

提高燃气炉回火工艺炉温均匀性的研究与应用

申国强¹, 柳海涛², 陈刚¹, 李保强¹, 闫少华¹, 赵青松¹, 林玉东³

(1. 机械工业第六设计研究院有限公司, 河南郑州 450007; 2. 燕山大学, 河北秦皇岛 066000;

3. 泰钢合金有限公司, 广东中山 528400)

摘要: 为满足铸件回火工艺高精度炉温均匀性的需要, 基于室式燃气热处理炉, 对影响温度均匀性的因素进行研究。设计了新结构组合均火托盘, 采用高速烧嘴和微脉冲燃烧技术, 以及Fuzzy-PID温度智能控制相结合的技术路径, 解决均匀加热的难题, 取得了 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的良好使用效果。

关键词: Fuzzy-PID智能温度控制; 炉温均匀性; 组合均火托盘; 脉冲燃烧; 燃气热处理炉; 回火

铸件回火热处理工艺决定其最终内部组织和性能^[1-2], 随着材料力学性能要求的日益提高, 对相应热处理炉的炉温均匀性要求也越来越高, 燃气热处理炉作为主要的炉型同样面临性能提高的要求, 提高其炉温均匀性极限始终是需要解决的难题。国标GB/T 16924—2008《钢件的淬火与回火》中淬火及回火的炉温均匀性要求均为 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$; AMS2759中对淬火的炉温均匀性要求为 $\pm 14\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而对回火的炉温均匀性要求为 $\pm 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 甚至个别品种为 $\pm 6\text{ }^{\circ}\text{C}$; 核电标准RCC-M1000对消除应力及回火热处理炉温均匀性要求为 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这是从材料和产品采购角度对热处理炉的要求, 但众所周知的物理原因限制导致燃气炉的炉温均匀性比电炉差, 能进入 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 已经是较好状态^[3], GB/T 30824—2014《燃气热处理炉温度均匀性测试方法》中最高等级为: III A $\pm 8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 并注明在有效加热区体积不超过 10 m^3 可达到。但燃气热处理炉应用却相当广泛, 对产品的极高需求仍有相当的差距, 是否需要独立的炉内循环风机加强对流换热长期以来存在争议, 在特定的产品及炉型探索实现更高的炉温均匀性就具有很高的科学研究价值和迫切的现实意义。

1 试验炉及试验工件热处理工艺要求

1.1 试验炉型及工艺要求

基于出口欧洲的铸件热处理需求, 某厂主要生产不锈钢铸件, 也有部分低合金钢铸件, 及少量核电产品, 检测工艺为 $550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 提出在回火温度区段实现炉温均匀性 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的目标要求, 研发设计一台最大装载量 10 t 、最大装载空间为 $4\ 500\text{ mm} \times 2\ 500\text{ mm} \times 1\ 000\text{ mm}$ 的室式燃气炉。其中马氏体铸钢件回火及焊后回火保温温度范围 $500\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, 有14个区位。碳素低合金钢铸件回火保温温度范围 $530\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, 有11个区位。沉淀硬化不锈钢程度硬化处理温度范围 $465\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, 有8个区位。基本对应AMS标准回火温度范围。

1.2 试验工件热处理工艺曲线温度分析

工件热处理工艺温度曲线如图1, 分为升温和保温区别明显的两个阶段。经典的温度控制模式为PID调节方式, 在脉冲燃烧控制基础上也可以实现 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的控温精

作者简介:

申国强(1965-), 男, 教授级高工, 从事铸造、工业炉及能源利用方面研究工作。E-mail: SGQZZ@sina.com

中图分类号: TG155

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

03-0320-06

收稿日期:

2022-04-27 收到初稿,

2022-06-09 收到修订稿。

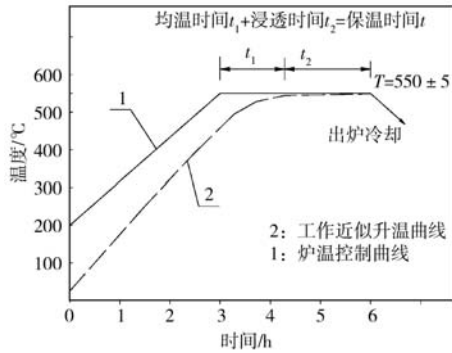


图1 工件热处理工艺曲线

Fig. 1 Process curves of the heat treatment of the workpieces

度，其对应的炉温空载或满载的炉温均匀性为 $\pm 8\text{ }^{\circ}\text{C} \sim \pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[4]。在两个阶段工件的吸热是非线性的，尽管保温阶段控制目标温度表现为恒定，但负载吸热的自变量却变化很大，要实现4点控制温度+11点以上检测温度，在空间上同步在较小偏差范围内，且保持一定的时间，其实质是空间加时间的四维非稳态自适应温度控制问题。需要从空间、时间转换的时空转换角度，进行理论和实践影响分析，改进每个关键点，来提高整体炉温均匀性的目的。

2 空间因素分析与改进

2.1 炉内气流分析

如图2所示，采用亚高速烧嘴脉冲燃烧控制方式时，炉内有四个炉压变化区^[5]，其优点是加剧了炉内气流的交换，有利于宏观整体炉温均匀^[6]，也导致单个控温点的波动较大，精度较差。

对燃气炉工件受热的方式是对流和辐射，区别于

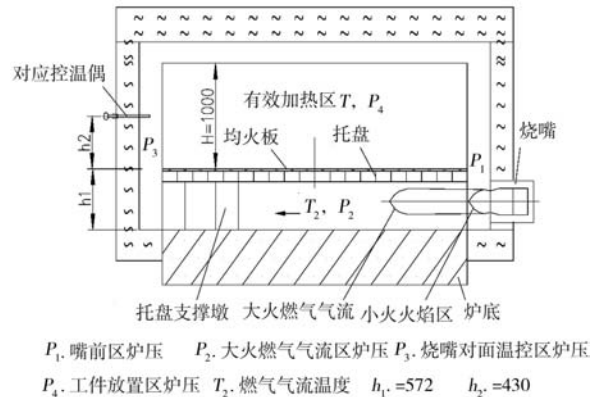


图2 工件布置、燃气流动及炉压示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the workpieces layout, gas flow and furnace pressure

电炉的单纯辐射，在200~700 °C的范围内，低温时对流换热占比较大，随着温度的升高，辐射占比逐步加大。重点考虑对流因素的影响。

2.2 非对称烧嘴布置

如图3炉内空间烧嘴非对称布置，亚高速烧嘴高温大火气流速度近80 m/s，能够贯穿整个炉膛到达对面炉墙后向上流动，基本上符合温差水平射流的规律，在对面炉墙适当位置设置控制热电偶，形成反馈控制回路，这是其热工和温度控制基础，且得到实践的验证。为了避免两个相邻烧嘴在大火时相碰引起局部高温，必须相对错位一定距离，本次设计为500 mm。

受室式炉结构限制，在深度方向设置3排承重墩，烧嘴1和2被限制在靠近炉门的一个受限空间内，烧嘴3和4被限制在靠近排烟口的一个受限空间内。

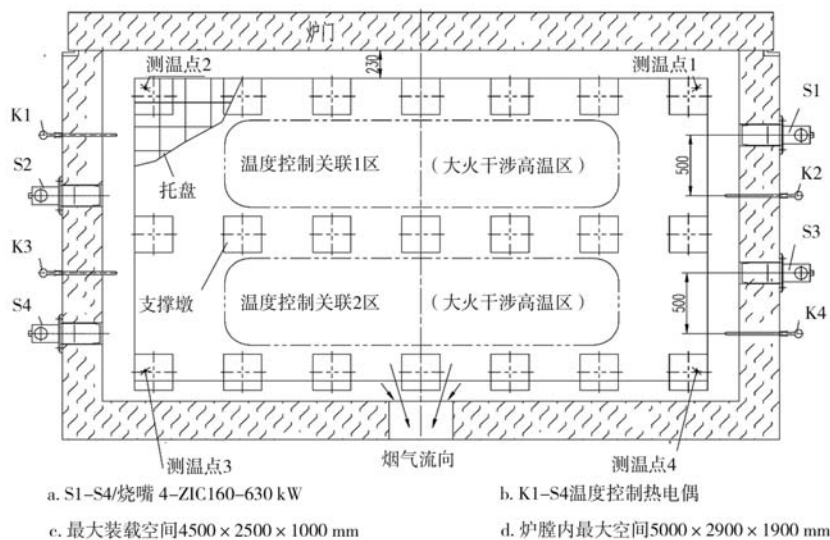


图3 室式炉烧嘴布置、控温点、热工空间结构关系图

Fig. 3 The location of the burner and temperature control

烧嘴布置是非对称的，相应控温偶也是非对称的，形成客观的有效加热区温度场也必然是非对称的。要获得相对对称的小偏差炉温均匀性测量温度场是有难度的，必须模拟分析最低点及最高点，且采取相应措施。四个角的测点是基本测点，距离烧嘴出口中心的距离差别较大，从对流和辐射的影响综合看，受炉门散热较多影响及气流从炉门向排烟口流动的影响，靠近炉门的两个测温点温差必然最大，所以改善1、2号烧嘴能力均衡及减少靠近炉门的两个测温点温差就是问题的本质和途径所在。

2.3 空间热工状态的根本改变——均火板

图2、图3所示，炉内下部有21个3排固定耐火支撑墩，中部是活动的4 500 mm × 2 500 mm × 100 mm网格状托盘，上部放置工件，托盘下和支撑墩之间的间隙就是高温燃气流通道，也称火道，大、小火高温燃气流接近1 500 °C，以射流形式喷出，不会射到工件上，和炉气进行对流和辐射交换，炉气再和工件进行热交换，也有部分和工件直接辐射换热。网格状托盘的筋板厚度约20 mm间隙约200 mm，主要是支撑存放工件功能，上、下部炉气处于一种自然交流状态，高温燃气和工件的辐射换热也处于自然状态。几乎没有均匀调节功能。特别是在大火同时出现不可避免时，中部存在大火高温干涉区，出现局部高温，这是影响炉温均匀性的最不利因素。

在托盘上部加置一层很薄的耐热钢板，4 500 mm × 2 500 mm × 2mm开少量的圆孔，使上下炉气交流减少，或转化为辐射换热，即组合结构的均火板^[7]，将极大的消除炉底高温峰值，也迫使气流向死角流动，特别是1号、2号测温位置。开孔率可以调节均匀化的能力，同时在高低温一体化热处理炉淬火时减少下降时托盘的冲击阻力，分析在3%~9%。炉底温度的可调可控均匀化功能就能实现。

2.4 调节比R的无限制化：大火、小火、熄火三态燃烧控制

脉冲燃烧的常用形态有二种组合：①小火、大火两种状态，普遍使用^[8]；②熄火、小火及大火三种状态，由于担心频繁点火可能的高故障而谨慎使用。

基本组合①状态时，小火火焰很短，出烧嘴≤220，基本达不到工件下部，作为长明执勤火，其能力确保在自动控制时不超温，炉温控制靠大火开闭来调节，实现炉温的自动控制。但在以往的实践中发现大、小火供热能力比即R受限，理论上天然气烧嘴R可以在10以上，甚至更大，但在脉冲控制方式有熄火现

象，在6~9之间比较稳定，可以实现百万级次无故障。但这一调节比值在保温段容易造成超温，特别是载重量少于50%时易出现，称为翘尾巴现象。这是难以协调的矛盾。在控制周期10~20 s情况下，在ZIC165烧嘴上试验频繁点火而引起的故障极低，故采取组合②熄火、小火及大火三种状态，彻底突破R在6~9之间的限制。

3 温度控制

3.1 时间转换因素 - 合理的升温速度

虽然标准要求是对保温阶段的，对升温时段的控温精度及测试炉温均匀性没有要求，但实践中发现由于热惯性较大，不良的升温参数会带入保温阶段，很难消除，严重时导致拐点的过冲现象。控温记录曲线也会真实的记录温度偏离、失衡，即使后期保温精度满足要求，也会导致歧义和客户的争议，所以追求升温、保温全程良好的控制精度和炉温均匀性，即全程曲线的优良率。

脉冲控制时大火及小火关闭时，称为消隐态，占比为消隐率，在消隐态时工件处于温度均衡化状态，有利于炉温均匀性^[6]，故需要保持一定的消隐率，在升温阶段就表现为升温速度限制。

3.2 Fuzzy-PID 智能温度控制模式

3.2.1 采用西门子PLC

采用西门子PLC温度控制模块、底层IFS258燃烧控制器物理硬件配置。经典的温度控制模式PID调节方式，在脉冲燃烧控制时可以实现±5 °C的控温精度，但在多点干扰时很容易失真。在图3本案例中1号烧嘴及温控、2号烧嘴及温控就出现强干扰，采用一对一的精细控制时，全程出现较多偏离和失衡，1控2控制时由于烧嘴能力的物理偏差在保温时偏离较大，在升温速度稍微差别时出现较大偏离和温度寄生现象。必须对PID控制进行强干预，消除干扰。设置选择参数和阈值，才能获得温度控制精度的突破。高控温精度是高炉温测量均匀性的保障和前提。

3.2.2 Fuzzy-PID智能温度控制模式

如图4所示，Fuzzy-PID复合控制是用模糊技术和常规PID相结合控制方法，当温度偏差较大时，采用Fuzzy控制，响应速度快，动态性能好；当温度偏差较小时，采用PID控制，使其静态性能好，满足系统精度要求^[9]。

(1) 在工件放置时强调尽量均匀放置，那么四个烧嘴的实际输出能力将不会偏差很大，PID计算输出偏

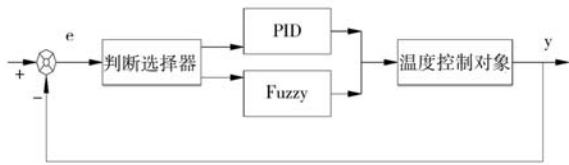


图4 Fuzzy-PID复合控制系统原理框图

Fig. 4 The principle diagram of the Fuzzy-PID control system

差较大且时长时，导致偏离和失衡，判断为异常，设置输出偏离阈值，进行干预，设置大火的输出偏离阈值 f_1 ，本例为30%~50%，超过时启动选择。

(2) 保温时小火的影响也很显著，设置小火的熄火时间偏离阈值 f_2 ，超过时启动选择。

(3) 温度控制关联区1号、2号烧嘴及温控，设置目标偏离阈值 f_3 ，超过时启动选择。

(4) 保温时段设置目标最大目标偏离阈值 f_4 ，超过时启动选择。

上述模糊控制模式及措施采取后，温度控制精度保温实现 $\pm 3\text{ }^\circ\text{C}$ ，升温实现 $\pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ 的良好结果。需要说明的是，上述措施是在炉内放置9点实际温度测量做目标改进依据的基础上完成的，各个阈值设定是逐步逼近，必须经过负载试验检验，否则程序易走偏进入逻辑陷阱中，效果反而更坏。

3.3 温度均匀性测量

3.3.1 空载9点测量及试验

依据GB/T 30824—2014 初步设定有效加热区为4 300 mm × 2 300 mm × 1 000 mm，周期炉需要11个以上均匀性测温点，如图5所示。基于前面分析下部四个角测点温差较大、上部测点温差较小、中间可能的高温，以及相关文献报道下部烧嘴及烟道的不利影响^[3]，重点解决下部测点温差较大问题，将6、11、12点从中间位置下移到接近炉底板，和其余四个下部测点在同一高度，仅保留上部一个角测点作比对参考，进行更

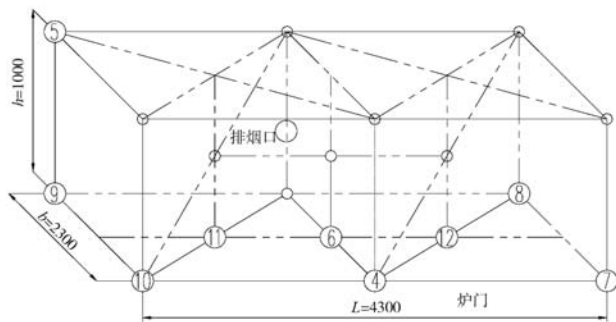


图5 测试点数量和位置示意图(9点)

Fig. 5 Schematic diagram of the number and location of the test points (9 points)

严格的炉温均匀性测试。改进后的下部8点加上部1点的9点测温方案作为试验及测试目标，重点关注及解决底部不均匀及高温干涉区的主要矛盾，其结果严于或等效于标准。

在应用组合均火托盘等措施，及Fuzzy-PID温度控制相结合的技术路线下，炉内空载9点测量实现 $550\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ (如图6)。

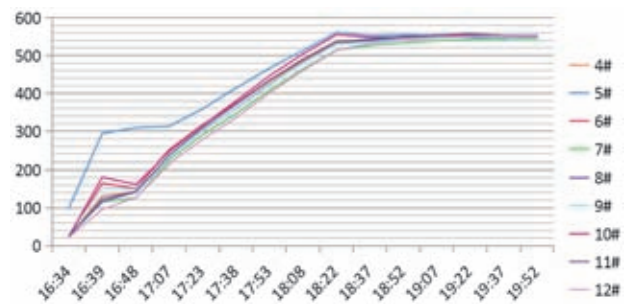


图6 空载炉温均匀性9点测量结果

Fig. 6 Measurement results of the 9 points of the no-load furnace temperature uniformity

3.3.2 负载模拟测量

在70%~100%负载下，选择代表性测温点位 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $550\text{ }^\circ\text{C}$ ，仍然采用炉内9点测量，实现 $\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ 。如图7a、b分别是在 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 负载70%时炉内温度测量及记录曲线，在没有剔除热偶误差的情况下获得的表观数据。图7c为 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 负载70%时炉内温度测量及记录曲线。

3.3.3 第三方标准14点测量

在100%满载下，依据GB/T30824炉内14点测量，图8为测点布置。选择可以覆盖 $400\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$ 范围的中点 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 为代表测量点。测量结果，温度均匀性： $\Delta\theta_+=2.9\leq 5$ ； $\Delta\theta_-=3.7\leq 5$ ，实现了 $550\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ ，保温6组数据结果见表1。

4 应用效果

(1) 在室式燃气热处理炉 $4\ 500\text{ mm} \times 2\ 500\text{ mm} \times 1\ 000\text{ mm}$ 进行试验研究，创新设计组合均火托盘，结合Fuzzy-PID控制技术，实现回火工艺温段控制精度 $550\text{ }^\circ\text{C} \pm 3\text{ }^\circ\text{C}$ 、测试炉温 $550\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ 的技术进展和良好结果。

(2) 组合均火托盘是在原托盘上增加 $4\ 500\text{ mm} \times 2\ 500\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 耐热钢板，开孔率3%~9%，极好改善炉内热工换热状况，均火效果明显，也使高温段炉温均匀性提高。其寿命长、成本低，值得推广。

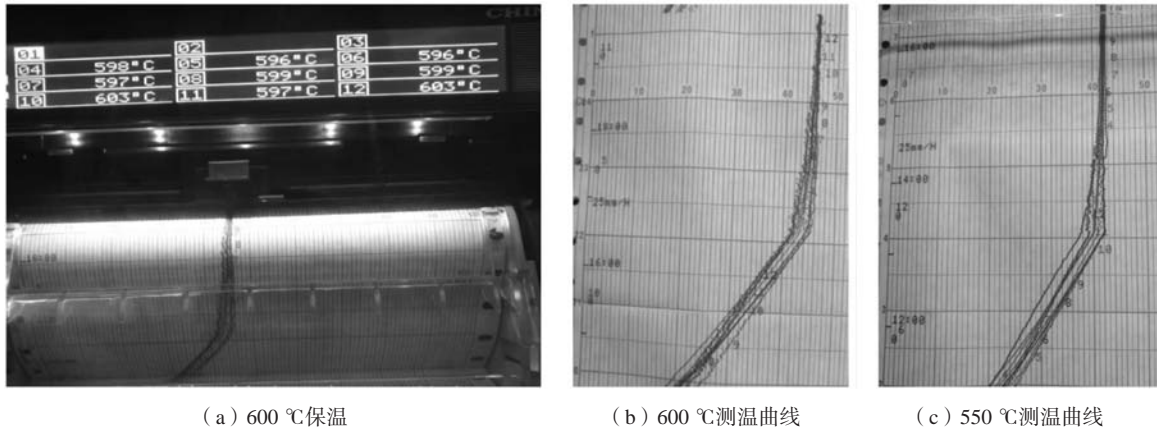


图7 负载模拟测温曲线

Fig. 7 The simulation load test of the temperature uniformity of 9 points

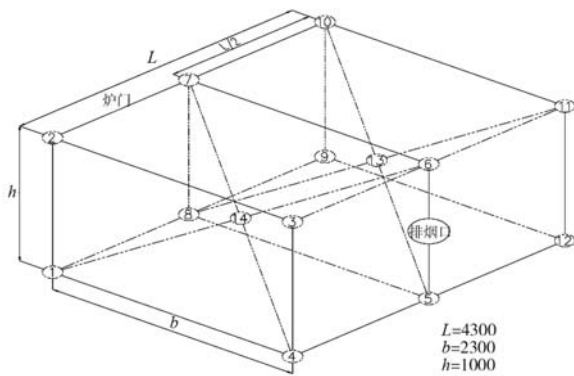


图8 炉温均匀性测试14点热电偶传感器装载位置

Fig. 8 The locations of the temperature measurement of 14 points

(3) 室式燃气热处理炉采用4个ZIC165烧嘴非对称布置, 存在两个大火高温干涉区, 采用亚高速烧嘴脉冲控制技术, 采用熄火、小火及大火三种状态突破调节比R的限制是可行的。

(4) Fuzzy-PID智能温度控制技术是消除干涉和提高精度的良好技术措施, 其阈值的设定要结合具体炉型进行实际炉内负载测试的检验。

(5) 试验表明升温速率较大时, 控温易出现失衡、偏离现象, 合理的升温速度为 ≤ 150 °C/h。

(6) 无循环风机搅拌对流状态的燃气热处理炉在回火温段炉温均匀性的突破提高, 为低温、中温、

表1 炉温均匀性测试数据 (550 °C, 负载)

Table 1 The measurement results of the temperature uniformity (550 °C, load test)

时间	实际测点温度/°C													
/min	测温点1	测温点2	测温点3	测温点4	测温点5	测温点6	测温点7	测温点8	测温点9	测温点10	测温点11	测温点12	测温点13	测温点14
0	550.2	547.7	548.2	548.7	546.3	548.4	548.8	548.7	547.6	547.2	548.6	550.7	547.3	546.8
6	551.3	549.0	547.9	548.9	548.2	547.5	547.8	549.1	548.1	547.5	549.2	551.3	549.6	548.7
12	552.2	550.8	547.6	548.9	549.0	548.0	548.3	549.5	548.2	549.3	549.6	551.3	550.6	549.0
18	551.6	552.2	548.2	548.8	548.8	548.4	548.7	549.5	548.2	549.7	548.6	551.3	550.7	548.7
24	551.6	552.2	548.2	549	547.2	548.7	549.1	549.7	548.2	550.5	548.8	551.2	550.3	549.9
30	551.3	552.3	548.6	549.2	549.3	548.6	549.8	549.9	548.8	550.8	549.4	551.3	551.9	548.5
最高	552.2	552.3	548.6	549.2	549.3	548.7	549.8	549.9	548.8	550.8	549.6	551.5	551.9	549.9
最低	550.2	547.7	547.6	548.7	546.3	547.5	547.8	548.7	547.6	547.2	548.3	550.7	547.3	546.8

注: 1.依据GB/T30824—2014要求进行测试及数据处理; 2.数据及结果摘自第三方检测报告。

高温全温段热处理工艺在一台炉内完成提供了技术保障, 可以实现高效、节约目标。

在更大容量的两台燃气热处理炉4 500 mm × 2 500 mm × 1 500/1 800 mm也取得良好效果。

5 结语

组合均火托盘热工新技术及Fuzzy-PID控制技术结合, 可显著改善燃气炉回火温段炉温均匀性, 测试达到 ± 5 °C的良好结果, 在高温段通过现场应用也取得

了较好效果且稳定,为热处理炉适用于全域范围热处理工艺奠定基础,具有重要意义,是值得借鉴的实用技术。

参考文献:

- [1] 鲍崇高,谷东丽,郭爱军,等.采煤设备连接用Cr-Mo-V低合金钢热处理制度及性能研究[J].铸造,2015,64(7):661-663.
- [2] 刘林,蔡淑芳,刘黎南,等.ZG42CrMo大型铸钢齿轮质量控制与热处理[J].铸造,2009,58(7):733-736.
- [3] 石月娥,聂英兰,李俏,等.GB/T 30824—2014燃气热处理炉温度均匀性测试方法 标准解读与应用[J].金属热处理,2015,40(12):206-211.
- [4] 全国热处理标准委员会.燃气热处理炉温度均匀性测试方法:GB/T 30824—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [5] 申国强.脉冲燃烧控制技术在燃油时效退火炉上的应用[J].中国铸造装备与技术,2005(5):51-53.
- [6] 武立云,张继光,林铁莉.脉冲控制燃烧器热工特性的实验研究[J].工业炉,2008,30(1):1-7.
- [7] 申国强,陈刚,林玉东,等.叉车室式炉用双组合托盘:CN215626597U[P].2022-01-25.
- [8] 刘义平,温治,刘训良,等.燃气台车式加热炉的应用现状及其分析[J].工业加热,2012,41(1)1-5.
- [9] 樊庆军,张宝珍.温度控制理论的发展概况[J].工业炉,2008,30(6):12-14.

Research and Application of Improving Temperature Uniformity During Tempering for Gas Heat Treatment Furnace

SHEN Guo-qiang¹, LIU Hai-tao², CHEN Gang¹, LI Bao-qiang¹, YAN Shao-hua¹, ZHAO Qing-song¹, LIN Yu-dong³

(1. SIPPR Engineering Group Co., Ltd., Zhengzhou 450007, Henan, China; 2. School of Information Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China; 3. Tycon Alloy Industries (Zhongshan) Co., Ltd., Zhongshan 528400, Guangdong, China)

Abstract:

In order to meet the needs of high-temperature uniformity during tempering, based on the chamber gas heat treatment furnace, the influence factors were studied. A new structure combined homogenizing tray was designed. The technical path of combining high-speed burner, micro pulse combustion technology and Fuzzy PID temperature intelligent control was adopted to solve the problem of uniform heating, and a good application effect of ± 5 °C was achieved.

Key words:

Fuzzy-PID Intelligent temperature control; high-temperature uniformity; combine fire tray; pulsed burning; gas heat treatment furnace; tempering