

中频感应淬火设备的调谐问题

■ 林信智, 江国清



中频感应淬火设备的调谐问题既是个老问题又是个新问题。所谓老问题,是中频感应淬火设备已经问世多年,随时都在做调谐的操作,但人们“对其所以然”又说不清楚,致使许多感应热处理工作者处于朦胧状态。所谓新问题,是近十几年来国内大量应用的“IGBT”新型的中频电源,对其调谐问题,又要有新的理解。然而,调谐是感应热处理工作者的基本功,只有在理论上理解调谐原理,才能准确而熟练地掌握调谐方法。

调谐问题的系统研究是比较复杂的,至少要制作系列的感应器和工件,做大量的试验才能总结出调谐的规律。现试图利用经试验获得的中频发电机的调谐资料,解决几种机型的调谐问题。

一、机式中频感应淬火设备的调谐

感应淬火设备的调谐目的是

要中频电源输出最大功率(当然,各电参数应运行在合理区间)。调谐一般包括淬火变压器匝比 K 的调整和补偿电容量 C 的调整。二者之中 K 的调整是主导,只有 K 选择正确,才能使得内外阻抗匹配,是功率最大输出的必要条件。补偿电容量 C 的选

择也很重要,它使振荡器谐振,提高功率因数, C 的调整操作较为简便,判断也较为容易,为此, C 的调整本文从略。

中频发电机供电的中频感应淬火设备组成示意如图1所示。

由图1可知,中频感应淬火设备主要是由中频发电机供电的淬火变压器与补偿电容并联的 L - C 振荡器组成。由于淬火变压器的一次绕组、二次绕组、感应器及被加热的零件都是既有电感 L 又有电阻 R ,所以在变压器支路又相当于 L - R 串联电路。为便于分析,我们把中频感应淬火设备简化为图2所示的电路。

电工学知识告诉我们,当一个单相交流电压 U_F 加在 L - C 振荡电路两端时,电容支路电流 I_C 超

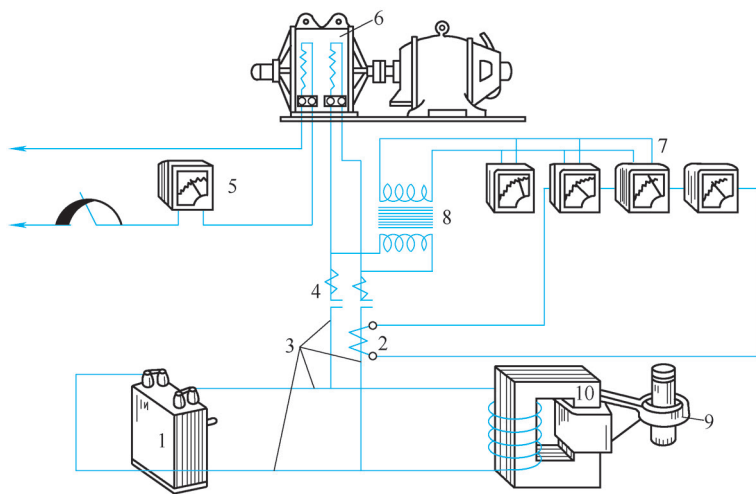


图1 机式中频感应淬火设备组成示意

1. 补偿电容器 2. 电流互感器 3. 输电线路 4. 中频接触器 5. 励磁电流表
6. 中频发电机 7. 中频电表 8. 电压互感器 9. 感应器及淬火零件 10. 中频感应淬火变压器

前电压 $U_F 90^\circ$ ，电感支路电流 I_L 滞后电压 $U_F 90^\circ$ ，而电阻 R 上电流 I_R 与电压 U_F 同向， I_{L-R} 是 I_L 与 I_R 的合成值，于是有图3所示的矢量图。

$$\begin{aligned} \text{输出功率 } P &= U_F I \cos \phi \\ &= U_F I_R \end{aligned} \quad (1)$$

通过调谐使 $I_C \approx I_L$ 时， $\cos \phi \approx 1$ ， $I \approx I_R$ ，这时中频发电机输出功率 P 达到最大值 P_E （也称额定功率），即：

$$P = U_F I_R = P_E \quad (2)$$

用 U_F^2 除以式（2）的两端，则得：

$$\text{发电机内阻抗 } Z_F = \frac{U_F^2}{P_E}$$

负载外阻抗

$$Z = \frac{U_F^2}{P} = \frac{U_F^2}{U_F I_R} = \frac{U_F}{I_R}$$

当 $Z_F = Z$

则 $P = P_E$

由上面分析可知，要使中频发电机输出最大功率 P_E ，其条件是负载外阻抗 Z 等于发电机内阻抗 Z_F 。这个过程称为阻抗匹配。

负载系统的外阻抗 Z 由以下各部分组成：淬火变压器一次绕组电感 L_1 、电阻 R_1 ，淬火变压器二次绕组电感 L_2 、电阻 R_2 ，感应器电感 L_3 、电阻 R_3 及淬火零件感应加热层电感 L_4 、电阻 R_4 ，以及补偿电容所具有的容抗 X_C 。也可粗略获得：

淬火变压器二次回路总电感

$$L_2' = L_2 + L_3 + L_4$$

淬火变压器二次回路总电阻

$$R_2' = R_2 + R_3 + R_4$$

淬火变压器变压比为 K 时，负载回路的总电感：

$$L = L_1 - K_2 L_2' \quad (3)$$

负载回路的总电阻：

$$R = R_1 + K_2 R_2' \quad (4)$$

负载回路的感抗 X_L 、容抗 X_C 、感性电流 I_L 和容性电流 I_C 分别为：

$$X_L = 2\pi fL \quad \text{进而}$$

$$I_L = \frac{U_F}{X_L} = \frac{U_F}{2\pi fL}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad \text{进而}$$

$$I_C = \frac{U_F}{X_C} = 2\pi fCU_F$$

式中， f 为电流频率。

若中频发电机满功率输出，

必须使 $\cos \phi \approx 1$

$$\text{即 } I_L = I_C \quad \text{也即 } X_L = X_C$$

因负载回路的阻抗 Z （也称外阻抗）为：

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\text{由于 } X = X_L - X_C = 0$$

所以 $Z = R$

$$R = R_1 + K^2 R'$$

$$= R_1 + K^2 (R_2 + R_3 + R_4)$$

于是

$$Z_F = R_1 + K^2 (R_2 + R_3 + R_4) \quad (5)$$

欲维持式（5）左右相等，其关键是选择 K 值。因为当中频机组的容量和输出电压确定之后，其内阻抗 Z_F 就是一个常量。

例如，100kW、8kHz中频电机在375V供电时，内阻抗

$$Z_F = \frac{U_F^2}{P_E} = \frac{375^2}{100 \times 10^3} = 1.406 \Omega$$

例如100kW、8kHz中频电机在750V供电时，内阻抗

$$Z_F = \frac{U_F^2}{P_E} = \frac{750^2}{100 \times 10^3} = 5.625 \Omega$$

R_1 是淬火变压器的一次绕组的电阻，当二次绕组是一匝时， K 的数值就是一次绕组的圈数。 R_2 是二次绕组的电阻，二次绕组多数是一匝，有时是两匝。 R_1 和 R_2 由变压器结构形式决定。 R_3 和 R_4 分别是感应器的电阻和淬

火零件加热层的电阻，显然不同形状、不同尺寸的淬火零件，将有不同形状、不同尺寸的感应器，自然有不同的 R_3 和 R_4 。当然应该有不同的 K 值，由式中还可看到，随 R_3 与 R_4 之和的增大， K 必然减小。综上所述，为使中频系统的阻抗匹配，必须正确选取 K 值，而 K 值又主要决定于 R_3 与 R_4 。

由式（5）可以看出，如果 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 若能计算或若能测量的话， K 就可以计算出来。遗憾的是上述参数即不能计算也不能测量。造成两个“不能”的主要因素是高（中）频电流的“趋肤效应”和“临近效应”，

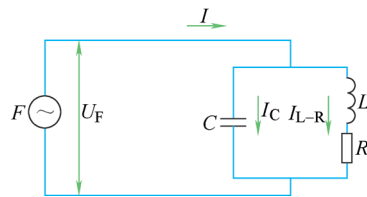


图2 中频感应淬火设备的等效电路

注： F 为中频发电机； U_F 为中频发电机输出电压； I 为中频主回路电流； C 为补偿电容器； I_C 为电容支路电流； L 为淬火变压器一次绕组、二次绕组、感应器及淬火零件的电感； R 为淬火变压器一次绕组、二次绕组、感应器及淬火零件的电阻； I_{L-R} 为

淬火变压器支路电流

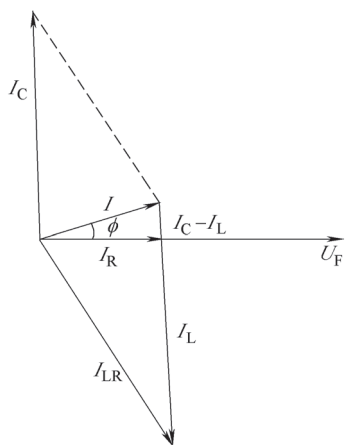


图3 中频电路矢量图

这两个效应使得高(中)频电流在导体中依指数曲线形式存在,被定义的“电流透入深度”之中的各处电流密度不同,致使电阻计算是困难的(因为 $R=U/I$)。同理,测量也是困难的。于是,我们决定用试验的方法求 K 值。

二、机式100kW、8kHz中频感应淬火的求 K 试验

1. 试验条件

中频发电机:苏式ΠBB-100/8000,频率7.85kHz、额定电压 $U_E=375V$ 、额定电流 $I_E=296A$ 、额定功率 $P_E=100kW$ 、功率因数-0.9(“-”为电容性)。

立式淬火机床:振荡回路导线为厚6mm、宽80mm的纯铜板,总长约1.3m。

淬火变压器:型号GP-010,硅钢片铁心,一次绕组的匝数是可变的,变化范围5~24匝,二次绕组为1匝。试验感应器为均圆环感应器,直径分

别为22mm、32mm、42mm、52mm、高度分别为30mm、50mm、70mm。感应器及试验零件的参数和各种试验数据列于表1。

利用表1数据,以 K 值为纵坐标,感应器有效圈高度 h 为横坐标,绘制 $K-h-\phi$ 关系图(见图4)。

2. $K-h-\phi$ 关系图说明

(1) 直径 $<18mm$ 的零件,硬化层要求一般很薄,多采用高频感应淬火(频率高于100kHz),故不是本试验的对象。同样直径 $>48mm$ 的零件,硬化层要较深,多采用较低的频率,故 $\phi>48mm$ 的零件也不是本试验的研究对象,但本试验所得的 $K-h-\phi$ 图中的大直径感应器的 K 值推测线,经实践证明是正确的。

(2) K 值得走势符合电工学理论。按照导体电阻的计算公式:

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (6)$$

式中 ρ ——导体的电阻率;

l ——导体的长度;

S ——导体的导电面积。

显然,当感应器高度 h 为定值时,随着感应器内径 ϕ 的减小,自然导致 R_3 、 R_4 减小,由式(5)可知 K 值必然增加。同理,当感应器高度 h 为定值时,随着感应器内径 ϕ 的增加,将导致 R_3 、 R_4 增加, K 值必然减小。反之亦然。

三、其他供电规格机式中频感应淬火设备 K 值

(1) 我们将试验的中频的

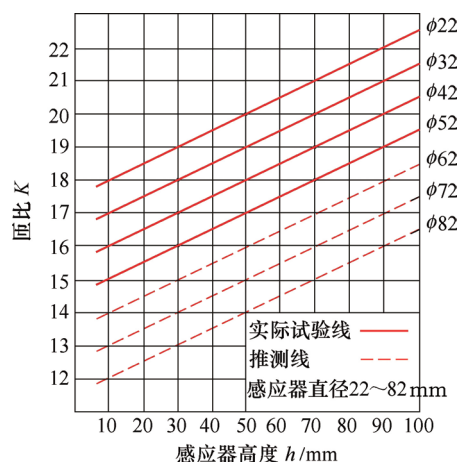


图4 各种圆环感应器中频感应淬火的 $K-h-\phi$ 关系图

表1 试验记录

感应器编号	有效圈尺寸/mm		试件直径/mm	变压器匝比K	补偿电容/ μF	中频参数				
	直径/mm	高度/mm				空载电压/V	负载电压/V	电流/A	功率因数 $\cos \phi$	功率/kW
A1	22	30	18	19	38.45	380	380	280	-0.9	85
A2	22	50	18	20	41.75	380	375	280	-0.9	85
A3	22	70	18	21	43.32	380	375	290	-0.9	85
A4	32	30	28	18	36.52	380	380	295	-0.9	95
A5	32	50	28	19	36.97	380	380	290	-0.9	87
A6	32	70	28	20	36.17	380	380	290	-0.86	85
A7	42	30	38	17	37.32	380	380	290	-0.88	87
A8	42	50	38	18	37.32	380	380	295	-0.9	90
A9	42	70	38	19	36.57	380	375	290	-0.9	90
A10	52	30	48	16	36.82	380	380	290	-0.9	92
A11	52	50	48	17	35.37	380	380	295	-0.9	92
A12	52	70	48	18	35.37	380	380	295	-0.9	95

参数重新命名 $P_1=P_E=100\text{kW}$ 、 $U_1=U_E=375\text{V}$ ，中频发电机内阻 $Z_1=Z_{F1}=U_1^2/P_1=1.406\Omega$ ，依通过试验获得的淬火变压器匝比 K （以后均称为 K_1 ）为基础，具体数据由表1和图4获取，试求以下几种供电规格中频发电机组供电时的 K 值。

(2) 求 8kHz 、 100kW 、 750V 供电时的淬火变压器匝比 K_2
 设： $P_2=100\text{kW}=P_1$ ， $U_2=750\text{V}=2U_1$ ，则中频发电机内阻：

$$Z_2=\frac{U_2^2}{P_2}=\frac{(2U_1)^2}{P_1}=\frac{4U_1^2}{P_1}=4Z_1$$

将 $Z_2=4Z_1$ 代入式(5)得：

$$Z_2=4Z_1=4R_1+4K_1^2(R_2+R_3+R_4)$$

令 $K_2^2=4K_1^2$ ，则

$$K_2=\sqrt{4K_1^2}=2K_1$$

(3) 求 8kHz 、 160kW 、 375V 供电时的淬火变压器匝比 K_3
 设 $P_3=160\text{kW}=1.6P_1$ ， $U_3=375\text{V}=U_1$ ，则中频发电机内阻：

$$Z_3=\frac{U_3^2}{P_3}=\frac{U_1^2}{1.6P_1}=0.625Z_1$$

将 $Z_3=0.625Z_1$ 代入式(5)得：

$$Z_3=0.625Z_1=0.625R_1+0.625K_1^2(R_2+R_3+R_4)$$

令 $K_3^2=0.625K_1^2$ ，则

$$K_3=\sqrt{0.625K_1^2}=0.791K_1\approx 0.8K_1$$

(4) 求 8kHz 、 160kW 、 750V 供电时的淬火变压器匝比 K_4
 设 $P_4=160\text{kW}=1.6P_1$ ， $U_4=750\text{V}=2U_1$ ，则中频发电机内阻：

$$Z_4=\frac{U_4^2}{P_4}=\frac{(2U_1)^2}{1.6P_1}=2.5Z_1$$

将 $Z_4=2.5Z_1$ 代入式(5)得：

$$Z_4=2.5Z_1$$

$$=2.5R_1+2.5K_1^2(R_2+R_3+R_4)$$

令 $K_4^2=2.5K_1^2$ ，则

$$K_4=\sqrt{2.5K_1^2}=1.581K_1\approx 1.6K_1$$

(5) 求 8kHz 、 200kW 、 375V 供电时的淬火变压器匝比 K_5
 设 $P_5=200\text{kW}=2P_1$ ， $U_5=375\text{V}=U_1$ ，则中频发电机内阻：

$$Z_5=\frac{U_5^2}{P_5}=\frac{U_1^2}{2P_1}=0.5Z_1$$

将 $Z_5=0.5Z_1$ 代入式(5)得：

$$Z_5=0.5Z_1=0.5K_1^2(R_2+R_3+R_4)$$

令 $K_5^2=0.5K_1^2$ ，则

$$K_5=\sqrt{0.5K_1^2}=0.707K_1\approx 0.7K_1$$

(6) 求 8kHz 、 200kW 、 750V 供电时的淬火变压器匝比 K_6
 设 $P_6=200\text{kW}=2P_1$ ， $U_6=750\text{V}=2U_1$ ，则中频发电机内阻：

$$Z_6=\frac{U_6^2}{P_6}=\frac{(2U_1)^2}{2P_1}=\frac{4U_1^2}{2P_1}=2Z_1$$

将 $Z_6=2Z_1$ 代入式(5)得：

$$Z_6=2Z_1=2R_1+2K_1^2(R_2+R_3+R_4)$$

令 $K_6^2=2K_1^2$ ，则

$$K_6=\sqrt{2K_1^2}=1.414K_1\approx 1.4K_1$$

将上述情况总结纳入表2。

表2说明：

①若干年前，在某大型工厂的生产线上，有多种规格的中频发电机组用于中频感应淬火。实际参数证明表2提供的 K 值基本

是正确的。仅举一例，后制动凸轮的轴颈中频感应淬火是两台 100kW 、 8000Hz 机组并联供电，供电电压 750V ，淬火感应器内径 43mm ，高度 70mm 。由图4查得淬火变压器匝比 $K\approx 19$ ，表2提供的变换系数为 1.4 ，计算结果匝比 K 为 26.6 ，生产实际使用的匝比 K 为 27 。

②应该说明，上述各种供电条件下的 K 值，均是中频发电机满功率输出（或接近满功率输出）时的匝比值，即设备调谐良好($\cos\phi\approx 1$)时的匝比值。但有时因零件的淬火面积较小，所用功率较小，不需要中频发电机满功率输出，自然不需要设备调谐良好，所用匝比与表2推荐值不同，也是可以的，不会有其他不利问题出现，只会增加无功损失。还有，一台中频感应淬火设备上要做多种零件，为了减少调整的麻烦，使用一种匝比淬火，设备难以做到良好调谐，所用匝比与表2推荐值不同也可以，无非浪费一些电能，倒也无关大局。

四、IGBT中频感应淬火时求 K

作为感应淬火的IGBT电源已经大量应用了。它具有多方面

表2 各种规格机式中频的淬火变压器匝比 K 值

序号	中频发电机型号	额定功率/kW	输出电压/V	发电机内阻/ Ω	淬火变压器匝比
1	BPSD100/8000	100	375	1.406	K
2	BPSD100/8000	100	750	5.625	$2K$
3	BPSD160/8000	160	375	0.878	$0.8K$
4	BPSD160/8000	160	750	3.512	$1.6K$
5	2*BPSD100/8000	200	375	0.703	$0.7K$
6	2*BPSD100/8000	200	750	2.813	$1.4K$

注： K 前的数字称为匝比变换系数。

的优点：①频率范围广，可以是中频（1~10kHz），也可以是超音频（10~100kHz）。②转换效率高，节能效果显著，其功率因数接近1，可减少输入功率22%~30%。③整台设备结构紧凑，外形尺寸小，节省空间。④保护电路完善，可靠性高。⑤电源内部和输出端没有高电压，安全性好。它完全取代了机械式中频感应发电机，部分取代了晶闸管（SCR）电源。但是，关于IGBT中频淬火设备的调谐很少有人研究，做以下尝试，抛砖引玉。

还是利用机式8kHz、 $P_1=100\text{kW}$ 、 $U_1=375\text{V}$ ，发电机内阻 $Z_1=1.406\Omega$ 的情况下，通过试验获得的 K 值为基础，经过以下的计算，试图求出IGBT电源几种供电规格下的 K 值。

（1）求IGBT中频：8kHz、 $P_7=100\text{kW}=P_1$ 、 $U_7=550\text{V}=1.47U_1$ 时的 K_7 值

IGBT电源内阻：

$$Z_7 = \frac{U_7^2}{P_7} = \frac{(1.47U_1)^2}{P_1} = 2.16Z_1$$

将 $Z_7=2.16Z_1$ 代入式（5）得：

$$Z_7 = 2.16R_1 + 2.16K_1^2(R_2 + R_3 + R_4)$$

$$\text{令 } K_7^2 = 2.16K_1^2$$

$$\text{则 } K_7 = \sqrt{2.16K_1^2} \approx 1.47K_1$$

（2）求IGBT中频：8kHz、 $P_8=160\text{kW}=1.6P_1$ 、 $U_8=550\text{V}=1.47U_1$ 时的 K_8 值

IGBT电源内阻：

$$Z_8 = \frac{U_8^2}{P_8} = \frac{(1.47U_1)^2}{1.6P_1} = 1.35Z_1$$

将 $Z_8=1.35Z_1$ 代入式（5）得：

$$Z_8 = 1.35R_1 + 1.35K_1^2(R_2 + R_3 + R_4)$$

$$\text{令 } K_8^2 = 1.35K_1^2$$

$$\text{则 } K_8 = \sqrt{1.35K_1^2} \approx 1.16K_1$$

（2）求IGBT中频：8kHz、 $P_9=200\text{kW}=2P_1$ 、 $U_9=550\text{V}=1.47U_1$ 时的 K_9 值

IGBT电源内阻：

$$Z_9 = \frac{U_9^2}{P_9} = \frac{(1.47U_1)^2}{2P_1} = 1.08Z_1$$

将 $Z_9=1.08Z_1$ 代入式（5）得：

$$Z_9 = 1.08R_1 + 1.08K_1^2(R_2 + R_3 + R_4)$$

$$\text{令 } K_9^2 = 1.08K_1^2$$

$$K_9 = \sqrt{1.08K_1^2} \approx 1.04K_1$$

现将IGBT三种电源的 K 值集中于表3。

IGBT中频淬火设备调谐的几点说明：

①IGBT中频电源的内阻抗是动态阻抗，即任何时候内阻抗均为 $Z_i=U_i/I_i$ ，所以IGBT中频的调谐是比较容易的，但若获得最大功率也是不轻松的。在调谐时会出现几种可能：一是接通中频电源后，电源立即“跳掉”，此时多半是补偿电容过多，“过电流保护”动作，切断电源，这时应该减少电容；二是接通中频电源，电源还是“跳掉”，这时可能是一次绕组匝数太少，即 K 太小之故，造成中频电流太大，当然应增加匝数；三是接通中频电源，电源表现正常，只是功率小些，说明 K 是对的，随之应适当增加电容，可看到电流增加，功率也增加。

②IGBT中频电源与机式中

频电源不同，它的频率变化、可调。频率决定于振荡器的频率，而振荡器频率又与感应器的结构、尺寸关系很大。

如接通中频电源，发现频率过高，要想降低频率，根据公式 $(2\pi f)^2=1/LC$ ，增加 L 或增加 C ，均可降低频率 f 。反之亦然。

③要使IGBT中频输出最大功率，必须让它输出最大电流（额定电流） I_E ，而 $I_E=P_E/U_E$ ，即设备铭牌上标出的额定功率 P_E 除以额定电压 U_E ，这里假定功率因数 $\cos\phi\approx 1$ ，实际IGBT功率因数也比较高的，一般在0.95左右。

④表3是将IGBT选 K 的频率设定为8kHz，这是中频感应淬火的常用频率，很多汽车零件用8kHz频率都能调试合格。而且8~12kHz的 K 是相同的或相近的。

⑤表3使用举例。例如有一直径56mm的小轴，其淬火层深度为2~4mm，预计中频感应淬火功率80kW左右，连续淬火。确定使用IGBT设备，设定设备频率8~10kHz、功率100kW、输出电压550V。选淬火感应器直径62mm、高度10mm。在图4上选出 K 值为14，再乘以表3的系数1.47，即可获得淬火变压器匝比为20.58，实际使用的匝比可能是18~22。 K 值要经过试用的。

表3 三种供电规格的IGBT在8kHz时中频感应淬火变压器匝比 K 值

序号	中频电源型号	额定功率/kW	输出电压/V	电源内阻/ Ω	淬火变压器匝比 K
1	BPSD100/8000	100	375	1.406	K_1
2	IGBT	100	550	3.04	$1.47K_1$
3	IGBT	160	550	1.9	$1.16K_1$
4	IGBT	200	550	1.52	$1.04K_1$

注： K 前的数字称为匝比变换系数。

轮毂轴管感应淬火工艺优化

■ 牛恩来, 赵俊平

轮毂轴管(见图1)又称半轴套管,主要用于载货汽车驱动桥两端的轮边支承,在车辆行驶过程中不仅承受整车及所载货物的重量,而且随着路况的变化还要承受复杂的交变应力,因此,需对轮毂轴管表面进行感应淬火以提高其强度及耐磨性。本文主要针对轮毂轴管两种强化工艺——分段感应淬火工艺技术和整体一次感应淬火工艺技术的优劣性进行对比,以此推动更先进的技术在新产品中的应用,实现

提高产品性能,降低生产成本的目的。

1. 分段感应淬火工艺技术

当前国内主要车桥生产厂家大部分都设计采用复杂台阶的轮毂轴管结构,由于轮毂轴管特殊结构,目前感应淬火强化多采用分段多次进行。如图1所示,淬火强化区域包括两段外圆柱面及三个过渡圆角,淬火区域比较复杂。

分段感应淬火技术有以下缺点:

(1) 轮毂轴管有两段不连续的淬火区,分两道工序淬火,所需感应器品种多。

(2) 淬火变形超差造成废品率较高,且分段淬火生产节拍慢、成本高、工人劳动强度大。

(3) 分段感应淬火形成的中间淬火软带(见图1)降低了轮毂轴管的强度,由于淬火硬化区和软带硬度相差大,进入磨削工序软带部位表面粗糙度偏低,影响磨削质量。

(4) 分段感应淬火技术中间圆角2靠圆角1的热传导带起来,台阶尖角部位存在明显的过热问题。

(5) 分段感应淬火使零件储热少,自回火开裂风险增大。

对于以上分段感应淬火技术所带来的缺点,其中淬火变形问题可以采取加大磨削余量的办法解决,但会增加部分磨削加工的成本;其他缺点在使用分段淬火

因现场的设备状况(主要指振荡回路状况)与试验的设备不尽相同,所以确定的 K 值可能有出入,需要调整是不奇怪的。

⑥ 串联两圈感应器的求 K 方法,将两圈的圆周长相加成为一个圈,再以此圈的 ϕ 及 h ,在图4上查得 K_1 乘以表3的系数即可获得 K 值。

五、结语

(1) 由于高(中)频电流“趋肤效应”和“临近效应”的影响,使得淬火变压器绕组和感应器的阻抗不能计算,也不能测量。

(2) 本文利用试验方法求

出8kHz、100kW、375V供电的机式中频感应淬火变压器的匝比 K 值。

(3) 以上述 K 值为基础,利用电工学理论计算出各种供电规格的机式中频感应淬火变压器匝比 K 值和常用几种IGBT中频感应淬火变压器匝比 K 值。

作者简介:林信智,教授级高级工程师,上海恒精感应科技有限公司总工程师,曾出版《淬火感应器选用、设计与制造》《汽车零部件感应热处理工艺与设备》。

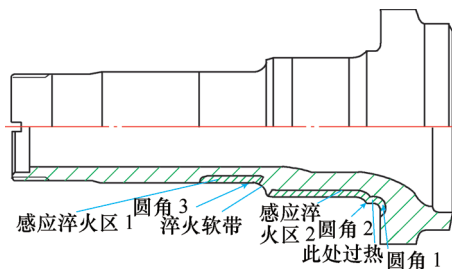


图1 轮毂轴管分段感应淬火区域分布示意