金属带的感应加热

兵器工业部新技术推广研究所 （北京 100089） 冯伟年

金属带材首先很薄，厚度≤1mm；其次很长，成卷带材长数千米。传统上带材成卷在罩式炉中退火时间长达数十小时，预热、固化等必须用长达百米的连续炉加热。金属带若感应加热，其加热速度极快，带材可以在行进过程中连续加热，效率高，能耗低，占地面积很小，具有明显的优越性。

金属带材的感应加热有两种基本方式：纵向磁场加热和横向磁场加热。

一、纵向磁场

1. 感应器是螺旋形

金属带置于螺旋感应器内加热，同时带材沿y轴方向行进，如图1所示。螺旋感应器通入电流后产生的磁场H与带材表面平行，沿y轴方向。带材中产生的电磁场E沿表面x轴，电场E和磁场H形成的电磁能P加热金属带，垂直于E和H构成的平面（xy）沿z轴由表面向内传输，电磁能沿z轴由表面向内衰减，形成表面温度逐步沿厚度方向降低，心部温度最低。

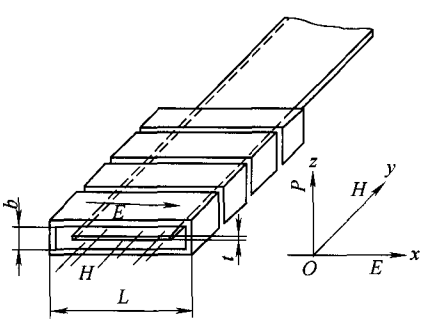


图1 金属带在径向磁场中感应加热

2. 电流频率

由电磁场理论可知，感应加热时，金属吸收的

术交流。

四、采购注意事项

（1）端正心态，以企业利益为重，以企业主人翁的高度责任感，不计较个人利益，为企业选择最合适的淬火冷却介质。

（2）需要具备金属材料及热处理方面的基本知识，特别是淬火冷却介质方面的基本知识，能将金属材料的性能与热处理工艺（加热与冷却）结合起来，从技术上明白材料的淬透性与淬火冷却介质冷却性能之间的关系。

根据本企业热处理产品的材质、工件形状、尺寸大小、技术要求，以及热处理设备（含配套的辅助装置），并参考同行企业的使用经验来确定淬火冷却介质的种类。

（3）借鉴同行用户的使用效果和经验，咨询多家国内外生产和应用的知名淬火冷却介质生产企业，了解介质的使用性能特点和注意事项，以及介质在生产中的应用效果，多方面进行综合对比，以了解介质生产企业对客户诚信态度和技术服务的质量及水平，最好多问些使用中的用户，且有必要去用户现场进行实地参观考察。

（4）熟知所选淬火冷却介质的使用条件（如换热、搅拌），并提前完善这种条件。尤其是新购进的热处理生产线，在签定购买设备技术协议时，要考虑淬火冷却介质的冷却换热降温（特别是在极其恶劣情况下）和淬火冷却介质的有效搅拌。不考虑这一点，会在设备的使用验收和今后的热处理生产中影响产品质量，给企业带来损失。

MW（全文完）（20120822）

电功率（能量）P为

$$P = FH^2\sqrt{\mu_r \rho f} \qquad (1)$$

式中 H——磁场强度；

μ_r——相对导磁率；

ρ——金属的电阻系数；

f——频率；

F——吸收系数，和带材的厚度t与穿透层厚度δ之比有关。

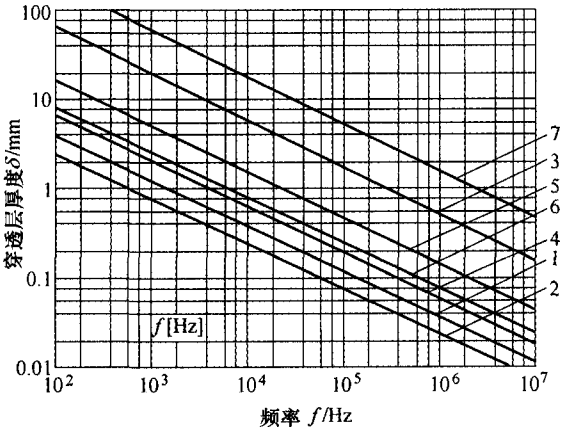
当t/δ在合理的范围内，F值最大，即金属带材能吸收电功率的效率最高。对非磁性材料：t/δ=3～3.5；磁性材料：t/δ=2.8～3.2。

电流穿透层厚度δ为

$$\delta = 5030\sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \qquad (2)$$

必须指出，电流穿透层δ与电磁能的衰减具有相同的物理意义，意味着能量由表面向内衰减，垂直于H和E构成的平面（xy）沿z轴表面向内，在穿透层δ内吸收的电功率为从表面进入总功率的86.4%，其余13.6%透过δ层向内传输。

工业中常用的几种金属的穿透层δ与频率f之间的关系如图2所示。



1—钢（20℃，μ_r=40） 2—钢（20℃，μ_r=100） 3—钢（800℃，μ_r=1） 4—铜（20℃） 5—铜（800℃） 6—铝（20℃） 7—石墨

图2 不同材料在温度变化时频率与穿透层厚度之间的对应关系

由式（2）可知，穿透层δ是f、μ_r和ρ的函数。

钢在居里点（760℃）以下，是磁性材料，μ_r可达20～200，在相同条件下，穿透层δ较小，可以采用较低频率f。

铜、铝、不锈钢，以及760℃以上的钢处于非磁性状态，则需要高得多的电流频率。

如加热厚1mm的钢带，合理的穿透层δ=0.3～0.4mm，图2中分别用曲线1和3显示，低温和高温时适用合理频率，低温时频率$f_L=10^4$Hz，而高温时为$f_h=2\times10^6$Hz。

3. 感应器结构

感应器是将电源的能量传输给金属带材的电磁能量转换器，感应器的结构直接影响能量的传输效率、带材的加热温度及均匀性，以及运行过程的可靠性。

（1）内腔厚度b 由式（1）可知，感应加热时传递电磁能与磁场强度成正比，而由电流I产生的磁场强度H与其通过导体的距离$R=b/2$成反比。

$$H = \frac{\mu_o I}{\pi \mu_o b}$$

式中 I——感应器电流；

μ_o——空气的导磁率。

内腔厚度b越大，则作用于金属带表面的磁场强度H呈直线下降，传输的能量减少，加热效果差。

当感应器接入电源后，产生的磁通ϕ充满感应器的内腔空间，由三部分组成。即

$$\phi = \bar{\phi}_i + \bar{\phi}_o + \bar{\phi}_w$$

$$u = -\frac{d\phi}{dt} = \frac{j\omega}{\sqrt{2}}(\bar{\phi}_i + \bar{\phi}_o + \bar{\phi}_w) = \bar{u}_i + \bar{u}_o + \bar{u}_w \qquad (3)$$

式中 ϕ_i——通过感应器导体的磁通；

ϕ_w——进入金属带内的磁通；

ϕ_o——空气隙内的磁通，也称漏磁通。ϕ_o=$HL(b-t)$，L为感应器内腔长度；

u——感应器的端电源；

u_i——在感应器导体内产生反电势；

u_w——在金属带内产生的感应电势；

u_o——空气隙内产生的反电势；

ω——角频率。

由此可见，内腔b的大小，决定了空气隙中反电势的大小，反电势u_o与u_w的相位差为90°，是无功的电势，它使系统的功率因数（cosϕ）下降。

感应加热的工作者力图减小内腔的厚度b，也就是减小空气隙，对于一般的金属带加热厚度b应<10mm。可以采取：①感应器导体采用厚2～3mm

的铜带，其宽度可达100mm以上，不用水冷，薄铜带在缠制螺旋线圈时弯曲成90°时十分方便，对于功率较大的感应器在线圈铜带的外侧面可以焊上铜管通水冷却。②采用多组小功率感应器并联，每组感应器的功率约为100kW。

（2）开口式感应器　加热镀锌铜带或涂塑钢带时，有锌灰或涂料等落在感应器内侧，因此清理感应器是必不可少的工作，而钢带是成卷的且长达数千米，很难将感应器从生产线上取下进行清理及维修。近年来发展开口式感应器见图3，是Inductheat公司的专利，由宽铜带组成一个并联式的螺旋线圈，感应器可以沿开口处移动，甚至从生产线上取下或维修或更换。

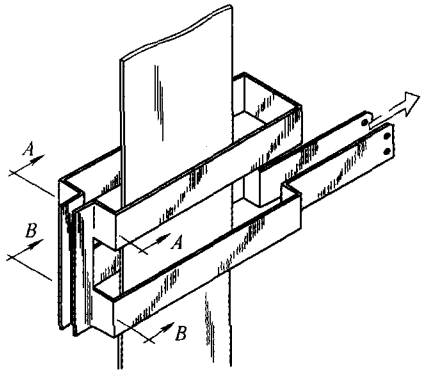


图3　开口式感应器

二、横向磁场感应加热

20世纪40年代，钢带热镀锌的相关部门希望将快速连续加热的感应加热技术用于钢带镀锌前的预热，而当年并没有半导体变频技术，只能采用较低的频率，如50Hz的工频，于是横向磁场感应加热钢带首先在镀锌行业试用。

1. 电磁回路

横向磁场感应器如图4所示，类似将一个变压器剖开，金属带2在剖开缝隙处穿过，导磁体1的作用是引导磁力线回路方向，减小空气隙中的磁阻，磁回路从金属带表面穿透，磁场H垂直于金属带，通过空气隙h与导磁体1组成磁回路5，感应电流在金属带2的表面形成回路，磁场H沿z轴，电场E则沿x轴、能量P沿y轴传输，在y轴上衰减，穿透层δ是沿y轴的向量，所以选用电流的频率f时，其主要的参数是线圈导线的节距τ，横向磁场感应加热选用的频率为：

$$f = 2.1\times10^6 \frac{\rho_2}{\tau^2}\frac{h}{d}k_f \qquad (4)$$

式中　ρ_2——金属带的电阻系数；

τ——感应器导体的节距；

h——空气隙；

d——金属带的厚度；

k_f——系数。

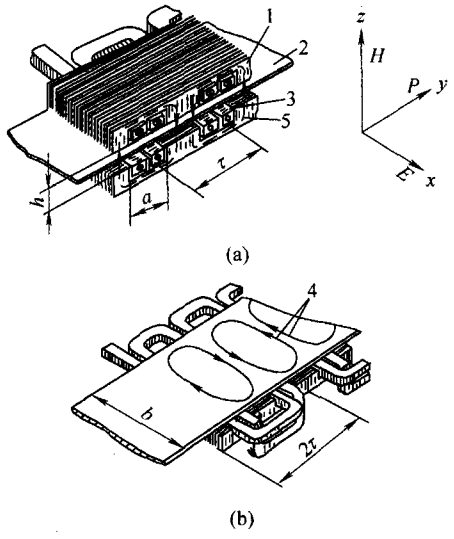


图4　横向磁场加热金属带

1.导磁体 2.金属带 3.线圈 4.带材中的涡流 5.磁回路

2. 温度均匀性

横向磁场感应加热时在金属带中的感应电流分布如图5所示，带材边缘处电流密度远大于心部，因此两边的温度比中心温度偏高，频率f越高，则这种效应越明显，减小中心和边缘区的温差是横向感应磁场加热尚需克服的障碍。20世纪后叶，有不少专利都致力于消除中心和边缘温差的技术。

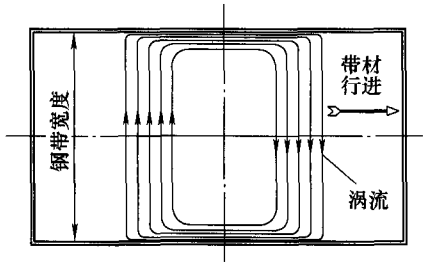


图5　横向磁场感应器加热的涡流

（1）感应器与金属带之间的相对宽度　改变感应器与金属带之间的相对宽度比，可以明显地改变中心与边缘的温差，图6所示为不同宽度比的温度分布。当感应器宽度大于金属带时，出现边缘的高温区，当感应器宽度远小于金属带时则出现边缘的

低温区。

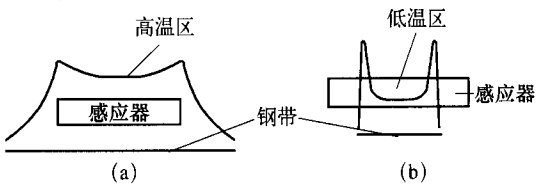


图 6

理论上认为合理的感应器宽度与金属带之比可以得到较均匀的温差分布，但是由于输入功率是变化的，而且金属带的宽度也并不是一致的，所以利用宽度比来均匀温度的方案并不多见。

（2）调整空气隙 横向磁场形成由导磁体、空气隙和金属带组成的闭合磁路，磁路的磁势为

$$F = WI = Hl = BAR_m \qquad (5)$$

式中 F——磁势；

W——励磁线圈的匝数；

I——线圈电流；

H——磁场强度；

l——磁路长度；

B——磁感应强度；

A——磁通面积；

R_m——磁阻（$R_m = \frac{l}{\mu A}$）。

导磁体是高导磁体材料，其中的磁阻R_m=0，金属带很薄可以忽视不计，主要的磁阻是由空气隙产生的，空气隙中μ_r=1，磁阻R_m=2h，则单位面积的磁强为：

$$H=wI/2h \qquad (6)$$

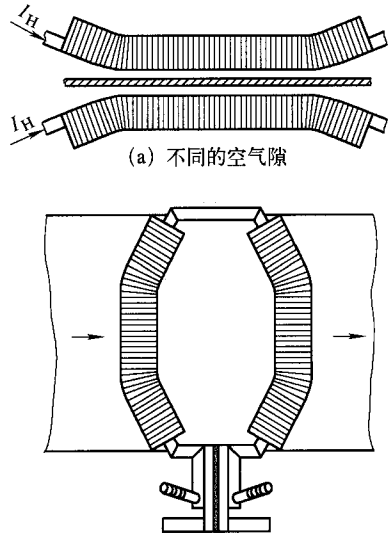
由式（6）可见，通过金属带的磁场强度H与空气隙h成反比，为了提高效率，应当尽量减少空气隙h。

由式（1）已知：金属带吸收的能量与磁强H的平方成正比，如果在边缘区设置的空气隙h大于中心区h_o，即$h>h_o$，则$H<H_o$，边缘区的功率密度P小于中心区的P_o，因而得到较均匀的温度。

图7为横向磁场加热感应器示意，其双边缘的空气隙明显大于中心区。

（3）导磁体 金属带中温度的分布决定于磁场强度H大小的分布，当磁势F为一定时，磁路中的磁场强度H的大小，取决于磁阻R_m。改变磁阻R_m，就可改变温度的分布，磁阻是自变量，除了上面提到改变空气隙h之外，更多的途径是改变导磁体的大小、位置和材料。

图8是不等截面的导磁体件，边缘高温区的导磁体较短，而在低温区则较长。



(a) 不同的空气隙

(b) 变节距的感应器导体

图7 横向磁场加热感应器

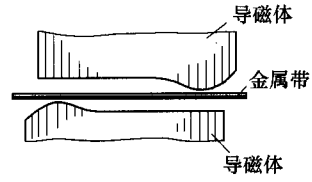


图8 不等截面导磁体

图9则在低温区增加导磁体，这是英国电气工程学会（ECRC）的专利，发明人M.G Gibbs，他把附加的导磁体称为Modifier，意为修正磁通的分布。笔者曾访问了ECRC，Gibbs先生十分友好地展示了Modifier的形状和在感应器中的位置，这种方法DAVY公司已应用于铝带退火和铜带退火加热。

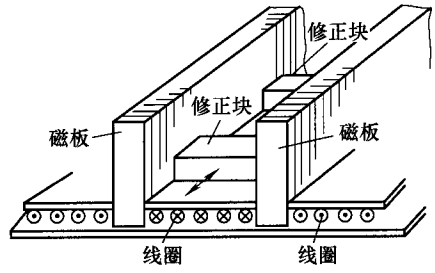


图9 带有修正块的导磁体

在感应器宽度方向上采用不同导磁率的材料作为导磁体，在高温的边缘采用导磁率低的材料，在中心的低温区采用高导磁率的材料。笔者设计的感应器成功用于钢带的正火，这种感应器的导磁体镶嵌在钢管上，更换导磁体十分方便，结构轻便。

选择合理的电流频率有利于横向温度的均匀性，ECRC选用频率f=250Hz的电流加热铝带。笔者的经验是，电流频率f<1000Hz温度比较均匀，f>1000Hz均匀度较差。**MW** （20121017）