

# 石油钻机平移棘爪步行器卡爪失效分析及优化

李建亭

(中石化中原石油工程有限公司 工程服务管理中心,河南 濮阳 457001)

**摘要:**卡爪作为棘爪步行器的主要承载部件,直接影响着钻机平移。在受力分析的基础上,利用力学原理与方法,分析推导获得斜面卡爪结构的失效机理及优化方法。实例分析结果表明:斜面卡爪产生附加分力导致其应力值增加,不利于卡爪承载,危险截面出现在卡爪固定处附近;进一步分析得到卡爪失效源于斜面卡爪结构设计缺陷;通过优化卡爪的受力状态、截面参数及制作材质后,卡爪应力值降低量约为54%与77%,这对提高卡爪承载能力是有效的。研究结果可为卡爪的优化设计提供参考。

**关键词:**棘爪步行器;钻机平移;斜面卡爪;失效;优化

**中图分类号:**TP202+.7 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)03-0075-03

## Failure Analysis and Optimization of Claw of Pawl Walker on Oil Rig Moving

LI Jianting

(Engineering Service Management Center of Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd., Puyang 457001, China)

**Abstract:** The claw is used as an important bearing component of the pawl walker, it has directly influence on the rig moving. On the basis of the force analysis, the failure mechanism and optimal method of the inclined claw is obtained by using the mechanic principle and method. The results in the case study show that the inclined claw can produce one additional force, which increases its stress value, that is not conducive to the bearing capacity of the claw, the dangerous section appears near the fixed position of the claw; Further analysis shows that the failure of the claw is caused by the structural design defect of the inclined claw. The load-bearing capacity is effectively improved by optimizing the stress state, section parameters and materials of the claw. The stress value of the claw can be reduced by about 54% and 77%. The research results can be used to provide references for the optimal design of the claw structure.

**Keywords:** pawl walker; rig moving; inclined claw; failure; optimization

## 0 引言

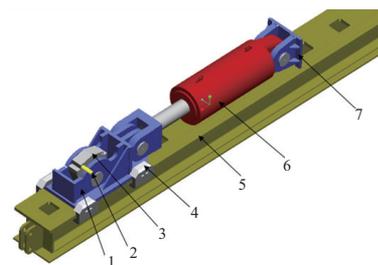
钻机整体平移装置是同一井场钻多口井,实现重复、批量化作业“井工厂”钻井模式的核心装备<sup>[1]</sup>,而棘爪步行器又是平移装置的重要部件,它是钻机沿平移导轨在液缸液力作用下向前/后移动达到下一个力的作用基点,平移时液缸推动棘爪步行器实现钻机载荷与导轨间以滑动摩擦形式的整体平移。棘爪步行器由于应用环境复杂苛刻,现场应用中存在着棘爪座撕裂、卡爪失效、限位螺钉断裂等问题,从而影响钻机平移装置的使用寿命及平移效率。

目前,针对棘爪步行器类型、数值仿真及液压系统等方向都有大量的理论研究<sup>[2-3]</sup>,但对于其卡爪失效方面的专题研究还很少。鉴于此,笔者以一种带有斜面结构的卡爪步行器在一次现场应用中出现的卡爪损坏失效问题为研究对象,通过对此结构卡爪受力及应力分析,判断卡爪失效的原因,提出优化措施,这对解决石油钻机平移棘爪步行器工程实际问题具有一定的指导意义。

## 1 棘爪步行器结构及失效

一种带有斜面卡爪结构的单棘爪步行器由棘爪座、棘爪、翻转手柄、棘爪连接销轴、卡爪、卡爪固定螺钉组成,如

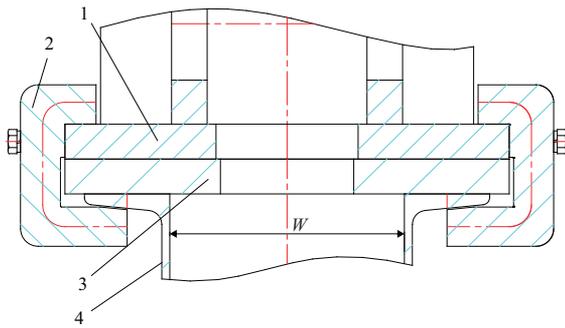
图1所示。由于导轨截面采用槽钢梁与棘爪孔板焊接而成,为了实现卡爪与导轨接触部位的紧密贴合,在卡爪与导轨槽钢梁接触部位设计了1:10斜面,用卡爪承载步行器垂直方向分力限制其在导轨平面法向移动<sup>[4]</sup>。钻机平移时卡爪与导轨截面结构如图2所示,图2中 $W$ 为导轨槽钢梁间距。



1—棘爪座;2—翻转手柄;3—棘爪;  
4—卡爪;5—导轨;6—液缸;7—耳座。

图1 棘爪步行器总成

棘爪步行器失效类型主要有:钻机平移过程中步行器棘爪刃无法顺利自动落入导轨棘爪孔中,如图3(a)所示;



1—棘爪座;2—卡爪;3—导轨棘爪孔板;4—导轨槽钢梁。

图2 卡爪截面示意图

卡爪产生塑性变形或断裂失效,如图3(b)所示。



(a) 棘爪失效

(b) 卡爪失效

图3 失效类型

下面以斜面卡爪变形失效问题作为研究对象,通过卡爪受力分析获得卡爪危险截面的应力值,从而判断卡爪失效的原因,提出改进优化措施。

## 2 卡爪力学分析与求解

### 2.1 受力分析

钻机平移时,棘爪步行器首先在液缸液力作用下沿导轨面滑移,棘爪刃面滑入导轨棘爪孔内,然后在液缸反向液力作用下,棘爪刃面与导轨棘爪孔面接触,直至卡爪1:10斜面与导轨槽钢梁斜面接触作用,最终在卡爪1:10斜面上产生一个作用力 $F$ ,如图4(a)所示。根据力的合成原理此力可以分解为水平力 $F_H$ 和竖直分力 $F_V$ 。

图4(a)中, $a_1=0.095\text{ m}$ ,为卡爪 $OA$ 段长度; $b_1=0.0975\text{ m}$ ,为卡爪 $AB$ 段长度; $h=0.045\text{ m}$ ,为卡爪厚度;卡爪截面法向长度为 $L=0.100\text{ m}$ 。

### 2.2 力学求解

由斜面几何关系知:卡爪在1:10斜面位置产生的作用力 $F_H/F_V=0.1$ 。竖直分力 $F_V$ 作用下卡爪受力如图4(b)所示,卡爪在力 $F_V$ 作用下产生弯矩 $M_{VH}$ 、 $M_{VV}$ ,弯曲应力为 $\sigma_{VH}$ 、 $\sigma_{VV}$ ,轴向拉应力 $\sigma_{Vx}$ ;卡爪在力 $F_H$ 作用下受力如图4(c)所示,卡爪力 $F_H$ 作用下产生弯矩 $M_{HV}$ 、轴向压应力 $\sigma_{Hy}$ 及弯曲应力 $\sigma_{HV}$ 。根据力的叠加原理,将卡爪在力 $F_V$ 与 $F_H$ 作用下进行叠加,获得卡爪在力 $F$ 作用下 $OA$ 与 $AB$ 区间不同截面上的最大拉应力、压应力 $\sigma_{\pm}$ 表达式如公式(1)所示。

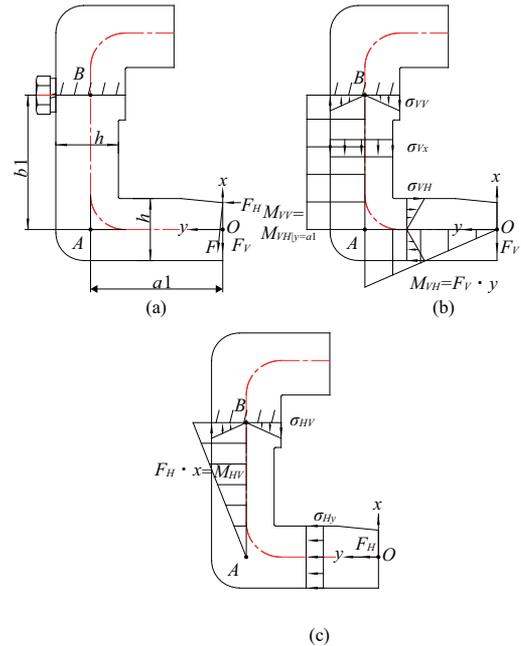


图4 卡爪力学分析图

$$\begin{cases} OA \text{ 区间: } \sigma_{\pm} = \pm\sigma_{VH} - \sigma_{Hy} = \frac{F_V}{L \cdot h} \left( \pm \frac{6 \cdot y}{h} - \frac{1}{10} \right) \\ AB \text{ 区间: } \sigma_{\pm} = \pm\sigma_{VH} + \sigma_{Vx} + \sigma_{VH} = \frac{F_V}{L \cdot h} \left( \pm \frac{3 \cdot (10 \cdot a_1 + x)}{5 \cdot h} + 1 \right) \end{cases} \quad (1)$$

通过图4与公式(1)分析发现:卡爪应力极值出现在两个截面上:一个是卡爪 $OA$ 区间 $y$ 最大值 $y=a_1$ ,即过 $A$ 点的法向截面上;另一个是卡爪 $AB$ 区间 $x$ 最大值 $x=b_1$ ,即过 $B$ 点的法向截面上,爪内侧受拉,外侧面受压。进一步比较两截面上的最大压应力 $\sigma_{-A}$ 、 $\sigma_{-B}$ 与拉应力 $\sigma_{+A}$ 、 $\sigma_{+B}$ ,得到最大应力值 $|\sigma_{-A}| > |\sigma_{-B}|$ 与 $|\sigma_{+A}| < |\sigma_{+B}|$ ,同时 $|\sigma_{-A}| < |\sigma_{+B}|$ ,即卡爪在卡爪力 $F$ 作用下最大应力出现在过 $B$ 点的法向截面上内侧面处,即卡爪受力时的危险截面。

### 2.3 卡爪竖直方向分力 $F_V$ 的确定

针对同一钻机平移载荷无论拉移还是推移过程中,用于平衡导轨对卡爪产生的竖直方向作用力恒定,即卡爪力 $F_V$ 为定值。参考文献[4]作者通过对棘爪步行器受力分析,利用力学原理与方法,首次建立了一种获得了解析解的棘爪步行器力学求解模型。本文采用其卡爪力求解表达式,将棘爪步行器相关参数带入其表达式,并考虑本文步行器卡爪安装方式:推移过程中步行器安装单侧双前卡爪与单后卡爪;拉移过程中,步行器安装单侧单前卡爪与双后卡爪方式,获得钻机推移/拉移过程前、后卡爪力 $F_{V1T}$ ( $F_{V1L}$ )与 $F_{V2T}$ ( $F_{V2L}$ )值,如表1所示。

表1 卡爪力 $F_V$ 计算结果 单位:kN

参数	$F_{V1T}$	$F_{V2T}$	$F_{V1L}$	$F_{V2L}$
值	147.78	251.52	195.48	175.80

计算中采用液缸液力约1200 kN,步行器仅改变了前卡爪安装位置即 $L_1$ 值为0.43,其他参数的数值含义与文

献[4]完全一致。

### 3 卡爪实例计算与优化

#### 3.1 实例计算

现以公司研发的一种适用于型钢结构截面导轨的棘爪步行器为例,其卡爪具有 1:10 斜面结构,以上述卡爪受力分析计算结果为依据,将卡爪危险截面上相关参数带入应力公式(1)中,得到危险截面上的最大应力  $\sigma_{+B}$ :

$$\sigma_{+B} = \frac{F_V}{L \cdot h} \left( + \frac{3 \cdot (10 \cdot a1 + b1)}{5 \cdot h} + 1 \right) = +3\ 325.926 \cdot F_V \quad (2)$$

将表 1 卡爪力  $F_V$  值带入式(2)中,获得棘爪步行器在推移过程中前、后卡爪危险截面上的最大应力  $\sigma_{+B1T}$  与  $\sigma_{+B2T}$  及拉移过程中相应应力  $\sigma_{+B1L}$  与  $\sigma_{+B2L}$ ,如表 2 所示。

表 2 卡爪应力与性能参数 单位:MPa

参数	$\sigma_{+B1T}$	$\sigma_{+B2T}$	$\sigma_{+B1L}$	$\sigma_{+B2L}$	$\sigma_S$	$\sigma_b$
值	492	837	650	585	355	600

结果表明:步行器无论推移还是拉移状态下卡爪应力  $\sigma_{+B}$  分别超过卡爪材料的屈服强度值  $\sigma_S$  的 38.6%、136%、83.1%、64.8%;推移过程最大卡爪应力  $\sigma_{+B2T}$  与拉移过程的最大卡爪应力  $\sigma_{+B1L}$  两者值都大于其断裂强度值  $\sigma_b$ 。

#### 3.2 结构优化

表 2 结果表明卡爪由于强度设计不足导致其失效,针对此原因提出 3 个方面的优化措施:1) 减小导轨槽钢梁间距  $W$  值,改善卡爪受力状况。优化后的卡爪截面如图 5(a) 所示。2) 改变卡爪截面参数即  $a2 = 0.06\text{ m}$ ,  $b2 = 0.087\ 5\text{ m}$ 、卡爪轴向长度  $L = 0.26\text{ m}$ ,其他尺寸不变。卡爪受力如图 5(b) 所示。3) 卡爪用料选用耐磨性好、强度高的 35CrMo 材料制作。

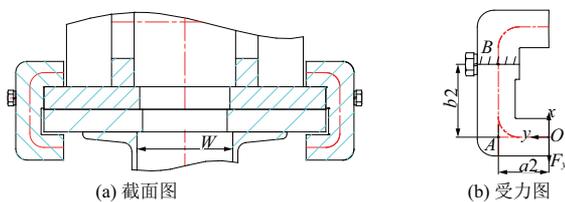


图 5 卡爪截面及力学分析示意图

优化后的卡爪在钻机平移过程中仅受到导轨接触面上的竖直作用力  $F_V$ ,无附加水平方向的分力作用。此时步行器在推移过程中前、后卡爪危险截面上的最大应力  $\sigma_{+B1T}$  与  $\sigma_{+B2T}$  及拉移过程中相应应力  $\sigma_{+B1L}$  与  $\sigma_{+B2L}$  如表 3 所示。

表 3 优化后的卡爪应力与性能参数 单位:MPa

参数	$\sigma_{+B1T}$	$\sigma_{+B2T}$	$\sigma_{+B1L}$	$\sigma_{+B2L}$	$\sigma_S$	$\sigma_b$
值	227	193	150	270	835	980

表 3 结果表明:在同一钻机平移载荷下,优化后的卡爪无论拉移还是推移状态下最大应力都远远小于材料的屈服强度值  $\sigma_S$ ;优化后的卡爪应力减小量约是表 1 相应数值的 54% 或 77%,说明优化后的卡爪承载能力获得提高;最大应力发生在钻机拉移过程的后卡爪上,其值为  $\sigma_{+B2L} = 270\text{ MPa}$ ,最小应力发生在钻机拉移过程的前卡爪上,其值为  $\sigma_{+B1L} = 150\text{ MPa}$ 。将应力与原材质机械性能参数对比发现:优化后的卡爪即使在原材质情况下也满足强度要求,说明斜面卡爪结构设计缺陷是卡爪塑性变形失效问题的根源。优化后步行器卡爪强度足够,满足钻机平移使用要求,与步行器整体承载相匹配,优化改进后的卡爪在现场应用后再未发生严重的塑性变形失效问题。

### 4 结语

1) 通过斜面卡爪受力分析发现:卡爪内侧面受压与外侧面受拉的受力规律,附加水平分力使卡爪向外扩张,这不利于卡爪承载。

2) 斜面卡爪应力计算结果表明:卡爪危险截面出现在卡爪固定螺钉附近,其应力值分别超过卡爪材料屈服强度的 38.6%、136.0%、83.1%、64.8%,平移过程中的最大卡爪应力都大于其材料的断裂强度值。

3) 优化后的卡爪应力计算结果表明:通过改变导轨截面结构实现卡爪受力部位由斜面变平面,卡爪应力值相应降低量约为 54% 与 77%,改善了卡爪的受力状态,有利于卡爪承载能力提高,表明斜面卡爪结构设计缺陷是卡爪塑性变形失效问题的根源。

#### 参考文献:

- [1] 龙志平,沈建中. 煤层气井工厂钻井模式设计与应用[J]. 石油机械,2016,44(6):19-23.
- [2] 历要海. 棘爪步进式钻机移动装置在南美 TARAPOA 油田的应用[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版),2011,13(1):56-57,75.
- [3] 韩宇,栗国浩. 海洋模块钻机移动步行器优化设计[J]. 石油矿场机械,2011,40(2):84-86.
- [4] 郭高垒. 石油钻机平移棘爪步行器力学行为分析[J]. 石油机械,2018,46(10):23-27.

收稿日期:2019-12-03