

# RN254型铁钻工冲扣钳设计与力学分析

许本冲<sup>1,2,3,4</sup>, 王林清<sup>1,2,3,4\*</sup>, 刘凡柏<sup>1,3,4</sup>, 李文秀<sup>1,3,4</sup>

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 廊坊聚力勘探科技有限公司, 河北廊坊 065000;  
3. 河北省大口径岩土钻掘技术创新中心, 河北廊坊 065000;  
4. 中国地质学会自动化智能化钻探装备创新基地, 河北廊坊 065000)

**摘要:** 铁钻工作为安全、高效的钻杆拧卸工具, 逐步取代了液气大钳, 成为自动化钻探装备的标准配置。作为铁钻工核心部件的冲扣钳对于整个铁钻工的工作性能至关重要。通过分析冲扣钳的结构原理及工作方式, 进行油缸选型与力学分析, 为RN254型铁钻工设计了一套高效率的冲扣钳结构装置, 并进行了野外生产试验。试验表明, 冲扣钳结构设计科学, 油缸选型合理, 极大地提高了铁钻工的工作效率, 为铁钻工的设计制造提供了借鉴。

**关键词:** 铁钻工; 冲扣钳; 切径比; 夹持力

**中图分类号:** P634.4; TE921 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)S1-0226-05

## Design and mechanical analysis of RN254 roughneck shackle pliers

XU Benchong<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Linqing<sup>1,2,3,4\*</sup>, LIU Fanbai<sup>1,3,4</sup>, LI Wenxiu<sup>1,3,4</sup>

(1. *Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;*  
2. *Langfang Juli Exploration Technology Co., Ltd., Langfang Hebei 065000, China;*  
3. *Technology Innovation Center for Large Diameter Rock & Soil Drilling, Hebei Province, Langfang Hebei 065000, China;*  
4. *Innovation Base for Automatic and Intelligent Drilling Equipment, Geological Society of China, Langfang Hebei 065000, China*)

**Abstract:** Roughneck is a safe and efficient tool for screwing and unscrewing drill pipes, gradually replacing hydraulic and pneumatic tongs and becoming a standard configuration for automated drilling equipment. As the core component of roughneck, the shackle pliers are crucial to the performance of the entire iron roughneck. By analyzing the structural principle and working method of the shackle pliers, we conducted an oil cylinder selection and mechanical analysis. This led to the design of a highly efficient shackle pliers structure for the RN254 roughneck, which was then tested in field production. The test shows that the scientific structure design of the shackle pliers and the reasonable selection of the oil cylinder greatly improve the work efficiency of the roughneck, providing a reference for the design and manufacturing of roughneck.

**Key words:** roughneck; shackle pliers; cutting ratio; clamping force

## 0 引言

当前钻井施工作业对能够提高作业效率、降低

事故风险、减轻劳动强度的新技术需求日益提升, 钻探装备逐步向自动化、智能化方向发展<sup>[1-3]</sup>。近年

收稿日期: 2024-05-27 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.S1.034

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“固体矿产高效精准勘探技术及自动化钻探装备升级与应用”(编号: DD20242850); 廊坊聚力勘探科技有限公司研发专项“孔口自动化拧卸装置研发”

第一作者: 许本冲, 男, 汉族, 1988年生, 高级工程师, 机械设计制造及其自动化专业, 从事钻探装备、工艺器具及岩土钻掘工程机械等的研发工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, xbenchong@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 王林清, 男, 汉族, 1993年生, 地质工程专业, 硕士, 从事钻探新技术、新设备、新工艺的研发工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, wanglinqingmail@163.com。

引用格式: 许本冲, 王林清, 刘凡柏, 等. RN254型铁钻工冲扣钳设计与力学分析[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 226-230.

XU Benchong, WANG Linqing, LIU Fanbai, et al. Design and mechanical analysis of RN254 roughneck shackle pliers[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 226-230.

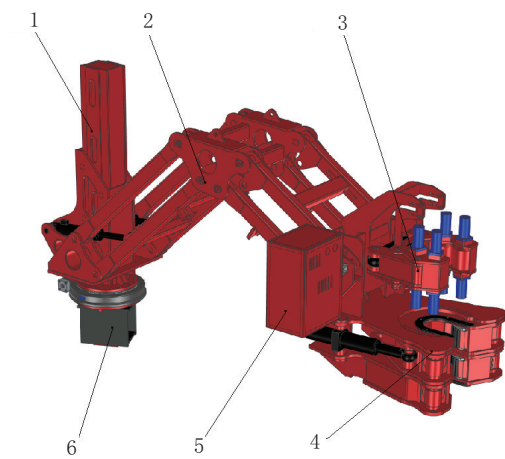
来,液压吊卡、液压卡盘、猫道机等管柱自动化处理设备在钻探装备上广泛应用。其中铁钻工作为安全、高效的钻杆拆卸工具,逐步取代了液气大钳,成为自动化钻探装备的标准配置<sup>[4-9]</sup>。

传统的液气大钳的控制基本上只有本地气液控制,电气控制的部分很少,需用绳索悬挂在钻塔天车上,依靠人工在其悬挂位置与井口工位之间来回推移。操作十分繁琐,往往需要3名操作人员才能完成。而且,由于设备质量大且需频繁操作,对人身的安全构成了极大的威胁。

区别于传统液气大钳,铁钻工利用轨道或伸缩臂能够实现在待机位与井口工位或鼠洞工位间的往复移动,通过远程操作完成钻杆拆卸动作,旋扣与冲扣装置独立运行<sup>[10-11]</sup>,使钻具连接更为方便,工序也更为简单,极大地提高了作业的安全性和可靠性。

### 1 RN-254型铁钻工总体结构

RN-254型铁钻工(图1)采用伸缩臂式结构,主要由冲扣钳、旋扣钳、伸缩臂、基座、控制系统等部分组成,技术参数见表1。冲扣钳由上钳和下钳组成,上钳为冲扣机构,下钳为背扣机构,上钳、下钳之间设有导轨和冲扣油缸,通过冲扣油缸的伸缩实现冲扣和紧扣,与旋扣钳配合能够快速完成钻具的拆卸作业。其中冲扣钳是铁钻工最核心的部件。



1—基座;2—伸缩臂;3—旋扣钳;4—冲扣钳;5—控制阀箱;6—安装底座

图1 RN-254型铁钻工结构示意图

### 2 冲扣钳设计

冲扣钳作为铁钻工最核心的部件,其性能直接

表1 RN-254型铁钻工参数

参 数	数值
夹持范围/in	3½~10
冲扣扭矩/(kN·m)	175
单回次最大拆卸角度/(°)	60
旋扣扭矩/(N·m)	3950(@5in)
旋扣转速/(r·min <sup>-1</sup> )	80(@5in)
水平伸展范围/mm	1475~3970
垂直升降范围/mm	145~1020
额定工作压力/MPa	21
控制方式	远程+本地

(1 in=25.4 mm,下同)

决定铁钻工的工作能力与效率。冲扣钳通常由夹持装置和冲扣装置两部分组成,通过优化结构设计,达到最理想的效果。

#### 2.1 冲扣钳夹持装置设计

铁钻工冲扣钳常用夹紧方式有剪刀式结构、对夹式结构、三爪式结构、杠杆式结构等(如图2所示)。其中剪刀式结构与杠杆式结构工作原理相同,都是将液压油缸推力通过杠杆机构转化为卡瓦的夹持力;对夹式结构是由对称布置在钳体两侧的液压油缸直接推动卡瓦夹持管柱;三爪式结构是围绕钳体中心圆周均布3个液压油缸,直接推动卡瓦夹持管柱。上述夹持结构优缺点对比如表2所示。

通过对比,RN-254型铁钻工冲扣钳夹紧方式选择三爪式结构(如图3所示),3个夹紧油缸活塞杆

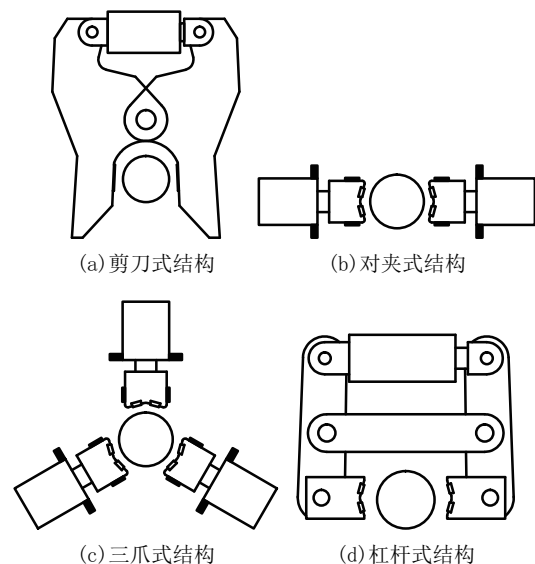


图2 铁钻工冲扣钳常用夹紧方式

表2 冲扣钳常用夹紧方式对比

夹紧方式	优点	缺点
剪刀式	结构简单,为增力结构,油缸数量少,夹持范围大	夹持不同管径时中心会移动,相同夹持范围,所需油缸行程更大
杠杆式	油缸数量少,为增力结构,夹持范围大,夹持不同管径时中心不变	结构相对复杂,需设计同步机构保证卡瓦同步
对夹式	结构简单,钳体前后尺寸小,适用于中小扭矩铁钻工	钳体宽度大,相同夹持力下所需油缸缸径大,钳体厚度大
三爪式	同油缸缸径下,夹持力更大,适用于大扭矩铁钻工	钳体外形尺寸大,3个油缸同步,液压控制系统复杂

通过销轴与钳体固定,油缸缸筒在钳体内滑动,带动卡瓦夹紧或松开中心管柱。为保证钳口中心位置不变,3个夹紧油缸需同步运动,设计液压回路中增加同步马达,使得3个卡瓦同时接触并夹紧中心管柱。

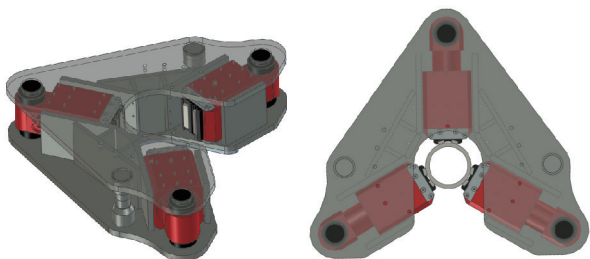


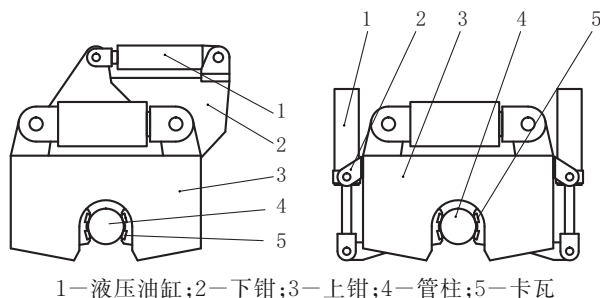
图3 RN-254型铁钻工冲扣钳夹紧机构

## 2.2 冲扣装置设计

铁钻工在进行钻杆上扣作业时,在旋扣器将大部分螺纹拧卸完成之后需要进行冲扣操作,将钻杆螺纹连接达到一定的扭矩强度标准,来保证钻杆连接的安全性。而在进行卸扣作业时,旋扣器进行旋扣之前需要通过冲扣操作来把连接紧实的钻杆扣打开。具体操作为在进行钻杆上扣作业时,最后需要进行紧扣操作,通过冲扣钳实现钻杆螺纹的紧扣。卸扣作业时,首要进行的是冲扣操作,通过冲扣钳实现钻杆螺纹第一扣的退扣。

铁钻工常见的冲扣方式有两种(见图4):一种是采用单液压油缸布置在钳体尾部,油缸两端分别连接上钳和下钳,活塞杆伸出执行卸扣动作,活塞杆缩回执行上扣动作;另一种是采用双液压油缸对

称布置在钳体两侧,油缸两端分别连接上钳和下钳,其中一个油缸活塞杆伸出的同时,另一个油缸活塞杆缩回,执行上卸扣动作。两种冲扣方式优缺点对比见表3。



1—液压油缸;2—下钳;3—上钳;4—管柱;5—卡瓦

图4 铁钻工冲扣钳常见冲扣方式

表3 冲扣钳常见冲扣方式对比

冲扣方式	优点	缺点
单液压油缸	结构简单,控制方便	冲扣钳体前后尺寸大,相同扭矩下,所需油缸缸径大,上、下钳转动角度小
双液压油缸	上/卸扣扭矩大,上、下钳转动角度大	钳体宽度大,控制复杂,需增加传感器以保证钳口对正

通过对比,RN-254型铁钻工采用双液压油缸冲扣,以增加上/卸扣扭矩和单回次冲扣角度。如图5所示,两个冲扣油缸位于钳体两侧,缸筒采用中部铰接的连接方式,安装在下钳上,活塞杆与上钳连接,经结构优化,冲扣钳单回次最大扭转角度为 $60^{\circ}$ 。液压回路中,左侧油缸的有杆腔与右侧油缸的无杆腔并联,而无杆腔与右侧油缸的有杆腔并联,使得两条液压油缸同步反向运动,完成上/卸扣动作。

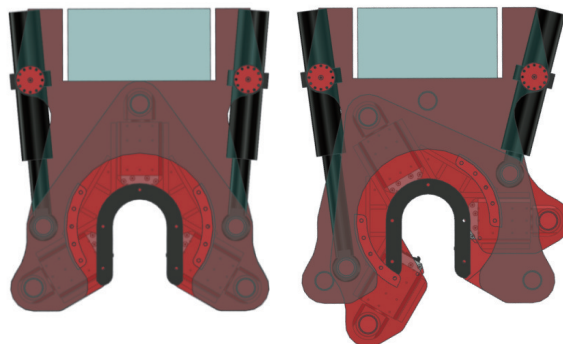


图5 RN-254型铁钻工冲扣钳冲扣机构及极限冲扣角度

### 3 力学分析与计算

为适应不同直径的管柱,冲扣钳的夹持卡瓦设计为 V 形结构,每个卡瓦上装有 2 块牙板,夹角为 150°。3 个卡瓦围绕管柱均布,在夹持卡瓦时,每个牙板均可与管柱接触,以增加咬合接触点(如图 6 所示)。

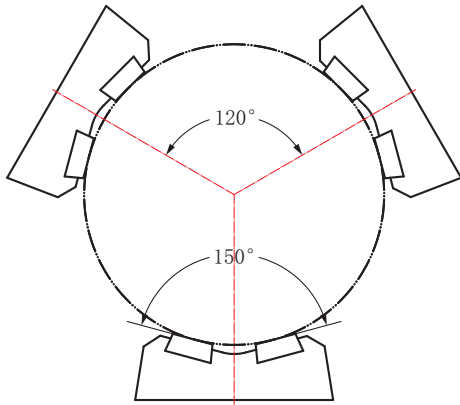


图 6 夹持示意

针对单个卡瓦在铁钻工上/卸扣过程中受力展开分析(图 7),夹紧油缸施加在卡瓦上的推力,可分解为牙板与钻杆接触点上的径向力  $F_N$ ,同时上/卸扣过程中,扭矩  $T$  作用在管柱弧面,在牙板与管柱接触点产生切向力  $F_t$ 。 $F_t$  与  $F_N$  的比值为切径比,不打滑时的切径比为允许切径比  $[m]$ 。

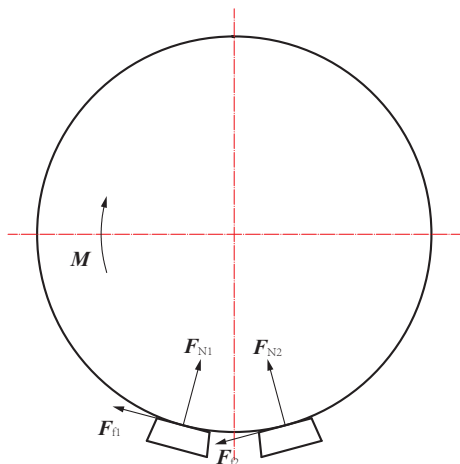


图 7 受力示意

$F_{N1}$  和  $F_{N2}$  为单个卡瓦上牙板对钻杆的径向力,夹角为 30°,以设计最大扭矩  $T=175 \text{ kN}\cdot\text{m}$  和最大管柱直径  $\varnothing=254 \text{ mm}$  作为输入参数,可得牙板与钻杆间的切向力:

$$F_{t1} = F_{t2} = \frac{1000T}{3\varnothing} = 229.66 \text{ kN}$$

取允许切径比  $[m]=0.8^{[12-14]}$ ,可得牙板与钻杆间的径向力:

$$F_{N1} = F_{N2} = \frac{F_t}{[m]} = 287.08 \text{ kN}$$

由此可计算出油缸作用在卡瓦上的推力:

$$F = F_{N1}\cos 15^\circ + F_{N2}\cos 15^\circ = 554.59 \text{ kN}$$

按照额定工作压力  $P=21 \text{ MPa}$ ,计算夹紧油缸

内径  $D = 2\sqrt{\frac{1000F}{\pi P}} = 183.42 \text{ mm}$ ,按照油缸标准直径系列,选取夹紧油缸内径  $D=180 \text{ mm}$ 。

为减小钳体宽度,设计夹紧油缸的安装距较短,从而导致油缸行程有限,为增大冲扣钳的夹持范围,设计了两种规格夹持卡瓦,夹持范围分别为  $3\frac{1}{2}\sim 7\frac{1}{4} \text{ in}$  和  $7\sim 10 \text{ in}$ ,在夹紧油缸行程不变的情况下,增加了夹持卡瓦直径的适用范围。

根据结构尺寸,冲扣油缸活塞杆铰接点与钳口中心距离为  $r=460 \text{ mm}$ ,以最大冲扣扭矩设计冲扣油缸。在冲扣过程中,其中一个冲扣油缸活塞杆伸出,推力做功,另一个油缸活塞杆缩回,拉力做功。两个油缸合力为:

$$F_d = \frac{1000T}{r} = 380.43 \text{ kN}$$

以额定压力  $P=21 \text{ MPa}$ ,计算压力的作用面积:

$$A = \frac{1000F_d}{P} = 18115.71 \text{ mm}^2$$

作用面积与缸径之间的关系公式如下:

$$A = \frac{2\pi D^2 - \pi d^2}{4}$$

式中: $D$ ——活塞直径,即油缸内径; $d$ ——活塞杆直径。

按液压油缸设计规范,选取冲扣油缸内径  $D=125 \text{ mm}$ ,缸孔面积  $A_1=12272 \text{ mm}^2$ ,活塞杆直径  $d=90 \text{ mm}$ ,活塞杆面积  $A_2=6363 \text{ mm}^2$ ,最大冲扣扭矩可达设计值。

在上/卸扣过程中,冲扣油缸随上钳扭转产生摆动,导致钳体中心与冲扣油缸的垂直距离发生变化,使冲扣扭矩在一定范围内波动,选取点位进行分析,可得出冲扣扭矩随钳体扭转角度变化曲线见图 8。

由图 8 可知,冲扣扭矩极大值出现在钳体中心

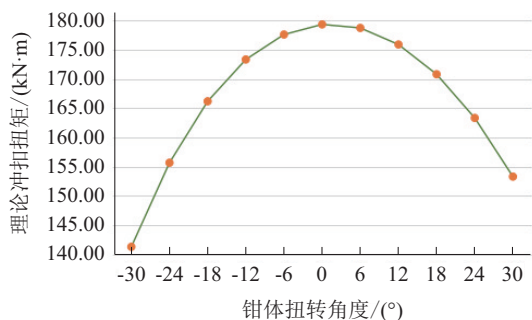


图8 扭矩曲线

与冲扣油缸垂直距离最大时,因此在进行冲扣作业时,应尽量控制冲扣钳,使得钳体中心与冲扣油缸垂直距离最大。

#### 4 应用试验情况

在陕西省某煤层气井钻探施工现场,RN-254型铁钻工结合ZJ-50型钻机开展了应用试验(图9),在4000 m深的钻井作业过程中,完成多次起下钻的钻杆拧卸任务,期间冲扣钳未出现夹持打滑现象。



图9 冲扣钳现场试验

在进行冲扣作业时,通过冲扣钳实现拧卸钻杆时对第一扣的退扣和上扣时最后一扣的拧紧,钳体的推出和复位动作是受侧向安装的两只冲扣油缸控制,上/卸扣最大拧卸角度达到 $60^{\circ}$ ,与设计预期相符。在旋扣马达进行退扣前及旋扣后,一般只需一个回次的拧卸即可进行旋扣操作,极大地缩减了上/卸扣时间。

大冲扣角度减少了冲扣往复频次,提高了钻具的拧卸效率,充分验证了原理可行,系统稳定。该

冲扣钳与旋扣钳一起作业,可快速完成钻杆的上/卸扣作业,与传统液气大钳对比,降低了作业风险,减轻了人工劳动强度。

#### 5 结论

(1)通过对冲扣钳夹紧结构、冲扣结构进行对比分析和计算,优化设计了一种适应钻具范围大、冲扣扭矩大、冲扣角度大的铁钻工冲扣钳,并经应用试验,验证了原理可行,性能可靠。

(2)在钻杆卸扣的过程中,冲扣初始位置所需扭矩最大,随钻杆螺纹松动,扭矩逐渐减小。因此,调整冲扣油缸安装位置,使卸扣初始钳体中心与冲扣油缸垂直距离最大,可以优化冲扣钳的扭矩输出,有效提高作业效率。

#### 参考文献:

- [1] 张鹏飞,朱永庆,张青锋,等.石油钻机自动化、智能化技术研究和发建议[J].石油机械,2015,43(10):13-17.
- [2] 孙长征,李进付,李海营,等.在役钻机管柱自动化升级改造技术与实践[J].西部探矿工程,2019,31(2):48-52.
- [3] 薛倩冰,刘凡柏,张金昌,等.特深孔地质岩心钻探技术装备集成及示范[J].钻探工程,2023,50(2):8-16.
- [4] 耿长伟,王清岩,孙友宏,等.“地壳一号”万米钻机铁钻工伸展机构设计及运动学仿真分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(5):53-56.
- [5] 董春龙.TZG/Y-165铁钻工桁架式机械臂振动特性研究[D].大庆:东北石油大学,2016.
- [6] 张洪生,胡开斌,刘昊.TZG-120型铁钻工冲扣钳钳体部分的机构研究[J].科学技术与工程,2008,8(24):6594-6596.
- [7] 胡开斌.TZG216-110型铁钻工冲扣钳的机构研究[D].兰州:兰州理工大学,2009.
- [8] 侯香港.铁钻工冲扣钳结构优化与钳牙承载能力分析[D].西安:西安石油大学,2023.
- [9] 郭李彤.铁钻工冲扣钳机构设计与管柱夹持体力学分析[D].西安:西安石油大学,2019.
- [10] 叶强,闫文辉,李慧莹,等.伸缩臂式铁钻工冲扣钳的设计[J].液压气动与密封,2018,38(6):8-11.
- [11] 刘佰龙.摇臂式铁钻工冲扣钳设计及钳口上卸扣过程仿真试验[D].大庆:东北石油大学,2017.
- [12] 罗震.石油钻机铁钻工冲扣钳设计与制造关键技术研究[D].西安:长安大学,2018.
- [13] 刘伟.铁钻工夹紧缸同步技术与钻具自动找心方法的研究[D].扬州:扬州大学,2016.
- [14] 关春丽.TZG/Y165折臂式铁钻工冲扣钳的设计与仿真[D].大庆:东北石油大学,2015.

(编辑 荐华)