

V形聚能铜切割索校直方法研究

汪辉强, 彭文彬, 周旋*, 葛亚庆, 王鹏飞, 冯川, 李泽东, 韦浩然, 伍科
四川航天川南火工技术有限公司, 四川 泸州

收稿日期: 2025年3月28日; 录用日期: 2025年4月21日; 发布日期: 2025年4月29日

摘要

针对V形聚能铜切割索存在弯曲和扭转的问题, 开展V形聚能铜切割索校直方法, 解决并消除了人工施力不易准确控制的缺陷, 提高了V形聚能铜切割索的校直稳定性、校直效率及合格率。针对以上问题, 设计了一套V形切割索校直装置, 在提升校直效率的同时, 实现了带药操作环节的人机隔离, 提升了本质安全度。

关键词

V形聚能切割索, 校直, 本质安全度

Research on Straightening Method of V-Shaped Linear-Shaped Charge

Huiqiang Wang, Wenbin Peng, Xuan Zhou*, Yaqing Ge, Pengfei Wang, Chuan Feng, Zedong Li, Haoran Wei, Ke Wu

Sichuan Aerospace Chuannan Initiating Explosive Technology Limited, Luzhou Sichuan

Received: Mar. 28th, 2025; accepted: Apr. 21st, 2025; published: Apr. 29th, 2025

Abstract

Aiming at the bending and torsion of V-shaped linear-shaped charge, the straightening method of V-shaped linear-shaped charge is developed. The defect that the artificial force application is not easy to be accurately controlled is solved and eliminated, and the straightening stability, straightening efficiency and qualified rate of the copper skin cutting cable are improved. In view of the above problems, a set of V-shaped shaped charge straightening device is designed, the man-machine isolation is realized while the straightening is improved, and intrinsic safety is improved.

*通讯作者。

文章引用: 汪辉强, 彭文彬, 周旋, 葛亚庆, 王鹏飞, 冯川, 李泽东, 韦浩然, 伍科. V形聚能铜切割索校直方法研究[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(2): 133-141. DOI: 10.12677/met.2025.142014

Keywords

The V-Shaped Linear-Shaped Charge, Straightening, Intrinsic Safety

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

聚能切割索是利用聚能效应(通常称为“门罗效应”),即炸药爆炸后,在凹槽轴线上会出现一股汇聚的、速度和压强都很高的爆炸产物流,通过高温高压来达到切割金属材料的功能[1][2]。铜切割索为带V型聚能槽的线性装药结构[3][4],见图1。

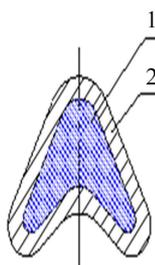


Figure 1. Typical shape of copper linear-shaped charge: 1-Explosives; 2-Copper skins

图 1. 典型铜切割索形状: 1-炸药; 2-铜皮

如图2所示,由于切割索细长型的特殊结构,其成型后需通过手工方式进行校直方可使用。目前采用两块长带沟槽的铝块固定待校直点两度,对校直点进行反向施力达到校直目的。



Figure 2. Current method of straightening

图 2. 目前校直方式

目前采用手工校直存在以下问题:

1) 手工校直方法对操作人员的技能要求高,校直效果差。由于每一点弯曲、扭转情况不同,人工施力过程无法准确控制,对操作人员的技能要求很高,且由于V形聚能铜切割索外皮为铜,材质较硬,采用手工校直的方式效果较差。

2) 手工校直劳动强度大,校直效率低。由于V形聚能铜切割索需进行多次反复校直工作,且校直过程劳动强度大,超过2h需进行体力恢复或更换人员,校直效率较低,导致每人每天仅能完成10根校直工作,不能满足生产需求。

3) 手工校直为带药操作,存在安全隐患。V形聚能铜切割索内装药剂为高爆炸药,采用手工进行强制校直过程会挤压药剂,存在一定的安全隐患。

针对 V 形聚能铜切割索校直效果差、校直效率低、存在安全隐患的问题,开展 V 形聚能铜切割索校直方法,解决并消除人工施力不易准确控制的缺陷,提高 V 形聚能铜切割索的校直稳定性、校直效率及合格率,设计 V 形切割索校直装置,提升校直效率的同时,实现带药操作环节的人机隔离,提升了本质安全度。

2. 校直原理分析

校直过程为 3 点弹塑性反弯过程,两端点为支点,中间为加力点,其理论模型可以用图 3 的载荷 - 挠度变形曲线表示,对具有初始弯曲量 δ_0 的物体,在横向集中力 F 的作用下发生反弯,反弯量为 δ_m ,卸载外力后,若回弹量正好等于反弯量,则物体被校直。

图 3 中 oa 为物体的弹性变形阶段,假定其斜率为 k_1 , ac 曲线段为弹塑性变形阶段, a 点为材料的屈服点,当横向集中力加载到 a 点时,零件开始产生塑性变形,加严到 c 点卸载, cd 段为弹性回弹,根据简单卸载定律, cd 段为直线,其斜率也为 k_1 ,要使物体被校直,则要求零件回弹到 d 点产生的永久变形 od 段大小正好等于初始弯曲变形量 δ_0 。

现用直线连接 a 、 c 两点,将 ac 曲线段简化为直线段,假设其斜率为 k_2 ,由图 3 几何关系可得到如下方程:

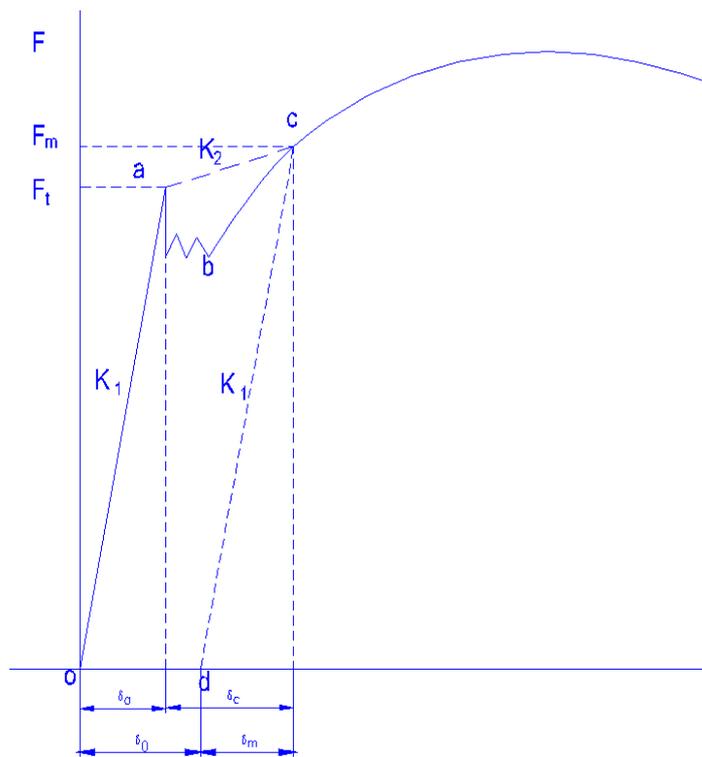


Figure 3. Theoretical model of straightening process

图 3. 校直过程理论模型

$$\begin{cases} \delta_a = F_t/k_1 \\ \delta_c = (F_m - F_t)/k_2 \\ \delta_m = F_m/k_1 \\ \delta_0 + \delta_m = \delta_a + \delta_c \end{cases} \quad (1)$$

消去 δ_a 、 δ_c 和 F_m ，得反弯量：

$$\delta_m = \frac{K_2}{K_1 - K_2} \delta_0 + \frac{F_t}{K_1} \quad (2)$$

即校直反弯量与横向集中力、初始弯曲量呈线性关系(若将 ac 段近似为二次函数或幂函数，结果更精确)，当卸载横向集中力后物体回弹到 d 点产生的永久变形正好等于初始弯曲量时，物体被校直。

3. 改进的校直方案

3.1. V 形聚能铜切割索校直原理分析

根据手工点式校直的影响因素可知，为提高校直稳定性，首先应统一校直过程中的参照基准，其次对 V 形聚能铜切割索上的每一处均进行无差别校直。根据公式(2)可知，反弯量与初始弯曲量和校直力呈线性关系，而 V 形聚能铜切割索生产后，V 形聚能铜切割索各点初始弯曲量为随机值，导致各点的反弯量也存在波动，在同一校直力下校直 V 形聚能铜切割索，其直线度也存在波动，导致校直稳定性不高。

对公式(2)进行分析，当 $\frac{F_t}{K_1} \gg \frac{K_2}{K_1 - K_2} \delta_0$ 时，初始弯曲量对反弯量的影响较小，甚至可以忽略，此时对 V 形聚能铜切割索而言，当在较大的校直力作用下，V 形聚能铜切割索将由不规则的弯曲变成了规则弯曲，弯曲量 $\delta_m = \frac{F_t}{K_1}$ ，在此基础上，若再对 V 形聚能铜切割索进行一次反向弯曲，则可以达到校直目的。

目前市面出售的钢丝校直机，采用多轮组对钢丝进行校直，V 形聚能铜切割索可借鉴该校直方式。该校直方式为三点式线性校直，每三个相邻的滚轮形成一组轮组，当该轮组内滚轮间的间隙保持一定相对位置时，校直力度固定，且待校直物体与轮组接触的三点形成一个圆，该圆即为校直基准，未校直的物体通过轮组后，通过塑性变形弯曲成一个规整的圆弧，见图 4；按照该方法当再增加一组反向弯曲的轮组后，物体就可从规整的圆弧变成直线。

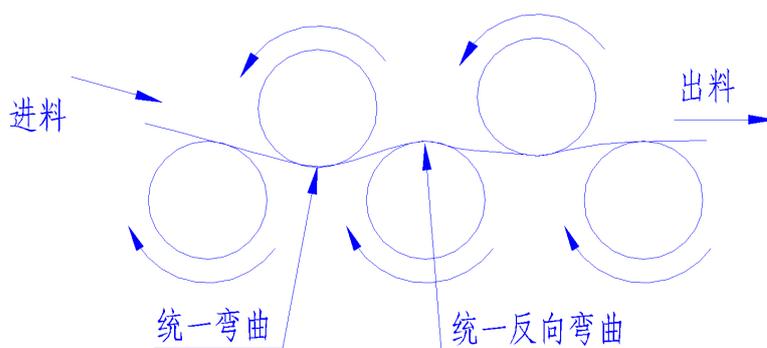


Figure 4. Linear straightening principal diagram
图 4. 线性校直原理图

V 形聚能铜切割索的校直可按图 4 的线性校直结构进行设计，其工作原理为：第 1 轮组未校直的 V 形聚能铜切割索按一定曲率半径统一进行弯曲，使整体发生塑性变形，将生产过程中产生的不规则弯曲和扭转变成具有相同曲率半径的弯曲，第 2 轮组反向按一定曲率半径将 V 形聚能铜切割索进行弯曲，消除第 1 轮组产生的弯曲，达到校直的目的，第 3 轮组则对第 2 轮组的过校直或欠校直进行补偿。

根据以上分析论证，本项目采用轮组线性方式进行校直，通过控制滚轮间隙确定校直基准及校直力度，通过控制滚轮转速确定校直速度，从而达到提高校直稳定性的目的。

3.2. 轮组型面通用化设计

3.2.1. 型面结构设计

V形聚能铜切割索的弯曲存在两个方向：宽度方向和高度方向，根据图4可知，线性校直只能对一个方向进行校直，故需设计两组型面，分别对高度和宽度方向进行校直。

市面的钢丝校直型面为两个V型槽，通过4个点压紧钢丝从而完成校直，见图5，工厂目前的7种V形聚能铜切割索，截面尺寸从 $3 \times 3.5 \text{ mm}$ 到 $5 \times 4.3 \text{ mm}$ ，形状均为U型，两侧均存在固定的夹角，见图6。故V形聚能铜切割索校直轮组型面可在图4的基础上进行改进优化设计，在高度方向，通过V型面与V形聚能铜切割索背部两侧接触，通过U型面与V形聚能铜切割索聚能底角接触，达到4点压紧校直的目的；在宽度方向，通过斜U型面与V形聚能铜切割索背部两侧面接触，然后通过轮组挤压，V形聚能铜切割索聚能底角与斜U型边接触，达到2点2线压紧校直的目的，见图7、图8。

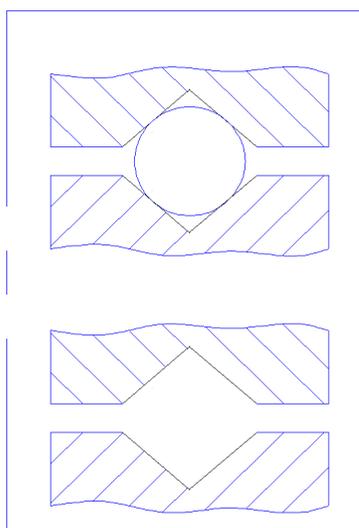


Figure 5. The profile of steel wire straightening

图5. 钢丝校直型面

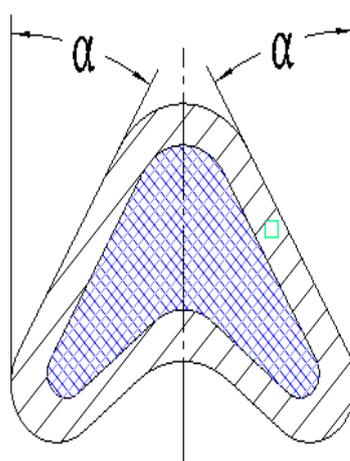


Figure 6. The profile of V-shaped linear-shaped charge

图6. V形聚能铜切割索型面

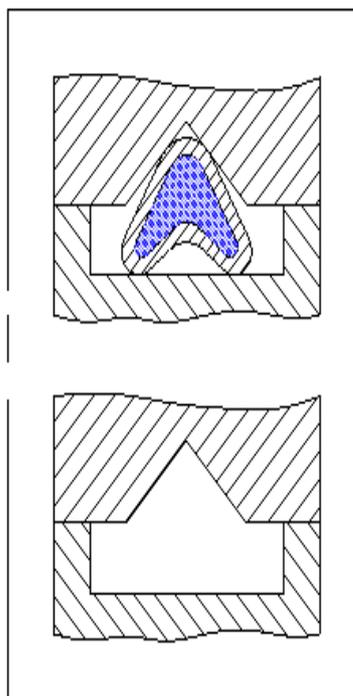


Figure 7. Wheel set of height straightening profile
图 7. 高度校直型面轮组

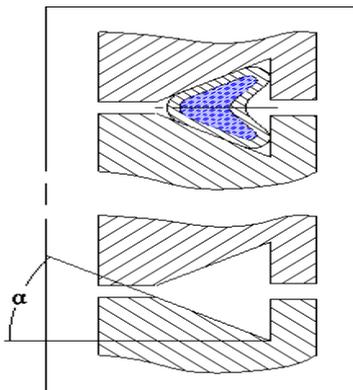


Figure 8. Wheel set of width straightening profile
图 8. 宽度校直型面轮组

3.2.2. 型面尺寸设计

根据 V 形聚能铜切割索型面尺寸，结合第 3.2.1 的分析，设计的校直轮组见图 9。

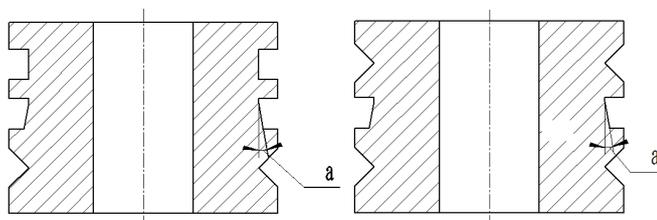


Figure 9. Wheel set of straightening profile
图 9. 校直轮组型面

3.3. 原理性验证

3.3.1. 原理样机搭建的原则

鉴于为防止校直时出现不稳定的情况，在原理样机搭建时需满足以下原则：

- 1) 应尽量减少上下滚轮间隙，防止出现滚轮定位不准的情况；量化每种规格 V 形聚能铜切割索的调整量，避免操作人员凭直觉调整间隙，影响校直效果。
- 2) 采用动力装置代替手工牵引，避免操作人员手工牵引速度的随机性，同时可对校直速度与 V 形聚能铜切割索摆动进行研究，确定进料、出料以及收料工艺。
- 3) 间隙调节结构设计在上轮，下轮用于传动，减少参数控制量。

3.3.2. 原理样机的搭建

切割索校直机主要由驱动电机、电源开关、传动模块、校直区域构成，其中，校直区域为工作区域，与传动模块和驱动电机采用隔板隔开，电源开关在整机外侧。驱动电机与电源开关之间的连线采用防爆挠性连接管保护，系统电源出线采用尼龙接头连接，控制电源通过按钮开关控制。选用零配件均满足防护等级。其结构如图 10~12 所示。

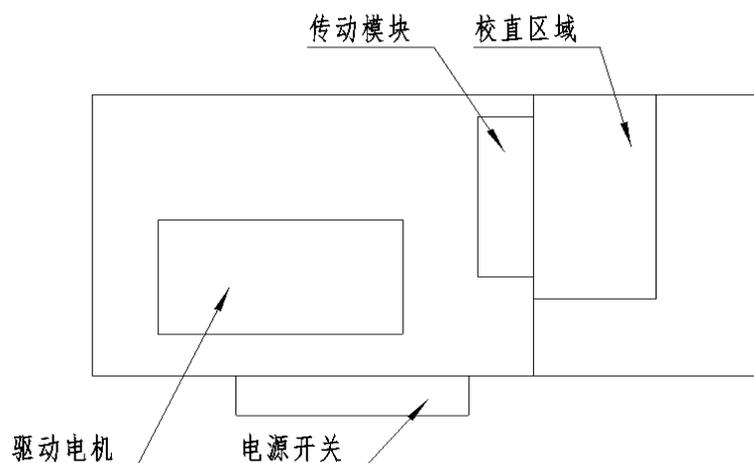


Figure 10. Layout diagram of V-shaped linear-shaped charge straightener
图 10. V 型聚能切割索校直机的布局图

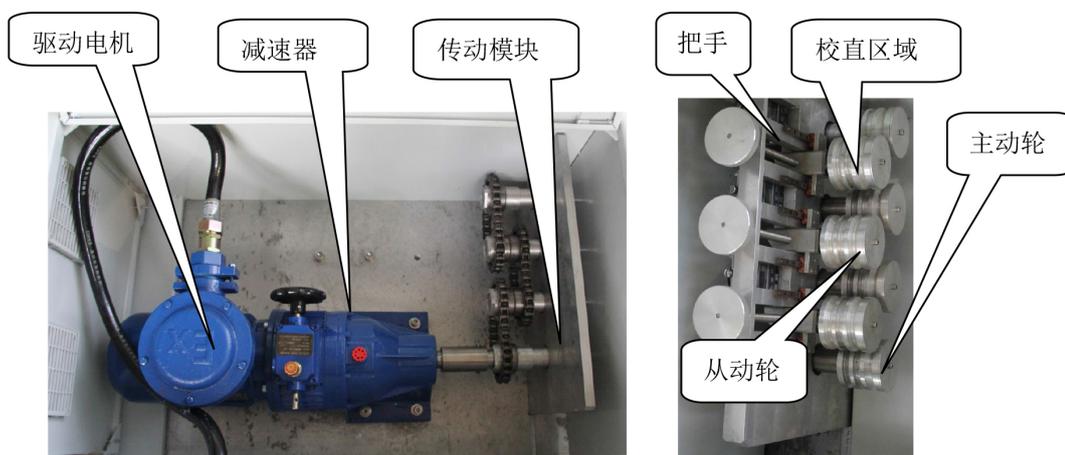


Figure 11. Functional module of V-shaped linear-shaped charge straightener
图 11. V 型切割索校直机的功能模块



Figure 12. Appearance of V-shaped linear-shaped charge straightener
图 12. V 型切割索校直机的外观

3.3.3. 原理样机的工作原理

切割索校直机的工作原理是：设计了内型面与切割索外型面相贴合的校直轮，校直轮分为上轮和下轮，下轮为固定轮。可通过转动把手调节上轮与下轮的间距，以适应不同类型产品的校直。上轮和下轮之间，安装有百分表，在转动把手调节上轮与下轮的间距时，百分表可显示数值，使间距调整精确。上轮为无动力轮，又称从动轮，下轮为动力轮，又称主动轮。

通过把手调整好主动轮和从动轮的间距后，采用防爆电机带动位于下部一个主动轮，该主动轮通过链传动带动同样位于下部的另外三个主动轮同方向旋转，采用链条传动可使得四个主动轮速度保持一致。若装置内没有切割索，则处于上部的三个从动轮处于静止状态。当切割索被送入装置后，切割索与从动轮、主动轮紧密接触。防爆电机带动主动轮旋转，切割索向前移动；从动轮依靠与切割索的静摩擦力，朝着主动轮的反方向旋转，且速度与主动轮一致。切割索位于主动轮和从动轮之间，校直工作时，由于校直轮内型面对切割索约束作用，使得切割索沿直线运动，最终达到校直的目的。

3.3.4. 相关工艺参数的确定

通过工艺摸索，得出推荐的运行参数，如表 1 所示。

Table 1. Straightening parameter table

表 1. 校直参数表

序号	产品代号	变速器频率	方向	推荐百分表 1 参数值(mm)	推荐百分表 2 参数值(mm)	推荐百分表 3 参数值(mm)
1	产品 1	50 HZ	高度	6.50 ± 0.05	8.25 ± 0.05	8.30 ± 0.02
			宽度	6.50 ± 0.05	8.25 ± 0.05	8.30 ± 0.02 m
2	产品 2	50 HZ	高度	4.80 ± 0.05	6.72 ± 0.05 m	6.90 ± 0.02
			宽度	4.80 ± 0.05	6.72 ± 0.05	6.90 ± 0.02

4. 试验验证

根据以上试验，按表 1 参数设置轮组间隙，对产品 1 和产品 2 进行校直。

试验结果：两种 V 形聚能铜切割索各选取了 10 根进行试验，直线度均不超过 0.8 mm/m，满足设计要求。此外，外观合格，线密度和爆速测试结果满足要求，且校直前后线密度无变化，见表 2。试验结果表明，校直参数设置合理。

Table 2. Straightening results

表 2. 校直结果

序号	产品代号	外观情况	耗时(min)	直线度(mm/m)	序号	产品代号	外观情况	耗时(min)	直线度(mm/m)
1		合格	3.4	0.055	11		合格	4.3	0.050
2		合格	3.6	0.080	12		合格	4.2	0.065
3		合格	3.4	0.035	13		合格	4.3	0.075
4		合格	3.6	0.065	14		合格	4.4	0.080
5	产品 1	合格	3.4	0.060	15	产品 2	合格	4.1	0.035
6		合格	3.5	0.040	16		合格	4.2	0.050
7		合格	3.6	0.025	17		合格	4.3	0.035
8		合格	3.4	0.045	18		合格	4.2	0.045
9		合格	3.2	0.050	19		合格	4.1	0.025
10		合格	3.4	0.035	20		合格	4.2	0.065

5. 结论

本文针对 V 形聚能铜切割索校直稳定性差的生产瓶颈, 围绕以人为本、提高 V 形聚能铜切割索校直稳定性、提高校直效率的研究目标, 利用校直原理和直线度检测原理, 从 V 形聚能铜切割索校直工艺研究、原理样机设计及改进、检测平台设计等方面展开研究, 设计、开发了校直机, 实现了自动校直, 校直合格率 100%, 校直效率提高 10 倍以上。

参考文献

- [1] 陈锋, 曹始发, 王晓勇, 等. 聚能切割 T 形节点传爆性能研究[J]. 火工品, 2021(2): 10-12.
- [2] 易建坤, 姜新权, 彭浩. 起爆方式对线性聚能装药射流形成的影响[J]. 火炸药学报, 2006, 29(3): 57-61.
- [3] 刘超. 某型发动机铜管切割索的研究与设计[J]. 时代报告(学术版), 2012(12): 141.
- [4] 刘宁, 渠弘毅, 戈庆明, 等. 聚能切割索切割仿真能力仿真及试验研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2020(1): 38-42.