气东输管道弯管的国内外生产工艺对比	李为卫	刘迎来	王长安	霍春勇	冯耀荣	李平全
.....	李平全	黄开文	孙梯民	(163)		
埋地钢质管道外防腐层的选择与应用	郭生武	(168)				
X70 管线钢中厚板的焊接	李为卫	刘亚旭	孟庆云	(174)		
冷却速度对 X70 管线钢感应加热弯管组织性能的影响	李为卫	熊庆人	刘迎来	霍春勇	冯耀荣	(178)
加热温度对 X70 管线钢感应加热弯管组织性能的影响	李为卫	熊庆人	刘迎来	霍春勇	余大涛	(182)
天然气输送钢管研究与应用中的几个热点问题	李鹤林	(185)				
HU - METAL 法成型钢管的残余应力分析	王志明	熊庆人	薛小刚	(206)		
管线断裂控制参量的研究	马秋荣	霍春勇	冯耀荣	(208)		
中国 ERW 焊管生产中的问题及改进措施	李记科	李云龙	黄开文	袁鹏斌	(216)	
埋地钢质管道补口材料的选择	吴艳阳	郭生武	陈开勋	(220)		

腐蚀与防护

The Corrosion Behavior of Welded Line Pipes in Wet H₂S Environment

.....	Feng Yaorong	Huo Chunyong	Yan Feng	(227)			
N80 油套管钢 CO ₂ 腐蚀产物膜特征	 陈长风	路民旭	赵国仙	白真权	严密林	杨延清	(236)
N80 钢 CO ₂ 腐蚀电极过程交流阻抗分析	 陈长风	路民旭	赵国仙	白真权	严密林	杨延清	(243)
N80 油套管钢 CO ₂ 腐蚀阴极过程电化学阻抗谱分析	 陈长风	路民旭	赵国仙	白真权	严密林	杨延清	(250)
N80 油套管钢 CO ₂ 腐蚀产物膜的力学性能	 陈长风	路民旭	赵国仙	白真权	严密林	杨延清	(257)
温度、Cl ⁻ 浓度、Cr 元素对 N80 钢 CO ₂ 腐蚀电极过程的影响	 陈长风	路民旭	赵国仙	白真权	严密林	杨延清	(266)

Ca ²⁺ 和 Mg ²⁺ 对 CO ₂ 环境中点蚀形貌的影响	孙冬柏 李静 俞宏英 路民旭 严密林 赵国仙(277)
X60 螺旋缝埋弧焊管在湿 H ₂ S 环境中的腐蚀行为	冯耀荣 李铁虎 李国兴 霍春勇 颜峰(281)
油管钢高温高压 CO ₂ 腐蚀行为研究	李静 孙冬柏 杨德钧 严密林 路民旭 赵国仙(286)
硫酸盐还原菌对硫化物的分解作用研究	黄建新 杨靖亚 张茜 马艳玲 陈志昕(291)
硫酸盐还原菌的腐蚀机理	朱绒霞 那静彦 郭生武 陈志昕(297)
油田管材的 SRB 腐蚀	朱绒霞 马艳玲 那静彦 陈志昕 郭生武(301)
N80 钢 CO ₂ 腐蚀产物膜研究	陈长风 赵国仙 路民旭 杨延清 李鹤林(305)
硫代磷酸酯缓蚀剂在金属表面成膜行为研究	张玉芳 路民旭 朱雅红 白真权(311)
含 Cr 油套管钢 CO ₂ 腐蚀产物膜特征	陈长风 赵国仙 严密林 白真权 路民旭 杨延清(316)
CO ₂ 腐蚀的产物膜及膜中物质交换通道的形成	赵国仙 陈长风 路民旭 李鹤林(322)
含 1% Cr 的 N80 钢 CO ₂ 腐蚀产物膜特征	陈长风 路民旭 赵国仙 白真权 严密林 杨延清(328)
腐蚀产物膜覆盖条件下油套管钢 CO ₂ 腐蚀电化学特征	陈长风 路民旭 赵国仙 严密林 白真权 杨延清(334)
有机涂层在天然气井环境下的耐蚀性研究	杨全安 李琼伟 杨海恩 严密林(340)
添加 Cr 对碳钢在 CO ₂ 水溶液中耐蚀性的影响	赵国仙 陈长风 路民旭(345)
模拟油田 H ₂ S/CO ₂ 环境中 N80 钢的腐蚀及影响因素研究	白真权 李鹤林 刘道新 王献昉(349)
抗 CO ₂ 腐蚀的气—液双相缓蚀剂的研究	颜红侠 张秋禹 张军平 张玉芳 路民旭(354)
油田 CO ₂ 腐蚀环境中的选材评价	赵国仙 严密林 路民旭 李平全(358)
X52 钢的 CO ₂ 腐蚀行为	赵国仙 陈长风 李建平 魏云峰 沈建新 路民旭(361)
N80 钢动态和静态 CO ₂ 腐蚀行为对比研究	吕祥鸿 赵国仙 路民旭(365)
高效气—液双相 CO ₂ 缓蚀剂的研究	张军平 张秋禹 颜红侠 赵雯 张玉芳 路民旭(370)
神经网络在预测高温高压环境中油管钢腐蚀速率的应用	周计明 刘道新 白真权(374)
LN5 井油管腐蚀掉井原因分析	赵国仙 陈长风 白真权 路民旭 李建平 魏云峰 沈建新(379)
N80 钢的 CO ₂ 腐蚀行为试验研究	赵国仙 严密林 白真权 路民旭 冯耀荣 邱超 李建平(382)
X70 管线钢在模拟土壤介质中裂纹扩展特性研究	李明星 王荣 李鹏亮 路民旭(386)
X70 管线钢在模拟高 pH 值介质中裂纹断口分析	李明星 王荣 白真权(392)

CO₂ 压力对金属腐蚀产物膜形貌结构的影响

- 林冠发 白真权 李鹤林 赵新伟 郑茂盛 路民旭(396)
- 气相缓蚀剂研究进展 张秋禹 张军平 颜红侠 张玉芳 路民旭(401)
- 咪唑啉型缓蚀剂的合成及其抑制 CO₂ 腐蚀性能的研究
..... 颜红侠 张秋禹 张军平 张玉芳 路民旭(407)
- 35Mn2 与 20CrMo 抽油杆的抗腐蚀性能评价
..... 吴宗福 张栋杰 裴润有 王大创 严密林(411)
- 影响碳钢 CO₂ 腐蚀速率因素的研究 赵国仙 严密林 陈长风 路民旭 冯耀荣(415)
- DH1—H1 井 P110 油管腐蚀原因分析
..... 赵国仙 白真权 陈长风 严密林 路民旭 李建平 魏云峰 沈建新(418)
- 13Cr 不锈钢的 CO₂ 腐蚀行为研究 董晓焕 赵国仙 冯耀荣 姜毅(422)
- 有硫酸盐还原菌存在时 J55 套管钢的极化行为 ... 朱绒霞 那静彦 郭生武 陈志昕(426)
- 油气采集储运中的腐蚀现状及典型案例
..... 路民旭 白真权 赵新伟 赵国仙 罗金恒 陈长风(429)
- 咪唑啉及其衍生物在 CO₂ 腐蚀介质中的缓蚀行为研究进展
..... 张玉芳 路民旭 李爱兰(442)
- 克乌复线管道腐蚀缺陷检测数据综合统计分析
..... 白真权 赵新伟 罗金恒 路民旭 邱超 李建平 井一平 孙建刚(447)
- 埋地钢质管道外防腐层的腐蚀机理 郭生武 方军锋 郝晓晨 王志宏 邓军孝(452)
- 阿—赛输油管线腐蚀现状分析..... 王献昉 白真权 韩晓毅(457)
- 影响油气输送管线抗 HIC 因素探讨 尹成先 兰新哲 霍春勇 冯耀荣(462)
- 高强度管线钢应力腐蚀试验研究 尹成先 冯耀荣 霍春勇 兰新哲 周军(468)
- 高强度感应加热弯管抗氢致开裂试验研究
..... 尹成先 刘伟 冯耀荣 兰新哲 霍春勇(472)

安全评价与风险分析

A Damage Model for Assessing Pipeline Safety in Corrosion Environments

..... X. W. Zhao J. H. Luo M. Zheng M. X. Lu H. L. Li(479)

Example of Quantitative Risk Analysis of A Gas Pipeline

..... Huo Chunyong Zhuang Chuanjing Lu Minxu Li Helin Li Guoxing(488)

Effect of Strength Mismatch of Girth Weld on Safety of The West - East Pipeline

..... Zhuang Chuanjing(493)

Failure Analysis and Fitness - for - Service Assessment for a Pipeline

... Feng Yaorong Li Helin Zhang Pingsheng Du Baiping Ma Baodian Jin Zhihao(500)

油气管线钢的焊接局部脆化及其预防 高惠临 董玉华 冯耀荣(508)

管线钢断裂和疲劳裂纹扩展特性研究

..... 赵新伟 罗金恒 路民旭 李鹤林 郭万林(516)

含缺陷油气管线结构的可靠性计算 董玉华 高惠临 周敬恩 冯耀荣 霍春勇(523)

长输管线失效状况模糊故障树分析方法

..... 董玉华 高惠临 周敬恩 冯耀荣 霍春勇(530)

其 他

无尺作图的基础作图体系的简化	杨力能 穆玉杰(539)
动力学环境下含裂纹板力学性能分析与试验	林凯 吕国志(545)
90Al ₂ O ₃ 缸套内衬的显微结构分析	郭生武(549)
深冷处理对 T12 钢磨料磨损性能的影响	陈长风 李士燕 严密林 路民旭 杨延清(554)
时效温度对 Fe - Mn - Si - Cr - Ni - C 合金形状记忆效应的影响	文玉华 李宁 席华萍 涂铭旌 李平全 刘迎来 马颖丽(559)
不同淬火态 Fe - Mn - Si - Cr - Ni 形状记忆合金热机械循环训练效果的研究	李宁 文玉华 席华萍 涂铭旌 李平全 刘迎来 马颖丽(563)
时效工艺对 Fe - 14 Mn - 5 Si - 8 Cr - 4 Ni - 0.2C 合金形状记忆效应的影响	李宁 文玉华 胥永刚 涂铭旌 李平全 刘迎来(567)
时效时间对 Fe - Mn - Si - Cr - Ni - C 记忆合金回复应力的影响	李宁 文玉华 陈孟诗 涂铭旌 李平全 刘迎来 马颖丽(572)
API 会标在石油工业中的意义	方伟 秦长毅(575)
单位换算表	(577)

油井管与管柱

底部钻具组合二维分析新方法

宋执武 高德利

[石油大学(北京)石油天然气工程学院]

摘 要 提出一种用于分析底部钻具组合稳定器处的轴向力的新方法,即认为轴向力方向应与钻柱切线方向一致,其大小不应忽略井壁支反力的影响。在此基础上,采用加权余量法推导出一套用于计算底部钻具组合二维受力和变形的新的公式。实例计算结果表明,由于该公式考虑影响因素更全面,因而其计算结果更具合理性,与钻柱实际受力情况更加相符,且计算过程更为简便、快捷。

关键词 底部钻具组合 钻柱力学 二维分析 加权余量法

引 言

底部钻具组合的受力和变形分析是井眼轨迹控制技术的基础。在分析底部钻具组合时,一般将钻柱在稳定器处断开,然后根据连续条件列出补充方程。在现有的分析方法中^[1,2],一般认为稳定器处轴向力的方向与井眼切线方向一致,其大小等于钻柱浮重在井眼方向上的分量。笔者认为稳定器处轴向力的方向应是钻柱的切线方向,其大小应考虑井壁支反力的影响。基于这种认识,采用加权余量法(the method of weighted residuals),推导出底部钻具组合二维受力和变形的计算公式,并对典型的增斜、降斜和稳斜钻具组合进行计算。

1 公式推导

1.1 单跨钻柱受力分析

为分析方便,将底部钻具组合由稳定器处断开,将两稳定器的中心连线作为 x 轴,垂直于 x 轴,指向井眼高边的方向作为 y 轴,则单跨度钻具组合的受力情况如图 1 所示。

根据权余法^[2],将原点设在每一跨度的上稳定器中心上,则其挠度试函数为

$$y = \sum_{i=1}^4 c_i x^i \quad (1)$$

对 B 点取矩并整理,求得 A 点的支反力为

$$R_A = \frac{M_B - M_A + P_A l \sin \gamma_A + \frac{q}{2} l^2 \sin \beta}{l \cos(\alpha_A - \beta)} \quad (2)$$

式中 R_A —— A 点支反力,方向为与 A 点井斜方向垂直, N;

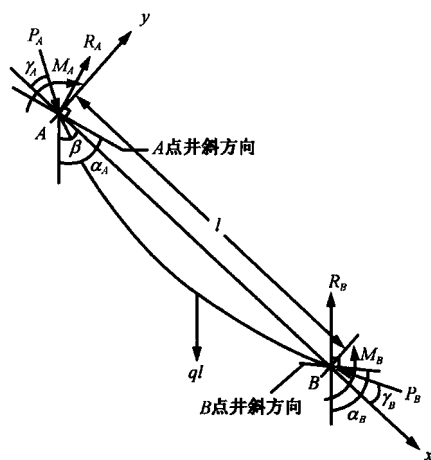


图 1 单跨度钻具组合的受力情况简图

M_A, M_B ——A、B 两点处弯矩, N·m;

P_A ——A 点所受轴向力, 方向为 A 点处钻柱的切线方向, 以压力为正, N;

l ——A、B 两点间钻柱的长度, m;

q ——单位长度钻柱浮重, N/m;

α_A ——A 点井斜角;

γ_A ——A 点钻柱切线方向与 x 轴的夹角, $\gamma_A = \arctan \theta_A$;

θ_A ——钻柱在 A 点的切线斜率;

β —— x 轴与垂直方向的夹角。

令

$$\begin{cases} P_a = R_A \sin(\alpha_A - \beta) + P_A \cos \gamma_A \\ R_a = R_A \cos(\alpha_A - \beta) + P_A \sin \gamma_A \end{cases} \quad (3)$$

则钻柱上任一点处的弯矩为

$$M_x = M_A + R_a x - P_a y - \frac{q}{2} x^2 \sin \beta \quad (4)$$

由于钻柱是弹性小变形, 所以有

$$M_x = EI \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (5)$$

式中 E ——钻柱弹性模量, MPa;

I ——钻柱截面轴惯性矩, m^4 。

将式(1), (2), (3), (5)代入式(4), 化简得

$$\begin{aligned} & M_A - 2EIc_2 + (R_a - 6EIc_3 - P_a c_1)x \\ & - \left(12EIc_4 + \frac{q}{2} \sin \beta + P_a c_2 \right) x^2 - P_a c_3 x^3 - P_a c_4 x^4 \\ & = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

根据权余法中的子域法, 令式(6)的左端等于 R_1 , 则可由 $\int_0^l R_1 dx = 0$ 消去内部残值, 将式(6)代入, 经过计算并化简可得

$$\begin{aligned} & EI(2c_2 + 3c_3 l + 4c_4 l^2) + P_a \left[\frac{c_1 l}{2} + \frac{c_2 l^2}{3} + \frac{c_3 l^3}{4} + \frac{c_4 l^4}{5} \right] \\ & + \frac{ql^2}{6} \sin \beta - M_A - \frac{R_a l}{2} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

每一跨的边界条件为

$$y(0) = 0 \quad (8)$$

$$y(l) = 0 \quad (9)$$

$$EIy''(0) = M_A \quad (10)$$

$$EIy''(l) = M_B \quad (11)$$

式(8)自然满足。由式(9)得

$$c_1 l + c_2 l^2 + c_3 l^3 + c_4 l^4 = 0 \quad (12)$$

由式(10)得

$$2EIc_2 - M_A = 0 \quad (13)$$

由式(11)得

$$EI(2c_2 + 6c_3l + 12c_4l^2) - M_B = 0 \quad (14)$$

联立式(7), (12), (13), (14), 可求得 c_1, c_2, c_3, c_4 的表达式为

$$c_1 = \frac{\frac{q\sin\beta l^3}{12} + \frac{M_A + M_B}{24EI}P_A l^3}{\frac{P_A l^2}{5} - 2EI} - \frac{2M_A + M_B}{6EI}l \quad (15)$$

$$c_2 = \frac{M_A}{2EI} \quad (16)$$

$$c_3 = \frac{M_B - M_A}{6EI} - \frac{\frac{q\sin\beta l}{6} + \frac{M_A + M_B}{12EI}P_A l}{\frac{P_A l^2}{5} - 2EI} \quad (17)$$

$$c_4 = \frac{\frac{q\sin\beta}{12} + \frac{M_A + M_B}{24EI}P_A}{\frac{P_A l^2}{5} - 2EI} \quad (18)$$

切线斜率为

$$\theta = y' = c_1 + 2c_2x + 3c_3x^2 + 4c_4x^3 \quad (19)$$

假设已知 A 点的弯矩 M_A 和切线斜率 θ_A , 将式(15)代入 A 点的切线斜率公式

$$\theta_A = y'(0) = c_1 \quad (20)$$

经过计算和化简得

$$\begin{aligned} & (-3EI\theta_A - M_A l)(8P_A l^2 - 80EI) + (5P_A M_A l^3 + 10EIq\sin\beta l^3) \\ & + M_B(P_A l^3 + 40EI) = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

将式(3)代入式(21)并整理得

$$\begin{aligned} & [l^2 \tan(\alpha_A - \beta)]M_B^2 + \left\{ -P_A l^3 [\sin\gamma_A \tan(\alpha_A - \beta) + \cos\gamma_A] \right. \\ & - \frac{q\sin\beta l^4}{2} \tan(\alpha_A - \beta) - 40EI l - 24EI l \theta_A \tan(\alpha_A - \beta) - 4M_A l^2 \tan(\alpha_A - \beta) \Big\} M_B \\ & - 80EI(3\theta_A EI + M_A l) - 10EIq\sin\beta l^3 \\ & + \left\{ \left[M_A + \frac{q\sin\beta}{2} l^2 \right] \tan(\alpha_A - \beta) + P_A l [\sin\gamma_A \tan(\alpha_A - \beta) + \cos\gamma_A] \right\} \\ & \times (24EI l \theta_A + 3M_A l^2) = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

令

$$A = l^2 \tan(\alpha_A - \beta)$$

$$B = -P_A l^3 [\sin\gamma_A \tan(\alpha_A - \beta) + \cos\gamma_A]$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{q\sin\beta l^4}{2}\tan(\alpha_A - \beta) - 40EI \\
& - 24lEI\theta_A\tan(\alpha_A - \beta) - 4M_A l^2\tan(\alpha_A - \beta) \\
C = & - 80EI(3\theta_A EI + M_A l) - 10EIq\sin\beta l^3 \\
& + (24lEI\theta_A + 3M_A l^2) \left\{ \left[M_A + \frac{q\sin\beta}{2}l^2 \right] \tan(\alpha_A - \beta) \right. \\
& \left. + P_A l[\sin\gamma_A \tan(\alpha_A - \beta) + \cos\gamma_A] \right\}
\end{aligned}$$

则利用二次方程求根公式求得 M_B 为

$$M_B = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (\text{另一根被舍去}) \quad (23)$$

进而求得 B 点切线斜率 θ_B 为

$$\begin{aligned}
\theta_B = y'(l) = & c_1 + 2c_2 l + 3c_3 l^2 + 4c_4 l^3 \\
= & - \left[\frac{ql^3 \sin\beta}{12} + \frac{M_A + M_B}{24EI} P_A \right] \left[\frac{P_A l^2}{5} - 2EI \right]^{-1} l^3 \\
& + \frac{M_A + 2M_B}{6EI} l
\end{aligned} \quad (24)$$

由 x 轴方向的合力为零,得

$$\begin{aligned}
R_A \sin(\alpha_A - \beta) - P_A \cos\gamma_A + R_B \sin(\alpha_B - \beta) \\
+ P_B \cos\gamma_B - q \cos\beta l = 0
\end{aligned} \quad (25)$$

由 y 轴方向的合力为零得

$$\begin{aligned}
R_A \cos(\alpha_A - \beta) - P_A \sin\gamma_A + R_B \cos(\alpha_B - \beta) \\
- P_B \sin\gamma_B - q \sin\beta l = 0
\end{aligned} \quad (26)$$

式中 R_B —— B 点支反力,方向为与 B 点井斜方向垂直,N;

P_B —— B 点所受轴向力,方向为 B 点处钻柱的切线方向,以压力为正,N;

α_B —— B 点井斜角;

γ_B —— B 点钻柱切线方向与 x 轴夹角, $\gamma_B = \arctan\theta_B$ 。

联立式(25),(26),可求得 P_B 为

$$\begin{aligned}
P_B = & \sin(\alpha_B - \beta) [R_A \cos(\alpha_A - \beta) - P_A \sin\gamma_A \\
& - q \sin\beta l] [\sin\gamma_B \sin(\alpha_B - \beta) + \cos\gamma_B \cos(\alpha_B - \beta)]^{-1} \\
& - \cos(\alpha_B - \beta) [R_A \sin(\alpha_A - \beta) - P_A \cos\gamma_A - q \cos\beta l] \\
& \times [\sin\gamma_B \sin(\alpha_B - \beta) + \cos\gamma_B \cos(\alpha_B - \beta)]^{-1}
\end{aligned} \quad (27)$$

式中的 R_A 可由式(2)算得。

1.2 上下跨间的几何关系

设相邻两跨钻柱(1跨和2跨)的 x 轴与垂直方向的夹角分别为 β_1 和 β_2 ,则由图2所示的几何关系得

$$\beta_1 - \beta_2 = \gamma_{1B} - \gamma_{2A} = \arctan\theta_{1B} - \arctan\theta_{2A} \quad (28)$$

式中 γ_{1B} ——1跨钻柱的 B 点切线方向与其 x 轴的夹角;

γ_{2A} ——2跨钻柱的 A 点切线方向与其 x 轴的夹角;

θ_{1B} ——1 跨钻柱的 B 点切线斜率;

θ_{2A} ——2 跨钻柱的 A 点切线斜率。

由式(28)可得

$$\theta_{2A} = \frac{\theta_{1B} + \tan(\beta_2 - \beta_1)}{1 - \theta_{1B} \tan(\beta_2 - \beta_1)} \quad (29)$$

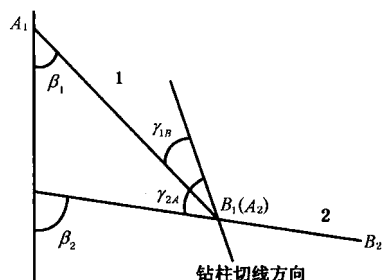


图 2 上下跨间几何关系简图

1.3 底部钻具组合计算过程

由于底部钻具组合的边界条件是上切点处的弯矩和切线斜率已知(轴向力须假设),故从此处开始,先由式(23)、(24)和(27)算得此跨 B 点的受力与变形量。如无稳定器,则所算得的结果就是钻头处的参数值;如有稳定器,则根据稳定器处的连续条件,所算得的上一跨 B 点的弯矩 M_B 和轴向力 P_B 就是下一跨 A 点的弯矩 M_A 和轴向力 P_A ,将算得的上一跨 B 点的切线斜率 θ_B 代入式(29)即可算得下一跨 A 点的切线斜率 θ_A 。将所得值再代入式(23)、(24)和(27),又算得这一跨 B 点的受力与变形。如此不断地代入式(23)、(24)、(27)和(29),就可求得钻头处的弯矩和切线斜率。不断调整上切点的位置,让钻头处的目标函数为弯矩趋于零($M_B \rightarrow 0$),就算出了最终结果。

2 算例

2.1 降斜钻具组合

双稳定器降斜钻具组合:钻头直径 $D_B = 21.6\text{cm}$,第 1 稳定器与第 2 稳定器直径均为 21.6cm ,第 1 稳定器至钻头的距离 $L_1 = 1800\text{cm}$,第 2 稳定器至第 1 稳定器的距离 $L_2 = 900\text{cm}$,第 1,2,3 段钻铤外径均为 15.9cm ,钻井液密度为 1.2g/cm^3 ,钻头处井斜角为 10° ,井斜变化率为 $2^\circ/(30\text{m})$,井径为 21.6cm 。利用传统方法与本文中方法所得计算结果的对比见图 3。

2.2 增斜钻具组合

双稳定器增斜钻具组合: $L_1 = 100\text{cm}$, $L_2 = 1800\text{cm}$,其他参数与降斜钻具组合相同。计算结果见图 4。

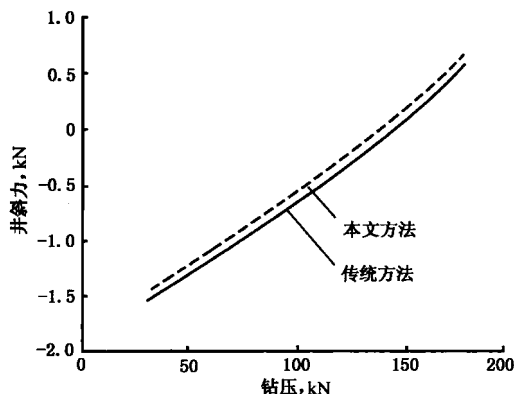


图 3 降斜钻具组合井斜力计算结果

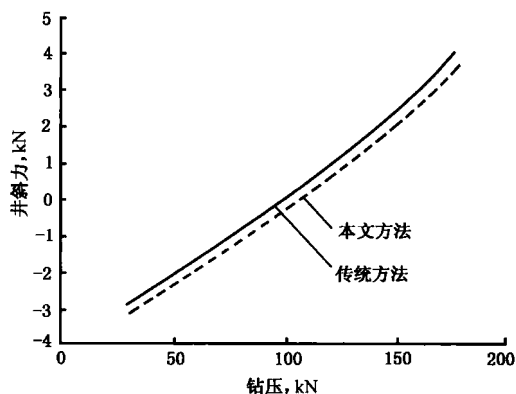


图 4 增斜钻具组合井斜力计算结果

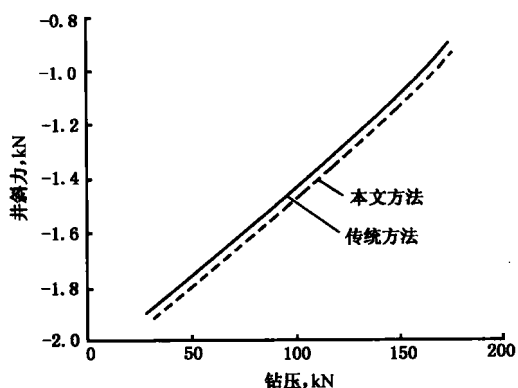


图5 稳斜钻具组合井斜力计算结果

2.3 稳斜钻具组合

双稳定器稳斜钻具组合: $L_1 = 390\text{cm}$, $L_2 = 1400\text{cm}$, 其他参数与降斜钻具组合相同。计算结果见图5。

3 结论

(1)在对底部钻具组合进行受力和变形分析时,将稳定器处轴向力的方向取为钻柱的切线方向,同时考虑了井壁支反力的影响,这种处理方式与钻柱实际受力情况相符合,因此结果更准确。

(2)利用权余法推导了新的底部钻具组合受力变形计算公式。利用其边界条件的特点(即上切点处边界条件已知),只须不断地代入求 M_B , θ_B , P_B 和 θ_{2A} 的公式就可得到最终结果,使得计算过程变得简便、快捷。

参考文献

- 1 白家祉,苏义脑. 井斜控制理论与实践. 北京:石油工业出版社,1990
- 2 高德利,刘希圣,徐秉业. 井眼轨迹控制. 山东东营:石油大学出版社,1994