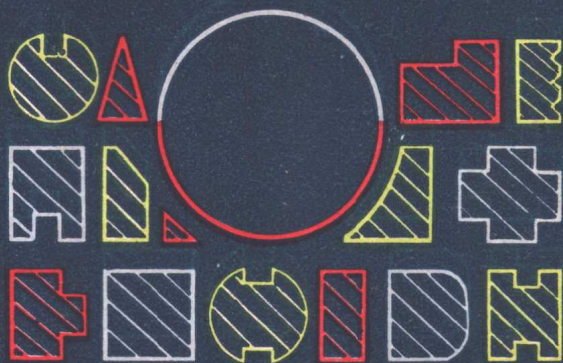


钢的热处理变形

朱利卿 编著



GANGDERECHULIBIANXIN

湖北人民出版社

钢的热处理变形

朱利辉编著

湖北人民出版社出版 湖北省新华书店发行

潜江县印刷厂印刷

787×1092毫米32开本 6.75印张 143,000字

1980年11月第1版 1980年11月第1次印刷

印数：1—1,300

统一书号：15106·236 定价：0.75元

目 录

前言	1
第一章 钢在热处理时的变形机理	3
第一节 钢在热处理时变形的几种形式	3
第二节 钢的内部组织及其性质	5
第三节 变形的四个机理	8
第四节 钢的热处理变形因素	44
第二章 减小变形的工艺措施	49
第一节 选择合理的工艺方案	49
第二节 合理地选择材料	63
第三节 选择合适的加热设备和淬火温度	72
第四节 淬火剂的特性和合理选择	83
第五节 浸入淬火剂的方向和运动方法	102
第六节 分级淬火和等温淬火	107
第七节 局部淬火	117
第八节 及时回火	121
第九节 改善原始组织	130
第十节 消除原始内应力	133
第十一节 无形变热处理	134
第十二节 稳定尺寸的热处理	140
第三章 校正工艺	142
第一节 压力校正	142
第二节 过冷奥氏体定形法	147
第三节 回火校正	151

第四节	热点校正	154
第五节	磨削校正	159
第六节	校正设备和工具	160
第四章	典型工件的热处理变形举例	164
第一节	圆环形工件的热处理变形	164
第二节	细长形工件的热处理变形	174
第三节	薄片形工件的热处理变形	184
第四节	厚薄悬殊工件的热处理变形	186
第五节	有内腔工件的热处理变形	189
第六节	采用线切割加工模具的热处理变形	197
第五章	淬火应力强化工件的探讨	206

前 言

钢制机器零件和刃模卡具以及其它工件，在热处理时发生变形和开裂，在工厂是常见的。就以还未出热处理车间就报废的工件来说，要是全国统计下来也是很惊人的。虽然有的机器零件应该经过淬火后使用，但往往害怕热处理时会发生变形，而未经处理就直接使用，这样的零件使用寿命当然很短，对国家造成的浪费也是难以估量的。还有一种使人看不见的浪费钢材的情况，就是机器零件经淬火后的应力分布有时与零件力学上的要求相矛盾，这种不合理的应力分布大大地降低了零件的抗弯曲、扭转强度和疲劳强度，增加了断裂的敏感性。它不仅缩短了使用寿命，更重要的是影响了机器(如汽车、飞机……)和人身的安全。相反，如果热处理工艺合理，选材合理，可以使淬火应力分布合理，这就有助于零件的强度。所以研究利用零件本身热处理残留应力去抵消零件在承载时的应力，这对研究高强度零件提高强度重量比，对航空事业的发展是很重要的。总之，如何解决热处理变形和开裂的问题，对国民经济和多、快、好、省地实现“四个现代化”都有重要的意义。

这本小册子，主要介绍钢在热处理时变形开裂的四个机理，并以这四个机理为指导，如何采取各种措施防止、减少工件在淬火时的变形和开裂的发生。还介绍挽救废品的办法——校正。最后，根据工件的外形、变形特点，介绍不同类型

工件的防止或减少变形和开裂的具体方法。

作者的写作目的，是想从理论到实践系统地探讨钢在热处理时的变形规律；把前人所论及到这方面的问题加以归纳整理，并参考有关资料做一些必要的试验和验证，在这个基础上提出了一些新的看法。

本书写成之后，曾得到北京邮电学院沈家光、钮以力两位老师修改，并提出宝贵意见，在此谨致谢忱。由于作者水平有限，错误缺点在所难免，请读者批评指正。

朱利卿

一九七九年九月

第一章 钢在热处理时的变形机理

在现代的机器制造中，热处理是一个不可缺少的工艺过程。尤其近代的机器制造业，随着高速动作，大马力的精密机器制造，对热处理提出了要高强度、高耐磨性、高耐热、高耐疲劳、高韧性、高稳定性等零件的要求，热处理的重要性就更加突出了。热处理的主要任务就是使钢铁机器零件获得机械性质所需要的金相组织。但事物都是一分为二的，为使机器零件通过热处理工艺手段获得所需要的金相组织的同时，却发生人们所不希望的情况。零件的热处理变形是常见的，它对我们生产高质量的零件经常发生矛盾。热处理工作者在长期的生产实践和科学实验中找到了钢在热处理时的变形原因，同时也研究了一些减少变形的办法和措施。但由于变形因素是多方面的，有时几种因素同时起作用，这就给控制变形造成困难。

下面我们来谈谈钢在热处理中的四个变形机理。

第一节 钢在热处理时变形的几种形式

钢制的机器零件、工具、量具、刃具等在热处理时经过加热、保温、冷却等过程，但在加热时，由于有慢速加热和快速加热，在冷却时也有快速冷却和慢速冷却，还有加热保温的温度高低等等的不同。在这些复杂交替的过程中，钢铁内部要发生各种性能的变化。其中有物理、化学性能的变

化；有内部金相组织(即晶体结构及其分布状况)的变化，这些变化都有可能引起工件的外形变化。

首先，工件在加热或冷却时有膨胀、缩小的性质。其次，表面和心部加热或冷却的速度不同，这个不同就能使工件膨胀和缩小出现不平衡，从而产生内部原子之间的力的作用，这个力我们叫内力(单位截面积所具有的内力称应力。因加热或冷却产生的应力称为热应力)。

最值得重视的是，工件在加热或冷却时，有金相组织的转变，简称相变。金属相变都伴有比容(就是单位重量所占的容积)的变化，也就是产生体积的变大或缩小。比如工件各部位由于温度的差距造成相变时间上的、数量上的差别而产生应力。这种应力称之为组织应力。

组织应力可以发生在加热过程，也可以发生在冷却过程。这种应力也是热处理过程中必然的现象。

上面讲的工件应力是热处理过程中产生的热应力和组织应力。产生应力的原因还有一种是机械外力作用在工件上造成的。比如对钢件进行拉伸压缩、弯曲、扭转等力的作用，这种施加到钢件的力，钢内部的原子，也产生力的传递作用，这种应力就叫机械应力。工件经过冷加工，如车、钳、铣、刨、冲压、锻打等都储藏有机应力。

工件在热处理时由于各种应力的发生和作用到工件内，就使工件发生变形。工件变形有几种表现形式，比如工件发生歪扭，弯曲，圆变椭圆，正方变长方等等，即工件发生几何形状的变化称做畸变；还有工件在热处理时发生几何尺寸的变化，即尺寸的伸长或缩短，如圆环的增大和缩小等等。只发生尺寸的变化称为形变。

畸变和形变的总称为变形。在热处理时，形变和畸变是同时发生的。但由于各种内因、外因的不同，两种变形的程度又是不同的。

工件在淬火或回火的热处理工艺过程中，有时发生开裂现象。开裂有粉碎性开裂和裂纹性开裂。开裂当然也是变形的一种形式。

第二节 钢的内部组织及其性质

钢的内部组织及其性质，对钢在热处理时的变形有很大关系，只有弄懂了钢的内部组织和性质，才能掌握钢在热处理时的变形规律。原来钢在热处理的变形，其中一个很重要的因素就是相变造成的所谓组织应力。如果我们了解了钢在热处理过程中每一阶段的相和组织结构的状态，那么，对我们采取各种措施防止变形，以及变形后的校正工作都有一定的指导意义。

现在首先把钢内在不同条件下有可能形成的相或组织谈一谈，然后再来谈谈钢在不同条件下形成的相以及数量上的分析。

铁素体：就是碳和其它元素溶解在 α -铁中的固溶体。含碳量在0.04%以下。它的机械强度和硬度较低，塑性较好；强度极限为25公斤/厘米²，延伸率为50%，断面收缩率为80%，硬度HB=80~100。它的结晶格子为体心立方晶格，即与 α -Fe相似。钢的退火状态都存在一定数量的铁素体，含碳越低的钢，铁素体量越高。亚共析钢（即含碳量低于0.8%的）有单独的铁素体晶粒存在，而共析钢（即含碳量为0.8%的）和过共析钢（碳含量大于0.8%的）则与渗碳体共析

为珠光体。

渗碳体：即铁与碳的化合物，即 Fe_3C (含碳量为 6.67%) 它的机械性能是硬而脆 $\text{HB} = 745 \sim 760$ 。结晶格子为密堆原子的正交体。渗碳体存在于钢的退火状态，碳的含量越高渗碳体量越多，所以钢的含碳量越高，其塑性就越差。

珠光体：为铁素体和渗碳体的共析混合物〔即 $\alpha\text{-Fe}(\text{c}) + \text{Fe}_3\text{c}$ 〕。碳的浓度为 0.8%，珠光体的硬度与它自己的形状有关。渗碳体在钢中有两种形状，一种为片状渗碳体的珠光体称片状珠光体，另一种为球状渗碳体叫球状珠光体。一般说来，球状珠光体的塑性比片状珠光体的塑性好。退火状态的各种钢中都存在珠光体，在共析钢和亚共析钢中，含碳量愈高其珠光体的比例愈大。

奥氏体：碳和其它合金元素溶解在 $\gamma\text{-Fe}$ 中的固溶体〔 $\gamma\text{-Fe}(\text{c})$ 〕。碳含量在 2% 以下。硬度较低 $\text{HB} 70 \sim 220$ ，塑性较好。它存在于 723℃ 以上的钢中。在淬火冷却过程中钢以过冷奥氏体状态存在，直到马氏体转变温度以下，奥氏体才能转变为马氏体。但往往还留有一部分残余奥氏体。当然，它仍然是不稳定的组织，随着条件的变化或时间延长，残余奥氏体有向马氏体转变的趋势。

索氏体：奥氏体在 600~650℃ 温度范围内转变的产物，即是铁素体和球状渗碳体的混合物。它与珠光体不同之点是分散性较大(也叫弥散度大)而且硬度较高。普通碳素钢正火和淬火后高温回火(500℃ 以上)，都可以获得索氏体。它的硬度为 $\text{HB} 270 \sim 320$ 。有一定的塑性。

屈氏体：为奥氏体在 400~550℃ 温度范围内转变的产物，即铁素体和渗碳体的混合物。比索氏体的分散性更大。

硬度更高，仍有一定的塑性。马氏体在中温回火后也可得到屈氏体。

贝氏体：为奥氏体过冷到较低的温度（450~200℃）等温分解的产物，即分散性更高的铁素体和渗碳体的混合物。有羽毛状的显微结构。硬度比屈氏体更高。塑性和韧性比马氏体好，硬度比马氏体稍低或相近。

马氏体：奥氏体在过冷度很大的情况下，过冷到一临界点（即马氏体转变点），无扩散转变的产物。实质是碳和其它合金元素在 α -Fe中的过饱和固溶体。马氏体具有很高的硬度，而且很脆，含碳量越高硬度就越高，但脆性也越大。不能经受重大的冲击作用。淬火状态的钢大都存在马氏体。马氏体晶格为正方体，正方度是由与溶解碳和其它元素的数量来决定。

碳化物，是钢中的碳与钢中的合金元素形成的化合物，如WC、TiC、VC等。它们在钢中以小颗粒存在。它们比渗碳体（Fe₃C）还要硬（Rc70~75），而且极脆，塑性非常低。合金钢（能形成碳化物元素的合金钢）的退火、淬火（指碳素钢）、回火后都有碳化物存在。在一般情况下，它的作用主要是增加钢的硬度、强度、高温强度和耐磨性以及淬透性等等。

由于各种钢号中含碳量的不同，合金元素的种类和量的不同，即使同一热处理状态，它们内部的组织状态也是不同的。就退火状态的碳素钢来说，以铁碳平衡图可以看出，随着含碳量的增加钢中的渗碳体也增加，所以高碳钢中的渗碳体比低碳钢多，低碳钢以铁素体占多数。合金元素在钢中存在两种情形，一种以碳化物的方式存在，另一种是溶解在 α -Fe中形成固溶体。它们在钢中数量上的比例取决于热处理

的温度和冷却速度。一般来说低碳钢中的合金元素是为了固溶强化，所以多以固溶体的形式存在，高碳钢中所加的合金元素多数是为了弥散硬化，所以多以碳化物的形式存在，这种情况，又以高碳高合金钢中的碳化物最多，故钢的性质硬而脆。

碳和合金元素在钢的热处理过程中，它们存在的形式变化如何控制，主要是根据我们所要求的性能为依据。但有时为了控制淬火变形的目的，而适当调整它的存在形式。如高碳钢淬火可以用高温加热使碳完全溶解在奥氏体内，淬火后就可得高饱和的马氏体。不过变形严重。所以高碳钢淬火又多采用低温加热法，以取得一部分碳以碳化铁的形式存在，这样淬火后马氏体饱和程度就要低些，因而变形和开裂的倾向性就要小些。

以上我们了解了钢内的各种组织的性质，以及它们在热处理过程中的变化过程。下面我们再谈谈如何控制热处理变形。

第三节 变形的四个机理

钢在热处理时造成变形的因素很多，外因是加热、冷却的速度、加热和冷却的均匀性，以及加热温度的高低。内因是钢内部固有的特性，如热胀冷缩，相变引起的体变，自身重力以及处理前存在的机械内应力等。通过归纳和推理，可以总结四个变形机理。所谓变形机理就是工件变形的原因、过程和结果的相互关系。

一、热胀冷缩的机理

钢铁也跟其它物体一样有热胀冷缩的特点，即在加热过

程中体积膨胀，在冷却过程中体积收缩。这是因为工件在加热时，外界给工件一定的能量(热能)，使工件内部原子增加了内能，振动更加激烈，在激烈的振动下，原子的活动范围自然扩大，因而工件的体积就比原来增大。冷却时，又正好是加热的相反过程，故体积缩小。

钢的热胀冷缩是指无相变的温度范围内的过程。在相同“相”的温度范围内，是遵循着这一规律的。但超出了这个范围，这个规律就有变化。如钢在临界点 A_{c1} 时发生相变，就不遵守这一规律。如温度上升到 A_{c1} (720°C) 时，它不但不胀大反而有突然收缩的现象，这我们留在相变与体变一节来讲。

一个工件如果各处绝对均匀地加热或冷却，一般不会产生畸变(但不是绝对的)。但要做到绝对均匀地加热或冷却是很困难的。只有在加热或冷却速度无限小的情况下才能实现。但工件在热处理过程中多半是比较快的加热和冷却，所以这是一个矛盾，正是这个矛盾，促进了热处理工艺的发展。

在热处理工艺过程中，工件的加热和冷却都是属于不均匀地加热和冷却。有时工艺本身要求快速加热或冷却以达到技术上的要求。在这种不均匀的加热和冷却情况下，工件产生畸变的情况，可做几个试验来了解热胀冷缩引起的变形规律。

1. 不均匀加热情况下的变形规律试验：试样尺寸如图 1-1 所示，把试样水平方位吊置，单面浸入盐浴炉的盐浴表面，在炉温为 1200°C 的高温下进行快速加热至 700°C (A_{c1} 以下)，取出在空气中冷却，这是一种情况。另一种情况是采用半边加热其条件与前者相同。试验结果见图 1-2、图

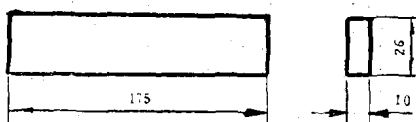


图 1—1 不均匀加热试样尺寸

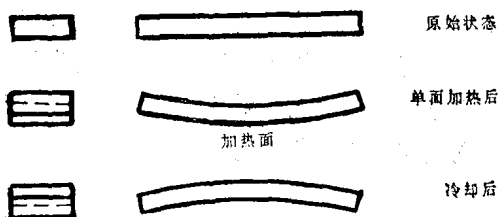


图 1—2 单面加热畸变过程

1—3。它表明加热面在加热时是工件的凸面，冷却后是工件的凹面。结果还表明单面加热的变形程度比半边加热的大。比方单面加热的变形度为 0.03 mm，而半边加热的变形度几乎测量不出来。

2. 不均匀冷却情况下的变形规律试验：试样尺寸见图 1—4，试样在箱式炉或电炉内进行慢速均匀地加热，升温至不发生相变的 A_c1 以下的 650°C 以后，从炉内取出立即进行单面或半边冷却。冷却是在 5%NaOH 水溶液中进行的。试验结果见图 1—4、图 1—5，它表明冷却面在冷却的初期是工件的凹面，冷却终了则是工件的凸面，变形度都在 0.10mm 左右。

上面讲的不均匀加热和不均匀冷却产生的变形情况。为

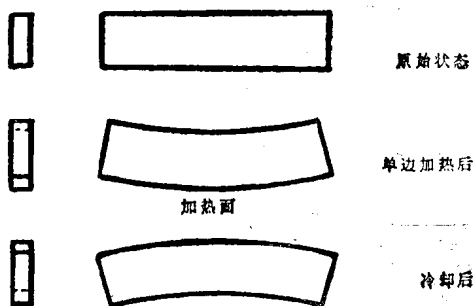


图 1—3 单边加热畸变过程

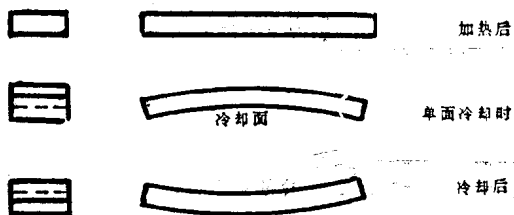


图 1—4 单面冷却畸变过程

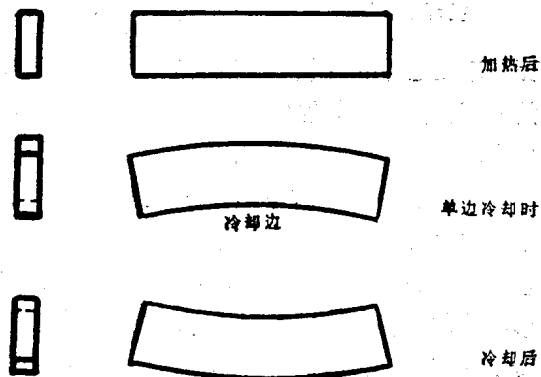


图 1—5 半边冷却畸变过程

什么会有这样的变形发展过程和结果？下面我们以单面加热为例来研究一下变形机理。

设有一长方形钢板，如图 1—6 所示，当进行单面加热时，加热面由于受热而膨胀，但受热的一面又受到冷面的牵制不允许它膨胀，因而

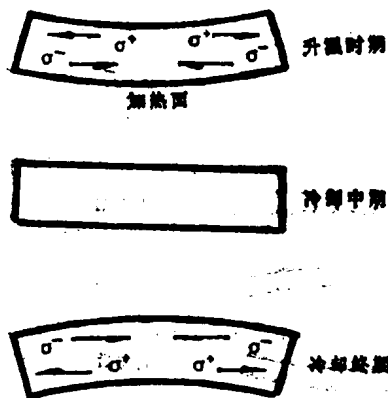


图 1—6 单面加热冷却后的变形机理示意图

处在应力状态。即加热面受压应力 σ^- ，冷面受拉应力 σ^+ 。当加热面加热到一定的高温时，如果有足够的塑性时，就要产生塑性变形，使加热面被压缩。而冷面虽然受拉应力，但由于它温度较低，不会发生大的塑性拉伸，只产生弹性拉伸。在冷却过程中期，加热面开始收缩，冷面又牵制它不允许收缩，这时应力状态发生变化，并有过零的瞬间。过零后如继续冷却时，加热面受拉应力，冷面受压应力。这时由于冷到较低的温度，钢的塑性较差，原加热面虽然受拉应力，但不能发生大的塑性变形。被拉长的量抵消不了原加热过程中被压缩的量，所以在冷却终了，原加热面被收缩成凹面。总的结果使试样弯曲成弧形。加热时形成的弧形与冷却后所形成的弧形恰好相反。加热时加热面为凸面，冷面为凹面，冷却后，加热面为凹面，冷面为凸面。

现在再来研究一下不均匀冷却，即半边快速冷却的变形

机理。见图 1—7 所示，先冷却的那半边收缩，在热边的牵制下冷边受拉应力，而热边受压应力。由于热边在高温下，塑性较好被压缩。在冷却到一定程度后，热边也开始冷却，也要发生收缩的现象，这时应力状态发生变化，先冷边为压应力，后冷边为拉应力。当然在中间有一个瞬间应力为零，如图冷却中期所示。在冷却的后期，虽然后冷边受拉应力，但由于处于较低的温度，不能产生明显的塑性拉长，不能抵消原先被压缩的数量值。先冷边无论是开始受拉还是最后受压等应力，由于温度低的原因，都不能发生明显的塑性增长和缩短。所以工件的冷却最终结果是先冷边为凸面，后冷边因开始被压缩而变为凹面。

前面我们谈了不均匀加热或冷却的变形机理，这个机理是否正确，下面我们再作一个试验。试样如图 1—8 所示。试

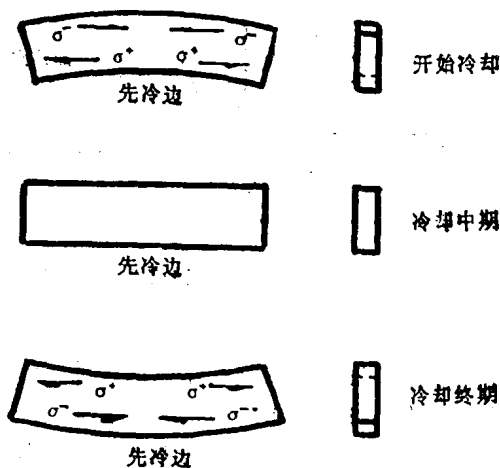


图 1—7 半边冷却变形机理示意图