

# 变径铝合金无缝管挤压工艺研究

荆云海<sup>1\*</sup>, 王 旭<sup>1</sup>, 李正利<sup>1</sup>, 郭永安<sup>1</sup>, 唐 琪<sup>2</sup>, 牟耀龙<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国重型机械研究院股份公司, 陕西 西安

<sup>2</sup>西北铝业有限责任公司, 甘肃 陇西

收稿日期: 2025年11月19日; 录用日期: 2025年12月12日; 发布日期: 2025年12月23日

## 摘 要

论述了铝合金外变径、内变径和复合变径挤压的变形机理和运动过程。针对外变径和复合变径时, 穿孔针容易出现断裂现象, 通过Abaqus仿真模拟计算穿孔针和模具的受力情况, 优化工模具参数和结构, 穿孔针的选材采用3Cr2W8Vi等重载模具钢。同时, 通过控制模型, 实现了穿孔针的精确液压定针和准确变位功能, 解决了铝合金变径管的应用和生产过程中的难题。

## 关键词

铝合金无缝变径管, 液压定针, 穿孔针变位

# Research on Extrusion Process of Variable Diameter Aluminum Alloy Seamless Tube

Yunhai Jing<sup>1\*</sup>, Xu Wang<sup>1</sup>, Zhengli Li<sup>1</sup>, Yong'an Guo<sup>1</sup>, Qi Tang<sup>2</sup>, Yaolong Mu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>China Heavy Machinery Research Institute Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Northwest Aluminum Co., Ltd., Longxi Gansu

Received: November 19, 2025; accepted: December 12, 2025; published: December 23, 2025

## Abstract

The deformation mechanism and motion process of extrusion of aluminum alloy tubes with external diameter change, internal diameter change and composite diameter change are discussed. In view the fact that the punching needle is easy to break when the external diameter and composite diameter change, the force of the punching needle and the mold is calculated by Abaqus simulation and the process parameters and structure of the mold are optimized. The selection of materials for punching needle adopts heavy load die steel such as 3Cr2W8Vi. At the same time, the precise hydraulic

\*第一作者。

文章引用: 荆云海, 王旭, 李正利, 郭永安, 唐琪, 牟耀龙. 变径铝合金无缝管挤压工艺研究[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(6): 749-758. DOI: 10.12677/met.2025.146078

locating and accurate shifting function of the punching needle are realized by controlling the model, and the difficult problems in the application and production process of aluminum alloy changing tubes are solved.

## Keywords

Aluminum-Bonded Seamless Gold Reducer, Hydraulic Needle Fixing, Perforated Needle Displacement

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. 前言

在生活中, 无缝铝合金管应用非常广泛, 如: 对管道密度及强度有严格要求的空调管、油管、高压水管等。生产无缝铝合金管对加工设备有着极高的要求, 一般只有双动挤压机才能生产出无缝铝合金管。

在工程上, 铝合金无缝管因其轻便、耐腐蚀、比强度高优点, 在石油、天然气的输送管道方面, 有很大的优势。石油钻杆方面, 和钢钻杆相比, 铝合金钻杆表现出了更好的优势, 如: 无磁性, 不易磨损套管等; 湿重减少 50%, 干重减少 40%, 提高开采中的钻深能力; 优越的水平定向钻进性能, 更适合定向井和大水平位移井, 减少拖拽力; 减少 20%~30%的扭矩和阻力, 且水力损失更小, 大幅度减少开采成本; 可以有效防止硫化氢和二氧化碳腐蚀, 提高操作安全性能。近年来, 铝合金无缝管的应用大幅提高[1]。

但这些管路往往有一些特殊需求, 如: 石油管、钻杆, 要求管材局部壁厚增加, 用于加工螺纹, 即局部减小内径或扩大外径, 增加壁厚。这种需求日益广泛, 但受技术条件限制, 仍难以批量生产。

## 2. 铝合金无缝变径管的应用

对于油气输送管路, 如图 1 所示, 两节管路的连接一般采用螺纹连接, 管子两端加工成一段外螺纹, 通过套管将两节管子相连[2]。但是, 加工螺纹会降低管子的承载能力, 为了不缩小管道通径, 又能得到等强度管道, 一般采用管端加厚, 即内径不变增加外径, 通过壁厚增加来抵消加工螺纹时产生的强度降低。这就是外变径管的应用之一。



Figure 1. Variable diameter pipe

图 1. 外变径管

对于钻杆, 如图 2 所示, 要求外径不变, 管端加工内螺纹, 两节钻杆通过连接杆来连接[2], 为了降低钻杆强度, 管道两端管壁局部要加厚, 即内径要减小。这就是内变径管的应用。

铝合金无缝变径管一般分为三种: 第一种: 内变径, 即外径不变, 管子两端局部内径减小, 壁厚增加; 第二种: 外变径, 即内径保持不变, 管子两端局部外径增大, 壁厚增加; 第三种: 复合变径, 以上两种情况的结合, 管子两端, 一端内变径, 另一端外变径。



Figure 2. Concentric reducing pipe  
图 2. 内变径管

### 3. 铝合金无缝变径管的变形机理及运行过程

对于内变径管，挤压相对简单一些，如图 3 所示，组合穿孔针带有 2 个工作带，前端的是小直径的工作带 1，后端的是大直径的工作带 2，模具为单工作带模具。其工作原理是：穿孔针工作带 1 进入模具工作带，定针挤压，达到合适长度后，穿孔针变位，工作带 2 进入模具工作带，定针挤压，变径，待到合适长度后，穿孔针再次变位，工作带 1 进入模具工作带，定针挤压，再次变径，如此完成内变径管挤压。得到一根外径一致，内径两端小中间大的变径管。内变径不同直径之间的过渡带，应尽量平滑，避免管道表面出现明显的竹节状缺陷。

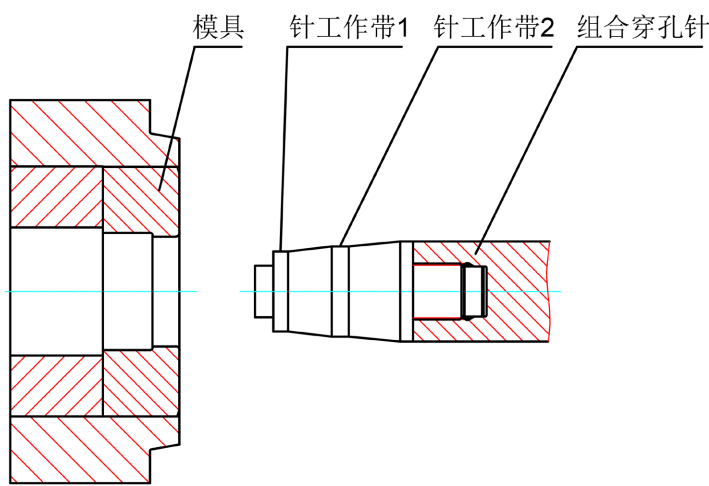


Figure 3. Punching die for tubes with changing inner diameter  
图 3. 内变径管挤压模具

外变径挤压如图 4 所示，外变径挤压模具采用双工作带模具，小内径工作带 1，大内径工作带 2，两个工作带之间是过渡形腔；组合穿孔针一般采用双工作带形状，前端是大直径工作带 1，往里是小直径的工作带 2。其工作原理是：第一步，穿孔针工作带 1 进入模具工作带 1，挤压出小外径管材；第二步，穿孔针变位，工作带 1 进入模具工作带 2，穿孔针工作带 2 进入模具工作带 1，此时，由模具工作带 1 和穿孔针工作带 2 组成的环形面积大于由模具工作带 2 和穿孔针工作带 1 组成的环形面积，铝合金最终在由模具工作带 2 和穿孔针工作带 1 组成的环形面积处成型，挤压出内径不变外径增大的管材，完成外变径。

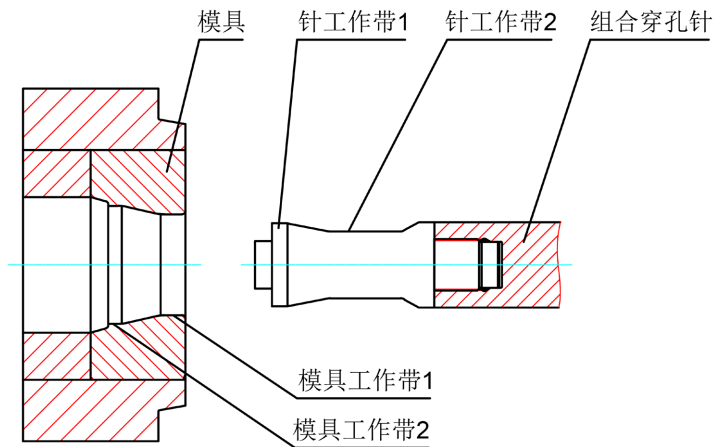


Figure 4. Extrusion die with external variable diameter  
图 4. 外变径挤压模具

复合变径变形机理和过程是内、外两种变径的复合，在同一根管子上实现内变径和外变径。如图 5 所示，复合变径挤压模具也采用双工作带模具，小内径工作带 1，大内径工作带 2，两个工作带之间是过渡形腔；穿孔针一般采用纺锤装多工作带形状，前端是小直径工作带 1，再往里是大直径工作带 2，再往里是更小直径的工作带 3。其工作原理是：第一步，穿孔针工作带 1 进入模具工作带 1，挤压出小外径小内径管材；第二步，穿孔针变位到工作带 2 进入模具工作带 1，挤压出内变径管，外径不变内径增大；第三步，穿孔针继续变位到工作带 2 进入模具工作带 2，穿孔针工作带 3 进入模具工作带 1，此时，由模具工作带 1 和穿孔针工作带 3 组成的环形面积大于由模具工作带 2 和穿孔针工作带 2 组成的环形面积，铝合金最终在由模具工作带 2 和穿孔针工作带 2 组成的环形面积处成型，挤压出内径不变外径增大的管材，完成外变径。

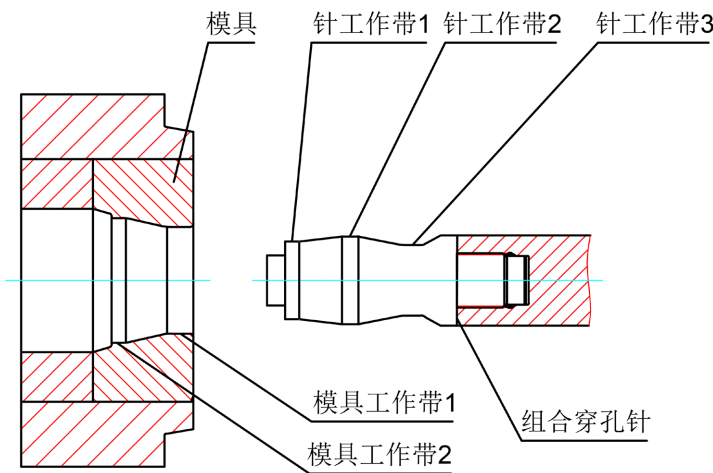


Figure 5. Composite variable diameter extrusion mold  
图 5. 复合变径挤压模具

## 4. 铝合金变径管生产中的关键技术

### 4.1. 穿孔针的定针和变位

生产变径管，穿孔针必须具备变位功能，即穿孔针在挤压时具备变换位置的能力；同时挤压过程中

穿孔针必须具备液压定针功能，即挤压过程中穿孔针相对模具不可窜动。

这就要求挤压机必须是双动挤压机，即挤压杆和穿孔针可以单独运动；而且，穿孔针必须具备准确定位和准确变位功能[3]。根据笔者对西北铝 36 MN、55 MN 双动挤压机、东轻 25 MN 双动挤压机、核兴航材 18 MN 等多台双动挤压机的调试和试生产经验，液压定针精度应达 $\pm 0.5$  mm，如果定针精度不达标，挤出的管子内外表面会出现环纹，严重影响外观质量。穿孔针变位精度对管子的内外径尺寸都有影响，变位精度不足时容易出现如图 6 所示的竹节状缺陷，根据笔者对西北铝 45 MN 挤压机变径管挤压的观察，变位精度应达 $\pm 1$  mm。



Figure 6. Bamboo-like defects  
图 6. 竹节状缺陷

目前，可以生产此类挤压机的厂家并不多，进口的有德国西马克等少数品牌，国产的有中国重型院等少数品牌。此类挤压机的机械结构、液压系统、电气控制系统相对复杂，设备比较昂贵。

#### 4.2. 挤压工模具的优化

目前，变径管挤压工模具，特别是外变径和复合变径工模具，业内缺少设计经验和参考资料，需要研发试验。

铝合金无缝管挤压过程中，穿孔针的受力如图 7，可以简化为：穿孔缸的作用力  $F$ ，台阶处铝合金反作用力  $P$ ，模口处的摩擦力  $f_1$ ，流动区的摩擦力  $f_2$ ，静态区的摩擦力  $f_3$ 。固定针挤压时，穿孔针受力平衡，则  $F_{总} = F + P - f_1 - f_2 - f_3 = 0$ 。

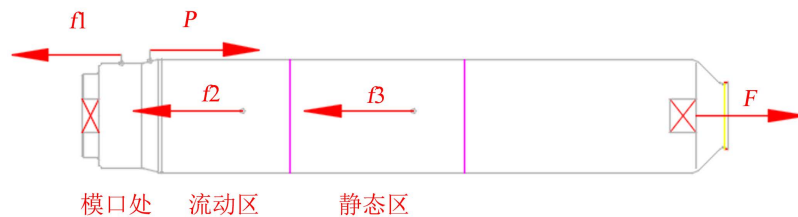
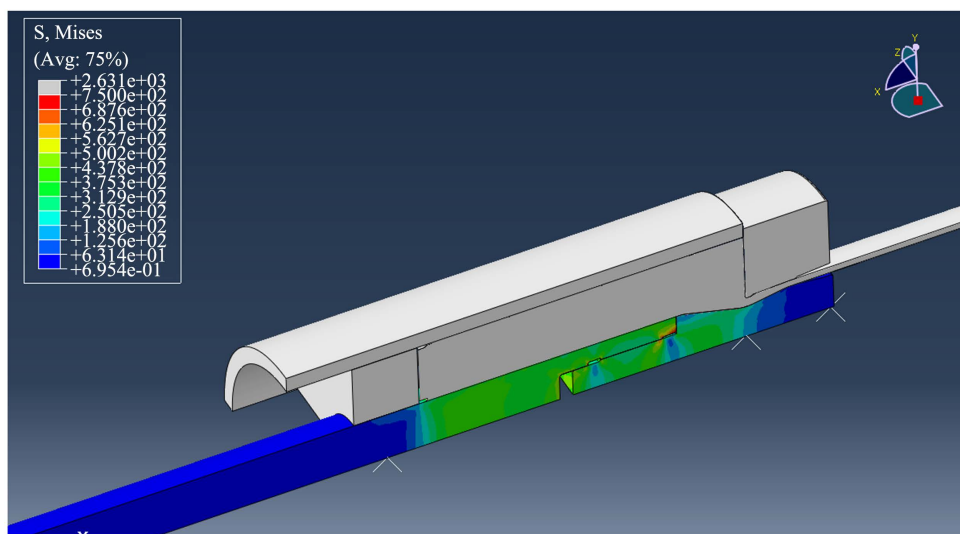


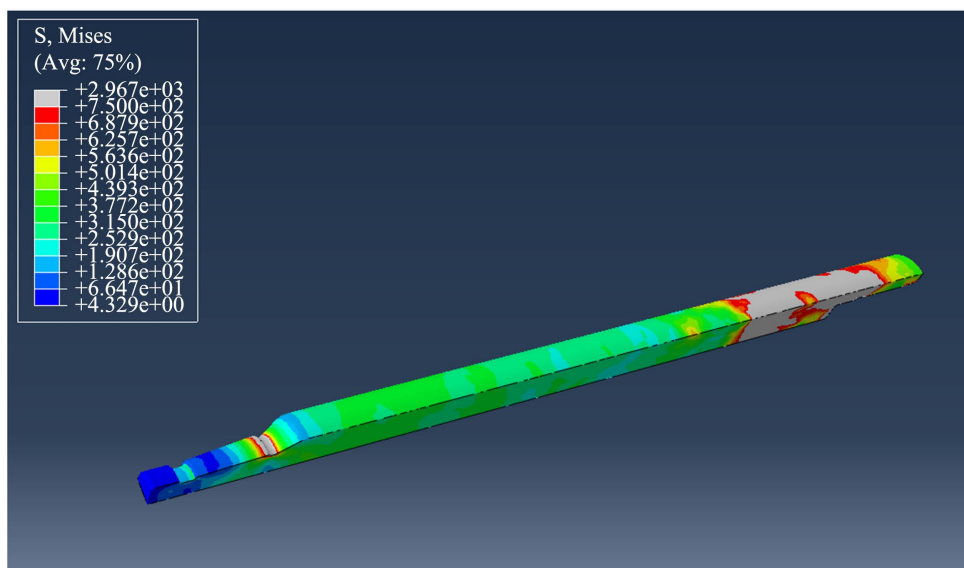
Figure 7. Stress analysis diagram of piercing needle  
图 7. 穿孔针受力分析图

挤压前期穿孔针摩擦力  $f_1 + f_2 + f_3$  大于  $P$ ，则， $F$  表现为拉力；随着坯锭长度减小摩擦力  $f_2 + f_3$  不断降低，阻力  $P$  变化不大，有可能出现  $f_1 + f_2 + f_3$  小于  $P$ ， $F$  有可能变为推力[2]。实际挤压过程中挤压力会发生变化，力的变化会更复杂。针的控制难度很大，主要原因在于以上的各个力不仅随挤压进程变化，而且随挤压制品规格变化而变化。坯锭的加热温度、材质等因素也可造成不同程度的影响[3]。

针向后变位时,要产生加速度,再叠加以上摩擦力,拔针力会很大,穿孔针容易出现断裂现象[4]。解决这一难题,主要取决于工模具设计和选材。通过 Abaqus 模拟仿真可以全过程模拟和计算穿孔针和模具的受力情况,找出工模具的应力集中点和高应力部位,优化工模具的结构,加强高应力处的强度设计,减小应力集中。如图 8~10 所示,为优化前,穿孔针第一次向后变位时,针体和针尖上的应力,此应力为挤压过程中针体和针尖上所受的最大应力,局部综合应力已经达到 2900 MPa,显然超出了工具钢的承受范围。根据计算结果,我们对挤压比、针体直径等挤压参数进行了优化,对模具、针尖、针体应力集中点进行了结构优化,经过多次优化,结果如图 11~13 所示,针尖、针体上的最大综合应力大幅下降,但去掉边缘部分网格畸变引起的应力集中后,针上的最大应力仍然超过了 750 MPa,常规的 H13 可以使用,但寿命欠佳,改成 3Cr2W8Vi 重载模具钢效果较好[5]。

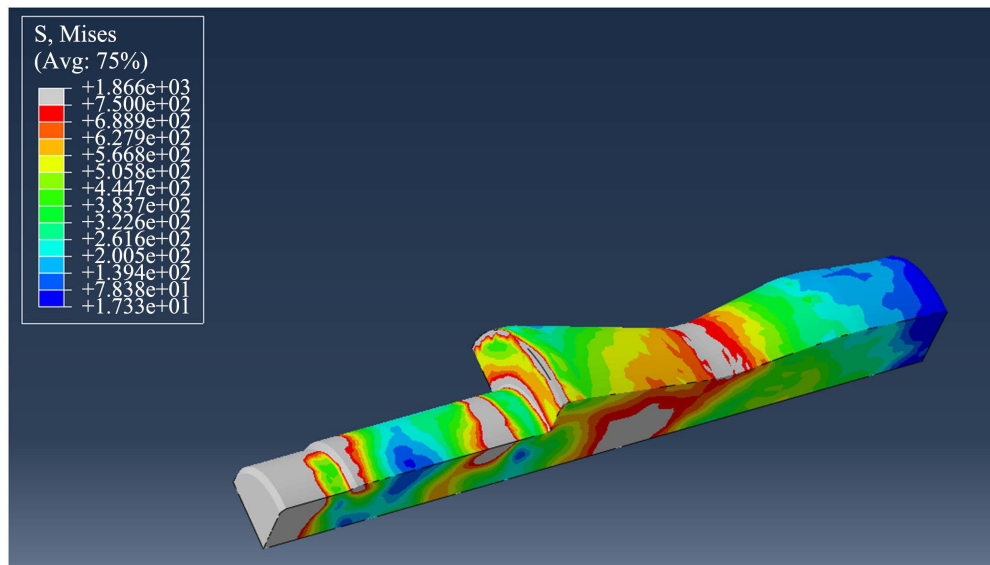


**Figure 8.** Stress in the needle and needle tip 1 s after the start of backward displacement of the punching needle  
**图 8.** 穿孔针向后变位开始后 1 s 时针和针尖的应力



**Figure 9.** Stress in the body of the punch when backward deflection begins after 1 s  
**图 9.** 穿孔针向后变位开始后 1 s 时针体的应力

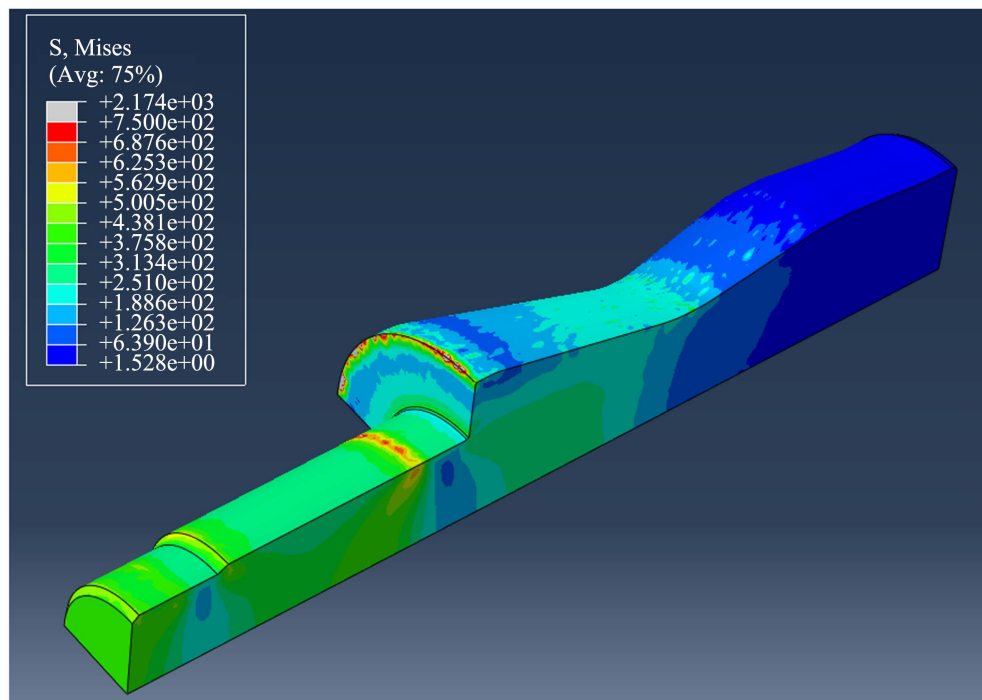




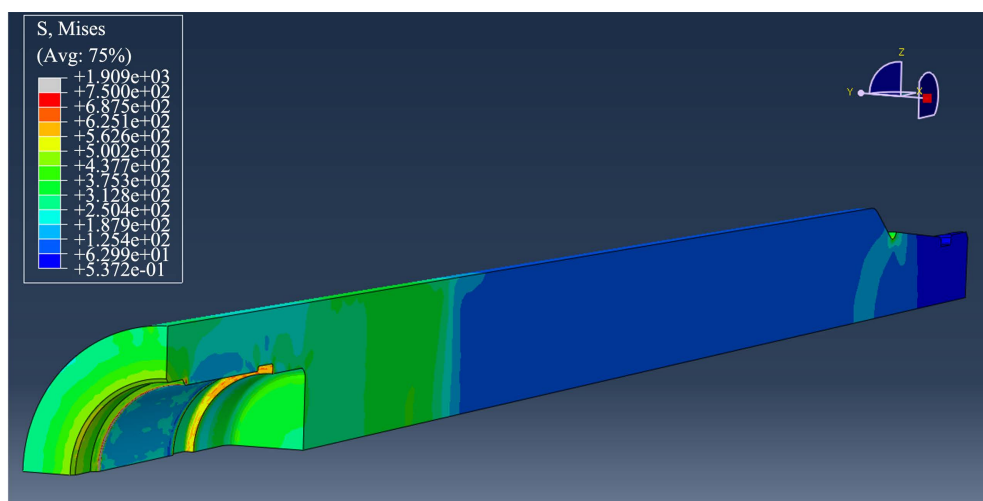
**Figure 10.** Stress at the tip of the punch at the start of the backward displacement of the punch 1 s after the start of the perform  
**图 10.** 穿孔针向后变位开始后 1 s 时针尖的应力



**Figure 11.** Stress in the needle and needle tip 1 s after the start of backward displacement of the optimized perforator  
**图 11.** 优化后穿孔针向后变位开始后 1 s 时针和针尖的应力



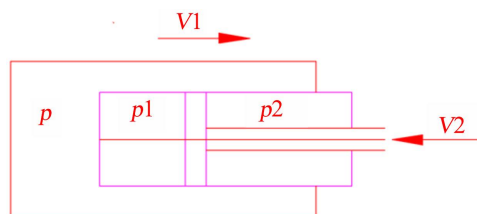
**Figure 12.** Stress at the tip of the perforated needle 1 s after the start of backward displacement after optimization  
**图 12.** 优化后穿孔针向后变位开始后 1 s 时针尖的应力



**Figure 13.** Stress in the needle body when the backward deflection of the perforated needle begins 1 s after the optimization  
**图 13.** 优化后穿孔针向后变位开始后 1 s 时针体的应力

#### 4.3. 液压定针和变位的控制模型

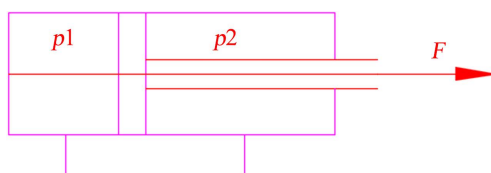
常规的液压定针模型为速度 PID 跟随模型，如图 14，固定针挤压的核心是  $V1 + V2 = 0$ ，其中  $V1$  是主柱塞速度(挤压速度)， $V2$  是穿孔缸回退速度。当  $V1 + V2 = 0$ ，穿孔针相对于模具是固定不动的。



**Figure 14.** Analysis of the fixed pin velocity  
**图 14.** 固定针速度分析图

此模型的缺陷在于，未考虑穿孔针的受力变化，当所需要的穿孔缸作用力由拉力变为推力时，穿孔缸大腔建压需要时间，会造成穿孔针位移过大，控制失败。

中国重型院提出的模型，在上述控制模型的基础上，引入了压力控制模型，如图 15， $F = p2 * A2 - p1 * A1$ ，预先给定一个  $p1$ ，使得  $p1 * A1 > P$ ，则



**Figure 15.** Punch pressure analysis chart  
**图 15.** 穿孔缸压力分析图

$$F_{\text{总}} = (p2 * A2 - p1 * A1) + P - f1 - f2 + f3 = p2 * A2 - (p1 * A1 - P) - f1 - f2 + f3。$$

若  $F_{\text{总}} = 0$ ，则  $p2 * A2 = (p1 * A1 - P) + f1 + f2 + f3 > 0$ ，即穿孔缸小腔压力恒大于零，不存在切换问题。



基于以上数学原理，可以建立以下压力速度双控制模型，如图 16，采用此数学模型，定针和变位情况如下：

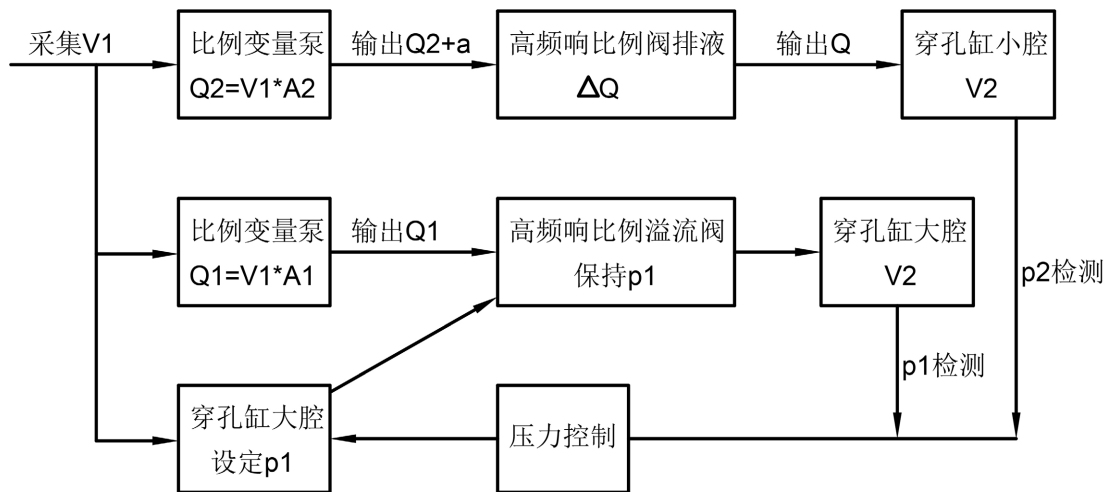


Figure 16. Dual control model of pressure and speed

图 16. 压力速度双控制模型

#### 1) 液压定针

挤压过程中，穿孔缸大腔保持设定压力不变，比例泵输送给穿孔缸小腔一个稍大于保持速度  $V_2$  的流量，通过比例阀排液保证穿孔缸的速度，使其保持和挤压速度  $V_1$  保持一致。同时实时检测穿孔缸两腔压力，根据压力变化可以调整设定压力  $p_1$ 。

#### 2) 变位

向后变位，增大小腔进液量，从而增大穿孔针回退速度；压力上  $p_1$  保持不变， $p_2$  增大。停止变位时，减小小腔进液量即可；在压力上  $p_1$  保持不变， $p_2$  回落。

向前变位，减小小腔进液量，从而减小穿孔针回退速度；在压力上  $p_1$  保持不变， $p_2$  减小。停止变位时，增大大腔溢流量，增大小腔进液量即可；在压力上  $p_1$  保持不变， $p_2$  增大。

本模型的优点：

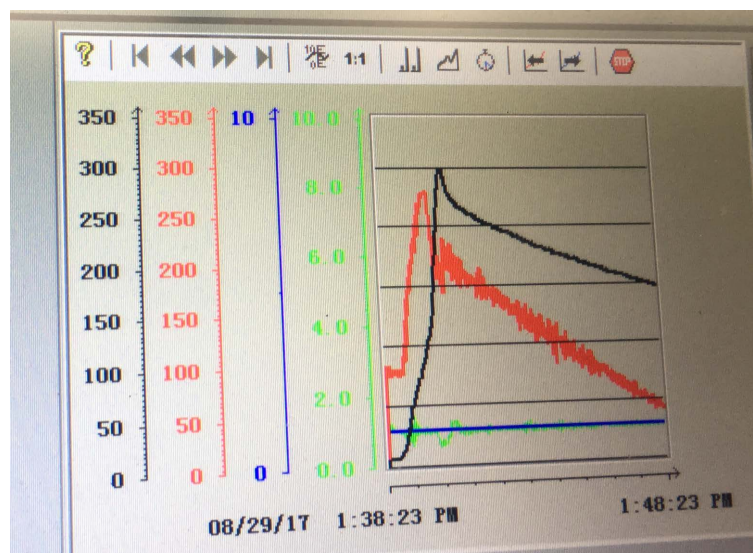
1) 挤压过程中，穿孔缸两腔一直处于正压状态，小腔处于受控进液，大腔处于压力受控，无进排液切换，全程受控。

2) 精度高，定针精度  $\pm 0.1 \text{ mm}$ ，变位精度  $\pm 1 \text{ mm}$ 。

3) 对针规格和挤压材质变化不敏感。

### 4.4. 工程实例

如图 17 所示，为西北铝 55 MN 双动挤压机固定针挤压管子时实测数据，其中，黑色曲线为挤压机主缸实时工作压强，红色曲线为穿孔缸小腔实时压强，绿色的为穿孔缸大腔压强。需要注意穿孔缸大腔的面积是小腔的 2 倍，对应的大腔力需要放大 2 倍。可见：挤压前期，穿孔缸小腔力大于穿孔缸大腔力，表现为拔针力，拔针力在挤压突破前达到最大，之后逐渐减小，到一定时间点，穿孔缸小腔力可能等于穿孔缸大腔力，拔针力为 0，之后穿孔缸大腔力大于穿孔缸小腔力，表现为推针力；整个挤压过程中，穿孔缸小腔压力恒大于零，穿孔缸大腔的压力基本保持恒定，大于零。通过此模型控制，经测定该挤压机定针挤压时，穿孔针定针精度可达  $\pm 0.5 \text{ mm}$ 。



**Figure 17.** Hydraulic pin pressure detection diagram of 55 MN extrusion machine of Northwest Aluminum Co., Ltd.  
**图 17.** 西北铝 55 MN 挤压机液压定针压强检测图

## 5. 结束语

铝合金变径管挤压的设想是由德国一家企业首先提出的，2023 年国内进行了实际生产试验，内变径取得了一定的成功，外变径和复合变径连续损坏工模具，无法正常生产。

国内挤压机相关企业如中国重型机械研究院也开展了研究，研发进度几乎和国外同步。中国重型机械研究院投入了大量的人力和科研经费，在铝合金变径管挤压方面已经取得了一定的成绩，已经完成了技术研发和实验室验证，正在积极推广产业化生产，相信很快这一技术将走进中国的挤压生产厂。

## 参考文献

- [1] 冯春, 杨尚谕. 铝合金钻杆的特点及发展应用[J]. 石油管材与仪器, 2017(4): 1-7.
- [2] 郑伟龙. 变径管形体热挤压成形工艺的研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2013.
- [3] 魏军. 金属挤压机[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [4] 刘静安, 谢水生. 铝合金材料的应用与技术开发[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [5] 汪大年. 金属塑性成形原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.