

# 高温氢气环境蠕变持久试验装置的试样均温性控制

刘孝亮<sup>1,2</sup>, 陈学东<sup>1,2</sup>, 王冰<sup>1,2</sup>, 范志超<sup>1,2</sup>, 庄庆伟<sup>3</sup>, 范辉<sup>3</sup>, 迟成芳<sup>3</sup>

(1. 合肥通用机械研究院, 合肥 230031; 2. 国家压力容器与管道安全工程技术研究中心, 合肥 230031;  
3. 长春机械科学研究院有限公司, 长春 130103)

**摘要:** 试验过程中, 试样有效段的温度均匀性(即均温性)直接影响测试结果的可信性与精度。为此, 从装置的热结构和温控策略两个方面入手以保证试验过程中试样有效段的均温性。通过分析原有热结构热场分布找出试样上段温度过高的原因, 在密封钟罩顶端增加水冷结构以带走聚集热量; 提出 Fuzzy-PID 混合控制策略, 采用 Fuzzy 控制调整上、下段加热电阻丝输入功率上限, 再结合传统 PID 控制实现加热过程中输入功率的智能控制。结果表明, 相对原有热结构及传统 PID 温控策略新结构, Fuzzy-PID 温控策略有效的提高了试样有效段均温性, 将其上、下段温差控制在  $\pm 1$ ℃ 以内, 满足蠕变持久测试需求。

**关键词:** 试样; 均温性; 模糊控制; 氢损伤; 材料试验装置

中图分类号: TG 40 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2016)05-0065-04

## 0 序 言

钢材焊接接头及高温临氢设备用材在高温氢气服役环境下的力学性能变化与氢损伤规律有待深入研究, 为此开发了一套试验装置<sup>[1]</sup>进行高温氢气环境下的力学性能测试, 研究其损伤机理及建立相应性能数据库。测试试验过程中, 被测试样有效段温度均匀性直接影响测试结果的可信性与精度, 因而相关试验标准中都给出了试样温度梯度要求, 通常为不大于 3℃。因此必须要对试样有效度的均温性进行精确控制。

在温度控制策略研究方面, 从早期的单纯 PID 控制<sup>[2]</sup>, 发展为具有一定智能特征的 PID 控制(如可编程 PID 控制<sup>[3]</sup>), 随着智能控制的兴起与成熟, 最终发展为当今的将智能控制与 PID 结合的智能 PID 控制<sup>[4-6]</sup>。也有学者直接应用智能控制进行控制<sup>[7]</sup>, 还有学者在建立系统模型的基础之上, 再进行控制<sup>[8]</sup>。其中, 模糊控制与 PID 控制结合的控制策略研究与应用较多。Moon 等人<sup>[9]</sup>针对玻璃熔窑的控温问题, 提出了模糊系统与传统 PID 控制混合算法。文中将玻璃熔窑总体的复杂非线性分为线性部分和非线性部分, 线性部分以传统 PID 来控制, 非线性部分则以模糊系统来控制。张乃禄等人<sup>[10,11]</sup>针对大型真空退火炉大容积炉室的均温性控制, 在 PID 控制

的基础上, 以输入温度偏差和偏差变化率为依据, 采用 Fuzzy 算法进行加热过程中 PID 参数的动态优化与调整, 实现了真空退火炉加热多温区温度(控温精度  $\leq \pm 0.7$ ℃)和均温性(径向炉温均匀度  $\leq \pm 3$ ℃)的精确控制。

上述研究为温度以及均温性的精确控制提供了有效的方法, 并且基本上都是以工业加热炉(如热处理炉、真空退火炉、扩散炉)等的加热系统为研究对象, 以加热元件为控制对象。相对于工业加热炉, 由于高温氢气环境蠕变持久试验装置的高温环境炉在结构、规模、加热方式等方面的区别, 特别是由于高温环境炉外壁冷却水循环对其温度场的影响, 这些新情况给装夹在其中的试样的均温区精确控制带来了挑战。

文中针对高温氢气环境蠕变持久试验装置中试样有效段均温性控制开展研究, 从热结构与控制算法两方面入手, 采用更加利于热量平衡的热结构, 以及提出模糊与 PID 相结合的控制策略, 来实现试样均温性控制。结果表明了新的热结构与控制策略的有效性, 试验过程中试样有效段温度梯度控制在 1℃ 以内。

## 1 高温氢气环境蠕变持久试验装置加热系统

所研发高温氢气环境蠕变持久试验装置的加热系统结构剖视如图 1c 所示。在钟罩中充入带压氢

气。内置加热炉,加热炉由上、下两段电阻丝组成,并对上、下段电阻丝采用 PID 算法单独控制以期分别主要加热试样的上、下段。在试样有效段的上端与下端分别绑有热电偶,分别测量试样上段与下段温度。钟罩外壳具有水冷腔,通过冷却水循环以防止长期试验时钟罩过热。

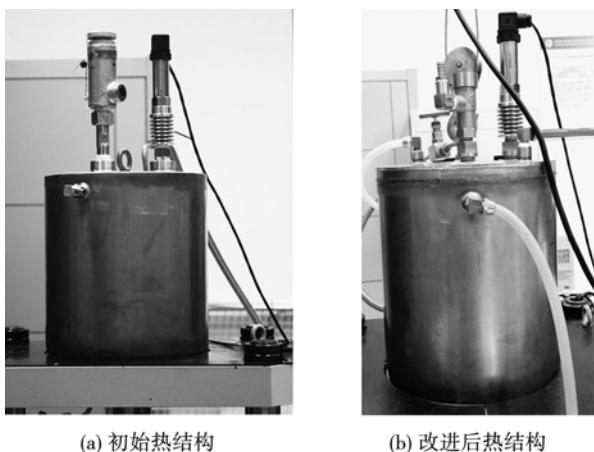


图 1 高温氢气环境材料性能试验装置的热结构

Fig. 1 Thermal structure of testing apparatus

## 2 高温氢气环境蠕变持久试验装置试样均温控制方法

原始热结构及 PID 控制方法未能实现试样有效段的均温性有效控制,如图 2 所示。在试验过程中,试样上段温度远高于下段温度,即使将上段加热电阻丝驱动降为 0,依旧不能将温度梯度控制在需求范围内。由图 2 可见,温度梯度最大时接近 50 ℃,不符合相关试验标准要求。为此,文中分别以热结构与控制策略两个方面的改进来解决试样有效段的均温控制问题。

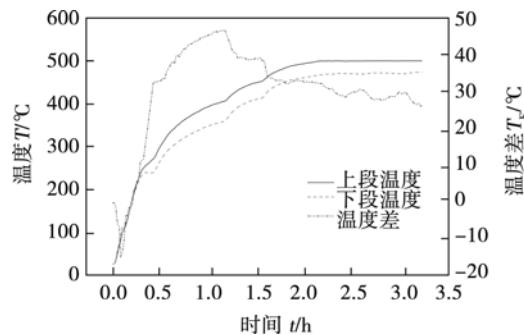


图 2 原始升温曲线

Fig. 2 Original heating curve

### 2.1 热结构分析与改进

对加热系统进行分析的结果表明,由于顶端隔热罩对热量对流的阻碍作用,导致热量在试样上段聚集,从而造成试样上段温度明显高于下段。为此,去除顶端隔热罩,并在钟罩顶端增加冷却水循环,保证了钟罩顶端不致过热且带着聚集的热量。改进后的热结构如图 1b ~ 图 1c 所示。

热结构改进后的升温试验曲线如图 3 所示,可见试样温度梯度大为减小,但依旧不能满足要求,且温度波动较大。其原因为传统 PID 控制精度不足,且未将试样上、下段温差作为控制量引入系统,导致达到目标值需要较长时间,即控制效率低。为此,需要改进空控制策略。

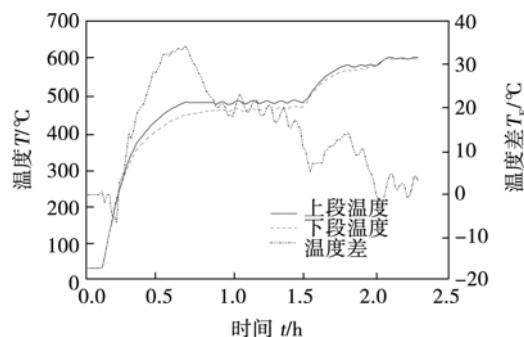


图 3 热结构改进后升温曲线

Fig. 3 Heating curve of new thermal structure

### 2.2 Fuzzy-PID 混合控制策略

Fuzzy-PID 混合控制策略原理如图 4 所示。其核心思想是根据试样上、下段温差(即温度梯度)来分别调整上、下段加热电阻丝驱动功放的输入功率上限,在该驱动功放的功率范围内再以 PID 控制各自驱动功放的具体输出功率。其中,Fuzzy 控制器的输入变量为试样上、下段温度之差,即

$$e(k) = T_u(k) - T_l(k) \quad (1)$$

式中: $e(k)$  为 Fuzzy 控制输入,其论域为  $E$ ;  $T_u(k)$  为

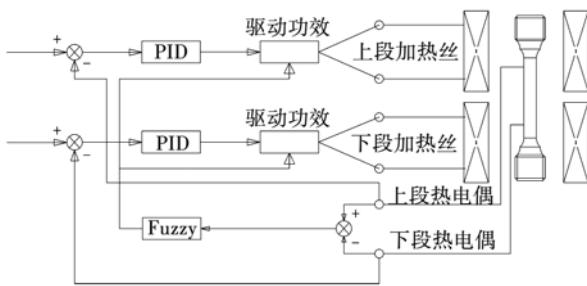


图4 Fuzzy-PID混合控制系统

Fig. 4 Schematic of Fuzzy-PID hybrid control system

试样上段热电偶测得温度;  $T_L(k)$  试样下段热电偶测得温度;  $k$  为采样次数. 且有

$$E = \{-10, -5, 0, +5, +10\} \quad (2)$$

Fuzzy控制器的输出变量  $y(k)$  为驱动功放功率上限的调整增量, 其论域为  $Y$ , 且有

$$Y = \{-10\%, -5\%, 0, +5\%, +10\% \} \quad (3)$$

控制输入  $E$  与控制输出  $Y$  论域量化皆对应为  $\{-1.0, -0.5, 0, +0.5, +1\}$  五个等级.

描述输入变量及输出变量的语言值依次为负大(NB)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正大(PB), 其隶属函数如图5所示, 控制状态如表1所示.

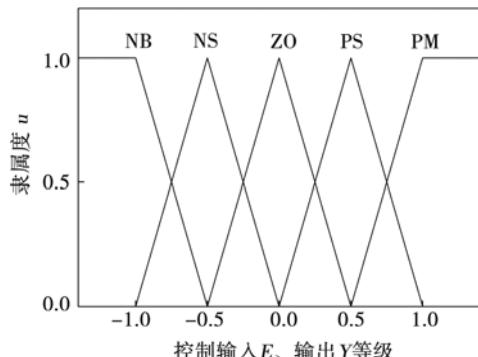


图5 语言变量的隶属函数

Fig. 5 Membership function of linguistic variable

表1 控制状态表

Table 1 Rule table

控制输入 $E$	控制输出 $Y$
NB	PB
NS	PS
ZO	ZO
PS	NS
PB	NB

相应的去模糊化为

$$y(k) = \frac{\sum_{i=1}^5 Y(u_i) u_i}{\sum_{i=1}^5 Y(u_i)} \quad (4)$$

则最终驱动功放的功率上限为

$$P(k) = P(k-1) + y(k)P_R \quad (5)$$

式中:  $P(k)$  为当前输出功率上限;  $P(k-1)$  为上一次调整输出功率上限;  $P_R$  为驱动功放额定功率.

### 3 试验结果与分析

热结构改进后的温升曲线如图3所示. 由此可见, 相对于未改进前升温曲线(图2), 试样的均温性大为提高; 温度达到预定值后, 温度梯度约为5℃, 且存在较大波动, 依旧不能满足测试标准要求.

在新热结构的同时, 采用所提Fuzzy-PID混合控制策略的温升曲线如图6所示, 由此可见, 相对于前述两种升温曲线(图2, 图5), 试样的均温性最高, 当温度达到预定值后, 温度梯度不大于1℃, 满足测试标准不大于3℃的温控要求. 结果表明, 热结构改进与所提Fuzzy-PID混合控制策略的有效性; 升温过程中, 特别是在Fuzzy控制器调整了驱动功放功率上限后(图6中试样上段温度曲线转折处即为功率调整时), 温度有较大波动, 可在后续工作中通过提高控制采样率等提高控制精度.

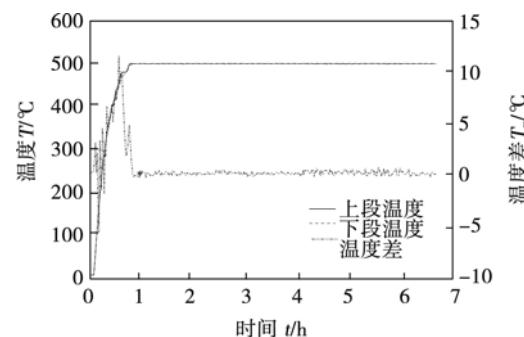


图6 Fuzzy-PID控制升温曲线

Fig. 6 Heating curve of Fuzzy-PID control strategy

### 4 结论

(1) 导致试样上段温度远大于试样下段温度的原因为初始热结构致使热量在试样上段聚集.

(2) 改进热结构, 去除隔热罩并在钟罩顶端增加水冷腔, 带走了聚集于试样上段的热量, 降低了上下段试样温差, 提高了试样均温性.

(3) 提出Fuzzy-PID混合控制策略, 先以Fuzzy

算法调整驱动功放功率上限,再结合原有 PID 控制输出功率,进一步提高试样均温性。且所提控制策略无需改进原有控制器,具有方便易行、控制精度高等优势。

(4) 试验结果验证了所改进热结构及所提控制策略的有效性,试样温度梯度 $<1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,满足相关试验标准对试验过程中试样的均温性要求。同时所提控制策略亦可用于类似的温度控制。

### 参考文献:

- [1] Liu X L, Chen X D, Wang B, *et al*. Development of new material testing apparatus in hydrogen at elevated temperature[J]. Procedia Engineering, 2015, 130: 1046–1056.
- [2] Fotouhi M, Garner R. Using a PID controller in controlling temperature of a multizone furnace[C]//Anaheim, CA, USA: AS-EE-American Society for Engineering Education, 1995. 1747–1754.
- [3] Guvench M G, Stone R, Pennell S, *et al*. Programmable PID temperature control of multi-tube multi-zone diffusion furnaces[C]//Seattle, WA, USA: ASEE, 1998. 3. 462. 1–3. 462. 8
- [4] Dussud M, Galichet S, Foulloy L P. Application of fuzzy logic control for continuous casting mold level control[J]. Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 1998, 6(2): 246–256.
- [5] Wu J C, Liu T S. A sliding-mode approach to fuzzy control design[J]. Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 1996, 4(2): 141–151.
- [6] Kim J, Kim K, Chong E K. Fuzzy precompensated PID controllers[J]. Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 1994, 2(4): 406–411.
- [7] Aoki S, Kawachi S, Sugeno M. Application of fuzzy control logic for dead-time processes in a glass melting furnace[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1990, 38(3): 251–265.
- [8] Porter C, Laser A, Hertle J, *et al*. Improving furnaces with model-based temperature control[J]. Solid State Technology, 1996, 39(11): 119–131.
- [9] Moon U, Lee K Y. Hybrid algorithm with fuzzy system and conventional PI control for the temperature control of TV glass furnace[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003, 11(4): 548–554.
- [10] 李鑫. 大型真空退火炉温度及均温性控制研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2011.
- [11] 张乃禄, 李鑫, 张嘉, 等. 大型板材真空退火炉多温区均温性控制研究[J]. 真空, 2010(5): 80–82.
- Zhang Nailu, Li Xi, Zhang Jia, *et al*. Research on controlling temperature equilibrium of multi-temperature zones for vacuum annealing furnace[J]. Vacuum, 2015(5): 80–82.

**作者简介:** 刘孝亮,男,1983年出生,博士,工程师。研究方向为承压设备测试仪器研发。发表论文10余篇。Email: hzxliu@zju.edu.cn