

钢蓝脆下料、温锻感应加热及感应器 设计与参数计算

李 韵 豪

5-1 钢蓝脆下料、温锻的感应加热

钢在感应加热冷态规范的温度范围，正好是蓝脆下料和温锻的温度段。

以 45 钢为例，它在不同温度时的力学性能变化：抗拉强度 σ_b 从室温到 300℃略有下降，在 300~450℃之间，出现上升峰值，这一区间即为蓝脆区。过了蓝脆区下降较为剧烈：650℃时 σ_b 约为 200MPa，到 800℃约为 100MPa，塑性指标明显上升。

低碳钢、中碳钢、低合金钢和轴承钢等都有蓝脆现象，其中，低碳钢、中碳钢的蓝脆区一般在 300~450℃，合金结构钢在 300℃左右。将棒料加热到蓝脆区，可以得到较为匀整的剖切面，即所谓蓝脆下料，这是锻压工厂常用的下料手段。

温锻的变形温度一般在室温与热锻温度之间。黑色金属温锻温度范围一般为 200~850℃。

钢坯料典型的温锻温度见下表

表 5-1 钢坯料典型温锻温度

材 料	温锻温度 (℃)
碳钢、低合金结构钢、工具钢	600~800
奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti	250~350 或 500~800
马氏体不锈钢 2Cr13、4Cr13、 Cr17Ni2	600~800
高强合金钢 CH140	300~400

钢在冷态规范条件下，它的电阻率、相对磁导率等与热态规范有较大差异（详见 2-1 节）因此，感应加热时的电流频率、感应器的效率、加热时间的确定，以及参数计算等都与热态规范不同。

钢感应加热的中间规范是冷态规范到热态规范的中间过渡阶段，在这个阶段它同时存在两个截然分开的金属层：表面层（即所谓的有效加热层）为热态，与表面层相邻的一层仍为冷态。中间规范的计算用于表面淬火。对锻造感应透热而言，中间规范是一个过渡过程，因此，一般不就中间规范进行讨论。

5-2 冷态规范钢的平均电阻率 ρ_z 和相对磁导率 μ_r

1、平均电阻率 ρ_z

平均电阻率 ρ_z 值是指钢从初始温度（20℃）到始锻温度各点的电阻率的积分平均值。在工程上，可由始锻温度之前的若干点温度之和并除以点数作为它的平均电阻率。

表 5-2 几种钢的电阻率与温度的关系 ($\times 10^{-6} \Omega \cdot m$)

钢 种	20℃	100℃	200℃	400℃	600℃	700℃
0.06C 0.38Mn	0.130	0.178	0.252	0.448	0.725	0.898
0.08C 0.31Mn	0.142	0.190	0.263	0.453	0.534	0.905
0.23C 0.635Mn	0.169	0.219	0.292	0.487	0.758	0.925
0.415C 0.643Mn	0.171	0.221	0.296	0.493	0.766	0.932
0.23C 1.51M 0.105Cu	0.208	0.259	0.333	0.523	0.786	0.946
0.325C 0.55M 0.17Cr3.47Ni	0.291	0.320	0.390	0.567	0.814	0.992
0.33C 0.53M 0.080Cr3.38Ni	0.268	0.317	0.387	0.567	0.817	0.981
0.325C .55Mn 0.71Cr0.91Ni	0.280	0.325	0.395	0.572	0.820	0.990

例如：表 5-2 中某一种钢，如“0.325C55Mn0.71Cr0.91Ni”其蓝脆下料温度定为 400℃，可将 20℃、100℃、200℃、400℃ 的电阻率的算术平均值求出，近似作为加热到 400℃ 时的积分平均值。

$$\rho_2 = (0.280 + 0.325 + 0.395 + 0.572) \times 10^{-6} / 4 \\ = 0.393 \times 10^{-6} (\Omega \cdot m)$$

这种钢的温锻温度为 700℃，用同样方法可求出：

$$\rho_2 = 0.564 \times 10^{-6} (\Omega \cdot m)$$

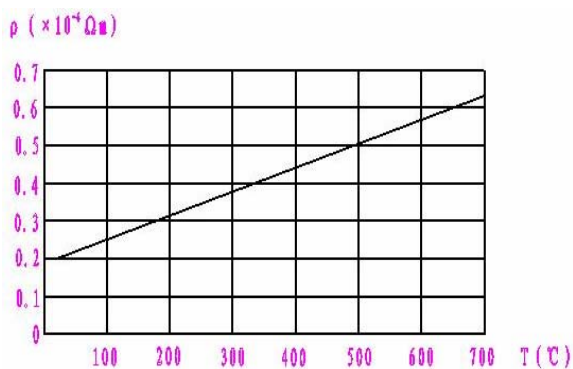


图 5-1 钢在初始温度到居里温度之间平均电阻率的近似值

如果某种钢各温度点的电阻率无法知道，可以用更近似的办法：将钢在初始温度（20℃）时的平均电阻率 ρ_2 取 $0.2 \times 10^{-6} (\Omega \cdot m)$ ，650℃ 时的平均电阻率取 $0.6 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ 。从初始温度到居里温度的温度值与其平均电阻率的关系曲线可以认为是线性的。通过查图 5-1 即可得到初始温度到居里温度的平均电阻率 ρ_2 值。经验表明，这种近似虽然对感应器效率和功率因数的计算数据有一定影响，但不会影响感应器参数计算的精度。

2、相对磁导率 μ_r

感应加热过程中的相对磁导率是一个很复杂的变量。为了确定磁导率，必须参考钢的磁化曲线 $B=f(H)$ 。通常感应加热的磁场强度 $H > 4 \times 10^4 A/m$ ，当 $H > 4 \times 10^3 A/m$ 时，各种钢的磁化曲线彼此之间差别就已经很小，这样就有可能编制出平均磁化曲

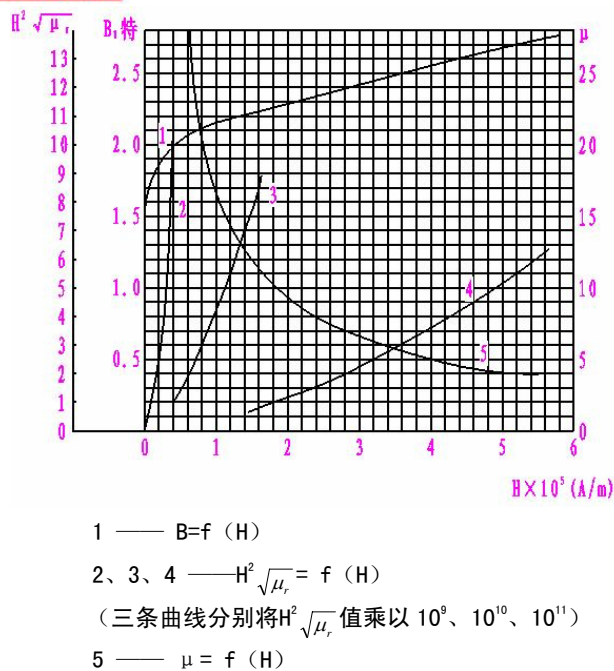


图 5-2 钢的平均磁化曲线

线 $B=f(H)$ 、 $\mu=f(H)$ 和 $H^2\sqrt{\mu_r}=f(H)$ ，曲线如图 5-2。

$$H^2\sqrt{\mu_r} = 3.67 \times 10^2 P_0 / \sqrt{\rho_2 f} \quad (5-1)$$

其中： H —— 磁场强度的有效值 (A/m)

B —— 按磁场强度的有效值，在磁化曲线上找到的磁感应强度 (特斯拉，简称特)

P_0 —— 单位功率 (W/m^2)

ρ_2 —— 平均电阻率 ($\Omega \cdot m$)

f —— 频率 (Hz)

相对磁导率确定的步骤：

① 求单位功率 P_0

$$P_0 = P_2 / (\pi D_2 a_2) \quad (W/m^2) \quad (5-2)$$

P_2 —— 坯料中的总功率 (W)

a_2 —— 坯料在感应器中的长度 (m)

D_2 —— 坯料直径 (m)

② 由式 (5-1) 求 $H^2\sqrt{\mu_r}$ 值。

③ 根据纵坐标上 $H^2\sqrt{\mu_r}$ 值，找出对应曲线，在横坐标上查得： H

④ 再根据式 (5-1) 求出 μ_r 。

5-3 钢冷态规范的电流频率、加热时间

1、频率的选择

按式 (2-3)

$$\frac{3 \times 10^6 \rho_2}{\mu_r D_2^2} \leq f \leq \frac{6 \times 10^6 \rho_2}{\mu_r D_2^2}$$

将钢在冷态规范的平均电阻率 ρ_2 和相对磁导率 μ_r 代入上式即可求出频率。

按照上式确定的频率在进行感应器参数设计的时候会遇到以下问题：按较低的频率计算出来的感应器匝数密度较高，为了在一定长度内将这些线圈匝数排布开，可以采用中频变压器将晶闸管变频器的中频电压降低、由电感线圈分压，或者采用多层线圈的方案。但工程上往往通过适当提高频率，使计算出的线圈匝数能排布开。由于频率的提高会造成加热时间的延长（感应器的长度也要延长），由于处于冷态，因感应器长度增加带来的热损的影响还是可以容忍的。

2、功率的确定

由式 2-14

$$P = \frac{P_T}{\eta} = \frac{C(T - T_0)G}{\eta \cdot t}$$

其中：C —— 坯料的平均比热容。

单位：KJkg⁻¹°C⁻¹

表 5-3 钢在不同温度的热容

温度 (°C)	钢的热容 (KJkg ⁻¹)		
	钢 0.3%C	钢 0.8%C	钢 1.6%C
100	46.7	47.9	50.0
200	95.4	96.3	100.4
300	150.0	153.8	156.3
400	205.4	209.2	212.9
500	266.3	270.0	275.4
600	339.2	342.9	349.6
700	418.8	422.5	429.2
800	547.9	539.6	551.3
900	625.0	607.9	608.8

例如，钢（0.3%C）在 650°C 时的热容为 379 KJkg⁻¹，平均比热容 C 为：379/650=0.583 (KJkg⁻¹°C⁻¹)

T-T₀ —— 始锻温度与初温（20°C）之差

G —— 坯料质量（kg）

T —— 节拍（s）

η —— 钢在冷态规范时的感应加热的总效率 $\eta=0.80\sim0.92$ ，其中电效率 η_e 为 0.90~0.95，热效率为 η_t 为 0.90~0.96。

3、最短加热时间的确定

① 钢的导温系数

钢的热态规范（通常加热到 1200~1300°C）的导温系数是取 800°C 时的参数作为平均值， α 取 $6.4 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 。钢在冷态规范的导温系数的平均值可由下表求出。

表 5-4 钢的导温系数 ($\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)

钢号	50~100	150~200	200~300	350~400	450~500	550~600	650~700	750~800
40	13.0	12.0	11.0	8.5	8.6	6.4	5.3	5.5
T8	12.8	11.0	9.7	8.3	7.8	6.1	6.3	5.5
30Cr	12.2	11.0	10.0	8.6	7.2	5.8	4.6	3.8
30Mn2	12.0	11.4	10.3	9.0	7.6	6.2	5.0	4.5
W18Cr4V	7.2	7.2	7.0	6.6	6.0	5.4	5.0	4.3

将一些常用碳钢、低合金结构钢初温到居里温度的导温系数的平均值再求一次算术平均值，取 $8.5 \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$ 作为钢在冷态规范时的导温系数。

② 钢冷态规范最短加热时间简化公式的推导

按由初始温度加热到居里温度、心表温差 $\Delta T=50^\circ\text{C}$ 时来核算：

$$\alpha = 1 - \Delta_2 / R_2$$

$$\text{令 } \Delta_2 = 0, a = 1$$

查图 2-3

$$S(1, 1) = 0.125$$

$$S(1, 0) = -0.125$$

将 $a=1$ 、 $S(1, 1)=0.125$ 、 $S(1, 0)=-0.125$

代入式 (2-17) 得，

$$\tau = \frac{0.125 - \frac{650}{650-50} \times (-0.125)}{\frac{650}{650-50} - 1} = 3.125$$

在冷态及中间状态时运用式 (2-17) 时，我们没有像在热态规范时将心表温差乘以 2，这是因为

冷态时不必考虑热量向周围空间散热这一因素。

将 τ 、 D_2 、 Δ_2 、 a 代入式 (2-15)

$$t_k = \frac{(D_2 - \Delta_2)^2}{4a} \tau$$

$$= 9.2 \times 10^4 (D_2 - \Delta_2)^2 \text{ (s)} \quad (5-3)$$

取 $a = 8.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

同样, 可得:

$$\Delta T = 100^\circ\text{C}$$

$$t_k = 4.4 \times 10^4 (D_2 - \Delta_2)^2 \text{ (s)} \quad (5-4)$$

$$\Delta T = 150^\circ\text{C}$$

$$t_k = 2.8 \times 10^4 (D_2 - \Delta_2)^2 \text{ (s)} \quad (5-5)$$

依照经验, 钢冷态规范, 变匝距感应加热最短时间的简化计算公式:

$$\Delta T = 50^\circ\text{C}$$

$$t_k = 3.9 \times 10^4 (D_2 - \Delta_2)^2 \text{ (s)} \quad (5-6)$$

$$\Delta T = 100^\circ\text{C}$$

$$t_k = 1.9 \times 10^4 (D_2 - \Delta_2)^2 \text{ (s)} \quad (5-7)$$

$$\Delta T = 150^\circ\text{C}$$

$$t_k = 1.4 \times 10^4 (D_2 - \Delta_2)^2 \text{ (s)} \quad (5-8)$$

5-4 冷态规范螺线管感应器的参数计算*

冷态规范感应器设计思路: 求出 ρ_2 、 μ_r

其中: $r_2 = 1.37 \frac{\pi D_1}{a_1} \times \frac{\rho_1}{\Delta_2}$ 、 $X_{2m} = \frac{r_2}{1.37}$ 。其余部分

的计算与热态规范相同。

例: 内燃机的活塞销温挤压成形坯料加热的感应器由两部分组成, 第一部分将坯料的表面温度由初始温度加热至 $80 \sim 120^\circ\text{C}$, 取 100°C , 坯料出感应器, 马上进入商业水基石墨润滑剂槽内, 使每只坯料表面浸涂 0.5g 左右的润滑剂, 再进入第二部分感应器内继续加热至温挤压温度, 加热好的坯料送入压力机中温挤压成形。

坯料材质: 20Cr; 坯料规格: $\Phi 45.5 \times 66$; 质量: 0.842kg ; 挤压温度: $650 \pm 10^\circ\text{C}$, 加热节拍: 5s ; 心表温差: $\leq 30^\circ\text{C}$ 。

计算步骤如下:

1、 ρ_2 和 μ_r 的确定及最短加热时间的计算

①坯料的平均电阻率 ρ_2

查图 5-1, $\rho_2 = 0.58 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$

②相对磁导率 μ_r

首先计算坯料中的总功率 P_2

坯料加热的平均有效功率 P_T

$$P_T = C \Delta T G / t = 0.583 \times [(100 - 20) + (650 - 80)] \times 0.842 / 5 = 63.815\text{kW}$$

通过感应器的隔热层损失的功率 ΔP_T

$$\Delta P_T = \frac{2\pi a_1 \lambda}{3600 \times \ln \frac{D_1}{D_3}} (T_2 - T_1) = 5.059\text{kW}$$

λ —— 高铝硅酸铝纤维的导热系数, 取 λ

$= 0.83\text{kJ}/\text{m}^\circ\text{C}\cdot\text{h}$

T_2 —— 炉衬内表面温度, 近似等于温挤压温度, $T_2 = 650^\circ\text{C}$ 。

T_1 —— 炉衬外表面温度, 近似等于感应器线圈温度, $T_1 = 60^\circ\text{C}$

D_1 —— 感应器线圈内径。 $D_1 = 0.09\text{m}$

D_3 —— 炉衬内径。 $D_3 = 0.06\text{m}$

a_{11} —— 坯料由初始温度加热至表面达到 100°C 的感应器长度, 设 $a_{11} = 0.4\text{m}$

a_{12} —— 坯料由 80°C 升温到温挤压温度的感应器长度, 设 $a_{12} = 2.0\text{m}$

a_1 —— 感应器长度, $a_1 = a_{11} + a_{12} = 0.4 + 2.0 = 2.4\text{m}$

$P_2 = P_T + \Delta P_T = 63.815 + 5.059 = 68.874\text{kW}$

$\eta_t = P_T / P_2 = 0.927$

求单位功率 P_0

$$P_0 = \frac{P_2}{\pi D_2 a_2} = \frac{68.874 \times 10^3}{\pi \times 0.0455 \times 2.4} = 20.1 \times 10^4 \text{ W}$$

a_2 —— 感应器内坯料的总长度 (m)

* 本文中感应器参数设计举例的计算由王新、王海燕同志完成。

$$H^2 \sqrt{\mu_r} = 3.67 \times 10^2 \times \frac{P_0}{\sqrt{\rho_2 f}} = 1.97 \times 10^9$$

$$H = 0.19 \times 10^5 \text{ (A/m)}$$

$$\mu_r = 30$$

求单位功率时，坯料在感应器内的长度 a_2 尚未确定，这时，可先根据经验预设，等求出 μ_r 、 Δ_2 后，再根据最短加热时间公式求出 a_2 值，用 a_2 值重新核算 μ_r 。

③电流透入深度 Δ_2

$$\Delta_2 = 503 \sqrt{\frac{\rho_2}{\mu_r f}} = 503 \sqrt{\frac{0.58 \times 10^{-6}}{30 \times 2400}}$$

$$= 0.0014 \text{ m}$$

$$\text{取 } f = 2400 \text{ Hz}$$

④最短加热时间

$$t_k = 9.2 \times 10^4 (D_2 - \Delta_2)^2 = 180 \text{ s}$$

$$\text{感应器内坯料件数 } n = t_k / t = 180 / 5 = 36 \text{ (件)}$$

如果用连续式加热，有：

$$a_1 = a_2 = a_2' \quad n = 0.066 \times 36 = 2.376 \approx 2.4 \text{ m}$$

将 $a_1 = 2.4 \text{ m}$ 分为2段，第1段 a_{11} 用于初始温度加热至 100°C ，第2段 a_{12} 用于从 80°C 到挤压温度 650°C （石墨润滑剂槽内降至 80°C ）。冷态规范下可近似地认为感应器长度与温度是线性的，因此，按温度比例分配 $a_{11} = 0.4 \text{ m}$ 、 $a_{12} = 2.0 \text{ m}$

$$\text{⑤ 感应器计算直径 } D_2' = D_2 - \Delta_2 = 0.0455 - 0.0014 \approx 0.044 \text{ m}$$

2、感应器参数计算

①坯料的电阻和电感

$$r_2 = 1.37 \times \frac{\rho_2}{\Delta_2} \times \frac{\pi D_2'}{a_2} = 1.37 \times \frac{0.58 \times 10^{-6}}{0.0014} \times \frac{0.044 \pi}{2.4}$$

$$= 3.269 \times 10^{-5} \Omega$$

$$x_{2m} = \frac{r_2}{1.37} = \frac{3.269}{1.37} = 2.386 \times 10^{-5} \Omega$$

②电抗 x_0

$$x_{10} = \omega \pi^2 D_1^2 \times 10^{-7} / a_1 = 2 \pi^3 \times 2400 \times 10^{-7} \times 0.09^2 / 2.4 = 5.023 \times 10^{-5} \Omega$$

$$k_1 = f \left(\frac{D_1}{a_1} \right) = f \left(\frac{0.09}{2.4} \right) = f(0.0375) = 0.985$$

$$x_0 = x_{10} k_1 a_1 / (a_1 - k_1 a_2) = 5.023 \times 10^{-5} \times 0.985 \times 2.4 / (2.4 - 0.985 \times 2.4) = 329.844 \times 10^{-5} \Omega$$

③感应器漏电抗 x_s

$$x_s = \omega \pi^2 (D_1^2 - D_2'^2) \times 10^{-7} / a_2 = 2 \pi^3 \times 2400 \times 10^{-7} \times (0.09^2 - 0.044^2) / 2.4 = 3.822 \times 10^{-5} \Omega$$

④坯料的换算系数C

$$C = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{x_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_s + x_{2m}}{x_0}\right)^2} = 0.963$$

⑤坯料的换算电阻 r_2'

$$r_2' = C r_2 = 0.963 \times 3.269 \times 10^{-5} = 3.148 \times 10^{-5} \Omega$$

⑥坯料的换算电抗 x_2'

$$x_2' = C \left[x_s + x_{2m} + \frac{(x_s + x_{2m})^2 + r_2'^2}{x_0} \right] = 6.122 \times 10^{-5} \Omega$$

⑦感应器线圈铜管壁厚 d_1

$$\Delta_1 = 503 \sqrt{\frac{\rho_1}{f}} = 503 \sqrt{\frac{2 \times 10^{-8}}{2400}} = 0.0015 \text{ m}$$

$$d_1 = 1.35 \Delta_1 \approx 0.002 \text{ m}$$

$$k_r = f(d_1 / \Delta_1) = f(0.002 / 0.0015) = f(1.333) = 1.35$$

$$k_x = 1.15$$

⑧感应线圈的电阻 r_1 与电抗 x_{1m}

$$r_1 = k_r \rho_1 \pi D_1 / (a_1 - d_1) = 1.35 \times 2 \times 10^{-8} \times \pi \times 0.09 / (2.4 \times 0.002 \times 0.85) = 0.187 \times 10^{-5} \Omega$$

$$x_{1m} = r_1 \frac{k_x}{k_r} = 0.187 \times 10^{-5} \times \frac{1.15}{1.35} = 0.159 \times 10^{-5} \Omega$$

⑨感应器的等效电阻 r 、电抗 x 和阻抗 z

$$r = r_1 + r_2' = 3.335 \times 10^{-5} \Omega$$

$$x = x_{1m} + x_2' = 6.281 \times 10^{-5} \Omega$$

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} = 7.111 \times 10^{-5} \Omega$$

⑩感应器的电效率 η_u

$$\eta_u = \frac{r_2'}{r} = \frac{3.148 \times 10^{-5}}{3.335 \times 10^{-5}} = 0.944$$

$$\text{总效率 } \eta = \eta_u \times \eta_t = 0.944 \times 0.927 = 0.875$$

$$P = P_T / \eta = 63.815 / 0.875 = 72.931 \text{ Kw}$$

(1)感应器的功率因数 $\cos \phi$

$$\cos \phi = r / z = 3.335 / 7.111 = 0.469$$

(2)感应器内的电流

$$I_{u'} = \sqrt{P_2 / r_2} = \sqrt{68.874 \times 10^3 / 3.148 \times 10^{-5}}$$

$$= 4.677 \times 10^4 \text{ A}$$

(3)感应器上的电压 $U_{u'}$

$$U_{u'} = I_{u'} \times z = 4.677 \times 10^4 \times 7.111 \times 10^{-5} = 3.326 \text{ V}$$

(4)感应器的匝数 ω'

$$\omega' = U_u / U_{u'} = 600 / 3.326 = 180 \text{ (匝)}$$

(5)感应器的匝数分配

$$a_{11} = 0.4 \text{ m} \quad W_1 = 30 \text{ 匝}$$

$$a_{12} = 2.0 \text{ m} \quad W_2 = 150 \text{ 匝}$$

(6)电容器容量 P_c

$$Q = \frac{x}{r} = \frac{6.281 \times 10^{-5}}{3.335 \times 10^{-5}} = 1.883$$

$$P_{c1} = P (Q + 0.62) = 72.931 \times (1.883 + 0.62)$$

$$= 182.546 \text{ kVar}$$

$$P_{c2} = \left(\frac{0.75}{0.60} \right)^2 \times P_{c1} = \left(\frac{0.75}{0.60} \right)^2 \times 182.546$$

$$= 285.228 \text{ kVar}$$

$$P_{c3} = \frac{2500}{2400} \times P_{c2} = \frac{2500}{2400} \times 285.228 = 297.113 \text{ kVar}$$

$$P_{c4} = 1.15 \times P_{c3} = 341.680 \text{ kVar}$$

下期内容简介: 铝合金的感应加热及感应器的设计与参数计算、铝合金等温锻造模具的感应加热、带温度递度的铝和铝合金的感应加热。