

基于模糊 PID 温度控制的 TA1 钛合金 ECAP 工艺与试验

赵 军, 徐浩杰

(厦门理工学院 材料科学与工程学院, 福建 厦门 361024)

摘要: 针对 TA1 钛合金挤压过程中变形温度范围窄、常温下变形困难等问题, 运用热传导理论, 研究了模具传热的基本原理, 并设计了模糊 PID 算法来实现调控温度过程中 PID 控制器参数的自整定, 从而精准控制挤压过程中的温度。进行了算法响应速度和精度的模拟以及显微组织的测试、对比和分析。结果表明: 调试后, 与传统 PID 算法相比, 采用模糊 PID 算法的超调量为 8.86%, 减少了 3.97%; 调节时间为 57.56 s, 减少了 56.88 s; 稳定性误差为 0, 减少了 0.9%。试验研究表明, 模具温度变化越小, 变形后材料晶粒细化越明显, 组织分布越致密均匀。

关键词: PID 算法; TA1 钛合金; 挤压温度; 模糊控制; 超调量; 调节时间; 稳定性误差

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.10.010

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 10-0075-07

ECAP process and experiment of TA1 titanium alloy based on fuzzy PID temperature control

Zhao Jun, Xu Haojie

(School of Materials Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: Aiming at the problems of narrow range of deformation temperature and difficulty of deformation at room temperature in the extrusion process of TA1 titanium alloy, the basic principle of heat transfer in the mold was studied by applying the heat conduction theory, and a fuzzy PID algorithm was designed to realize the self-tuning of PID controller parameters in the process of regulating temperature, so as to achieve the precise control of temperature in the extrusion process. The simulation of algorithm response speed and accuracy and the test, comparison and analysis of microstructure were carried out. The results show that after debugging, compared with the traditional PID algorithm, the overshoot amount of the fuzzy PID algorithm is 8.86%, a reduction of 3.97%; the regulation time is 57.56 s, a reduction of 56.88 s; the stability error is 0, a reduction of 0.9%. The experimental study shows that the smaller the mold temperature change, the more obvious the grain refinement of the material after deformation, and the more dense and uniform the tissue distribution.

Key words: proportional-integral-derivative algorithm; TA1 titanium alloy; extrusion temperature; fuzzy control; overshooting amount; regulation time; stability error

钛及其合金具有密度低、强度高、延展性好、耐腐蚀性能突出等特点, 在航天、生物医疗等领域均有很好的应用前景^[1-3]。TA1 钛合金在室温环境中的材料硬度较高、变形阻力大, 导致其塑性变形能力差, 变形较为困难。对坯料进行适当温度的预热可以降低变形阻力, 提高塑性变形能力。然而, 由于工业纯钛受热后冷却速率快, 变形温度范围较窄^[4-6], 所以, 对加热系统的精度要求比较高。

Semiatin S L 等^[7]在低温条件下对工业纯钛进行了等通道转角挤压 (Equal Channel Angular Process-

ing, ECAP) 试验, 发现低温时参数的改变对成形的影响并不显著, 坯料表面均会发生开裂。然而, 随着温度的升高, 当温度达到 275 °C 时, 可以获得质量良好、表面光滑无裂纹的坯料。需要注意的是, 随着变形温度的进一步升高, 坯料容易因高温而发生回复现象, 影响大角度晶界的形成, 晶粒有长大趋势, 不利于晶粒细化。Du F P 等^[8]对工业纯钛经过不同温度下的 ECAP 变形后的微观组织和力学性能进行了试验探究。结果显示, 经过 1 道次变形后, 试样晶粒组织被剪切力拉长, 出现板条状孪晶。在室温和 300 °C 下, 样品的显微硬度分别提高了 30% 和 26%, 抗拉强度分别提高了 19% 和 23%。对比发现, 钛合金在室温下进行 ECAP 变形时, 其力学性能的强化效果更加明显。

收稿日期: 2024-05-27; **修订日期:** 2024-08-28

基金项目: 厦门市自然科学基金资助项目 (3502Z20227222)

作者简介: 赵 军 (1973-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师

E-mail: junzhao@xmut.edu.cn

模糊控制算法作为一种非线性控制方法,可以设置相关模糊规则,是在 PID (Proportional-Integral-Derivative) 控制器的基础上设计的能够有效解决具有时滞性问题的非线性、时变系统。1965 年, Zadeh L A^[9]首次提出了模糊集理论,该理论的提出在很大程度上解决了工程控制领域面临的一系列问题。Korkut I 等^[10]利用模糊预测相关理论搭建了数学模型,并根据模型分析结果控制加热过程,实现了对加热过程中温度变化的预测功能。夏洪永等^[11]对锻造电阻加热炉的组成及原理进行了分析,设计的温度控制算法解决了热锻过程中热量利用率低、加热不均匀、控制精度低及智能化不足等问题。Gao Z 等^[12]设计了一种具有独特模糊控制逻辑的结构,其通过相对较小的规则数据库实现了高效的控制,能够降低其在工业生产中实现的难度。Xie X L 等^[13]基于 STC89C52 单片机进行了恒温系统的软硬件设计开发,并使用 Simulink 将模糊 PID 算法与传统 PID 算法分别进行了仿真结果对比分析,通过研究结果发现,该系统能够以单片机实现恒温控制。

采用模糊 PID 控制对挤压温度进行控制,通过热传导相关理论研究了热电偶加热棒对挤压通道温度的影响,并通过 Simulink 对模糊 PID 控制进行了模拟,通过设置系统延迟函数的方式消除了温度时滞性影响,研究了模糊 PID 控制温度对 TA1 钛合金挤压组织的影响。

1 温度控制原理与方案

1.1 模具传热理论

热传导通常与物体之间的温差有关,在此过程中,热量会从温度较高的物体流向温度较低的物体,此现象通常发生于相互接触的物体之间或同一物体的不同区域之间。要获得热传导过程中物体内部温度场的数学表达式,必须利用能量守恒定律和傅里叶定律确定物体内部温度场的热传导微分方程,其一般形式如式(1)所示。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} T_{f_{x,y,z}}(T, t) \quad (1)$$

式中: ρ 和 c 分别为材料的密度和比热容; T 为材料内部任意一点的温度; t 为时间; $\rho c (\partial T / \partial t)$ 为微元体热力学能增量; λ_x 、 λ_y 、 λ_z 为各方向的热传导系数; Q 为材料内部的热源密度,即单位时间单位体积产生或消耗的热能; $f_{x,y,z}(T, t)$ 为空间维度上

温度与时间的函数; x 、 y 、 z 为三维空间方向。

1.2 PID 温度控制

控制温度需要具有测量温度的传感器,并将结果反馈至控制回路,方可实现对温度的控制。PID 控制器原理简单,易于设计,适用领域广泛。尽管 PID 控制器中的比例 (Proportional, P)、积分 (Integral, I)、微分 (Derivative, D) 作用相互补充和耦合,但各参数对控制器性能的影响程度不同,因而控制参数相对独立,参数选择相对简单,其工作原理如图 1 所示。其中, $x_i(t)$ 和 $x_o(t)$ 分别为输入信号和偏差, $e(t)$ 为偏差值, K_p 为比例系数, K_i 为积分系数, K_d 为微分系数, $u(t)$ 为 PID 控制器的输出量, $G(s)$ 为传递函数。

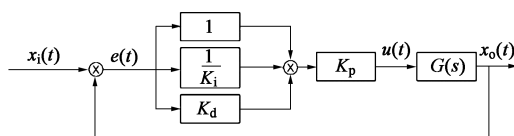


图 1 PID 算法原理图

Fig. 1 Principle diagram of PID algorithm

其中, 输入偏差 $x_o(t)$ 的表达式为:

$$x_o(t) = x_i(t) - e(t) \quad (2)$$

得到 $e(t)$ 后, PID 控制器对其进行相应的组合运算, 得到 PID 控制器的输出量 $u(t)$, 其表达式为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{K_i} \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3)$$

将式(3)进行拉普拉斯变换后, 得到其传递函数 $G(s)$ 为:

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{K_{is}} + K_{ds} \right) \quad (4)$$

式中: s 为具有正实数的复变数; K_{is} 为积分时间常数; K_{ds} 为微分时间常数。

由式(4)可知, PID 控制中主要调整 3 个参数的值, 下面对这 3 个参数的功能进行介绍。

(1) 比例系数 K_p : 作用是将系统输入值与反馈值之间的偏差按照相应比例放大, 以此来提高系统控制的响应速度。比例调节只能在一定程度上减小系统的稳定性误差, 但不能完全消除。

(2) 积分系数 K_i : 作用是将系统的稳定性误差减小或者消除, 但是不合适的积分时间常数值会对系统产生很大影响。

(3) 微分系数 K_d : 作用是对系统的动态性能和稳定性进行调整, 预测系统控制偏差的变化趋势。

1.3 模糊 PID 温度控制

随着被控对象的复杂程度、非线性、时滞性和各

环境耦合性的增加，难以准确得到被控对象的各特性和参数，传统的控制方法难以对复杂系统实现有效控制。当系统达到一定复杂程度后，其复杂程度和清晰程度成反比，模糊控制就是基于此产生的。图 2 展示了 TA1 钛合金挤压工艺的模糊 PID 控制算法流程图。

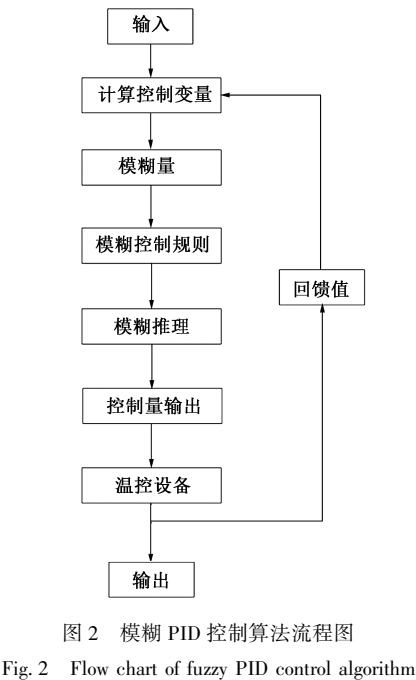


图 2 模糊 PID 控制算法流程图
Fig. 2 Flow chart of fuzzy PID control algorithm

本文将算法写入单片机中以实现模糊控制，基本原理如图 3 所示，其中， ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 分别为比例系数、积分系数和微分系数的变化值。控制规则根据实际试验过程中的控制规律和经验得出。

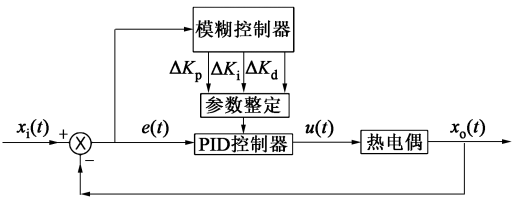


图 3 模糊 PID 算法原理图
Fig. 3 Principle diagram of fuzzy PID algorithm

模糊控制规则如表 1 所示，由表 1 可以看出每条控制规则的模糊关系。例如，当 ΔK_p 的偏差值 $e(t)$ 为 PB，偏差变化率 $e_c(t)$ 为 NS 时，则 ΔK_p 为 NM。其中，PB（Positive Large）为正大；PM（Positive Medium）为正中；PS（Positive Small）为正小；ZO（Zero）为零；NB（Negative Large）为负大；NM（Negative Medium）为负中；NS（Negative Small）为负小。不同的符号代表着不同的输入值与期望值的比较结果，模糊值按照 “If ($e(t)$ is NB) and ($e_c(t)$ is NB) then (K_p is PB) (K_i is NB) (K_d is PS)”

表 1 模糊控制规则
Table 1 Fuzzy control rules

偏差值	偏差变化率 $e_c(t)$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/ZO/PB	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

方式调整。模糊规则控制特征图如图 4 所示。所有最终控制量均是在起始 PID 参数的基础上进行修正的，计算公式如下：

$$K_p = K_{p0} + \Delta K_p \tag{5}$$

$$K_i = K_{i0} + \Delta K_i \tag{6}$$

$$K_d = K_{d0} + \Delta K_d \tag{7}$$

式中： K_{p0} 为系统起始比例常数； K_{i0} 为系统起始积分系数； K_{d0} 为系统起始微分系数。

2 试验方案

2.1 试验材料

试验材料为工业纯钛（TA1 钛合金）。将制备好的样品切割为 $\Phi 10\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 的圆柱体；在高温箱式炉内对切割制得的样品进行 $700\text{ }^\circ\text{C} \times 1\text{ h}$ 的均匀化处理；模具温度为 $400\text{ }^\circ\text{C}$ ，最后在液压式挤压机上进行挤压成形试验，得到直径未发生变化的挤压

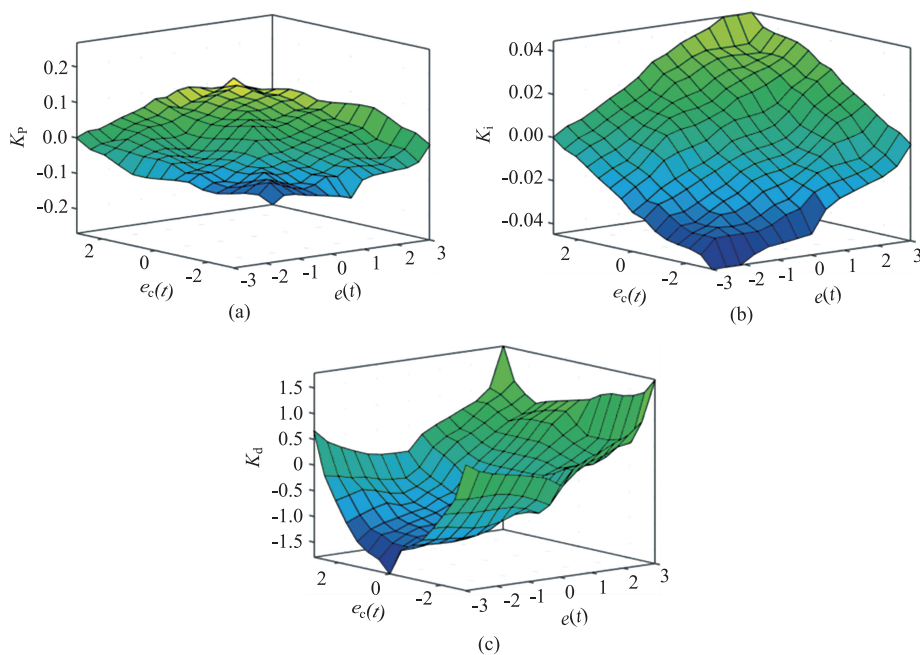


图 4 模糊规则控制特征图

(a) K_p (b) K_i (c) K_d

Fig. 4 Control feature maps of fuzzy rule

样品。控制规则是根据实际试验过程中的控制规律和经验得出的。TA1 钛合金的 ECAP 试验工艺参数如下：温度为 400 ℃、凸模移动速度为 $3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 、模具预热温度为 250 ℃。在 TA1 钛合金挤压过程中，挤压温度和模具温度的控制采用传统 PID 和模糊 PID 两种方式。

2.2 温度控制系统设计

采用 STM32 单片机、pt100 热电阻、智能温度变送器、G3NB-210B-1 10 A 固态继电器、DMG10600C070_03WTC、S-12-12 开关电源、400 W 功率热电偶加热棒搭建温度控制设备，如图 5 所示。

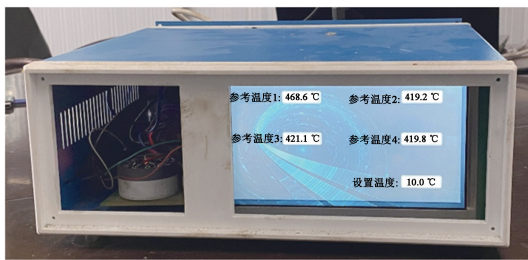


图 5 温度控制设备

Fig. 5 Temperature control equipment

2.3 试验方法

使用 MATLAB 软件对电路及算法过程进行模拟，探究传统 PID 控制以及模糊 PID 控制的响应时间、稳定性以及精度等特性。

在 TA1 钛合金试样中用线切割的方法切取金相组织试块。观察前对试样进行磨制和抛光，然后用钛合金金相腐蚀液进行腐蚀，再使用光学显微镜观察合金的显微组织。

3 结果分析

3.1 仿真结果分析

PID 算法调整比例系数 K_p 、积分系数 K_i 、微分系数 K_d 多根据经验进行，以获得较好的信号波形，具体输出波形如图 6 所示。由图 6 可以看出，两种控制器在调节参数过程中，由于控制算法比较简单，传统 PID 控制算法选用的各环节参数比较容易调整，当参数变化时波形表现相对稳定，不会出现较大起伏。但是，由于传统 PID 控制算法的局限性，手动调节参数很难应对复杂的温度控制。随着参数的优化，传统 PID 控制算法的控制效果有所提升，但很难进一步地提高性能。而模糊 PID 控制算法在调节参数的过程中波形起伏较大，较好的参数难以调整，不容易得到对系统的理想预估值。

从图 6d 可以得出，采用比例系数 $K_p=0.50$ 、积分系数 $K_i=0.07$ 、微分系数 $K_d=0.08$ 的模糊控制的 PID 算法，在超调量、响应时间和稳定性误差方面的输出波形明显更好，经过反复调试，能够出现更

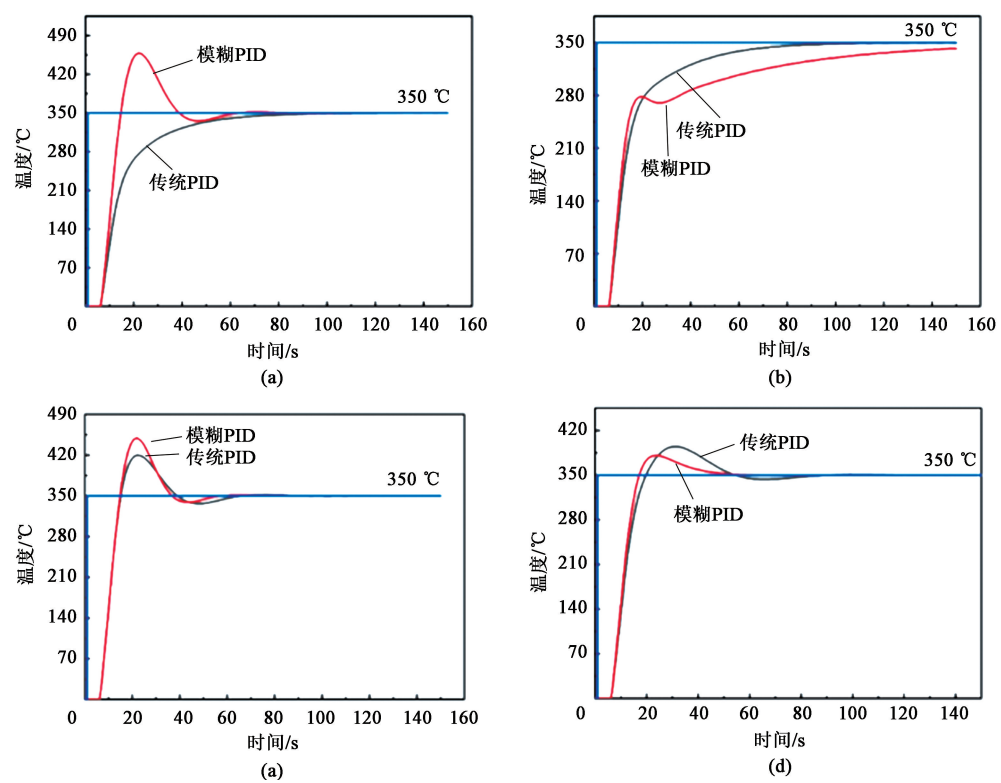


图 6 不同参数下的仿真结果对比
(a) $K_p=0.60$, $K_i=0.08$, $K_d=0.06$ (b) $K_p=0.30$, $K_i=0.03$, $K_d=0.10$ (c) $K_p=0.40$, $K_i=0.05$, $K_d=0.07$
(d) $K_p=0.50$, $K_i=0.07$, $K_d=0.08$

Fig. 6 Comparison of simulation results under different parameters

稳定且波形比传统 PID 控制算法振荡更小、超调量更小、输出波形调整时间更短的情况。故最终确定参数为：比例系数 $K_p=0.50$ 、积分系数 $K_i=0.07$ 、微分系数 $K_d=0.08$ 。采用最终参数性能仿真对比结果，如表 2 所示，经过最终参数调整后，采用模糊 PID 算法，超调量为 8.86%，而传统 PID 算法的超调量为 3.97%；采用模糊 PID 算法的调节时间为 57.56 s，比传统 PID 算法减少了 56.88 s；采用模糊 PID 算法时，稳定性误差为 0，而传统 PID 算法的稳定性误差为 0.9%。

表 2 采用最终参数的性能仿真对比

性能指标	控制算法	
	传统 PID	模糊 PID
超调量/%	12.83	8.86
调节时间/s	114.44	57.56
稳定性误差/%	0.9	0.0

综上所述，与传统 PID 控制算法相比，采用模

糊 PID 算法虽然参数调整难度较大，但其超调量小、调整时间短、稳定性误差为 0，虽然传统 PID 控制算法参数相对容易调整，但控制效果较采用模糊 PID 算法时差。

3.2 试验结果分析

针对 TA1 钛合金 ECAP 过程，采用传统 PID 算法以及模糊 PID 算法，写入到控制设备中，记录不同温度的响应时间、超调量以及稳定时间。同时，制备挤压试样，取样的使用光学显微镜对试样进行显微组织分析。

将温度控制设备分别加热至 150、250 和 350 °C，因为实际试验中，所获取的数据均为温度值，为更直观地表示，下文中均使用温度值来表示超调量和稳定性误差。试验时，仅改变期望温度值，并保持环境其他条件一致，记录液晶屏幕上温度值以及时间等信息。每次试验结束后待热电偶冷却，重复上述操作，得到的不同期望温度下的性能信息如表 3 所示。由表 3 可知，随着期望温度的升高，两种控制算法系统的超调量和调节时间均有所增加，但模糊PID算法的稳定性误差始终为 0。模

表 3 不同期望温度下的设备性能
Table 3 Equipment performance under different expected temperatures

期望温度/ ℃	控制算法	超调量/ ℃	稳定性误差/ ℃	调节时间/s
150	传统 PID	10	1.1	97
	模糊 PID	3	0.0	46
250	传统 PID	12	1.4	103
	模糊 PID	3.8	0.0	49
350	传统 PID	16	1.8	110
	模糊 PID	4.4	0.0	53

糊 PID 算法的实际效果与仿真结果大体相符,在期望温度为 350 ℃ 时,模糊 PID 算法的调节时间为 53 s,比传统 PID 算法减少了 57 s;模糊 PID 算法的稳定性误差为 0 ℃,优于传统 PID 算法的 1.8 ℃;模糊 PID 算法的超调量为 4.4 ℃,比传统 PID 算法

降低 11.6 ℃。基本符合 3.1 节仿真模拟结果。

通过光学显微镜对坯料经过不同 ECAP 试验后制得的样品进行观察,结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出,坯料内部晶粒沿剪切力方向被拉长,甚至破碎。坯料在经过变形区的塑性变形之后,原始晶粒得到了有效的细化,晶粒尺寸明显减小,经退火获得的原始等轴晶界基本消失,仅局部区域还可以观察到完整晶界,晶粒形状由于破碎导致不规则。通过观察不同 ECAP 试验对坯料晶粒的细化效果,发现采用传统 PID 算法时,塑性变形对坯料晶粒的细化效果相对较差,这是因为传统 PID 算法无法精确控制温度,且挤压过程超调量过大,ECAP 后坯料组织破碎,晶粒之间有明显的再结晶晶粒出现。而模糊 PID 算法通过系统自动调节算法中积分、微分以及比例常数的值,实现系统的变参数调节,能够提前预测温度值的变化,降低了系统的超调量,晶粒的再结晶也得到抑制。

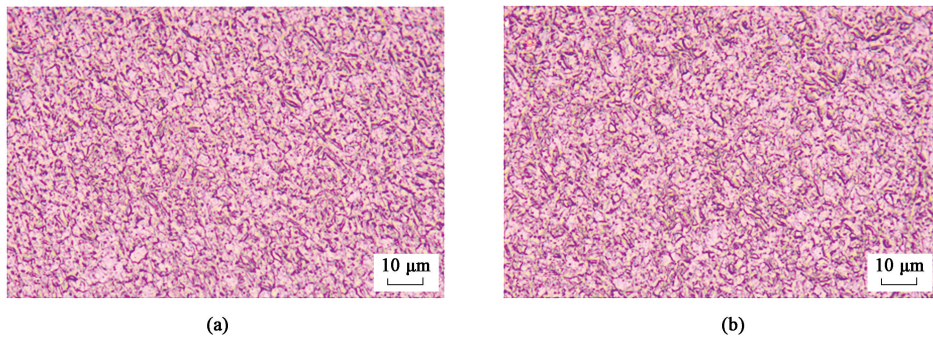


图 7 不同控制算法的微观组织对比

(a) 传统 PID (b) 模糊 PID

Fig. 7 Comparison of microstructures with different control algorithms

(a) Traditional PID (b) Fuzzy PID

综上所述,模糊 PID 算法的温度控制效果更好,温度更加精确,不会因温度较高而导致坯料晶粒有回复和再结晶现象发生^[14-15],晶粒细化也更加的均匀。

4 结论

(1) 通过 Simulink 仿真结果表明:模糊 PID 算法的超调量为 8.86%,相较传统 PID 算法下降了 3.97%;模糊 PID 算法的调节时间为 57.56 s,相较传统 PID 算法下降了 56.88 s;模糊 PID 算法的稳定性误差为 0,而 PID 算法稳定性误差为 0.9%。

(2) 在 150~350 ℃ 区间内,随着温度的升高,两种控制算法系统的超调量和调节时间均有上升,模糊 PID 算法稳定性误差一直为 0。模糊 PID 算法

的实际效果与仿真结果大体相符,在温度为 350 ℃ 时,模糊 PID 算法调节时间为 31.1 s,比传统 PID 算法减少了 58.9 s;模糊 PID 算法的稳定性误差在实际应用中与模拟结果相同,均为 0;模糊 PID 算法的超调量为 31.1 ℃,比传统 PID 算法降低 20.6 ℃。

(3) 材料变形后微观组织分析表明:模糊 PID 算法制得样品的晶粒细化效果较好,晶粒回复现象较少,晶粒细化分布更均匀。

参考文献:

- [1] 王贤贤,张睿翔,张功学,等.钛合金热变形组织演变研究进展[J].塑性工程学报,2022,29(12):1-12.
Wang X X, Zhang R X, Zhang G X, et al. Research progress of texture evolution of titanium alloy in hot deformation process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (12): 1-12.
- [2] 罗雷.超细晶工业纯钛室温变形行为研究[D].西安:西安

- 建筑科技大学, 2017.
- Luo L. Deformation Behavior of Ultra-fine Grained Commercial Pure Titanium at Room Temperature [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [3] 林正捷, 王立强, 吕维洁, 等. 大塑性变形制备超细晶生物医用钛合金的研究进展 [J]. 材料与冶金学报, 2014, 13 (3): 206-211.
- Lin Z J, Wang L Q, Lyu W J, et al. Research progress of fabricating ultrafine-grained biomedical titanium alloys by severe plastic deformation (SPD) [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2014, 13 (3): 206-211.
- [4] 强萌, 杨西荣, 刘晓燕, 等. ECAP 制备超细晶生物医用钛及钛合金的研究进展 (英文) [J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52 (5): 1673-1682.
- Qiang M, Yang X R, Liu X Y, et al. Research progress in preparation of ultra-fine crystalline biomedical titanium and titanium alloys by ECAP [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52 (5): 1673-1682.
- [5] 徐淑波, 赵国群, 栾贻国, 等. 等通道弯角挤压变形机理分析与工艺路线研究 [J]. 中国机械工程, 2006 (S1): 110-114.
- Xu S B, Zhao G Q, Luan Y G, et al. Deformation behavior analysis and process investigation of equal channel angular pressing [J]. China Mechanical Engineering, 2006 (S1): 110-114.
- [6] 胡雨龙, 刘晓燕, 高飞龙, 等. TA15 钛合金室温等径弯曲通道挤压模拟与试验研究 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (6): 33-40.
- Hu Y L, Liu X Y, Gao F L, et al. Simulation and test research of equal channel angular pressing of TA15 titanium alloy at room temperature [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (6): 33-40.
- [7] Semiatin S L, Delo D P, Segal V M, et al. Workability of commercial-purity titanium and 4340 steel during equal channel angular extrusion at cold-working temperatures [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, 30: 1425-1435.
- [8] Du F P, Liu F, Jiao Q Y, et al. Influence of ECAP temperature on the mechanical properties of pure Ti [J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39 (3): 692-696.
- [9] Zadeh L A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999, 100 (S1): 9-34.
- [10] Korkut I, Acir A, Boy M. Application of regression and artificial neural network analysis in modelling of tool-chip interface temperature in machining [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38 (9): 11651-11656.
- [11] 夏洪永, 李军国. 基于 PLC 的锻造加热炉温度智能控制系统设计 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (9): 180-182, 185.
- Xia H Y, Li J G. Design of temperature intelligent control system for forging heating furnace based on PLC [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (9): 180-182, 185.
- [12] Gao Z, Trautzsch T A, Dawson J G. A stable self-tuning fuzzy logic control system for industrial temperature regulation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38 (2): 414-424.
- [13] Xie X L, Long Z. Fuzzy PID Temperature control system design based on single chip microcomputer [J]. International Journal of Online Engineering, 2015, 11 (8): 29-33.
- [14] 王克平, 赵西城, 杨西荣. 工业纯钛 ECAP 温变形的力学性能及热稳定性 [J]. 热加工工艺, 2011, 40 (20): 7-10.
- Wang K P, Zhao X C, Yang X R. Mechanical properties and thermal stability of CP-Ti processed by ECAP at intermediate temperature [J]. Hot Working Technology, 2011, 40 (20): 7-10.
- [15] Huang Y, Figueiredo R B, Baudin T, et al. Evolution of strength and homogeneity in a magnesium AZ31 alloy processed by high-pressure torsion at different temperatures [J]. Advanced Engineering Materials, 2012, 14 (11): 1018-1026.

欢迎订阅《塑性工程学报》杂志



欢迎关注
微信公众号

《塑性工程学报》(Journal of Plasticity Engineering)创刊于1994年,是由中国科学技术协会主管、中国机械工程学会主办的学术刊物。《塑性工程学报》为全国中文核心期刊,被众多知名数据库收录:中文核心期刊要目总览(北大)、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊(核心库)、中国科技期刊引证报告统计源核心期刊、中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊)、中国学术期刊文摘数据库(核心版,CSAD-C)、中国学术期刊综合评价数据库、美国化学文摘CA、美国剑桥科学文摘材料信息(CSA:MI)、Scopus数据库、日本科学技术振兴机构中国文献数据库等。本刊主要报道与塑性成形领域及其交叉学科相关的前沿性、创新性的基础理论研究及工程技术应用等优秀科研成果。

本刊宗旨:

活跃本专业学术思想,提高本专业学术理论,强化本专业学术交流,为不断提高我国塑性工程基础水平,确立我国塑性工程界在世界科技阵营中的地位而服务。

读者对象:

本刊适用于从事与材料塑性成形理论研究、科研、生产、设计等相关的高校师生、科研人员及专业技术人员阅读。

本刊订阅方式

1. 全国各地邮局均可直接订阅
本刊为月刊,大16开本,每月末出版
邮发代号:80-353
国际标准刊号:ISSN 1007-2012
国内统一刊号:CN11-3449/TG
国内定价:40.00元/册
2. 逾期未定上者,可与编辑部联系订阅
汇款地址:北京市海淀区学清路18号
收款人:《塑性工程学报》编辑部
联系人:薛老师
联系电话/传真:010-62912592
电子邮箱: sxgxb@263.net

欢迎投稿,网址: <http://sxgc.cbpt.cnki.net/>