

流固耦合效应下深水双闸板防喷器系统损伤机制及预测方法研究

安全2103班：怀晨雨 指导教师：武丹 论文类型：毕业论文

摘要：本文应用显式动力学与计算流体动力学相结合的研究方法，探讨了深水双闸板防喷器系统在动态窜动工况下的损伤机制及预测方法。首先，基于 ANSYS/LS-DYNA 构建闸板-钻杆动态剪切模型，揭示轴向窜动载荷下钻杆弹性变形、塑性流动及断裂全过程，发现裂纹萌生于钻杆远端两侧并沿径向扩展，剪切应力峰值与临界剪切力随载荷增加显著下降。其次，结合 ANSYS/Fluent 建立流固耦合模型，分析流体压力场对剪切过程的影响，表明钻杆窜动导致流道截面积扩张、压力梯度减弱，流体冲击力贡献度低于 5%。最后，基于三参数强度准则与等效应力理论建立动态预测模型，综合考虑材料非线性、摩擦阻力及多场耦合效应，实现剪切应力误差 $\leq 5\%$ 、剪切力误差 $\leq 10\%$ 的精准预测。研究突破传统准静态分析方法的局限性，为深海高压工况下防喷器剪切参数优化提供理论支撑。

关键词：闸板防喷器；窜动工况；流固耦合；剪切机理；预测模型

1 研究背景

随着全球油气资源开发向深海、超深层及非常规储层拓展，钻探工程面临极端工况挑战。井喷事故风险因海洋动力学条件、地层复杂性和装备智能化程度提升呈指数级增长。据统计，全球 62% 的井喷事故发生于钻井作业阶段，典型案例例如 2010 年墨西哥湾“深水地平线”事故暴露出剪切闸板功能失效的致命风险。深水高压环境下，闸板防喷器受动态窜动、多相流冲击等多因素耦合影响，传统评估方法难以准确预测剪切性能，研究流固耦合效应下的损伤机制对提升井控系统安全性、降低油气勘探风险具有重要理论价值与工程意义。

2 发展现状

1979 年国产闸板防喷器完成现场试验并批量生产，我国在防喷器剪切力学建模、多物理场耦合模型、楔形体应力理论等方面取得突破，但仍存在动态工况模拟效率低、边界适应性不足等问题。国外研究发现动态工况下裂纹扩展路径与静态差异显著，现有研究多基于准静态假设，未充分揭示井喷失控时流体对剪切机理的影响。

3 相关分析

3.1 数值仿真体系

如图 3.1 所示，以 FZ35-70 双 V 形闸板为原型，构建三维模型闸板剪切钻杆有限元模型，钻杆选取 $\Phi 127\text{mm} \times 9.19\text{mm}$ 规格。闸板采用四面体非结构化网格（主体 10mm，刃口 5mm），钻杆中部 500mm 剪切段加密至 2mm，总单元数 668,251，计算耗时降低同时保证精度，设置轴向窜动载荷（0-200kN）边界条件。

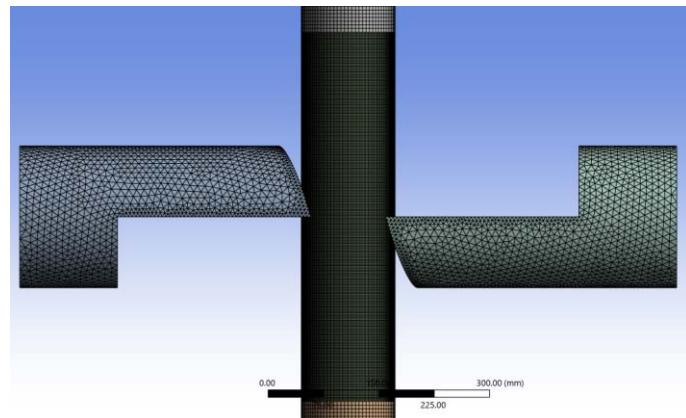


图 3.1 闸板剪切钻杆有限元仿真模型

如图 3.2 所示，基于 ANSYS/Fluent 模块，建立考虑流体-固体-接触多因素协同作用的防喷器三维数值模型，通过参数化模拟不同井况载荷组合，系统探究复杂流体环境对闸板剪切性能的作用规律。

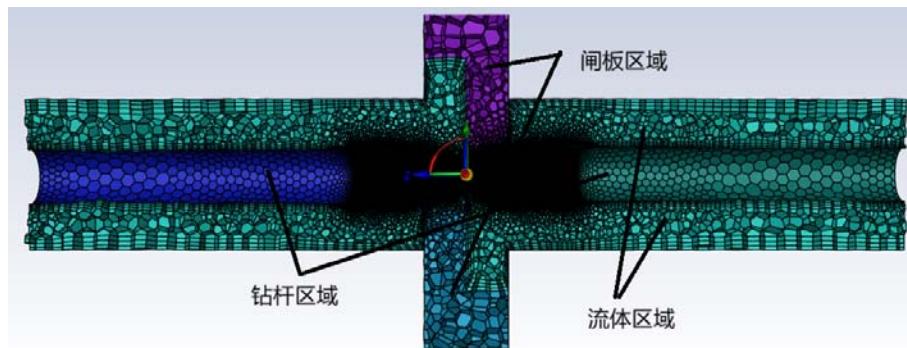


图 3.2 流固耦合下闸板防喷器剪切钻杆有限元模型

3.2 结果与分析

如图 3.3 所示，通过分析钻杆剪切变形过程，当闸板开始接触钻杆但未达屈服极限时，接触区出现应力分布并伴随椭圆化趋势，随着载荷持续增加突破材料屈服强度，闸板开始切入管体引发塑性变形，最终阶段在持续剪切作用下，裂纹从切口处萌生扩展，直到管柱完全断裂。且在窜动状态下，钻柱的两端都出现了裂纹，裂缝会沿着剪切刃向钻柱轴线的方向逐渐延伸，直至彻底断裂。此后，在拉-压复合载荷作用下，断裂的钻杆上段会沿轴向产生位移。

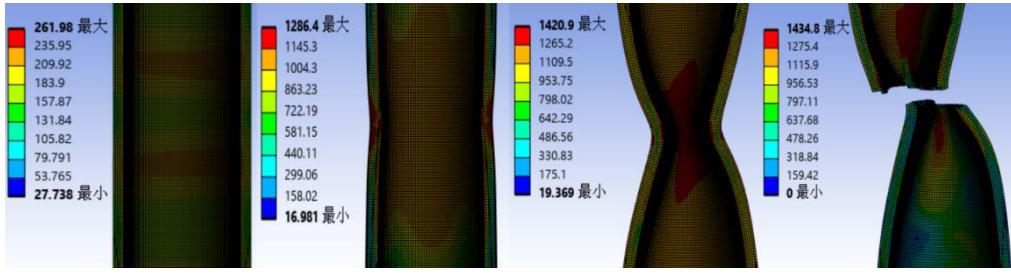
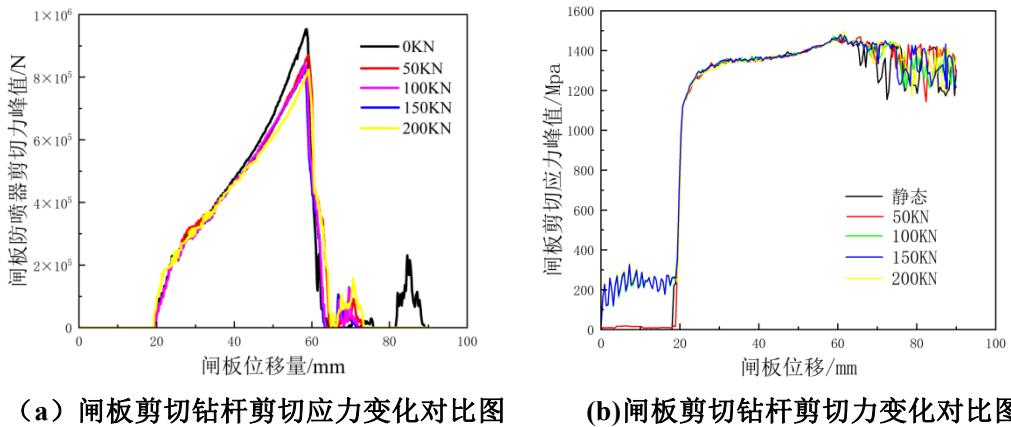


图 3.3 闸板剪切钻杆变形过程

如图 3.4 所示，当闸板接触钻杆时，钻杆剪切应力与剪切力呈陡升趋势。随着进入塑性变形阶段，应力逐渐放缓直至峰值，接触力迅速增长。在断裂瞬间，剪切应力与剪切力呈现断崖式跌落，但断裂后阶段钻杆仍保持残余应力。对不同窜动工况下进行比较，随着钻柱窜动载荷增大时，剪切应力与剪切力的峰值也迅速降低。



(a) 闸板剪切钻杆剪切应力变化对比图 (b) 闸板剪切钻杆剪切力变化对比图

图 3.4 闸板剪切窜动钻杆剪切应力与剪切力变化

如图 3.5 所示，基于有限元分析技术构建了闸板防喷器流固耦合仿真模型，在闸板剪切钻柱的动态过程中，当流场达到稳定状态时，随着钻柱所受窜动载荷的增大，流体对闸板的冲击效应逐渐减弱。

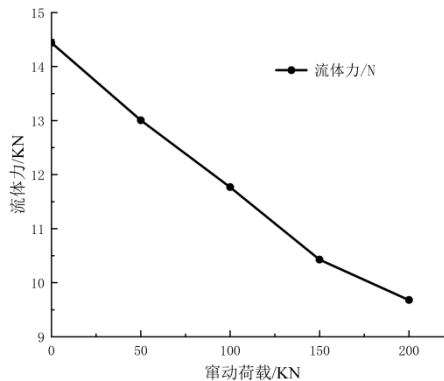


图 3.5 流体压力随钻杆窜动荷载变化趋势

如表 3.1 所示，本研究通过系统解析井控失效场景下闸板防喷器剪切作业的力学机制，综合纳入钻柱材料特性、闸板几何参数、接触摩擦效应、静液压力场及流体冲击等关键影响因素，分别建立了以三参数强度准则为基础的剪切应力场预测模型，和依托等效应力的剪切载荷预测模型并与仿真数据对比。

表 3.1 理论预测与数值模拟结果的比对分析

工况代码	窜动载荷 /kN	剪切应力理论值 σ_m /MPa	剪切应力仿真值 σ_f /MPa	剪切力理论预测 F_{thi} /KN	剪切力仿真结果 F_{sim} /KN
1	0(静态)	1561	1496.6	989.5	953.5
2	50	1554.3	1480.8	948.2	870.3
3	100	1546.1	1474.6	927.0	846.4
4	150	1535.6	1470.4	905.8	837.0
5	200	1522.7	1466.6	884.6	824.6

4 研究结论

本文针对闸板-钻杆窜动状态下闸板-钻杆体系剪切特性精确评价这一关键问题，以有限元方法为基础，建立考虑流固耦合作用的闸板-钻杆体系动力学仿真模型。阐明了窜动载荷作用下钻柱剪切失效机制，并量化揭示了井筒流体压力对闸板剪切阻的影响规律，系统揭示了深水防喷器动态剪切失效规律，提出的预测模型与优化策略可为我国深海装备设计提供技术支撑，对降低井控风险、提升油气开发安全性具有重要意义。论文的主要工作结论如下：

(1) 本文针对窜动条件下钻柱动载条件复杂、剪切过程载荷演化规律不明等实际问题，开展闸板防喷器剪切钻杆数值模拟方法研究。基于 ANSYS/LS-DYNA 显式动力求解器，以闸板-钻杆装配体三维模型为载体，通过定义材料本构关系、实施自适应网格剖分及配置非线性接触算法等前处理流程，实现了窜动载荷下剪切失效过程数值仿真。通过数值模拟，得到了钻柱在不同条件下的应力-载荷关系曲线，以及钻柱与闸板之间的应力-应变关系，对所建立的模拟模型进行可靠性验证，将为下一步开展闸板剪切钻杆的破坏机制的研究提供理论依据。

(2) 基于有限元分析技术构建了闸板防喷器流固耦合仿真模型，该模型可视化呈现闸板防喷器剪切钻杆过程中流场分布特征。仿真结果表明，当闸板对钻杆进行剪切时，在流场达稳态时，流体力和钻柱的窜动载荷之间存在着明显的负相关，随着钻柱所受轴向力的增大，流体对闸板的冲击效应逐渐减弱。这一现象源于钻柱位移增大导致流道截面积扩张，进而引起流体压力梯度降低，造成流体对闸板冲击力的衰减。

(3) 针对窜动工况下防喷器动态剪切参数求解难题，本文系统探究了闸板防喷器剪切窜动钻杆的机理分析方法，并构建了适用于窜动工况下剪切过程的理论计算体系，通过对闸板-钻杆体系中钻杆在窜动状态下的受力特性进行研究，考虑材料非线性、几何接触特性、流体体力和动态摩擦作用，建立了基于三参数强度理论的闸板防喷器的剪切应力预测模型与等效应力的剪切力计算模型，结果表明剪切应力方法理论值与仿真数据相对偏差不超过 5%，剪切力方法理论值与仿真数据相对偏差不超过 10%，该理论体系的建立为现场剪切作业提供了可靠的力学模型支撑。