

⑧  
33-39, 32

感应加热, 感应器, 设计, 制作

# 感应器的设计与制作 (第一部分)

## 基本设计和调整

Stanley Zinn, S.L. Semiatin

丁 155.24

Zinn, S

邓华铭

从某种意义上说, 感应加热中感应器的设计是建立在大量实验数据基础上的, 而这些数据实际上又是从那些几何形状简单, 形如螺管感应器的不断改进中获得的, 因此, 感应器的设计通常都是凭经验进行的。现在连续发表文章介绍感应器设计的基本电气原理及一些应用最广泛的感应器。

### 1 基本设计依据

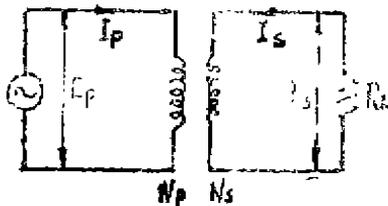
感应器类似于变压器的初级线圈, 而被加热件则相当于次级线圈 (如图1)。因此, 可借鉴变压器的某些特性来设计感应器。

变压器的重要特性之一是: 线圈耦合的效率与两线圈之间的距离的平方成反比, 而且, 通过变压器初级线圈的电流与初级线圈匝数的乘积等于通过次级线圈的电流与次级线圈匝数的乘积。基于这些关系, 在设计感应加热的感应圈时, 要时刻注意以下几个问题:

1) 感应圈与工件的耦合应尽量靠近, 以获得最大的能量转换。最好是: 磁力线能最大限度的穿过工件的加热部位。磁力线越密, 则该部位所感应的电流就越强。

2) 螺管感应圈大量的磁力线均指向感应圈的中心, 因此, 感应圈内侧的磁力线最集中, 那里的加热速度就最大。

3) 由于越靠近感应器有效圈的地方磁力线越集中, 因此, 感应圈的几何中心为一弱磁场区。这样, 如果加热零件避开感应圈的几何中心而靠近有效圈, 则通过的磁力线就多, 便可获得大的加热速度, 而工件与感应圈耦合较少的部位, 其加热速度就小, 如图2所示。该效应在高频感应加热中最为明显。



$E_p$ , 初级电压 (V)	$E_s$ , 次级电压 (V)
$I_p$ , 初级电流 (A)	$I_s$ , 次级电流 (A)
$N_p$ , 初级线圈匝数	$N_s$ , 次级线圈匝数
	$R_L$ , 负载电阻 ( $\Omega$ )

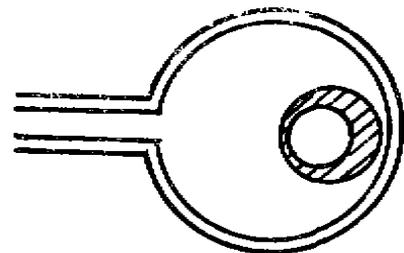


图1 感应加热类似于变压器原理的电路示意图

图2 工件避开感应圈几何中心的感应加热示意图

4) 在导电板与有效圈的连接点磁场较弱, 因此, 感应圈的磁化中心未必是其几何中心, 该效应在单匝感应圈中较为明显。如果感应圈匝数增加, 则通过初级线圈每匝的磁通量

增大，这种影响就不明显。由于工件不可能总位于感应圈中心，它将稍微偏离这一区域，因此，工件加热时应旋转，以保证均匀加热。

5) 在设计感应圈时，必须避免磁场的相互抵消。如图3所示，左边的感应器因两边线圈靠得太近，因而无电磁感应现象；中间的感应器设计成环孔形，将产生部份电磁感应，感应加热零件从开口处插进，感应圈能对零件进行加热。右边的感应器能叠加电磁感应，为典型的最佳设计。

从以上原理可知：一些感应圈能迅速传导能量加热工件，因为它们能使加热区域的磁力线更集中。以下三类感应圈能提供不同的加热方式：

- 螺管感应圈：加热零件位于感应圈内，该区域具有最大的磁通量；
- 扁平感应圈：磁力线仅从一个面穿过工件；
- 内孔感应圈：用于加热零件的内孔，在这种情况下，可利用了感应圈外部的磁力线。

通常，对于圆形工件，用螺管感应圈加热可获得最大的感应圈效率，而内孔感应圈的效率则最低（表1）。感应圈效率是指：输送给感应圈的能量被传递给工件的百分数，不要与整个加热体系的效率相混淆。

表1 感应圈的耦合效率

不同频率下的耦合效率	不同频率下的耦合效率				
	感应圈类型	10Hz		450KHz	
		磁钢	其它材料	磁钢	其它材料
螺管感应圈	0.75	0.50	0.80	0.60	
扁平感应圈	0.35	0.25	0.50	0.30	
马蹄形感应圈	0.45	0.30	0.60	0.40	
单匝感应圈	0.60	0.40	0.70	0.50	
凹状感应圈	0.65	0.45	0.70	0.50	
内孔感应圈	0.40	0.20	0.50	0.25	

感应圈的设计除与感应圈效率，加热模式，工件移动方式等有关外，还必须考虑生产率。由于仿型加热要借助于感应圈的几何形状，因此感应圈的形状是所有加热因素中最重要因素。通常，工件移进或移出感应圈的方式也是感应圈优化设计中所必须考虑的问题。同时，还应考虑能量供给的方式及生产率。如：某一工件需30秒钟的加热时间，设计感应圈时就应考虑成50秒，这样，要达到预定的生产率，就多需约一倍的加热时间。考虑这些因素，并广泛搜集感应器方面的技术资料，对于设计最佳感应器是非常必要的。

## 2 高一中频加热

高一中频热处理中，常用简单的螺管式感应圈，这类感应圈有单匝和多匝之分。图4示出了在螺管式感应圈基础上设计出的一些较常用的感应器。图4a为多匝感应器，常用于零件的单一部位加热；图4b为单匝感应器，图4c为单匝、多位感应器；图4d为多匝、多位感应器。在这些设计中，单匝能够与工件的各个加热部位相互耦合。

通常，高一中频淬火需要特殊形状的感应圈，以便耦合时达到均匀加热。最简单的方法

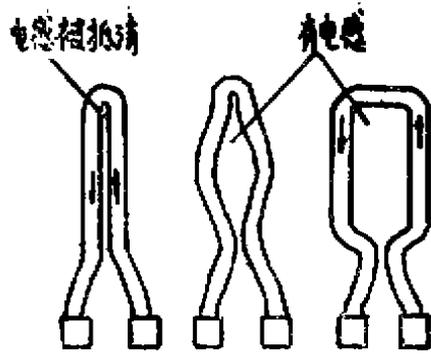
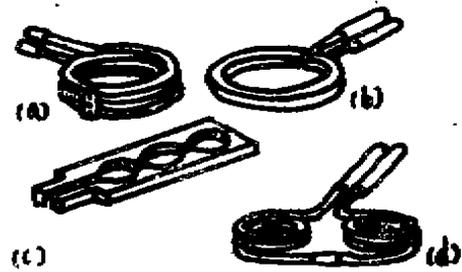


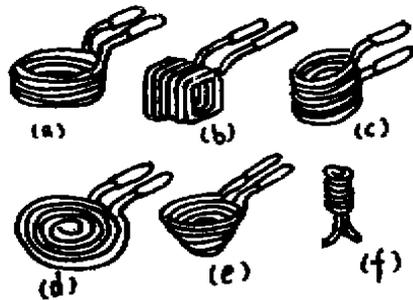
图3 不同形状感应圈对电感的影响



(a) 多匝 (b) 单匝 (c) 单匝、多位 (d) 多匝、多位

图4 感应器的典型结构

是，将感应圈弯曲成工件的形状，如图5所示。感应圈可以是圆形（图5a）。矩形（图5b）；有时，为了加热特殊形状的工件，还可将其做成椭圆形（图5c）。当仅对工件一个面加热，或者工件不需要周围各个面都加热时，常采用扁平形感应器（图5d），而螺管式锥形感应器（图5e）则常用于锥齿轮或圆锥形孔的加热。在某些情况下，工件的内孔也可用5f所示的多匝感应器进行加热。值得注意的是：除扁平感应圈和内孔感应圈以外，工件加热时均位于磁场中心。



(a) 圆形 (b) 矩形 (c) 椭圆形 (d) 扁平形 (e) 锥形 (f) 内孔形

图5 不同形状的多匝感应器

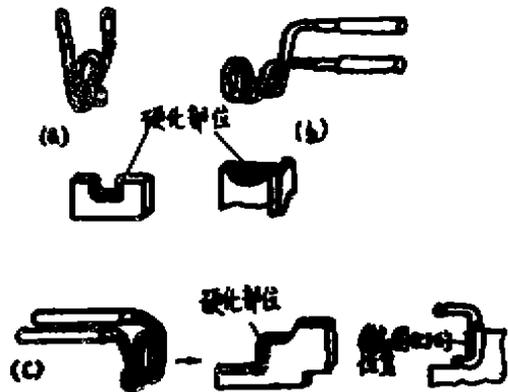


图6 用于局部加热的感应器

无论工件的形状如何，效率最高的感应圈本质上应设计成圆形。对于凹状感应圈，可视之为矩形，其末端被弯曲成“拱”状，以使工件能够顺利地穿过。而工件总是放在凹孔内加热的，因为那里的磁力线最为集中。图6示出了各种相类似的情形，即需加热硬化的部位放在感应圈的一侧，以保证该部位的磁力线最集中。

### 3 加热内孔的感应器

无论是淬火、回火、还是冷缩处理，常常要对内孔加热。实际上，450kHz频率所能加热的最小孔径为0.44in(1.12cm)，而10kHz所能加热的最小孔径为1.0in(2.54cm)。

内孔感应器的管壁应尽量薄些，感应圈的表面应尽量靠近孔壁。由于感应圈里的电流是沿感应圈内侧流过，因此，获得最多磁力线的最佳耦合处是感应圈内径到工件孔壁之间，这样，感应圈的横截面就宜小些。当频率为450KHZ时，感应圈外径与工件间的距离应为

0.062in(0.16cm)。图7a所示的耦合间距太大，若改成图7b那样，（即将感应圈的管子压平些，以增大感应圈的外径，减小耦合距离。）就可减小感应圈到工件的距离。

增大内孔感应圈的匝数，或者减小螺管的节距，均可增大磁通量。通常，匝间距不应超过管径的1/2，同时，感应器的总高度也不应超过其直径的2倍。图7c和7d是加热内孔的特殊感应圈，图7e的内孔感应器像四条垂直的U型管，加热时旋转工件，即可实现均匀加热。

由此观之，为了提高感应器的效率，加热内孔的感应器应选用薄壁铜管，或者要控制其冷却道。当工件的加热深度较浅时，由于其效率相对较低，也必须选用大功率的发电机。

#### 4 感应圈的特性

螺管式感应器在高度方向的中部磁力线最为集中，因此，该部位所形成的加热速度比端部大，但零件加热时间长时，端部的热传导和热辐射会迅速增大，要使工件长度方向可均匀加热，必须调整感应圈。调整感应圈的匝数、匝间距及其与工件的耦合距离，以获得一个均匀加热规范的方法常称为调节感应圈的特性。

已经有一些调整磁场的方法，如：对感应圈中心退耦，以增大与工件间的距离从而使该部位的磁通量减少；或者，减少感应圈中部的匝数（匝密度），也可达到同样的效果，后者更为常见。另一个方法是，选择整体的单匝感应器，增大感应器中间部位的孔径，也可取得同样的效果。

图8a是沿锥形轴轴向调整感应圈以达到均匀加热的例子。端部的匝间距较小，补偿了因锥度而导致的耦合的减小，这个方法还便于“穿过感应圈”加载或御载，便于将感应器安装

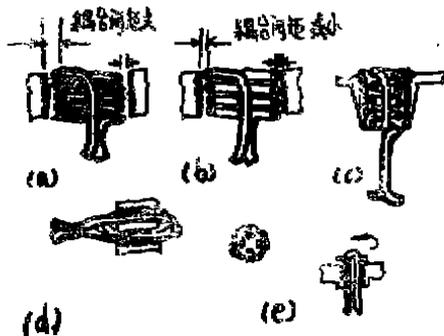


图7 加热内孔的感应器

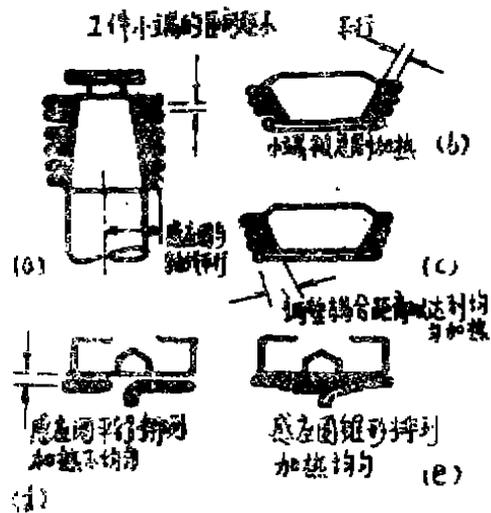


图8 改变耦合距离和匝间距的感应器特性调节方法

定位。锥齿轮的感应加热也有类似的要求，如图8b、8c所示，这里，由于锥度更大，采用了螺管式感应器。若采用扁平感应器，使中心退耦，也可达到均匀加热的目的。（图8d、8e）

#### 5 单匝感应圈与多匝感应圈的比较

工件的长度和加热均匀性是确定感应圈匝数时应考虑的两个主要因素。小螺距的多匝感应圈与工件间的耦合，可构成一个很均匀的加热模式。藉工件与感应圈之间耦合开度的增大，使磁力线仿型通过加热区域，也能进行均匀加热。但是，这个方法会降低能量转换率，

只有采用较低的加热速度时[如锻压过程中的加热],才宜使用该方法,若需要大的加热速度,仍需采用近耦合的办法,同时,感应圈的螺距必须能伸张,以避免发动机超载。

仿型加热要借助于感应圈的形状,与多匝感应圈毗连的强磁场区域会在工件上产生螺旋形花纹,被称为“旋风线路”。加热时旋转工件可消除这种花纹。对大多数淬火作业而言,由于持续时间短,在加热时间内旋转次数应不少于10次。

如果工件不易旋转,感应器就应用扁平的管子做成台阶状,或者给感应圈加一个衬圈,以实现均匀加热。绕制扁平感应圈时应使其长边与工件邻接,台阶状多匝感应圈可形成一个均匀平整的仿型加热层(图9)。台阶状感应圈的简便作法是:在老虎钳的两档板间卷绕、压制,然后退火。感应圈的衬圈可用铜片焊接在有效圈的内表面,该衬圈加大了电流流过的区域,使通过每匝的磁场加宽。通过控制衬圈的高度,调整磁场的宽度来满足使用要求。使用衬圈时,由电源供给的电流流过连接管(图10),在两个连接管之间,衬圈只有靠管壁进行散热。



图9 台阶状感应器示意图

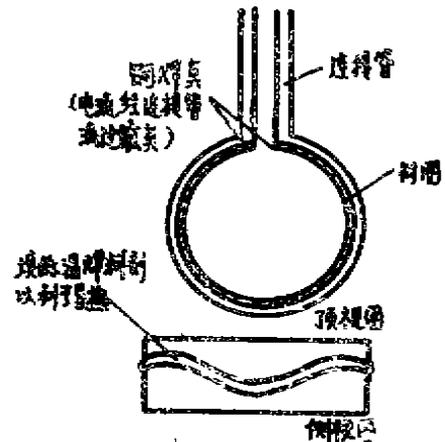


图10 带衬圈的感应器

在(组装)带衬圈的感应器时,只需将衬圈首尾两连接点用铜焊法与连接管拼拢,为保证机械强度,可全部焊合。其次,为了最大限度地导热,应考虑到铜有时从感应圈内侧向外导热的性能不佳,而感应圈冷却水的温度又绝不会超过水的沸点,且远低于焊料的流动点,因而可在管壁与衬圈间的相邻表面填以低温焊料剂。

当工件的加热长度增大时,多匝感应圈的匝数也应呈比例地增加。图11a,感应圈的高度与其直径是呈比例的;图11b,感应圈直径与工作面宽度之比不恰当,图11c的多匝感应圈提供了一种较为适用的加热方式。图11d那种多匝感应圈广泛用于大直径工件的“单次加热”。

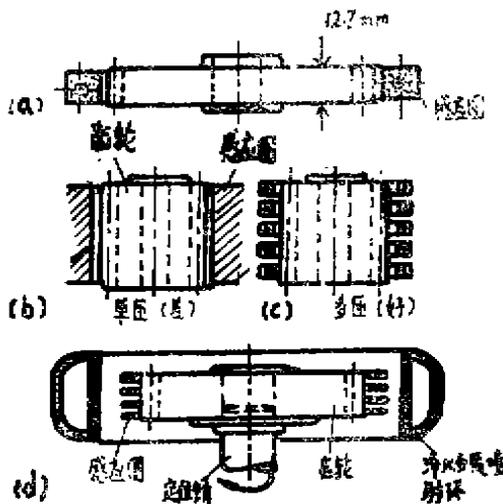


图11 选用多匝或单匝感应圈取决于工件长度/直径之比

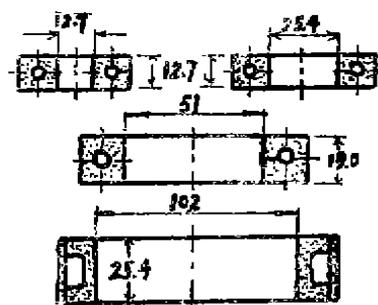


图12 常见的单匝感应圈圆形内径—高度比例关系

此感应圈有利于淬火介质在匝与匝之间均匀喷射。

当感应圈的高度为直径的4~8倍时，电能密度高，难以进行均匀加热。在这种情况下，常用能扫描工件长度的单匝或多匝感应圈。但是，在给定的能源条件下，多匝感应圈扫描工件的速度大，因而能够提高加热效率，单匝感应圈则对比工件直径细的区域可有效地进行加热。

单匝感应圈的直径与最佳高度之间的关系随感应圈尺寸不同而不同。小感应圈的高度可与其直径相等，这是因为电流能够在较小的区域内集中。对于大感应圈，其高度不应大于半径。感应圈越大，则高度与内径的比例就越小——如：内径为2in(5.08cm)的感应圈，最大高度为0.75in(1.91cm)；内径为4in(10.16cm)的感应圈，最大高度为1.0in(2.5cm)，图12为一些典型的内径—高度比例关系。

## 6 耦合距离（加热间隙）

最佳耦合距离的选择取决于加热类型（单次加热或扫描整个工件的加热）和材质（铁质或非铁质）。单次加热时（同时加热）工件能够旋转，却不能通过感应圈移动，建议工件到感应圈的耦合距离为0.060in(0.15cm)；对于连续加热（逐一扫描工件的加热），耦合距离可选为0.075in(0.19cm)，并允许工件平直度的变化；磁性材料的透入式加热，可选用多匝感应器和低功率转换器，在这种情况下，耦合距离可以不固定——大致为0.25~0.38in(0.64~0.95cm)。但是，值得注意的是，工艺过程中的条件和加工方法也决定着耦合距离。如果工件不直，则必须增大耦合距离。对于高频，通过感应圈的电流较低，应减小耦合距离，而对于低、中频，通过感应圈的电流较大，则可增大耦合距离以利于安全操作。如果是自动化生产，感应圈的耦合常常可以松一些。

以上所列的耦合距离主要用于近距离耦合的热处理。在多数情况下，耦合距离随工件直径的增大而增大。典型的数据为：0.75，1.25，1.75英寸（19，32，44厘米），对应的钢坯直径分别为：1.5，4，6英寸（38，102，152厘米）。

## 7 工件结构尺寸不均匀的影响

工件横截面和质量的变化，对所有感应圈的磁力线仿型均有影响。如图13所示，当感应圈环绕轴形件的端部（轴颈）加热时，轴颈处的加热深度较深，为了减少这种影响，可将感应圈调整为与轴颈水平或略低于轴颈。盘形或轮形件加热也存在同样的问题。如果感应圈与

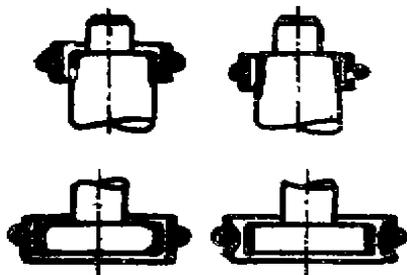


图13 感应圈位置对工件端部加热的影响

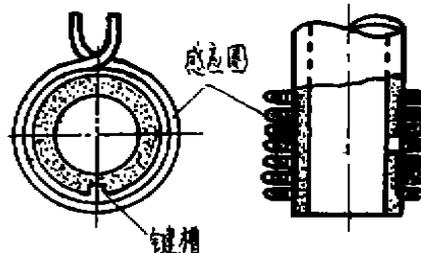


图14 在高频感应加热中，尖角、键槽、圆孔处最易过热

工件端部相重叠，则工件端部的加热深度将大于中间部位的加热深度，此时，可将感应圈缩短，或将感应圈端部的直径做得比中间大，以减少与重叠部位的耦合距离。

在轴形件端部，磁力线耦合使加热深度加大，在工件的圆孔、长孔，或凸台处也存在同样的情况（如图14）。若工件有圆孔，则在圆孔处将产生一附加涡流，因此，圆孔的加热速度比工件的其余部位要大得多。若在圆孔处加一个铜芯轴，则可有效的矫正或消除这一问题。



图15 采用铜芯轴以控制内孔的仿形加热

芯轴的位置可控制总的加热模式（如图15所示），而且，工件加热后淬火，芯轴可减小小孔的变形。

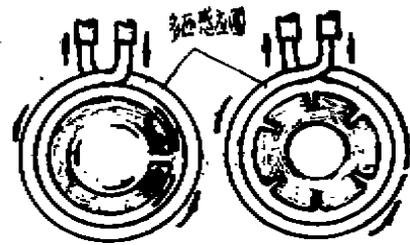


图16 感应电流仿形流过工件，使工件槽孔过热

用螺管式感应圈对有槽孔的工件进行加热时（如图16所示），连续电流将被槽孔切断，此时，电流从工件内侧流过以形成闭路，这便是同心感应器的设计基础。值得注意的是，在感应圈工作电压下工件将有较高的电流流过，这是由于槽口封闭，工件外圆的电阻通路缩短所造成的。于是，同样的感应器，因电流的增大而大大提高了加热速度。

## 8 电磁分流器

当同时对一个工件的两个不同却又相邻的部位加热时（如图17所示），相邻两个感应圈的磁场有可能重叠，这将导致整个工件均被加热。为了避免这个问题，相邻两个有效圈的绕向应相反，用这个方法，有效圈之间的磁场就能被抵消。在图17中，值得注意的是，导电板的绕向最关键，而且，若反方向感器远离感应圈的导电板，将对整个体系带来不必要的损失。另一种反绕感应圈如图18所示，图18b为18a改型后示意图，这类感应圈有效地用于仅对槽孔边缘加热而中心不加热的情形。

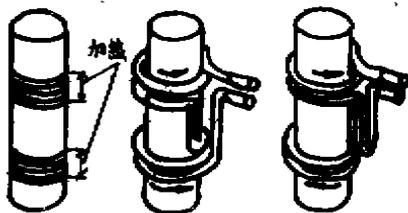


图17 相邻有效圈绕向相反以控制同一工件不同部位的仿形加热

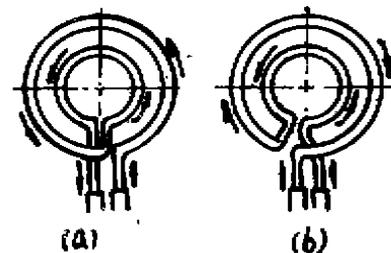


图18 扁平感应圈设计  
(a)整体均匀加热 (b)仅对边缘加热

另一类常用于上述情形的的方法是：在两个活动的有效圈之间接一短路（下转 32 页）

设备使用一年以后, PLC-2/30微处理机亦出故障不能工作, 美方人员已带回修理。

#### 4.2.2 设备的结构上也有不足之处

主体炉的外炉门, 系20钢板磨削加工而成, 垂直升降仅靠门框两侧的两个辊轮压紧, 随着使用时间的延长, 炉门会变形, 密封难以保证。按常规, 门框上应加有可调整的石棉盘根之类的密封件。此外, 炉门与升降气缸间不是用链条连接, 而是用一根钢丝绳连接, 钢丝绳在长时间的重力作用和受热条件下工作, 很易被拉长, 致使炉门“部分升起”时, 下端长方形缺口失去正常的位置高度, 造成料车的推拉头不能顺利通过外门缺口进出炉内, 以致碰撞在炉门上, 损坏门框上的辊轮支架, 也增加了炉门的变形。

卧式油搅拌器从近两年的使用看, 密封性较好, 未出现漏油现象, 但搅拌器的转速要靠调整电机轴上的组合式皮带轮的槽宽来改变, 极不方便, 不能适应结构尺寸、材料不同的淬火件的处理, 若采用调速电机就方便了。

清洗机设计上虽然功能较齐全, 但调试时发现其液面控制高度偏低, 以致撇油器根本不能与清洗液面接触, 无法将浮油撇出, 现升高溢流口位置后解决了。

GPG“202”吸热发生器装置虽具有体积小、产气量大的优点, 但使用中催化剂粉碎及结炭黑后都积存在U型反应缸的转弯处, 致使气流不畅, 影响产气量, 气氛成分难稳定, 降低了催化剂的更换周期。

发生器配用的 Lira-3000 型红外仪, 精度较低, 而且常出现指针卡死现象, 美方人员来厂检修时亦未能调整好, 另外受红外仪操纵的自动控制调节阀的调整范围偏小, 以致原料气成份发生变化时, 往往造成气氛成份失控。

4.3 因种种原因本套设备从安装调试到投入生产, 经历了两年多的时间, 除了上述配套仪表、计算机系统出故障、零件损坏需更换, 花去很长时间外, 卖方公司派来的调试人员不能迅速排除故障, 售后服务不及时也是一个重要的原因。此外能源供应不正常、操作不熟练也有影响。

目前我厂及美方有关专业人员正在为使设备正常稳定地运行而努力工作。

(上接 39 页) 线匝。在这种情况下, 该短路线起备择线路的作用, 可集聚过剩磁力线以吸收这些漏磁场, 因此, 有时也称之为电磁分流器。对于活动的有效圈, 短路线匝必须水冷以使其散热, 图19为一典型结构。

短路线匝也常有效地用于避免大感应圈的漏磁场, 因为该漏磁场有可能使工件的边缘部位被加热。

生产中, 当需要确定感应圈的最佳匝数时, 也可用电磁分流器对感应圈进行安装试验。在这种情况下, 附加匝数可根据需要而加减; 进行试验时, 用铜皮或暂时铜焊形成短路, 加热试验结束后再拆去即可。(待续)

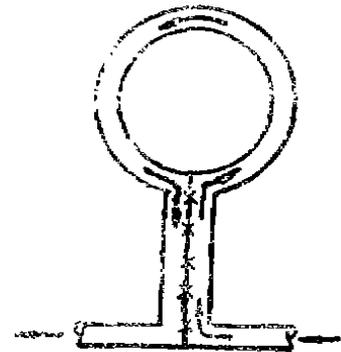


图19 水冷-电磁分流器典型结构

邓华铭译自《HEAT TREATING》1988.6

熊定国、李继清校