

# 连续式石墨真空炉加热及控制系统设计

于文杰<sup>1</sup> 张宇<sup>1</sup> 周湘文<sup>2</sup> 刘兵<sup>2</sup> 赵建国<sup>3</sup> 谭水胜<sup>3</sup>

1. 中核北方核燃料元件有限公司 内蒙古包头 014035

2. 清华大学核能与新能源技术研究院 北京 100084

3. 北京北方华创真空技术有限公司 北京 100015

**摘要:** 连续式石墨真空炉作为一种常用的热处理炉, 主要用于连续化大生产, 其加热系统是最重要的组成部分。本文利用热平衡法计算加热功率, 并详细介绍石墨热区的结构设计, 减少漏热, 防止热区之间的相互干扰。同时选择不同类型的控温热偶对各区的温度进行PID控制, 并有超温报警, 以保证加热系统运行可靠。

**关键词:** 连续式炉; 加热功率; 加热器; 热偶

## Design of Heating and Control System for Continuous Graphite Vacuum Furnace

Wenjie Yu<sup>1</sup>, Yu Zhang<sup>1</sup>, Xiangwen Zhou<sup>2</sup>, Bing Liu<sup>2</sup>, Jianguo Zhao<sup>3</sup>, Shuisheng Tan<sup>3</sup>

1. China North nuclear fuel Co.,Ltd., Baotou, Inner Mongolia, 014035, China

2. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing, 100084, China

3. Beijing Naura Vacuum Technology Co.,Ltd., Beijing, 100015, China

**Abstract:** As a common heat treatment furnace, a continuous graphite vacuum furnace is mainly used in continuous mass production. The heating system is the most important component. In this paper, the heating power is calculated by the heat balance method, and the structure design of the graphite hot zone is introduced in detail to reduce heat leakage and prevent mutual interference between hot zones. At the same time, different types of thermocouples are selected to control the temperature of each area by PID temperature control, with an overtemperature alarm, to ensure the reliable operation of the heating system.

**Keywords:** continuous furnace; heating power; the heater; thermocouple

### 引言:

连续炉主要是工件在炉内不断移动, 完成加热、保温、冷却全过程的热处理炉。与批次炉相比, 这类炉子具有生产效率高, 产品质量稳定, 节约能源, 生产成本低, 容易实现机械化与自动化, 适用于大批量生产等优点。

目前国内的真空炉基本上都是单室或双室间歇式真空炉, 其缺点是效率低、产品一致性差、不适合大批量生产。为了克服间歇式真空炉存在的上述缺点, 满足现代工业大批量生产的需要。国内外厂商积极研发连续炉

设备。日本爱发科的连续式真空热处理炉FHHn系列、连续式真空钎焊炉FB系列、以及连续真空烧结炉FSC系列, 可实现多种金属零部件的热处理, 钎焊, 烧结等工艺, 其采用模块化的将各室结合起来, 可形成多室连续式的真空设备。日本爱发科连续炉设备性能稳定, 在中国在市场上有很高的占有率。近年来国内厂商也加紧连续真空设备的研制工作, 应用在不同的工业领域。如沈阳真空技术研究所研制的多室连续室真空炉, 是五室式连续真空炉, 有效加热区尺寸为1200mm(长)×600mm(宽)×500mm(高), 工作温度可达1200℃<sup>[1]</sup>。该设备已于2002年10月在用户现场一次试车成功, 并稳定投入使用。兰州真空设备有限责任公司研制的多室隧道连续式真空烧结炉, 是2017-2019年甘肃省重点研

**通讯作者简介:** 于文杰(1990-), 男, 工程师, 专业为机械电子工程, 现主要从事核燃料元件制造生产及科研工作。

发项目, 其为三室式连续真空炉, 有效加热区尺寸为  $\Phi 200\text{mm} \times L260\text{mm}$ , 工作温度可达  $2200^\circ\text{C}$  [2]。这两种串联式连续炉, 填补了国内空白, 也为国产连续炉提供了一种设计思路。

## 1 球形燃料元件连续高温真空纯化设备介绍

### 1.1 连续高温真空纯化设备的应用

连续高温真空纯化设备是高温气冷堆核电站示范工程燃料元件生产线的关键设备, 客户用于替代批次式石墨真空炉。本文所述的连续式石墨真空炉主要用于对车削后的球坯进行高温处理, 实现球坯石墨表层纯化 [3], 降低金属杂质含量, 改善球形燃料元件腐蚀性能和提高热力学性能。本设备已在用户现场试车成功, 并投入使用, 达到国内领先水平。

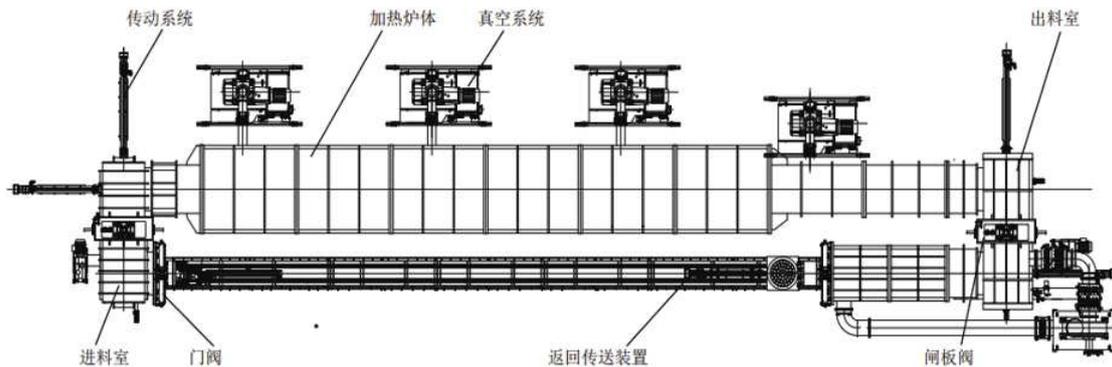


图1 连续式石墨真空炉组成示意图

连续炉的动作流程依次为, 装好球坯的石墨坩埚在返回传送装置上运至进料口, 然后进料口的门阀打开, 将石墨坩埚推送至进料室后进料口的门阀关闭, 进料室抽至一定真空后, 打开进料室的闸板阀, 石墨坩埚通过传动系统送至加热炉体, 进料室的闸板阀关闭, 再次利用传动系统推动石墨坩埚经过加热室的各个温区, 达到加热炉体的尾端, 打开出料室的闸板阀, 石墨坩埚通过传动系统送至出料室, 出料室的闸板阀关闭, 石墨坩埚在出料室冷却到设定温度后, 最后打开出料室的门阀, 将石墨坩埚送至返回传送装置上, 至此完成一个循环。产能需满足每一个小时移动一车的距离, 即满足每小时300个球坯的产能。按照各区的设计温度, 从室温升至最高工作温度  $1900^\circ\text{C}$ , 设备每区温度见下表1。

当温区确定后, 则开始计算加热功率, 设计热区及加热炉壳。

### 1.2 连续高温真空纯化设备的组成及温区的划分

设备的主要工艺参数为: (1) 工件尺寸:  $\Phi 60$ 球; (2) 产能: 300个球/h; (3) 设备形式: 推车式; (4) 石墨坩埚尺寸:  $\phi 580 \times 580\text{mm}$ ; (5) 最高工作温度:  $1900^\circ\text{C}$ ; (6) 控温精度:  $\pm 1^\circ\text{C}$ ; (7) 冷态极限真空度:  $10\text{Pa}$ ; (8) 压升率:  $5\text{Pa/h}$ ; (9) 传送速度: 约  $0.6\text{m/h}$ ; (10) 出炉温度: 球坯表面温度低于  $60^\circ\text{C}$ 。

本设备满足连续生产, 物料传输采用推车结构, 进出料采用闭环物料转移机构, 小车通过传动机构实现进出料操作, 可以平稳连续运输石墨坩埚。主要由进料室、加热炉体、出料室、闸板阀、门阀、传动系统、返回传送装置、真空系统、冷却水系统及控制系统等主要部分构成。

## 2 加热功率计算及热区结构

### 2.1 加热功率计算

确定设备的加热功率的方法主要有两种 [4-5]: 一是利用经验公式, 二是通过热平衡计算。此外参考其它文献, 指出计算的过程引入一个时间节点作为计算单位, 代替以往的一个烧结过程为计算单位 [6], 此法具有一定的实际意义。连续式加热设备需充分考虑高温区热辐射对低温区的影响, 保证温度曲线满足工艺要求。根据炉体温区的不同, 先分别计算每段加热的功率 [7-8], 然后相加得出总的加热功率, 本文先计算第6段温区的加热功率, 然后在计算整个加热功率。

根据热平衡方程:

$$Q_{\text{总}} = Q_{\text{有效}} + Q_{\text{损失}} + Q_{\text{蓄}} \quad (1)$$

式中:  $Q_{\text{总}}$  是加热器发出的总热量 ( $\text{kJ/h}$ );  $Q_{\text{有效}}$  是有效热消耗, 加热物料和石墨坩埚所消耗的热量 ( $\text{kJ/h}$ );  $Q_{\text{损失}}$  是无效热消耗 ( $\text{kJ/h}$ );  $Q_{\text{蓄}}$  是加热过程中炉内

表1 加热炉体的温区划分表

炉体分区	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
温度/ $^\circ\text{C}$	250	500	750	1000	1250	1500	1700	1900	1825	1625	1525	自然降温

结构件蓄热消耗的热量 (kJ/h)。

1)  $Q_{\text{有效}}$ 有效热消耗的计算

$$Q_{\text{有效}}=Q_{\text{工}}+Q_{\text{夹}} \quad (2)$$

式中:  $Q_{\text{工}}$ 是工件加热消耗热量 (kJ/h);  $Q_{\text{夹}}$ 是夹具加热消耗热量 (kJ/h)。

每个石墨坩埚装载300个球坯, 单个球坯重量约210g, 工件总重量约63kg, 石墨坩埚重量约20kg, 料车上的石墨板重约50kg, 单个料车及物料总重量约133kg。石墨在1000℃至1250℃的平均比热容1.98kJ/(kg·℃), 故  $Q_{\text{有效}}=133 \times 1.98 \times (1250-1200) / (60 \times 60) = 18\text{kW}$ 。

2)  $Q_{\text{损失}}$ 无效热消耗的计算

$$Q_{\text{损失}}=Q_1+Q_2+Q_3+Q_4 \quad (3)$$

式中:  $Q_1$ 是通过隔热层辐射给水冷壁的热损失 (kJ/h);  $Q_2$ 是水冷电极传导的热损失 (kJ/h);  $Q_3$ 是热短路造成的热损失 (kJ/h);  $Q_4$ 是其它热损失 (kJ/h)。

采用石墨毡隔热屏进行保温, 通过非金属反射屏隔热层热损失, 计算方法如下:  $Q_1=Q_{\text{传}}=Q_{\text{辐}}$ 。即炉内达到稳态后, 通过非金属反射屏隔热层的热损失等于非金属反射屏隔热层内表面热传导到外表面的热量; 也等于加热器辐射给非金属反射屏内表面的热量。

$$Q_{\text{传}} = \frac{t_1 - t_2}{S} \cdot \lambda \cdot F \quad (4)$$

式中:  $Q_{\text{传}}$ 是通过非金属隔热屏传导热损失 (kJ/h);  $t_1$ 是隔热屏内壁温度 (℃);  $t_2$ 是隔热屏外壁温度 (℃);  $S$ 是平壁的厚度 (m);  $F$ 是隔热屏平壁的平均面积 (m<sup>2</sup>);  $\lambda$ 是隔热屏材料的平均热导率[kJ/(m·℃)]。

$$Q_{\text{辐}} = C_{12} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1 \quad (5a)$$

$$C_{12} = \frac{4.96}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (5b)$$

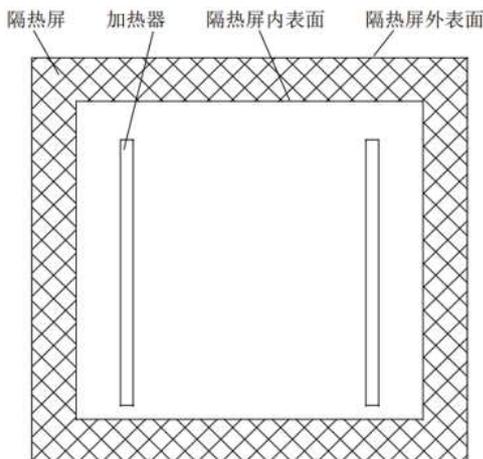


图2 隔热屏示意图

式中:  $Q_{\text{辐}}$ 是通过非金属隔热屏辐射热损失 (kJ/h);  $C_{12}$ 是导热辐射系数[kJ/(m<sup>2</sup>·h·K<sup>4</sup>)];  $T_1$ 是加热器外表面温度 (℃);  $T_2$ 是隔热屏内表面温度 (℃);  $F_1$ 是加热器外表面积 (m<sup>2</sup>);  $F_2$ 是隔热屏内表面积 (m<sup>2</sup>);  $\varepsilon_1$ 是辐射体黑度;  $\varepsilon_2$ 是接收体黑度。

隔热屏采用石墨毡, 加热器采用等静压石墨。取加热器表面温度1450℃, 隔热屏内表面温度1250℃, 隔热屏外表面温度200℃, 隔热屏厚度100mm, 隔热屏材料的平均热导率0.3kJ/(m·℃), 取石墨毡和石墨加热器的黑度均为0.76, 并根据热区结构尺寸, 计算得隔热屏平壁的平均面积5.16m<sup>2</sup>, 加热器外表面积0.54m<sup>2</sup>, 隔热屏的内表面积3.62m<sup>2</sup>, 故

$$Q_{\text{传}} = (1250-200) / [0.1 / (0.0003 \times 5.16)] = 16\text{kW},$$

$$C_{12} = 4.23\text{kJ} / (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4),$$

$$Q_{\text{辐}} = 3.64 \times [ (1723/100)^4 - (1523/100)^4 ] \times 0.5355 = 19\text{kW},$$

可得  $Q_{\text{传}} \approx Q_{\text{辐}}$ , 所以取  $Q_1=18\text{kW}$ 。根据工程经验, 一个水冷电极消耗的功率约为0.5kW~1kW, 每个加热区有6个电极, 故  $Q_2=6 \times 0.5=3\text{kW}$ ; 热短路造成的热损失包括隔热层支撑件与炉壁连接热传导损失, 炉床或工件支撑架短路传导损失, 以及其它热短路损失等。根据工程经验, 一般取  $Q_1$ 的5%~10%左右, 故  $Q_3=18 \times 0.1=1.8\text{kW}$ ; 其它热损失, 如热电偶导出装置、真空管道、观察孔、风扇装置等。一般情况下, 这部分热损失大约为  $Q_1$ 的3%~5%左右, 即  $Q_4=18 \times 0.05=0.9\text{kW}$ 。

根据以上计算, 可得:  $Q_{\text{损失}}=Q_1+Q_2+Q_3+Q_4=18+3+1.8+0.9=23.7\text{kW}$ 。

根据以上计算, 可得:  $Q_{\text{损失}}=Q_1+Q_2+Q_3+Q_4=18+3+1.8+0.9=23.7\text{kW}$ 。

3)  $Q_{\text{总}}$ 总热量的计算

对于连续式石墨真空炉, 不用考虑  $Q_{\text{蓄}}$  功率, 如此可求得第6节温区的总功率  $Q_{\text{总}}=18+23.7=41.7\text{kW}$ 。其它各区的功率也可根据热平衡法进行计算, 但对于连续炉需考虑温区之间的相互影响, 根据经验, 低温区第1、2、3、4节的功率可设置一样, 可取30KW。中温区第5、6节的功率可设置一样, 可取50KW。高温区第7、8、9节的功率可设置一样, 可取80KW。降温区第10、11节的功率可设置一样, 可取60KW。所以总加热功率为:  $4 \times 30+2 \times 45+3 \times 80+2 \times 55=560\text{KW}$ 。

### 2.2 热区结构设计

反射屏是用于隔热、减少热损失的部件, 分为金属反射屏和非金属反射屏两类, 文中连续炉采用石墨毡保温屏。在每两个控温区之间设置隔热挡板, 隔热挡板开口尺寸正好使石墨坩埚顺利通过, 防止温区之间的互相干扰。加热器是真空炉内的发热部件, 其向工件的传热

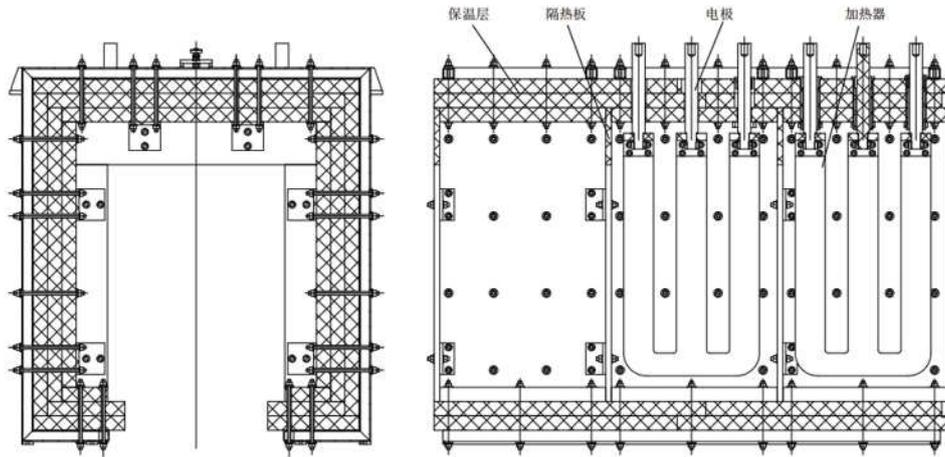


图3 炉体热区结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the inner dipole motor

方式以辐射传热为主。加热器设置在加热区的两侧，采用石墨加热板竖直安装连接，每区加热器均采用星形接法，以保证加热区的温度均匀性。加热器材质为等静压电极石墨，电阻分布均匀。保温层采用成形石墨纤维模块平板搭接而成，分段加工制作，连接处错缝搭接，防止热气外泄，以保证温区内部的温度均匀性。

左右及上部反射屏固定在炉体上，下部反射屏安装在料车框架上，如此热区组成一个动态矩形截面。反射屏框架采用不锈钢矩形管焊接而成，保证整体强度，随着温度的逐渐升高，石墨毡有50mm、100mm、150mm三种规格厚度，保证良好的保温性能。为保证加热器连接点尽量少，减少不必要的安装误差，采用整板做成星型加热器，确保在使用过程中不出现打火现象。

底部保温层安装在料车框架上，随料车移动，保温层上部为石墨板用于装载石墨坩埚，石墨板通过石墨杆支撑在料车框架上。炉体其余保温层固定安装在炉体内部，底部保温层与侧部保温层之间采用台阶密封，相接

部位采用软毡，密封间隙尽量小，有效防止热气外泄，保证料车框架升温较小，防止料车热变形，保证运行稳定性。料车采用耐热不锈钢材质，其滚动轮在反射屏外部，滚动轮采用高温无油真空轴承，实现料车移动，炉底反射屏随料车移动。滚轮在专用轨道上只能沿一个方向移动，导轨设置在料车两侧，其中一侧为V型导轨，保证料车直线运行不偏离，另一侧为C型导轨，保证料车在炉内运行顺畅，不出现卡顿或料车偏离现象。导轨位于反射屏外部，安装于炉壳水冷夹套内侧，其热变形小，满足使用工况。

### 3 温控系统设计

温控系统设计要考虑热偶选择、控温方式等内容。料车运行方式是一小时所有料车前进一个工位，其中20分钟由伺服电缸缓慢从前一个温区推入下一个温区，料车前进60mm，剩余40分钟料车静止不动。在连续运行期间要考虑料车移动期间和静止状态的加热情况。

#### 3.1 控温热偶

本设备是连续炉，在升温过程中会发生高温区影响低温区控温，高温区的热量会辐射进入低温区，低温区温度会超过设定温度。因此在选择热偶的时候要选温度显示范围更高的热偶。0℃~1000℃采用K型热偶测量控制，低温段K型热偶温度测量更精确。钨铼热偶在1000℃~1800℃有良好测温性和稳定性，在1000℃~1800℃温区采用钨铼热偶测量控制。在1900℃钨铼热偶故障率比较高，为保证设备正常运行采用高精度红外双色测温仪测量控制，钨铼热偶进行监控，既保证故障率低，又保证测温准确。热偶从炉体侧面插入，便于维修拆卸。

根据现场实际情况，在1700~1900℃温区虽然有进口热偶能正常测量，但是连续炉会长期连续在这一温度

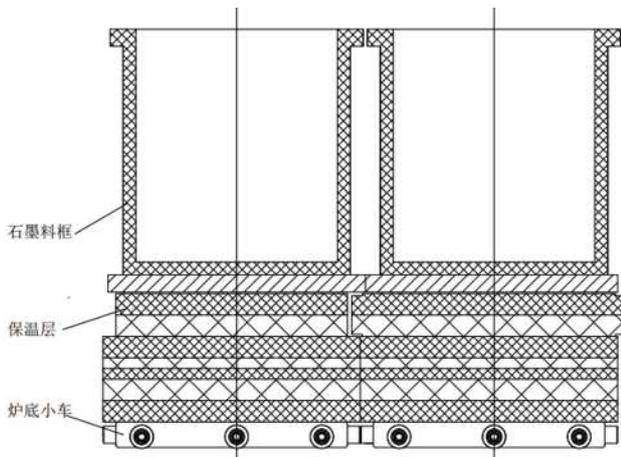


图4 炉底热区结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of pressure and cooling motor

下工作, 经过测试进口C型热电偶在工作200小时左右时, 5支热偶有两支出现断偶现象。因此在高于1700℃的温区只适用红外测量。

### 3.2 控温方式及保护

1) 升温段控温方式: 高温区从前一温区进来料车, 温度会在本温区升200℃, 因此在料车前进期间, 升温段所有温度都会快速下降, 在此期间为防止加热功率快速升到最大, 因此要限制输出功率最大值, 防止功率输出波动范围大。在料车就位之后, 所有温度会快速升到设定温度, 而低温区还会受高温区辐射影响。各升温段功率下降到最小功率。升温段温度控制是围绕设定值上下波动, 因此不用使用高精度控制仪表。整个加热控温方式采用输出功率限幅加自动控制方式控温, 同时不必使用控温精度很高的仪表。本设备采用山武表测温, 经过PID运算后, 将控制信号发送给功率控制器, 功率控制器使用恒功率控制, 功率输出值恒定在功率给定值上的控制方式。完全能满足上述要求。

2) 降温段控温方式: 降温段在料车移动期间, 料车都是从高温段进入低温段, 这时候控温功率会快速下降, 在料车静止期间功率再缓慢上升。在降温段只是为了保证最高温区温度, 所有工艺处理都已完成, 也不需要高精度控制方式。

3) 加热器设计: 每组加热分成左右两个完全相同的加热器, 加热器采用星形接法, 然后两组加热器并接到变压器次级铜排, 这样保证左右加热效果完全相同, 防止出现某一侧温度过高过低的现象, 三相电压均在控制面板显示, 便于观察三相电压是否平衡。另外每个星型加热器都配置三个互感器用于检测加热器三相电流, 保证左右任何一组加热器损坏都能及时发现。采用十一组加热独立控制, 可在某一组加热出现故障, 切断故障组加热, 其余加热正常工作, 保证工艺继续运行, 减少损失。

4) 加热保护: 为保证加热能正常运行, 在设备出现故障时, 设置了很多加热保护报警, 超温, 温差大, 温度过低, 加热断路, 热偶断路等, 在出现故障后都会有声光报警, 出现声光报警后在给予一定时的处理时间, 在规定时间内不能恢复正常, 则采取相应的保护措施。比如出现超温报警, “超温”指示灯闪烁, 蜂鸣器进行为时3分钟的预警, 如在预警期间炉温恢复到最高允许温度之下, 报警自动解除; 如在超过预警时间, 炉温依然高于最高允许温度, 设备将进行保护性操作: 自动停止加热, 终止自动运行, 断加热等。

## 4 结束语

本文介绍了连续式石墨真空炉的工作流程, 并对加

热功率的计算与热区的结构设计做了详细介绍, 为类似的设备提供了参考, 本设备已完成了连续自动测试, 并进行多次带料实验, 处理完成的料球各项指标都能达到要求。原有批次炉每炉三台一天处理量为1000个料球, 本设备一小时处理量为300~500个, 一天处理量在7200以上, 生产效率是现在单台设备21倍。但本设备总运行时间只有240小时, 后续长时间运行的稳定性需进一步测试考证。

加热功率的计算和分配是连续炉的关键技术, 从实际使用情况来看, 第1节温区的加热功率基本不输出, 第8节温区的加热功率基本达到满功率输出, 而降温段第10节温区的加热功率到设计功率的一半, 降温段第11节温区基本为不输出, 其它温区的设计基本合理, 约在设计功率的85%左右。对今后的设计功率来说, 第1节温区可不设置加热器, 就能达到所需温度, 最高温区的加热功率应加大, 并且降温段受高温区及物料自身蓄热的影响, 所需功率可大幅减少。我们只是利用了热平衡法计算了加热功率, 后续可以从模拟仿真等方面进行仿真计算<sup>[9-10]</sup>, 使各个温区的功率合理分配。

### 参考文献:

- [1]刘阳兴, 富宏军, 吴剑, 王亮, 马俊.多室连续式真空炉的研制与应用[J].真空, 2005(02): 15-19.
- [2]王智荣, 马强, 龙国梁, 李雪峰, 刘成.多室隧道连续式真空烧结炉及热处理炉的研制与应用[J].真空, 2019, 56(05): 6-11.
- [3]周社柱, 聂婷婷, 张军彦.石墨纯化技术研究分析[J].炭素技术, 2021, 40(05).
- [4]王天泉.电阻炉设计[M].北京: 航空工业出版社, 2000.
- [5]阎承沛.真空热处理工艺与设备设计[M].北京: 机械工业出版社, 1998.
- [6]陆利新, 李桂琴, 仝韶华, 孙逸.连续式烧结炉加热功率计算模型[J].热加工工艺, 2012, 41(19): 37-39.
- [7]陈祎, 刘余庆.基于热平衡原理的硬质合金压力烧结炉最佳加热功率的研究[J].工业加热, 2005(05): 34-37.
- [8]尹国木, 沈精虎, 李建朋.高温连续式烧结炉的热分析[J].工业炉, 2013, 35(03): 1-4.
- [9]许晓平, 王跃飞, 雷金辉, 何宇翔, 陈焰.内热式多级连续真空炉温度场的有限元分析[J].特种铸造及有色合金, 2013, 33(10): 904-907.
- [10]Rad S D, Ashrafizadeh A, Nickaeen M. Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in an industrial continuous furnace[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 117(Complete):263-274.