



推杆式可控气氛渗碳自动线 电加热系统的设计

株洲齿轮有限责任公司 (湖南 412000) 周激波 黄星星

一、基本方案确定

该生产线设计纲领为：生产量以渗碳层深 1.0 ~ 1.4mm 的产品为计算标准，应达到净重每小时 400kg，产品在主炉内停止时间为 11h，所以料盘数为 22 个。考虑与我公司老连续炉工装互换性，我们采用相同规格料盘，尺寸为长 780mm × 宽 50mm，设计装料高度 650mm。根据我公司实际使用经验及相关炉型资料参考，决定采用横置辐射管，以保证工件在有效炉宽范围内得到均匀加热，避免竖置辐射管高温下自重及高温蠕变产生电阻丝搭壁造成相互挤靠而短路，导致加热元件早期报废的缺点。考虑有效加热区的热效率、加热均匀性、热强度、订货方便性及成本低廉等因素，决定采用国内同类炉型相同的辐射管规格，管外径 $\phi 203\text{mm}$ ，材质 Cr25Ni20Si2。

二、主炉总功率计算

炉内料盘装料尺寸可确定为宽 780mm，高 650mm，长 $440\text{mm} \times 22$ (盘数) = 9680mm。在确定 $\phi 203\text{mm}$ 横置辐射管和使用顶风扇后，我们可以确定主炉炉膛尺寸为长 10.42m × 宽 1.33m × 高 1.245m (计算公式及数据略)，可得到炉膛容积为 17.3m^3 。根据炉子功率计算方法之一，由指标计算法可得：

$$\text{炉温 } 1000^\circ\text{C} \text{ 时, } N = (75 \sim 100) \sqrt[3]{V^2}$$

式中 N ——安装功率，kW；

V ——炉膛容积， m^3 。

考虑该设备设计选用优质保温材料，其保温性好、蓄热能力强。参考国内外同类炉型相关资料，我们决定选择 $N = 75 \sqrt[3]{V^2}$ 计算。

$$\text{则 } N = 75 \times \sqrt[3]{17.3^2} \text{ kW} = 501.7 \text{ kW}$$

因此，炉子主炉总设计安装功率为 501.7kW。

三、各区安装功率确定

该设备共把主炉分为五区：升温区 (1 区) 5 盘 2412mm，均温区 (2 区) 4 盘 1535mm，渗碳区 (3 区) 6 盘 2846mm，扩散区 (4 区) 4 盘 1899mm，降温区 (5 区) 3 盘 2441mm。1 区、4 区靠近主炉两端墙，炉体散热大，工件进 1 区时吸热较多；3 区温度最高，散热较多，工件仍需吸热；4 区工件降温散热，同时考虑到各区双拱墙的隔离、顶风扇搅动、炉内气体流动，主炉墙上诸多孔：辐射管孔、氧探头孔、热电偶孔、定碳孔、进气口、窥视孔和故障门等的散热。考虑国内外炉型各区安装功率综合统计数据 (见表 1)。

表 1 连续炉设计分配功率

区间	加热区 (1 区 + 2 区)	渗碳区 (3 区)	扩散区 (4 区)	降温区 (5 区)
占总安装 功率比例 (%)	41 ~ 54	16 ~ 20	10 ~ 20	10 ~ 20

根据我公司产品结构特点，品种多，处理工件层深范围大，从 0.6 ~ 2.2mm 均有，且浅层深产品较多，周期短，Ⅲ区温度又较高，故应适当增加Ⅲ区功率比例。最后根据各区实际容积确定各区分布功率，进而确定各区辐射管根数。见表 2。

表 2 连续炉设计分配功率

区段	1 区	2 区	3 区	4 区	5 区	合计
占总安装功率比例 (%)	24	20	30	13	13	100
各区安装功率/kW	120	99	148.5	66	66	499.5
辐射管数量 (根)	6	6	9	3	3	27
单根辐射管功率/kW	20	16.5	16.5	22	22	—



四、横置电加热辐射管的设计

确定了渗碳主炉总安装功率和各区功率分布后,下一步着手横置辐射管的设计。众所周知,由于设计、选材和制造等诸多方面的原因,国产辐射管使用寿命较低,据对部门厂家了解后的估计,可能平均半年左右,这不仅大大增加了生产成本,也极大地影响了产品质量的稳定。为提高加热元件寿命,笔者尝试从设计、选材和制作等方面作了一些探索,现分述如下。

1. 横置电加热辐射管介绍

横置辐射管由外套管、鼠笼式电热元件和引出棒等组成。它结构简单,更换方便,可实现不停气、不降温更换加热元件,单管承载功率大,允许表面负荷较高。其中外套管、电阻丝和耐火隔盘的设计及制造合理与否非常关键。

2. 外套管设计

外套管确定了外径为 $\phi 203\text{mm}$ 后,还须确定壁厚和长度。考虑要兼顾高的热强度和良好的散热性,壁厚确定为 $6\sim 6.5\text{mm}$,根据炉墙厚度和炉膛宽度,长度确定为 1848mm 。

根据市场调研和实际应用,确定采购四川化工机械厂(川化机)制造的 ZG4Cr25Ni20Si2 离心浇注热强钢,其特点是表层组织致密,为超细化组织结构,具有优化高温热强度、优异高温辐射能力和较长使用寿命。管内壁经机械加工,以保证尺寸精度。川化机外套管化学成分及力学性能略。

3. 电阻丝选择

由于采用外套管保护,不需考虑抗渗碳性能,所以可选择价格低、工作温度较高的铁-铬-铝系电阻丝。为了减少电热元件用量,又保证使用寿命,应尽可能选择允许表面负荷较高的优质材料。

根据市场调研和我公司使用情况比较,我们决定采用西安精密合金厂研制的 0Cr23A16CoZnRe 直条供货。其主要特点:高温下极高的抗氧化性能、高的使用温度、高的电阻率、比重轻、电阻温度系数小以及使用寿命长等一系列优良的电气和热工性能。其主要化学成分及性能略。

4. 鼠笼式电热元件功率计算

我公司自制连续炉因功率不同,需设计三种功率的辐射管,分别为 1 区 $20\text{kW}/\text{根}$, 2、3 区 $16.5\text{kW}/\text{根}$, 4、5 区 $22\text{kW}/\text{根}$ 。因篇幅限制,笔

者不在此论述辐射管联接方式、端电压及电阻丝直径计算等的推定过程,具体数据请见表 3。

表 3 各区辐射管的分布

区段	1 区	2 区	3 区	4、5 区
根数	6	6	9	各 3
接法	Y 型每相串联两根	Y 型每相串联两根	Δ 型每相串联三根	Y 型每相串联一根
单根端电压/V	110	110	110	146.7
丝径/mm	10	9	9	9

下面以 1 区辐射管加热元件计算为例。

要求:单根辐射管功率 $P = 20\text{kW}$,共 6 根,1 区总安装功率 120kW 。

计算:假定采用 Y 型接法,每相串联两根,可知端电压 $U = 110\text{V}$ 。

$$(1) \text{单管辐射管电阻: } R_{\text{根}} = \frac{U^2}{P} = \frac{110^2}{20} \times 10^{-3} \Omega = 0.605\Omega$$

$$(2) \text{单管电阻丝长度: } L_{\text{根}} = R \times \frac{S}{\rho_i} = R \times \frac{\pi d^2}{4(1+at)\rho_0}$$

$$\text{式中 } d = 10\text{mm}; \rho_0 = 1.41\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}; a = 1.51 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}; t = 1100^\circ\text{C}。$$

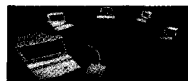
$$\text{则 } L_{\text{根}} = 0.605 \times \frac{3.14 \times 10^2}{4 \times 1.41 \times (1 + 1.51 \times 10^{-5} \times 1100)} \text{m} = 33.14\text{m}$$

$$(3) \text{因管内 U 型电阻丝长度} < \text{炉膛宽度 } 1.33\text{m}, \text{所以管内 U 型电阻丝对数 } n_{\text{根}} = \frac{33.14}{1.33 \times 2} = 12.5 = 13 (\text{对}), \text{那么管内电阻丝有效长度 } L_{\text{根}} = \frac{33.14}{13 \times 2} (\text{m}) = 12.7\text{m}, \text{所以每根辐射管实际表面负荷 } W_{\text{根}} = \frac{P}{\pi d L} = \frac{20 \times 10^3}{3.14 \times 33.14 \times 10^2} (\text{W}/\text{cm}^2) = 1.92 (\text{W}/\text{cm}^2)。$$

按照常规选择, 1100°C 时, 0Cr25A15 的 $W = 1.2 \sim 1.5\text{W}/\text{cm}^2$, 而国外普遍在 $W = 1.8 \sim 2.3\text{W}/\text{cm}^2$, 我们分析这与国外电热元件材质较好有关, 而西安精密合金厂的 0Cr23A16CoZnRe 丝材质很好(见前述), 实际使用表面负荷能达到 $1.94\text{W}/\text{cm}^2$ 以上, 我公司试用于进口箱式多用炉时其表面负荷达到了 $2.1\text{W}/\text{cm}^2$, 故笔者认为 $W_{\text{根}} = 1.94\text{W}/\text{cm}^2$ 是可行的。

5. 耐火隔盘的设计

由于我公司自制连续炉有三种功率辐射管, 电



阻丝直径分别为 $\phi 9\text{mm}$ 、 $\phi 10\text{mm}$ 的 U 型电阻丝，对数分别为 12 对、13 对、16 对。考虑通用性，我们以 $\phi 10\text{mm}$ 、16 对为基本参数进行耐火隔盘设计。

(1) 孔盘可以确定为 16 对孔，孔直径为 12mm，孔应比丝径大 1.5~2mm。

(2) 确定内、外侧孔半径，此时应考虑内侧孔太紧散热不好，管内芯温度易偏高；外侧孔太靠边也不行，一是可能因与管套间距过近电阻丝易搭壁短路，二是可能使隔盘强度不够而被边。

(3) 确定孔中心与盘中心的偏心距，因辐射管横置，电热体必须搁在外套管底边，造成盘边与管边不同距，只有孔中心移至管中心时电阻丝对管壁距离才会相同，以减少电阻丝搭边可能性，提高管四周热均匀性。笔者经反复演算，确定了上述关键尺寸（略）。

材料选用江苏宜兴优质高铝瑾青石，强度适中，高温下和急冷急热时不易破碎。

6. 电热元件制作及线路保护

由于 0Cr23Al6CoZnRe 属 Fe-Cr-Al 系，与 Ni-Cr 系电阻丝相比，硬度高、脆性大，冷加工绕制成形困难，焊接性不好。故我公司要求以直条形式供货，绕制 U 型时加热温度控制较低，采用低电流氩弧焊焊接，这样可以防止因温度过高而使晶粒粗化，加大丝脆性。另外在设计时应注意不使电热体有效部分进入炉墙，以防止辐射管局部过热而降低寿命。

在控制电路上采用英国欧陆表控温，实现自整定、自适用 PID 调节，加上变时基过零触发晶闸管调功器控制加热输出电源，使其变化平缓，设有通断开关量，升温时可采用斜率法控制升温电流大小，使辐射管电热元件受冲击电流小，不易过载。

五、主要技术指标数据分析

为了验证笔者渗碳主炉电加热系统是否合理，还应该对渗碳主炉进行九点连续测温，检查炉膛有效加热区温度偏差是否 $\leq \pm 5^\circ\text{C}$ ；应该在满载、空载时测定升温速率及输出功率大小，结合其使用寿命才能综合评价。

由于我公司无连续九点测温专用检查设备，笔者采用了 5 个区热电偶孔（炉顶中间）竖置 3 点测温 and 定碳孔（水平横置）3 点测温作为替代。渗碳主炉温度均匀性检测结果见表 4。

从温度检测结果表 4 分析中，可以认为炉温均匀性较好，变动量 $< \pm 5^\circ\text{C}$ ，达到了设计要求，可以满足工艺需要。

表 4 渗碳主炉测温数据 (°C)

温区	1 区	2 区	3 区	4 区	5 区
设定温度	880	910	920	910	830
修正值	-1.2	-2.3	-2.8	-3.4	-2
修正后温度	881.2	912.3	922.8	913.4	832
测量温度	883	914	923	913	834
修正值	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3
修正后温度	885.3	915.3	925.3	915.3	836.3
测量温度	881	911	922	908	830
修正值	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3
修正后温度	883.3	913.3	922.3	910.3	832.3
测量温度	878	907	922	913	828
修正值	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3
修正后温度	880.3	910.3	924.3	915.3	830.3
测量温度	-	913	925	914	833
修正值	-	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3
修正后温度	-	915.3	927.3	916.3	835.3
测量温度	-	912	924	909	831
修正值	-	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3
修正后温度	-	914.3	926.3	911.3	833.3
测量温度	-	912	924	910	835
修正值	-	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3
修正后温度	-	914.3	926.3	912.3	837.3
最大值	4.1	3	4.5	2.9	5.3
最小值	-0.9	-2	-0.5	-3.1	-1.7
变动量	5	5	5	6	7

六、实际使用寿命

连续炉渗碳主炉从调试烘炉开始，辐射管使用至今已有一年半，期间多次升温降温（室温—工作温度），未发现一根辐射管电热元件出现问题，寿命比我公司的老产品有大幅提高（老产品使用寿命在一年以下）。同时检查 9 点齿块均匀性，其产品表面硬度偏差、金相级别偏差、表面碳浓度偏差及渗碳层深偏差（统计数据分略）都在工艺允许范围之内。因此可以说横置辐射管设计是成功的，特别是在耐用度方面表现令人满意，为我公司节约了大量生产成本，值得进一步推广。

(20040810)