

应达（中国） 供图

铸造工业的感应加热

第四讲 感应熔炼电炉设计和感应器参数计算（中）

李韵豪

编者按：本刊从2020年第1期开始连续12期连载李韵豪撰写的《铸造工业的感应加热》系列讲座，主要涉及目前铸造工业应用最多的中频无心感应电炉，介绍各类铸铁、钢，以及有色金属中铝、铜及其合金感应熔炼炉和保温炉的选型，电炉的设计以及感应器参数的计算；金属坩埚、石墨坩埚的设计以及感应器参数的计算；专题讨论感应电炉的供电系统及变频电源主电路的计算、谐波治理和功率因数提高问题；各类无心感应电炉的耐火材料、筑炉工艺、感应电炉循环水系统的设计；感应电炉的环境因素、电气电磁安全防护、环境保护问题等，内容浓缩了作者几十年的宝贵从业经验，对铸造工厂感应电炉熔炼设备的规划、选型、操作、维修和管理，提供非常实用的参考与借鉴，敬请关注。

3 磁轭、短路环、消磁环、水冷圈的设计

3.1 磁轭的设计

（1）磁轭的作用

1) 磁轭有机械和电气的双重功能：①感应器线圈径向由磁轭固定、支撑，使其刚度大为提高，在倾料和承受由炉衬热膨胀引起的压力时也不会变形。②磁屏蔽。

2) 感应器线圈外侧的磁通较集中地沿着磁阻最小的磁轭通过，减少了磁通散射，降低了电炉钢结构件因磁通散射而引起的发热，感应器的电效率也

得到提高。

3) 磁轭可以降低电磁振动的振幅，提高炉衬寿命，并减少因电磁振动引起的噪声。

4) 德国ABP感应系统公司资料认为：根据计算，没有磁轭的坩埚式感应电炉产生的漏磁量是有磁轭的坩埚式感应炉的6倍或者更高，电磁泄漏区域内的磁场对人体器官可能造成伤害。瑞菲特·G的“在感应设备环境中的磁场”一文指出，由于磁轭的作用，即使是大功率感应熔炼电炉的漏磁也不会对人体器官造成伤害。

(2) 磁轭的材料 磁轭对硅钢片的要求如下:

1) 铁损低, 这是硅钢片质量最重要的指标, 要求较强磁场下磁感应强度高、基本没有磁时效。

2) 表面光滑、平整、厚度均匀。磁轭的叠装系数高, 冲片性好。表面绝缘膜的附着性、焊接性好。

硅钢片是一种含碳极低的硅铁软磁合金。用于磁轭的材料是硅含量(质量分数)2.8%~4.8%的高硅片。按生产加工工艺分为热轧片和冷轧片。冷轧片的磁性、尺寸精度、表面质量、叠片系数和冲片性远比热轧片好, 热轧片是不均匀氧化膜绝缘, 而冷轧片表面有绝缘层, 其绝缘电阻要大得多, 可以减少涡流损失, 降低铁损。冷轧硅钢片分为晶粒无取向和晶粒取向两种。与晶粒无取向相比, 晶粒取向硅钢片的磁性具有强烈的方向性, 在易磁化的轧制方向上具有优越的高磁导率与低损耗性能^①。

感应熔炼电炉磁轭采用普通级冷轧晶粒取向硅钢片, 可在表5中选取。

表5 感应熔炼电炉磁轭用冷轧电工钢晶粒取向硅钢片(普通级)技术性能

牌号 GB/T 2521.2 —2016	与IEC牌号对照 IEC60404-8-7: 2008	公称厚度 /mm	最大比总损耗 $P_{1.7-50}/W \cdot kg^{-1}$	最小叠片 系数
30Q120	—	0.30	1.20	0.955
30Q130	M130~30S5		1.30	
35Q145	M145-35S5	0.35	1.45	0.960
35Q155	M155-35S5		1.55	

硅钢片的牌号由3部分组成: 第1部分数字, 表示材料以毫米为单位时公称厚度的100倍; 第2部分字母Q表示取向的“取”字的汉语拼音首字母。如30Q120表示公称厚度0.30mm, 最大比总损耗 $P_{1.7-50}$ (单位为W/kg, 频率为50Hz, 波形为正弦的磁感应强度峰值为1.7T单位重量铁损值)为1.2W/kg的普通级冷轧晶粒取向硅钢片。适用中频感应熔炼电炉磁轭用的冷轧晶粒取向硅钢片, 国外同类的产品型号: 美国M-5、M-6; 英国30M5、30M6; 日本20Z140(Z10)、35Z155(Z11)。

① 冷轧硅钢片替代热轧硅钢片是国家即定的产业政策。1997年国家经贸委、机械工业部等几个部门联合发文把叠轧薄板作为生产方式落后、所制造的产品低劣的落后设备加以淘汰。2000年国家经贸委下达16号文件要求停止热轧硅钢片的生产, 2002年6月又就限期淘汰热轧硅钢片发表第34号公告, 规定具体时间停止生产热轧硅钢片, 不再使用热轧硅钢片作为原材料, 不再销售和采购含有热轧硅钢片的电器产品。

(3) 磁轭截面设计 以3600kW、300Hz、6t铸铁感应熔炼电炉的磁轭设计为例, 已知变频电源输出的中频电压1060V、感应器线圈匝数12匝。

1) 通过感应器外侧的磁通 Φ_m : 由法拉第电磁感应定律为

$$U_a' = 2\pi f \omega' \Phi_m / \sqrt{2} = 4.44 f \omega' \Phi_m$$

$$\text{就有 } \Phi_m = \frac{U_a'}{4.44 f \omega'} \quad (31)$$

式中 Φ_m ——通过感应器外侧的磁通(Wb);

U_a' ——感应器两端电压(V)。对于电容升压电路, $U_a' = 2U_a$, U_a 为变频电源输出的中频电压;

f ——频率(Hz);

ω' ——感应器匝数。

本例, $U_a = 1060V$, $U_a' = 2U_a = 2 \times 1060V$, $f = 300Hz$, $\omega' = 12$ 匝, 则

$$\Phi_m = \frac{U_a'}{4.44 f \omega'} = \frac{1060 \times 2}{4.44 \times 300 \times 12} = 0.133 \text{ (Wb)}$$

2) 磁轭中通过的磁通 Φ :

$$\Phi = k_1 \Phi_m \quad (32)$$

式中 Φ ——磁轭中通过的磁通(Wb);

k_1 ——漏磁系数, 该值反映感应器外侧磁通通过磁轭部分的分量, $k_1 = 0.8 \sim 0.9$ 。

本例, 取 $k_1 = 0.9$, 则

$$\Phi = k_1 \Phi_m = 0.9 \times 0.133 = 0.120 \text{ (Wb)}$$

3) 磁轭总截面 S_c :

$$S_c = \frac{\Phi}{K_c B} \quad (33)$$

式中 S_c ——磁轭总截面(m^2)

K_c ——磁轭叠片系数, 冷轧晶粒取向硅钢片的叠片表面经磷化处理的剪切层, 只需剪切断面涂绝缘漆即可。这种硅钢片的叠装系数很高, 可达 $K_c = 0.955 \sim 0.980$; 本例取 $K_c = 0.980$ 。

B ——磁通密度(T), B 为磁轭内磁感应强度的最大值, 采用GB/T 2521.1—2016

冷轧晶粒取向普通级硅钢片, 300Hz

时, $B=0.5\sim 0.6\text{T}$ 。本例, 取 $B=0.6\text{T}$ 。

为有利于导引磁力线, 提高导磁效率, 磁轭覆盖率设计为60%~65%。计算出感应器线圈外围周长 E_L , 按周长 E_L 的60%~65%, 得出磁轭的总叠片厚度。根据总厚度, 可确定磁轭的条数。再按计算出来的磁轭总截面积, 除以磁轭条数, 得到单条磁轭的截面积, 在单条磁轭的叠片厚度确定后, 磁轭的片宽也就定下来了。

$$\text{则 } S_c = \frac{\Phi}{K_c B} = \frac{0.120}{0.98 \times 0.6} = 0.204 (\text{m}^2)$$

4) 单条磁轭的截面积 A_{F1} :

$$A_{F1} = \frac{S_c}{m_F} \quad (34)$$

式中 A_{F1} ——单条磁轭的截面积 (m^2) ;

m_F ——磁轭的条数 (条)。

根据炉容、紧固在感应器线圈外侧硬木夹柱的分布、磁轭片宽及叠片的厚度、线圈引出线具有的空间, 来合理确定磁轭的条数。磁轭沿感应器线圈外围应均匀分布, 引出线两侧磁轭距离过近, 会使磁力线分布不均匀, 造成炉料尤其是导电坩埚 (如铁坩埚、石墨坩埚) 的坩埚壁局部过热。另外, 还应考虑均布的单条磁轭分配的角度为整数, 这样会给制图、加工炉壳和机械装配带来方便。

本例, 磁轭条数取 $m_F=8$ 条, 则

$$A_{F1} = \frac{S_c}{m_F} = \frac{0.204}{8} = 0.0255 (\text{m}^2)$$

5) 确定单条磁轭的叠片厚度 E_a 和片宽 E_b :

计算感应器线圈外侧圆周长 E_L 为

$$E_L = \pi (D_1 + 2a + 2\delta_j) \quad (35)$$

式中 E_L ——感应器线圈外侧圆周长 (m) ;

D_1 ——感应器线圈内径 (m) ;

a ——线圈铜管高度 (m) ;

δ_j ——线圈铜管与磁轭间隙 (m)。

本例, $D_1=1.165\text{m}$, $a=0.046\text{m}$, $\delta_j=0.024\text{m}$,

则

$$E_L = \pi (D_1 + 2a + 2\delta_j) = \pi (1.165 + 2 \times 0.046 + 2 \times 0.024) = 4.10 (\text{m})$$

求叠片总厚度 E_c :

$$E_c = E_L F_f \quad (36)$$

式中 E_c ——磁轭叠片总厚度 (m) ;

F_f ——磁轭覆盖率。

本例, $F_f=0.625$, 则

$$E_c = E_L F_f = 4.10 \times 0.625 = 2.562 (\text{m})$$

单条磁轭叠片厚度 E_a :

$$E_a = \frac{E_c}{m_F} = \frac{2.562}{8} = 0.320 (\text{m}) \quad (37)$$

单条磁轭叠片宽度 E_b :

$$E_b = \frac{A_{F1}}{E_a} = \frac{0.0255}{0.320} = 0.08 (\text{m}) \quad (38)$$

即单条磁轭截面尺寸: $0.320\text{m} \times 0.08\text{m}$ 。

如同一般感应器线圈铜管必须通水冷却一样, 磁轭也需要通水冷却。

以上磁轭的条数以及截面设计就是在水冷条件下得出的。在中频条件下完全依靠加大磁轭截面会造成硅钢片过度消耗, 炉体自重增加, 电炉结构设计也不允许。只有小容量低功率密度炉子的磁轭可以不通水冷却, 但磁通密度值必须降低。通水冷却和不通水冷却磁轭的外表面任意点温升极限值与炉子炉架钢外壳一样, 不应超过75K。磁轭温度的测量使用准确度不低于2.5级的表面温度计。通水冷却的磁轭表面温升以进水温度为基准计算, 非水冷的以环境温度为基准计算。

出线端两侧磁轭的叠片厚度有时比其他位置设计的稍宽一些, 这对减少磁轭的发热有好处。由于出线端两侧磁轭距离大电流母线较近, 也会引起磁轭的表面感应发热。加强这两条磁轭的水冷也是很有必要的。

(4) 磁轭高度的确定 早期文献描述金属熔炼过程中熔液的磁场分布是通过理论推演近似表达的。近年来, 借助计算机数值计算可以准确地得到熔炼过程中熔液的电磁场分布、磁力线路径及炉料熔液涡旋方向, 据此确定炉料熔液与感应器线圈、磁轭的相对位置, 确定感应器线圈的高度及磁轭的高度, 可以通过磁轭最大限度地收集感应器线圈两端的散射磁场。电磁能量分布与金属液涡旋方向如图4所示^[13-15]。

磁轭高度的确定与电炉整体性能优劣关系很大。磁轭高度 L_{ce} 一般取感应器线圈高度 H_1 的1.35~1.45倍, 即

$$L_{ce} = (1.35 \sim 1.45) H_1 \quad (39)$$

本例, 磁轭高度 L_{ce} 取感应器线圈高度 H_1 的1.4倍, $H_1=1.6\text{m}$, 则

$$L_{ce} = 1.4 H_1 = 1.4 \times 1.6 = 2.24 (\text{m})$$

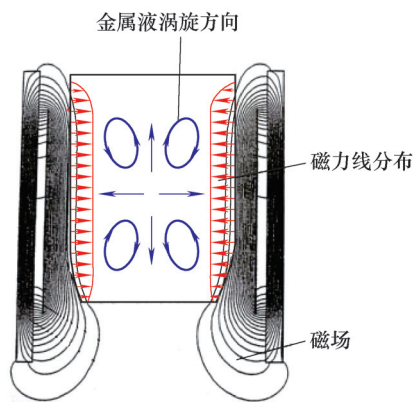


图4 电磁能量分布与炉料熔液涡旋方向

磁轭高度确定后,磁轭与感应器有效线圈及熔池之间相对位置就确定了,水冷圈的匝数及占用高度也就定了;短路环的位置预留后,熔池底部到炉底钢板之间的高度也就定了。

熔池底部到炉底钢板高度为

$$L_m = L_{ce} - F_x - H_2 \quad (40)$$

式中 L_m ——熔池底部到炉底钢板高度 (m);

L_{ce} ——磁轭高度 (m);

F_x ——磁轭顶部到熔池液面高度 (m), 一般取 $F_x = (0.1 \sim 0.15) L_{ce}$;

H_2 ——液态炉料高度 (m)。

本例,取 $F_x = 0.125 L_{ce}$, 则

$$L_m = L_{ce} - F_x - H_2 = 2.24 - 0.125 \times 2.24 - 1.323 \approx 0.64 \text{ (m)}$$

即熔池底部到炉底钢板之间的高度设计为 0.64m。

GB 50056—1993《电热设备电力装置设计规范》规定,母线电流大于1500A时,在附近0.3m范围内不应有钢铁构件。炉子的钢外壳、炉底钢板、炉台钢板与感应器保持适用距离,对减少线圈周围钢铁构件的发热至关重要。

(5) 磁轭总重量

1) 单条磁轭重量:

$$g_c = \rho_{ce} E_a E_b L_{ce} K_c \quad (41)$$

式中 g_c ——单条磁轭重量 (kg);

ρ_{ce} ——冷轧晶粒取向硅钢片用于计算磁性能、叠装系数的约定密度, $\rho_{ce} = 7650 \text{ kg/m}^3$;

E_a ——单条磁轭叠片厚度 (m);

E_b ——单条磁轭叠片宽度 (m)。

将已知各参数值代入式 (41), 得

$$g_c = \rho_{ce} E_a E_b L_{ce} K_c = 7650 \times 0.320 \times 0.08 \times 2.24 \times 0.980 \approx 430.0 \text{ (kg)}$$

2) 磁轭硅钢片总重量:

$$g_{cz} = m_f g_c \quad (42)$$

式中 g_{cz} ——炉子磁轭硅钢片总重量 (kg);

m_f ——炉子磁轭条数 (条)。

本例, $m_f = 8$ 条, 则

$$g_{cz} = m_f g_c = 8 \times 430.0 = 3440 \text{ (kg)}$$

(6) 磁轭功率损耗及单位表面积散热量校验

1) 单条磁轭的冷却表面积 S :

$$S = 2L_{ce} (E_a + E_b) \quad (43)$$

2) 自然冷却的单条磁轭允许发热条件:

$$\frac{P_{co} g_c}{S} \leq 7.5 \times 10^2 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (44)$$

式中 P_{co} ——单位磁轭损耗 (W/kg)。

同一种规格的硅钢片,不同的磁通密度,工作在不同的频率下,会有不同的单位损耗。

计算出的结果如不能满足式 (44)、或选用较小的磁通密度值计算 (也就是增大磁轭冷却表面积) 时,应采用或改善水冷方式。

3) 磁轭总损耗功率 P_c :

$$P_c = g_{cz} P_{co} \quad (45)$$

3.2 水冷圈、短路环、消磁环的设计

水冷圈、短路环、消磁环与感应器线圈及磁轭、炉壳之间相对位置如图5所示。

(1) 水冷圈的设计 水冷圈又称冷却环。由

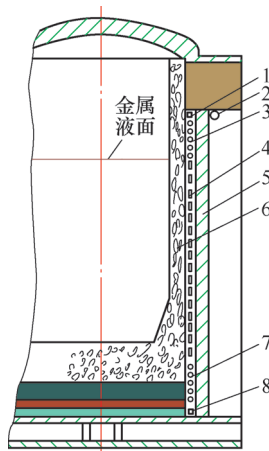


图5 感应器线圈、磁轭、水冷圈、短路环、消磁环相对位置

- 1、8. 短路环 2. 消磁环 3. 上水冷圈 4. 感应器有效线圈 5. 磁轭
6. 炉衬 7. 下水冷圈

于磁轭的高度高于感应器有效线圈,有效线圈的上下部位就用水冷圈来填补。上下水冷圈只通水、不通电,电气处于开路状态。上下水冷圈的内径取感应器线圈内径 D_1 。由于所处位置不同,上下水冷圈的作用也稍有区别:上水冷圈与感应器有效线圈一起将打结的炉衬耐火材料网拦,给炉衬提供机械支撑,可以减少炉衬径向温度梯度,温度分布均匀,降低该部位炉料的热膨胀,使感应器有效线圈上部没有线圈部位的炉衬得以冷却,防止可能出现的横向裂纹。下水冷圈已到达炉底,其主要作用也是网拦炉底部位的耐火材料。与上水冷圈一样,下水冷圈也为磁轭阻隔了耐火材料传过来的较高温度。下水冷圈不是为降低炉底钢板温度而设置的,按照GB/T 10067.31—2013规定,炉底钢板表面温升200K,这个极限温度是炉底耐火材料厚度保证的。

(2) 短路环、消磁环的设计 短路环主要作用是压缩磁场和磁屏蔽。短路环的内径与感应器线圈内径 D_1 及上下水冷圈的内径相同。感应器的主磁通 Φ_1 通过上下短路环时感应的电流形成磁势产生磁通 Φ_2 ,短路环磁通 Φ_2 与感应器主磁通 Φ_1 相差 180° ,实际通过短路环的磁通 Φ_{LC} 为漏磁通, $\Phi_{LC} = \Phi_1 - \Phi_2$ 。设置短路环大大减少了漏磁通对炉底钢板与炉口平齐的钢板产生的涡流发热损耗,提高了电效率^[14-15]。

符合规范设计的磁轭高度可以保证水冷圈有足够的高度,此时上下短路环可与水冷圈相邻。不合规范的过短的磁轭设计,使水冷圈与感应器有效线圈距离太近,这时水冷圈与感应器线圈则必须拉开一定距离,因此只好把上水冷圈埋在“炉领”,而下水冷圈埋在炉底,否则短路环的漏磁通加大,造成短路环感应电流很大,同时也增大“炉领”、炉底钢板的涡流发热。

短路环虽然减少了漏磁通,但漏磁通依然残留,它沿着电炉钢壳内侧流动并使钢壳发热。为此不少电炉生产厂家在钢壳上部内侧再放置一短路环,称之为消磁环。消磁环的作用主要是为进一步减少漏磁,并使电炉钢壳的涡流发热降至最低。消磁环上侧与磁轭上侧处于同一平面,以满足炉衬上部铺耐火砖的需要。

为了减小损耗,感应熔炼电炉的短路环、消磁环应该由磁导率低而电导率高的材料制成,纯铜材

料的磁导率与真空磁导率接近,相对磁导率低至 $\mu_r = 0.999\ 991\ 2$,导电性良好,仅次于银,是制作短路环、消磁环的首选材料。奥氏体不锈钢为弱磁性材料,只有在真空状态下才有可能完全无磁,而且奥氏体不锈钢钢管在冷加工过程中也会产生磁性,相对磁导率也较低,作为导体也可以导电,与铜材比较,奥氏体不锈钢材料价格也较低,因此奥氏体不锈钢也被一些厂家充当电磁屏蔽材料。

根据水冷圈的作用,水冷圈最好采用奥氏体不锈钢管制作。但由于铜管易于焊接,不少厂家宁可采用成本更高的铜管来制作。还有一些电炉生产厂家将上水冷圈与感应器线圈用同一规格铜管同一螺旋方向绕制,与感应器线圈制成一整体结构,这样在坩埚烧结时,将上水冷圈与感应器线圈临时连接通电后,使位于上水冷圈的坩埚同时烧结,提高了坩埚的整体烧结质量。

(3) 炉壳 把炉壳放在这一讲来论述,是因为炉子的钢壳对于磁轭、短路环、消磁环没有捕集到的漏磁通,钢壳就成为防止杂散磁场逸出炉壳之外、减少电磁辐射的最后一道屏障。带磁轭的钢结构炉子的外壳分为框架式和钢壳式。对于大额定容量和高功率密度感应电炉,推荐采用钢壳式结构。

炉子除了外磁路经磁轭闭合的结构外,还有一种金属屏蔽式结构。由于金属在电磁场中的发热量取决于自身的电导率和磁导率,因此可以采用纯铜板置于感应器线圈与钢炉壳之间作为磁屏蔽,以减少炉壳钢板的发热。由于这种结构要消耗大量铜材,又使设备复杂化,故未得到推广。为降低成本,感应熔炼电炉将钢壳加装铜屏蔽层改为铸铝壳体,过去很长一段时间内竟得到普遍应用。用铸铝外壳炉时为减少涡流,壳体必须沿纵向剖开。受强度和刚度所限,铸铝外壳熔炼炉的额定容量就不可过大。但到后来,这种铸铝外壳的炉子容量越做越大,甚至5t容量的炉子竟然也敢采用铸铝外壳。工信部工产业[2010]第122号公告《机械冶金、建材行业淘汰落后生产工艺装备和产品指导目录(2010年)》规定,无磁轭 $\geq 0.25t$ 铝壳无心中频感应电炉,到2015年“淘汰”,一律不得转移、生产、销售、使用和采用。2013年第26号公告发布的《铸造行业准入条件》也明确规定铸造工厂不得采用0.25t及以上无磁轭的铸铝外壳中频感应电炉。

4 感应熔炼电炉工频、中频电缆、铜母线的选择与计算

4.1 感应熔炼电炉工频、中频电缆、母线的选择

感应熔炼电炉工频电缆、母线是指从整流变压器阀侧经低压开关柜到变频电源输入端的一段载流导线，目前这一段电缆、母线多采用铜导体。中频电缆、母线指的是从变频电源输出端到谐振回路这一段载流导体，目前使用的主要是铜硬母线（铜排）。GB 50056—1993《电热设备电力装置设计规范》指出：固定敷设的中频线路宜用铝导体。GB 50217—2018《电力工程电缆设计标准》中规定，除电压等级1kV以上、工作电流大、需增多电缆根数、振动场具有爆炸危险或对铝有腐蚀的工作环境等情况下的电缆应采用铜导体外，工频电缆、母线材质可选用铜、铝或铝合金（8000系列）导体。最近，国务院发展研究中心专家在谈到要理性看待“以铝代铜”问题时指出：“以铝代铜”要分场合，在导电性、安全性、可靠性要求较高的场合，该用铜的地方必须用铜，但中频、高频线路应优先采用铝。

关于感应熔炼电炉工频、中频电缆、母线以铝（铝合金）代铜问题，目前我国120多个产业中有110多个使用铜产品，其消费水平与GDP的线性相关系数高达0.9。铜在世界范围内，蕴藏量相对较少，而且已经开采了数千年，特别是2002年以来，由于世界性资源紧张，铜资源作为金融的衍生产品，被某些国家基金所关注而成为期货投资热点，大量资金涌入，推动了铜及其产品的轮番涨价。

相反，铝资源在国内的储量相对较高，国内铝材的生产技术已达到电工级铝的水平，只要在导电截面选择、附件选择、导体连接（铜铝过渡对接）敷设方面加以注意，“以铝代铜”在规定范围内是完全可行的。铝合金电缆（8000系列）最早应用于美国，自1968年研发出来以后，在北美国家市场占有率达到80%。近年来，一些国际知名感应电炉生产厂家的中频电缆多采用8000系列铝合金材质，对此人们知之甚少，当然跟这些厂家对此不刻意宣传有关。

铜、铝是仅次于金、银的优良导体。电工铜（软态）20℃电阻率为 $1.7241 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ，电导率为100%IACS（20℃）。电工铝（硬态、软态）

的电阻率为 $2.8264 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ，电导率为61%IACS（20℃）。而AA8000系列电工铝合金的电阻率为 $2.7900 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ，电导率为61.8%IACS（20℃）。另外，电工铜、铝的密度分别为 $8.89 \times 10^3 kg/m^3$ 、 $2.70 \times 10^3 kg/m^3$ ，电工铝合金的密度为 $2.71 \times 10^3 kg/m^3$ （均为20℃时）。电工铝（铝合金）的抗拉强度为电工铜的1/2左右，屈服强度、伸长率与铜的下限值接近。

我们知道，导体直接与载流量相关的参数是电导率，直接与电压损耗相关的参数是电阻率。我们把铜与铝的电导率和电阻率加以比较，当电工铝合金截面为电工铜导体（电缆、母线）截面的1.5倍时，在相同温度下，两者的载流量与电压损耗基本相同。

感应熔炼电炉工频和中频电缆、母线选用原则：

- 1) 载流导体必须满足负载实际最大电流。
- 2) 载流导体应保证在额定功率条件下，网路电压损耗在允许的范围内：通常从整流变压器阀侧经低压开关柜到变频电源进线端、变频电源输出端到谐振回路的电压损失不得超过5%。
- 3) 载流导体安装应确保运行安全可靠、施工维护方便。
- 4) 节约电能（经常费用），尽量减少网络有功功率损耗；节约投资（初期费用）和有色金属。网路尽可能短，尤其是中频回路。
- 5) 只要符合条件，并解决铜、铝过渡接头问题，则尽可能采用铝或铝合金导体，尤其是中频回路。
- 6) 大电流母线允许温升（表面温升）35K。

4.2 电工铜、铝、铝合金的经济电流密度

感应熔炼电炉工频和中频电缆、母线的截面按经济电流载流量来计算。载流导线的经济载流量是国家根据铜、铝、铝合金的消耗量，初次建设投资、炉子年最大负荷利用小时数、使用年限及运行时的电能损耗等因素，通过技术经济比较后作出的规定。IEC—60287：2018《电缆载流量计算》是额定载流量计算国际公认的标准。JB/T 10181.32—2014/IEC60827-3-2：1995《电缆载流量计算第32部分：运行条件相关电力电缆截面的经济优化选择》可作为确定经济电流密度时的参考。

以经济电流密度选择电缆、母线截面按式(46)：

$$S_{ec} = \frac{I_{\max}}{J_{ec}} \quad (46)$$

式中 S_{ec} ——电缆、母线截面积 (mm^2)；
 I_{\max} ——通过导体最大负荷电流 (A)；
 J_{ec} ——不同班制年最大负荷利用小时数规定的经济电流密度 (A/mm^2)。

我国现行规定经济电流密度参见表6。

表6 经济电流密度 (A/mm^2)

导体材料	年最大负荷利用小时数		
	一班制 $\leq 3000\text{h}$	两班制 $3000 \sim 5000\text{h}$	三班制 $> 5000\text{h}$
铜裸母线	3.00	2.25	1.75
铝裸母线	1.65	1.15	0.90
铜芯电缆	2.50	2.25	2.00
铝芯电缆	1.92	1.73	1.54

大多数铸造厂感应电炉作业都属间断性生产、两班制，按GB/T 51266—2017《机械工厂年时基数设计标准》中工业炉窑钢铁金属熔炼炉的感应电炉的规定，公称年时基数为3680h。因此，铜、铝裸母线的经济电流密度应分别取 $2.25\text{A}/\text{mm}^2$ 、 $1.15\text{A}/\text{mm}^2$ ，铜、铝工频和中频电缆的经济电流密度应分别为 $2.25\text{A}/\text{mm}^2$ 、 $1.73\text{A}/\text{mm}^2$ 。

表6被不少文献引用，但出处不详。也有文献对此表规定的数字提出异议。JB/T 9692.1—1999《工频无心感应熔铁（钢）炉和铁保温炉》中曾规定，大电流回路铜连接母线和铜电缆的电流密度可根据冷却方式参照下面规定选择：自冷铜母线 $1.5 \sim 2.0\text{A}/\text{mm}^2$ ，具体数据可按尺寸和布置方式确定。这个标准对铜裸导线与电缆电流密度没有加以区分，关于铝及铝合金母线和电缆的电流密度，标准中也没有规定。用铝及铝合金代铜的问题，相关文献有两种意见：一种是同截面铜母排及电缆的载流量比铝及铝合金的载流量高30%；另一种是50%。我们取50%，即电工铝、铝合金母线及电缆的电流密度为 $1.00 \sim 1.33\text{A}/\text{mm}^2$ 。笔者过去习惯用的铝及铝合金电流密度这个系数，与年最大负荷利用小时数 $> 5000\text{h}$ （三班制）提供的数据是比较接近的。但以下举例我们还是按表6的数据设计。

4.3 工频电缆的选择与计算

举例：变频电源功率3600kW，频率300Hz，

进线电压 $2 \times 660\text{V}$ 双整流，总直流电流计算值4658.4A，每个整流桥直流电流计算值 $I_d=2795.0\text{A}$ （总直流电流值乘以0.6得出，是考虑每个整流桥可能有60%和40%的不平衡）。选择整流变压器阀侧经低压开关柜至变频电源输入端的电缆。电缆导体：电工铜。现场作业条件：两班制。

(1) 交流线电流 I'

$$I' = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{dq} \quad (47)$$

式中 I' ——每组整流桥的交流线电流 (A)；

I_{dq} ——每组整流桥输出直流电流 (A)；

本例， $I_{dq}=2795.0\text{A}$ （计算值），则

$$I' = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{dq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times 2795.0 = 2282.1 (\text{A})$$

(2) 输入端计算交流电流 I

$$I = KI' \quad (48)$$

式中 I ——每组整流桥输入端计算交流电流 (A)；

K ——电缆安放环境系数，取 $K=1.1$ 。

则 $I = KI' = 1.1 \times 2282.1 = 2510.3 (\text{A})$

(3) 铜芯电缆截面积 S_{tx}

$$S_{tx} = I/J_{ec} \quad (49)$$

式中 S_{tx} ——铜芯电缆截面积 (mm^2)；

J_{ec} ——经济电流密度 (A/mm^2)。

本例，查表6，取 $J_{ec}=2.25\text{A}/\text{mm}^2$ ，则

$$S_{tx} = I/J_{ec} = 2510.3/2.25 = 1115.7 (\text{mm}^2)$$

(4) 铜芯电缆根数 N

$$N = S_{tx}/S_0 \quad (50)$$

式中 N ——铜芯电缆根数 (根)；

S_0 ——铜芯电缆单芯截面积 (mm^2)。

本例，取 $S_0=185\text{mm}^2$ ，则

$$N = S_{tx}/S_0 = 1115.7/185 = 6.0 (\text{根})$$

选取电缆：YJV0.6/1kV3 \times 185+1 \times 95架空用交联聚乙烯绝缘、聚氯乙烯护套四芯铜电缆6根并联。

4.4 中频母线的计算

接前例，3600kW、300Hz变频电源输出端与并联谐振回路的连接导体，采用硬母线（铜排）。

(1) 中频电流基波值 I_{a1}

$$I_{a1} = \frac{P \times 10^3}{U_d \cos \varphi} \quad (51)$$

式中 I_{a1} ——中频电流基波值 (A)；

P ——变频电源额定功率 (kW) ;

U_d ——直流电压 (V) ;

φ ——晶闸管逆变超前角, 国产晶闸管逆变触发超前角 ($^\circ$) 。

本例, $P=3600\text{kW}$, $U_d=840\text{V}$, 300Hz 时, $\varphi\approx 32^\circ$, 则

$$I_{a1} = \frac{P \times 10^3}{U_d \cos \varphi} = \frac{3600 \times 10^3}{840 \times \cos 32^\circ} = 5137.4 \text{ (A)}$$

(2) 自冷铜母线 (铜排) 有效导电截面积 S'

$$S' = I_{a1} / J_{ec} \quad (52)$$

式中 S' ——铜排有效导电截面积 (mm^2) ;

J_{ec} ——经济电流密度 (A/mm^2) 。

本例, 查表6, 取 $J_{ec}=2.25\text{A}/\text{mm}^2$, 则

$$S' = I_{a1} / J_{ec} = 5137.4 / 2.25 = 2283.3 \text{ (mm}^2\text{)}$$

(3) 求铜排的电流透入深度 Δ_1

$$\Delta_1 = 503 \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu_r f}} \quad (53)$$

式中 Δ_1 ——铜排的电流透入深度 (m) ;

ρ_1 ——电工铜室温至 80°C 时的平均电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$) ;

μ_r ——铜排的相对磁导率, $\mu_r \approx 1$;

f ——变频电源标称频率 (Hz) 。

本例, $\rho_1 = 2 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, $f=300\text{Hz}$, 则

$$\Delta_1 = 503 \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu_r f}} = 503 \sqrt{\frac{2 \times 10^{-8}}{1 \times 300}} = 0.0041 \text{ (m)}$$

即 $\Delta_1 = 4.1\text{mm}$

(4) 铜排宽度 b' 、厚度 a 的选择

1) 铜排宽度 b' 的选择:

$$b' = \frac{S'}{\Delta_1} \quad (54)$$

式中 b' ——铜排的宽度 (mm) 。

$$\text{则 } b' = \frac{S'}{\Delta_1} = \frac{2283.3}{4.1} = 556.0 \text{ (mm)}$$

由于现场安装条件的限制, 铜排一般不可太宽, 如本例铜排宽度达 556mm , 显然是不行的, 为此可根据现场条件采用“双并”、“三并”的设计。

按“双并”布线时, 铜排的宽度可用3块铜排, 每块铜排宽度 b_3 为 $b'/3$, 即 $b_3 = b'/3 \approx 185\text{mm}$ 。

按“三并”布线时, 铜排的宽度用5块铜排, 每块铜排宽度 b_5 为 $b'/5$, 即 $b_5 = b'/5 \approx 111\text{mm}$ 。

“四并”时, 需要7块铜排, 并接的铜排过多, 现场往往不好布置, 一般较少使用, 如有需要, 则在“三并”布线情况下增加铜排宽度即可。

2) 铜排厚度 a 选择: 根据电磁场理论, 当铜排厚度 a 为 $\frac{\pi}{2} \Delta_1$ 时, 其电阻率最小, 铜排上功率损耗也最小, 在此基础上增大厚度, 不会明显降低损耗, 只能造成铜材的浪费。在工程应用上, $a \geq 1.35 \Delta_1$ 就可以了。多个铜排并接时中间铜排双面导电, 如图6所示, 铜排标号2, 由于该铜排两侧都有电流, 故该铜排最佳厚度为 Δ_1 的 π 倍, 在工程应用上取 $a \geq 2.7 \Delta_1$ 就可以了。

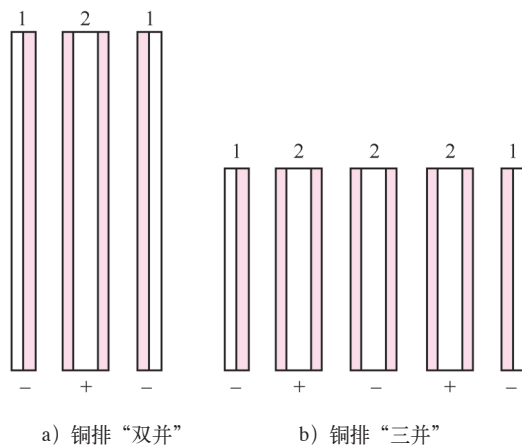


图6 多个铜排并接时中间铜排双面导电

图6中, 标号“1”铜排的厚度: $a = \frac{\pi}{2} \times \Delta_1 = 6.5\text{mm}$ 。

在工程应用时: $a = 1.35 \Delta_1 = 5.5\text{mm}$ 。

标号“2”铜排的厚度: $a = 13\text{mm}$ 。

在工程应用时: $a = 11.0\text{mm}$ 。

铜排布置规范: GB 50056—1993《电热设备电力装置设计规范》中规定: 在中频回路中采用矩形母线时应符合下列要求:

1) 平行布置的多片母线, 应宽面相对, 相邻母线为不同的极性。

2) 母线的夹板、隔板采用绝缘浸渍处理的硬木、塑料或层压绝缘板等材料制作。

3) 不同相 (不同极) 矩形母线间最小净距应符合规范, 参见表7。

对于一般铸造工厂, 变频电源频率一般在 $150 \sim 1500\text{Hz}$, 我们在确定铜排间最小净距时, 推荐以下尺寸: 500V 以下时: $10 \sim 15\text{mm}$; $750 \sim 1000\text{V}$ 时: $15 \sim 20\text{mm}$; 1500V 时: $20 \sim 25\text{mm}$; 2000V 时: 25

表7 铜排最小间距净值 (mm)

导体装置场所	50Hz		500~10 000Hz	
	<0.2kV	0.2~1.0kV	<1.6kV	1.6~3kV
干燥无尘	10	15	15~20	20~30
干燥多尘 (非导电尘)	12	20	20~25	25~35

~30mm; 3000V时: 35~40mm。干燥无尘时取下限, 干燥多尘 (非导电尘) 时取上限; 频率低时取下限, 频率高时取上限。

4.5 感应熔炼电炉中频电缆、母线的几个问题讨论

(1) 同轴电缆 所谓同轴电缆是指电缆的往线和返线由同轴的两层导线绕成, 内腔有充填物, 两层导线之间有电绝缘, 外部有防护覆盖层, 同轴电缆的导电材料利用率高、感抗小, 但只有在高频率、小电流场合比较适用, 用于感应熔炼电炉的中频电流导电其实并不适用。因为载流导线的厚度是一定频率下该导体电流透入深度的 $1.35 \sim \pi/2$ 倍, 对于目前低中频范围、大功率、大电流设备, 电缆生产厂家无法提供这种产品。

(2) 工频电缆、母线 由于熔炼电炉的变频电源的进线线电压基本都<1kV, 因此工频电缆和母排在大多数场合既可以采用铜导体, 也可以用铝或铝合金导体。但铝及铝合金母线很少使用, 除了架设较麻烦外, 铝及铝合金母线的铜、铝过渡母线目前市场上不易找到。铝及铝合金工频电力输送电缆目前在市场上也难找到架空用“3+1”“3+2”类型的系列产品。

当前现场工频电缆、母线基本上是用铜导体, 且以铜电缆为主。由于铝电缆的铜铝过渡端子已有质量可保证的产品, 只需铝及铝合金工频电力输送电缆形成系列, 工频电缆用铝及铝合金取代铜的问题, 将会迎刃而解。

(3) 中频电缆、母线 目前, 国内电缆厂生产的无铠装四芯铝电缆, 可用于中频电流输送。考虑到不损伤电缆的绝缘和保护层, 电缆弯曲的曲率半径不应小于一定值。为此, 一般避免采用单根芯线截面>185mm²的电缆。

目前, 国内铝芯四芯电缆主要有两种规格可供选择:

1) YJLY0.6/1kV (GB/T 12706.1—2008)。

导体: 紧压圆形19根, ϕ 2.95mm。

绝缘: 交联聚乙烯 (XLPE), 允许工作温度90℃, 允许短路温度250℃。

护套: 聚氯乙烯 (PVC)。

2) VLV0.6/1kV (GB/T 12706.1—2008)。

导体: 绞合圆形37根, ϕ 2.03mm, 或紧压圆形19根, ϕ 2.95mm。

绝缘: 聚氯乙烯 (PVC)。

护套: 聚氯乙烯 (PVC)。

导体截面 $\leq 300\text{mm}^2$ 时, 允许工作温度70℃, 允许短路温度160℃。导体符合GB/T 3956—2008及IEC60228: 2004。铝杆符合GB/T 3954—2014中的IA60、IR50、H12。

与铝、铝合金电缆相关的有如下几个标准:

GB/T 5585.1—2018 《电工用铜、铝及其合金母线第1部分: 铜及铜合金母线》。

GB/T 5585.2—2018 《电工用铜、铝及其合金母线第2部分: 铝和铝合金母线》。

ASTM B 800-05 (2011) 《电气用退火及中温回火8000系列铝合金导线标准规范》。

GB/T 30552—2014 《电缆导体用铝合金线》。

GB/T 14315—2008 《电力电缆导体用压接型铜铝接线端子和连接管》。

IEC 61238-1: 2003 《连接接头标准》。

NB/T 42051—2015 《额定电压0.6/1kV铝合金导体交联聚乙烯绝缘电缆》。

GB/T 9327—2008 《额定电压35kV ($U_m=40.5\text{kV}$) 及以下电力电缆导体用导接式和机械连接金具试验方法和要求》。

GB/T 3956—2008 《电缆的导体》。

由于篇幅所限, 本讲只举例介绍了工频和中频铜母线的选择与计算。中频铝芯电缆的选择与计算我们留待后续章节介绍。

(4) 水冷母线 水冷母线有平板、管状、水冷电缆几种类型, 母排侧加焊矩形截面水冷管即平板式水冷母线。

1) 管状母线: 分为矩形和异形。

2) 水冷电缆:多数采用编织软铜绞线穿在两端封焊的夹布橡皮套管内并通水冷却。在允许电压损失和功率损耗的情况下,采用水冷母线以提高母线的电流密度。在电流特别大的场合,如谐振回路等,自冷母线无法实现安全载流的情况下,采用水冷母线是必要的,但它是以增加电耗为代价的。感应熔炼电炉由于炉体倾动需要,谐振回路与感应器线圈之间的电缆连接有一段是可挠的,这一段也不得不采用水冷母线。

只要能利用自冷母线的场合一定要用自冷母线(按经验电流密度选择母线导电截面)。某些电炉生产厂家为降低制造成本,在应该用自冷母线的地方滥用水冷母线,使用户电耗增加,给用户带来经济损失。

5 感应熔炼电炉感应器线圈制作工艺

5.1 感应器线圈工艺设计原则和制作规范

感应器是感应熔炼电炉的重要部件,变频电源通过感应器把有功功率传递到被加热、熔化的金属炉料中。GB/T 10067.3—2015和GB/T 10067.31—2013规定了感应器线圈工艺设计原则和制作规范,综述如下:

1) 感应器线圈在满足隔热和绝缘条件下,应与被加热炉料之间的间隙尽可能小,各匝应尽可能相互靠近,以提高感应器的电效率。

2) 感应器线圈的导体采用低电阻、不低于T2的铜材制造,应有大于其工作频率的透入深度和满足机械强度的足够厚度。导体的表面应平整光滑,无砂眼、裂纹、褶皱、起层和起泡等缺陷。

3) 感应器线圈大多采用矩形、方形或圆形截面水冷铜管。低频时,为保证电效率,可采用偏心截面的异形水冷铜管。多数情况下,都采用矩形、方形,而较少采用圆形截面铜管,这是因为矩形、方形截面与圆形截面相比,在相同的电流透入深度时有较大的截流面积和同等宽度弦面积之别。

4) 当铜管由于长度所限而必须焊接加长时,应制定相应的焊接工艺和严格的检验规则,以确保可靠导电和冷却水不渗漏。

5) 在感应器线圈绕制成形后,应根据其使用要求进行绝缘处理,所用绝缘层及绝缘漆的温度等级应在各产品标准中具体规定,以保证具有规定的绝

缘性能和使用期限。

6) 在感应器线圈绕制成形后,应进行水压试验。

7) 感应器线圈制造尺寸偏差应符合设计图样的要求。

8) 感应器线圈两端头和中间抽头的连接板与线圈的焊接应保证导电良好、水冷线圈的水路畅通。连接板应平整光滑,具有足够的接触面积并作必要的防锈处理。感应器线圈及其匝间通常由坚固的支撑件、磁轭及拉杆等固定和定位,以增加刚性,使其在电炉运行中不产生变形和位移。紧固件应采用奥氏体不锈钢、铜等无磁性的材质。

5.2 感应器线圈制作工艺

1982年,我国原机械工业部颁布了JB/DQ 5072—1982《中频无心感应炉感应器工艺守则》、JB/DQ 5074—1982《工频无心感应炉感应器工艺守则》(这两个工艺守则由湘潭电机厂主持起草,起草人刘敦秀)。该标准年久失修,早已作废,其后国内一些科研院所、电炉生产厂家借鉴国内外电炉的先进技术,并参照这个标准制定了各自企业的工艺标准。但这两个部颁标准对早期规范国内电炉生产厂家感应器制作工艺起到了非常重要的作用。

(1) 感应器线圈制作工艺 感应器线圈制作工艺如图7所示,图中红色符号“△”表示检查。

(2) 感应器线圈制作工艺过程

1) 铜管牌号确定和原材料检验:制作感应器线圈铜管材料的化学成分应符合GB/T 5231—2012《加工铜及铜合金牌号和化学成分》的规定。铜管的力学性能等指标应符合GB/T 1527—2017《铜及铜合金拉制管》的规定。

大容量高功率感应电炉的感应器线圈的铜管推荐采用无氧铜。ISO 431《精铜锭》标准选用的线圈材料为Cu-OFE电子级精炼无氧铜,铜含量(质量分数,下同)99.99%(不包括Ag)、氧含量0.001%。体积电阻率(最大) $1.707 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$,电导率58.58MS/m(最小)或101.0%IACS(最小)。国标规定氧含量 $\leq 0.003\%$ 、杂质总量 $\leq 0.05\%$ 、铜纯度 $> 99.95\%$,其中一号无氧铜氧含量 $\leq 0.003\%$ 、杂质 $\leq 0.03\%$ 、铜纯度99.97%;二号无氧铜氧含量

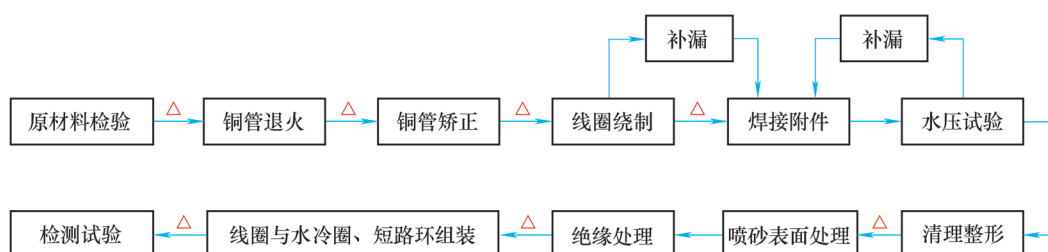


图7 感应器线圈制作工艺流程

≤0.003%、杂质≤0.05%、铜纯度99.95%。一般线圈采用二号无氧铜有较小的铜损，就可以得到比较满意的电效率。

矩形（方形）、异形铜管各部分尺寸及其公差应满足设计要求外，其中矩形（方形）铜管截面的纵向与横向的相对面相互平行度不得超过0.6mm。偏心截面的异形铜管，截面横向相对的相互平行度不得超过0.8mm。检测方法按GB/T 26303.1—2010《铜及铜合金加工材外形尺寸检测方法 第1部分：管材》及GB/T 16866—2006《铜及铜合金无缝管材外形尺寸及允许偏差》执行。

2) 铜管退火：如果采购的铜管为经过软化退火的（O60态），可直接进入下道矫正工序。非O60态的铜管必须进行退火处理。最好用光亮退火炉，退火时炉门密封，炉内通保护气氛。炉室额定温度700℃，无保护气氛退火炉也可在普通电阻炉中退火，但应增加激冷脱氧化皮措施。

无保护气氛条件退火工艺：退火炉温升至550～650℃时，将料盘上铜管送入炉内。炉温重新升高至550～650℃后开始保温。保温时间按铜管壁厚不同为1～2.5h，但最少不低于1h。出料时迅速将铜管浸入冷水槽中。铜管冷却出水后，用压缩空气吹净铜管内腔。

退火后的铜管晶粒度应≤0.06mm，伸长率应≥55%。

3) 铜管矫正：采用铜管矫正机矫正，或在平台上人工矫正。用木榔头整形，表面不允许有凹陷和伤痕，检验用的平尺应在500mm以上，将铜管置于平台和平尺之间，测量平台、铜管、平尺之间的缝隙。铜管上下两侧的缝隙均不应>0.3mm。沿铜管长度方向逐步向前移动平尺测量。

4) 线圈绕制：在绕线机上进行线圈绕制。多采

用卧式绕线机，装有脚踏开关和手动按钮开关，转速1～4r/min。绕线胎具（芯模）的外径确定要考虑铜管绕制后的反弹，下列经验公式可作为参考。

$$D_t = D_1 - D_1 \lambda \quad (55)$$

式中 D_t ——绕线胎具（芯模）外径（m）；

D_1 ——感应器线圈内径（m）；

λ ——经验系数，可取 $\lambda = 0.035 \sim 0.045$ 。

由于感应熔炼电炉的线圈内径一般均>300mm，故可不必进行二次退火。

尺寸检查：线圈径向尺寸，以绕线胎具（芯模）的外径为基准，线圈内径与胎具外径的间隙，用塞尺检查不得通过0.2mm，引出头与线圈径向中心线的平行线偏差应在±5mm范围内。

5) 焊接水管接头及导电铜排等附件：线圈引出头与水管接头用HICuZn46黄铜焊料钎焊，水管接头材质62黄铜，结构采用水管接头套在线圈铜管外壁。

线圈与导电铜排用HLAgCu30-25银铜焊料钎焊。

6) 水压试验：参照GB/T 10067.3—2015和GB/T 10067.31—2013规定执行。感应线圈组装前要经过1.2MPa水压耐压试验24h。

7) 线圈组件喷砂表面处理：喷砂表面处理，用于线圈组件套装整形以及表面绝缘涂覆前的处理。喷砂机（自动、手动）用压缩空气将高速运动的直径1～4mm的硅砂喷于线圈组件表面，使组件表面无灰尘、油污、锈蚀、脆化层，具有25～40μm的表面粗糙度。喷砂处理后的线圈组件应清除掉表面杂质、杂色、氧化层、锈蚀，以及焊接件的氧化层、焊渣、焊瘤等，可以增加组件表面与绝缘涂层之间的附着力，延长绝缘材质的耐久性。喷砂机应采用环保型装置，要低于国家二级工业排放60mm³

的标准。

8) 感应器线圈的绝缘处理: 根据感应器线圈的使用环境, 其绝缘处理必须采用耐高温绝缘漆。需注意的是, 绝缘漆同其他绝缘材料一样, 其绝缘性能随着温度的升高而降低, 这是因为常规绝缘材料的电子活跃性随着温度的升高而增加。对绝缘漆的要求是在高温下仍具有良好的绝缘性能。感应器线圈即使在正常水冷条件下, 炉衬较厚时能防止坩埚内炉料的热传到线圈表面, 到达线圈的温度可达80℃, 在线圈使用后期, 炉料变薄, 此时传递到线圈表面的温度高达200℃, 有时甚至更高。线圈“打火”等故障往往就发生在这个时候。此时耐温低于180℃的绝缘漆已炭化失去绝缘作用, 因此必须选用耐高温绝缘漆。

耐高温绝缘漆, 耐热温度为750℃, 用于熔炼钢及高熔点金属的线圈绝缘。绝缘漆的质量应符合GB/T 1981—2007《电气绝缘用漆》的技术条件。高温抗弧绝缘磁漆, 耐热温度为210℃, 击穿电压是常规绝缘漆的2~4倍, 适合高海拔地区使用的电炉、匝间距小或电压高的串联谐振电炉线圈的绝缘。涂刷或喷涂工艺应按照厂家提供的说明书指示的工艺操作^[16]。

9) 感应器线圈、水冷圈、短路环套整形: 将感应器线圈与上下水冷圈、上下短路环等, 紧固在感应器、水冷圈、短路环外侧的硬木夹柱上, 硬木夹柱与感应器、水冷圈、短路环之间垫有5mm厚聚四氟乙烯板。

套装后线圈整形要求线圈水冷圈、短路环内径圆度≤3mm, 内壁的圆柱度≤2.5mm, 内壁与径向

垂直度≤5mm, 各水管接头排列整齐, 偏离排列中心线应不超过10mm。

10) 检查和试验: 检查各部位尺寸, 应符合设计要求。用兆欧表测量绝缘层的局部绝缘电阻, 兆欧表的一极接铜管, 另一极接在离裸铜200mm以上的绝缘层表面, 任选绝缘层上的三点, 绝缘电阻应>50MΩ。

感应器绝缘耐压试验按GB/T 10066.1—2004第1.1.3条、GB/T 10066.3—2014第5.1条进行。

感应圈绕制成形后采用绝缘漆整体浸漆后, 经真空烘干, 绝缘等级要达到HIR (绝缘耐压>7000V), 并要进行7000V电压的耐压试验, GB/T 10066.3—2014/IEC 62076: 2006标准中规定感应器组件的绝缘耐压试验应在 $(2U_a+1000)$ V的工频和基本呈正弦波的电压下进行。这里的 U_a 是感应器线圈的额定电压, 当额定电压 U_a 为3000V时, 试验电压就是7000V。

参考文献:

- [13]潘天明. 工频和中频感应炉[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1983.
- [14]李澍信, 周淑玲. 串联谐振逆变电源的节能设计理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [15]李澍信, 朱兴发. 串联谐振型逆变电源的节能设计方法与调试[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [16]中国科学技术情报研究所. 国外专利资料专辑无溶剂电绝缘漆[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1977.

(待续)

MW 20200228

作者简介: 李韵豪, 长期从事铸造、锻造、整体热处理领域感应加热装置的研发与设计工作。

联系方式: 13709196753 @163.com。

致读者: 您在阅读每期讲座后, 如有问题可直接联系作者进行交流、探讨, 或即时反馈到编辑部(联系人: 田文华13671067737, rb1950@126.com), 我们将在后期以专家答疑的形式刊出, 实现作者与读者的互动。