

螺杆钻具三卡瓦偏心打捞筒的研制及应用

麻坦^{1,2,3,4}

(1. 国家矿山应急救援山东特勘队, 山东 济宁 272000; 2. 中国石油大学(北京), 北京 102249;
3. 山东省应急管理厅矿山钻探救援重点实验室, 山东 济宁 272000; 4. 山东省煤田地质局第二勘探队, 山东 济宁 272000)

摘要: 钻井过程中螺杆钻具断落事故时有发生, 对于螺杆钻具外筒壳体脱扣、转子断裂抽芯等事故形成的轻质“落鱼”, 使用常规卡瓦打捞筒作业时的适用性不足、打捞成功率低。基于此, 设计了螺杆钻具三卡瓦偏心打捞筒, 通过打捞筒的锥形导向面驱动上卡瓦、中卡瓦和下卡瓦共轭环空收缩卡紧, 实现对该类“落鱼”的有效打捞。三卡瓦的偏心排布结构设计, 增加了有效夹持面积, 提高了打捞筒对螺杆钻具的综合打捞力。结合打捞筒的工作原理, 建立了卡瓦常规夹持力和挤压夹持力的计算公式, 对比得出三卡瓦偏心打捞筒所需的卡瓦常规夹持应力可减少50.46%, 捞牙咬深可减少13.92%。试制的打捞筒在施工现场进行了打捞实践, 表明其结构设计合理, 打捞性能可靠。

关键词: 螺杆钻具; 打捞工具; 轻质“落鱼”; 偏心结构; 三卡瓦偏心打捞筒

中图分类号: P634.4⁺9; TE921⁺.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)06-0099-07

Development and application of eccentric fishing barrel with three slips for screw drilling tools

MA Tan^{1,2,3,4}

(1. National Mine Emergency Rescue Shandong Special Survey Team, Jining Shandong 272000, China;

2. China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

3. Key Laboratory of Mine Drilling and Rescue of Shandong Provincial Department of Emergency Management, Jining Shandong 272000, China;

4. The Second Exploration Team of Shandong Coalfield Geology Bureau, Jining Shandong 272000, China)

Abstract: During the drilling process, accidents of screw drilling tools breaking and falling often occur. For lightweight falling objects caused by accidents such as detachment of the outer shell of the screw drilling tool and core pulling due to rotor fracture, the applicability and success rate of using conventional slip salvage barrels are insufficient. Based on this, a screw drilling tool three slip eccentric fishing barrel was designed, which drives the upper, middle, and lower slips to contract and clamp the conjugate annular space through the conical guide surface of the fishing barrel, achieving effective fishing of this type of falling objects. The eccentric arrangement structure design of the three slips increases the effective clamping area and improves the comprehensive fishing force of the fishing barrel on the screw drilling tool. Based on the working principle of the fishing barrel, a calculation formula for the conventional clamping force of the slip and the squeezing clamping force was established. By comparing, it was found that the conventional clamping stress of the slip required for the three eccentric fishing barrel can be reduced by 50.46%, and the bite depth of the fishing tool can be reduced by 13.92%. The trial produced fishing tube has been put into salvage practice on the construction site, indicating that its structural design is reasonable and its salvage performance is reliable.

Key words: screw drilling tools; fishing tools; lightweight falling objects; eccentric structure; three slips eccentric fishing barrel

收稿日期: 2024-02-05; 修回日期: 2024-05-07 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.06.012

基金项目: 山东省级地勘基金项目“矿山应急救援大口径定向快速钻探技术研究及应用”(编号: SDGP370000000202102003484)

作者简介: 麻坦, 男, 汉族, 1988年生, 工程师, 石油与天然气工程专业, 硕士, 从事石油与天然气工程研究工作, 山东省济宁市任城区任城大道120号, iammatan@foxmail.com。

引用格式: 麻坦. 螺杆钻具三卡瓦偏心打捞筒的研制及应用[J]. 钻探工程, 2024, 51(6): 99-105.

MA Tan. Development and application of eccentric fishing barrel with three slips for screw drilling tools[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 99-105.

随着螺杆钻具在钻井中的应用日益广泛,螺杆钻具断落等井下事故时有发生,影响钻进效率^[1-3]。螺纹疲劳损坏、应力集中和防脱总成失效是造成螺杆钻具断落的主要原因^[4-6],其断落事故主要有5种形式,分别为螺杆钻具外筒壳体断扣、传动轴折断、万向轴断裂、外筒壳体脱扣和转子断裂抽芯^[7-8]。打捞螺杆钻具通常是采用卡瓦打捞筒,即通过外捞的咬合方式进行打捞^[9-10],例如,实用新型专利“一种可退式双卡瓦打捞筒^[11]”和“多功能螺杆钻具打捞工具^[12]”,对于螺杆钻具外筒壳体断扣、传动轴折断和万向轴断裂事故形成的圆柱形“落鱼”,打捞效果较理想。但对于螺杆钻具外筒壳体脱扣和转子断裂抽芯事故形成的“落鱼”,使用常规打捞工具作业时打捞成功率低。主要有3方面的问题,一是“落鱼”较难扶正,“落鱼”由转子、万向节、传动轴和钻头组成,“落鱼”整体细长、上轻下重,且万向轴活瓣以上均为柔性结构,“落鱼”紧贴井壁,使用常规引鞋不易扶正。二是卡瓦的有效夹持面积不足,常规卡瓦打捞筒在打捞圆柱形“落鱼”时,夹持面积为整体圆柱外表面,有效夹持面积较大,但在打捞螺旋外齿轮的转子“落鱼”时,其啮合齿形结构导致有效接触面积较小、夹持面不均匀,易发生夹持失效或上提滑脱现象。三是针对轻质“落鱼”的有效打捞力不足,打捞作业中的卡瓦材料、螺牙类型和有效夹持面积已基本确定,打捞力与“落鱼”在卡瓦内表面的法向压力分量成正比,而螺杆钻具“落鱼”均较轻,常规卡瓦打捞筒无法通过“落鱼”浮重产生足够的打捞力,导致打捞成功率低。鉴于此,笔者从引鞋结构设计辅助扶正螺杆钻具、增加卡瓦的有效夹持面积、设计卡瓦组件的偏心排布结构提升打捞力等多个方面开展研究,研制了一种螺杆钻具三卡瓦偏心打捞筒,以便更好地解决此类问题。

1 结构设计

螺杆钻具三卡瓦偏心打捞筒结构如图1所示,主要由安全接头、捞筒、上卡瓦、中卡瓦、下卡瓦、内锥面铣齿和壁钩7个部件组成。捞筒与壁钩采用螺纹顺序连接,内锥面铣齿焊接在捞筒下端,内锥面铣齿与壁钩相接。上、中、下卡瓦在捞筒内部沿锥形导向面限位滑动。安全接头上部与钻杆采用螺纹顺序连接,下部与捞筒采用螺纹顺序连接。

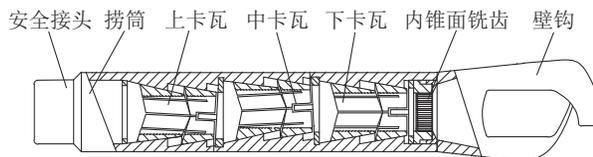


图1 螺杆钻具三卡瓦偏心打捞筒结构

Fig.1 The structure of eccentric fishing barrel with three slips of screw drilling tool

1.1 壁钩及内锥面铣齿

“落鱼”一般在孔内呈倾斜状态,“鱼顶”贴井壁,螺杆钻具三卡瓦偏心打捞筒设计具有扶正效果的壁钩,壁钩为外扩型,设计为螺旋结构面,外壁与垂线的外扩夹角为 5° ,当“落鱼”与螺杆钻具三卡瓦偏心打捞筒相错时,通过回转可快速扶正“落鱼”并引入壁钩内。内锥面铣齿起到修整“鱼顶”裂口飞边的作用,便于扶正后的“落鱼”顺利进入捞筒。

1.2 卡瓦组件

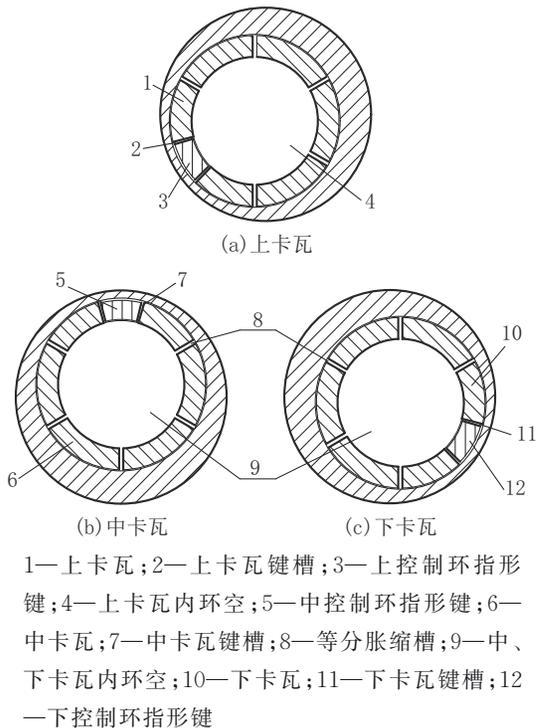
上、中、下卡瓦的结构设计相同,均为圆筒状篮状卡瓦,外部为完整的宽锯齿左旋螺纹,内部环空捞牙为多头左旋锯齿形螺牙,纵向开有等分胀缩槽,共分为6个卡瓦牙块,夹角呈 60° 均匀分布。上、中、下卡瓦在捞筒内部呈偏心排布结构(如图2所示)。

卡瓦下端均开有键槽,卡瓦控制环由控制卡套和指形键焊接而成,其作用在于,通过卡瓦控制环的指形键与卡瓦键槽配合,约束卡瓦只能沿着卡瓦锥形导向面滑动而不能转动。同时,两组卡瓦控制环均为其中部卡瓦的限位器,例如,上控制环和中控制环作为上卡瓦的限位器,限制上卡瓦最低运动至中控制环上端面,最高运动至上控制环下端。并且,每组卡瓦均为内倾结构,上端偏向捞筒轴心,下端偏向捞筒壁,每组卡瓦轴心线与捞筒横截面的夹角为 85° ,在沿卡瓦锥形导向面滑动时,卡瓦内环空轴线始终与捞筒纵轴线平行(如图3所示)。

1.3 捞筒

当“落鱼”进入捞筒并顶起三组卡瓦向斜上方运动时,三组卡瓦各自张开并向捞筒轴心收拢,三组卡瓦共轭环空持续扩大,当运动至对应上限位器时,三组卡瓦内环空轴心的轴向投影点 m 、 q 、 n 和捞筒轴心 o 重合,且三组卡瓦共轭环空的面积最大,等于卡瓦环空的面积,如图4(a)所示。

当上提捞筒时,三组卡瓦分别沿着各自锥形导



1—上卡瓦;2—上卡瓦键槽;3—上控制环指形键;4—上卡瓦内环空;5—中控制环指形键;6—中卡瓦;7—中卡瓦键槽;8—等分胀缩槽;9—中、下卡瓦内环空;10—下卡瓦;11—下卡瓦键槽;12—下控制环指形键

图2 上、中、下卡瓦结构横截面

Fig.2 Cross section of upper slip, middle slip and lower slip

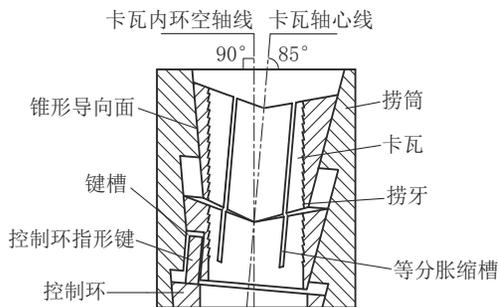


图3 上卡瓦结构剖面

Fig.3 Structural profile of the upper slip

面向下部限位器运动,三组卡瓦收缩咬紧“落鱼”并向捞筒壁扩散,三组卡瓦共轭环空的面积持续缩小,缩小过程中,三组卡瓦内环空轴心的轴向投影点 m 、 q 和 n 保持共圆,圆心为捞筒轴心 o ,三组卡瓦内环空轴心的轴向投影点 m 、 q 和 n 呈均匀分布状态,即三组卡瓦内环空轴心投影点与捞筒轴心投影点的连线 om 、 oq 和 on 互成 120° ,如图4(b)所示。

螺杆钻具三卡瓦偏心打捞筒整体结构设计实现了以下有益功能:一是通过壁钩及内锥面铣齿设计可提升扶正引入“落鱼”的成功率;二是通过增加3个卡瓦的有效夹持面积,实现对“落鱼”3个不同卡

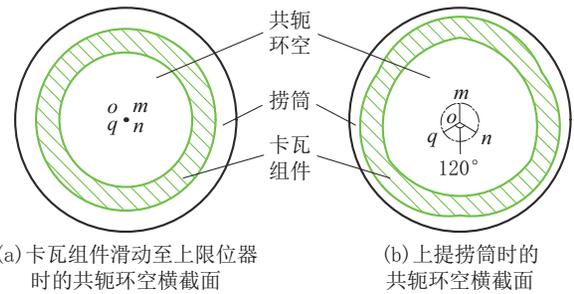


图4 三组卡瓦的共轭环空横截面

Fig.4 Cross sections of conjugate annulus of three sets of slips

位的卡紧打捞;三是设计卡瓦组件的偏心排布结构,相比单一的卡瓦作用,卡瓦夹持和面积挤压的共同作用可获得更大的综合打捞力,实现以简单提拉方式打捞轻质“落鱼”。

2 打捞工艺

2.1 打捞原理

打捞前计算好碰顶方入、铣齿方入和打捞方入,试探“鱼顶”。通过引鞋扶正“落鱼”,根据打捞方入及打捞悬重变化判断“鱼顶”进入下卡瓦后,停止转动并施加 $20\sim 50\text{ kN}$ 的钻压,使“落鱼”依次顶起并进入中卡瓦和上卡瓦。“落鱼”上顶过程中,卡瓦沿锥形导向面向上滑动,三组卡瓦直径变大,并且偏心排布结构设计使得三组卡瓦向捞筒轴心收拢,三组卡瓦共轭环空面积扩大,保障“落鱼”顺利进入三组卡瓦。缓慢上提钻具,卡瓦沿锥形导向面向下滑动,卡瓦持续收紧,产生卡瓦夹持力并抱紧“落鱼”,同时偏心排布结构设计使得三组卡瓦共轭环空面积持续缩小,进而产生径向的综合夹持力抱死“落鱼”,提升轻质“落鱼”的打捞成功率。最后根据悬重变化判断是否捞获。

2.2 适用性分析

鉴于捞筒内部的三卡瓦偏心结构设计,客观上导致捞筒直径偏大,因此在现场应用中,三卡瓦偏心打捞筒适用于环空间隙较大的事故类型。配合壁钩和内锥面铣齿,上、中、下卡瓦的整体结构设计适用于打捞细长型轻质“落鱼”,例如螺杆钻具外筒壳体脱扣和转子断裂抽芯事故形成的“落鱼”。单个卡瓦均设置了键槽和卡瓦控制环,通过两者的配合,初始回转给进状态下卡瓦在捞筒内上可轴向移动但无旋转自由度,“落鱼”可顺利进入单个卡瓦。下入过程中,“落鱼”顶起各组卡瓦,内倾结构设计

使卡瓦内环空轴线始终与捞筒纵轴线平行,保障“落鱼”顺利依次进入各组卡瓦,偏心结构设计使三组卡瓦共轭环空增大,卡瓦滑动至对应上限位器时,其等于常规卡瓦的内环空面积,可减少下入过程中遇阻遇卡的可能性,保障打捞筒顺利下入。上提过程中,在卡瓦咬合和三组卡瓦共轭环空缩小的联合作用下,完成“落鱼”卡紧过程,使打捞工具平稳、可靠。

3 捞筒力学分析

在打捞事故处理过程中,对卡瓦打捞筒夹持力的评价最为重要,能为现场作业提供理论指导。卡瓦体能够锚定“落鱼”的基本条件是卡瓦牙片在锥形导向面作用下,依靠锥形导向面与卡瓦捞牙的摩擦力作用抱紧“落鱼”。对于自重大、“鱼头”夹持条件理想的“落鱼”,钻机起拔力可等比例的转化为卡瓦对“落鱼”的夹持力,夹持力越大,打捞成功率越高。但在打捞轻质“落鱼”时,卡瓦与“落鱼”没有足够的初始接触力使卡瓦捞牙咬入“落鱼”表面一定深度,因而无法产生足够夹持力。即卡瓦对螺杆钻具等轻质“落鱼”的夹持力不由钻机起拔力决定,而是由“落鱼”浮重、井底岩屑覆盖压力、卡瓦捞牙与“落鱼”的当量摩擦系数共同决定。因此对于重力一定的轻质“落鱼”,当打捞需要的卡瓦夹持力越小,即达到卡紧所需的卡瓦捞牙咬深、滑动距离越易实现,其打捞成功率越高。

3.1 常规卡瓦夹持力计算

取常规卡瓦打捞筒分析^[13],卡瓦、锥形导向面和“落鱼”的接触关系和受力分析如图5所示。

卡瓦整体处于受力平衡状态:

$$F_1 \cos \beta + N_1 \sin \beta = F_2 \quad (1)$$

$$N_2 + F_1 \sin \beta = N_1 \cos \beta \quad (2)$$

且 $F_1 = f_1 N_1$, $F_2 = f_2 N_2$, 联立式(1)(2)可得:

$$\frac{f_1 + \tan \beta}{1 - f_1 \tan \beta} = f_2$$

式中: F_1 ——锥形导向面与卡瓦体之间当量摩擦力, N; F_2 ——卡瓦体与“落鱼”之间当量摩擦力, N; N_1 ——锥形导向面法向正压力, N; N_2 ——卡瓦对“落鱼”夹持力, N; f_1 ——锥形导向面与卡瓦体之间摩擦系数, 无量纲; f_2 ——卡瓦体与“落鱼”之间摩擦系数, 无量纲; β ——锥形导向面倾角, ($^\circ$)。

即设计打捞筒卡瓦时, β 角、 f_1 和 f_2 必须满足这

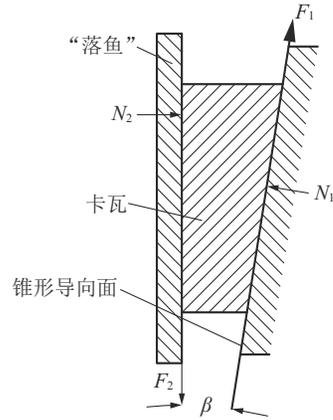


图5 常规卡瓦受力分析

Fig.5 Cava force analysis

一条条件。根据美国石油协会标准(API)^[14]卡瓦锥形导向面锥度一般取1:6,即 $\beta=9.4^\circ$,而钢材之间无润滑时的摩擦系数 f_1 取0.14~0.16,为使得卡瓦夹持可靠,在设计加工卡瓦时,应使卡瓦捞牙与“落鱼”之间的当量摩擦系数 $f_2 \geq 0.34$ 。

为保证卡瓦抱紧“落鱼”不滑脱,卡瓦与“落鱼”之间的当量摩擦力 F_2 必须大于“落鱼”浮重 G ,才能实现成功打捞,即:

$$F_2 = f_2 N_2 \geq G \quad (3)$$

式中: G ——“落鱼”浮重,包含井底岩屑填埋压力、粘滞阻力等附加力, N。

目前,常规卡瓦夹持力 N_2 与卡瓦捞牙咬深 Δ 的分布规律暂无成熟研究结论,根据文献调研^[15-19],汇总以镁合金等为材料的卡瓦力学实验数据,当轴向载荷为9~600 kN时,卡瓦捞牙在径向载荷作用下发生弹塑性形变过程中产生的咬深约为1.5~8 mm。三卡瓦偏心打捞筒的单个卡瓦咬合作用原理与常规卡瓦打捞筒相同,在打捞轻质“落鱼”时,挤压变形一般为弹性形变,设常规卡瓦夹持力 N_2 与卡瓦捞牙咬深 Δ 的比例系数为 K , $K=90.92$ kN/mm, 即:

$$N_2 = 90.92\Delta - 127.36 \quad (4)$$

式中: Δ ——卡瓦捞牙咬深, mm;

以 $\varnothing 159$ mm打捞筒为例,假设螺杆钻具外筒壳体脱扣形成的“落鱼”浮重 G 为50 kN时, f_2 取0.34,若采用常规卡瓦打捞,在卡瓦捞牙吃准的理想状态下,常规卡瓦夹持力 N_2 至少应达到147.06 kN,常规卡瓦长度取270 mm,则常规卡瓦夹持应力要达到1.09 MPa以上,卡瓦捞牙咬深 Δ 要达到约1.94 mm。

3.2 三卡瓦偏心打捞筒夹持力计算

三卡瓦偏心打捞筒夹持力由两种力组成,一是3个卡瓦的常规夹持力 N_2 ,其作用原理与常规卡瓦打捞筒相同,二是卡瓦共轭内环空面积持续缩小产生的挤压夹持力 N_3 ,为新增力。随着钻具上提,卡瓦偏心排布结构使得卡瓦收缩咬紧“落鱼”并向捞筒壁扩散,假设“落鱼”为圆形,当 $d \leq a - b$ 时,卡瓦内环空对“落鱼”产生挤压夹持力 N_3 。挤压夹持力如图6所示。

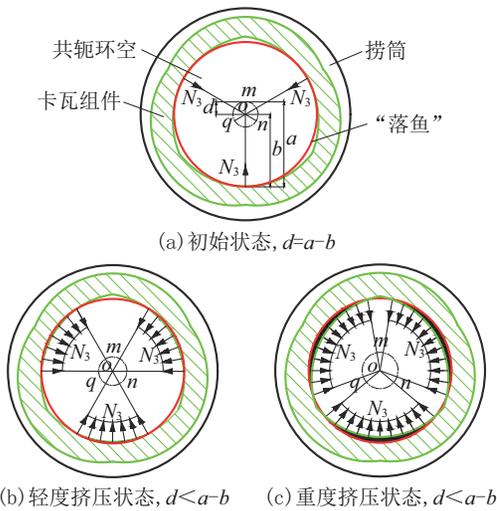


图6 卡瓦-“落鱼”径向挤压受力

Fig.6 Slip-force diagram of “falling fish” radial compression

图中实心阴影部分为挤压夹持力 N_3 作用区,随着卡瓦内环空持续收缩(图6a→图6b→图6c),其作用范围拓宽, N_3 增大。以 o 为极点、 on 为极轴做坐标系,则上卡瓦内环空和“落鱼”外圆的极坐标方程分别为:

$$(r \cos \theta + d)^2 + (r \sin \theta)^2 = b^2 \quad (5)$$

$$r = a \quad (6)$$

联立式(5)(6)求解,可得交点 $\theta = \pm \arccos \frac{b^2 - a^2 - d^2}{2ad}$ 。

则上卡瓦挤压夹持力作用范围:

$$s = 2 \int_0^{\arccos \frac{b^2 - a^2 - d^2}{2ad}} a d \theta。$$

因对称关系,3组卡瓦各自产生的挤压夹持力作用范围和大小均相等,且螺杆钻具材料为钨钢等硬质合金,挤压变形为弹性形变,且材质受压弹性应变小,即3组卡瓦挤压夹持力作用范围无重叠,

则有:

$$N_3 = 6aleE \int_0^{\arccos \frac{b^2 - a^2 - d^2}{2ad}} d \theta \quad (7)$$

同理,为保证卡瓦抱紧“落鱼”不滑脱,卡瓦与“落鱼”之间的当量摩擦力 F_2 必须大于“落鱼”浮重 G ,才能实现成功打捞,即:

$$F_2 = f_2(N_2 + N_3) \geq G \quad (8)$$

式中: N_3 ——卡瓦共轭内环空面积持续缩小产生的挤压夹持力, N; d ——三组卡瓦内环空轴心投影点与捞筒轴心投影点的连线 om 、 oq 和 on 的长度, mm, $om = oq = on = d$; a ——上卡瓦、中卡瓦和下卡瓦的内环空半径, m; b ——“落鱼”半径, m, 假设“落鱼”为圆形; r ——极径, mm, 所在极坐标系极点为 o , 极轴为 on ; θ ——极角, rad, 所在极坐标系极点为 o , 极轴为 on ; l ——卡瓦长度, mm; ϵ ——“落鱼”挤压应变, 假设与卡瓦挤压应变一致, 为简化计算将其视为线性应变, 无量纲; E ——“落鱼”的弹性模量, MPa。

同样,以 $\varnothing 159$ mm 打捞筒为例,假设螺杆钻具外筒壳体脱扣形成的“落鱼”浮重为 50 kN 时, $f_2 = 0.34$ 。按照 API 标准,卡瓦齿高与齿间距之比在 1.5~2.5 最合适,故取齿高度 2.0 mm,齿间距 5.0 mm,单个卡瓦长度取 90 mm,三组卡瓦总长 270 mm。螺杆钻具材料弹性模量取 2.1×10^3 MPa,泊松比取 0.3。根据锥形导向面和卡瓦捞牙的线性弹性本构关系, $\Delta = d$ 。则由式 8,在三组卡瓦捞牙吃准的理想状态下,三卡瓦偏心打捞筒夹持力至少应达到 147.06 kN,其中 $N_2 = 73.44$ kN、 $N_3 = 73.62$ kN,则 N_2 产生的夹持应力要达到 0.54 MPa,对应的卡瓦捞牙咬深 Δ 要达到约 1.67 mm, N_3 产生的夹持应力要达到 0.56 MPa。

综上所述,在卡瓦内部接触面积相等且“落鱼”顺利下入的情况下,对比常规卡瓦打捞筒,三卡瓦偏心打捞筒因偏心结构设计产生新的挤压夹持力 N_3 ,有效分担了总打捞力,剩余的卡瓦常规夹持力 N_2 产生的夹持应力减少 50.46%,卡瓦捞牙咬深减少 13.92%,即达到卡紧所需的夹持力、卡瓦捞牙咬深更易实现,可提高轻质“落鱼”打捞效率。

4 三卡瓦偏心打捞筒研制

煤层气、地热和煤炭勘探常规井身结构所采用的螺杆钻具规格为 $\varnothing 159$ 、102 和 73 mm^[20],打捞筒材料采用 45 号钢,考虑安全许用切应力和正应力屈

服强度极限,设计了3种型号的三卡瓦偏心打捞筒(见表1)。其中,Ø206/159 mm三卡瓦偏心打捞筒,设计打捞Ø159 mm“落鱼”,捞筒最大直径Ø159 mm,设计壁厚5.5 mm;Ø140/102 mm三卡瓦偏心打捞筒,设计打捞Ø102 mm“落鱼”,捞筒最大直径Ø140 mm,设计壁厚4.5 mm;Ø108/73 mm三卡瓦偏心打捞筒,设计打捞Ø73 mm“落鱼”,捞筒最大直径Ø108 mm,设计壁厚3.5 mm。

表1 三卡瓦偏心打捞筒设计参数

Table 1 Design parameters of three slip eccentric salvage cylinders

型号规格/mm	设计尺寸/mm	打捞尺寸/mm
Ø206/159	Ø206×500	Ø159±3
Ø140/102	Ø140×340	Ø102±3
Ø108/73	Ø108×260	Ø73±3

5 现场试验

5.1 试验汇总

三卡瓦偏心打捞筒在山东、陕西等地区勘探井使用共计5井次,其中煤层气勘探3井次,地热勘探1井次,煤田勘探1井次,打捞筒况见表2。

表2 打捞作业筒况统计

Table 2 Statistical tables on salvage operations

井号	“鱼顶”深度/m	捞筒规格/mm	打捞次数/次	打捞用时/h	井型
JS1	1854	Ø206/159	3	81	直井
临Y9	2631	Ø206/159	2	56	定向井
宜77	672	Ø140/102	1	15	定向井
绣D3	2237	Ø206/159	3	103	水平井
DY-4	564	Ø108/73	1	17	直井

5口井所打捞的“落鱼”浮重范围约为40~110 kN,均属于螺杆钻具外筒壳体脱扣、转子断裂抽芯等事故形成的轻质“落鱼”。其中JS1、临Y9和宜77在事故初期采用常规卡瓦打捞筒或滑块捞矛打捞,因“落鱼”不易扶正、摩阻大和井控风险等因素导致入“鱼”困难,而且出现二次落井情况,多次打捞失败。5口井后续采用三卡瓦偏心打捞筒,平均尝试打捞次数2次/井,平均打捞用时54.4 h,“落鱼”全部成功捞获,现场应用效果良好。

5.2 典型井例

事故工况:绣D3井采用Ø215.9 mm PDC钻进至井深2248.6 m处时,Ø159 mm螺杆钻具转子距旁通阀13 cm处失效断裂;“落鱼”长度10.6 m,“鱼顶”深度2081 m;岩性为白云岩及泥岩;钻井液体系为钾基聚合物钻井液,密度1.18 g/cm³,粘度42 s,滤饼厚度0.6 mm。

打捞过程:下放工具至2232 m开泵循环冲洗岩屑,缓慢下探至2237.42 m遇阻3 kN,复探2次验证“鱼顶”位置;下放工具至距“鱼顶”0.4 m,停泵并顺时针间断转动钻具,转1圈扶正“落鱼”,下放工具加压20 kN,试提悬重无变化,反复两次均扶正失败;第三次下放工具至距“鱼顶”0.2 m,转2.5圈拨转“落鱼”,下放工具加压20 kN,试提悬重由505 kN增至533 kN,捞获“落鱼”;继续下放工具,加压30 kN,使“落鱼”顺利进入三组卡瓦;缓慢上提钻具至2230 m,期间多次活动工具,悬重由430 kN增加至564 kN;将“落鱼”提离井底0.8 m,猛刹车2次,悬重稳定无变化,证实“落鱼”卡牢并正常起钻至井口,捞出“落鱼”。

6 结论及建议

(1)通过对三卡瓦偏心打捞筒的结构设计改变了卡瓦打捞原理,增加了卡瓦共轭内环空面积持续缩小产生的挤压夹持力,针对螺杆钻具外筒壳体脱扣、转子断裂抽芯等事故形成的轻质“落鱼”,能有效提高其打捞成功率。

(2)根据捞筒力学分析,分析了“落鱼”与卡瓦的受力关系,推导出卡瓦当量摩擦系数应满足的参数要求;简化推导出卡瓦夹持力与卡瓦捞牙咬深的分布规律,通过计算卡紧所需的卡瓦捞牙咬深,量化打捞成功率;分析三卡瓦偏心打捞筒的综合夹持力组成,导出挤压夹持力计算公式,得出对比常规卡瓦打捞筒,三卡瓦偏心打捞筒所需的卡瓦常规夹持应力减少50.46%,卡瓦捞牙咬深减少13.92%。

(3)鉴于偏心排布结构导致捞筒尺寸增大,应根据实际井况合理建立打捞方案和工艺流程,减小打捞工具在下入过程中的遇阻力,有助于复杂事故“落鱼”打捞成功。

(4)在现场应用中,三卡瓦偏心打捞筒暂不适用于环空间隙较小的事故类型,今后应在材料强度、锥形导向面角度优化方面进一步开展研究。

参考文献(References):

- [1] 邱自学,王璐璐,徐永和,等.页岩气钻井螺杆钻具的研究现状及发展趋势[J].钻采工艺,2019,42(2):36-37,48,3.
QIU Zixue, WANG Lulu, XU Yonghe, et al. Research status and development trend of screw drilling tools in shale gas drilling [J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42 (2) : 36-37,48,3.
- [2] 郝世俊,褚志伟,李泉新,等.煤矿井下近钻头随钻测量技术研究现状及发展趋势[J].煤田地质与勘探,2023,51(9):10-19.
HAO Shijun, CHU Zhiwei, LI Quanxin, et al. Research status and development trend of near-bit MWD in underground coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2023,51(9):10-19.
- [3] 翟育峰,赵辉,王鲁朝,等.湘南3000 m科学深钻孔内事故处理及对策[J].钻探工程,2023,50(4):32-40.
ZHAI Yufeng, ZHAO Hui, WANG Luzhao, et al. Down-hole incident treatment and prevention for the 3000m scientific deep borehole in southern Hunan[J]. Drilling Engineering, 2023,50(4):32-40.
- [4] 郑斌.螺杆钻具的失效分析及对策方案研究[D].大庆:东北石油大学,2017.
ZHENG Bin. Failure analysis and precautions of PDM[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.
- [5] 郭衍茹,练章华,陈世春,等.螺杆钻具损坏落井原因分析[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2011,13(6):145-147.
GUO Yanru, LIAN Zhanghua, CHEN Shichun, et al. Analysis of screw drilling tool failure and falling well [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011,13(6):145-147.
- [6] 杨森,赵映辉.螺杆钻具失效情况统计分析[J].钻采工艺,2010,33(3):81-82,144.
YANG Sen, ZHAO Yinghui. Statistical Analysis of screw drilling tool failure[J]. Drilling & Production Technology, 2010,33(3):81-82,144.
- [7] 李京川,赵金兰,翟婷婷,等.螺杆钻具传动轴断裂原因分析[J].石油管材与仪器,2021,7(5):45-49,53.
LI Jingchuan, ZHAO Jinlan, QU Tingting, et al. Fracture analysis of screw drill drive shaft [J]. Petroleum Pipe and Instrument, 2021,7(5):45-49,53.
- [8] 李琦,蒋宏业,刘洋,等.基于模糊故障树的螺杆钻具马达总成失效分析[J].石油矿场机械,2018,47(2):17-20.
LI Qi, JIANG Hongye, LIU Yang, et al. Failure analysis of screw drill motor assembly based on fuzzy fault tree [J]. Oil Field Machinery, 2018,47(2):17-20.
- [9] 伍涛.煤矿井下可退式卡瓦打捞筒的研制及应用[J].煤田地质与勘探,2022,50(8):165-170.
WU Tao. Development and application of a retractable slip over-shot in underground coal mines [J]. Coal Geology & Exploration, 2022,50(8):165-170.
- [10] 王一全,王肖伟,程松节,等.大口径井筒连续管打捞技术及应用[J].石油机械,2020,48(7):97-103.
WANG Yiquan, WANG Xiaowei, CHENG Songjie, et al. Fishing technology and application of continuous pipe in large-diameter wellbore [J]. China Petroleum Machinery, 2020,48(7):97-103.
- [11] 刘勇,李晨宣,闫林峰,等.一种可退式双卡瓦打捞筒:CN202021236440.4[P].2021-04-20.
LIU Yong, LI Chenxuan, YAN Linfeng, et al. A retractable double slip fishing tube: CN202021236440.4[P]. 2021-04-20.
- [12] 陈世春,练章华,王树超,等.多功能螺杆钻具打捞工具:CN201020685630.4[P].2011-07-27.
CHEN Shichun, LIAN Zhanghua, WANG Shuchao, et al. Multifunctional screw drilling and fishing tools: CN201020685630.4[P]. 2011-07-27.
- [13] 张宏伟,舒畅,窦益华,等.楔形封隔器卡瓦与套管相互作用的力学分析[J].机械设计与制造工程,2017,46(10):34-37.
ZHANG Hongwei, SHU Chang, DOU Yihua, et al. Mechanical analysis of the interaction between slip-casing and wedge packer [J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2017,46(10):34-37.
- [14] American Petroleum Institute. API Bull 5C3 6th Bulletin on formulas and calculations for casing, tubing, drill pipe and line properties[S]. Washington DC: API, 1994.
- [15] 王方明,张勇,陈晓军,等.分瓣式卡瓦结构优化设计与试验分析[J].石油机械,2021,49(10):71-77.
WANG Fangming, ZHANG Yong, CHEN Xiaojun, et al. Optimal design and experimental analysis of split slip structure [J]. China Petroleum Machinery, 2021,49(10):71-77.
- [16] 董学成,熊柯睿,王国荣,等.基于实验和数值仿真的钻具防顶卡瓦结构优化[J].西南石油大学学报(自然科学版),2021,43(1):167-175.
DONG Xuecheng, XIONG Kerui, WANG Guorong, et al. Optimization of anti-top slip structure of drilling tools based on experiment and numerical simulation [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2021,43(1):167-175.
- [17] 李英松,李克鹏,边杰,等.分瓣式内卡瓦有限元分析及结构参数优化设计[J].石油矿场机械,2016,45(1):41-45.
LI Yingsong, LI Kepeng, BIAN Jie, et al. Finite element analysis and structural parameter optimization design of split inner slips [J]. Oil Field Machinery, 2016,45(1):41-45.
- [18] 王锡洲,王洪兵,肖利君,等.连续循环系统上卸扣卡瓦卡紧力计算方法研究[J].石油矿场机械,2009,38(10):35-39.
WANG Xizhou, WANG Hongbing, XIAO Lijun, et al. Research on calculation method of clamping force of shackle slips in continuous circulation system [J]. Oil Field Machinery, 2009,38(10):35-39.
- [19] 吴恩成.分瓣式卡瓦的力学理论分析与实验研究[D].大庆:大庆石油学院,2007.
WU Encheng. Mechanical theory analysis and experimental study of split slips [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2007.
- [20] 李笔文,叶嗣暄.复杂地层顺层定向钻孔轨迹设计方法优化[J].钻探工程,2024,51(2):47-52.
LI Biwen, YE Sixuan. Optimization of directional drilling path design method in complex formation [J]. Drilling Engineering, 2024,51(2):47-52.

(编辑 荐华)