

鋼的热处理感应加热

М. Ф. 阿列克森科, Л. С. 里弗西兹 著



机械工业出版社

鋼的热处理感应加热

M. Ф. 阿列克森科、Л. С. 里弗西兹著

郝应麒、張立之、刘翰英译



机械工业出版社

1960

內 容 簡 介

本书叙述了鋼及鑄鉄热处理时感应加热的特性，并对該种热处理方法的应用范围及其对被处理的金属的机械性能的影响也进行了說明。书中还研究了該种处理法的缺陷并列举出零件和工具感应热处理的合理方法以及淬火零件的檢驗法。

本书供机械制造厂、工厂实验室和科学院的工程技术人员用，并可作为冶金和机械制造等高等学校学生的教科书。

苏联 М. Ф. Алексеев, Л. С. Лившиц 著 ‘Индукционный нагрев при термообработке стали’ (Обorongиз 1953 年第一版)

NO. 3186

1960 年 4 月第一版 1960 年 4 月第一版第一次印刷
850×1168 1/32 字数 180 千字 印張 6 7/16 0,001— 5,600 册
机械工业出版社(北京阜成門外百万庄)出版
机械工业出版社印刷厂印刷 新华书店发行

北京市书刊出版业营业許可証出字第008号 定价 (11-8) 1.35 元

目 录

序言	5
导言	7
第一章 钢的热处理感应加热的基本范围	10
表面淬火(10)——穿透淬火(14)——局部淬火(15)——回火(16)——正常 化(18)	
第二章 感应加热时钢的热处理特点	19
1. 淬火前的感应加热	20
加热温度与持续时间的关系(20)——钢成分的意义及预先热处理的作用(39) ——残余应力(49)——增高硬度现象(62)——淬火层及过渡区的显微组织及 硬度(68)	
2. 电回火	75
第三章 感应淬火钢的机械性能	86
1. 普通穿透淬火和感应淬火后钢的性能	86
强度极限(86)——抗扭力(88)——冲击韧性(88)	
2. 渗碳钢及表面淬火钢的性能	89
3. 渗碳钢的感应加热淬火	96
4. 抗磨性	99
感应淬火及普通淬火后钢的抗磨性(99)——渗碳的低碳钢和表面淬火的中碳 钢之抗磨性(103)	
5. 疲劳强度	105
表面淬火对疲劳强度的影响(106)——渗碳及表面淬火钢的疲劳强度(116)	
第四章 感应加热化学热处理	118
第五章 生铁感应热处理	123
第六章 工具钢淬火时的感应加热	129
1. 碳钢的淬火	129
2. 合金钢的淬火	131
3. 高速钢的淬火	135
第七章 变形及翘曲	140
1. 变形	141
2. 翘曲	146
第八章 零件合理的处理条件	150

1. 圓柱形零件外表面的淬火	150
2. 空心圓柱件內表面的淬火	155
3. 齒輪的淬火	156
4. 工具的淬火	158
第九章 感應淬火零件的檢驗方法	164
1. 感應熱處理工藝卡片	164
2. 處理後的零件的檢驗	166
第十章 感應加熱熱處理在工業上的應用	170
1. 機床	170
2. 曲軸和凸輪軸的淬火	175
3. 花鍵零件和齒輪的淬火	181
4. 氣缸筒的淬火	187
5. 毛坯的穿透淬火	190
第十一章 其他局部和表面淬火方法	196
1. 表面淬火時鋼的接觸電加熱	196
2. 氣體火焰加熱時的表面淬火	199
3. 在電解液中局部和表面加熱	201
4. 在熔槽內局部加熱和表面加熱	203
參考資料	205

序 言

多年来，在感应加热热处理规律性方面所进行的研究工作，已使在生产及试验室实践中对应用这种工艺过程积累了某些经验。

在感应热处理过程中经常产生的一些缺陷的原因长期未得明确。因而在机器制造业中采用这种无容置辩的先进方法就被拖延了。仅近年来的著作，主要是苏联学者和工程师们的著作，才解决了有关确定进行感应加热热处理有利条件的一系列问题。

感应热处理及工业采用高频率电流的创始人系苏联学者、苏联科学院通讯院士 В. П. 沃罗格金教授，毫无疑问，他是在该领域中的世界权威者。进一步制订感应加热方法及研究其规律性的，除了 В. П. 沃罗格金教授及其同事以外，尚有 М. Г. 罗任斯基、Т. И. 巴巴特、Б. Н. 阿尔诺夫、Б. Н. 罗曼诺夫、И. Н. 格金、К. В. 舍彼梁果夫斯基、Ю. И. 基太高尔德斯基、Ю. М. 巴格底列夫及斯大林汽车厂和奥尔忠尼启则机床工厂的工作人员等。

在研究淬火感应加热时，一般主要都注意在过程的能量方面，而对影响热处理零件性能的感应加热条件却未给予足够的重视。

仅在最近才开始研究零件感应热处理条件对其性能的影响及确定采用这种方法最有效的条件。

在上述的工作中已确定了一系列的感应热处理规律性，而这些规律性与热处理零件获得某种性能是有联系的。这些工作的结果做出了制订感应热处理工艺规程及在机器制造业中更广泛地推行这种工艺规程的科学根据。

在本书中所援引的感应热处理方面的著作，系在下列人员的参与之下完成的：И. Е. 广多罗维奇教授、斯大林奖金获得者 М. Г. 罗任斯基、В. А. 雅果夫烈夫工程师、技术科学副博士 С. Л. 儒果夫、И. Л. 米尔金教授、Б. С. 阿克塞诺夫、А. Е. 麦吉维吉夫、Ю. А. 沙果诺娃、В. Я. 普罗斯维道夫 及 А. И. 沙莫依诺夫。

这些著作的结果被做为本书的根据。

作者們深深感謝本书科学編輯技术科学副博士Ю. М. 巴格底列夫对本书仔細的編輯和作了一系列原則性的修正，同时也衷心地感謝技术科学副博士М. Г. 罗任斯基及技术科学副博士И. Н. 格金預先审閱了手稿及提出了宝貴的意見。

本书第二、三、四、六、七及八章系由技术科学副博士Л. С. 里弗西茲执笔，第五、十及十一章系由技术科学副博士М. Ф. 阿列克森科执笔，第一、九章共同写成。

導 言

当发现在工业上可以采用在迅速改变的磁场内加热金属以后，各种类型的「感应热处理」才开始发展。机器制造业各部门都非常积极地开始在不同的工艺程序中采用感应加热。出现了如下的过程：如表面淬火、正常化及回火感应加热、锻造及冲压感应加热、钎焊感应加热等。这些方法之所以能够迅速推广，是因为它优于类似的普通工艺程序。在热处理方面感应加热获得最广泛的推广。这种方法的基本优点在于具有极高的加热速度及可能实现局部及表面加热。一般几秒钟的瞬时加热不会引起淬火零件强烈的氧化，而仅能盖上一层淡灰色的氧化膜。由于同样的原因「感应淬火」时也无脱碳现象。这种方法淬火的零件可以不经磨削，而仅进行轻微的抛光即可，这样就大大地减小加工余量。由于感应加热时间短暂，故可阻止对钢的性能产生有害影响的晶粒长大。

感应加热设备的特性及其工作条件都使得它与机械车间一般的机床设备相近。因此有可能将感应加热设备布置在机械车间的流水作业线上。这时设备的特点是可使热处理过程自动化，其优点除去提高生产率外，最主要的是在大量及成批生产时可以保证零件热处理的均衡质量。感应加热热处理时热处理工的劳动条件比普通热处理车间热处理时好得多。

对需要改变金属性能的部分进行局部热处理，有十分显著的优点，因为无须在炉中加热全部零件。

感应热处理的最主要优点是可以实现表面加热。表面加热至要求深度，并随后冷却（表面淬火），可使零件上获得化学热处理（例如渗碳）所能达到的性能。在这种情况下，当心部具有韧性时亦可获得高的表面硬度，同时经受摩擦及冲击载荷作用的机器零件，或者工作在长期交变载荷作用条件下的机器零件，经常要求这种配合。用表面淬火代替渗碳过程具有很多经济及工艺意义。表面淬火所需的时间，根

据热处理零件的尺寸及感应加热设备的功率之不同，仅为数秒钟至数分钟；而渗碳所需的时间则以数小时计。此外，渗碳时还要求进行专门的补充加工（镀铜），以防非强化区被碳饱和。表面淬火时，采用局部加热可仅强化表面硬度要求高的区域。

随着采用感应热处理范围的扩大，逐渐明确了这种过程的某些特点及在许多情况下所产生的缺陷。这些缺陷有时在热处理后立即发生，有时经过一段时间才发生。起初最常见的缺陷为裂纹及淬硬层脱落。随后又发现感应淬火零件上的裂纹可能不是在热处理后立即产生的，而是经过一段时间。因此就出现了所使用的零件外表虽然完好，但可能逐渐产生强化材料破裂的危险。还有一些更大的困难，即不管这种热处理过程刚结束或者经过一段时间之后在零件上都不会产生裂纹及其他可见的缺陷，然而零件的使用性能却降低了。这种情况主要发生在重载荷零件进行感应淬火的机器制造业中。在苏联及其他国家众所周知这样的情况：这种非常完善的方法长期不能在某些工业部门中采用，因为用它来进行重要及重载荷零件热处理的最初尝试即遭失败——没有可见缺陷的淬火零件在工作中断裂的时间，比未经感应淬火的零件还早得多。

这些可见的和不可见的缺陷迫使更深一步地对这种方法的研究。

所进行的研究逐渐揭露了方法的「秘密」，目前对感应淬火进行得“成功”或“不成功”的最可信的原因已可作出某些说明。

推广上述方法，可作出有关在钢的热处理中最合理采用感应加热方法的某些结论。经常可以遇见采用感应加热并非有利的地方。譬如，小零件穿透淬火的感应加热即不适宜（不使用专门的自动装置时），因为在普通的热处理加热炉中进行淬火加热时，同时装入炉中零件的数量很大，致使在这种情况下加热相同数量零件所需时间要少一些。因此广泛采用感应加热进行大型零件（曲轴颈、轧辊、轴的轴承部分等）的表面淬火和局部淬火并非偶然。小零件（各种滚棒）热处理时采用感应加热的情況非常少，而在采用感应加热的地方，则应尽量创制能提高该过程生产率的自动机床。

另一方面正与此相反，在许多情况下感应热处理是不可以被代替

的工藝程序。譬如，由鋼部件和陶瓷部件組成的組合零件，或者鋼鋁組合零件，都需要局部強化鋼部件的單獨部分，這時採用感應加熱最為方便。

由此可見，感應熱處理完全有可能最廣泛地應用於工業生產的各個部門中。然而採用感應加熱要求在不同的條件下遵循不同的條件，以保證在熱處理零件上獲得最良好的性能。

第一章 鋼的热处理感应加热 的基本範圍

热处理的实践已經創立了各种局部强化和表面强化的方法。許久以来，已經采用化学热处理的各种过程来进行表面强化；然而它們与表面淬火法的强化比較起来，却存在着一个很大的缺点，即持續時間过长。此外，化学热处理方法一般还須进行补充工序，以防止不需要强化的表面扩散饱和。后来一般采用的其他表面强化方法有：接触电淬火法（H. B. 格維林柯法）、在电解液中加热淬火法（И. З. 雅斯諾伽罗斯基法）、气体火焰加热淬火法等，这些方法与感应加热表面淬火法比較起来，也各有缺点。

但是并不能由于各种局部加热和表面加热方法有这些缺点，就认为感应加热是十全十美的。感应加热法較之其他方法是有一系列重要的优点，但也有时不能被采用，因为在这些情况下采用其他方法則更为有利。热处理中感应加热方法的主要缺点如下：1）設備成本較高；2）由于感应加热經常用噴头冷却，所以在許多情况下淬火时采用油进行冷却甚为困难；这就在热处理鋼材方面造成某些限制；3）由于加热時間短促，所以对溫度的控制很困难；4）很大的殘余应力。

在热处理方面，感应加热基本上适用于下列工艺程序：表面淬火，穿透淬火，局部淬火（表面淬火及穿透淬火），回火（穿透的），表面回火，局部回火，正常化。

表面 淬 火

这是一种采用感应加热最有效的基本工艺程序。表面淬火法是将热处理零件的表面加热至要求的深度，然后将材料加热区域用水或其他冷却剂冷却。加热深度及与其相适应的淬火深度可用选择电流頻率的方法調节。当采用相同的頻率工作时，加热深度可以在一定的範圍內用规范来調节。加热深度（淬火深度）視电流頻率确定。采用最高的頻率可以达到可能最淺的加热深度；随着頻率的减低，能达到的最小加

热深度逐渐增加。这就是说，采用較低的频率工作时，不可能获得小深度的淬火。从另一方面看来，采用真空管振荡器工作时，电流穿透金属的深度較小[●]。因此，进行很大深度的加热时并不合算。这时采用产生几千赫芝的机动振荡器，则可迅速而均匀地实现大型零件深度加热。

因此，不应该认为任何型别的高频率设备都是万能的，而是应当规定出每种型别振荡器的适当用途。

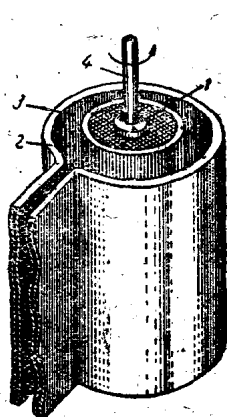


图1 一次表面淬火示意图

图，在感应器中冷却：

- 1—被加热的零件；2—感应器；
3—注入淬火液的孔；4—电磁夹持器。

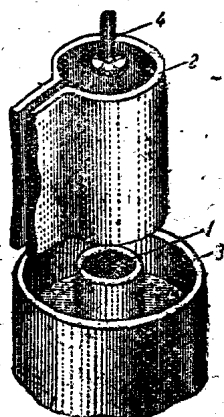


图2 一次表面淬火示意图，

浸入法冷却：

- 1—被加热的零件；2—感应器；
3—冷却液槽；4—电磁夹持器。

感应加热表面淬火法主要分为两种：一次法及連續法。按第一种方法淬火时，零件需要进行热处理的表面一次加热。加热后由感应器内表面的孔注入冷却水（图1）冷却，或者将零件移入喷头下或冷却槽中（图2）冷却。零件加热表面越大，則將該表面层加热至淬火温

● 为了简化感应加热的计算，在电工学中习惯使用条件值——[电流穿透金属的深度]。此值按照密度相同的电流通过导体表面层确定，这时导体的其余内部断面被认为是不带电的。感应加热时决定于加热深度的电流穿透深度与供电频率的平方根成反比。此外，电流穿透深度还决定于加热材料的物理性能——电阻率和导磁率。钢材加热至超过磁性转变温度时，即丧失铁磁性，因之也使电流穿透钢材的深度急剧加深。

度所需之电能功率也应越高。因此，由于现有高频率设备功率不足，用一次加热法加热大型零件不易实现。在这种情况下，表面淬火是用連續法来进行的。此时并不是一次即将全部需要热处理的表面加热，而仅将位于感应器中的那一窄条部分加热。加热在窄的感应器中进行（图3）；由零件需要进行热处理区域的下部开始。当第一部分加热至要求的温度后，将零件自上向下移动。需要加热的区域連續地通过感应器进行加热，然后冷却。这时或者是由感应器与零件成一定角度喷射出之水流进行冷却（图3, a），或者在专门的喷水冷却装置中进行冷却（图3, b），该装置为一圆筒，圆筒壁间有循环的冷却水，冷却水经过圆筒内壁的小孔喷射于零件上。

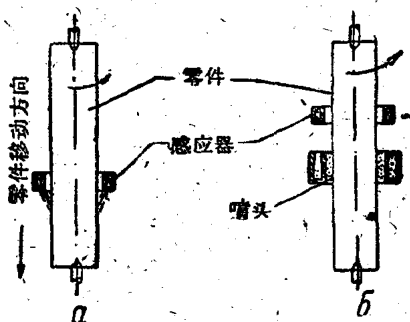


图3 用連續法进行加热及淬火的示意图：

a—由感应器中的水冷却； b—用专门的喷头冷却。

圆柱状零件或者零件上的圆柱形部分最容易进行表面淬火。但是形状较复杂的零件，如偏心轮、齿轮和平面等也可以进行表面淬火。表面电淬火可以获得某些类型的化学热处理所能获得的综合性能。和渗碳相同，表面淬火在心部保持韧性的情况下可以获得很高的表面硬度。然而用渗碳法达到这种综合性能要经过长时期复杂的处理，并且还须进行一系列的补充工序——镀铜、除掉加工余量、随后进行的热处理（有时需要二次热处理）、校正，而采用固体渗碳剂时需要装箱及启箱。通常这个过程需要进行几小时。如采用表面淬火，则化费较少的时间即可获得同样的综合性能。

应该注意到表面淬火中的两种情况：主要在磨损负荷作用条件下工作的不重要的和负荷较轻的机器零件的表面淬火，以及在工作中除了承受磨损负荷外，还承受更复杂的应力作用（而这种复杂的应力要求在零件上除了有高的表面硬度之外，其淬火层和心部尚须具有一定性能）的重要机器零件的表面淬火。根据这些条件确定出采用表面淬

火的各种处理方式。通常,进行表面淬火的零件由含0.4%左右或0.4%以上碳的鋼材制成,与其他合金成分含量无关。含碳量較低时,在热处理的零件上不可能获得像渗碳零件表面那样高的硬度。

基本上仅承受磨損应力的次要零件,在表面淬火前不必进行預先热处理,零件可以由正常化状态的原材料最后制成。在制完的零件要求热处理的区域上进行需要深度的表面淬火,然后将零件在 150°C 左右的低温进行回火,以减少表面淬火时产生的残余应力。低温回火所消除之应力甚不完全,然而并不是任何时候都可以提高回火温度,因为在較高温度回火时,淬火层的硬度会急剧地下降。经过上述处理的零件进行檢驗并最后精加工(磨光,如果零件表面淬火前经过磨光,则进行抛光)至所需尺寸。

对于承受不仅是一种磨損載荷条件下工作的較重要的零件,在表面淬火前应进行預先热处理,以使心部有适当的性能。为此先粗制零件,使其具有普通淬火的加工余量,然后进行該种鋼的普通淬火,并在能使該材料的强度和塑性恰当配合的温度下进行高温回火。普通結構鋼的这种回火温度范围为 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ 。在这种状态下的零件須进行最后机械加工(根据制造精度的不同,經常包括磨光),然后接着进行要求区域的表面淬火、上面提到的低温回火和尺寸的精磨。按照这种程序制成的零件,具有很高的表面硬度和高强度的韌性心部。鋼材選擇得当时,心部的韌性可能不低于类似的渗碳零件,而淬火零件心部的强度却比渗碳零件好得多(見[渗碳鋼和表面淬火鋼的性能]一节)。

表面淬火与渗碳比較起来,它的优点之一是零件经过这种热处理时所产生的撓曲和变形較少。因为在表面淬火时,仅仅只有很薄的一层材料被加热和冷却,而零件的絕大部分在热处理时仍旧是冷的,不发生任何的体积改变,零件总变形不大。如果淬火层的位置对称的話,則零件在表面淬火时产生的撓曲将更小。这样,仔細地进行表面淬火就能够在某些情况下避免成品零件的校正,而用渗碳法强化时,校正工序就成为不可避免的。

表面淬火与渗碳比較起来,它的最大优点是可获得一致的綜合性

能，因此在許多情況下提出了以表面淬火代替滲碳的問題。由於第一種表面淬火的最大優點是它具有極高的生產率，故解決代替的問題時，應考慮到這個因素。在計算各種方法熱處理的生產率時，應根據每個零件熱處理的持續時間而定。在爐中同時進行大量零件的滲碳，同時又選擇時間最短的滲碳方法（氣體滲碳）時，處理每個零件所需平均時間就比表面淬火所需時間少得多。這時，時間上的差別如此懸殊，致使電淬火因為生產率較低而喪失瞭其他優點——例如不需要進行補充加工工序，不需要防護個別非強化區域等。只有利用能大量提高勞動生產率過程的專門自動化裝置時，小零件表面淬火才可以保存自己的優點。例如，滾動軸承的滾棒進行表面淬火時，就採用這種自動化裝置。

穿 透 淬 火

穿透淬火感應加热的優點主要是在於能進行長零件的熱處理，棒材、管材、某些型材（大部分是簡單截面的）以及長度為3~4米或更長的其他零件，在普通條件下的熱處理應在專門的爐中加熱，最常用的是適當深度或長度的堅爐。建造這樣的加熱裝置非常昂貴而複雜。此外，長零件和重型零件淬火過程的輔助工作非常複雜，並要求專門的設備。如利用感應加熱進行這些零件的淬火，就不需要複雜的輔助設備。這種熱處理方法的基本原理如下。

應該根據熱處理零件的直徑（截面）或壁厚來選擇相應電流頻率（高頻率振蕩器）的設備。但是，如果企業中現有設備的電流頻率，超過對該零件尺寸最適當的頻率數，也同樣可以使用，當然這時能量的損失較使用適當頻率的設備要高一些。利用適當頻率設備加熱和利用較高頻率設備加熱的方式是不一樣的。由於現在談到的是穿透淬火的加熱，即穿透加熱，所以能將規定厚度零件全部熱透的頻率就是最適當的。這種情況下加熱裝置是一個感應器。零件在水平狀態下通過感應器，在感應器中熱透至要求溫度（這時加熱溫度主要是由零件通過感應器的速度來調節），然後再通過環狀噴頭，進行淬火。零件通過感應器和噴頭是利用裝置在設備入口和出口處的滑輪來移動的（圖4）。

如果穿透淬火加热用的设备产生的频率超过适当的频率（此种情况下加热深度较浅，即不是全部截面析出热量，而加热是借助载波电流层导出的热量来实现的），加热周期有意识地予以延长，以使载波电流层导出热量将零件全部加热。在这种情况下应按照图 46 经过两三个感应器中进行加热。热处理零件通过第一感应器

时，加热至高温的外载波电流层导出的热量，将零件全部截面加热（然而尚未达到淬火温度），用同样方法在第二感应器中加热后，加热温度得到进一步的提高。这样，用两三个感应器加热的方法即可将温度提高至淬火所要求的程度。

喷头冷却是在零件通过最后一个感应器之后进行的。毫无疑问，这种加热方法和采用适当频率一次将棒材或管材整个截面加热方法比较起来，较不经济。这种情况下能量的损失是与两感应器空隙间的热辐射和热处理总周期的某些延长有关。长的淬火零件也可以利用感应加热进行回火。为此，在上图冷却装置之后可安装一个或数个感应器，以便进行回火要求温度的穿透加热。在每种情况下，热处理的相应规范均应由实验方法选择。

局部淬火

利用感应加热进行零件个别区域的局部淬火，是一种非常方便的工艺程序。最近期间个别区域的局部强化利用盐槽或者瓦斯灯焰加热，少数情况下还利用其他方法（在电解液中加热，接触加热等）。鉴于这些方法有缺点，所以利用感应加热进行局部强化是极为方便和有利的。

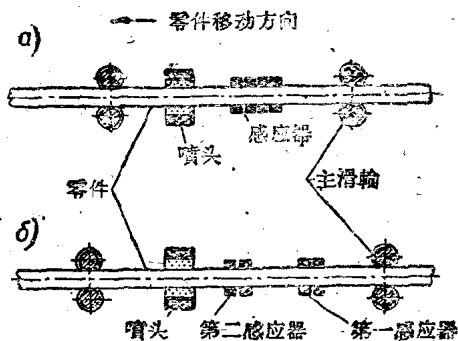


图 4 长零件利用感应加热进行穿透淬火示意图：

a) 用适当频率的电流进行穿透加热； b) 用高于适当频率的电流加热。

在許多情況下，主要是對於工具的热處理，其个别区域需要进行局部強化，在大多數情況下，工具的淬火一般是採用全部熱處理的方法。工具非工作部分具有很高的脆性，這些地方經常發生斷裂。為了避免這種現象，應該進行工作部分的局部淬火，保持非工作部分較高的韌性（正常化的）。對於刀具、鉋頭、沖子等的淬火都是這樣。許多機器零件也要求局部強化。工具端頭和推杆的端面在其余部分保持韌性的情況下要求具有高的硬度。在此種情況下，除去其他頂端加熱法外，利用感應加熱局部淬火非常合適。

滲碳零件局部淬火也具有極大的優點。經常在滲碳時僅在不大的區域上要求表面強化，在此情況下一般都用鍍銅法防止零件的其余部分滲碳。利用感應加熱進行局部淬火可省掉鍍銅工序。滲碳後或者進行高溫回火熱處理，以便改善心部的性能；如果為不重要的零件或者不再進行熱處理。要求區域的高硬度可以用對該區域進行感應加熱和局部淬火來達到。這時加熱深度應超過滲碳層深度，以使該區域的滲碳層的淬火能達到全部深度。此種熱處理對於各種汽車拖拉機零件和機床零件極為有效。

局部淬火的方法基本上和表面淬火相同。如果強化部分的尺寸不大時，則將整個強化部分置於感應器中；或者逐漸地通過感應器及冷卻裝置。如尖端部分進行局部淬火，則按照「工具的淬火」一節之「切刀和鑿子的熱處理」部分所述方法進行。

回 火

這種类型的熱處理，可以有效地用於下述兩種情況：1) 淬火零件機械加工（鉋孔、鏜槽、銑削等）部分之軟化；2) 回火時迅速加熱，以避免回火脆性效應。第一種情況下為了獲得个别區域的局部軟化而進行局部感應加熱，使溫度得到輕微可見之灼熱色。這樣可將淬火零件硬度降低至可以切削加工的程度。局部回火在許多情況下可使个别部分有螺紋的零件的加工工藝過程大大簡化。

在淬火前不應車螺紋，因為淬火前的加熱可引起螺紋根部材料氧化及破裂（由於螺槽中應力集中的緣故）。此外，淬火時螺紋可能產生