

方管铝型材速度闭环控制等温挤压系统数值模拟

杨志高¹, 班米扁², 卢 聪¹

¹南宁富联富桂精密工业有限公司, 广西 南宁

²百色市重大项目服务中心, 广西 百色

收稿日期: 2025年1月15日; 录用日期: 2025年2月8日; 发布日期: 2025年2月17日

摘 要

基于PID算法对闭环控制系统的挤压过程进行模拟, 获得方管铝型材挤压速度和铝型材出模口温度控制系统的传递函数: $F_1(s) = \frac{410.142}{s - 0.039}$ 以及挤压力与挤压速度控制系统的传递函数: $F_2(s) = \frac{176.183}{s - 0.203}$, 根据这两个传递函数设计的串级闭环控制系统, 仿真模拟的铝型材出模口前后温差为6℃, 符合等温挤压工艺要求。

关键词

铝, 等温挤压, 数值模拟

Numerical Simulation of Speed Closed-Loop Control Isothermal Extrusion System for Aluminum Alloy Square Tube

Zhigao Yang¹, Mibian Ban², Cong Lu¹

¹Nanning Fulian Fugui Precision Industrial Co., Ltd., Nanning Guangxi

²Baise Major Project Service Center, Baise Guangxi

Received: Jan. 15th, 2025; accepted: Feb. 8th, 2025; published: Feb. 17th, 2025

Abstract

Basing on PID algorithm, closed-loop control system applying to isothermal extrusion process was simulated. The transfer function describing correlation of extrusion speed and temperature for

control system of square aluminum tube was obtained as followed: $F_1(s) = \frac{410.142}{s - 0.039}$ The transfer function describing correlation of extrusion pressure and extrusion speed was obtained as followed: $F_2(s) = \frac{176.183}{s - 0.203}$. Through the closed-loop control system designed according to the two transfer functions, 6°C variation on die exit could be obtained during the simulation, which met the requirements of isothermal extrusion process.

Keywords

Aluminum, Isothermal Extrusion, Numerical Simulation

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

普通铝合金热挤压生产中，材料温度、变形出现分布不均匀的情况，容易造成挤压件尺寸、形状、组织、性能等存在缺陷。铝合金等温挤压技术，能够减少甚至消除这种缺陷和不足，生产出来的产品具有表里温度均匀、变形均匀、流线合理、组织性能优异等特点[1]。以方管铝型材为研究对象，基于 PID 算法对闭环系统控制法等温挤压工艺进行研究，将挤压参数热力耦合模拟仿真和闭环控制系统相互组合，建立了挤压力 - 挤压速度 - 出模口温度的闭环控制等温挤压系统，预期实现等温挤压模拟过程。速度闭环控制等温挤压系统的仿真模拟研究，能够对未来先进的挤压自动化控制系统提供理论参考，以便对挤压设备进行改造升级[2]。

2. PID 控制算法

PID 控制是比例积分微分控制的简称，在实际生产过程控制的发展历程中，PID 控制是历史最悠久、应用范围最广和生命力最顽强的基本控制方式[3]-[5]。本文在方管铝型材速度闭环等温挤压系统仿真研究中，选择 PID 作为控制系统仿真模拟的控制算法。PID 控制算法，如图 1 所示。

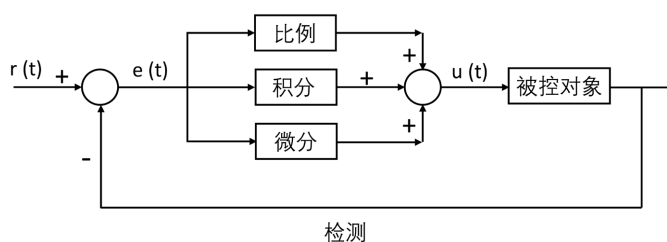


Figure 1. PID control algorithms

图 1. PID 控制算法

3. 速度闭环等温挤压系统仿真

3.1. 控制系统设计

等温挤压闭环控制系统一般由控制器、传感器、变送器、执行器、输入接口以及输出接口等几个部

分组成。控制系统的被控量是铝型材出模口的温度，经过传感器的测量，通过变送器将温度信息转换为可读信号，再经过输入接口传输到控制器。控制器比较被控量与给定量的偏差，根据 PID 控制算法进行调整输出，经过输出接口传输到执行器，进而作用到被控对象挤压速度，达到调节作用，以获得铝型材出模口温度的稳定，达到等温挤压工艺的要求，如图 2 所示。

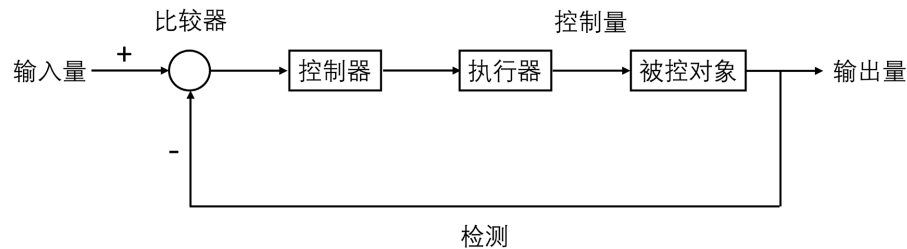


Figure 2. Closed-loop control system
图 2. 闭环控制系统

3.2. 数据收集分析

等温挤压闭环控制的过程就是依靠检测铝型材出模口温度的变化，通过 PID 控制算法的处理，进而调节挤压速度，控制铝型材出模口的温度基本恒定，实现等温挤压工艺。以方管铝型材为研究对象，通过图 3 模拟的方管铝型材不同挤压速度的出模口温度变化规律[6]，以此作为系统设计的参数，并建立相关数学模型。

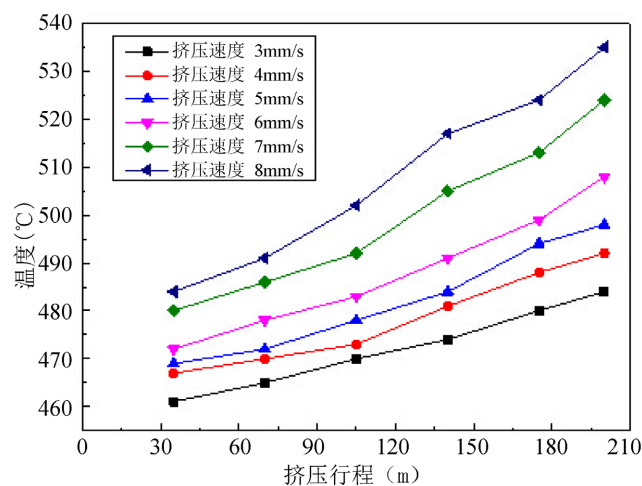


Figure 3. Profile outlet temperature of 3~8 mm/s extrusion speed
图 3. 3~8 mm/s 挤压速度的型材出模口温度

由于实际的挤压自动化系统是一个复杂且技术要求非常高的控制系统，要想真正高精度仿真模拟整个自动化过程是非常困难的，故本文作控制系统的简化处理，只对挤压过程的基本挤压阶段进行研究。在挤压过程的基本挤压阶段挤压速度与铝型材出模口温度呈近似线性相关[7]，从而对方管铝型材速度闭环控制等温挤压系统进行仿真模拟。选择了 5 mm/s 作为初始挤压速度，以[3 mm/s, 5 mm/s]作为挤压速度区间。同时，挤压过程中方管铝型材出模口的温度变化区间取等速 5 mm/s 挤压和等速 3 mm/s 挤压的温度变化区间的并集[461°C, 498°C]。此外，其他工艺参数挤压坯料、挤压模具、挤压垫片和挤压筒的预热温度仍然是 450°C、440°C、430°C 和 420°C。

3.3. 单回路闭环系统

在铝型材挤压过程中，挤压速度是铝型材出模口温度的重要影响因素。首先，对挤压速度和铝型材出模口温度的关系进行建模仿真，以挤压速度作为输入值，铝型材出模口温度作为输出值，挤压速度区间[3 mm/s, 5 mm/s]对应的铝型材出模口温度区间[461℃, 498℃]。通过实验建模的方法，它们的数学模型可选择为一阶系统[8]：

$$y = a \cdot \exp(-b \cdot x) \quad (1)$$

式中： y 是出模口温度，单位为℃； x 是挤压速度，单位为 mm/s； a 、 b 为系数。

其次，经过仿真计算，获得上述一阶系统的两个系数值，它们分别 $a = 410.142$ ， $b = -0.039$ 。因此，得到方管铝型材在挤压过程中，铝型材出模口温度与挤压速度的数学模型是：

$$y_1 = 410.142 \cdot \exp(0.039 \cdot x) \quad (2)$$

接着，再通过将这个数学模型进行拉氏变换，就能够获得控制系统的传递函数是：

$$F_1(s) = \frac{410.142}{s - 0.039} \quad (3)$$

最后，基于传递函数 $F_1(s)$ ，以铝型材出模口温度区间[461℃, 498℃]的中间值 480℃作为一个预设输入量，通过测温器将实际挤压过程的出模口温度信息反馈回来，然后加入一个 PID 控制器，这就形成了一个单回路出模口温度闭环的控制系统，如图 4 所示。

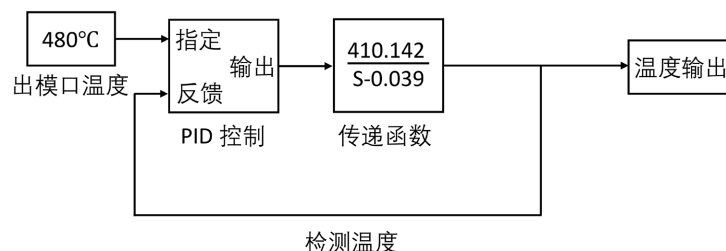


Figure 4. Die outlet temperature closed-loop control system
图 4. 出模口温度闭环控制

3.4. 双串级闭环系统

在铝型材挤压过程中，挤压速度在很大程度上决定了铝型材出模口的温度，而挤压速度通常由挤压力决定，挤压力选择了各自挤压速度在挤压过程基本挤压阶段中的平均值，即 3 mm/s、4 mm/s 和 5 mm/s 的平均挤压力分别为 324 MPa、408 MPa 和 485 MPa，即挤压力区间[324 MPa, 485 MPa]对应的挤压速度区间为[3 mm/s, 5 mm/s]。

首先，对挤压力和挤压速度之间的关系进行建模仿真，以挤压力作为输入值，将挤压速度作为输出值。挤压力和挤压速度的数学模型是：

$$y_2 = 176.183 \cdot \exp(0.203 \cdot x) \quad (4)$$

接着，再将这个数学模型进行拉氏变换，就能够获得控制系统的传递函数是：

$$F_2(s) = \frac{176.183}{s - 0.203} \quad (5)$$

然后，基于传递函数 $F_2(s)$ ，通过测速器将实际挤压过程的挤压速度信息反馈回来，加入一个 PID 控

制器，这就形成了一个挤压速度闭环的控制系统，如图 5 所示。

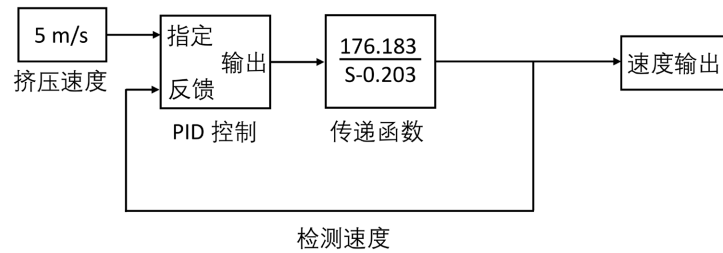


Figure 5. Extrusion speed closed-loop control system
图 5. 挤压速度闭环控制

最后，将这个挤压速度的闭环控制作为内环，与之前的单回路出模口温度闭环控制系统结合起来，形成串级闭环控制等温挤压系统，如图 6 所示。

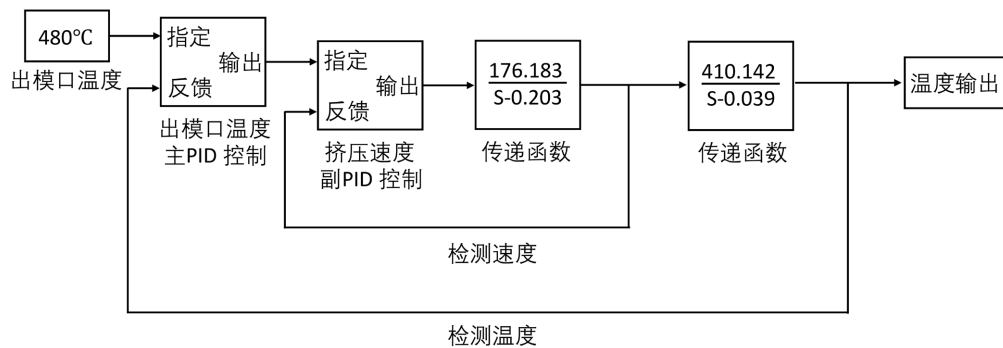


Figure 6. Double closed-loops control system of extrusion speed and temperature
图 6. 挤压速度温度双闭环控制系统

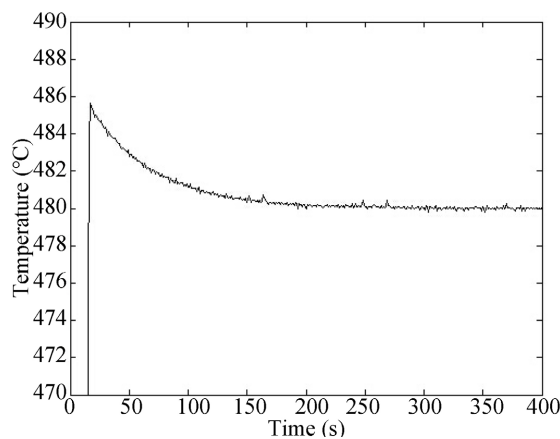


Figure 7. Aluminum die outlet temperature
图 7. 铝型材出模口温度

这是一个典型的串级闭环控制系统，其中，把铝型材出模口温度当作主要被控量，挤压速度当作次要被控量，这个串级控制系统在结构上构成了两个闭环。挤压速度控制部分是内环，其 PID 控制器为副调节器；铝型材出模口温度控制部分是外环，其 PID 控制器为主调节器。通过双串级闭环控制使被控量铝型材出模口温度满足等温挤压工艺要求。外环回路是常数控制，它的调节器是主 PID 调节器，拥有自

己独立的预设值 480°C ，它输出的挤压速度是内环副 PID 调节器的预设值，而副调节器输出的信号则会传输给调节阀去调节控制挤压力，进而调节挤压速度，最后保证铝型材出模口的温度稳定，符合等温挤压工艺要求。

在控制器参数整定实验中，首先，依靠调节主控制器的 PID 参数，来获得一个比较好的输出波形，其中，比例系数 $P_1 = 0.05$ 、积分系数 $I_1 = 0.2$ 、微分系数 $D_1 = 0$ 。接着，当主回路系统稳定后再调节副控制器的 PID 参数，其中，副控制器比例系数 $P_2 = 0.4$ 、积分系数 $I_2 = 0.3$ 、微分系数 $D_2 = 0$ 。最后，仿真模拟获得了铝型材出模口温度变化区间是 $[480^{\circ}\text{C}, 486^{\circ}\text{C}]$ ，符合等温挤压工艺要求，如图 7 所示。

为了保证较快的生产效率，挤压初期选择 5 mm/s 进行等速挤压。随着挤压不断进行，铝型材出模口温度就会不断升高，当温度高于预设值 480°C 时，串级闭环控制系统的主 PID 控制器就会开始自动调节，发出要求挤压速度减小的信号；接着通过副 PID 控制器减小挤压力的输出，来调节挤压速度变小，从而使铝型材的出模口温度保持在 480°C 上下轻微波动，实现等温挤压工艺。

4. 总结

本文分四个部分对方管铝型材的速度闭环控制等温挤压系统进行了仿真研究。

第一，介绍了控制系统的计算机仿真模拟，选择 PID 作为方管铝型材的速度闭环系统的控制算法。

第二，经过数据收集和分析，获得了方管铝型材挤压速度和出模口温度的数学模型：

$$y_1 = 410.142 \cdot \exp(0.039 \cdot x)$$

以及控制系统的传递函数：

$$F_1(s) = \frac{410.142}{s - 0.039}$$

第三，经过数据收集和分析，获得了方管铝型材挤压力和挤压速度的数学模型：

$$y_2 = 176.183 \cdot \exp(0.203 \cdot x)$$

以及控制系统的传递函数：

$$F_2(s) = \frac{176.183}{s - 0.203}$$

第四，根据传递函数，建立双串级闭环控制等温挤压系统，设定主控制器比例系数 $P_1 = 0.05$ 、积分系数 $I_1 = 0.2$ 、微分系数 $D_1 = 0$ ；副控制器的 PID 参数，比例系数 $P_2 = 0.4$ 、积分系数 $I_2 = 0.3$ 、微分系数 $D_2 = 0$ ；在此串级闭环控制系统模拟仿真中方管铝型材的出模口温度在 $[480^{\circ}\text{C}, 486^{\circ}\text{C}]$ 轻微波动，符合等温挤压工艺要求。

参考文献

- [1] 黄和奎, 李辉, 罗铭强, 等. 铝合金等温挤压技术研究及应用分析[J]. 世界有色金属, 2021(22): 150-151.
- [2] 李博. 25MN 挤压机等温挤压速度控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2019.
- [3] 司明, 胡灿, 郭伯藩, 等. PID 控制与性能评价仿真实验系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(12): 100-105+209.
- [4] 郭志庭. 基于模糊 PID 控制的智能温度控制系统研究[J]. 农机使用与维修, 2023(11): 10-14.
- [5] 易杰, 刘志文, 曾文琦. 基于 PID 算法和有限元模拟的空心铝型材分流模等温挤压速度曲线设计(英文) [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(7): 1939-1950.
- [6] 杨志高, 徐永礼, 庞祖高, 等. 基于 Deform-3D 方管铝合金型材等温挤压的变速挤压数值模拟[J]. 锻压技术, 2015, 40(4): 152-157.

- [7] 周理. 大型铝型材挤压生产线故障诊断系统的关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [8] 戴建民, 鄢仁武, 陈松岭, 等. 基于串级控制的铝型材等温挤压系统建模与仿真[J]. 热加工工艺, 2013, 42(5): 124-129.