

提高感应器使用寿命的方法探讨

谢文

十堰天舒感应设备有限公司 湖北十堰 442002

摘要：感应器作为感应淬火的关键零部件，其稳定性和寿命是淬火质量的重要保证因素，如何提高感应器的使用寿命，对于工艺维护、产品质量的稳定、成本的节约，均有着非常重大的意义。

关键词：感应器；使用寿命；设计；铜材；维护保养

1 序言

我们经常听到有客户或同行谈起：有些供应商制造的感应器使用寿命短，而有些供应商制造的感应器使用寿命很长，肯定是制作有问题，或是焊接水平有问题，或是铜材有问题。其实这都有点儿“盲人摸象”的感觉，都只是片面地说出了其中的某一个点，不全面。

本文结合相关资料和多年积累的工作经验，以及客户的相关建议，对提高感应器使用寿命的途径，分别从多个方面进行分析、改进，以便大家进行探讨。

2 感应器的设计及材料选择

2.1 间隙的选择

工件与感应器间隙如图1所示。

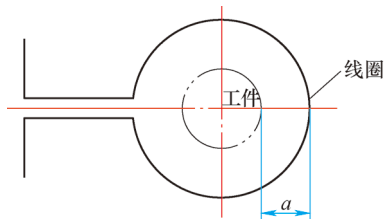


图1 工件与感应器间隙示意

感应器与工件的间隙 a 一般选择1~3mm。有些特殊零件，间隙最小可达0.5mm，最大可达8mm甚



图6 切样

5 结束语

采用整体仿形淬火感应器，不但能够避免硬化层不均匀现象，而且对 R 角、台阶部位的淬硬层要求也很容易满足，可以实现同步加热。整体加热感

应器还具有以下优势。

- 1) 实现对工件进行一次装夹完成整体淬火，减少了掉头二次装夹，提高了生产效率。
- 2) 感应器和工件的间隙比较一致，避免了扫描感应器出现的质量不稳定的情况。
- 3) 感应器和冷却喷水相对固定，不易损坏，且喷水盒不会随着产品型号的更换而更换。
- 4) 通过合理控制水溶性淬火介质的浓度和冷却时间及冷却液的温度，避免零件淬火开裂的危险。

参考文献：

- [1] 沈庆通，梁文林.现代感应热处理技术[M].北京：机械工业出版社，2008.
- [2] 沈庆通，黄志.感应热处理技术300问[M].北京：机械工业出版社，2013.

MW 20210612

至20mm，这需要根据技术要求和零件的加工状况选择，不可一概而论。

1) 间隙太大时，感应器效率太低，需要的功率很大，感应器如果冷却不及时，就会降低感应器的使用寿命，甚至烧毁。

2) 间隙太小时，感应器与工件之间容易拉弧、打火，也会降低感应器的使用寿命。

2.2 铜管材质的选择

(1) 铜管壁厚的选择 在机械空间允许的情况下，尽量选用通径较大、壁厚符合频率要求的铜管，这样能保证感应器冷却水的流量，提高感应器寿命^[1]。

电流透入深度计算公式为

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu_r f}}$$

式中 Δ ——电流透入深度 (mm)；

ρ_1 ——材料的平均电阻率 ($\Omega \cdot m$)；

μ_r ——材料的相对磁导率；

f ——频率 (Hz)。

铜管壁厚： $C \geq 1.35\Delta$ ，其中 C 为壁厚， Δ 为常温下的电流透入深度，不仅是感应器的铜管选择依据，也是变压器铜管的选择依据。根据工作频率选择铜管壁厚见表1。

表1 电流穿透层厚度与频率和铜管最佳壁厚的关系

f/Hz	Δ_{Cu}/mm	C/mm
50	9.530	15.0
1000	2.130	3.4
2500	1.340	2.1
10^4	0.670	1.0

注： $\rho_{Cu} = 1.8 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 。

(2) 铜管材质的选择 一般有T2、T1、TU2、TU1，含氧量 $T1 < T2$ ， $TU1 < TU2$ ，铜管含氧量越低，焊接性越好，焊缝性能越好，感应器使用寿命越高。

根据相关资料，氧是影响纯铜钎焊性能极其有害的元素，这种影响的原因是因为以氧化亚铜存在的氧占据焊缝大量表面积，因表面张力过大，造成焊条熔液在纯铜表面上不能很好地湿润纯铜，而出现焊条熔液与纯铜表面难于焊合的现象。

2.3 感应器冷却方式的选择

感应器尽量采用冷却水冷却，不采用淬火水冷却。

却。

扫描淬火感应器的冷却方式如2所示（感应器冷却水与淬火水分开）。

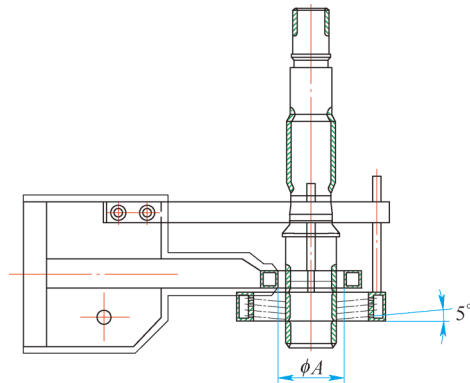


图2 扫描淬火感应器

内孔、外圆喷水扫描淬火方式可详见参考文献[2]，这里不再赘述。

2.4 有效圈的设计及强度

(1) 有效圈设计 图3所示为外圆感应器，有效圈设计一般会采用加热环1、加热环2车加工后，与竖直加热管1、竖直加热管2焊接组合而成。

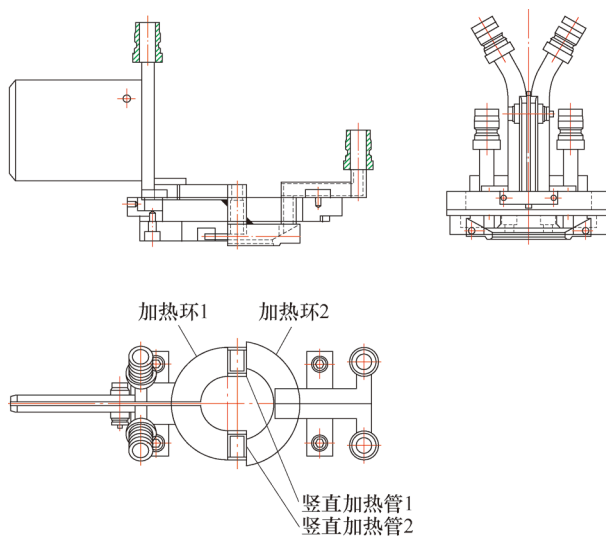


图3 外圆感应器示意

而某些知名德国和日本企业，则对加热环与竖直加热管采用整体铜块加工而成，减少了焊缝，从而达到提高感应器寿命的效果。

这种整体式感应器，由于是机加工而成，因此尺寸一致性很好，但成本也相当昂贵，不是一般企业所愿意承受的。

(2) 有效圈强度设计 感应器在加热过程中，

线圈与工件之间存在很大的磁场力，如果线圈强度不够，很容易变形，使得线圈的尺寸偏离调试合格的尺寸，从而导致产品不合格，或者感应器与工件接地打火，使得感应器寿命降低，甚至损坏。因此，可对有效圈进行加强设计，如图4所示。

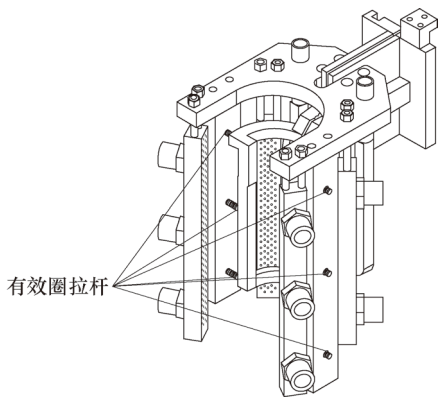


图4 感应器加强示意

2.5 感应器水路设计

(1) 外圆感应器 图5所示为外圆感应器冷却水路设计。很明显，两侧进水、中间出水，感应器的流量最大，对感应器的使用寿命提高是有利的^[3, 4]。当然，并不是所有的感应器都需要采用“二进一出”“二进二出”的形式，在铜管口径足够、冷却充分的情况下，常规“一进一出”的冷却方式也是可以的。感应器冷却不同进水、出水方式（感应器冷却水流量）见表2。

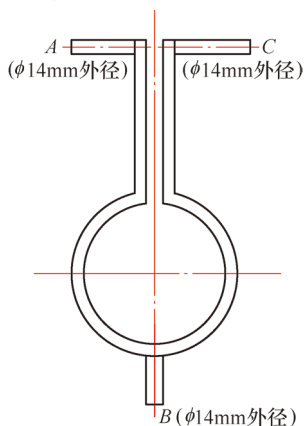


图5 外圆感应器冷却水路

(2) 内孔感应器 对于内孔特别是小内孔感应器（见图6），其中导电管之一就是从小孔中心引出来的，此导电管除了本身通过大电流之外，还受到多匝线圈内磁场的加热，因此发热最大，使用过程中此导电管必须接到冷却水的进水端，使冷却水先

表2 不同进出水方式（感应器流量）

管接头号	A	B	C	压力 /MPa	流量 /L·min ⁻¹
进水或出水	进	出	进	0.5	28
	出	进	出		25
	进	进	出		23
	进	封闭	出		18.5

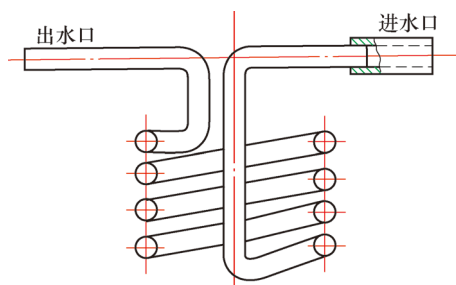


图6 内孔感应器冷却水示意

通过这一段，可以提高感应器的使用寿命。

3 感应器的制作、绝缘装配

3.1 感应器的焊接

(1) 焊接方式 我公司给客户的感应器，有些经验不足的员工按图7a所示方式焊接，感应器到达客户现场，出现感应器寿命不足的情况，后来根据情况分析，改为图7b所示的焊接方式，感应器使用寿命得到大幅提高。

(2) 钎焊材料 感应器上有些承载电流较大关键位置的焊缝，尽量采用纯铜焊接，尽量少用黄铜或磷铜焊条（熔点：纯铜>黄铜>磷铜），甚至不用，以提高焊缝的耐热温度，从而提高感应器的使用寿命。

3.2 后期处理

(1) 酸洗 采用浓度为5%硫酸，酸洗时间1~2h，如果酸洗时间过长，对铜材本身也有一定的腐蚀作用。

(2) 喷砂 喷砂所用砂子颗粒较大或喷砂压力太大时，都会在铜管的表面形成凹坑，使感应器加热过程中，在铜管表面凹坑处出现尖角效应，形成早期的微观烧熔。

3.3 绝缘

1) 绝缘板采用聚四氟乙烯。

2) 为了防止导电板从两侧跳弧，绝缘板高出导电板3~5mm，如图8所示。

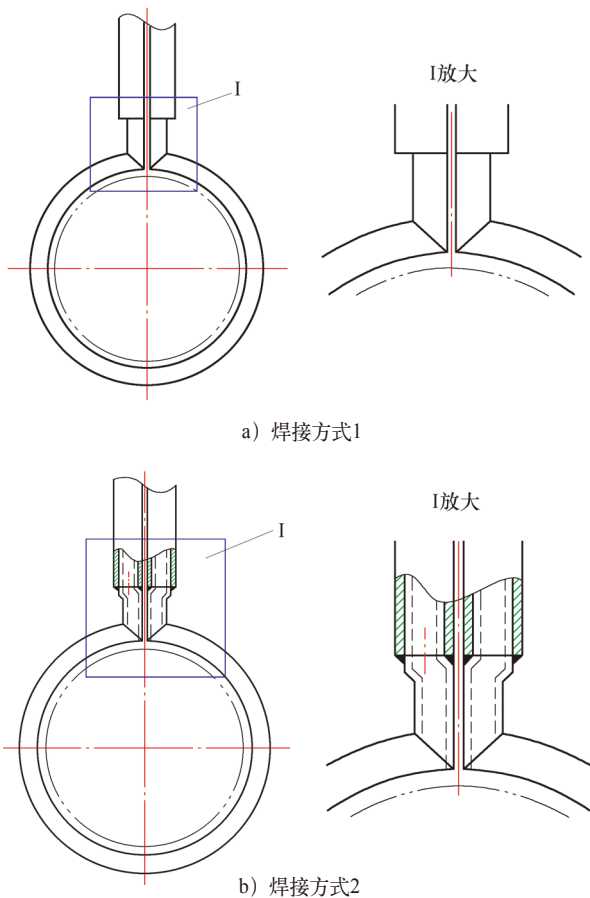


图7 两种不同的焊接方式

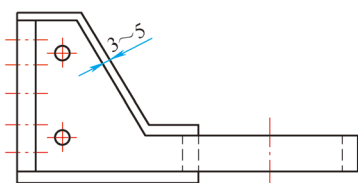


图8 绝缘板与导电板的关系

3.4 定位精度

产品本身的定位基准面精度或机械定位精度不准或不精确，会造成感应器与工件的间隙不准，使感应器与工件发生碰撞或刮蹭，降低感应器的使用寿命。

3.5 产品的清洁度

绝大部分国企或大型企业，对到达淬火工序的工件，都会进行清洗、烘干。

但是，目前很多中小企业都不重视，加工完成的产品，不经过任何的清洗工序，直接进入淬火工序。虽然经常有客户向我公司投诉感应器使用寿命短，但是经过调查发现，客户现场的产品加工完

成之后，不经过任何的清洗工序，到达淬火工序时，零件表面存在很多油污、铁屑。在淬火加热过程中，油污燃烧，烟雾在感应器表面形成很厚的油腻，铁屑会被磁力吸附在感应器内壁结壳，使得感应器的加热效果变差，而为了满足工艺要求，就要不断地增加功率或降低扫描速度，但感应器的冷却又跟不上，同时结壳会在感应器和工件之间形成导体，加热通电时，产生微小电火花，使轴径表面和线圈表面同时烧伤。

因此，油污、杂物，不仅会导致感应器失效，还会导致PAG水基淬火冷却介质被污染，降低淬火冷却介质的使用寿命，如果检测不及时、充分，则会间接造成零件开裂等质量事故。

4 设备的水路压力与冷却水的选择

(1) 感应器冷却水路压力 有很多客户购买十堰天舒的感应器，配置到其他品牌的淬火机床上，使用中客户经常抱怨感应器寿命短，希望提高使用寿命。经过实地考察、分析，建议在水路上增设高压泵（见图9），感应器寿命大幅提高。同样的感应器，水路增设高压泵后，感应器冷却水流量比没有高压泵增大了30%（实际感应器由于铜管通径大小差别，可能大于或小于30%）。

(2) 冷却水的选择 冷却水的硬度偏高，感应器在使用过程中，就会在铜管内壁形成水垢，导致铜管与水不能直接接触，使导热变慢，感应器寿命

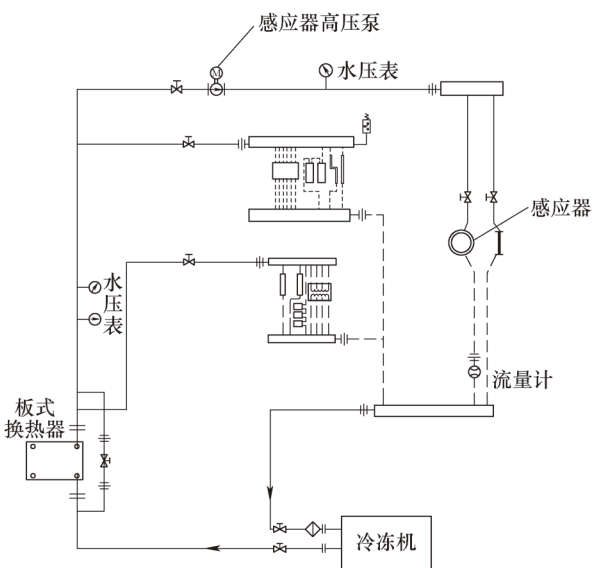


图9 感应器冷却水路增设高压泵

降低。水垢严重时，会使铜管通径变小，水流量减少，导致感应器寿命下降，一般设备感应器都有流量和水温保护，但是在使用过程中，操作人员或管理者为了保证生产，将流量保护值改低或将保护水温升高，经常出现客户投诉感应器寿命不达标，而设备厂家还找不到原因，到现场发现冷却水质或保护值都被不合理地修改了。某知名德国企业设备对于冷却水的要求见表3。

表3 某知名德国企业设备对于冷却水的要求

序号	项目	数值
1	pH	7~8
2	氯化物含量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	≤ 40
3	硝酸盐含量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	≤ 10
4	硫酸盐含量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	≤ 100
5	铁含量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	≤ 0.05
6	锰含量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	≤ 0.05
7	电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	≤ 400 (25℃)
8	硬度/(°dH)	4~6

注：1° dH = 17.8×10^{-6} 。

案例1：东风某专业厂，冷却水采用自来水，且混入了防锈剂，冷却水水箱内形成蓝色结晶（见图10），蓝色结晶随着循环进入感应器内，导致感应器烧毁。改为蒸馏水之后，问题得到解决。

案例2：东风某专业厂，反馈感应器经常烧毁，找不到原因，经过仔细排查，发现管道中有O形圈进入管道（见图11）。另外，在其他客户售后



图10 冷却水蓝色结晶



图11 水管中有异物

现场，也发现生料带等异物进入管道，造成流量异常。清理杂物后，冷却水流量达标。

5 感应器调试的参数匹配问题

(1) 频率的影响 一般情况下，参考表1来选择铜管壁厚和频率的关系。

(2) 电压、电流的影响 在感应器调试过程中，参数的匹配问题对感应器的使用寿命也有非常大的影响。

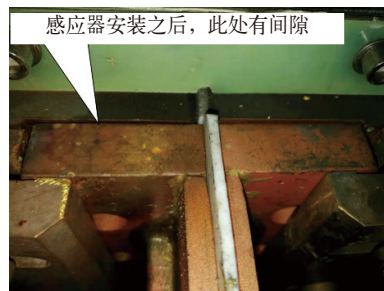
例如，在500V/320A、400V/400A、320V/500A匹配下，得到的功率均是160kW。

根据焦耳定律， $Q=I^2Rt$ ，在感应器和加热时间一定的情况下，电流越大，感应器的发热量也就越大，相应地感应器使用寿命自然会降低。由此可见，当感应器寿命较低时，第一时间就归于感应器制作不良，显然有失偏颇，而是应全面分析，不能忽视调试参数对感应器使用寿命的影响。

6 感应器的定期检查、维护与保养

6.1 感应器的定期检查

感应器安装后有间隙，或感应器压紧不牢，会导致感应器压板烧熔，如图12所示。因此，要排查或定期检查感应器的压接是否可靠，即使感应器没



a) 感应器压紧不牢



b) 压板烧熔

图12 感应器的安装

有拆装，也要定期检查，因为感应器长期在强磁场下工作发生振动，会导致压紧螺钉松动或接触面不牢靠。

6.2 感应器的维护与保养

(1) 感应器定期校正 即使线圈有效圈加强（见图3），但感应器在加热过程中，线圈与工件之间仍存在很大的磁场力，线圈依然会变形，从而导致产品不合格或损坏感应器，为了避免这种风险，需要定期用标准的模具对有效圈进行校正。

(2) 定期清理有效圈氧化皮和油污 由于感应器长期使用后，氧化皮、油污黏结在感应器表面，会降低感应器的效率，增加感应器与工件放电打火的风险，因此必须定期清理。

(3) 定期对感应器安装座进行清洁处理 感应器工作环境恶劣，周围温度较高，湿度较大，不可避免地有油污、异物黏结在感应器底座上，会造成感应器接触不可靠，感应器与接触导电板之间放电，损坏感应器。因此，要定期清理感应器底座的异物，确保导电可靠。

(4) 定期更换导磁体 感应器上镶嵌的导磁体，一般有硅钢叠片、铁氧体导磁体、可加工导磁体，提高其使用寿命的途径就是不超过其使用温度。

控制导磁体的发热，除选择合适的使用频率外，还与冷却方式有直接关系。首先导磁体的冷却主要依靠其与铜管接触传热，其次是辅助喷水或滴水冷却。

铁氧体超过居里点就会失效（一般不超过 180°C ，特殊的能达到 500°C ），可加工导磁体为 $250\sim 300^{\circ}\text{C}$ ，硅钢片居里点最高。硅钢片镶嵌在铜管上，受到磁力的作用会发热，称为铁损。其值与电流频率、磁场强度与硅钢片的厚度有直接关系。硅钢片的老化（磁特性的衰变）是由矫顽力与磁滞损耗的升高而引起的。除老化外，还会发生锈蚀、松动，因此使用一定时间后，需要对导磁体进行加固或更换^[5]。

(5) 定期检查磨损程度 对于曲轴感应器，需要定期检查定位块的磨损程度。例如，德国某知名设备厂家规定，间隔定位块的磨损尺寸不能超过 $0.3D$ （见图13， D 为有效圈内径与间隔定位块的间隙； B 为定位块包容直径； C 为有效圈内径）。

定位块磨损超过极限后，线圈与工件的间隙减小，工件对零件的吸力增大，造成感应器与工件打火，烧伤零件，损坏感应器。

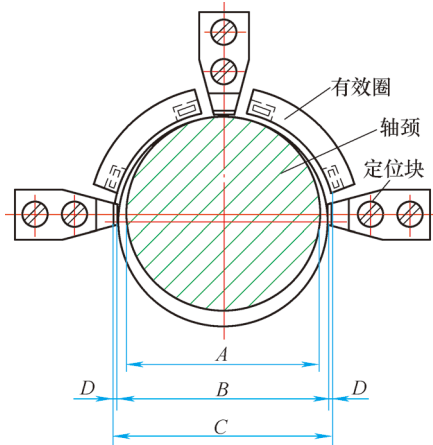


图13 定位块磨损相关尺寸

7 结语

感应器的使用寿命，除了选材、设计、焊接和装配之外，与设备水路设计也有很大关系，使用者的良好操作和保养习惯也是提高感应器使用寿命的关键。

关于提高感应器使用寿命的方法，笔者的论述可能存在偏颇和不到位的地方，大家可以相互探讨、学习。

参考文献：

- [1] 李韵豪.锻压工业中的感应加热（第一讲）：感应加热的基础[J].机械工人（热加工），2007（1）：80-81.
- [2] 谢文，许刚.一种值得推广的内孔感应淬火工艺调试方法[J].金属加工（热加工），2021（5）：38-40.
- [3] 沈庆通.如何提高淬火感应器的使用寿命[J].机械工人（热加工），2004（4）：39-41.
- [4] 沈庆通.淬火感应器失效案例及提高寿命途径[J].金属加工（热加工），2015（S2）：58-62.
- [5] 沈庆通，黄志.感应热处理问答300问[M].北京：机械工业出版社，2013.

MW 20210808