

# VKNA404060型真空回火炉结构及典型故障分析

韩枫钦

中航光电科技股份有限公司 河南 洛阳 471000

**摘要:** 真空回火炉在工业生产中发挥着重要作用,探究如何保障设备的正常运行,降低故障率,提升生产效率具有实际意义。本文主要针对真空回火炉的基本结构及原理进行介绍,并结合工作实践对此类设备的常见故障及处理方法进行了详细分析,从故障情况出发针对性地对真空回火炉的日常维护提出建议。

**关键词:** 真空回火炉;故障处理;温度均匀性;真空

**引言:** 真空回火炉是热处理生产线中的核心关键设备,主要应用于模具钢、精密零件、航空航天零部件等产品的回火处理工序。其设备运行的稳定性与工艺控制的精度,直接决定工件的组织均匀性、硬度一致性与最终尺寸精度,是整个制造环节中不可替代的质量保障端口,基于此,本文立足企业现场维修实际,以真空回火炉的全流程维修为研究对象,系统梳理常见故障模式与失效机理,构建“诊断-维修-验证-预防”的闭环维修体系。通过深度剖析,结合具体维修案例与数据验证,探索高效的维修技术路径与持续性改进策略,解决设备维修痛点,稳定热处理工艺质量,助力制造业实现降本增效与装备维修技术的规范化发展。

## 1 真空回火炉概况

真空回火炉适用于高速钢、模具钢、合金钢、不锈钢、钛合金等材料的回火、退火和固溶时效等工艺。可以消除锻件、焊接件、冷冲压件、工件淬火后残余内应力,防止工件变形开裂。具有工件表面不氧化、不脱碳、表面光亮的特点,有除气净化作用,能提高材料的纯度、疲劳强度、塑性和韧性。

设备使用操作方便,手动/自动自由切换。具有完善的报警系统对设备和工件进行保护。使用欧陆温控仪表进行温度控制,具有较高的控制精度<sup>[1]</sup>。具有对流加热功能,既能提高加热速度也能保证了工件的光亮度。配备了高效的内循环冷却系统,工艺适应性强。

## 2 真空回火炉结构原理

真空回火炉由密封炉壳、炉膛、水路、真空系统、加热系统、冷却系统和电气控制系统组成。采用循环水对整个炉壳进行降温,用以防止受热变形,且隔绝内部高温。

真空回火炉使用时首先按照工艺需求即低真空使用二级泵,高真空使用三级泵对炉体进行抽取真空。待真空度达到要求后,设备按照设定好的加热工艺曲线进行

升温、保温、降温或快速冷却。待加热工艺曲线完成,炉温降至80℃以下后,可通过打开放气阀门将炉内压力逐渐恢复至大气压,然后方可打开炉门取出工件。

### 2.1 加热系统

加热系统主要由温控器、变压器、炉膛加热装置等组成。炉膛内使用石墨加热棒进行加热,隔热屏采用石墨毡隔热屏。由于石墨材料具有较大的吸附性,因此此炉膛如果长期暴露在空气潮湿的环境下将会吸收水汽,影响真空度。

此炉通过单路温控表欧陆3504控温,控温精度可达1℃。但为满足炉温均匀性的要求,其炉膛内加热分为三个区域:AB区,BC区,AC区。设备共有三个功率调节器,每个分区由其对应的功率调节器控制加热功率,从而实现炉内不同位置温度的调节。

典型的加热控制是温控器通过热电偶检测炉膛温度,然后与设定温度通过PID算法运算输出功率控制信号(0-5V)。功率控制信号输出至功率调节器,然后按比例输出功率,其中功率调节器具有缺相检测功能,若供电故障会发出报警,切断控制输出。在功率调节器上端,加热总供电线接有三相电压电流表,可监测加热实时电压电流<sup>[2]</sup>。

由于功率调节器输出电压一般为380V,电压过高,危险性大,因此实际使用中采取低电压高电流的加热方式。由变压器降低电压后连接至炉膛加热材料。

### 2.2 真空系统

真空系统中真空泵包括机械泵、罗茨泵、扩散泵和维持泵等,辅以真空阀进行管路通断控制,负责对整个炉膛进行抽真空。机械泵、罗茨泵为二级泵,适用于低真空工艺;加入扩散泵后为三级泵,适用于高真空工艺。其中维持泵用于保持扩散泵泵体真空,提前扩散泵加热时间缩短高真空抽取速度,并且防止炉膛停止抽真空后扩散泵油被氧化。

设备上电后即会依次打开维持泵、维持阀以保持扩散泵泵体真空。抽真空时首先启动机械泵,然后在几秒钟内打开粗抽阀对炉膛进行粗抽,待真空度达到1000Pa以下后启动罗茨泵,待真空度达到50Pa以下后会依次关闭维持阀、维持泵、打开前级阀。使用三级泵时,高阀需在真空度小于10Pa的情况下才能打开。正常情况下二级泵抽真空时炉内真空度应能小于5Pa,三级泵真空度应达到 $8 \times 10^{-3}$ Pa以下。

### 2.3 电气控制系统

电气控制系统负责整个炉子的控制运作。主要由可编程逻辑控制器PLC进行电气逻辑控制,通过对温度、压力、真空度、循环水压力流量等各个参数的检测来监视控制整个炉子的运行,当其任一出现超出范围或预估的目标时发出报警并进行相应的切断动作,保障设备安全。其具有超温、缺水、电流不平衡、变频器故障等多种报警功能。通常操作人员通过上位机设置工艺参数,监控整个设备的运行情况。

设备具有多种连锁保护功能。炉门上设有行程开关检测炉门关闭,在未检测到炉门关闭时无法进行抽真空操作;炉顶电接点压力表在未检测到炉膛内恢复大气压的情况下,炉门不会打开;真空度未达到预设阈值时高阀不能打开,以防止扩散泵油被氧化。

## 3 真空回火炉常见故障分析

### 3.1 加热电流异常报警

上位机报警信息显示“加热电流异常”,报警后设备会自动停止加热。此报警触发的条件是三相加热电流不平衡,相差较大。此时可查看炉内高温偶、低温偶、控制偶的温度,若发现三点温度中有温度明显异常的即可判断炉膛内部加热材料出现短路或接地。待炉膛温度下降至室温后断电进入炉膛内部检查,通常可能是工件未放置好,接触到加热材料或出现接地,导致漏电流。

### 3.2 超温报警

第一检查超温保护温度设置是否错误。第二检查热电偶与温控表之间接线有无接触不良,温度显示是否异常。第三对于多区控温的真空热处理炉,还需检查每个分区对应的功率调节器功率输入信号线连接是否正常。如果某一路断线则会导致整个炉膛温度均匀性发生改变,可能会导致超温。

### 3.3 温度均匀性问题

对于真空回火炉,加热工件时,由于炉内压力低,热传导主要靠辐射传热,很少有对流交换,所以在炉温均匀性性能方面对炉膛结构和加热材料分布比较敏感。单分区加热的真空回火炉因为无法分区调节加热功率,其炉膛结构已经决定了它的温度均匀性分布,一般不易出现温度均匀性问题,如果出现温度均匀性问题多是由于加热材料老化需更换。因此此处只讨论采用多分区加热的真空热处理的温度均匀性问题<sup>[3]</sup>。

在炉膛结构不改变的情况下温度均匀性问题一般是分区加热功率分布、控温偶位置变动造成的。要解决此类问题需依靠温度均匀性计量数据。通常温度均匀性问题有两种,以九点测温布局如图1所示,设定温度520℃,均匀性要求为 $\pm 3$ ℃为例,具体分析如下。

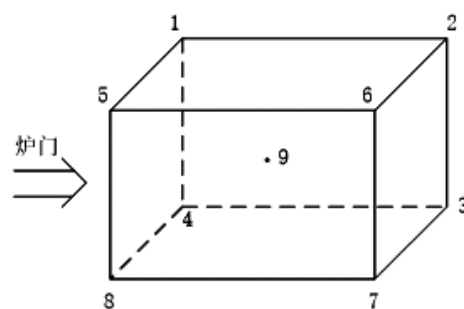


图1 九点测温布局图

九点温度中有超出 $520 \pm 3$ ℃的点,但最高点与最低点温差在6℃之内。

九点温度测量数据如表1,控温偶为4号点。

表1 九点测温数据一

| 时间<br>(一天中的时间) | 距离 (m) | #1 (℃) | #2 (℃) | #3 (℃) | #4 (℃) | #5 (℃) | #6 (℃) | #7 (℃) | #8 (℃) | #9 (℃) |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 15:56          | 223.2  | 523.0  | 521.9  | 522.5  | 520.5  | 524.5  | 523.2  | 523.3  | 523.1  | 522.8  |
| 15:58          | 224.4  | 522.9  | 521.9  | 522.5  | 520.5  | 524.4  | 523.0  | 523.3  | 523.0  | 522.7  |
| 16:00          | 225.6  | 522.8  | 521.6  | 522.5  | 520.5  | 524.4  | 523.0  | 523.2  | 523.1  | 522.7  |
| 16:02          | 226.8  | 523.0  | 521.8  | 522.5  | 520.6  | 524.5  | 523.1  | 523.4  | 523.2  | 522.8  |
| 16:04          | 228.0  | 523.0  | 521.9  | 522.6  | 520.6  | 524.4  | 523.1  | 523.4  | 523.2  | 522.8  |

在此测温数据中,最低点为4号点,温度520.5℃;最高点5号点,温度524.5℃。其最高点与最低点温差为4℃,代表实际均匀性可以,炉体本身结构及加热功

率分布无问题。要解决最高点超温的问题只需将炉膛温度整体下降2℃,这样4号点温度518.5℃,5号点温度522.5℃,就均在计量要求的 $520 \pm 3$ ℃范围内。

3.4 而要使炉膛温度整体下降一般可以采取两种方法:

3.4.1 将此时的控温偶4号点向外拔

由于加热材料分布在炉膛四壁,当把控温偶向外侧拔后,其距离加热材料会更近,其所在位置的温度相对之前位置会提高。但由于温控器的控制作用当其温度高于控制温度时会降低功率,降低控温偶温度,从而降低了整个炉膛的温度。

3.4.2 将控温偶位置移至3号点

如果要将炉膛整体温度下降2℃,需要在现有控温偶4号点520.5℃的基础上加2℃,即522.5℃。在测量数据中3号点温度正好在522.5℃左右。按照测量数据可以得出,如果以3号点作为控温偶位置,则控制温度在520℃时,整体下降2℃。从而达到520℃时炉体均匀性±3℃的要求。

九点温度中有超出520±3℃的点,且最高点与最低点温差大于6℃。

九点温度测量数据如表2所示,控温偶为4号点。

表2 九点测温数据二

| 时间<br>(一天中的时间) | 距离(m) | #1(℃) | #2(℃) | #3(℃) | #4(℃) | #5(℃) | #6(℃) | #7(℃) | #8(℃) | #9(℃) |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 15:26          | 205.2 | 523.9 | 521.5 | 523.7 | 520.5 | 527.6 | 523.8 | 525.5 | 525.6 | 523.8 |
| 15:28          | 206.4 | 524.2 | 522.2 | 524.1 | 520.7 | 527.3 | 524.4 | 525.3 | 525.7 | 524.4 |
| 15:30          | 207.6 | 523.7 | 522.5 | 523.6 | 520.7 | 526.1 | 524.3 | 524.7 | 524.7 | 523.9 |

在此测温数据中,最低点为4号点,温度520.7℃;最高点5号点,温度527.3℃。其最高点与最低点温差为6.6℃,大于6℃,说明加热材料功率分布有问题,不可能通过调整控温偶解决问题。要解决此问题必须先将最高点与最低点温差调回到6℃以内,然后再按照第一种情况的做法再行调整。

此种情况下,在不动炉膛结构的情况下调整温度均匀性分布的方法,只有调节加热材料的功率分布。按照测温数据分析,可以发现多数温度均偏高,因此优先考虑提高最低点且同时是控温点的4号点的温度。根据图1九点测温布局图可知,影响4号点较大的温区有前区、左区和下区。但调整前区必然对最高点5号点有影响,不可行。而调节左区影响较大的四个点1、2、3、4中最大温差3.5℃,调节下区影响较大的四个点3、4、7、8中最大温差5℃,因此优先选择调整左区的加热功率。

在炉温达到520℃恒温阶段后逐步调节,加大左区加热功率,同时观察九点测温情况,最好的情况是可以直接将九点温度调整至520±3℃范围内。如果达不到可以先将九点温度最高点与最低点温差调整在6℃范围内,然后再按照第一种情况的做法再行调整。

上述为两种温度均匀性问题的基本调节方法。但在实际操作中,由于炉膛是一个整体,调整任一温区的功率均会引起所有温度的连锁变化,因此一定要实时观察温度数据情况再对温区功率作出相应调整。

4 真空回火炉的维护建议

在日常工作中,要求真空设备必须保证完好的工作

状态,这就要求设备操作和维护人员要做好日常保养。科学有效的保养能极大地降低设备故障率,延长使用寿命,确保安全生产。针对真空回火炉,通常的维护保养应涉及以下几方面。

4.1 真空泵的保养

真空泵包括机械泵、罗茨泵、扩散泵和维持泵。至少要每周检查一次油量、油的颜色和状态,观察是否有浑浊。需要按照真空泵标明的油号,按量定期更换泵油。定期更换空气滤芯,油滤芯。定期检查扩散泵循环水流通情况,在其运行时测量泵体盘管温度不能过高。

4.2 电气系统的保养

定期紧固电气柜内接线端子,查看各元器件是否有明显异常。检查各行程开关是否松动,机械转动、电气通断能力是否正常。

结术语:通过对真空回火炉的结构解析,和常见故障的处理方法分析探讨,提出了针对性的日常维护建议。随着真空回火炉产品逐渐增多,加强日常维护能避免大部分设备问题。确定有效的解决方案,安排专业人员进行检修,确保设备的正常运行状态,对生产十分重要。

参考文献

[1]吴涛,贺宇清,刘元德,等.工业燃煤锅炉回转式空气预热器防堵提效技术研究[J].工业加热.2024,53(7).  
 [2]王铭朴.扩散泵的理论和技术[J].真空技术报道.1972,(2).15  
 [3]范雪龙,邓继军.基于自动控制的火电厂锅炉自适应燃烧控制系统优化及应用[J].大众标准化.2025,(2).