

钻柱动力学研究及应用进展^{*}

狄勤丰 王文昌 胡以宝 张小柯

(上海大学上海市应用数学和力学研究所)

狄勤丰等. 钻柱动力学研究及应用进展. 天然气工业, 2006, 26(4): 57-59.

摘要 石油钻井钻柱是石油工业中用量大、质量要求高的管材,处在充满钻井液的狭长井眼里工作,受力情况非常复杂。每年国内外都会发生大量钻柱失效事故,造成重大经济损失。在钻柱失效调研分析的基础上,阐明了钻柱失效的主要原因,指出了钻柱动力学研究的重要性,详述了国内外钻柱动力学研究的历史和最新进展,介绍了钻柱动力学研究的应用现状,分析了现存模型的优缺点和国内外研究的差距,总结了钻柱动力学研究方法,强调了钻柱动力学研究急需解决的核心技术问题。现有钻具材质及结构条件下,减少钻柱疲劳破坏的最有效途径是根据钻柱的动态应力特征,优化钻柱结构和工作参数,使钻柱尽可能在低动态应力水平下工作。

关键词 钻井 钻柱 动力学 涡动 失效

近年来,各种新工艺、新工具、新技术的出现,为钻井速度的提高提供了坚强的后盾,而优化钻井等技术则为降低钻井成本创造了条件。但值得注意的是,钻柱的振动会导致钻速下降、井下测量数据不准确、井下昂贵设备的破坏等,并且在影响钻井周期和钻井成本的诸多因素中,钻柱失效造成的事故仍然占有很高的比例。频繁的钻具失效事故不仅大大增加了钻具消耗,更重要的是增加了起下钻时间,影响了钻井作业的正常进行。中国石油天然气公司石油管材研究所曾对83起钻具落井事故进行了停工时间统计^[1]:事故造成的停工时间超过5 d的占33.7%,超过15 d的占19.3%。1988年全国油气田钻具失效共计540起,其中重大的钻具落井事故高达332起,占事故总数的61.5%^[1]。

一、钻柱动力学研究的历史及现状

钻柱在井眼中的运动状态可视为钻柱本体、钻井液、井壁或井底几大部分相互作用的结果。钻柱在地面设备的驱动下,处在内外均有钻井液流动的环境中,局限于井筒的有限空间里,遭受着井底岩石的反作用力而进行钻井作业。在石油钻井过程中,钻柱的主要运动形式是旋转向下的运动,但实际上却总伴随着各种振动状态的出现。研究表明^[2],钻

柱振动是导致钻柱失效的主要原因。钻柱一般具有4种振动形式:纵向振动、横向振动、扭转振动、涡动。这4种振动在形态及机理上各不相同。章扬烈^[3]通过对各种振动的研究与分析认为——井下各种振动按危害程度由大到小排列应为:反转运动(涡动)、横振、扭振、纵振。涡动是指当钻柱在井中以转盘转速按顺时针方向绕自身轴线旋转的同时,由于其不平衡力或其它扰动力的作用,钻柱本身也进行着绕井眼轴线公转的现象。Chen等详细讨论了钻柱的纵向振动、粘滑振动、涡动对钻头的影响,得出了向后涡动时,实际作用于钻头的钻压和扭矩很小,甚至有停钻的可能,并且涡动一般是比较剧烈的振动,还时常伴有混沌现象的出现,危害较大。Jansen把非线性转子动力学应用于钻柱运动分析,建立了钻柱的无量纲运动方程,特别是对钻柱的涡动和混沌进行了大量的计算机仿真及分析。Heisig和Neubert通过线性分析模型,得出了横向振动的固有频率公式,并与线性的有限元模型和非线性的有限元模型仿真结果进行了对比,确认了涡动的存在。

二、钻柱动力学研究的最新进展

1950年,Lubinski发表了第一篇研究钻柱理论的文章,随后发表了多篇有关钻柱理论的论著,成为

^{*} 本文系国家自然科学基金项目(50174047)、上海市重点学科建设项目研究成果。

作者简介 狄勤丰,1963年生,教授,博士生导师;1984年和1987年在原华东石油学院获学士和硕士学位;1997年在原西南石油学院获博士学位,1997~2000年在西北工业大学“航天、宇航科学与技术”博士后流动站工作,现在上海大学力学所工作。地址:(200072)上海市延长路149号。电话:(021)56333256。E-mail:qinfengd@sina.com

早期研究钻柱理论的代表人物。但早期对钻柱振动问题的分析大都忽略了非线性因素的影响,直到1992年召开的第十三届世界石油大会,前苏联科学家 Mizajanzade 等人发表了钻柱动力学方面的文章,比较系统地研究了钻柱的非线性振动问题,首次建立了钻柱纵振的非线性数学模型,探讨了钻柱振动中可能出现的突变、混沌等现象。随着钻柱动力学研究的逐渐深入,近年来,钻柱动力学研究在现场应用中已取得了良好的效果。

1995~1996年 Hughes(休斯)公司的 Dykstra 等人利用有限元方法,对钻柱的静力学屈曲和动力学振动进行了分析及数值模拟,并做了大量的实验。他们指出:钻柱的质量不平衡对钻柱的横向振动有很大的影响。当钻柱在其固有频率附近运行时,与井壁碰摩严重。当出现低转速共振时,可通过提高转速来减小钻柱的振动,而当出现高转速共振时,提高转速反而会加剧钻柱的振动。前涡向后涡的转化会导致地面扭矩的突然增加。硬地层则会加剧钻柱的振动,促使前涡向后涡的转化。经过多年的探索和完善,Baker-Hughes(贝克休斯)公司应用该动力学模型自主开发的底部钻具组合动力学分析软件(BHA Dynamics Analysis Software)已得到了广泛应用。该动力学分析软件可模拟出钻井过程中钻柱轴向、扭转、横向的动态变形,给出临界钻压、临界转速及屈曲模态、振动模态等重要信息,优化出合理的钻井参数,避开临界钻压及临界转速。与此同时,BakerHughes公司开发了相应的 VSS(Vibration/Stick-Slip)监测工具及软件,实时监测井下钻柱的动力学状况,对钻柱的有害振动进行早期预警。利用这些数据,钻井人员可以及时调整钻井参数,防止剧烈振动的发生。

Shell(壳牌)公司的 Kriesels 等人于1999年发表文章介绍了一套可以很好的防止钻柱失稳及振动的综合方法。自1997年开始该方法应用于中东某油田,钻柱失效事故大幅度下降,在工程实际中已收到了很好的经济效益。其综合方法主要包括:①应用软扭矩旋转系统 STRS(Soft Torque Rotary System)抑止钻头及 BHA 的扭转和粘滑振动;②利用钻柱动力学分析软件 DSD(Drill String Dynamics),优化 BHA 设计,避开临界钻压及危险转速区间,防止 BHA 的屈曲及共振;③行之有效的振动监测工具;④钻柱按时进行常规检查。其中,软扭矩系统是减少钻柱扭转、粘滑振动的有效工具。DSD 则是基于钻柱的屈曲、纵向振动、横向振动和涡动分析,开

发的钻柱动力学综合分析软件,主要是在设计井时对 BHA 进行结构优化。该动力学分析软件的不足之处在于要求井眼是规则的直井眼,不能进行实时监测及优化。

2003年,PDVSA(委内瑞拉国家石油公司)和 Halliburton-Landmark Graphics Corporation 公司^[11]应用先进的钻柱动力学模型,优化了井下钻具组合和转速,降低了钻头和钻柱的振动,在现场取得了很好的效果。

无论是 Baker-Hughes 公司的井下钻具组合动力学分析软件,还是 Shell 公司的综合方法,以及 Halliburton-Landmark Graphics Corporation 公司的动力学分析方法,在工程现场都降低了钻柱振动,对各种井下工具起到了保护作用,使钻柱失效事故大幅度减少,但是其功能主要局限于设计井时优化钻具结构,预测工作参数,或者对现有钻具组合进行工作效果评估。这些方法虽然包括了振动监测工具,但还不能很好的进行实时数据处理及参数优化,有待进一步研究和完善。

Sperry-Sun 公司于2003年发表了利用综合方法对钻柱动力学特性进行实时监测及优化的相关文章。其综合方法主要包括:①实时的 BHA 动力学分析软件;②带有振动传感器的 MWD 系统;③信息收集及处理系统。Sperry-Sun 公司于上世纪90年代中期开发了井下钻具组合动力学分析程序(WHIRL),并在 MWD 系统上装置钻柱动力学传感器 DDS(Drillstring Dynamics Sensor),进行实时数据收集、处理、参数优化。其目的主要是避免共振,减小钻柱的振动。与传统的动力学软件相比,其突出的优点是可以对钻井参数,特别是转速进行实时优化,不断更新临界转速。

以上分析表明,在钻柱失效控制综合方法,特别是实时振动测量及控制中,随钻测量 MWD 是必不可少的一部分。目前国际上的 MWD/LWD 可测量30多种参数,基本能满足各项定向钻井的需要。众多的 MWD 技术中,尤以斯伦贝谢公司的随钻测量技术最为突出。中石油塔里木油田八盘1井的实践表明,斯伦贝谢公司的 MWD 工具可以测量大钩载荷、地面钻压、井底钻压、转速、横向振动、扭转振动、轴向振动等众多的钻井参数,并可通过数据处理,实时监测井斜及振动,提高井身质量,保护井下工具。

除了测量工具外,钻柱失效控制综合方法中另一个核心组成部分便是 BHA 动力学分析软件。国外几家大公司的软件均是在考虑了钻柱屈曲、纵向振动、横向振动、扭转振动、粘滑振动、涡动等钻柱

静、动力学行为的基础上开发完成的。通过模拟仿真,既可在设计井时优化钻具组合,预测工作参数,又可与先进的随钻测量工具相结合,实时优化钻井参数。

与国外知名公司开展的大量钻柱动力学失效分析及控制相比,国内在这方面的研究还比较少,离工程应用的差距还很大。首先,国内随钻测量技术落后。国内的MWD系统一般只能测得井斜角、方位角、工具面角等少量几个参数,还远远满足不了工程现场的需要,特别是还不能测得钻柱动力学的相关参数。其次,在钻柱失效的动力学研究方面,目前国内还没有可以广泛应用于现场的工程分析软件。1996年,高宝奎、高德利等人利用梁的横向振动方程,对钻柱的横向振动进行了分析,他们认为横向振动只发生并存在于钻柱底部。底部钻具的屈曲、动力失稳和钻柱与井壁的碰撞是引起横向振动的直接原因,中和点以上钻柱的横向振动能量主要被钻井液的阻尼消耗掉了,不可能传播到地面,中和点附近的运动状态非常复杂,是钻柱容易碰磨的危险区域。1998年,张学鸿等人通过建立钻柱的有限元振动方程,利用振型迭加法、改进的李兹向量法对侧钻井钻柱的纵向振动进行了初步研究,对钻柱的疲劳极限作出了定量的分析和界定,并开发了相应的软件系统。但其忽略了钻柱横向和扭转振动的影响,更没有考虑到钻柱的涡动,认为钻柱疲劳断裂的主要应力是轴向应力,与实际的钻具动力学运动状态及钻柱失效状况相距甚远。2001年,石晓兵、施太和建立了下部钻具组合在弯曲井眼内的变形微分方程,导出了求解钻具任一截面弯矩和弯曲应力的计算公式,初步揭示了下部钻具组合失效的力学机理。2004年,张小柯、狄勤丰在研究钻柱涡动的基础上,建立了钻柱规则涡动时疲劳强度的校核公式^[4],并通过钻柱的动力学分析,编制了相应的程序,给出了钻柱稳定器位置附近以及接头附近钻柱易失效的初步解释。

三、钻柱动力学研究方法及最新进展

钻柱力学研究中常用的方法主要有:①经典微分方程法;②能量法;③加权残值法;④有限差分法;⑤纵横弯曲连续梁法;⑥有限元法。其中钻柱的动力学研究主要应用的是微分方程法和有限元法。经典微分方程法是钻柱力学中最早的研究方法,无论在早期的静力学研究,还是在随后的动力学研究中,都被广泛应用。考虑因素较多时,建立起的微分方程极其复杂,用经典方法求解比较困难,甚至可能无法求解。因此,在钻柱动力学研究中,更多的采用有

限元法。国外几个知名公司的钻柱动力学分析软件均是采用有限元方法开发。1980年代初,Millheima和Apostal应用D'Alembert原理,首次比较系统的对钻柱振动问题进行了研究,在原先静力分析的基础上引入了惯性力和摩擦力,建立了组合钻柱的三维动态有限元分析模型^[5]。1998年,刘延强^[6]根据动力学原理完善了钻柱与井壁动态摩擦接触模型,并依据有限元理论提出了Wilson- θ 法与Newton-Raphson法相结合的模式,来解决钻柱二重(几何、边界)非线性动力学问题。1999年,焦洪柱等通过试验研究及力学分析,采用有限元法、间隙元法建立了小井眼下部钻具双重(接触、几何)非线性力学分析模型和理论分析方法,该模型综合考虑了多相接触摩擦和纵向弯曲,经过现场反复验证、完善,能够比较真实地描述钻柱的受力变形状态,为小井眼钻具组合设计提供了一种实用的计算方法。现在发展的接触有限元法,应用多向接触间隙元,考虑了钻柱、稳定器与井壁之间的初始间隙和接触摩擦力,力学模型比较准确,考虑的因素较多,解题速度较快,也是一种既有理论意义又有工程应用价值的方法。

四、结 论

通过国内外资料调研可以看出,在钻柱动力学方面的研究工作已经很多,并且取得了初步成果。

建议在现有钻具材质及结构研究成果的前提下,对钻柱的动力学特征进行研究,优化钻柱结构和工作参数,使钻柱尽可能工作在低动态应力水平下,是减少钻柱疲劳破坏的有效途径。呼吁国内重视钻柱疲劳破坏的动力学机理及防治措施的研究工作。

参 考 文 献

- [1] 石油管材研究中心失效分析研究室.1988年全国油田钻具失效情况调查报告[J].石油专用管,1992(6).
- [2] ROBERT F MLTCHELL, MLCHAEL B ALLEN. Lateral Vibration: The key to BHA failure analysis [J]. World Oil, 1985.
- [3] 章扬烈著.钻柱运动学与动力学[M].北京:石油工业出版社.
- [4] 张小柯,狄勤丰.钻柱涡动时弯扭组合交变应力下的强度计算[J].天然气工业,2004,24(7).
- [5] MILLHEIM K K. APOSTAL M C. How BHA Dynamics Affect Bit Trajectory [J]. World Oil, 1981, 92(6).
- [6] 刘延强.环空钻柱三维二重非线性动力学问题的研究[J].力学学报,1998,30(1).

(收稿日期 2005-10-13 编辑 钟水清)