油气井测试 WELL TESTING

· 试油试采技术 ·　　文章编号:1004-4388(2023)06-0020-09

井下油管切割工具的设计与力学分析

伊西锋[1],张峰[1],刘玉国[1],李玉坤[2],曹小建[2]

1. 中国石化胜利油田分公司石油工程技术研究院　山东东营　257088
2. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院　山东青岛　266580

通讯作者:Email:mliyk@ qq. com

引用:伊西锋,张峰,刘玉国,等. 井下油管切割工具的设计与力学分析[J]. 油气井测试,2023,32(6):20-28.

Cite: YI Xifeng ,ZHANG Feng ,LIU Yuguo ,et al. Design and mechanical analysis of downhole tubing cutting tool[J]. Well Testing,2023,32(6):20-28.

摘要　油气田开采中后期易发生油管砂埋、砂卡事故,不仅影响单井产量,严重时易造成油水井报废,有效的油管切割工具是应对卡井事故最高效的方法。研制了一套油管切割工具,全套机械系统包含锚固模块、驱动模块和进给模块等部分。建立了锚爪锚固的有限元模型,分析了锚固状态下锚爪和油管的应力与变形情况,并对不同切削速度、进给量、刀尖半径下的切割工具和油管进行了结构强度分析,由仿真结果选择出了最优切削速度、进给量和刀尖半径。最后对切割装置的壳体进行了振动和模态分析,获得了切割工具的固有频率等振动属性。经实验室切割实验,整个切割流程平稳流畅,割刀完整性好,无明显磨损,实验油管管柱断面光滑平整,整体效果良好。该分析为在实际操作中有效避开油管切割工具的共振区间提供了可靠的理论依据。

关键词　修井作业;井下油管;切割工具设计;切削速度;模态分析;有限元分析;力学分析

中图分类号:TE931　　**文献标识码**:文献识别号:A　　DOI:10. 19680/j. cnki. 1004-4388. 2023. 06. 004

Design and mechanical analysis of downhole tubing cutting tool

YI Xifeng[1], ZHANG Feng[1], LIU Yuguo[1], LI Yukun[2], CAO Xiaojian[2]

1. *Sinopec Shengli Oilfield Company*, *Petroleum Engineering Technology Research Institute*, *Dongying*, *Shandong* 257088, *China*
2. *College of Pipeline and Civil Engineering*, *China University of Petroleum*(*East China*), *Qingdao*, *Shandong* 266580, *China*

Abstract: In the middle and later stages of oil and gas field development, accidents such as sand burial and sand jamming of oil pipes are prone to occur, which not only affects the production of a single well, but also causes the scrapping of oil and water wells in severe cases. Effective oil pipe cutting tools are the most efficient way to deal with well jamming accidents. A set of oil pipe cutting tools has been developed, and the complete mechanical system includes anchoring module, driving module, and feeding module. A finite element model of anchor anchorage was established to analyze the stress and deformation of anchor and oil pipe under anchorage state. Structural strength analysis was conducted on cutting tools and oil pipes under different cutting speeds, feed rates, and tool tip radii. The optimal cutting speed, feed rates, and tool tip radii were selected based on the simulation results. Finally, vibration and modal analysis were conducted on the shell of the cutting device, and vibration properties such as the natural frequency of the cutting tool were obtained. Through laboratory cutting experiments, the entire cutting process is smooth and smooth, with good integrity of the cutting blade and no obvious wear. The cross-section of the experimental oil pipe string is smooth and flat, and the overall effect is good. This analysis provides a reliable theoretical basis for effectively avoiding the resonance range of tubing cutting tools in practical operations.

Keywords: workover operation; downhole tubing; cutting tool design; cutting speed; modal analysis; finite element analysis; mechanical analysis

在油水井开发生产作业中,因所处地质、工具工艺、增产及油层改造措施等因素的不同[1],都可导致生产井不能正常工作,尤其是进入开采中后期的油田,管柱卡阻事故愈发频繁。卡阻使油水井修井作业不能正常运行,严重卡阻事故的发生将导致油井、水井井段报废或者全井报废,对油田的开发经营带来巨大的经济损失。

传统的提升设备直接上拉或者活动上拉等解卡方式未能成功高效地解卡,需采取管柱切割的方式将卡点上部管段提出井口[2]。目前的井下切割

2023-04-20 收稿, 2023-08-23 修回, 2023-10-11 接受, 2023-12-20 网络版发表

技术有传统机械切割、水力切割、化学切割、聚能切割、磨料水射流切割、热熔式切割、电弧切割等。传统机械切割与水力切割技术工艺复杂、切割效率低[3];化学切割会对环境造成污染[4];聚能切割有时达不到设计深度和合适位置,同时,还存在切割后鱼顶不规整、套管损伤等问题,给后续打捞解卡带来不便;后三种技术为新型技术,切割平稳、效率高,但由于井下状况复杂、空间小,限制了这些技术的使用。由于管外切割存在套管内径及切割长度受限问题,油管内切割是在油水井发生卡阻或油管发生破坏时割断油管并将损坏油管上拉出井口的有效工艺,现存油管内切割工具对管径低于 70 mm 的油管具有一定局限性[5],为最大限度的切断油管,同时为后续的打捞工作做好准备,亟需设计小口径的油管内切割工具。

国外对切割工具的研究有美国喷射研究中心研制的聚能切割油管切割器[6]、哈里伯顿能源服务公司的慢旋转射流清洗工具[7]以及 Bowen 公司的水力套管切割器[8]等。但以上工具存在切割结果难以控制,对环境造成污染,或者是技术被垄断,价格昂贵等使用缺陷。国内自主研发出一款高效环保的油管内电动切割工具是目前石油行业亟需。

国内中石化西南油气分公司提出了一种新型的电缆机械切割技术[9],工具通过电缆传输电信号使锚定部分作业,输送指令使内部马达转动,带动刀片旋转切割。与常规切割方式相比,操作简单,可控性强,可实时监控,可用于解决大井深,大斜度井的油管卡钻事故。中石化胜利石油工程有限公司研制了适用于电缆送入作业的井下管柱电控切割工具[10],采用地面直流源供电,上位机控制作业,对流程实时监控,可实现井下与地面的数据互联,适用于外径 73.0~101.6 mm 的油套管切割。通用石油天然气公司研制了一种井下电动套管切割工具(DECT),该切割器主要由锚定部分、切割部分、电控部分组成。井下电动套管切割工具可精密控制切割过程,大大提高了切割质量。切割完成后很容易实现废弃套管的分段打捞和清理[11]。整个过程监控切割速度,并通过井下麦克风的实时响应检测作业是否完成,准确完成切割而不损害相邻管柱[12]。贝克休斯公司发明了一种用于在井内切割或铣削套管的工具[13],包括向外延伸到基本径向位置的多个刀片,用于在切割动作中切割放松管柱的壁并移除预定长度的套管柱[14],该发明为本研究提供指导思路。

综上所述,传统的机械切割、爆炸切割、水力切割、磨料射流切割、电弧切割等技术经过长期的研究已经趋于成熟,但仍存在作业效率低、对周围套管的损坏严重、可控性能低、工艺复杂、断口不平整等缺陷。目前常规的切割技术已无法满足现场作业需要。国外提出的电控的切割技术可满足高效工作、断口光滑、一次下井多次作业、环保不破坏其他管道、对切割过程实时监控等要求,且已经得到广泛应用。但其技术保密性高,服务费非常昂贵,使用性价比太低。国内学者对井下电动切割技术的研究正处于研发阶段,通过多年的努力已研究取得一些成绩,但与国外技术有一定的距离,且目前国内无成熟的对于小口径的油管管内切割工艺及工具。本文基于贝克休斯工具研究基础研发一款井下油管内电动切割工具,旨在推动国内对于井下电动切割技术的发展。

1 井下油管内切割工具整体方案设计

根据工具的设计要求,对比各种切割方案后确定工艺流程,并且对井下油管内切割工具的结构原理与总体参数进行概述。本文研发的切割工具主要由上部锚固模块、上部驱动模块、进给模块、下部驱动模块、下部锚固模块五个部分组成。工具通过电动系统驱动,利用锚固模块固定在管道内壁上,步进电机带动丝杠转动,锥体逐步将刀具向外推出至与被割管道内壁相接触,电动马达带动刀具高速旋转,从内部切割油管。该工具操作简单、自动化程度高,可以满足油管内切割作业,为处理遇卡油管提供新思路,具有广阔的应用前景。

1.1 设计要求

根据油管内切割装置工作环境、油管尺寸、切割过程工艺、切割能力以及其他相关方面要求,对油管切割装置的设计要求如下:

(1)油管外径:73 mm,接箍外径 89.5 mm;

(2)油管壁厚:5.5 mm;

(3)工具最大外径:55 mm;

(4)切割方式:切断车刀;

(5)驱动方式:电驱动(24 V);

(6)套管材料:N80(屈服强度 485 MPa、抗拉强度 625 MPa);

(7)切割质量:切口光滑,切屑细小;

(8)性能要求:全程监控、精确控制、重复使用。

1.2 设计流程及工作原理

井下油管切割设备在修井作业中占有重要地位,能减少修井作业时间,使油井尽快恢复生产,减少油田损失[15]。

对井下油管电动切割工具进行设计,首先应明确产品的设计目标,调研现有井下管内电动切割工具,比较优缺点,提出初步设计方案,并经过作业专家论证,确保其合理性;然后根据设计方案,进行具体的结构设计、构建产品模型。再运用有限元法进行关键结构强度的校核与优化,确定最优的切割参数;达到设计要求后绘制 CAD 图纸并加工,同时进行控制电路的设计与制作;进行样机的组装,搭建室内试验架开展室内测试并总结记录调试情况,以便后续进行修改和完善,直至可完成现场应用。具体设计流程见图 1。

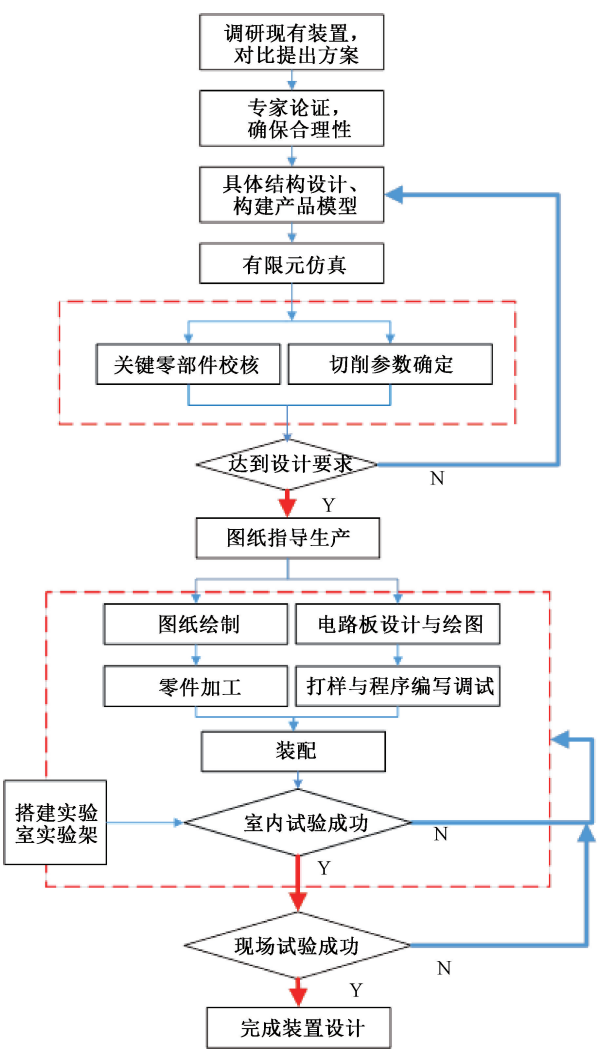


图 1 井下油管内切割工具设计流程

Fig. 1 Design flow of downhole tubing internal cutting device

井下油管内切割工具主要由上部锚固模块、下部锚固模块、上部驱动模块、下部驱动模块、进给模块、总控制筒、锚固控制筒、连接头等部分组成(见图 2)。各模块之间通过连接头进行连接。其中,总控制筒、锚固控制筒内装有电路板,为整个装置的控制系统;上、下部锚定模块在接收到锚固信号后,锚爪推出,将整个装置固定在管柱内壁上;上、下部驱动模块协同为进给模块的旋转提供动力;进给模块是利用丝杠传动将步进电机的旋转运动转变成刀具总成的径向进给。

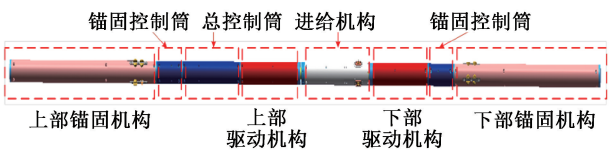


图 2 井下油管内切割工具结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of downhole tubing internal cutting device

设计的油管内切割工具的工作原理为:利用电缆将工具下放到油管的切割位置,通过地面直流稳压电源对装置供电,总控制筒传递信号给锚固控制筒,锚固模块工作,锚爪向外推出锚定油管内壁,使工具不产生轴向位移和环向偏移,锚固完成后,电动推杆自锁直至完成切割作业;进给模块与上、下部驱动模块开始工作,车刀一边轴向旋转一边径向进给,直到切断油管;切割完成后,控制电路驱动进给步进电机反向旋转,刀具总成在压缩弹簧的作用下缩回工具内,直至达到工具切割时的初始状态;油管的整个切割过程完成,油缸泄压收回锚爪,脱开油管;装置从井口提出,再将切后的油管取出,完成切割作业。

1.3 机械装置参数

针对 73 mm 的油管研制了一套油管内电动切割工具,对各部分结构进行详细设计,并对关键性的零部件进行了仿真优化,最终完成结构的确定和三维图纸的绘制,加工制作样机。全套油管内电动切割工具的实物图如图 3 所示。

该油管内切割工具的主要技术参数如下:设备总长 1 396.5 mm,切割对象 62 mm、73 mm 油管,设备质量 60 kg,刀具材料硬质合金,外径 55 mm,刀具转速 120 r/min,刀片伸出最大外径 76 mm,径向进给量 0.002 3 mm/r,工作电压 24 V 直流电,切断时间 10~20 min。

2 切割工具设计中的有限元分析

主要采用 ABAQUS 有限元软件研究了切削过

程中切削速度、进给量、刀尖半径对切削力的影响,以此来作为最优切削参数确定的理论依据。本文还对装置的外壳体进行模态分析,分析设备的固有频率和振型等振动特性,基于此对壳体进行优化与改进。

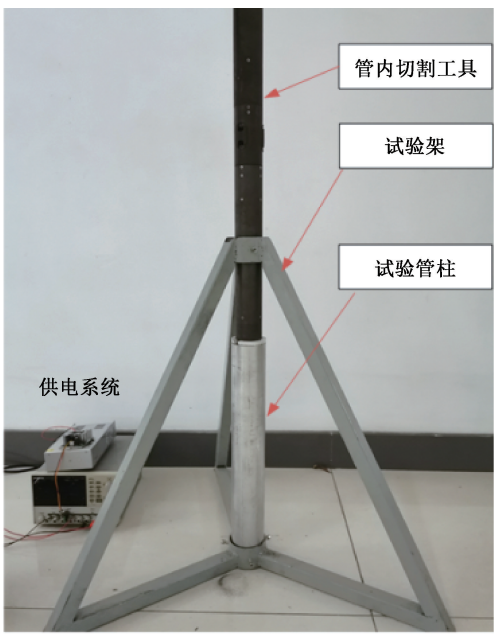


图 3　油管内电动切割工具总体图
Fig. 3　Overall drawing of electric cutting device in oil pipe

2.1　锚爪油管锚固有限元分析

锚爪在油缸内压作用下径向推出,随着内压的升高,锚爪将嵌入油管内壁,使内壁产生轻微的塑性变形。锚爪需承受装置自重,即承受向上的轴向力,则锚爪牙上侧面承受的压力增大,下侧面承受的压力减小,并且锚爪嵌入后会有轻微下滑。但嵌入内壁的接触面为斜面,承受的接触压力并不均匀,无法准确计算嵌入深度、下滑位移与锚定力[16]。采用有限元仿真计算,确定各锚固结构的最优参数。

油管材料为 N80,尺寸为内径 62 mm 外径 73 mm。锚爪采用硬质合金,材料属性如表 1 所示。

表 1　材料属性
Table 1　Material properties

材料	密度/($g\cdot cm^{-3}$)	硬度	弹性模量/GPa	泊松比	屈服极限/MPa	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa
N80	7.87	241HB	209	0.30	552	758	/
硬质合金	14.50	90HRA	600	0.22	/	/	5 460

选取单个锚爪与一段油管作为分析对象,忽略锚爪中间的弹簧槽与密封圈槽,只保留主体与锚爪牙;油管只取与锚爪接触部分,面积大于锚爪底面积即可。对锚爪与油管内壁进行局部网格细化,锚爪油管锚固模型如图 4 所示。

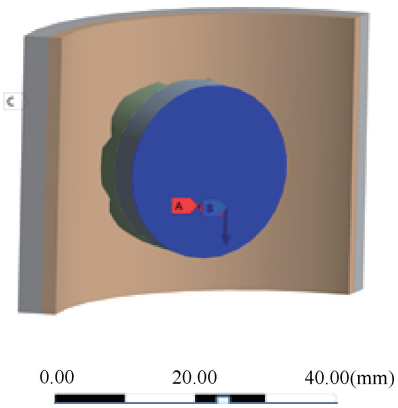
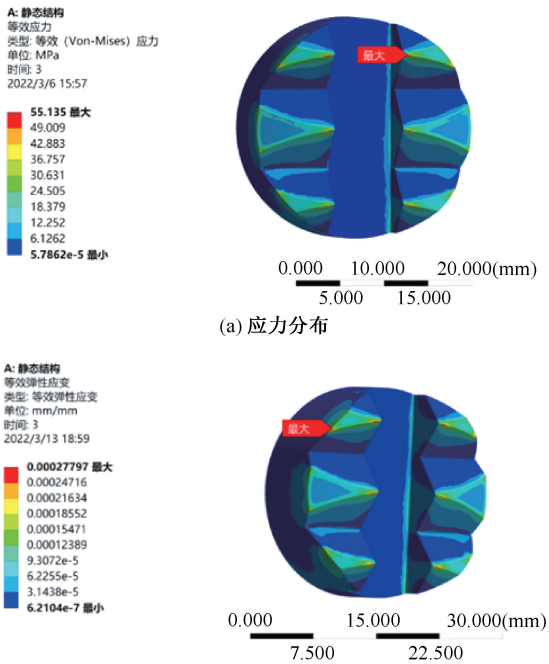


图 4　锚爪锚固模型
Fig. 4　Anchorage model

锚爪牙与油管之间设置摩擦接触,摩擦系数为 0.15。固定油管外壁如图 4 中的 C 位置,对锚爪后端施加压力和向下的轴向力载荷,如图 4 中的 A 和 B 所示。仿真计算中创建了两个载荷步,第一载荷步对锚爪后端面施加压力 3 MPa,锚爪沿油管轴向方向的位移量为 0,模拟锚爪挤压油管过程;第二载荷步,保持锚爪后端面的压力不变再对锚爪施加向下的轴向力 50 N,模拟锚爪下滑过程。

仿真计算得到锚爪的应力和变形结果如图 5 所示,由图 5 可知,锚爪的最大应力为 55.14 MPa,最大变形远小于 1 mm,且均发生在锚爪顶部与油管接触部分,与实际情况相符合。锚爪受到的最大应力远小于锚爪材料的抗压强度,因此锚爪的整体强度满足多次作业不更替的使用要求。

由仿真计算结果得到,第一步载荷加载完成时,锚爪牙嵌入油管,油管应力集中与最大变形均发生在油管与锚爪牙顶接触位置,最大应力为 25.28 MPa,最大变形远小于 1 mm。第二载荷步施加完成时,锚爪沿油管的轴向下滑,下滑后油管最大应力为 32.55 MPa,最大变形远小于 1 mm,结构的最大应力均远小于 N80 材料的屈服强度,不会发生塑性变形,即锚固过程对油管本身不会造成损伤。利用 ANSYS-WorkBench 的后处理功能 Probe 可求出锚爪锚定力。第二载荷步完成时,锚定力最大,大小为 1 490.60 N,装置共包含 12 只锚爪,总锚定力为 1.79×10^4 N,满足要求。因此锚固装置整体可在不损坏油管的前提下,满足所需锚定力,避免装置下滑。



(a) 应力分布

(b) 变形结果

图 5 锚爪结构强度分析结果

Fig. 5 Cloud diagram of stress distribution of anchor claw

2.2 基于 ABAQUS 的切割工具整体有限元仿真分析

实际切割作业中,切割质量可通过目视切割断口进行主观判断,通过探究不同切削速度、进给量、刀尖半径下切削力的变化规律来评价切割质量。

图 6 和图 7 为模型在切削深度 2 mm,切削速度 0.44 m/s,进给量 0.15 mm,刀尖半径 0.20 mm 下的切削应力云图与切削力动态变化曲线。计算选择的合理材料流动应力模型[17-18]为 Johnson-Cook(简称 J-C)本构方程

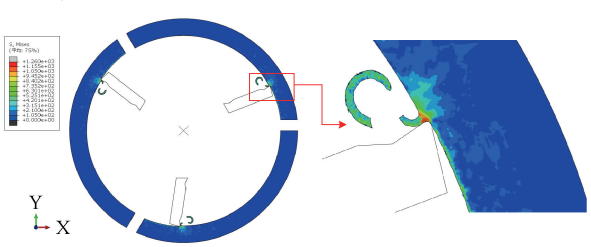


图 6 切削过程应力云图

Fig. 6 Stress nephogram of cutting process

由图 6 可知,切削层切削变形后与基体分离形成带状切屑,证明切削过程平稳。应力主要集中在刀尖与工件接触区域,即第一变形区,主要是由第一变形区的弹塑性变形引起。其应力值在工件材料的屈服极限值上下浮动,这与切削分离准则相符合。随着刀具的旋转并开始接触工件,工件在刀具的挤压作用下发生弹塑性变形和应变硬化,切削力发全急剧的线性增大。随着切削过程趋于稳定,切削力达到最大值后开始在区间内循环波动,是由于切屑在应力值超过破坏极限时发生断裂导致。

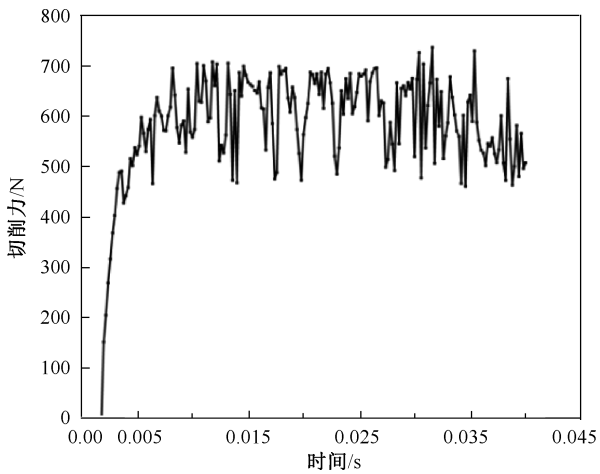
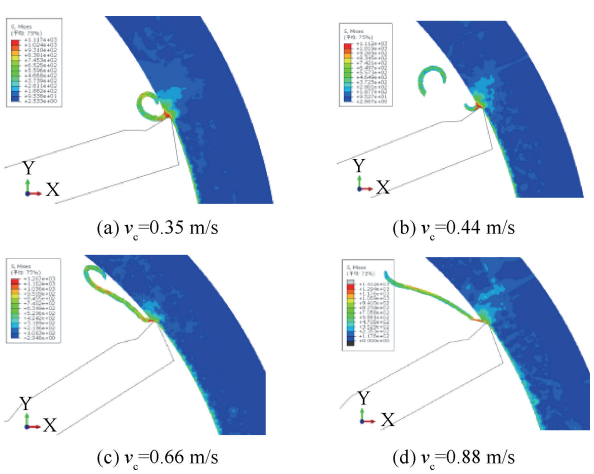


图 7 切削力动态变化曲线

Fig. 7 Dynamic variation curve of cutting force

为探究切削速度对该模型切削力的影响,利用统一变量法进行仿真实验,切削深度 2 mm,进给量为 0.15 mm,刀尖半径为 0.20 mm,不考虑温度的影响。根据主轴电机参数分别选用 96 r/min、120 r/min、180 r/min、240 r/min,对应切削速度分别为 0.35 m/s、0.44 m/s、0.66 m/s、0.88 m/s,不同切削速度对应的应力分布与切屑形状如图 8 所示。



(a) v_c=0.35 m/s (b) v_c=0.44 m/s

(c) v_c=0.66 m/s (d) v_c=0.88 m/s

图 8 不同切削速度下应力分布与切屑形状

Fig. 8 Stress distribution and chip shape at different cutting speeds

由图 8 可知,随着切削速度的增加,切屑形状仍为带状,但切屑的变形程度不同,变形系数减小,剪切角增大,切屑变形减小。可以看出,当切削速度为 0.44 m/s 时,可形成连续平稳的断屑,证明切削稳定,切削质量高。不同切削速度对应的切削力变化见表 2。

表 2　不同切削速度对应的平均切削力

Table 2　Average cutting force corresponding to different cutting speeds

切削速度/(m·s^{-1})	0.35	0.44	0.66	0.88
平均切削力/N	604.30	638.10	619.60	583.30

由结果可见,切削力在区间内先增大后减小,在切削速度为 0.44 m/s 时达到最大,继续提高切削速度会使切削力减小,降低切削效率,不利于保证作业质量。在材料切削实验中,工件材料经过屈服阶段后,内部组织变化,晶粒沿着变形最大的方向被拉长扭曲,进而升高了工件材料的抗应变能力,这是切削力变大的直接原因。然而工件材料的应变硬化持续时间短,因此当切削速度提高时,小部分材料应变硬化,而大部分材料还未发生变形,因此硬化作用被消减,切削力相应减小。因此最优切削速度为 0.44 m/s,此时切削过程平稳,切削效率高。

为探究进给量对切削力的影响,设置切削深度 2 mm,切削速度为 0.44 m/s,刀尖半径为 0.20 mm,不考虑温度的影响。在 0.15 mm、0.25 mm、0.35 mm 和 0.45 mm 几个不同进给量下,随着进给量的增加,切屑形状仍为带状,但切屑的厚度增大。其变形程度与进给量呈负相关,即进给量越大,变形系数越小,切屑卷曲程度越小。剪切角增大,切屑变形程度减小。当进给量为 0.15 mm 时,可形成连续平稳的切屑,证明切削稳定,切削质量高。

为探究刀具刀尖半径对该模型切削力的影响,利用统一变量法进行仿真实验,切削深度 2 mm,切削速度为 0.44 m/s,进给量为 0.15 mm,不考虑温度的影响。刀尖半径分别选用 0.10 mm、0.20 mm、0.30 mm、0.40 mm,当进给量大于刀尖半径时,工件以切屑的方式排出;随着刀尖半径的增加,进给量相对减小,即切屑的厚度减小。剪切角减小,切屑变形程度增大,变成碎屑。不同刀尖半径对应的切削力变化见图 9。

由图 9 可知,刀尖半径为 0.20 mm 时,切削力最大,之后随着刀具半径的增大,切削力反而减小。由于刀具的刀尖半径越大,刀具的前角变小,使剪切角变小,即刀具变得“滞钝”,刀具切入工件更加困难,所有切削力会减小。综上,刀具的最优刀尖半径选择 0.20 mm。

2.3　油管切割中壳体的模态分析

井下油管内切割工具需承受转动扭矩,为避免

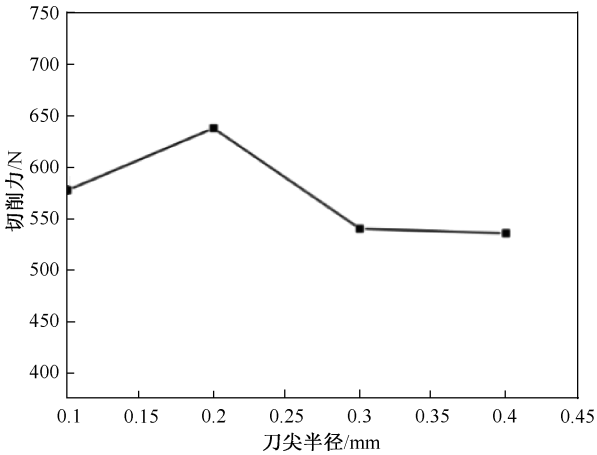


图 9　切削力随刀尖半径变化规律

Fig. 9　Variation law of cutting force with tool tip radius

额外的振动,需对设备的动力学特征进行评估,验证其转动频率是否接近设备的固有频率(是否发生共振)。若发生共振,小的动态载荷也将形成大的响应[19]。对壳体进行固有模态分析,系统动力学控制方程可表示为

$$[M]\{\ddot{x}\}+[C]\{\dot{x}\}+[K]\{x\}+\{F_t\}=0 \quad (1)$$

式中:$[M]$ 为模块质量矩阵;$\{\ddot{x}\}$ 为节点加速度矢量;$[C]$ 为模块阻尼矩阵;$\{\dot{x}\}$ 为节点速度矩阵;$[K]$ 为模块刚度矩阵;$\{x\}$ 为节点位移矢量;$\{F_t\}$ 为随时间变化的外载荷函数。

在自由振动(理想情况)下,模态分析无需考虑外载荷影响和阻尼效应[20],则公式 (1) 可简化为

$$[M]\{\ddot{x}\}+[K]\{x\}=0 \quad (2)$$

对于线性系统,节点位移矢量的表达式为

$$\{x\}=\{\delta\}_i\cos\omega_i t \quad (3)$$

式中:$\{\delta\}_i$ 为第 i 阶模态对应的特征向量;ω_i 为第 i 阶模态对应的固有圆周频率, rad/s;t 为振动时间,s。

将式 (3) 代入式(2)可得

$$([K]-\omega_i^2[M])\cdot\{\delta\}_i\cdot\cos\omega_i t=0 \quad (4)$$

当模型在自由振动(理想情况)时,各阶特征向量与固有频率不可能同时为 0,故公式(4)可进一步简化为

$$[K]-\omega_i^2[M]=0 \quad (5)$$

求解公式(5),可得方程的根是 ω_i^2, 即特征值,其中 i 的取值范围为 1~N(表示结构自由度个数)。ω_i 为固有圆周频率(单位为 rad/s),结构固有频率 f_i(单位为 rad/s)可写成

$$f_i=\frac{\omega_i}{2\pi} \quad (6)$$

模态分析可得到 f_i 或者 ω_i，都可以用来描述结构的振动频率。

采用 ABAQUS 软件对壳体结构进行模态仿真分析，壳体三维实体模型如图 10 所示。

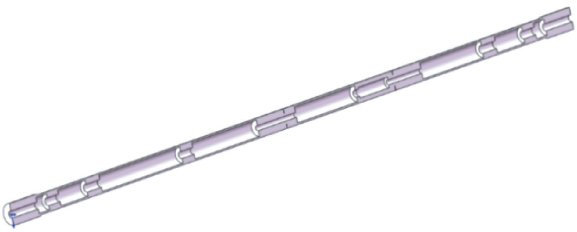


图 10　壳体简化三维剖面图
Fig. 10　Simplified 3D section of shell

壳体材料取 45 号钢，密度为 7 890 kg/m^3，杨氏模量为 210 GPa，泊松比为 0.27。网格划分采用线性六面体扫掠（C3D8R），得到单元数为 171 712。固定壳体的上下端锚定部分，限制六个自由度，频率为其固有属性，无需进行其他载荷施加。

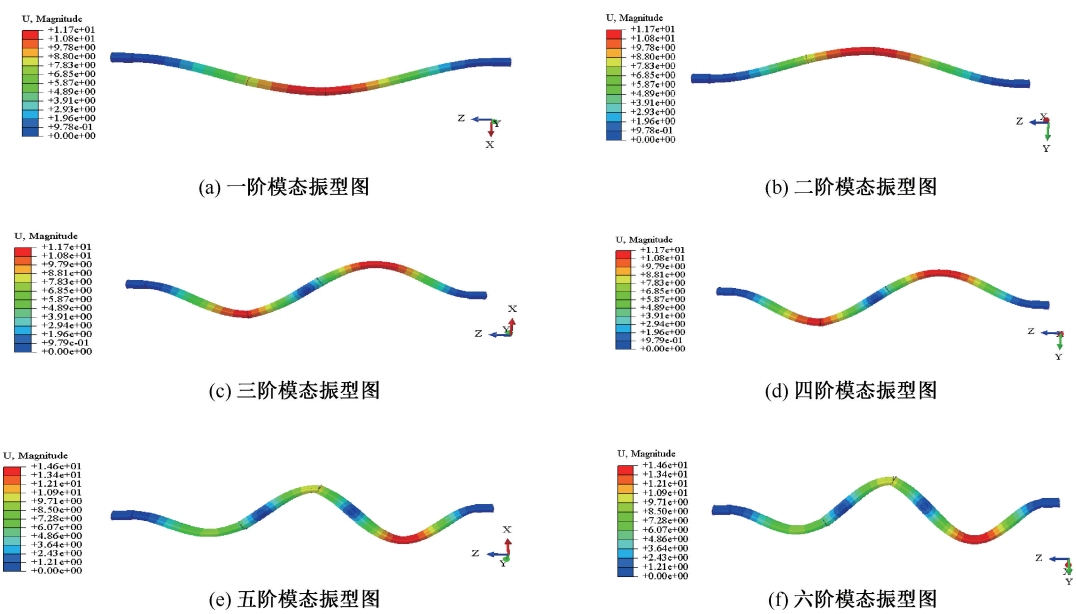
模态分析结果可用于对结构固有振型进行分析，与动载荷频率进行比较，评估是否发生共振，以便对结构与外载荷进行改进与优化设计。在忽略阻尼与外力的情况下，进行模态仿真分析获得结构的前 6 阶固有频率如表 3 所示。

表 3　壳体固有频率（1~6 阶）
Table 3　Natural frequency of shell (order 1 ~ 6)

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1 阶	68.71	4 阶	193.43
2 阶	68.71	5 阶	374.32
3 阶	193.43	6 阶	374.32

由表 3 可知，第 1~2 阶振型的固有频率为 68.71 Hz，第 3~4 阶振型的固有频率为 193.43 Hz，，第 5~6 阶振型的固有频率为 374.32 Hz。井下油管内电动切割工具的主轴电机转速为 2 r/s，即激振频率为 2 Hz。油管壳体的固有频率均远大于激振频率，故不会发生共振而影响稳定性。

油管壳体的前 6 阶模态阵型如图 11 所示。



(a) 一阶模态振型图　(b) 二阶模态振型图　(c) 三阶模态振型图　(d) 四阶模态振型图　(e) 五阶模态振型图　(f) 六阶模态振型图

图 11　前 6 阶模态振型图
Fig. 11　Pattern of first 6 modes

由图 11 中的模态振型可知，井下油管内切割工具进给模块两端连接处与主控制筒为薄弱部位，更容易发生破坏，因此进行加固优化。通过 1~2 阶颜色变化也可以看出距离固定端越远，振幅越大，因此设计时可使锚定位置尽量接近进给模块以减小振动，提高稳定性。

3　切割实验

在实验室对废弃油井管管柱进行切割试验，管柱为内径 62 mm、外径 73 mm 的 N80 管段。利用三脚试验架使试验油管垂直固定于地面。工具为串状结构，包括上下锚固模块、上下旋转模块、进给模块等。将管内切割工具放置入试验油管管柱内，通过树脂扶正块确保切割工具与试验油井管的同轴度；调节直流稳压电源（LRS-350-24）使其为控制系统输送 24 V 稳定电压，功率为 350 W；工具开始自动切割油管，根据电路板中的 LED 灯检测切割流程，可实时检测切割工具的运行状态。

根据二维切削仿真得到的最优切割参数,选取切削速度 0.44 mm/s、进给量 0.15 mm、刀尖半径 0.20 mm。利用三脚架将油管内电动切割工具固定在指定切割位置,通电后旋转模块开始带动进给模块轴向旋转,同时进给步进电机开始工作,逐渐将刀具推出,20 min 后油井管被切断。切割过程平稳流畅,整个切割流程平稳流畅,切割完成后,提出切割工具,发现切割后的割刀完整性好,无明显磨损,切割作业前后刀具情况对比如图 12 所示。

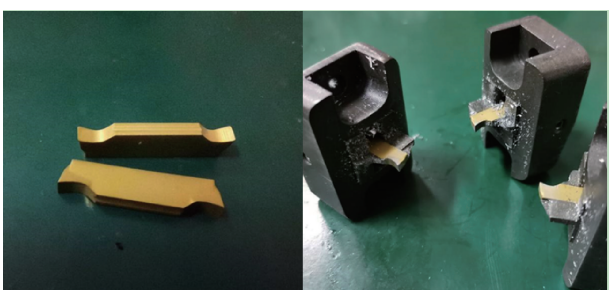


图 12　刀具作业前后对比
Fig. 12　Comparison before and after tool operation

切割后的断面如图 13 所示。可见,试验油管管柱断面光滑平整,整体效果良好,获得了预期效果,为油田现场的油管的切割作业提供了理论支撑。

(a) 管柱切割一部分时　(b) 管柱切断

图 13　管柱切割断面
Fig. 13　Cutting section of pipe column

4　结论

(1)本套电动切割工具可以切割内径大于 58 mm 且屈服强度小于 500 MPa 的管材。

(2)设计了一套油管切割工具,共包括锚固模块、进给模块和驱动模块等几个部分。对锚爪油管锚固进行了有限元分析,计算得到锚爪发生沿油管轴向的下滑时,下滑后最大应力为 32.55 MPa,结构的最大应力均远小于 N80 材料的屈服强度,不会发生塑性变形,锚固过程对油管本身不会造成损伤。

(3)分析了切削速度、刀尖半径、进给量对切削力的影响规律,并确定了最优的切削参数分别为:切削速度 0.44 m/s、刀尖半径 0.20 mm、进给量 0.15 mm。为探究设备的固有振动特性,防止刀具在转动切割过程中发生共振而影响稳定性,对切割装置外壳体进行模态分析,得到结构前六阶固有频率,得出了壳体容易发生共振的区域,并进行了结构的优化与加固。

(4)为电动切割工具的参数选择提供可靠理论依据,可为油管切割实际操作提供有效指导。

致谢:感谢庞玉川等同学参与了切割工具的组装以及切割实验,致谢中国石油大学(华东)工程力学系提供实验室场地。

参考文献

[1] 叶文勇, 胡东锋, 王思凡. 井下电驱切割油管工具研究与试验[J]. 石油机械, 2023, 51(2): 93-100.
YE Wenyong, HU Dongfeng, WANG Sifan. Research and testing of downhole electric drive tubing cutting tool [J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51 (2): 93-100.

[2] 刘啸峰, 苏镖, 丁洁,等. 电缆机械切割技术在处理大斜度井油管卡钻中的应用[J]. 钻采工艺, 2021, 44(6): 136-138.
LIU Xiaofeng, SU Biao, DING Jie, et al. Application of cable mechanical cutting technology for handling pipe sticking in highly deviated wells[J]. Drilling and Production Technology, 2021, 44(6): 136-138.

[3] 翟城城. 电缆投送套管切割器的研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018:23-30.
ZHAI Chengcheng. The research of cable driven casing cutter [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018:23-30.

[4] MACFARLANE R, SCHWANITZ B, AGUIRRE. Mechanical pipe cutting in ERD wells with pipe under compression [C]//International Petroleum Technology Conference. IPTC, 2014: 36-40.

[5] 李玉坤, 李汝强, 刘玉国, 等. 井下油管内切割装置开发与应用[J]. 自动化与信息工程, 2022, 43(3): 37-43.
LI Yukun, LI Ruqiang, LIU Yuguo, et al. Development and application of downhole tubing internal cutting device[J]. Automation & Information Engineering, 2022, 43(3): 37-43.

[6] NIMMO P, KAMP A W, LEIPER F J. Explosive cutting of stuck drillpipe and bottomhole assemblies[C]//European Petroleum Conference, SPE,1984, 12: 102-110.

[7] 许清海, 胡晋阳, 刘春阳, 等. 渤海油田切割工艺技术研究[J]. 石化技术, 2018,25(5):79-84.
XU Qinghai, HU Jinyang, LIU Chunyang, et al. Study on the cutting technology of Bohai Oilfield[J]. Petrochemical Industry Technology, 2018,25(5): 79-84.

[8] ZHANG J, DIAO Y H, ZHAO Y H. Experimental study on flat plate heat pipe heat recovery equipment with nanofluid [J]. Building Science, 2012,28(6): 31-35.

[9] 平恩顺, 张曙光, 胡永雄, 等. 水平井连续油管高效钻磨技术研究[J]. 钻采工艺, 2018,41(5): 56-58.
PING Enshun, ZHANG Shuguang, HU Yongxiong, et al. Research on efficient drilling and grinding technology for horizontal well continuous tubing[J]. Drilling & Production Technology, 2018,41(5): 56-58.

[10] 赵传伟, 张辉, 吴仲华, 等. 井下管柱电控切割工具的研制与试验[J]. 石油机械, 2020, 48(12): 117-122.
ZHAO Chuanwei, ZHANG Hui, WU Zhonghua, et al. Development of electric control cutting tool for downhole string[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(12): 117-122.

[11] 徐太保. 机械切割在南海西部气田修井作业中的应用[J]. 石油管材与仪器, 2020,6(6): 83-85.
XU Taibao. Application of mechanical cutting in workover operation in western gas field of south China sea[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2020,6(6): 83-85.

[12] 罗少锋, 贾奔, 林志勇,等. 电缆机械切割工艺在修井中的应用与探索[J]. 石油和化工设备, 2017, 20(4): 62-65.
LUO Shaofeng, JIA Ben, LIN Zhiyong, et al. Application and exploration of cable mechanical cutting technology in workover[J]. Petro & Chemical Equipment, 2017, 20(4): 62-65.

[13] WATSON B, SCHULTZ R. Downhole tool for guiding a cutting tool[J]. Metallurgist, 2016(1): 63-64.

[14] CHEN Q, ZUO T, XU Y, et al. Design and realization of intelligent wheelchair based on STM32[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1678(1): 18-20.

[15] 桂鹏. 2-7/8″油管单管割刀原理、结构及应用实例[J]. 石化技术, 2021, 28(11): 202-203.
GUI Peng. Principle, structure and application example of 2-7/8″ tubing single pipe cutter[J]. Petrochemical Industry Technology, 2021, 28(11): 202-203.

[16] 宫敬,史博会,李晓平等. 油气管网仿真技术在智能管网建设中的应用及展望[J]. 油气储运, 2023, 42(9): 988-997.
GONG Jing, SHI Bohui, LI Xiaoping, et al. Application of oil and gas pipeline network simulation technologies in construction of intelligent pipeline network and its prospect[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(9): 988-997.

[17] KONG H X, Guo L F, Yin X X. Finite element analysis of titanium cutting based on ABAQUS[M]. Beijing: Electrical Technology, 2011:117-125.

[18] 彭臣西, 吴运新, 易守华, 等. JC 本构模型对 7050 铝合金二维切削仿真影响的研究[J]. 工具技术, 2018, 52(11): 59-62.
PENG Chenxi, WU Yunxin, YI Shouhua, et al. Effect of JC constitutive model on two-dimensional cutting simulation of 7050 aluminum alloy[J]. Tool Engineering, 2018, 52(11): 59-62.

[19] 沈宇峰, 何幸保, 唐军. 基于 ABAQUS 锯片铣刀的模态分析及优化[J]. 工具技术, 2019, 53(9): 74-77.
SHEN Yufeng, HE Xingbao, TANG Jun. Modal analysis and optimization of saw blade milling cutter based on ABAQUS[J]. Tool Engineering, 2019, 53(9): 74-77.

[20] 陈硕. 基于 ABAQUS 超声振动钻削系统变幅杆模态分析[J]. 精密制造与自动化, 2018,54(2):1-3.
CHEN Shuo. Modal analysis of amplitude bar based on ABAQUS ultrasonic vibration drilling system[J]. Precise Manufacturing & Automation, 2018,54(2):1-3.

编辑　方志慧

第一作者简介:伊西锋,男,1980 年出生,硕士,工程师,2006 年毕业于中国石油大学(华东)油气田开发工程专业,现从事水平井修井完井研究工作。电话:13805469697;Email:yixifeng.slyt@sinopec.com。通信地址:山东省东营市东营区西三路 306 号胜利油田分公司石油工程技术研究院,邮政编码:257088。