

含能金属铜管轧尖成型方式及参数研究

李泽东, 王旭东, 汪辉强*, 赵哲, 冯杰, 陈思皓, 李浩翔, 徐祯, 廖金燕

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21日; 录用日期: 2025年4月20日; 发布日期: 2025年4月30日

摘要

当前工厂采用滚筒轧尖机实现多次滚压轧尖, 轧尖效率低, 轧尖成型段一致性差。本文通过对比市面上常见的轧尖方式, 并结合索类产品加工安全需求, 确定径向锻造缩径成型方式最为满足轧尖需求, 并建立了成型工艺参数模型, 正向确立了轧尖成型长度和轧尖成型强度之间的关系, 通过试验验证, 模型的误差在10%以内。新的轧尖成型方式以及成型工艺参数模型, 显著的提升了轧尖效率及一致性, 降低了劳动强度, 缩短了开发周期。

关键词

轧尖, 径向锻造缩径, 成型工艺参数模型, 效率及一致性提升

Research on Tapering Process and Parameters of Energetic Metal-Copper Tubes

Zedong Li, Xudong Wang, Huiqiang Wang*, Zhe Zhao, Jie Feng, Sihao Chen, Haoxiang Li, Zhen Xu, Jinyan Liao

Sichuan Aerospace Chuannan Initiating Explosive Technology Limited, Luzhou Sichuan

Received: Mar. 21st, 2025; accepted: Apr. 20th, 2025; published: Apr. 30th, 2025

Abstract

Currently, factories employ roller pointing machines for repeated rolling and pointing processes, which suffer from low efficiency and poor consistency in the forming segments. By comparing common pointing methods on the market and considering the safety requirements for cable product processing, this paper identifies radial forging and necking-down as the optimal forming method for pointing. A forming process parameter model is established to define the relationship between

*通讯作者。

文章引用: 李泽东, 王旭东, 汪辉强, 赵哲, 冯杰, 陈思皓, 李浩翔, 徐祯, 廖金燕. 含能金属铜管轧尖成型方式及参数研究[J]. 材料科学, 2025, 15(4): 889-901. DOI: 10.12677/ms.2025.154093

pointing length and forming strength through forward analysis. Experimental validation shows that the model's error margin is within 10%. The new pointing method and process parameter model significantly improve pointing efficiency and consistency, reduce labor intensity, and shorten development cycles.

Keywords

Pointing, Radial Forging and Necking-Down, Forming Process Parameter Model, Efficiency and Consistency Improvement

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

切割索是一种线性分离类火工品，是一种用于精确切割金属或坚硬材料的线性装药装置。广泛运用于航空航天、船舶制造等领域，具有结构简单、工作可靠等特点。切割索由内装炸药及外层金属管组成，制造流程包含空管装药、轧尖、拉伸等，轧尖密封是切割索生产制造的主要环节之一。

2. 存在的问题

轧尖成型就是将坯管的口部直径缩小直至密封的一种成形工序，是一种特殊的缩径方法。金属铜管在完成药剂装填后，需要通过一系列内径渐变的拉模拉伸到指定直径，为了确保金属管能够顺利穿入拉伸模具并保证在拉伸过程中药剂不发生遗漏，在拉伸前需要对端头进行轧尖密封。当前轧尖采用滚筒轧尖机多次滚压成型，滚筒轧尖机结构如图 1 所示。此轧尖过程中存在以下不足。



Figure 1. Schematic diagram of roller pointing machine structure
图 1. 滚筒轧尖机结构示意图

2.1. 效率低、操作技巧强

当前轧尖采用多次滚压成型，在轧尖过程中，需要在轧尖机不同半径的模具上，按照模具半径从大

到小依次轧尖，不允许跳模轧尖，以防止含能金属铜管因变形量过大出现卡死，在轧尖过程中需要不断调整轧尖位置，使各个位置都能均匀滚压成型，防止含能金属铜管因局部受力发生破裂，整个流程动作繁琐、耗时长、柔性高、操作技巧强、对工人技术要求高。

2.2. 一致性差

由于整个轧尖过程由人工进行手动操作，即使同一个操作者，轧尖出来的轧尖段直线段长度不一、过渡段倾斜角度不一、同心度、一致性差，并且表面粗糙、毛刺多，如图 2 所示。自动拉伸设备的开发，实现装药管自动夹持，自动穿模、自动拉伸等动作，增加了对于轧尖段同心度和一致性的要求，当前轧尖段成型特征难以满足自动拉伸设备需求，需要重新复轧。



Figure 2. Zoning diagram of pointing structure
图 2. 轧尖结构分区图

因此，为了进一步提升轧尖生产效率与一致性，需要探究新的轧尖密封成型方法，保证轧尖的长度、直线度、同心度、强度满足自动拉伸设备的要求。

3. 轧尖成型方式研究

在工程实际中，轧尖的方式主要以滚筒轧尖机轧尖为主，但缩径形式多种多样，轧尖与缩径的区别在于，轧尖需要保证端口完全密封，而缩径只需保证端口直径变小，轧尖属于特殊的缩径，缩径成型方法通常有模具挤压缩径，钢球旋压缩径，径向锻造缩径等[1][2]，通过试验对比各类缩径成型方式，确定最佳成型方式。

3.1. 模具挤压缩径成型技术

模压缩径也称冲压缩径，采用专用或通用的缩径模具，通过摩擦以及挤压方式实现缩径。根据缩径模具类型的不同可分为无芯柱缩径、有芯柱缩径和外部成形缩径，根据成形的次数又可以分为一次缩径和多次缩径[3]。模具挤压缩径的原理如图 3 所示，含能金属铜管轴向进给，在轴向推力和坯管与模具锥面的摩擦力的作用下缩径成形，采用该方法利用摩擦和挤压实现轧尖缩径，使得工件在轧尖缩径过程中产生大量的热量，即使在润滑的条件下，也容易造成工件的严重氧化和失效，不宜用于含能金属铜管的轧尖缩径[4]。

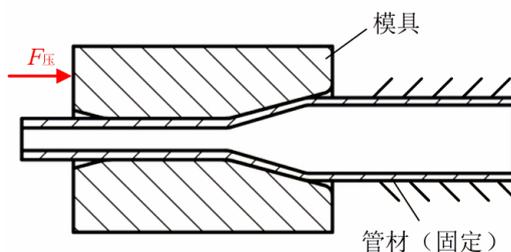


Figure 3. Schematic diagram of die swaging for diameter reduction
图 3. 模具挤压缩径原理图

3.2. 钢球旋压缩径成型技术

钢球旋压缩径是指卡盘夹紧钢珠保持架旋转，坯管轴向进给，在轴向推力和四钢珠共同作用下缩径成形，原理如图 4 所示。由于旋压缩径是逐渐进行的，因而大大减小了顶进缩径模所需的力和传力区产生皱褶的危险，但该方法由于反复和钢球摩擦，产生大量的热，使得含能金属铜管融化，通过此方法，轧尖后的含能金属铜管如图 5 所示[5]，由于轧尖坯管中装有药剂，轧尖温度过高会造成安全隐患，因此，该方法不适用于含能金属铜管轧尖。

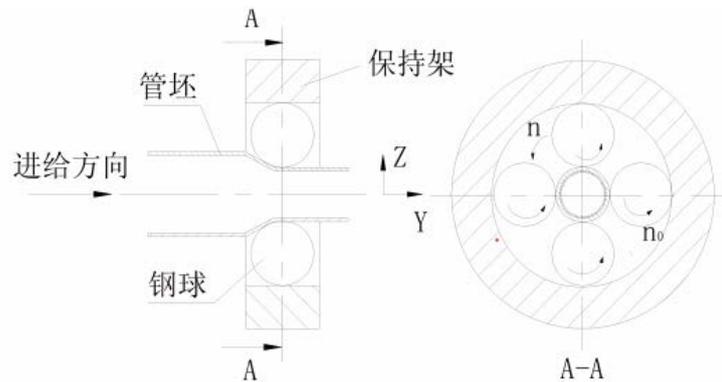


Figure 4. Schematic diagram of steel ball rotary swaging for diameter reduction
图 4. 钢球旋压缩径原理图

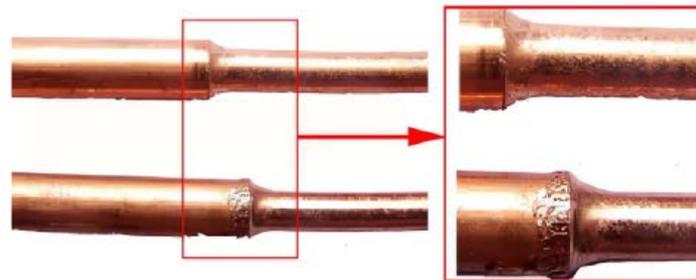
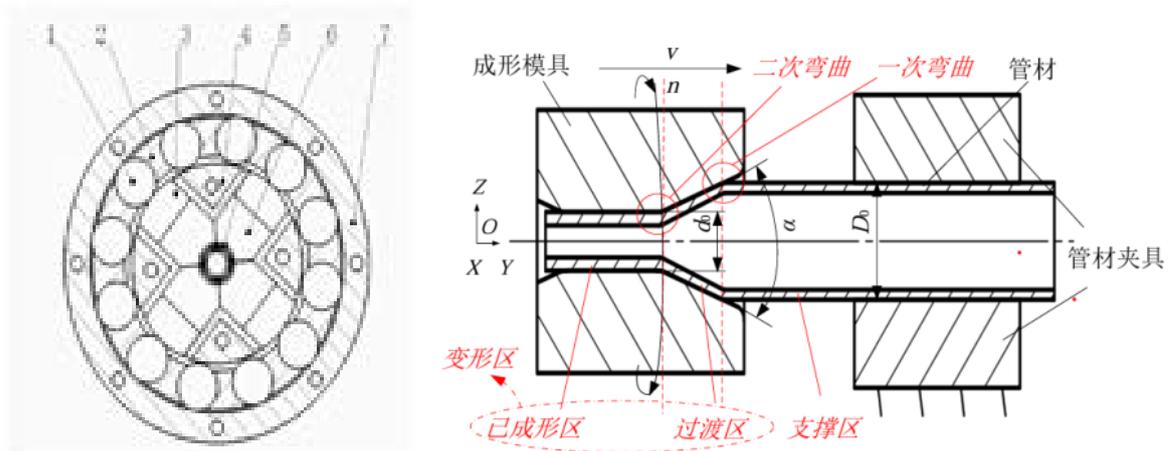


Figure 5. Schematic diagram of steel ball rotary swaging results
图 5. 钢球旋压缩径结果示意图

3.3. 径向锻造缩径成型技术

径向锻造缩径通常将模具均匀分布在待加工坯料圆心四周，并沿坯料圆心旋转，同时模具沿坯料直径方向进行周期性往复运动，对坯料进行击打以减小其半径，旋锻模具数量通常为 2~4 个。径向锻造缩径成形可以获得较高的表面质量，且加工效率高。径向锻造缩径缩径结构示意图如图 6 所示[6]。主轴通过电机带动实现高速旋转，击打块和模具伴随主轴一同旋转，因离心力而有向外运动的趋势。击打块圆弧外表面与滚动圆柱体相切限制其向外运动，因为切点位置不同，模具在主轴槽内往复运动，从而实现锻打动作[7]。同时，铜管沿主轴轴心匀速向前，模具与铜管接触后分离，如此往复，实现铜管的锻打缩径。由于该方法通过模具成型，铜管与模具接触面积大，并且可以控制模具转速及进给速度来控制轧尖速度，进而控制温度，使用该方法轧尖后直线段平直，直线段到过渡段圆过度平滑，过渡段同心度高，表面光滑，如图 7 所示。



注：1. 滚动物 2. 保持架 3. 击打块 4. 主轴 5. 铜管 6. 模具 7. 外壳。

Figure 6. Schematic diagram of forged radial forging for diameter reduction
图 6. 径向锻造缩径原理图



Figure 7. Schematic diagram of copper tube after diameter reduction
图 7. 锻造缩径铜管结果示意图

由上述分析以及试验结果可知，以上三种轧尖成型方式，只有径向锻造缩径符合含能金属铜管轧尖需求，故采用径向锻造缩径作为含能金属铜管轧尖成型方法。

4. 轧尖成型参数模型建立

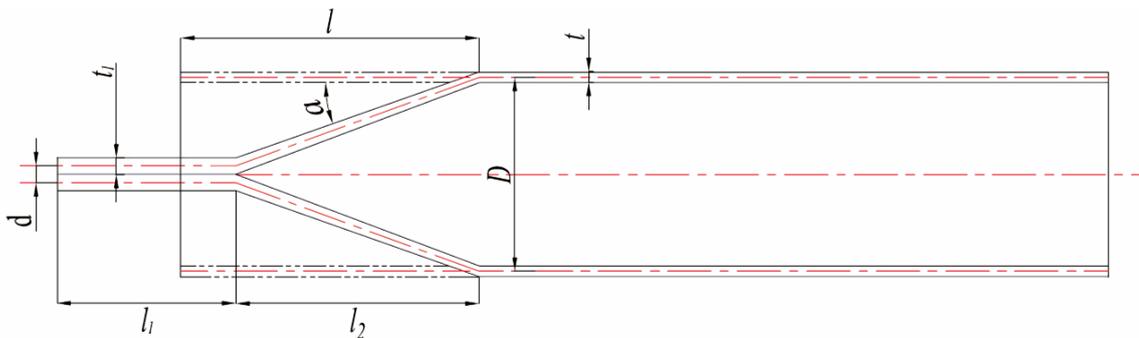


Figure 8. Schematic diagram of billet tube before and after diameter reduction
图 8. 缩径前后坯管示意图

由径向锻造缩径成型机理可知，轧尖后的直径、长度靠模具进行保证，由于工厂产品众多，各类产品尺寸不同，各类产品都需要与之对应的专用模具，由于模具加工时间长，费用高，如果单纯通过经验去设计模具，必然造成模具的大量浪费，因此需要通过对模具进行正向设计，轧尖模具的设计不但决定了

轧尖成型结构、形状、一致性，更是决定了轧尖段的直径，从而决定了轧尖段的抗拉强度，通过对拉伸过程的分析，明确了理想的轧尖段除了直线段平直，直线段到过渡段过度平滑，过渡段同心度高，表面光滑，未变形区不受轧尖部分影响，形状不发生改变等外部特征外，还需要具备较高的抗拉强度，保证在拉伸过程中不发生断裂，以及较大的伸长率，保证全自动拉伸设备能够夹持，由于轧尖后铜管外部的尺寸即为模具的内部尺寸，通过对轧尖前后进行分析计算，设计模具过程计算如下，缩径前后坯管的示意图如图 8 所示，其中 D 与 d 分别表示成形前后铜管中径，当前铜管轧尖长度为 l ，轧尖后的铜管长度为直线段长度 l_1 与过渡段长度 l_2 之和[8]。

忽略变形过程中铜管磨损，根据体积不变原则得到：

$$V_0 = V_1 + V_2 \quad (1)$$

V_0 、 V_1 、 V_2 分别为未变形铜管体积、成形后直线段体积与过渡段体积，其中变形前铜管体积 V_0 为：

$$V_0 = \pi D l t \quad (2)$$

铜管已成形区壁厚为 t_1 与铜管初始壁厚为 t ，两者之间存在以下关系：

$$t_1 = t \sqrt{\frac{D}{d}} \quad (3)$$

其中 D 与 d 分别表示成形前后铜管中径，为了保证药剂不泄露，直线段需要完全密封，因此，当直线段完全密封时的临界壁厚为 t_0 ，此时， $t_0 = d$ ，代入式(3)可知。

$$t_0 = d = \sqrt[3]{D t^2} \quad (4)$$

在轧尖过程中，为了保证完全密封，通常实际轧尖直线段壁厚 $t_1 \leq t_0$ ，因此，直线段到过渡段之间已经存在实心部分，对模型进行校正，校正后的缩径成形后铜管示意图如图 9 所示。

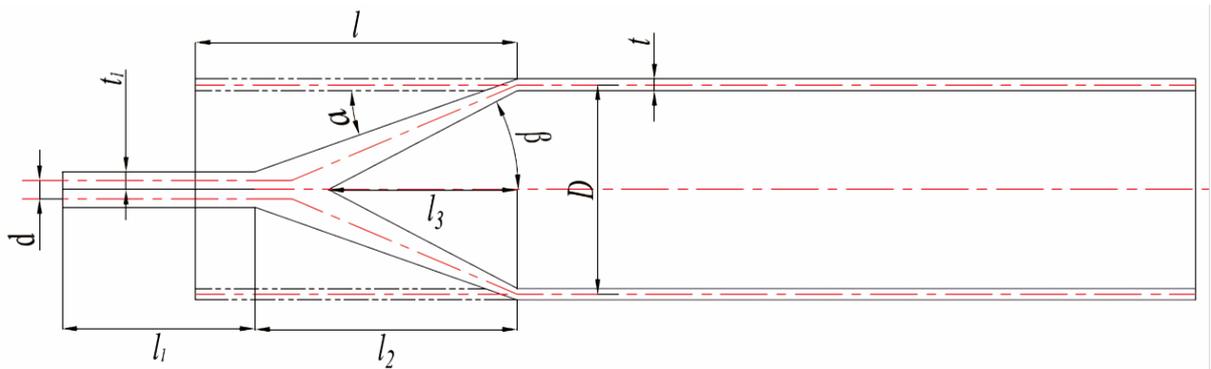


Figure 9. Schematic diagram of copper tube after calibrated diameter reduction
图 9. 校正后缩径后铜管示意图

直线段体积 V_1 为：

$$V_1 = \pi l_1 d^2 \quad (5)$$

则铜管过渡区体积 V_2 为圆台的体积减去圆锥的体积：

$$V_2 = V_{\text{圆台}} - V_{\text{圆锥}} \quad (6)$$

$$V_2 = \frac{\pi}{3} \times \left(d^2 + \left(\frac{D}{2} \right)^2 + \frac{dD}{2} \right) \times l_2 - \frac{\pi}{3} \times \left(\frac{D-t}{2} \right)^2 \times l_3 \quad (7)$$

其中 l_2 为过渡段的高度, l_3 为圆锥的高度, 过渡段高度 l_2 的计算公式如下:

$$l_2 = \frac{D-d}{2 \tan \alpha} \quad (8)$$

其中 α 为模具锥角;

为了更好的计算 l_3 , 将过渡段放大, 如图 10 所示。

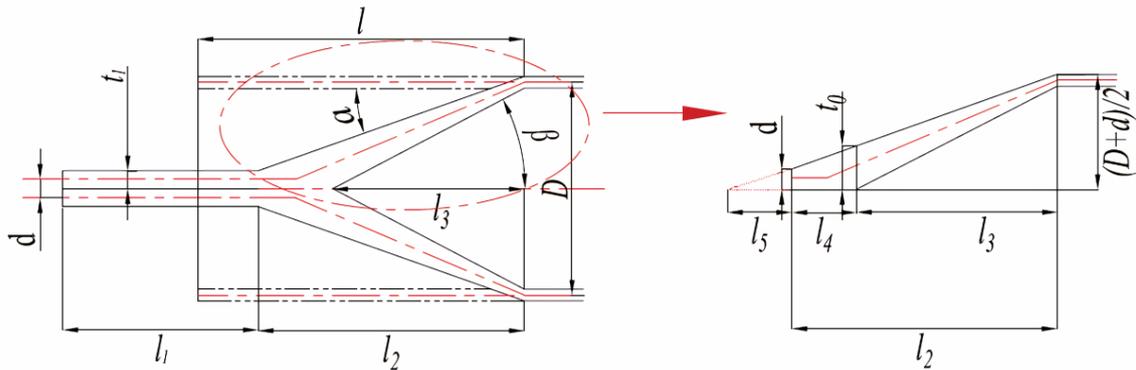


Figure 10. Enlarged schematic diagram of transition section

图 10. 过渡段放大示意图

由相似三角形比例关系可知:

$$\frac{l_5}{l_5 + l_2} = \frac{d}{(D+t)/2} \quad (9)$$

$$\frac{l_5}{l_5 + l_4} = \frac{d}{t_0} \quad (10)$$

$$l_2 = l_3 + l_4 \quad (11)$$

其中 l_4 为过渡段实心部分的长度, l_5 为辅助延长线交点的长度。

由(9)~(11)可得:

$$l_3 = l_2 \left(1 - \frac{t_0 - d}{(D+t)/2 - d} \right) \quad (12)$$

由(1)~(12)可得:

$$l_1 = \frac{Dl}{d^2} - \frac{\left[\left(d^2 + \left(\frac{D}{2} \right)^2 + \frac{dD}{2} \right) \left(1 - \frac{\sqrt[3]{Dt^2 - d}}{(D+t)/2 - d} \right) - \left(\frac{D-t}{2} \right)^2 \right]}{3d^2} \times \frac{D-d}{2 \tan \alpha} \quad (13)$$

由此可得轧尖后总长 $l_1 + l_2$ 为:

$$l_1 + l_2 = \frac{Dl}{d^2} - \frac{\left(\left[\left(d^2 + \left(\frac{D}{2} \right)^2 + \frac{dD}{2} \right) \left(1 - \frac{\sqrt[3]{Dt^2 - d}}{(D+t)/2 - d} \right) - \left(\frac{D-t}{2} \right)^2 \right] + 3d^2 \right) \times (D-d)}{6d^2 \tan \alpha} \quad (14)$$

从式(13)可以看出, 轧尖成型总长与成形前后铜管外径 D 、壁厚 t 、轧尖长度 l 及模具锥角 α 有关。

式中 d 的大小决定轧尖的抗拉强度，为了保证轧尖过程不发生拉断，则需满足公式如下。

$$F = \delta \times S = \delta \times \pi \times d^2 > F_{\text{拉伸}} \quad (15)$$

式中 F 为最大拉力， σ 为抗拉强度， S 为横截面面积。 $F_{\text{拉伸}}$ 为对应尺寸通过拉伸过程中的最大拉力， $F_{\text{拉伸}}$ 、抗拉强度 σ 可通过试验测得。

除此之外，为了保证全自动拉伸设备能够夹持轧尖段，轧尖段整体长度需要超过 11.5 cm，如图 11 所示。

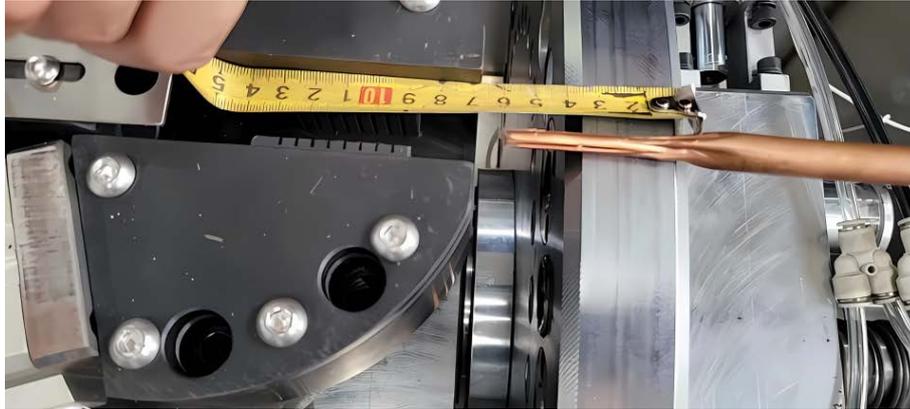


Figure 11. Schematic diagram of automatic stretching equipment clamp
图 11. 自动拉伸设备夹具示意图

因此，需要增加边界条件如式(15)所示：

$$l_1 + l_2 \geq 11.5 \text{ cm} \quad (16)$$

由上述设计模型，不同直径铜管只需填入成形前后铜管外径、壁厚以及模具锥角即可完成正向设计模具，大大的减少模具设计时间，减少了模具的浪费。

5. 样机的搭建

利用前文理论分析结果，设计并制造原理样机如图 12 所示，在该样机上进行了试验，试验参数为：电机转速 350 r/min，进给速度为 10 mm/s，在该参数下进行轧尖试验，并在后续对试验结果进行分析。



Figure 12. Schematic diagram of automatic pointing equipment structure
图 12. 自动轧尖设备结构示意图

6. 试验及结果分析

6.1. 轧尖成型参数模型验证

以直径为 $\varphi 12$ mm, 厚度为 $t = 1.58$ mm 铜管为研究对象, 对轧尖的强度进行核算, 通过, 查阅相关资料可知, 铜的抗拉强度在 200~300 Mpa 之间, 若通过塑性变形后, 抗拉强度可达 350 Mpa, 由于整体的区间范围较大, 以及工厂轧尖成型方式较为特殊, 文献上没有相应的数据支撑, 因此, 需要通过试验来确定当前轧尖状态下的抗拉强度, 通过自动拉伸设备拉力传感器的数据记录可知, 直径为 $\varphi 12$ mm, 厚度为 $t = 1.58$ mm 的铜管在拉伸过程中最大拉力约为 3600 N。在拉伸过程中, 需要经过多次往复拉伸, 会使得轧尖段存在一定的疲劳磨损, 除此之外, 在径向锻造缩径轧尖过程中, 也会出现一定的应力集中, 为了保证在拉伸过程中轧尖部分不会被拉断, 安全系数 k 取 1.2, 因此, 锻造缩径轧尖的最小抗拉力不低于 4500 N, 选择直径为 $\varphi 12$ mm, 厚度为 $t = 1.58$ mm 的铜管, 轧尖直径为 4.8 mm 进行拉力试验, 拉力测试试验以及试验结果如图 13。



Figure 13. Tension testing diagram

图 13. 拉力测试图

通过对 3 根铜管进行拉力试验, 拉断力的范围在 5600~5800 N 之间, 因此, 根据公式(14)可知, 该状态下铜的抗拉强度约为 310 Mpa,

$$\delta = \frac{5600}{3.14 \times 2.4 \times 2.4} \approx 310 \text{ Mpa}$$

因此, 在不拉断的情况下, 轧尖的最小直径 D_{\min} 为:

$$D_{\min} = 2 \times \sqrt{\frac{4500}{3.14 \times 310}} \approx 4.298 \text{ mm}$$

因此要想实现轧尖段强度满足要求, 轧尖段的直线段直径应大于轧尖的最小直径 $D_{\min} \approx 4.298$ mm, 设计模具的锥角为 14.5° , 即 $\alpha = 7.25^\circ$, 轧尖长度为 $l = 60$ mm, 轧尖直线段的直径为 4.4, 即 $d = 2.2$, 对模具设计进行复核。由以上数据可得 $D = 0.42$, $\tan \alpha = 0.127$ 。将上述参数带入(13)式可得。

$$l_1 + l_2 = \frac{10.42 \times 60 \times 1.58}{2.3^2} - \frac{\left(\left[\left(2.2^2 + \frac{10.42^2}{4} + \frac{2.2 \times 10.42}{2} \right) \left(1 - \frac{\sqrt[3]{10.42 \times 1.58^2 - 2.2}}{6 - 2.2} \right) - \left(\frac{8.84}{2} \right)^2 \right] + 3 \times 2.2^2 \right) \times (10.42 - 2.2)}{6 \times 2.2^2 \times 0.127}$$

$$= 137.88 \text{ mm} \geq 115 \text{ mm}$$

准备直径为 $\phi 12 \text{ mm}$ ，厚度为 $t = 1.58 \text{ mm}$ 铜管，模具的锥角为 14.5° ，即 $\alpha = 7.25^\circ$ ，轧尖长度为 $l = 60 \text{ mm}$ ，轧尖直线段的直径为 4.4 ，即 $d = 2.2$ ，模具采用四瓣式，进行轧尖，模具如图 14 所示。



Figure 14. Schematic diagram of pointing die
图 14. 轧尖模具示意图

试验结果：通过试验，轧尖成型长度为 126.83 mm ，如图 15 所示，与理论计算值 137.88 mm 误差约为 8% ，通过对误差分析，误差主要来源于不循环小数简化的积累、数值的近似计算，当前误差能够满足实际需求，轧尖成型模型准确。



Figure 15. Schematic diagram of actual pointing length
图 15. 实际轧尖长度示意图

通过对轧尖成型参数进行研究，得出了轧尖成型长度和强度的影响方式，并通过模具正向设计，得出模具的锥角为 14.5° ，轧尖直径为 4.4 mm 时，轧尖段满足强度和长度的设计要求，为后续模具正向设计奠定了基础。

6.2. 一致性验证验证

试验目的：由于自动拉伸设备需要实现自动夹持、自动穿模，通过试验测得，自动拉伸设备对于轧尖段的需求为整体长度大于 11.5 cm ，同心度小于 0.5 mm ，直线度小于 0.2 mm ，因此，通过试验验证轧

尖后是否满足要求。

试验内容：准备 10 根直径为 $\phi 12$ mm，厚度为 $t=1.58$ mm 铜管，通过径向锻造缩径轧尖设备进行轧尖，观察成型一致性、直线度、外观；

试验结果：轧尖后的产品的一致性，直线度，过渡段情况如下。

一致性：通过径向锻造缩径进行轧尖后铜管外观如图 16 所示，通过测量可知，金属管轧尖段的直线段长度、过渡段长度、同心度如表 1 所示，直线段、过渡段、同心度测试图如图 17，图 18 所示。



Figure 16. Schematic diagram of post-pointing appearance
图 16. 轧尖后外观示意图



Figure 17. Measurement diagram of straight section and transition section in pointing zone
图 17. 轧尖段直线段、过渡段测量示意图

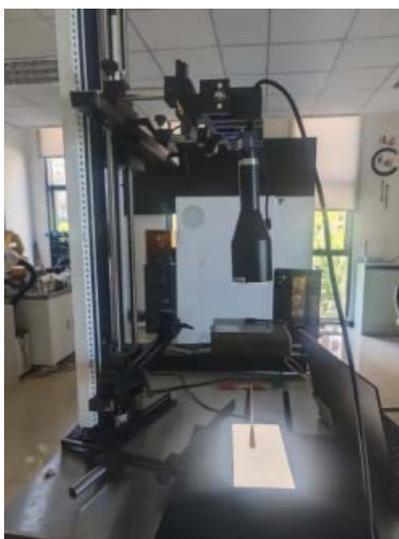


Figure 18. Concentricity measurement diagram of pointing zone
图 18. 轧尖段同心度测量示意图

Table 1. Consistency statistical table

表 1. 一致性统计表

产品参数	产品序号	直线段长度(cm)	过渡段长度(cm)	同心度(mm)	平均
直径为 $\phi 12$ mm, 厚度为 $t = 1.58$ mm 铜管	1	9.12	3.50	0.134	直线段长度标准差为 0.065, 过渡段长度 标准差为 0.004, 同心度的标准差为 0.09
	2	9.17	3.51	0.006	
	3	9.33	3.50	0.111	
	4	9.10	3.50	0.106	
	5	9.16	3.50	0.135	
	6	9.14	3.51	0.118	
	7	9.18	3.50	0.085	
	8	9.22	3.50	0.126	
	9	9.16	3.50	0.032	
	10	9.22	3.50	0.062	
需求标准		相加大于 11.5 cm		小于 0.5 mm	

Table 2. Straightness statistical table

表 2. 直线度统计表

产品名称	产品序号	直线度(mm)
直径为 $\phi 12$ mm, 厚度为 $t = 1.58$ mm 铜管	1	0.008
	2	0.011
	3	0.015
	4	0.010
	5	0.006
	6	0.011
	7	0.008
	8	0.007
	9	0.010
	10	0.013

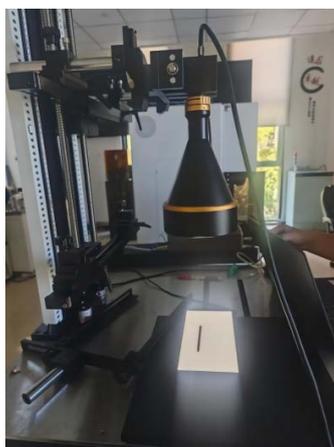


Figure 19. Straightness measurement diagram of pointing zone

图 19. 轧尖段直线度测量示意图

由于拉伸设备具有自定心机构，模具有导向口，通过自动轧尖设备轧尖后，直线段与过渡段之和大于 11.5 cm，同心度小于 0.5 mm，并且直线度、过渡段、同心度标准差都小于 0.1，产品的一致性，满足现场要求。

直线度：将上述轧尖后直线段下制，进行直线度测试，测试结果如表 2 所示，测试过程如图 19 所示。

为了使得自动穿模过程中保持稳定，需要控制轧尖后的直线度小于 0.2 mm，由测试结果可知，轧尖后直线段的直线度都在 0.1 mm 以内，直线度平直，满足要求。

外观：轧尖后过渡段与直线段通过圆角过渡，表面光滑无毛刺、飞边，如图 20 所示。



Figure 20. Schematic diagram of pointing zone appearance
图 20. 轧尖段外观示意图

7. 结论

本文针对当前滚压成型轧尖存在的不足，通过对比各类轧尖成型方式，确定了径向锻造缩径轧尖成型方式，开发了径向锻造缩径轧尖设备，降低了劳动强度，并建立了成型工艺参数模型，确立了轧尖成型长度和轧尖成型强度之间的关系，显著的降低了开发周期，提升了轧尖的一致性，显著的提升了索类产生的生产效率，为后续自动拉伸的实现奠定了基础。

参考文献

- [1] 运新兵. 金属塑性成形原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- [2] 马济民, 等. 钛铸锭和锻造[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- [3] 张琦, 母东, 靳凯强, 等. 旋转锻造成形技术研究现状[J]. 锻压技术, 2015, 40(1): 1-6.
- [4] 王同海. 管材塑性加工技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [5] 许泽川. 微小型薄壁内沟槽管缩径机理研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [6] 王旭. 微小型铜管旋转模压缩径工艺研究及设备开发[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [7] 黄金龙, 曾志新, 陈举聪, 等. 微小型轴向内沟槽铜管缩径缺陷实验研究[J]. 材料科学与工艺, 2012, 20(4): 116-120, 127.
- [8] 王旭. 微小型铜管旋转模压缩径工艺研究及设备开发[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2021.