齿轮感应淬火进展

洛阳升华感应加热有限公司 （河南 471003） 沈庆通

齿轮的硬齿面热处理工艺主要有：渗碳（和碳氮共渗）、渗氮（和软氮化）及感应淬火。

齿轮感应淬火和渗碳、渗氮相比，具有节能、节约合金元素、生产周期短、劳动环境好以及可在线生产等优点。因此，随着齿轮感应淬火工艺的不断改进，它在机床、汽车、拖拉机、机车以及回转支承等制造工业等应用领域得到了越来越广泛的应用。

一、常规（单频）齿轮感应淬火

（1）机床传动齿轮使用感应淬火最早，但受当时感应淬火电源频率的限制，大部分仍采用高频200kHz或中频2.5～8kHz电流感应淬火。此种工艺常得到全齿淬硬或半齿淬硬的齿轮。如图1a及1b所示。

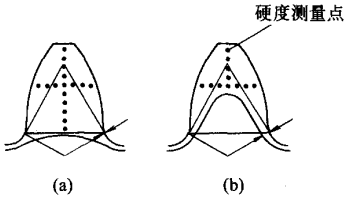


图1 感应淬火齿轮的宏观图片

（a）全齿淬硬 （b）半齿淬硬

在感应加热不同模数齿轮时，科研工作者发现，在轮齿截面加热温度分布上，电流频率对齿轮模数有极大影响。对某一模数齿轮加热时，有一个最佳频率，当频率高于最佳值时，齿顶温度高于齿沟；反之，当频率低于最佳值时，齿沟温度会高于齿顶。如图2所示。

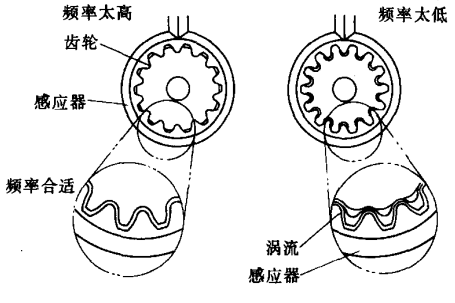


图2 频率高低对齿部温度的影响

其后，一些学者提出了齿轮最佳电流频率选取公式，经过几次改正，形成了下式：

$$f \approx \frac{25000}{m^2} \tag{1}$$

式中 f——电流频率，Hz；

m——齿的模数，mm。

按此式推算，不同模数齿轮加热淬火时的最佳频率见表1。

表1 不同模数齿轮加热的最佳频率

齿轮模数 m/mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
最佳频率/kHz	250	62.5	28	16	10	7	5	4	3	2.5

采用表1电流频率时，加热时间与齿轮模数也有密切关系，加热时间应尽可能接近下式。

$$t_{加热} \approx 0.25\, m^2 \tag{2}$$

式中 $t_{加热}$——加热时间，s；

m——齿的模数，mm。

按此式计算，加热时间极短，因此所需功率密度（kW/cm^2）极大。

在生产实践中，不可能对不同模数的齿轮均采用推荐的最佳频率，因此，实用方法是：当f比最佳频率高时，采用加大耦合间隙，降低功率密度，借热传导使轮齿匀温，甚至采用加热—停—加热—停，多次间断脉冲法来达到匀温的目的。另外一种方法是将有效圈宽度改窄，卷成螺旋状包住所加热齿轮。表2是一组$m=3$mm的齿轮在高频250kHz及中频8kHz的试验数据。它说明了电流频率与齿轮模数的关系。

表2 高频与中频电流加热 $m=3$mm齿轮时轮齿温度分布的差异

齿轮外径/mm	感应器内径/mm	齿轮宽/mm	感应器宽/mm	齿顶温度/℃	齿中间温度/℃	电源频率/kHz
201	208	22	30	880/920	740/760	250
201	208	22	30	900	960	8

（2）齿轮中频感应淬火，一般采用电源频率2.5～10kHz，适用模数4～10mm之间，广泛应用于机床、汽车及拖拉机齿轮。除直齿轮外，斜齿轮、内齿轮、锥齿轮及链轮均有应用。典型例子有德国迪尔公司的拖拉机中央传动从动齿轮（$m=4.2$mm，$Z=70$），采用10kHz，200kW中

频电源；日本小松制作所的 D80 推土机最终传动齿轮，用两台 300kW 中频发电机进行最终加热；东方红拖拉机 m = 4mm 飞轮齿圈用 8kHz、200kW 中频电源加热淬火等，当频率偏低时，齿沟温度均高于齿顶。

二、单齿一次加热或扫描淬火

(1) 单齿一次加热淬火　中频 8 ~ 10kHz 常用于 m = 8mm 以上的大模数齿轮，其感应器结构如图 3 所示。

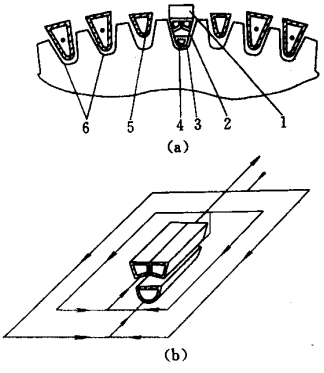


图 3　沿齿沟单齿一次加热感应器
1. 导磁体　2、4. 感应导体　3. 中间导磁体
5. 冷却已淬火面的辅助喷液器　6. 返回导体

单齿沿齿沟一次加热法曾用于船舶大齿轮的淬火。

早期的包容式单齿一次加热淬火法，因齿根未淬上火，存在残余张应力，降低轮齿的抗弯强度，故已被淘汰。

(2) 沿齿沟扫描淬火　沿齿沟扫描淬火主要用于 m = 6mm 以上的直齿轮及斜齿轮，此种方法应用极广，并且已有极成熟的工艺与装备，在锥齿轮淬火上国内也有成功的报道。

图 4 示出了沿齿沟扫描淬火带有导磁体的中频感应器。

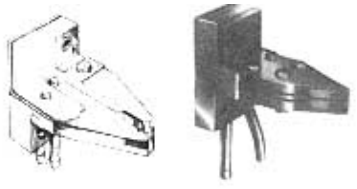


图 4　沿齿沟扫描淬火带有导磁体的中频淬火感应器

有些工厂将感应器放置在淬火液中（可为油或聚合物淬火液），称为埋液淬火。

对中小模数齿轮沿齿沟淬火，一般在高频电流下进行。国内外均有此种工艺应用，但要求机床精度和操作技术高。图 5 示出了德国的一种 m = 3mm 扫描淬火感应器及其展开图和淬火示意图。此种感应器制造精度以及对冷却水压力等均有较高要求。

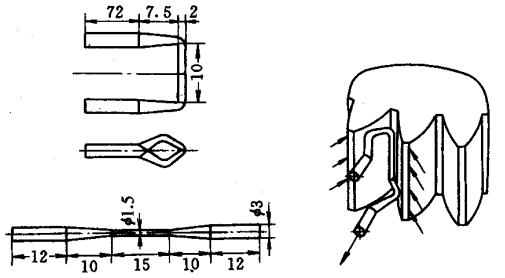


图 5　m = 3mm 齿轮沿齿沟淬火感应器及淬火示意

三、低淬钢齿轮感应加热淬火

前苏联在汽车、拖拉机齿轮的制造上，成功地采用了低淬透性钢感应淬火，利用钢材的低淬透性，将感应加热透的齿轮用激烈的冷却水进行淬火，得到沿齿轮廓的淬硬层及略提高硬度的齿心部，如图 6 所示。

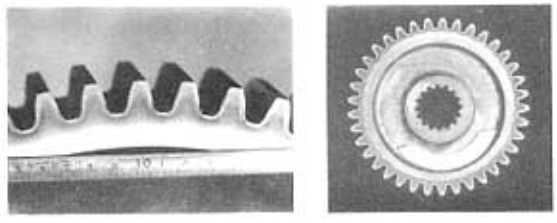


图 6　低淬透性钢齿轮感应淬火样品

这种工艺有如下优点：

(1) 对感应加热电源要求不高（常用 8kHz、100kW），即不需要特殊的频率及高的功率密度，设备投资费用少。

(2) 低淬透性钢成本低，其价格与中碳结构钢相似。

(3) 轮齿表面有很高的残余压应力，齿心部由于热透，硬度略有提高，因此轮齿的抗弯性强度得到提高，综合力学性能好。

低淬透性钢齿轮感应淬火在俄罗斯载重汽车的最终传动齿轮等零件上得到广泛的应用。相关资料见表3。我国低淬透性钢齿轮感应淬火在20世纪70年代曾经应用过，后因钢材供应标准等问题，没有继续使用。1992年俄罗斯低淬钢发明人舍皮里可夫斯基曾到我国汽车、拖拉机厂考察，并视察了某钢厂，认为中国完全有继续应用低淬透性钢感应淬火的环境与条件。

表3 低淬透性钢齿轮在载重汽车上的应用

零件类型	钢号		经济效益
	原工艺	新工艺	
后桥圆柱及圆锥齿轮	30ХГТ 20ХНМ 25ХНМ等	58(55пп) 或ш×4	(1)提高零件使用寿命 (2)取消了渗碳工艺 (3)节省合金元素Cr、Ni、Mo等，降低材料成本
m>5的传动箱及变速箱常用啮合圆柱齿轮	30ХТТ 20ХНМ 25ХНМ 15ХГНТА等	58(55пп) ш×4	

四、齿轮双频淬火

1. 齿轮双频淬火机理

齿轮双频淬火的机理是先用较低频率进行齿轮预热，首先在根部 Y 区域产生热，如图7a，其后预热区扩大到图7b状态，当高频加热后，形成图7c仿齿廓的奥氏体层。



(a) 预热　(b) 预热区扩大　(c) 高频加热后形成奥氏体的齿廓层

图7 齿轮双频加热热能变化示意

齿轮双频淬火由于电源设备投资费用高，使其应用受到限制。早期的齿轮双频淬火是在两个感应器中进行的，即先在中频感应器进行预热，然后在高频感应器中进行最终加热（见图8）。

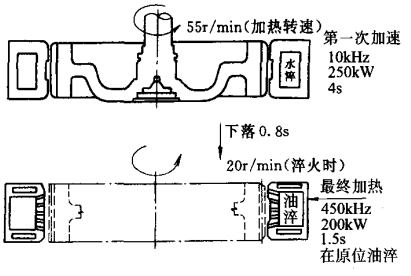


图8 齿轮双频淬火示意

2. 双频齿轮淬火应用

早在上世纪90年代，美国通用汽车公司Ypsilanti的一个传动器厂已建成了内齿轮及太阳齿轮的双频淬火、回火生产线，并具有自动装卸料、质量监控和统计过程等控制。

3. 两种双频齿轮淬火法

齿轮双频淬火可由两种方法实现，即同时加热法：一次加热齿轮全部加热表面；扫描加热法：齿轮依次通过中频预热及高频加热感应器，如图9所示。

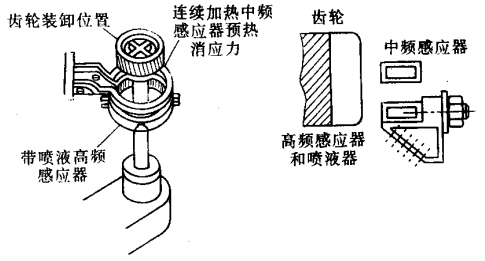


图9 双频齿轮扫描淬火示意

扫描淬火法所需电源功率比同时加热法要小。

表4列出了一种齿轮选用两种加热法的数据对比。

齿轮主要参数：$D_{外}$ 12.676in，$D_{根}$ 12.00in，齿宽2.8in，DP8，加热面积112in^2。材料：4150。工艺要求：表面硬度58～62HRC（149℃回火后齿根0.03in淬硬层深处的最小值），沿齿廓淬硬层图形，不超过2/3齿高。

表4 双频齿轮两种加热法所需设备功率对比

所需电源功率 / 加热方法	中频电源/kW	高频电源/kW
同时加热法	1176	784
扫描加热法	480	170

4. 现代化的双频齿轮感应淬火

现代化的双频齿轮加热已经改进在一个感应器内进行，图10示出了现代化的齿轮双频淬火图片（INDUCTOHEAT Co.）。

美国已有多家公司生产齿轮双频淬火装置，国内汽车行业已进口该种装置应用于生产。

五、齿条高频电阻加热及感应淬火

齿条（如汽车转向齿条）多采用高频电阻加

热淬火，其电源频率常为 50 ~ 250kHz，功率为 70 ~ 200kW，加热时间为 6 ~ 14.5s。



图 10　双频齿轮感应淬火

对于采用高频电阻加热的优点，据资料报道，其投资费用是感应加热的 70%，而生产率比感应淬火高一倍，其示意图见图 11。工作时高频电流从感应器导电端通过接触块与工件一端接触，从做成喷液器的导电板回到另一导电端。对于转向齿条加热，为使温度均匀，有些工厂采用间断加热法，即加热—停—再加热。

近年来，转向齿条感应淬火装置又开始在一些工厂应用。其原因是可以获得转向齿条的全截面淬火，齿条力学性能更好，变形更小。双顶尖自动淬火装置的生产率可达 30s/件。

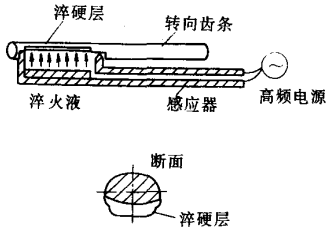


图 11　齿条电阻加热示意

六、结语

(1) 沿齿廓淬火或沿齿沟淬火工艺由于提高了轮齿的抗弯强度，所以将取代只淬硬轮齿工件面的旧工艺。

(2) 低淬透性钢齿轮感应淬火具有低成本、低投资等优点，在汽车、拖拉机行业具有广阔的应用前景。

(3) 双频齿轮感应淬火工艺适用于大批量齿轮生产，能取代某些渗碳齿轮。

(4) 对中、大模数齿轮，单齿沿齿沟感应淬火是一种经济实用的工艺。热　(20041010)

《机械工人》冷加工 2004 年第 11 期要目

正三棱锥体加工方案
高温蝶阀阀体轴孔加工技巧
等距窄长槽的加工方法
内翻边薄壁套的加工
圆柱测量齿轮的制造工艺
影响剃削精度的因素
数控铣床电解加工工艺的研究
减振原理在镗杆上的应用
利用滚切割刀实现薄壁筒件密封
可转位刀具的刃磨
数控机床的编程思想与刀具选择
车削外球面辅助装置
三种薄壁件车夹具的比较
加工内球面自动进给夹具
车偏心零件通用夹具
落地铣镗床双联齿轮的夹具设计
钻削加工长条形工件两端少半圆孔夹具
螺纹心轴夹具改进
大面积电子束的模具精加工技术
Z46 - 550 冷镦机切断模的改进
MJ - 520 床鞍注塑新方法
汽车冲模冲切元件的标准化
球冠半径的两种测量方法
小孔密封槽的测量
SF480 柴油机机体缸孔止口深度检具
多点自动测量系统
一种简单的中心孔测量装置
C620 车床主轴系统的改造方案
圆棒国产化的小经验
卧轴平磨时工件的安装
SLD150 数控刀架的原理与维修
车床改装拉床
X62W 横向丝杠螺母的精确修配
特形曲面加工工艺及编程探索
液压系统保压控制的电路分析及比较
西门子 810D 系统在模具工业中的优化应用及相关参数的调整
铣床控制线路的改进
三维实体零件的 CAD/CAM 集成及实现
浅谈 Solid Works 中引导线扫描的应用
逆向工程在烟机国产化中的应用
CAXA 二维图结合 Solid Works 快速生成三维模型
巧用 AutoCAD2002 计算截面的惯性矩
立式升降台铣床的数控化改造
机床数控系统电路板维修讲座
数控系统电路板维修的其他方法及实例（上）