

金属材料与热处理译丛

感应热处理

上海市科学技术編譯館

前 言

近十几年来,感应热处理与感应加热已被广泛采用,特别在现代的热处理技术中已占有十分重要的地位。为吸取国外先进经验,了解国外感应热处理和感应加热的现状与发展趋势,我们选择了苏联、美国、英国、民主德国、日本等国家近十年来有实用价值的文章共 36 篇彙成专輯。所选文章就其主要内容大致可分:(一)综述感应加热在工业上的应用及其发展趋势。(二)介绍齿輪、軸类、導軌、气缸套等标准零件的感应热处理工艺,其中包括双頻淬火、逐齿淬火、齿間淬火、鑄鉄气缸套的局部螺旋淬火等方法。(三)感应加热化学热处理,介绍利用高频电热的渗碳、碳氮共渗与氮化工艺的过程与结果。(四)新方法,利用感热体对玻璃、塑料等非导体进行加热,介绍如何使形状复杂的零件得到均匀加热;在液体中高频淬火不用噴水器和将油淬鋼件用油进行高频淬火,还介绍如何利用快速电加热使电鍍层加速扩散。(五)压力加工与焊接过程中感应加热的应用。(六)感应热处理用鋼和鑄鉄的組織与性能,介绍了低淬透性鋼的高频淬火,高速鋼与高强度鑄鉄的感应热处理规范和处理方法。(七)感应加热与淬火时的残余应力与变形的特性,介绍减少变形与残余应力的方法。(八)感应加热所用设备装置与温度控制,介绍几种典型淬火机床的结构及离子变频器。(九)介绍在一定的高频淬火条件下预测淬火深度的一些方法以及提供如何提高某些冷却介质的一些实用数据。

本专輯在編譯过程中,承长春市机械工程学会金属热处理学組领导大力支持和参加編譯工作的全体同志的努力,謹此致以謝意。

本輯由秦曾志、蔡安源两同志負責主編。但限于時間,选题及譯文质量难免有不足之处,希广大讀者不吝指正。

金属材料与热处理譯丛
編 譯 委 員 会

1965 年 2 月

目 录

高频感应加热的工业应用	[編譯]	(1)
感应加热热处理工艺	[苏联]	(9)
中模数齿輪淬火	[苏联]	(12)
大模数齿輪、齿形联軸节套圈和軸套的高频表面淬火	[苏联]	(16)
齿輪的双頻淬火法	[苏联]	(21)
机械零件感应加热淬火的合理规范	[苏联]	(25)
齿輪与鑄铁导軌的感应淬火	[民主德国]	(32)
气缸套的高频淬火	[日本]	(45)
用高频淬火的彈簧新制造法	[日本]	(50)
利用中頻进行調质处理	[民主德国]	(57)
鋼件高频电流加热化学热处理过程的研究	[苏联]	(61)
鋼在高频加热时碳氮共渗	[苏联]	(68)
利用高频加热和胶剂的快速高温氟化法	[苏联]	(73)
感热体在感应加热中的应用	[美国]	(77)
在液体层下用高频加热的鋼制件的表面淬火	[苏联]	(82)
高频加热等温淬火处理	[日本]	(86)
金属陶瓷材料淬火时的感应加热	[苏联]	(91)
快速感应加热时鉻从电鍍层向铁和鋼中的扩散	[苏联]	(95)
在感应加热压力加工条件下碳鋼的机械性能与显微組織	[苏联]	(98)
高合金鋼与合金坯件的快速感应加热	[苏联]	(106)
利用中頻加热軋輥的研究	[民主德国]	(112)
低淬透性鋼的高频淬火	[編譯]	(117)
高速鋼感应热处理的条件	[苏联]	(134)
高强度鑄铁的高频表面淬火	[苏联]	(137)
感应加热规范对 40X 和 40XH 鋼的奥氏体等温转变动力学的影响	[苏联]	(140)
感应加热时鋼中奥氏体晶粒的长大	[苏联]	(146)
感应淬火时鋼的淬火层的組織和性能	[苏联]	(150)
鋼在感应加热淬火后的硬度	[苏联]	(154)
保温時間对低碳鋼感应回火的影响	[苏联]	(156)
感应加热时鋼的变形	[苏联]	(157)
高频淬火时的残余应力及其消除	[日本]	(161)
感应淬火用的自动化設備	[苏联]	(174)
用离子变频器感应加热	[苏联]	(178)
感应加热时的温度控制	[美国]	(182)
感应淬火时淬透深度的选定	[西德]	(185)
工件表面用噴射法冷却时某些介质的冷却能力	[苏联]	(191)

高频感应加热的工业应用

李敏宝編譯 秦曾志校

一、前言

近十几年来,感应加热已經在世界各工业国家引起了高度的重視,几乎每年都有感应加热新工艺、新設备及工艺装备問世,同时感应加热的应用范围也在不断扩大。

在許多国家,对感应加热的应用已有一定成就。

本文主要目的,是介紹国外感应加热应用的現狀和新的发展方向。

二、高频感应加热設備

近年来,在很多国家(美国、英国、加拿大、瑞士、日本、西德等)制造了各种感应加热用的設備及仪器。在这些国家中,普遍生产机械式及真空管式高频裝置。美国、西德和日本等国还生产火花式发生器。現就下列几种类型的設備作一简单介绍。

1. 真空管式高频发生器

目前国外生产的真空管式高频发生器的功率和电流频率范围很寬。这些設備效率均高,同时产品的价格也比較低。如英国《Delapen》厂生产的真空管式高频发生器的功率有:2.5、6、7.5、10、15和20千瓦,电流频率将近500000赫。功率小于7.5千瓦的发生器采用空冷,大于7.5千瓦的采用水冷。

近年来,苏联在高频电热設備的设计試制上,今后真空管式高频发生器将从0.1千瓦开始,生产到1000千瓦(見表1)。

表1 真空管式高频发生器的功率范围(千瓦)

0.1	1.0	10	100	1000
0.16	1.6	16	160	
0.25	2.5	25	250	
0.4	4.0	40	400	
0.6	6.0	60	600	

为了适应各工业部門的使用特点,根据苏联国家标准ГОСТ8032-56,制訂了真空管式高频发生器的频率范围(見表2)。

表2 真空管式高频发生器的频率范围

設 备 用 途	名义频率 兆赫	频率变化范围
熔炼金属,表面淬火,金属透热加热,焊接,钎焊	0.07	±5%
	0.21	
	0.42	
小零件的表面淬火,干燥潮湿材料,胶合等	0.85	±5%
	1.7	
小零件的表面淬火,熔化导电性較差的材料,木材的粘結,加热具有較大角損耗的电介质	3.4	±2.5%
	6.8	
	10.2	
加热各种电介质材料,塑料的焊接	13.6	±2.5%
	20.3	
	27.1	
	40.7	

为了保证大量生产时电气参数能够稳定不变,因此,在中等和大容量設備的电气綫路上安装穩压器(見图1)。

上列电气綫路能保证綫路电压在±15%波动

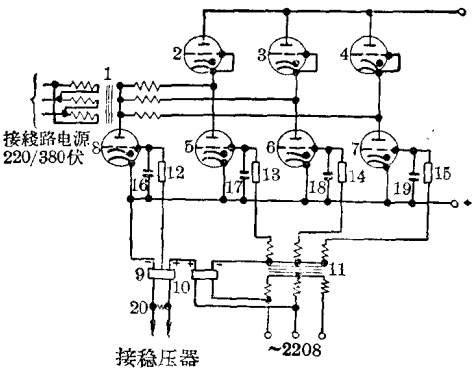


图1 具有整流电压的稳压装置原理图

1—阳极变压器; 2~8—閘流管; 9~10—輔助整流器; 11—栅极变压器; 12~15—閘流管栅极电阻; 16~19—保护电容; 20—可調的自偶变压器

範圍內,整流电压只在 $\pm 2\%$ 的範圍內变化。

此外,还根据不同的使用条件,設計了三種不同的电气原理图:

(1) 用作感应加热,并可以調整負荷的(見图 2);

(2) 用作感应加热,并可以在不大範圍內改变負荷的(見图 3);

(3) 用作感应加热,而負荷恒定不变的(見图 4)。

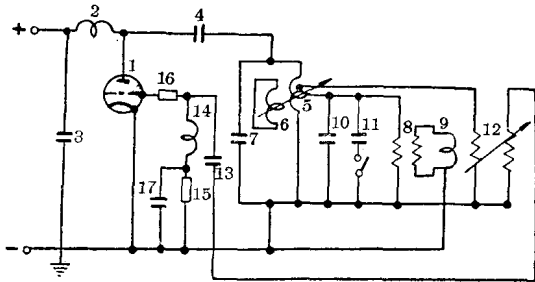


图 2 可以調整負荷的原理图

1—振荡管; 2—阳极扼流圈; 3—阻塞电容; 4—阳极隔离电容; 5—阳极回路电抗; 6—短路线圈; 7—阳极回路电容; 8—高频(淬火)变压器; 9—加热感应圈; 10—11—加热回路电容; 12—反馈变压器; 13—栅漏电容; 14—栅极扼流圈; 15—栅极电阻; 16—反寄生电阻; 17—阻塞电容

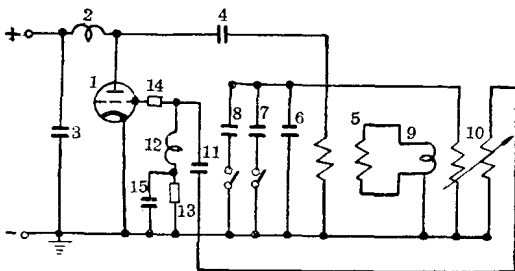


图 3 可以在不大的範圍內改变負荷的原理图

1—振荡管; 2—阳极扼流圈; 3—阻塞电容; 4—阳极隔离电容; 5—高频(淬火)变压器; 6—8—振荡回路电容; 9—加热感应圈; 10—反馈变压器; 11—栅漏电容; 12—栅极扼流圈; 13—栅漏电阻; 14—反寄生电阻; 15—阻塞电容

美国《Toeco》公司生产的真空管式发生器的功率有: 5, 10, 15, 20, 25, 50, 60, 100, 150, 200, 300, 450, 600 千瓦;最高的频率达 4 兆赫。

2. 机械式中频发电机

近 15~20 年来,各国在中频发电机的发展方面着重于改进结构,保証其經濟性及堅固性,而对于功率及频率的范围沒有很多的改变。

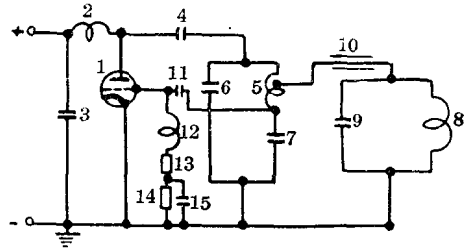


图 4 負荷不变的原理图

1—振荡管; 2—阳极扼流圈; 3—阻塞电容; 4—阳极隔离电容; 5—阳极回路电抗; 6—阳极回路电容; 7—反馈电容; 8—加热感应器; 9—加热回路电容; 10—高频滤波器; 11—栅漏电容; 12—栅极扼流圈; 13—反寄生电阻; 14—栅漏电阻; 15—阻塞电容

近几年来各国中频发电机的生产情况如下:

1. 瑞士的《Brown Boveri》牌发电机:

(1) 15, 30, 40, 60, 80, 100 千瓦-10000 赫;

(2) 25, 35, 50, 70, 100, 130, 160 千瓦-4000 赫;

赫;

(3) 30, 45, 60, 80, 120, 170, 210, 270, 335, 400 千瓦-2000 赫;

(4) 40, 55, 75, 100, 150, 200, 250, 320, 400, 500 千瓦-1000 赫;

(5) 500, 750, 1000 千瓦-500 赫。

电流频率从 500~1000 赫, 功率从 270~1000 千瓦的发电机采用臥式結構。电流频率 1000~10000 赫, 功率 15~250 千瓦发电机采用立式結構。

2. 英国《Delapen》牌机械式发电机:

(1) 25, 50, 70, 100, 150 千瓦-10000 赫;

(2) 100, 150, 200 千瓦-4000 赫。

此两种系列的发电机均采用立式結構, 既有风冷式又有风水冷式。

3. 比利时《ACEC》牌机械式发电机:

(1) 32, 80 千瓦-8000 赫;

(2) 40, 100 千瓦-4000 赫;

(3) 50, 100, 200 千瓦-2000 赫;

(4) 300 千瓦-1000 赫。

4. 美国生产的机械式发电机的电流频率有: 500, 960, 1920, 3000, 9600 赫五种;一般工业上普遍使用的为 3000 和 9600 赫两种。

美国生产的机械式发电机共有二十几种牌号。其中以《Toeco Divison》厂为最大, 所生产发电机有:

(1) 15, 30, 50, 75, 100, 175, 250 千瓦-9600 赫;

(2) 100, 200, 300 千瓦-3000 赫。

該厂生产的发电机大部分均采用水冷及空冷的立式結構。

近年来,苏联在机械式发电机方面,着重考虑的是将 125 千瓦以下的中小型发电机的結構由臥式改为立式,以縮小其体积,減輕其重量,并采用水冷及空冷。另外低頻率的(500~1000 赫)发电机的功率将由目前最高 500 千瓦,发展到 1500 千瓦,它主要是用于熔炼金属及鍛件毛坯加热等方面。

目前苏联生产的机械式发电机:

1. 列宁格勒电力厂和电机厂生产的:

(1) 30, 100 千瓦-8000 赫;

(2) 50, 100, 250, 500 千瓦-2500 赫;

(3) 500 千瓦-1000 赫。

2. 亚美尼亚厂生产的:

(1) 12, 20, 30, 50, 75, 125 千瓦-8000 赫;

(2) 20, 30, 50, 75, 125 千瓦-2400 赫;

(3) 50, 75, 125 千瓦-1200 赫。

3. 其它型式的高頻設備

近年来,在苏联及其它国家均在研究試制一些新型的高頻設備,并已取得了应有的成就;例如:

(1) 苏联試制成功的离子变频器,其頻率为 1000~1200 赫,功率为 500~600 千瓦。这种設備可以用作熔炼 1000~1500 公斤金属及加热鍛件毛坯,其效率較高,达 93~94%。

(2) 苏联試制成功的电子变频器,其頻率为 5000~10,000 赫,功率为 30~50 千瓦。这种設備主要用作熔炼 25 公斤的貴重金属和合金,其效率較高,达 80~90%。

(3) 在 1959 年及 1960 年列宁格勒高頻設備厂試制成功了两种新的高頻熔炼設備,型号为 TII-62, TII-162, 用它代替苏联原生产的 ЛГП-60 及 МГП-102 型熔炼設備。其主要技术数据見表 3。

表 3 TII-62, TII-162 熔炼設備技术数据

参 数	TII-62	TII-162
名义功率(千瓦)	60	160
工作頻率(赫)	2100~2700	2100~2700
熔炉容量(公斤)	50	150
熔化時間(分)	45	60
炉子最大允許电压(伏)	750	1500
炉子最大感应圈电流(安)	2000	2000
綫路电压(伏)	220/380	220/380
設備所需的功率(千伏安)	100	240

4. 在美国、日本和西德等国广泛地生产火花式发生器,在美国生产了 12 种火花式发生器,其結構比一般的真空管发生器要简单得多。日本也生产 25 千瓦、100~400 千赫的火花式发生器。

4. 設備及工艺装备

高頻感应加热淬火設備(机床)有下列几种型式:

(1) 万能淬火机床——在此机床上只要安装上不同的夹具及輔助工具以后,就能处理一般的軸类零件、齒輪等。

(2) 連續淬火机床——分臥式及立式两种,在这种机床上可以处理淬火区域較长的軸类零件(如机床的主軸、心軸、花鍵軸等),气缸套筒等。

(3) 专用淬火机床——此种机床乃根据不同的零件而專門設計制造的。通常大批生产曲軸、凸輪軸及大模数齒輪等时,均采用特殊結構的机床。此种机床的特点是生产效率高,零件的定位正确,零件处理后的质量稳定等。

近数十年来,随着机械工业的发展,生产量也不断地提高,因而在許多国家都对高頻淬火机床的結構作了进一步的改进。目前基本上有两种型式:一种是半自动淬火机床——除了零件装卸料机构是手动外,其它过程均自动地順序进行。另一种是全自动机床——此种机床是与冷加工生产的工艺过程衔接起来。当零件某一工序加工完毕后,零件自动地由送料机构送到淬火机床上,然后順序地自动进行,直到零件处理完毕,又自动地送到下一个加工过程。

三、感应加热表面处理

1. 曲軸軸頸的高頻表面淬火

这种处理方法在生产中有很大的經濟价值。应当指出,高頻感应加热淬火首先应用于曲軸上。近年来,曲軸軸頸表面淬火工艺及設備朝着两个方向发展。

最老的方法是所有軸頸表面在分开式感应器內依次順序一次加热。这种方法的主要缺点是被淬火表面硬度不均匀,其次是由于感应器磁場强度的影响(軸頸的体积,油孔的部份及感应器的合攏处)使淬火层深度在圓周上分布不均匀。

新方法是采用开口式感应器連續加热,加热时零件旋轉。用新方法肯定可以消除老方法所存在的缺点。一台淬火机床可以同时处理四个軸頸,加热时

零件繞主軸頸的軸綫旋轉，自一側固在軸頸上的感應器，隨着軸頸作旋轉運動。連杆軸頸的加熱方法同上。軸頸表面加熱到淬火溫度時，機架變換到另一位置，同時加熱的軸沉入淬火槽內進行淬火，此時另一個零件則處於工作位置。零件淬火後在爐內進行低溫回火，加熱零件到淬火溫度只需 5~15 秒。此設備可以處理長 1500 毫米、直徑達 100 毫米的零件，使用的高頻電機功率為 200 千瓦，電流頻率為 3000 赫。這種淬火機床能保證軸頸加熱均勻，淬火層深度的偏差不過 ± 0.25 毫米。

一般的曲軸軸頸高頻淬火後，只能使軸頸表面淬火，而軸肩及軸頸與曲軸連接部份圓角處通常都不淬火。曲軸經高頻表面淬火後，在淬火層的邊緣部分具有殘余拉應力，而圓角部分乃是拉應力的重合處，一般為 15~20 公斤/毫米²。是最大內應力的集中點，故最容易使曲軸在這部分折斷。

為了防止上述現象的發生，近年來在美國和蘇聯等國廣泛地研究軸頸連圓角部分淬火的工藝，據有關資料介紹，目前已有一些柴油機曲軸的熱處理工藝已按照這種方法進行生產。

2. 齒輪的淬火

利用感應加熱進行齒輪淬火可以加速熱處理過程，減少齒輪變形，能夠用碳鋼或低合金鋼代替貴重的鎳鉻合金鋼。齒輪感應加熱淬火機床可以直接安裝於機械加工流水生產綫上，組成連續的工藝過程，減少儲備量及往返運輸的工作量。

近年來，在國外有五種齒輪感應加熱處理方法：

(1) 齒透熱的齒圈淬火：此種工藝只能處理直徑和模數較小的齒輪，是用一次加熱法。由於齒部淬透，故齒部的塑性及韌性較低。為了提高其塑性，淬火後經過 300~400°C 中溫回火。這種齒輪只能適用於不易磨損、中等負荷和沒有沖擊負荷的工作條件。

(2) 逐齒淬火：感應器包圍着齒部或靠近齒的根部，僅僅在接觸表面淬火。淬火層按齒的根部分布。從已有的國外資料可知，經過這種淬火後提高了齒部的耐磨性，它的強度略有降低。

(3) 齒間淬火：在此種淬火狀況下淬火層沿齒的輪廓分布，在齒頂部斷開。這種齒輪具有較高的耐磨性及強度。

(4) 雙頻加熱沿齒廓淬火：加熱輪齒根部的電源為機械式發電機，加熱其它部分時用真空管式高頻電源。淬火後其淬火層沿齒廓分布，但是設備所

需的功率很大。

(5) 齒輪液下淬火：由於淬火層很薄，所以淬火後齒輪的變形很小。齒輪是采用逐齒連續淬火，淬火前將齒輪放在心軸上，然後將感應器安好。為了能使齒輪浸入水中，應將水槽上升到一定的高度。處理直徑 107 毫米的齒輪只需 4.5 分鐘，淬火層深度為 0.63~0.75 毫米。

為了使磁場能集中於所需的加熱部分，在感應器上裝有特殊的導磁體。感應器在齒間移動，其移動速度和傳輸給它的功率乃決定於齒的加熱深度。感應器的移動速度在 3~50 毫米/秒之間。設備的功率為 4~50 千瓦。被淬火齒輪的直徑為 37~650 毫米，齒寬達 150 毫米。表面淬火的齒輪一般采用含碳 0.3~0.5% 的鋼材。它可以用來製造負荷不大的齒輪。由於出現淬火裂紋傾向的可能性，所以很少採用高碳或高合金鋼製造齒輪。正火狀態的鋼材在齒輪加工過程中可以減少變形。齒輪表面淬火後應經過 180~200°C 的低溫回火。

通常在模數 8 以上的齒輪可以採用逐齒淬火。模數 4~7 的齒輪採用透熱淬火時質量不穩定，因此通常可以採用雙頻淬火。模數小於 4 的齒輪則採用一次加熱淬火。

當模數不大而採用齒間逐齒淬火時，在齒部加熱的同時應向相鄰的兩齒噴水冷卻以防止回火。

在某些情況下，為充份發揮高頻設備的利用率，採用齒輪預熱的辦法，可在爐中加熱或用工頻或中頻加熱到 600°C，然後再用高頻加熱到淬火溫度。

當齒輪表面淬火時，特別是星形齒輪，齒部的硬度不均勻；為了消除這種不均勻現象，採用特殊的結構。它是由用導電性較好的材料（如鋁）做成的兩個墊圈，其直徑與齒輪的根部外圓相同，墊圈放在齒輪的每一邊或固定在絕緣層上。為了使此部分加快材料的加熱，因而在齒輪的欲淬火部位和墊圈上用金屬噴鍍方法噴上一層導電性能良好的金屬層。

模數 2.5 時，感應器與齒間的間隙一般為 0.2~0.25 毫米。模數 8 時為 0.5 毫米。應當指出，整體淬火齒輪的疲勞強度比表面淬火要低 20~25%。淬火方法的選擇決定於齒輪使用條件和模數的大小。

應當指出，不是所有的表面淬火方法都有相同價值的。例如：用高頻電流通透齒圈和在爐中整體加熱淬火，都能增加齒輪的接觸強度和耐磨性，但是齒部不能達到必需的疲勞強度和韌性。齒的側面淬火增加了齒輪的耐磨性，但與此同時，由於淬火層的邊緣部分強度減弱，所以疲勞強度也相應地降低。

高频表面淬火可使淬火层沿工作表面和根部或按齿廓分布,是提高齿部接触强度和疲劳强度的最好方法。在这种情况下,淬火层有很高的硬度,齿的心部机械性能高,这种齿轮的使用寿命与渗碳齿轮相近。

3. 鋼軌 淬火

在使用过程中鋼軌末端銜接处往往容易磨損和压坏,因而大大地縮短了鋼軌的使用寿命。为了消除上述現象,采用高频感应加热处理鋼軌的末端(长150毫米处,淬火层深5~7毫米),以提高其耐磨性及强度。淬火后的組織为索氏体。为了避免鋼軌加热时的变形,用一个附加感应器加热軌底。淬火后,鋼軌的耐磨性大为提高,比未淬火的鋼軌提高約六倍。

4. 鑄鐵的 淬火

灰鑄鐵和可鍛鑄鐵在加热时,其金属基体中組織的轉变,是按照和鋼中同样的規律进行的。由于鑄鐵組織中存在着游离石墨,因而也带来某些特点。在用高频加热热处理时,温度范围应根据鑄鐵的金属基体原始組織来确定。

珠光体鑄鐵的淬火温度不能高于950~1100°C(决定于加热速度),铁素体在表面淬火温度1100°C时可以获得最高的硬度。但在这种情况下其硬度要比珠光体基体做的零件要低一些。因此铁素体鑄鐵件要經過專門的表面淬火(炉中或感应加热);此方法由以下两个工序組成:

(1) 在温度1050~1100°C的范围内鑄鐵件經多次表面加热,使在奥氏体状态下轉化鑄鐵的組織,在冷却时,鑄鐵的表面层出現珠光体組織。用压缩空气从950~1000°C冷却到500°C,再用水从500°C冷却到室温。

(2) 感应加热到900~950°C,然后用水冷却。

经过这两个工序以后,表面层硬度可达 $R_c55\sim60$,在零件的心部仍保持原来韧性的铁素体或半铁素体基体組織。

石墨状铁素体鑄鐵的表面淬火时,即使加热到1000°C,其硬度也不高于 R_c35 。欲提高其硬度,則应该将加热温度提高很多,使表面接近熔化或在淬火层获得莱氏体組織,但这是不允許的。

粒状珠光体鑄鐵是表面淬火最好的組織。淬火时在过渡区不允許有渗碳体存在,因为它能引起裂紋。提高石墨的含量同样也是不允許的。珠光体基体鑄鐵制的气缸套筒内表面經過淬火后可以提高耐磨性。当表面淬火时,在套筒的截面变化处容易出

現裂紋。因此套筒在半成品状态下进行淬火,淬火后再加工其外表面。气缸套筒經高频表面淬火提高耐磨性比其它任何方式都来得有效和經濟。淬火机床的电源为真空管式发生器,功率125千瓦,频率为225000赫。淬火温度为850~900°C,用水冷却,淬火后硬度为 $H_B500\sim550$ 。

热处理的新方法。在强大的电场中零件冷却淬火的新方法是巴錫脫(Baccet)研究成功的,此方法与一般的热处理相比較,它能使組織显著地細化和提高机械性能。例如SAE 4340經過一般的热处理: $\sigma_s=160\sim164$ 公斤/毫米², $\sigma_B=192\sim194$ 公斤/毫米², $\delta=5\sim6\%$;而經电场淬火后为: $\sigma_s=260\sim263$ 公斤/毫米², $\delta=10\sim11\%$ 。

四、鍛件毛坯感应加热

毛坯感应加热成为鍛压及冲压生产中的先进工艺之一。近几年来已被广泛地应用。鍛压生产中采用感应加热具有以下优点:

(1) 因为毛坯直接用高频电流加热,所以加热速度較快;

(2) 能减少氧化皮的損失,与此同时也延长了鍛模的使用寿命;

(3) 能改善鍛工車間的劳动条件;

(4) 提高鍛压设备的生产能力;

(5) 为鍛压生产实现完全自动化創造了必要的条件;

(6) 能縮減鍛造車間的生产面积。

根据不同的条件,毛坯感应加热目前共有四种加热方法:

(1) 中頻或高频感应加热——毛坯直徑小于35毫米的采用8000赫。大于35毫米的采用2500赫或1000赫。在直徑小于15毫米时,一般不采用8000赫,因其效率較低。

(2) 双頻加热——居里点以前用工頻加热,居里点以后用中頻加热。这样能充分发挥发电机的利用率,同时还能降低成本。

(3) 联合加热——用炉子加热和感应加热相結合,即在炉中加热到700~800°C,然后用1000或2300赫(根据毛坯直徑而定)的高频电流加热到1200~1250°C。

在某些情况下,应用联合加热的方法,即在炉中加热到750°C,然后在感应加热装置上加热到1250°C。感应加热装置的功率为1200千瓦。用这

种方法加热时,每小时能加热 15 吨金属。預先在炉中加热到不太高的温度,可以使金属表面不产生氧化皮,同时也可使高频装置所需的功率大为縮减。

美国《Kilby Steel》工厂应用联合加热法(炉中及感应加热)加热无缝鋼管毛坯。毛坯先在推杆式加热炉中加热,让它冷却到 925°C 以消除其氧化皮,經校直机校直后,再在感应加热装置上加热到軋制温度 1150°C。它是用 60 赫工頻电流加热,設備功率为 825 千瓦,綫路电压为 440 伏。零件經過加热器的时间为 50 秒。然后毛坯用送料机送到立式压床上軋压,此过程共 25 秒。

每吨鋼材消耗的电能为 65 千瓦/小时。加热器可以根据毛坯的不同尺寸,改变其电压及长度。可用輻射高温計测量毛坯的加热温度。当加热到規定温度后,加热器就自动断开。毛坯尺寸:直径为 140~180 毫米,长度为 350~400 毫米;設備生产能力为每小时 120 件。

国外的感应加热装置的结构一般均很紧凑,所占的生产面积也較小,装卸毛坯是用机械化装卸槽。

(4) 快速等温感应加热——在毛坯加热的第一阶段用較大的功率,使其表面温度很快地达到鍛压温度(1250°C);然后进入第二阶段加热,即用較小的功率使其表面温度能保持原来的温度,而主要依靠热傳导的作用使心部温度也达到鍛压温度,这样就可以大大地縮短毛坯的加热时间。据文献[3]介紹,直径 120 毫米的普通碳鋼毛坯在 1000 赫的电源下进行快速等温加热和普通加热法相比較,前者只需 230 秒,而后者需要 560 秒才能加热到 1150°C,加热时间縮短一半以上。

1. 快速等温加热的优点

- (1) 大大地縮短了加热时间;
- (2) 縮短了加热装置的尺寸并能簡化其结构;
- (3) 使氧化皮的損失大为减少,文献作者介紹,用快速等温加热时产生的氧化皮比普通炉中加热时少 92% 左右。

(4) 同一加热器可以适用于几种不同直径的毛坯,在相同的电流频率下可以提高加热器的效率;

(5) 由于加热和鍛压的自动化过程,可以用单位位置加热器代替多位置加热器。

选择电流频率时应该根据被加热材料的电⁴(特性而定。加热非磁性材料(奥氏体鋼,有色金属合金)时要比一般的磁性材料的电流频率低一些。为了选择感应加热装置最合适的效率,因而应该寻求

最佳的电流频率及加热速度。金属透热感应加热的效率基本上与合理地选择电流频率有关。

表 3 列举了毛坯联合加热时所用的电流频率;表 4 为 С. А. Яницков 在快速等温加热条件下所推荐的电流频率。

表 3 联合加热时毛坯直径与电流频率的关系

被加热的毛坯直径 (毫米)	加热的电流频率(赫)	
	低于居里点	高于居里点
6~12	3000	450000
12~25	960	10000
25~38	960	3000 10000
38~50	60	3000
50~150	60	960
152 以上	60	60

表 4

电流频率(赫)	毛 坯 直 径 (毫米)	
	一般加热	快速等温加热
500	80 以上	85 以上
1000	60~80	70~85
2500	35~60	40~70
8000	25~35	25~40

五、感应加热在軋鋼生产上的应用

近几年来,由于軋鋼工业的发展,为了不断提高軋制速度,因而必須加速加热过程。若采用感应加热即可以满足这一要求。由于采用感应加热,能将加热装置安装在軋机附近,因此縮短了加热軋材的运输过程,减少軋材在加热过程中所产生的氧化皮,延长軋軋的使用寿命,从而提高軋机的生产能力。此外,还能提高軋材的加热温度,因而相应地减少了軋制力。并且可以使軋机从上料、加热到軋制过程完全实现自动化。同时,使軋鋼工人的卫生及工作条件大为改善。

感应加热軋件毛坯(直径在 75~175 毫米)一般建議采用綜合加热法(居里点前用工頻、居里点后用高频加热)。但也不排斥用一种电流频率加热。軋坯直径在 175~250 毫米以上时采用工頻,直径小于 75 毫米时采用中頻。同样在軋鋼生产中也采用炉中加热和感应加热的联合加热法。

加拿大的温哥华冶金厂在 1954 年首先在軋鋼

生产上应用感应加热法。应用这种加热方法后,能缩短加热时间和提高劳动生产率。每吨钢加热费用约能降低一美元。应该指出,虽然设备成本很高(500,000美元以上),但设备的折旧费用很低。

这种设备每小时可以加热毛坯15~20吨。为了减少设备的总长度,装置做成双加热线式,两条加热线并行工作。毛坯感应加热的第一阶段(由室温到居里点)感应器的电压为550伏,频率为60赫。这些加热器约占加热生产线长度的一半。

为了保证毛坯能很快加热到更高温度,采用电流频率540赫,电压400伏。这样的频率是从由一功率为5000千瓦的同步电动机驱动的专用发电机得到的。

每吨钢材加热到1200°C左右的軋軋温度,在理论上能量最小值为220~230千瓦·时,而包括全部损耗在内则等于300千瓦·时/吨。

因此,整个加热器分为两部分:一是低温部分,用60赫的电流;另一是高温部分,用540赫的电流。

在感应器中加热的毛坯尺寸从100×100×900到160×160×1400毫米。加热后自动地送入軋鋼机。经过几道軋制后,毛坯軋成3毫米厚的钢板。钢板在冷却架上冷却。冷却后将它切断成需要的长度。经过矫整和整理后运到装货处。最小毛坯尺寸的加热时间为3.6分,最大尺寸为8.4分。

感应器的管子是用玻璃丝带包绕,并用有机硅漆浸渍。而整个感应器则浇有一层密度和强度很高的陶瓷物质。

感应器、电容器、发电机和变压器冷却水的消耗量约1800立升/分。在軋鋼車間采用感应加热后估计每班可以节约160个工时,軋鋼机的生产效率提高约30%,金属氧化皮的损失也由3%减到1%。提高了产品质量,与燃油炉相比降低了钢锭的加热成本。

六、感应加热在其它工业部门中的应用

1. 感应加热钎焊

感应加热钎焊已广泛地应用在机械制造部门和工具制造生产中。它利用局部加热,加热到比焊料材料的熔点高,而比零件金属熔点的温度低。零件之间的间隙被焊料所填充,焊料向钎焊区域表面层中扩散渗透。零件与焊料的相互熔接保证了零件冷

却和焊料再结晶后具有的机械强度和紧密连接。

由于高频感应加热的特点,因而在加热时电磁场只集中在应当钎焊的局部地区附近。因此该处的加热速度可以很快,一般在几秒钟内即可达到很高的温度。但是在离开加热区域一定距离的地方,金属仍然保持着冷态。

高频感应加热钎焊的优点是可以使整个过程完全机械化和自动化,以保证整批工件根据选定的最佳规范得到相同的处理。此外焊接区段的加热温度比较低,这样往往可以保持其原有的机械性能、显微组织和化学成份。而且可以得到光洁而牢固的连接,通常不需要再进行补充的机械加工。所有牌号的钢和铸铁、耐热合金和硬质合金都可以用高频加热钎焊。而特别重要的是不同种类的材料也可以彼此焊接起来。

采用感应加热用硬焊料或软焊料钎焊时,焊接的连接部分其间隙最好为0.04~0.05毫米,如小于此值时则焊料流不进去;而当大于此值时则连接处强度大为下降。

根据钎焊零件的尺寸来决定采用中频还是高频电源。电气开关、无线电元件和计算机零件等钎焊时采用高频电源。其设备的功率为1~15千瓦。自行车、机器脚踏车、汽车和飞机零件等钎焊时采用中频电源,其设备的功率为5~50千瓦。

2. 热轧辊感应预热

热轧钢板机的大型軋軋,在軋軋前用工频感应预热比其它任何预热方法要简单和经济得多。预热装置由分立式感应器、变压器、温度自动控制器、控制盘和电容器组成。如果軋軋要预热到300°C,感应器应该用水冷却和用热绝缘保护。改变感应器匝间的距离能够达到在沿軋軋长度上的任何温度分布。軋軋感应预热的参数:軋軋直径——500~700毫米,軋身长1.5米,从0~60°C或300°C所需的预热时间为2.7~5.3或3.6~7.1小时;功率为2~2.8或3.4千瓦。在预热到600或300°C时允许軋軋表面和心部的温度差为8~30°C。

3. 新的加热方法

高频等离子火焰在气体里或大气压力下以及不大的气体流出速度下产生辉光放电,火焰的温度达3700°C。用这种火焰来焊接难熔金属(钨、钽、钼、铌、锆)。带栅极控制或磁控管的真空管发生器使它产生高频能源,从发生器的能源沿同轴心的导线,输

給特殊的振蕩回路，从这里用高频变压器增强它到必需的火焰引燃值。高频放电在銳利的电流导綫的末部和噴嘴間发生。噴嘴應該用难熔金属（鉬、鎢）制成。

七、結 語

綜上所述，可以知道，在国外各工业部門已經广泛地应用感应加热。从而縮短加热过程，提高劳动生产率 and 降低成本。感应加热在一般零件的表面淬火和运输机械制造业上应用最普遍，近年来还报道关于冷軋軋感应加热表面淬火的消息。

在很多国家（美国、英国、加拿大、瑞士、西德、日本等）制造感应加热用的高频设备及仪器等已具有一定水平。应当指出，国外的机械式和真空管式发电机無論在功率和頻率方面生产面是很寬的。小的只有一、二千瓦，大的达几百乃至几千千瓦。用作加工小零件加热用的小功率真空管式发生器（10~20千瓦）的生产量很大。这些真空管式发生器具有很高的加热效率，这就大大地降低了感应加热的成本。同样还制造专用的工艺装备（淬火机床，机动夹具），設計和制造感应加热用的很多型号的设备及仪器。但在国外文献上还缺乏关于工頻感应加热的各种特殊型号设备的生产报道。

淬火机床的結構决定于生产方式，大量生产时采用专用机床。个体或小批生产采用万能机床。专用机床的所有工序包括上料、加热、等都是自动进行的。

值得介紹的是齿輪的液下淬火。用这种方法淬火后能够获得很薄的淬火层及最小的变形，这个方法可以适用于剃齿后淬火及不需最后精加工的齿輪。

近年来，在国外还使用新的冷却介质，它是由0.05~0.3%的聚乙烯醇的水溶液配成的。它的冷却能力介于水和油之間。

国外还正从事于热处理新方法的研究工作，例如纵向磁場加热，在强大的电场下淬火（Бассет法）。用此方法和一般热处理方法相比，它能显著地細化組織和提高机械性能。同时应该指出，实现此种加工方法改装设备时不需要很大的經濟支出。

广泛地应用感应加热在鍛压生产上，感应加热与炉子加热相比較，不但可以提高劳动生产率，改善了产品质量和劳动条件，同样大大减少了氧化皮，提

高了压床的寿命。此外，感应加热为热塑性变形的完全自动化开辟了很大的可能性。

为了提高其經濟效果，建議采用双頻加热（居里点以下用工頻，居里点以上用中頻），此种加热特别对于直徑75~175毫米的毛坯最为經濟。大直徑的毛坯建議用工頻加热，而小直徑的用中頻加热。

近年来，国外开始应用快速等温感应加热。它是先用大功率使毛坯表面很快地加热到鍛压温度，然后用較小的功率加热其心部，而在表面則保持其鍛造温度。这种加热方法与一般的加热相比可以縮短加热時間很多。

在国外工頻电流一般用作加热大直徑（150毫米以上）的有色金属及合金，同样也用双頻（或联合）加热。感应加热同样应用于钟表、首飾、光学仪器、电工技术工业和其它部門中。用高频电流0.5~2兆赫一般为加热重量很輕的零件（100~150克）和細小的精密零件。

在国外很注意温度控制，为此，设备上裝置了高温計，特别是加热含有鈦、鋳、鎢及其它元素的合金毛坯，因为这些毛坯的加热温度范围是很窄的。

为了降低加热价格，很好地使用高频设备，在国外采用联合加热法：在燃油炉或电阻炉中预热（加热温度600~800°C），最后用感应加热。

感应加热在軋鋼生产中有寬广的前途。它可以使軋鋼过程完全自动化，使軋机的生产能力大为提高并且改善了工作人員的劳动条件。目前国外在軋鋼方面应用感应加热的工厂还不多。

近年国外广泛应用感应加热于焊接生产上（高频焊接），焊接时使用高频和中頻电流。

感应加热还广泛地应用于其它工业部門中（钎焊、真空技术、軋軋预热、等离子加热等），用感应加热与其它一般的加热相比，在这些部門中明显地具有十分显著的优点。

参 考 文 献

- [1] М. М. Климович. Промышленное применение индукционного нагрева. 1963.
- [2] А. В. Донский. Высокочастотные электротермические установки.
- [3] С. А. Яницков. Ускоренный изотермический индукционный нагрев кузнечных заготовок.
- [4] Труды научно-исследовательского института токов высокой частоты имени проф. В. П. Володина. 1960.

感应加热热处理工艺

[苏联] М. О. Рабин, А. Г. Орловский

作者所在工厂首先利用感应加热进行汽车零件的热处理。在1937~1938年间,作者与沃洛格金(В. П. Вологдин)在实验室中,掌握了ЗИС-5发动机曲轴轴颈表面淬火,并且把高频半自动机床用于机械加工车间的流水线上。在吉尔(ЗИЛ)厂,用感应加热进行零件表面强化的热处理比重,与其它表面强化方法比较占61%以上(ЗИЛ-164А 和 ЗИЛ-157К 汽车)。

零件表面加热的表面淬火

这是感应加热热处理的最广泛形式。淬火层深度决定于加热到淬火温度的层深。局部表面淬火用45、40X、40ХНМА 和其它钢种。在大多数情况下,对于那些安全系数很大的零件,利用局部表面淬火可以提高其耐磨性(凸轮轴、曲轴、轴类、变速杆、撑杆凸轮等等)。

在个别情况下,局部淬火也可用于重载荷零件的强化,其目的在于提高零件的综合强度(例如ЗИЛ-164А 汽车半轴套管的强化)。以前,用正火的40X 钢或调质钢(用于公共汽车)制造半轴套管,而重载荷部分的结构强度靠套管的材料强度来保证。分析套管上的工作应力分布之后,在承受最大交变弯曲力矩的地方,可用表面淬火强化。表面淬火结果,淬火深度2~4毫米、硬度 R_c 50~62的45碳钢套管的强度超过了40X 钢正火的或调质的强度。在1959年,45 钢半轴套管强化过程的应用,节约了

230,000 卢布(新币)。

深层加热的表面淬火

在表面加热条件下淬火时,需要相当大的发电机功率(每平方厘米加热表面0.8~2千瓦)。沿复杂断面零件外廓(如齿轮的齿)完成表面淬火时,除了要求相当大的加热功率外,在很多情况下,还有很大的困难。

齿轮用双频加热时,以很大的中频电流和高频电流功率,可以获得沿齿断面的表面加热。但这就限制了零件表面加热感应淬火的应用范围。

我们工厂研究和采用低淬透性钢(临界直径6~15毫米)进行齿轮淬火。钢的有限的淬透性决定了淬火的深度^[2]。在小的比功率(0.2~0.05 千瓦/厘米²)条件下,就能完成加热淬火。

采用这种钢制造齿轮和其他薄断面零件的强化,在一定的深层加热条件下进行热处理是适宜的。因为应用较小的功率时,没有必要把功率严格地集中在零件的复杂表面上。

低淬透性钢55ПП 制造的ЗИЛ-164 卡车后桥从动圆柱齿轮,深层感应加热淬火的热处理代替了30ХГТ 钢渗碳淬火^[3]。高尔基汽车厂也应用了这种方法^[4]。

图1所示为55ПП 钢深层感应加热淬火齿轮的低倍组织。加热是用频率2500赫芝,功率140~150千瓦,加热76秒,冷却6秒,每个零件周期为120秒。

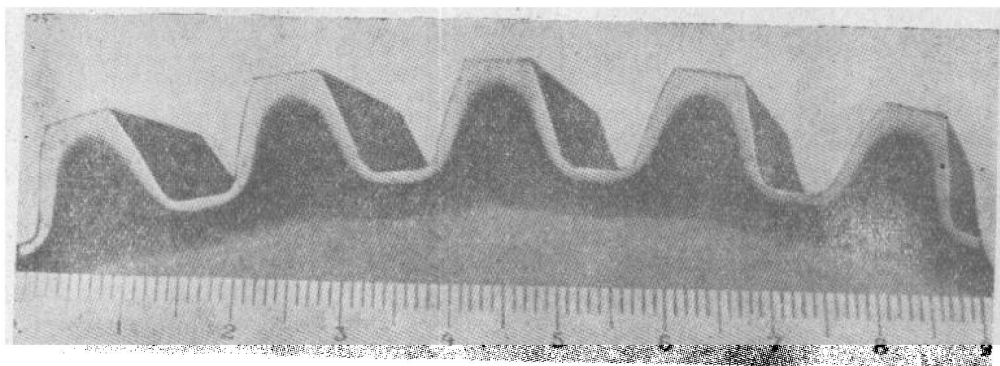


图1 55ПП 钢的ЗИЛ-164 后桥从动齿轮感应淬火的低倍组织

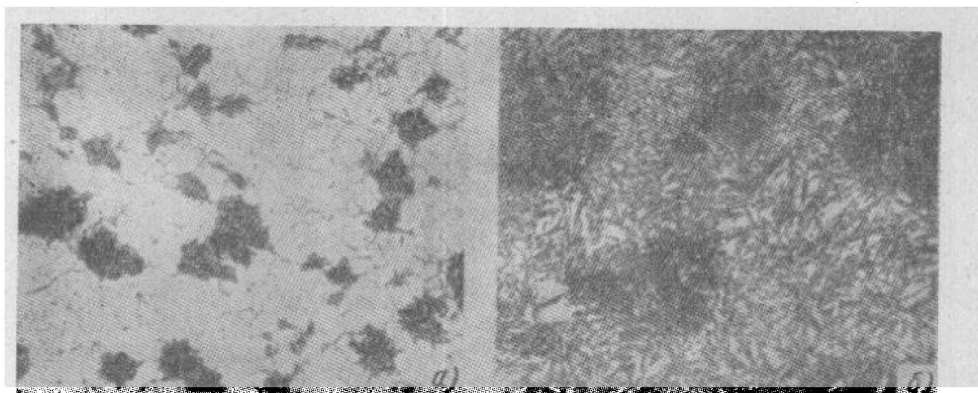


图2 铁素体可锻铸铁的显微组织

a) 原始组织, $\times 100$; b) 淬火组织, $\times 250$

1961年,在机械加工线上应用上述过程节约了172,000卢布。

应用有限的和可以控制的淬透性的钢,开辟了感应加热应用的新领域,它不仅可以用于齿轮的热处理,还可用于其它的很多零件。

铁素体可锻铸铁的表面淬火

铁素体可锻铸铁的表面淬火能保证铸铁铸件的最佳性能。即保持高强度指标的同时,淬火表面在干磨条件下具有高的耐磨性。

我们工厂首先掌握了铁素体可锻铸铁零件的高频淬火。并把这个方法用于刹车蹄片和隔套的加工流水线上^①。

普通钢件表面加热淬火的条件用于铁素体可锻铸铁时,在加热层全部体积内碳的扩散溶解来不及转变。为了提高扩散饱和速度,采用高加热温度 $1000\sim 1050^{\circ}\text{C}$ 。表面淬火加热规范分三个阶段:1)用小的比功率加热到 $600\sim 700^{\circ}\text{C}$;2)增加比功率,强制加热到 $1000\sim 1050^{\circ}\text{C}$;3)保温。

加热淬火的总时间为 $80\sim 120$ 秒。经验证明:淬火时可以用水作为冷却介质。

铁素体可锻铸铁的淬火扩大了感应加热热处理的应用范围。

由于铁素体可锻铸铁能够进行表面淬火,锻钢的辅助弹簧后支架可以用铸件支架代替。

图2所示为铁素体可锻铸铁的原始组织和淬火组织。

感应淬火的回火

由于普通回火周期比较长($1\sim 1.5$ 小时),而感应淬火后必须进行回火。这样,就打断了流水线的

工艺循环。缩短回火周期,使之与机械加工和表面淬火($1\sim 2$ 分钟)工序的时间相适应,是在机械加工流水线上保证应用感应热处理的条件之一。缩短回火周期主要是提高回火温度。

自行回火

感应加热表面淬火,零件在加热时的热量只有 $50\sim 80\%$ 用来直接加热淬火层。在冷却淬火表面时,控制其冷却时间,使其余的热量保留在零件的心部,利用这部分热量进行自行回火。试验表明:自行回火的周期不超过 $10\sim 60$ 秒,而表面温度比普通回火规定的温度高 $60\sim 80^{\circ}\text{C}$ 时,自行回火与普通回火的效果相同。淬火后很快地进行自行回火可以有效地避免淬火裂纹,这是自行回火的最大优点。目前,进行感应淬火的零件有 80% 以上采用自行回火。自行回火代替了炉热低温回火。

但是,自行回火也能用来代替高温回火(如改善表面淬火组织的活塞销的调质)。

活塞销由正火的45钢制造。为了保证活塞销强度,预先进行调质,其主要目的是获得细的片状组织,以保证淬火时缩短加热层转变到奥氏体的时间(这个时间约为 0.7 秒)。

活塞销调质是将整体进行感应加热,然后短时间喷水冷却表面,冷却时间控制在心部得到索氏体或屈氏-索氏体,硬度在 $R_{c28}\sim 35$,以符合一般的调质组织。这个过程的详细叙述见著作[6]。

电回火

在感应加热和冷却条件下,淬火后不是都能保证自行回火的,特别是薄断面零件和复杂形状零件。

① 发明证 No 76500, 1949年

在这种情况下,最好用中频或工频电流感应加热的电回火代替普通回火。此时,靠提高回火温度来缩短回火周期,提高回火温度可以使零件的淬火层断面加热均匀。

表面淬火后,45号钢的半轴套管螺纹端部进行高温回火,硬度 $R_c 23 \sim 35$ 。螺纹调质可提高抗压强度和剪切强度。

电回火是在加热淬火的同一个感应器中进行的。在大多数情况下,电回火最好利用工频电流。

现在,吉尔厂制造和试验 3ИЛ-130 的汽阀摇臂轴,用 50 赫的网路电源经变压器供给电回火感应器。这个加热器与感应淬火装置安装在一起,构成一个感应热处理的组合机床。

频率的选择

电流频率是感应加热参数和设备选择的先决条件。

电流频率的合理选择与过程的经济效果有关。为了正确地选择电流频率,在目前情况下,可以利用以生产经验为基础的数据。

感应加热工艺应用的远景

零件机械化送料和退料的专用热处理装置。准备应用重载荷零件的热处理过程(半轴、转向节、转向节销等等)。由于低淬透性钢的研究和掌握,在机械加工流水线上,有可能全套利用感应加热进行热轧齿轮和表面淬火。在工厂中,由于新型汽车制造的过渡,研究和应用感应加热气体渗碳过程代替渗碳和碳氮共渗,就可以在机械加工车间的完整的流水线上解决齿轮制造问题。在今后的工艺过程研

频率 (赫)	合理的淬火层深度 (毫米)	加热淬火的最小直径 (毫米)	
		可能的	最好的
1000	3~17	22	44
2500	2~11	14	28
8000	1~6	8	16
70,000	0.5~3	2.5	5

究工作中将继续掌握感应加热碳氮共渗工艺。工厂中在感应电热利用方面正在进行弹簧热处理的研究。

应用新的工艺过程和扩大感应电热处理,能够减轻劳动强度和降低汽车零部件制造成本,提高汽车的使用可靠性和改善工人的劳动条件。

参考文献

- [1] Шепеляковский К. З., Рыскин С. Е. Техника применения индукционного нагрева. Машгиз, 1949.
- [2] Шепеляковский К. З. «Металл», 1960, № 12.
- [3] Шепеляковский К. З. «Автомобильная промышленность», 1962, № 10.
- [4] Натанзон Е. И. «Автомобильная промышленность», 1962, № 8.
- [5] Рабин М. О. «Литейное производство», 1954, № 9.
- [6] Шкляров И. Н., Огневский В. А. «Вестник машиностроения», 1959, № 9.

(常光甲译自 «Металловедение и термическая обработка металлов»
1963 年 6 期 27~30 页 李敏宝校)

中模数齒輪淬火

[苏联] А. Д. Демичев 等

在現代的機器制造业中，齒輪傳動的应用範圍不斷地擴大。無論是齒輪的結構，還是它的热處理方法，都在愈益完善。目前，齒輪熱處理的方法有幾種：齒輪透熱淬火、齒輪滲碳后淬火并回火、高频電流加熱表面淬火等。

根据傳動齒輪的強度性能，對它們有各種不同的要求，因而它們的热處理也不能停留在某種通用的方法上。齒的表面滲碳并淬火，是提高齒的接觸強度和疲勞強度的最好熱處理方法。但是滲碳過程周期長，勞動量大，而且費用昂貴。由於齒輪在滲碳和淬火過程中變形較大，有時不能采用滲碳淬火過程，因而常常使齒輪的整個制造工艺複雜化。

利用感應加熱進行齒輪淬火，可以加速它的热處理過程，減小齒輪變形，并可用碳鋼或低合金鋼來代替貴重的鎳鉻合金鋼。齒輪感應淬火机床能安裝在齒輪的機械加工綫上，因此構成了不間斷的工艺循環，節省了零件到熱處理車間往返運輸的費用。取消工艺過程中的滲碳，并以碳鋼或低合金鋼代替高合金鋼，獲得很大的經濟效果。就以明斯克配件廠 ДТ-54 拖拉機的大減速齒輪而論，將滲碳改為高频淬火，每年總計可節約數百噸鎳。齒間感應淬火代替齒輪滲碳，還可減少用于熱處理的電能消耗。

目前，齒輪感應淬火分為四個主要方面：

- (1) 齒輪的齒透熱淬火，而齒間必須有 2~4 毫米的淬火層；
- (2) 齒的工作表面(側面)淬火，層深 1.5~3 毫米；
- (3) 工作表面和齒間淬火；
- (4) 整個齒輪的輪廓淬火。

至於应用哪一種方法，既要根據零件的技術要求，又要根據齒輪的尺寸和所具有的高频設備來決定。應當指出，各種不同的表面淬火方法，其效果亦不相等。例如，齒圈的高频透熱淬火與爐中整體淬火一樣，可以提高齒輪的接觸強度和耐磨性，然而不能保證齒所要求的疲勞強度。側面淬火可以提高耐磨性，但與此同時，由於圓角附近淬火層邊界的軟

化，會使疲勞強度有所降低。工作表面和齒間的高频淬火，或者整個齒輪的輪廓淬火，是提高齒的接觸強度和疲勞強度最好方法。在這種情況下，疲勞強度的提高可用殘余應力在淬火層內成有利的分布來解釋。

齒間和輪廓表面淬火的目的是，在於提高齒合工作表面的硬度和齒輪的疲勞強度。齒輪用碳鋼制造并經預先熱處理。由於淬火層的高硬度與心部良好的機械性能的綜合，在很多情況下有可能使齒輪獲得與滲碳相近的性能。

應當指出，與研究掌握結構鋼高频表面淬火的同時，正在推薦和研究新的齒輪強化方法，其中主要的有 К. З. Шепеляковский 应用低淬透性(2~3 毫米)鋼的試驗，以及汽車拖拉機科學研究所(ПАТИ)進行的提高淬透性鋼的研究，這種鋼的淬透性比結構鋼的淬透性高。在上面兩種淬透性鋼的研究工作中，齒輪的淬火加熱都是用高频加熱來使齒透熱，同時使齒間淬火。

感應淬火時的齒輪變形小，這對於蒸汽機車和電氣機車廠有很大的意義。因為在這些工廠中，模數 10 毫米的斜齒輪精度很高，其淬火變形不允許超出機械公差的極限。

由於应用這種或那種表面淬火法能够使加工零件獲得較高的強度性能，因此假設所有圓柱齒輪的品種分成三個基本類別：

- (1) 小模數齒輪(3~5 毫米)；
- (2) 中模數齒輪(5~10 毫米)；
- (3) 大模數齒輪(10 毫米以上)。

小模數(3~5 毫米)齒輪可用雙頻感應淬火，其淬火層與滲碳層相似，即沿齒輪的輪廓均勻分布。這種方法应用到模數較大(大於 5 毫米)的齒輪時，在技術上有很大的困難。因為齒輪模數增大，相應地增大了齒輪的幾何尺寸。這樣，不管是用中頻或是采用高频，都需要很大的功率(幾千千瓦)。

對於大模數齒輪(10 毫米以上)，當齒的長度為幾厘米和更長時，以較小功率的發電機(小於 100 千瓦)，用感應器順着齒間運動的連續順序淬火法進行

淬火。此时齿间和齿工作表面淬火层分布均匀，只是在齿顶的断面上淬火层是断开的。模数小于10毫米的齿轮用这种方法淬火时，感应器效率低，并且有时是无法实现的。

李哈乔夫汽车厂设计的环形感应器，能使模数10毫米的正齿轮工作表面的齿间淬火。齿轮淬火时，将齿放在环形感应器有效导体的正向与反向之间。采用这种结构的感应器时，齿工作表面的中间部分主要是靠热传导进行加热的。因此在不大的比功率条件下，加热过程较长(12秒以上)。借助热传

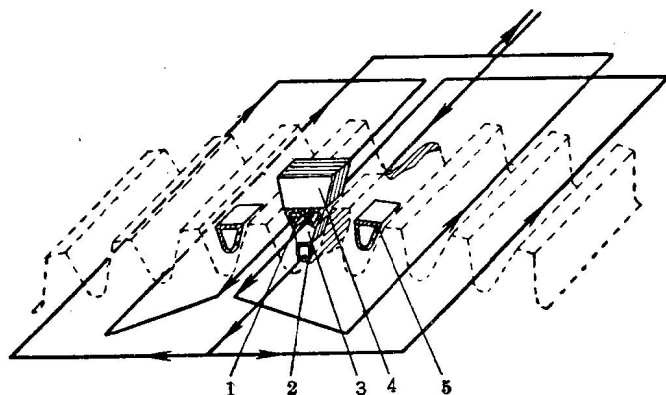


图1 齿轮的齿间淬火感应器原理图

这种新的模数5~10毫米齿轮的淬火法，是由高频电流科学研究院(НИИТВЧ)研究出来的。

在高频电流科学研究院的感应器结构中，无论对齿间或其侧面(工作表面)的加热，都是靠感应电流来直接进行的，而不象吉尔汽车厂(ЗИЛ)的感应器那样借助热传导进行。加热过程是用大的比功率在短时间(1~3秒)内进行的，因而有可能减少热传导对已淬硬齿表面回火的影响，并且有可能对较小模数(5毫米以下)的齿轮进行淬火。

在淬火的齿间(图1)放置两根感应导体1和2。这两根导体中的电流方向相同，导体是串联的。这种结构的感应器在加热时，由于邻近效应作用，强迫电流由淬火的齿间流向相邻的齿间。因此，相邻两齿间的加热大大地减弱，仅为淬火齿间的1/4~1/9。为使加热均匀，两根导体(上面的和下面的)间隔一定距离，在两根导体之间填充铁磁材料(CT.3钢)。中间导体3对齿间的热形有很大的影响，而实际上中间导体通过的磁通量不大。外导体4的作用，这里不需说明了。

对模数5~6毫米或必要时模数更大的齿轮进行淬火时，应采用8000~10000赫的频率。当快速加热(1~2秒)时，电流频率的选择是取决于获得足

够淬火层深度的条件。导作用的长时间加热，对先前已淬硬的齿表面产生有害的影响，即在不采取专门的剧烈冷却时会发生回火。对于模数小一些的齿轮，防止已淬硬齿表面的回火实际上是不可能的。这就限制了环形感应器在更小模数齿轮上的广泛使用。

对于各种中模数(5~10毫米)齿轮，其工作表面和齿间可以采用特殊结构的感应器进行同时淬火。图1所示为这种感应器的原理图，图2为其外形。这时所得的淬火层，与大模数齿轮用连续顺序淬火法所得的淬火层一样。

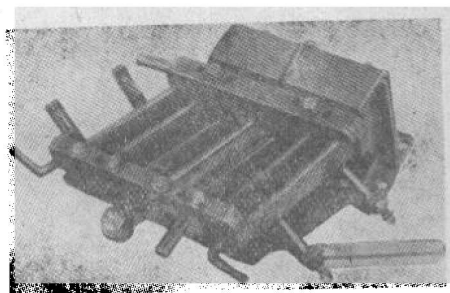


图2 模数10毫米斜齿轮淬火的感应器外形图

够淬火层深度的条件。

当加热时间为1~3秒时，如果考虑到变压器和感应器的效率，则每平方厘米加热表面需要的发电机功率为3~4千瓦。模数10毫米的齿轮还可采用2500赫的频率。

中模数齿轮齿间淬火的试验装置示于图3。为使加热时冷却液不落入正在淬火的齿间应使齿轮轴绕成水平放置，然后对下面的齿间进行淬火。

能够垂直方向移动的滑板固定在机架1上。滑板2上装有心轴4和定位机构5。按压手柄6时，零件与滑板一起下降，于是齿轮进入感应器3中。在这个位置上，淬火齿间进行加热。加热中断时，零件自动地上升20~25毫米，同时接通淬火液。齿轮在升高的位置上淬火液激烈地冷却淬火齿间。淬火液停止供应后，零件旋转一节距，以备下一个齿间进行淬火。

加热小模数齿轮时，由于热传导的作用，使相邻的已淬火齿工作表面回火。为了避免上述回火现象，必须采取缩短加热时间的措施，以便尽可能地减小热传导的影响。但是，缩短加热时间会使比功率增大，因而增加了高频发电机总的设备容量。所以在研究上述方法时，必须以该方法在工业上实际

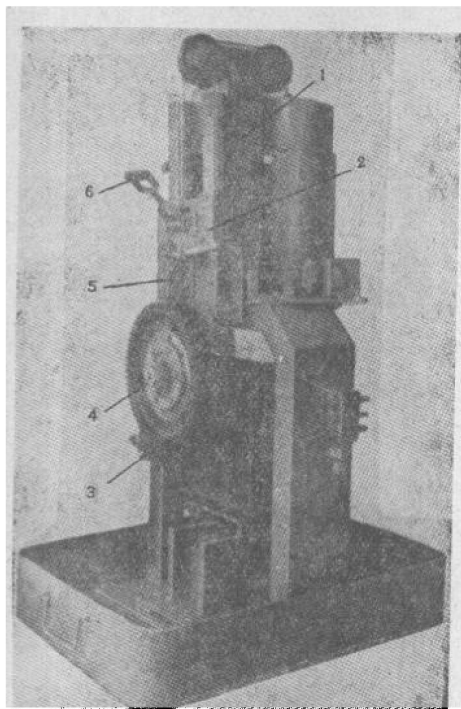


图3 ДТ-54和“白俄罗斯”拖拉机大减速齿轮淬火用试验装置

使用的条件为依据。

进行试验时，规定采用成批制造的功率100千瓦、电流频率8000和2500赫的国产发电机，以及一些频率10000赫、功率150~200千瓦的进口发电机。但是，100千瓦发电机往往是不够的，就象ДТ-54和“白俄罗斯”拖拉机的大减速齿轮的生产，在加热时间为1.2~1.8秒时，需要等于120~150千瓦的发电机功率。由于主要订户是一些拖拉机厂（哈尔科夫拖拉机厂、明斯克拖拉机厂、斯大林格勒拖拉机厂及明斯克配件厂等），这些工厂一昼夜能生产几百个齿轮，需要有很大的生产能力，因此把2台100千瓦的发电机并联使用，以解决齿轮的淬火问题。例如，一台150千瓦的发电机和一台高频电流科学研究所设计的机床工作时，每班能生产100个ДТ-54拖拉机的齿轮，这个生产能力是不够的。为了保证工厂的整个生产计划，必须提高生产能力或增加设备台数。

明斯克拖拉机厂和明斯克配件厂的正齿轮以及新切尔克斯电气机车厂的斜齿轮，采用了齿间表面淬火的方法。

ДТ-54拖拉机和“白俄罗斯”拖拉机的大减速齿轮是用45、40X、45X钢制成的，模数为6.5毫米，齿长分别为68和50毫米。新切尔克斯电气机车厂

的齿圈是用50和30XH3A钢制成的。

模数6.5毫米、齿长68毫米的齿轮，齿间淬火是用频率8000和10000赫、额定功率100和150千瓦的两台机械式发电机在试验装置上进行的，其规范如表1。

表1 模数6.5毫米的齿轮淬火规范

名 称	ИВ100/8000 型发电机	AEG* 型 发 电 机
电流频率，赫	8000	10000
发电机额定功率，千瓦	100	150
空载电压，伏	800	530
感应器电压，伏	48	50
发电机电压，伏	740	520
发电机电流，安	210	250
发电机功率，千瓦	120	120
加热时间，秒	1.75	1.75
冷却时间，秒	3.5	3.5

不过模数6.5毫米的齿轮甚至用很短(1.75秒)的加热时间(表1)，也不能消除热传导对已淬火齿表面回火的影响。相邻的齿间必须用水或其他液体进行激烈冷却。采用了冷却相邻齿间的特殊喷水器5后(图1)，已淬火表面没有回火现象。

齿轮用上述方法淬火时，端面发生激烈加热，导致端面淬火。这种现象是很不好的，因为同一个端面在整个齿轮的淬火过程中，要经受多次淬火和回火。这样的多次淬火会产生裂纹，这些裂纹通常分布在端面与齿间的棱角上。在加热过程中端面进行激烈的冷却，可以保证端面不发生淬火现象，从而避免淬火裂纹的产生。

加热淬火齿间时，如果热量分布不良会造成已淬火表面的回火和裂纹，那么通常分布在齿间和圆角上的显微裂纹是由于水冷所造成的。为了防止淬火裂纹的产生，应当采用更弱的淬火介质(3%水乳溶液或0.1%聚乙烯醇水溶液)。为了节省乳浊液(聚乙烯醇)，淬火液在封闭系统内循环，零件即用此液体进行冷却。

齿间淬火后，用15%高硫酸铵水溶液腐蚀，以显现齿轮上有没有淬火裂纹。在淬火齿轮上切取试样，以研究淬火层的硬度组织。

金相研究表明，接近表面的整个淬火层是中等针状的马氏体。齿工作部分的组织与齿间相同。淬火层深度大致相等(等于2.5毫米)。齿廓的马氏体

* 原文为 AET，系 AEG 的音译，是西德生产的高频发电机型号——译者