

汽車拖拉机零件 的感應淬火

果尔布里斯基 著
伊万諾夫

机械工业出版社

汽車拖拉機零件的 感應淬火

果尔布里斯基、伊万諾夫 著

安永成 譯

王式璠 校



机械工業出版社

1958

出版者的話

本書主要是介紹汽車拖拉机生产中高頻淬火的实际問題。書中用大量的实际資料对汽車拖拉机零件的高頻淬火工艺进行了分析和討論，此外对高頻加热的一般原理，高頻淬火所用的設備，零件質量檢查以及高頻淬火今后的研究方向等問題也作了簡要的叙述。

本書可供机器制造工厂及工艺研究或工艺設計部門从事高頻淬火的工程技術人員參考。也可供大專及中等技术学校的学生閱讀。

苏联 И. Я. Горбульский, В. А. Иванов 著 ‘Индукционная
закалка автотракторных деталей’
(Машгиз 1955年第一版)

*

*

*

NO. 1636

1958年10月第一版 1958年10月第一版第一次印刷
787×1092^{1/32} 字數 89 千字 印張 4^{6/16} 0,001— 4,800 冊
机械工業出版社(北京东交民巷 27 号)出版
机械工業出版社印刷厂印刷 新华書店發行

北京市書刊出版業營業許可証出字第 008 号 定价(10) 0.70 元

目 次

緒言	5
第一章 零件的硬化方法	8
1 增加机器零件及机构零件的耐久性	8
2 表面硬化的主要方法	8
3 感应加热的物理基础	11
4 某些金屬学問題	16
第二章 配有机械式發电机及真空管式發电机的高頻装置	19
1 机械式發电机的工作原理及其构造	19
2 机械式發电机用的淬火变压器	25
3 机械式發电机用的电容器	30
4 声頻淬火时加热规范的調諧	32
5 真空管式發电机的工作原理及其构造	35
6 无綫电頻率电流的高頻淬火变压器	39
7 真空管式發电机的迴路电容器	42
第三章 高頻淬火的工艺过程	43
1 感应淬火的主要方法	43
2 頻率的选择	46
3 选择淬火方法及計算需要的發电机功率	48
4 最佳間隙的选择	53
5 无綫电頻率下零件淬火的特性	54
6 用同时法的零件淬火	55
7 曲軸軸頸的高頻淬火	57
8 拖拉机鞣輪的淬火	65
9 复杂形状零件的高頻淬火	71
10 用連續—順序法的零件淬火	83
11 鑄鉄缸套的高頻淬火	86

12 高频淬火零件的回火及自行回火	95
13 渗碳零件的淬火	98
第四章 高频淬火的質量檢查	100
1 淬火質量的金相檢驗	100
2 用校准銼的硬度檢查法	102
3 淬火零件硬度檢驗時統計方法的应用	103
4 發現零件裂紋的檢查方法	106
5 零件变形的檢查	107
第五章 高频淬火机床	107
1 万能淬火机床	108
2 高频淬火的專用机床	111
第六章 高频淬火时零件的变形	128
1 高频淬火时决定变形大小的主要因素	129
2 圆柱形零件的变形	130
3 曲軸的变形	132
4 汽缸套的变形	133
第七章 感应表面淬火法今后的發展道路	134
1 应用电火花加工法进一步强化高频淬火的零件	134
2 多頻率淬火的应用	135
3 表面淬火零件的电回火	136
4 提高高频淬火裝置的生产率及經濟性	137
5 扩大感应表面淬火法的应用范围	138

緒 言

由于卓越的俄国科学家及發明家波波夫(А. С. Попов)利用高频电流获得电磁波的偉大發現，高频电流第一次得到了重要的技术应用。1918年可認為是工业上应用高频电流加热金屬的开始。当时在下諾夫哥罗德城(高尔基城)中，在符拉基米尔·伊里奇·列宁(Владимир Ильич Ленин)直接参加下組織的无綫电試驗室內，从真空管的玻璃泡中向外抽出空气时，就已經实行了电极的感应加热。沃罗格金(В. П. Вологдин)設計的第一台大功率机械式高频發电机，也是在这一試驗室中制造成功的。

1925年沃罗格金教授在列宁格勒城与普吉洛夫斯基工厂(現名基洛夫工厂)的工程师別里亞也夫(Беляев)一起，对高合金鋼工具的热处理，进行了感应加热的初次嘗試。那时已經發現显明的表面加热特性，但这一特性不能使淬火零件得到沿截面均匀分布的硬度，所以当时竟被視為缺点。

1930年在沃罗格金教授的試驗室中，已經开始感应爐結構的設計工作，所設計的感应爐是由机械式或真空管式發电机供电的。这一工作以創造了大容量工业用高频感应爐而告結束。

1935年科学院通訊院士沃罗格金及工程师罗曼諾夫(Б. Н. Романов)研究出零件在高频磁場中进行加热的零件表面淬火法。1936年沃罗格金在世界上第一次对高频加热表面淬火法的原理作出了解釋。

以后几年中，列宁格勒烏里揚諾夫（列宁）电工研究所沃罗格金試驗室，在弗格（А. А. Фогель），康托尔（И. И. Контор），魯欽科（Д. И. Руденко）及斯魯赫茨基（А. Е. Слухоцкий）参加下对这一方法作了詳細研究，使苏联在高频加热热处理应用方面无可辯駁的优先地位得以巩固。

苏联学者和工程师們在感应加热的研究方面作了很多重要的和有价值的工作，这些工作已作为苏联以及其他国家在解决感应加热实际应用問題的基础。

战前及战争年代里，表面淬火法的推广工作，大多是在莫斯科及烏拉尔的斯大林汽車厂进行的。在这里，工厂的工作人员工程师舍別里亞科夫斯基（К. З. Шепеляковский）和雷斯金（С. Б. Рыскин）与沃罗格金試驗室的工作人员康托尔和沙莫夫（А. Н. Шамов）一起，在很多方面促进了高频电流工业应用的扩展。在这个工厂中設計的很多工业用高频設備都广泛地被当作标准型式采用。与斯大林汽車厂同时，在沃罗格金試驗室的直接参加下，高尔基城莫洛托夫汽車厂、齐良宾城斯大林拖拉机厂、科洛明城古比雪夫機車厂、烏拉尔重型机器厂、莫斯科小型汽車厂及很多其他工厂进行了許多运用高频电流加热的工作。目前列宁格勒沃罗格金高频电流科学研究院（НИИ ТВЧ）领导着高频电流感应加热法进一步的科学技术研究工作。

高频电流工业应用會議的召开（1951年列宁格勒第一次會議及1954年列宁格勒第二次會議），促使基于应用高频电流及新的高频电气設備的新工艺过程在工业中得到更广泛的应用。

在大批-流水生产中，高频电流用于鋼件热处理的主要

工厂是汽車工厂及拖拉机工厂。此外，在成批生产及机械修理中，高频电流的应用正日益推广。

作者编写本书时，力求以简要易懂的形式对广大讀者阐述高频感应加热法的理论基础，叙述在完成各种工艺工序中高频电流的运用同时还介绍了生产中使用的电气淬火设备。

书中介绍了作者在拖拉机生产中应用高频加热方面的多年工作经验，以及国内先进工厂及研究院的经验，首先是沃罗格金高频电流科学研究院及莫斯科斯大林汽車工厂的经验。

第一章 零件的硬化方法

1 增加机器零件及机构零件的耐久性

机器及机构重要零件的使用期限，基本上决定于工作表面的耐磨性及零件的疲劳极限。第二种特性在提高单位负荷及工作速度方面，具有极大的意义。

零件的耐磨性，决定于一些因素，其中主要是摩擦表面的硬度。硬度增加，零件的耐磨性即增加。合理选择钢号及其热处理方法，可提高钢件的硬度。保证硬度增高最简单的热处理方式是整体淬火。

整体淬火只用于在没有冲击负荷下工作的零件。对于在工作过程中承受冲击负荷或周期交变负荷的一些零件，整体淬火通常是不适当的，因为会使脆性显著增加以及疲劳强度降低。

利用表面硬化法，例如感应表面淬火，可使零件兼有表层的高硬度及基本断面（心部）的韧性。运用表面硬化法时，应特别注意第二种特性——疲劳强度。

某些工厂的实践证明，于周期交变负荷下工作的零件（齿轮，曲轴，活塞销等），使用感应表面淬火时，应事先对疲劳度进行全面的试验室研究，随后并进行运转试验。

2 表面硬化的主要方法

在现代的机器制造业中，应用着各种表面硬化方法。每

一硬化方法都具有自己的特長及缺点,以及自己的应用範圍。

現在談一談三種最通用的表面硬化法: 滲碳, 氧-乙炔
淬火, 感應表面淬火。

滲 碳

鋼的淬火, 也就是得到具有高硬度組織的過程, 與鋼中所存在的碳是有密切關係的。當鋼中含碳量小於 0.15% 時, 不可能淬火。若鋼中含碳量為 0.15~0.25%, 則淬火後硬度將有稍許增高 ($R_C = 30 \sim 45$ 以下)。

當鋼中含碳量繼續增加時, 其淬火狀態的硬度迅速增高。由此可知, 在保持心部原始硬度及原有性質的情況下, 要想得到零件表層的高硬度, 必須進行表面增碳並隨即整體淬火。鋼的表面增碳過程, 稱為滲碳。

零件表面的增碳, 是將零件放在為碳所飽和的介質 (滲碳劑) 中, 在高溫下 ($900 \sim 1000^\circ\text{C}$) 碳原子強烈地擴散到金屬中去。滲碳時間決定於需要的硬化深度及使用的滲碳劑, 大約為 8 至 30 小時。滲碳過程結束後, 零件在空氣中冷卻至完全變冷, 只有在完全變冷時才可重新加熱和淬火。

滲碳與感應表面淬火相比, 前者有如下的缺點:

- 1) 操作過程特別長;
- 2) 零件的變形較大;
- 3) 有礙於生產的流水性。

滲碳的重要優點之一, 就是不管零件的形狀如何複雜, 都能得到沿零件輪廓厚度均勻的硬化層。

氧-乙炔淬火

这种硬化方法主要是利用气体喷嘴造成的火焰，把零件表面快速烧热至淬火温度。现在先不谈关于在郭特里波(Л. И. Готлиб)及基金(И. Н. Кидин)的著作中所研究的火焰淬火原理及实践问题，这里只指出这一方法特有的某些缺点：

- 1) 淬火过程的自动化实际上是不可能的；
- 2) 淬火时形成粗针状马氏体组织；
- 3) 淬火层的分布不稳定。

上述的一些缺点，极大地限制了火焰淬火应用的可能性，首先是在大量流水生产的条件下。但是对于小批生产的大型零件以及工厂机修零件的热处理，火焰淬火却极有成效；这时使用高频发电装置有困难，经济上也不合算。

感应表面淬火

感应表面淬火法主要是利用高频电流将零件的表面或其个别部分快速加热到淬火温度。

由于钢的高导热性，表面淬火只有在利用高频电流以每分钟几千度的加热速度代替炉子中加热时 $5\sim 25^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 的加热速度时，才可能实现。

淬火加热时，零件安置在高频磁场中，此高频磁场是由流经导体(感应器)的高频电流造成的。电磁感应的结果，在零件中产生涡流，这些涡流集中在表层，促使需硬化的地带快速加热。与电炉中的加热所不同的是，感应加热时电能转变为热能的作用发生于淬火工件的本身。

感应表面淬火法较上面研究的硬化方法具有下述优点：

- 1) 加热速度很快，淬火装置可达到高的生产率。
- 2) 淬火質量一致。
- 3) 保証生产的流水性。
- 4) 电能的消耗最少。
- 5) 淬火时变形不显著。

由于具有上列优点，这种方法在工业上已得到广泛应用，特别是在具有大量流水生产特点的汽車拖拉机生产中应用最广。在这种情况下应用高頻率淬火能得到最大的技术經濟效果。但正如阿尔基米也夫 (В. Ф. Артемьев) 及斯克留也夫 (П. В. Склюев) 在其著作中所指出的，甚至在小批生产中应用这一零件硬化的先进方法，也会显示出極大的效果。

与此同时，目前还有許多使用旧法硬化的大量零件品种，但是最大限度地减少用旧法硬化的这些品种的趋势正在日益增長。

3 感应加热的物理基础

电磁感应現象及表面效应的利用，是感应表面淬火法的基础。

現不拟研討电磁感应現象的一般情况，只談談磁場按正弦曲綫定律变化时的一部分情况。磁場中导綫内部产生的电动势等于：

$$E = 4.44fn\Phi \times 10^{-8} \text{ 伏}, \quad (1)$$

式中 f —— 磁場变化的頻率 (周波/秒或赫芝)；

n —— 导綫的圈数；

Φ —— 磁通量的最大值 (馬克士威)。

感应加热时，零件本身就是导綫，因而 $n = 1$ 。

由公式(1)可看出, 感应电动势与频率及磁通量成正比, 因而也与流经感应器的电流大小成正比。由此可看出, 感应加热时使用中频率及高频率的合理性。

在零件中所产生的电动势可引起电流。这种电流称为涡流。

涡流在零件截面上的分布是不均匀的, 在表层中电流密度最大, 愈接近导体中心电流密度愈下降, 如图1上的曲线所示。

导体截面上, 交变电流分布不均匀的现象, 称为表面效应。表层中电流集中的程度, 用等效的电流渗透深度表示。电流渗透深度根据热损失平衡条件确定, 这种条件就是用按照直角法的假定电流分布来代替按指数定律的真正电流分布(见图1)。

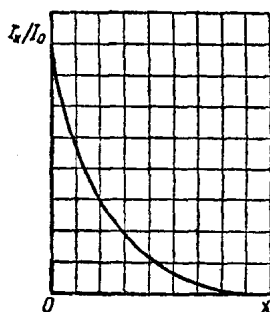


圖1 导体中交变电流密度的分布曲线:

x —距表面的距离(公分);
 I_x —距导体表面 x 处的电流密度(安/公分²); I_0 —导体表面的电流密度(安/公分²)。

等效渗透深度可按式求得:

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \text{ 公分}, \quad (2)$$

式中 f ——电流频率(赫芝);

ρ ——单位电阻(欧姆/公分);

μ ——导磁系数(高斯/奥斯特)。

由公式(2)得知, 当其他条件相同时, 电流渗透深度与频率的平方根成反比。

钢及铸铁加热时, ρ 及 μ 的数值发生变化, 于是电流渗透深度也随着变化。当达到临界温度时(磁性转变点), 导磁

系数显著降低至 $\mu = 1$ 。大多数鋼号的磁性轉变点位于很窄的溫度範圍內 (765~780°C)。鋼失去磁性后 渗透深度显著增加。

电流渗透深度的最大值称为热渗透深度, 以 δ_2 表示。

对結構鋼來說, 热深度可接近似公式求得:

$$\delta_2 \approx \frac{600}{\sqrt{f}} \text{ 公厘。} \quad (3)$$

由公式 (3) 得知, 热渗透深度与 频率的平方根成反比。正如后面将要談到的, δ_2 值的計算, 就足以确定給定深度淬火时, 使用这种或那种 频率 适合。对于在預定深度上选择淬火的适合频率。但同时也有这种情况, 就是需要知道开始或 [冷] 渗透深度, 这时可按公式 (2) 求出。

必須注意, 冷的或开始的渗透深度, 同时也与高频磁場的强度有关。这一关系的存在是由于导磁系数 μ 与磁場强度 H 有关 (圖 2)。当磁場强度增加时, 导磁系数减少, 因而电流渗透深度增加。

实际上就是說, 电流的渗透深度不仅决定于 ρ 及 μ 的数值, 而且也与加热时供应的單位功率大小

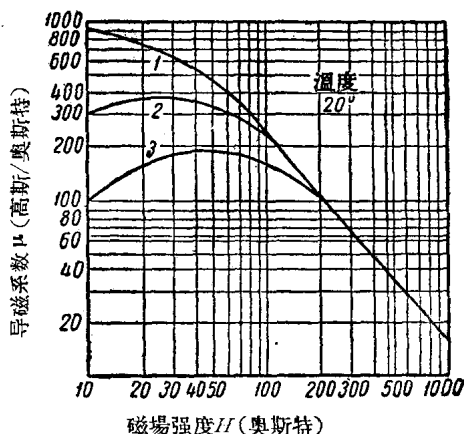


圖 2 鋼的导磁系数与磁場强度的关系, 鋼中含碳量:

1—0.3% C; 2—0.45% C; 3—0.6% C。

有关。表 1 載有三种常用頻率电流在鋼中的渗透深度。

表 1

頻率 (赫芝)	渗透深度 (公厘)	
	冷的 ($t=15^{\circ}\text{C}$)	热的 ($t=770^{\circ}\text{C}$)
2500	0.9	11.0
8000	0.5	6.2
200000	0.1	1.2

由上表可知，

电流在鋼中的热渗透深度 (δ_z) 大于冷渗透深度 (δ_x) 許多倍。

随着薄表面層中 δ_x 厚度上渦流的集中，鋼的感应加热过程开始。在表層失掉磁性后，电流的渗透深度增加到約为 $2\delta_x$ 。若考虑到傳热性的作用，則在此瞬間，电流渗透深度的瞬時值，將比 $2\delta_x$ 大一些。

电流渗透深度增加 ($\delta_x \rightarrow 2\delta_x$) 时，由于功率吸收系数 $\sqrt{\rho\mu}$ 的降低，在第一層中放出的能量强度將随着减小。鋼繼續加热时，电流的渗透深度將增加，且最大电能集中地带向里渗入并放出热量。热深度 δ_z 是电流渗透深度增加的極限。

在足够的單位功率下，用无綫电頻率加热时，很快即可达到这一極限（見第三章）。声頻加热时，由于需要的淬火層深度 x_k 照例小于 δ_z ，故不能达到热深度。

將热渗透深度与一定的淬火層深度相比，可显示出利用不同頻率时，零件在一定深度上的淬火特性。

必須对感应加热的两种基本类型加以区别，这两种类型是：

第一种类型， $\frac{\delta_z}{x_k} < 1$ ；

第二种类型， $\frac{\delta_z}{x_k} > 1$ 。

第一种情况 $x_k > \delta_z$ ，这时放出的能量只集中在薄于預定

淬火層深度的表層中。因此这种加热形式，称为表面加热。在这种情况下，淬火層深度 x_k ，是借零件的表層向內層的热傳导达到的。要加快热傳导过程，必須增加零件表面的加热溫度。

第二种情况时 $x_k < \delta_z$ ，这时热量将集中在厚度接近預定值 x_k 的表層中。这种感应加热形式，称为深層加热。深層加热出現于利用声頻（机械式發电机）的时候。在这种情况下，就不需要用增加表層溫度（过热）来加强热傳导过程了。

沿零件截面溫度的分布曲綫，随应用的加热形式而不同。圖3所示是表面及深層加热时，沿零件截面上的溫度分布曲綫。由所引述的曲綫可知，深層加热时，因为热量損失較少，所以这时能量的消耗較表面加热时 为小。

表面加热时，由于較多的热量傳往心部，致使能量的消耗增加。在个别情况下，表面加热較深層加热也有优点，因为这里可看到淬火層緩和地过渡到未淬火層。

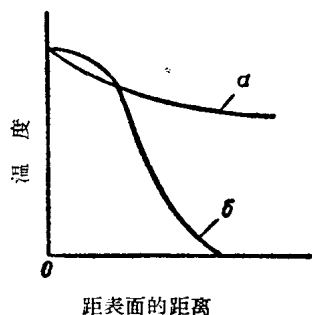


圖3 各种类型加热时，沿零件截面上溫度的分布曲綫：
a—表面加热；b—深層加热。

感应加热时除表面效应外，在某种程度上还出現高频电流其他特性的作用，特别是邻近效应及环状效应。

邻近效应的实质，就是两根邻近的导体中通过交变电流的相互作用。感应加热时，感应器和零件就是这样一对导体。由于邻近效应的作用，高频电流都集中在感应器感应导綫面

对着零件的部分。电流频率愈高以及零件与感应器间的间隙愈小时，则邻近效应的作用愈大。由此可知，间隙不均匀性对零件表面上温度分布的影响，在使用无线电频率时较使用声频时为大。

环状效应在沃罗格金的著作[●]中，已有详尽叙述，这里不再重提。

4 某些金属学问题

高频淬火零件的质量，与选择加热规范以及冷却规范的正确性有很大的关系。因此，运用高频淬火时，应特别注意选择合理的加热规范以及冷却规范的问题。

在钢中获得具有高硬度的组织是与钢中奥氏体的转变过程分不开的。这种转变的温度相当于临界点 A_{c3} 。对大多数中碳钢来说， A_{c3} 点在 $770 \sim 810^\circ\text{C}$ 范围内。

奥氏体转变过程应分为三个阶段：

- 1) 奥氏体晶粒的萌芽及长大。
- 2) 渗碳体 (Fe_3C) 的溶解及铁素体 ($\alpha = \text{Fe}$) 转变为奥氏体。
- 3) 奥氏体中碳浓度的均匀化。

在炉子中缓慢加热时，利用超过 A_{c3} 点 $30 \sim 50^\circ\text{C}$ 的保温来保证各相的完全转变。炉中加热时的保温时间，随钢号及零件尺寸而不同，变动的范围很广，可从几分钟到几小时。

在利用快速感应加热时，保温时间可缩短到几千分之一，通常为数秒或几分之一秒。为弥补感应加热时保温的短暂性，

● В. П. Вологдин 著: [Поверхностная индукционная закалка], обронгиз 1947年版。——译者