

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.01.035

# 10 kV 带电环境下线缆自适应剥皮器的设计与关键部件仿真

谭海铭<sup>1</sup>, 王海霖<sup>2</sup>, 覃明生<sup>1</sup>, 危秋珍<sup>1</sup>, 李成信<sup>2</sup>, 韦维<sup>1</sup>, 谭永真<sup>1</sup>

(1. 广西电网有限责任公司 河池供电局, 广西 河池 547000;

2. 广西电网有限责任公司 河池环江供电局 广西 环江 547100)

**摘要:**带电环境下线缆剥皮是配网带电最主要的作业之一。设计一种适用于 10 kV 带电环境下线缆自适应剥皮装置, 介绍该装置的结构与工作原理, 对其关键部件进行有限元分析, 验证其设计合理性并进行拓扑优化, 提升强度, 减轻质量。研究结果表明:所设计的自动剥皮器灵活、高效, 极大地提高了线缆的剥皮可靠性及效率。

**关键词:**带电线缆剥皮; 自适应剥皮器; 有限元分析; 拓扑

**中图分类号:** TM726 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2024)01-0169-06

## Design and Simulation of Cable Adaptive Strippers in 10 kV Live Environment

TAN Haiming<sup>1</sup>, WANG Hailin<sup>2</sup>, QIN Mingsheng<sup>1</sup>, WEI Qiuzhen<sup>1</sup>, LI Chengxin<sup>2</sup>, WEI Wei<sup>1</sup>, TAN Yongzhen<sup>1</sup>

(1. Hechi Power Supply Bureau, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Hechi 547000, China;

2. Hechi Huanjiang Power Supply Bureau, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Huanjiang 547100, China)

**Abstract:** Stripping cables in a live environment is one of the most important tasks in a live distribution network. Designs an adaptive peeling device suitable for offline 10 kV live environment. Its structure and working principle are introduced, the finite element analysis of its key components is carried out, the rationality of its design is verified, and topology optimization is conducted for strength reinforcement and mass reduction. The research results show that the designed automatic stripper designed is flexible and efficient, which greatly improves the stripping reliability and stripping efficiency of cables.

**Keywords:** striping of live cables; adaptive peeler; finite element analysis; topology

## 0 引言

随着社会不断的发展进步,配网建设的规模也在不断扩大,配网运维检修工作量也随之增加。为提高供电可靠性,带电作业工作必要性也逐步提高。在线路熔接施工过程中,绝缘导线护套即绝缘皮的剥除是导线开剥接续中的一道重要工序。现有的线缆剥皮方式分为人工与自动化剥皮两种。在人工利用绝缘斗臂车或绝缘平台等进出电位工具实施带电作业时,不仅作业人员直接接触带电导线,增加了不安全因素,同时剥皮难度大、作业步骤多且效率低,作业环境也容易受到地理环境影响,现已逐渐被自动化剥皮所取代。

目前市场上的剥皮装置存在着一个共性缺陷,即刀具零点位置无法在线调整<sup>[1]</sup>。由于线缆规格较多,每种规格线缆直径、皮厚等均有较大差异,具体作业时操作人员无法预先知道需要作业线缆的直径和表皮厚度。这就需要操作人员根据

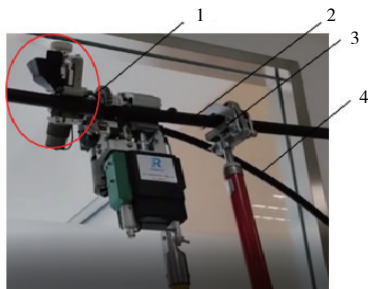
不同型号线缆进行调节,过程极为繁琐,严重地影响了实际的线缆剥皮效率。此外,现有技术中另一个突出性问题就是刀具的进刀深度与进刀角度的联合调节问题<sup>[2]</sup>。由于绝缘导线护套即绝缘皮通常采用高强度的聚乙烯材料,厚度和硬度非常大,这就要求刀具不仅要有合适的进刀深度,还需要搭配特定的最优进刀角度和材料要求,方可实现可靠的绝缘皮剥除功能。当刀具角度过大时,一旦需剥皮线缆绝缘皮硬度较高,甚至可能出现刀具折弯和折断现象<sup>[3]</sup>。而刀具角度过小时,在进行厚绝缘皮剥皮操作时效率较低,需旋钮式剥皮器重复切割多次方可剥出线芯,不能适应高效率的现代化剥皮需求。若想解决上述问题,只能依靠特定型号线缆匹配带有特定角度刀具的旋钮式剥皮器,这不仅加大了实际剥皮成本,还增加了作业人员的单次携物量,给实际作业带来诸多困扰。与此同时,由于在线缆剥皮时,旋钮式剥皮器处剥皮夹具不仅需抱合线缆,同时还需绕线缆产

第一作者简介:谭海铭(1985—),男,广西河池人,工程师,本科,研究方向为高压输电设备技术,1197849471@qq.com。

生回转剥皮动作, 如何以合适力度抱合线缆, 也是亟待解决的技术难题<sup>[4-6]</sup>。

### 1 自动剥皮器工具作业流程

实验人员将自动剥皮器放置到工作位置, 设备将一键启动自动完成电缆剥皮流程。具体作业步骤如下: 如图 1 所示, 将自动剥皮器 1 挂接到主线需要剥皮位置, 自动剥皮器夹具抱紧主线 2; 自动剥皮器进行零位基准校准; 自动剥皮器中的旋转剥皮刀以合适的进给量与切入角度进行旋转剥皮, 剥皮至所需长度后切断经导出口排出的剥除绝缘层; 线缆剥皮程序完成后, 执行下一步自动衔接引流线流程, 其具体作业流程如图 2 所示。



1—剥皮工具; 2—主线; 3—挡杆; 4—引流线。

图 1 工具作业图

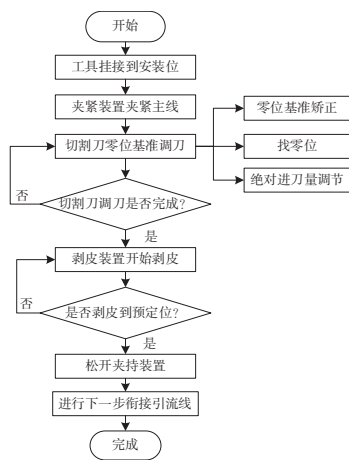
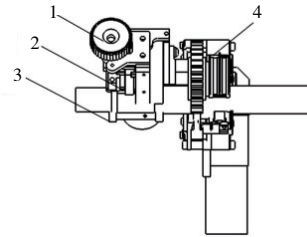


图 2 工具作业流程图

### 2 剥皮工具组成及作业原理

整个线缆剥皮装置主要分为 4 个部分, 夹紧装置、零位基准调刀装置、旋转驱动装置和剥皮装置, 如图 3 所示 (零位基准调刀装置深度调节范围为 0~4.5 mm, 可以覆盖 2.5 mm、3.4 mm 及其他非标绝缘层厚度)。

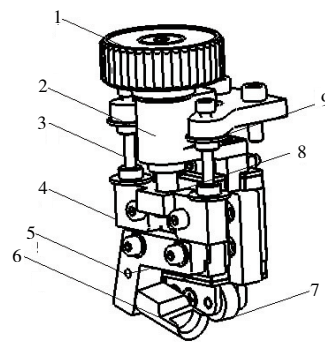


1—零位基准调刀装置; 2—剥皮装置; 3—夹紧装置; 4—剥皮装置。

图 3 自动剥皮器结构图

#### 2.1 零位基准调刀装置

设计的零位基准调节装置包括以下组成部分: 调刀旋钮、调刀基准螺纹座、弹性压缩阻尼件、进刀深度调节座、刀具固定座、刀具、调刀螺柱和弹簧压板, 整体如图 4 所示。在传统剥皮器的结构基础上, 本文提出一种手动控制的零位基准调节结构, 从而能针对当前待夹持线缆的直径, 灵活地实现刀具进刀量的手动调节功能。



1—调刀旋钮; 2—调刀基准螺纹座; 3—弹性压缩阻尼件; 4—进刀深度调节座; 5—刀具固定座; 6—刀具; 7—基准部件; 8—调刀螺柱; 9—弹簧压板。

图 4 基准调刀结构图

零位基准调节方法包括以下步骤。

##### 1) 零位基准校正

手动旋转调刀旋钮, 使得调刀螺栓产生随动上升动作, 直至调刀螺栓与进刀深度调节座共同配合相向夹紧调刀基准螺纹座, 此时刀具的刀尖与基准部的下端点在平面内处于同一水平线上, 完成零位基准校正。

##### 2) 找零位

当基准部与线缆绝缘皮开始逐渐接触时, 线缆绝缘皮会施予基准部以上行力, 而基准部则由下而上的压迫弹性压缩阻尼件并产生受压上行动作; 由于零位基准校正步骤中调刀螺栓与调刀基

准螺纹座形成了一体结构,因此刀具固定座处刀具会随零进刀深度调节座处基准部一起压迫弹性压缩阻尼件而上移,从而保证刀具的刀尖与基准部的底端面均抵靠于线缆最上侧母线处;即完成找零位操作。

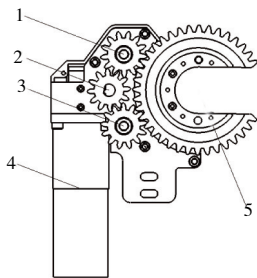
### 3) 绝对进刀量调节

在找好零位的基础上,利用调刀旋钮驱动旋转套筒转动,使得调刀螺栓产生螺旋下行动作,在弹性压缩阻尼件的弹性回复力作用下,刀具会伴随剥皮夹具的整体旋转而慢慢切入线缆绝缘皮内。调刀螺栓的螺距为 1 mm,并将调刀旋钮设计成十等分刻度,每刻度前进 0.1 mm。刀具会相对基准部或线缆绝缘皮的最上侧母线而“绝对”地下沉,最终实现进刀量与线缆实际需吃刀深度一致的调节目,并达到绝对吃刀深度调整效果。当刀具刀尖刚好伸入到完全剥离线缆绝缘层和屏蔽层并开始裸露线芯时,可停止旋动刀深调整旋钮,以保持当前吃刀深度而持续进行,从而达到线缆绝缘皮的切削目的。

## 2.2 旋转驱动装置

本文采用旋切法的剥皮装置,作业时需要剥皮夹具做圆周运动,且作业时需要将线缆置于旋转中心位置。因此需要设计有进线开口的连续传动装置。

旋转电机的输出轴安装有主动轮,从动轮 1、从动轮 3 与主动轮 2 啮合连接,开口齿轮与从动轮啮合连接(图 5)。旋转电机带动主动齿轮,主动齿轮带动从动齿轮,从动齿轮带动开口齿轮。因为安装有两个从动齿轮同时与开口齿轮啮合,且两个从动齿轮轴心距离大于开口齿轮开口距离,可以保证在旋转过程中至少有一个从动轮与开口齿轮啮合,进而可以持续旋转。



1—从动轮;2—主动轮;3—从动轮;  
4—驱动电机;5—从动开口齿轮。

图 5 旋转驱动装置平面示意图

针对 10 kV 配电线缆在剥皮所需切削力进行

实验,使用测力计测得手动剥线工具切削力大小,计算切削力矩  $M_1$ :

$$M_1 = FL \tag{1}$$

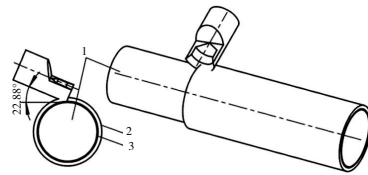
实验测得  $F$  约为 110 N,手动剥皮力臂  $L$  约为 100 mm,计算  $M_1$  为 11 Nm。自动剥皮工具电机驱动力矩  $M_2$  为

$$M_2 = M_1 \frac{z_1}{z_2} \eta_1 \frac{z_2}{z_3} \eta_2 \frac{z_3}{z_4} \eta_3 = 14.4 \text{ (Nm)} \tag{2}$$

式中: $Z_i(i=1,2,3,4)$ 为齿轮组齿数; $\eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = 0.8$ 。所以能够满足切削力的要求。

## 2.3 剥皮装置

当旋转驱动装置绕线缆旋转时,在导向刀(图 6)的作用下会产生圆柱螺旋运动,刀具同时切割,其轨迹遵循式(3)的运动方程,运动轨迹如图 7 所示。



1—导线内芯;2—绝缘层;3—屏蔽层。

图 6 剥皮刀切割原理图

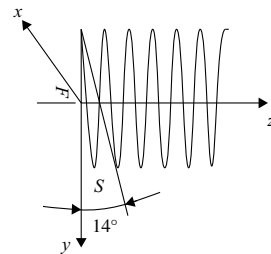


图 7 导向刀切割轨迹图

$$\begin{cases} x = a \cos \theta \\ y = a \sin \theta \\ z = \frac{h}{2\pi} \theta = a \theta \cot \beta \end{cases} \tag{3}$$

式中: $a$  为螺旋线长度,  $a = \sqrt{(\pi D)^2 + H^2}$ ,  $D$  为直径,  $H$  为导程; $\theta = \omega t$ ,  $\omega$  为角速度; $h$  为螺距; $\beta$  为螺旋角。

## 2.4 夹紧装置

夹持装置由双头反向丝杠和上下夹爪组成,如图 8 所示。其工作原理为当电机驱动双头反向丝杠,使上下夹爪产生相向运动从而夹持线缆,若反向则松开线缆,其原理如图 9。电机的转矩为 0.7 Nm,其中双头反向丝杠的螺距 2 mm、外径

8 mm, 导程 = 螺距 × 头数, 可以得到这里上下夹爪的推力为

$$F' = \frac{2\pi\eta T}{L'} = 2.02 \quad (\text{N}) \quad (4)$$

式中:  $\eta$  为传动效率;  $T$  为转矩;  $L'$  为导程。这个推力能稳固地夹紧线缆。

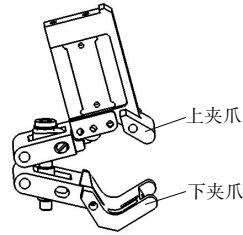


图 8 夹紧装置示意图

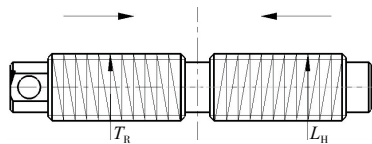
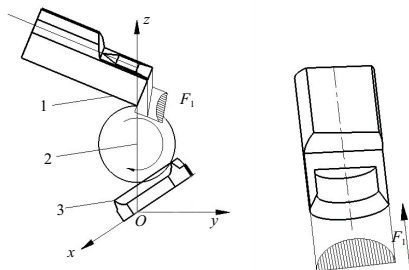


图 9 双头反向丝杠示意图

### 3 工具关键部件有限元分析

剥皮刀在整个剥皮装置中是最关键部件,为提高其使用寿命和提高剥皮效率,根据剥皮过程简化模型如图 10 所示,建立剥皮刀的有限元模型,运用 So-Simulation 进行有限元仿真。仿真后的结果与电力线缆切割试验的结果进行对比,进一步修正有限元模型。在修正后有限元模型的基础上,再次进行数值仿真,得到线缆切割的最大切割力、应变位移、能量等变化规律,揭示线缆切割时刀片的受力规律,为优化设计线缆切割结构提供参考。电力线缆切割力学特性数值仿真流程如图 11 所示。



1—剥皮;2—线缆;3—旋进刀。

图 10 剥皮过程简化模型图

首先第一步赋予导向刀和剥皮刀的材料属性,

剥皮刀用的是 1045 钢、冷拔处理,具体材料属性见表 1。之后是定义边界条件,固定剥皮刀并加载相应的力,图 10 中剥皮刀与线缆接触面分布着大小为 200 N,方向为“ $30 \times \cos(60) \times Y$ ”的不均匀力,之后进行网格划分,最后由求解器 (FPEPlus) 求解运算得到其应力和变形云图如图 12 所示。

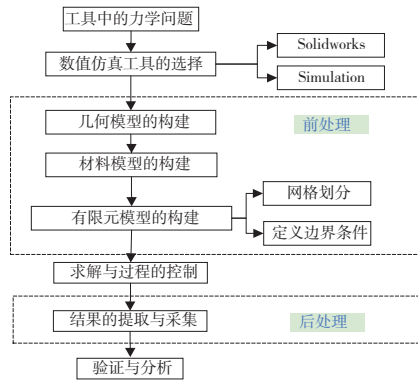


图 11 有限元分析框架图

表 1 1045 钢材料属性表

| 材料属性                      | 数值                    |
|---------------------------|-----------------------|
| 弹性模量/(N/m <sup>2</sup> )  | 2.05×10 <sup>11</sup> |
| 泊松比                       | 0.29                  |
| 中抗剪模量/(N/m <sup>2</sup> ) | 8×10 <sup>10</sup>    |
| 质量密度/(kg/m <sup>3</sup> ) | 7 850                 |
| 张力强度/(kg/m <sup>2</sup> ) | 625 000 000           |
| 屈服强度/(kg/m <sup>2</sup> ) | 530 000 000           |
| 热膨胀系数/K <sup>-1</sup>     | 1.15×10 <sup>-5</sup> |
| 热导率/(W/(m·K))             | 49.8                  |
| 比热/(J/(kg·K))             | 486                   |

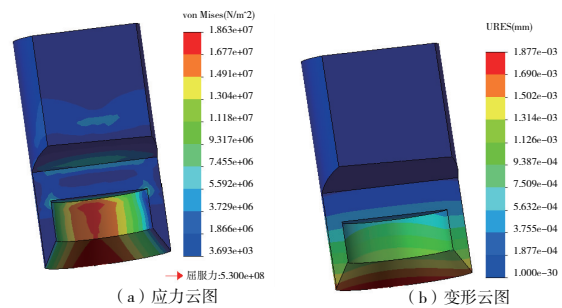


图 12 剥皮刀应力与变形云图

拓扑优化应用范围非常广泛,是运筹学、力学和工程交叉的领域,其原理是在满足工作性能和目标参数的前提下,在设计区域内找到结构的最优设计。如果零部件有强度、结构富裕的地方,拓扑优化能找到其富裕部分并进行优化。拓扑优化

有几种比较常用的方法,分别是均匀化法、变厚度法、变密度法等。本文使用变密度法对剥皮刀结构进行拓扑优化<sup>[7-8]</sup>。

变密度法数学模型为<sup>[9]</sup>

$$\begin{cases} \text{Find } \mathbf{x} = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T \\ \text{Min } C(\mathbf{x}) = \mathbf{F}^T \mathbf{U} \\ \text{s. t. } \begin{cases} V \leq V^* \\ \mathbf{F} = \mathbf{K}\mathbf{U} \quad (i=1, \dots, n) \\ x_i = \{0, 1\} \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $X_i$  为设计变量; $n$  为设计变量个数; $\mathbf{K}$  为总刚度矩阵; $\mathbf{U}$  为结构位移向量; $\mathbf{F}$  为结构所受外力向量; $V$  为结构体积; $V^*$  为优化后体积上限值。

设置保留剥皮刀 50% 的质量,将变量设置为单元密度,以剥皮刀刚度最大化为目标进行拓扑优化。拓扑优化后的结果如图 13 所示,拓扑优化结果云图中深色区域为被优化部分,浅色部分表示该部分是结构系统的主要承载部分,不能去除;深色部分是结构系统受力较小的部分,可以根据加工工艺、成本以及装配情况适当地去除该部分材料。拓扑优化后得到相应属性收敛曲线如图 14 所示,整体优化较为收敛。

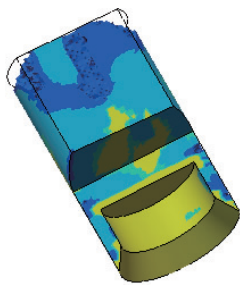


图 13 拓扑优化图

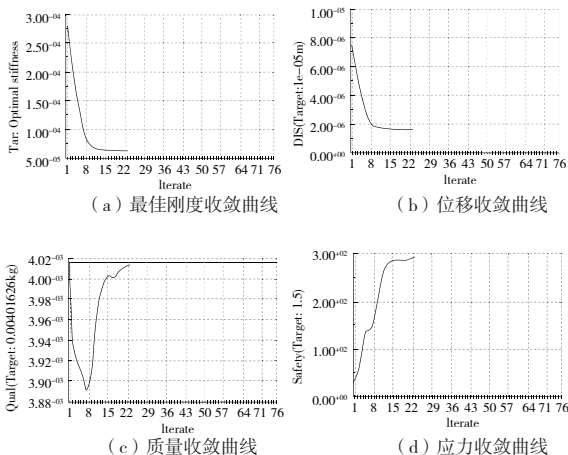


图 14 拓扑优化收敛曲线

经过优化后的模型如图 15 所示。对修改后的模型进行静力学分析并与修改前的模型对比,结果显示,拓扑优化后剥皮刀质量减少 11%,应力减少 9.7%;最大位移减少 26%,且能达到正常工作的条件。所以优化能达到轻量化和提高整体强度的目的。拓扑优化前后各项数据对比如表 2 所示。

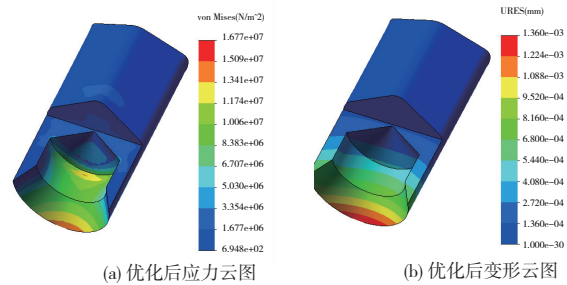


图 15 优化后应力和变形云图

表 2 拓扑优化前后数据对比

| 项目  | 最大位移/mm | 最大应力/MPa | 质量/kg |
|-----|---------|----------|-------|
| 优化前 | 0.001 9 | 18.6     | 0.104 |
| 优化后 | 0.001 4 | 16.8     | 0.093 |

## 4 实验和分析

自动剥皮器实验流程如下:

- 1) 电工穿戴好绝缘防护用具,系好安全带上杆准备进行带电作业;
- 2) 使用验电器对绝缘子、横担进行验电,确认无漏电现象;
- 3) 用绝缘操作杆按照“从近到远、从下到上、先带电体后接地体”的遮蔽原则对不能满足安全距离的带电体和接地体进行绝缘遮蔽;
- 4) 将一段剥皮完成的副线插入线夹的副线线槽内,操作时使副线在自动剥皮器工具上固定;
- 5) 将自动剥皮器工具挂在主线合适位置并保持自然垂落,人为轻轻握住绝缘杆,防止剥皮作业时产生轻微晃动;
- 6) 操作使自动剥皮器工具夹具闭合,将锁杆挂在剥皮方向同侧合适位置(距一体化绝缘接线装置边缘,略大于单个线夹宽度)并锁紧;
- 7) 进行剥皮作业,等待剥皮完成后绝缘皮自然截断;
- 8) 操作自动剥皮器工具夹具开口向上并打开,为后续自动接线装置提供基础;
- 9) 操作自动剥皮器工具线夹单侧解锁并进行旋紧;

10) 操作自动剥皮器工具全部解锁,取下一体化绝缘接线装置;

11) 工作结束后,按照“从远到近、从上到下、先接地体后带电体”的原则拆除绝缘遮蔽,作业人

员返回地面。

自动剥皮工具剥皮线缆选用 JKLYJ-95/JKYJ-

120 两种线缆,其规格参数如表 3 所示。

表 3 线缆规格参数表

| 线缆型号      | 导体      | 导体外半径/mm | 内屏蔽厚度/mm | 绝缘厚度/mm | 电缆外径/mm | 电缆计算质量/(kg/km) | 绝缘体积电阻/( $\Omega$ /km) | 20℃导体直流电阻/ $\Omega$ | 导体计算拉断力/N      | 浸水 1 h 耐压电压/kV | 允许载流量/A |
|-----------|---------|----------|----------|---------|---------|----------------|------------------------|---------------------|----------------|----------------|---------|
| JYLYJ-95  | 19/2.57 | 11.60    | 0.80     | 3.40    | 20.00   | 495.2          | 1 500                  | 0.320               | $\geq 13\ 227$ | 18             | 276     |
| JYLYJ-120 | 36/2.21 | 13.00    | 0.80     | 3.40    | 21.40   | 543.6          | 1 500                  | 0.253               | $\geq 17\ 399$ | 18             | 320     |

从表 4 可得到本工具剥皮成功率极高,工作相对稳定。从图 16 可知本剥皮工具能够稳定可

靠的完成剥皮工作,且从剥落的绝缘皮的切剖面可知刀具工作稳定且排布角度科学。

表 4 剥皮夹紧实验数据表

| 序号 | 时间         | 线缆型号      | 剥皮   |      |        | 夹紧   |      |        |
|----|------------|-----------|------|------|--------|------|------|--------|
|    |            |           | 实验次数 | 成功次数 | 成功率/%  | 实验次数 | 成功次数 | 成功/%   |
| 1  | 2020-06-16 | JKLYJ-95  | 10   | 10   | 100.00 | 10   | 10   | 100.00 |
|    |            | JKLYJ-120 | 5    | 5    | 100.00 | 10   | 8    | 80.00  |
| 2  | 2020-06-17 | JKLYJ-95  | 7    | 6    | 85.71  | 5    | 5    | 100.00 |
|    |            | JKLYJ-120 | 5    | 5    | 100.00 | 5    | 5    | 100.00 |
| 3  | 2020-06-18 | JKLYJ-95  | 5    | 5    | 100.00 | 5    | 5    | 100.00 |
|    |            | JKLYJ-120 | 5    | 5    | 100.00 | 5    | 5    | 100.00 |

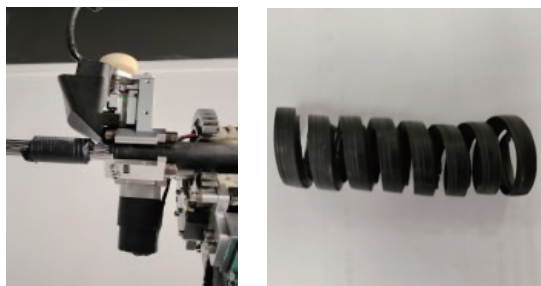


图 16 自动剥皮器工具实验图

## 5 结语

本文提供了一种结构合理且使用可靠、便捷的旋钮式剥皮器,其能针对当前待夹持线缆型号,而灵活地实现刀具进刀量的自适应调节、对关键部件导向刀和剥线刀进行了有限元分析,完全满足设计和使用要求,从而极大地提升线缆的剥皮可靠性及剥皮效率。从实验结果可以看出,当前自动剥皮器还存在剥皮失败的概率,主要原因有以下几点:1) 夹紧时开口齿轮未调至开口向上;2) 夹紧时夹具左挂钩未搭进线缆内芯;3) 第 2 次剥皮时,左侧预留线缆表皮太短,附着摩擦力减小,导致左侧表皮随剥皮夹具转动。后续工作将

针对这几点问题展开。

## 参考文献:

- [1] 胡毅. 配电线路带电作业技术导则[M]. 北京:中国标准出版社,2019:34-37.
- [2] 李健,李端明,戚晖,等. 高压带电作业机器人自动剥皮器的研制[J]. 制造业自动化,2011,33(7):111-112.
- [3] 曾国华. 可控扭矩电动扳手的设计[J]. 工具技术,2002,36(5):15-17.
- [4] 李邦协. 实用电动工具手册[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- [5] 易辉. 带电作业工具、装置和设备预防性试验规程[M]. 北京:中国电力出版社,2018:1-27.
- [6] 朱开放. 电力线缆切割剥皮结构的设计与关键部位的优化[D]. 杭州:浙江工业大学,2020.
- [7] XU D, CHEN J, TANG Y, et al. Topology optimization of die weight reduction for high-strength sheet metal stamping [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2012,59(1):73-82.
- [8] 马思群,刘寒,孙彦彬,等. 基于 ANSYS/PDS 的铁路机车转向架构架可靠性分析[J]. 计算机仿真,2019,36(9):168-172.
- [9] 丁卯,耿达,周明东,等. 基于变密度法的结构强度拓扑优化策略[J]. 上海交通大学学报,2021,55(6):764-773.

收稿日期:2022-07-15