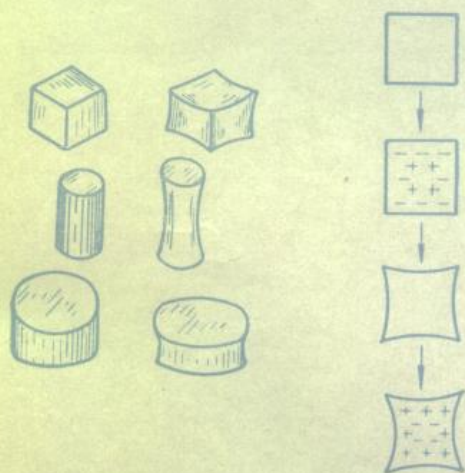


钢的热处理裂纹和变形



机械工业出版社

钢的热处理裂纹和变形

《钢的热处理裂纹和变形》编写组 编



机械工业出版社

1107198

钢件的热处理裂纹和变形是热处理工艺过程中的主要缺陷之一，如何防止开裂和减小变形是提高产品质量、延长使用寿命的一个重要关键问题。本书主要介绍钢的热处理应力；钢的热处理裂纹；钢的热处理变形；钢件热处理变形的校正工作和几种典型易变形件的热处理工艺分析等。从裂纹和变形的产生原因、影响因素、防止措施、控制变形和开裂的方法，提高到理论上进行了阐述。同时还介绍了一些生产中行之有效的减小变形和防止开裂的实例。

本书供从事热处理工作的工人、技术人员和大专院校热处理专业的师生参考。

钢的热处理裂纹和变形

《钢的热处理裂纹和变形》编写组 编

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₃₂·印张 13¹/₂·字数 298千字

1978年12月北京第一版·1978年12月北京第一次印刷

印数 00,001—47,000 定价 1.10元

*

统一书号：15033·4550

前 言

热处理工艺是使钢铁材料获得良好性能和提高产品使用寿命的重要手段之一。因此，热处理技术水平的提高，日益为人们所重视。近年来，热处理新技术、新工艺、新设备不断地涌现，在实现产品优质、高产、低成本方面，将日益发挥更大的作用。

建国以来，广大工人和工程技术人员在研究和探讨热处理裂纹和变形的产生原因、变化规律及其解决途径和防止措施等方面，积累了许多的宝贵经验。然而，在生产中，钢的热处理裂纹和变形仍是目前的关键问题之一。为了交流经验和促进这一问题的研究和解决，我们编写了《钢的热处理裂纹和变形》一书。

全书共分五部分：钢的热处理应力；钢的热处理裂纹；钢的热处理变形；钢件热处理变形的校正工作；几种典型易变形件的热处理工艺分析等。立足生产，立足国内，结合我们的一些经验体会，力求深入浅出，理论联系实际。同时对有关的新工艺、新设备、新技术也作了简要介绍。

本书的编写得到了辽宁省机械局的大力支持，并在沈阳拖拉机厂和沈阳机电学院党委的直接领导下进行的。新稿由沈阳机电学院朱荆璞和沈阳拖拉机厂马伯龙两同志执笔，沈阳拖拉机厂王友民同志参加了修改工作。在编写过程中，沈阳市技术革新展览馆和沈阳市工人文化宫协助做了大量组织工作。很多单位为本书的编写提供了宝贵的资料和意见，在此一并致谢。

我们由于水平所限，难免存在缺点和错误，请读者批评指正。

《钢的热处理裂纹和变形》编写组

一九七七·二·十八

目 录

前 言

第一章 钢的热处理应力	1
一、热处理应力的分类	2
1. 热应力	2
2. 组织应力	4
3. 附加应力	5
4. 合应力 (残余应力)	6
二、残余应力的测定	7
1. 圆柱体钢件残余应力的测定	8
2. 板形件残余应力的测定	12
三、影响钢件淬火应力的主要因素	14
1. 钢的化学成分的影响	14
2. 淬火工艺因素的影响	19
3. 钢件尺寸大小和几何形状对内应力的影响	24
4. 钢件表面脱碳的影响	27
四、钢件表面淬火时的残余应力	29
1. 高频淬火后钢的内应力	29
2. 火焰淬火后钢的内应力	36
五、化学热处理后钢件内的残余应力	38
1. 渗碳淬火后钢中的内应力	38
2. 氮化钢的内应力	40
六、淬火应力对钢件变形和裂纹的作用 以及消除内应力的方法	40
1. 淬火拉应力是形成淬火裂纹的主要危险	40
2. 回火对淬火应力的去除作用	41

3. 钢件表面淬火应力的去除	46
4. 应用回火法去除淬火应力的注意事项	47
第二章 钢件的热处理裂纹	48
一、钢件淬火裂纹的类型和特征	48
1. 纵向裂纹	48
2. 横向裂纹和弧形裂纹	50
3. 表面裂纹(或表面龟裂)	52
4. 剥离裂纹(或表面剥落)	52
二、钢件淬火裂纹的实质	56
1. 钢件淬火裂纹的实质——在内应力作用下 的脆性断裂	56
2. 影响产生淬火裂纹的两个主要方面—— 内应力和破断抗力	59
三、诸因素对钢件形成淬火裂纹的影响	61
1. 钢的化学成分对淬火裂纹敏感性的影响	61
2. 原材料缺陷对淬火时形成裂纹的影响	68
3. 钢件结构特点对形成裂纹的影响	71
4. 淬火前的原始组织和应力状态对形成裂纹的影响	81
5. 加热因素对形成裂纹的影响	87
6. 冷却因素对形成淬火裂纹的影响	91
四、防止淬火裂纹的措施	95
1. 改善钢件结构、合理选择钢材和确定技术条件	95
2. 妥善安排冷热加工工序和正确应用预先热处理	105
3. 正确选择加热介质、加热温度和保温时间	113
4. 合理选用冷却介质和冷却方法	118
5. 防止淬火裂纹的其他方法	138
6. 钢件的表面淬火裂纹形成及其防止措施	148
7. 钢件化学热处理裂纹的形成及其防止措施	155
五、淬火裂纹的补救方法	161

VI

1. 对形成裂纹钢件的处理原则	161
2. 裂纹的切除和焊补法	162
3. 裂纹的截止和嵌镶法	163
六、关于钢件热处理裂纹问题的讨论结语	164
第三章 钢的热处理变形	166
一、钢件的热处理变形概述	166
1. 翘曲变形——各种复杂应力综合作用的结果	167
2. 体积变形——相变的主导作用	169
3. 时效变形——在常温和零下温度， 时间因素对变形的影响	169
二、钢件热处理变形的一般规律	171
1. 钢件翘曲变形的一般规律	171
2. 钢件体积变形的一般规律	179
3. 钢件时效变形的一般规律	181
三、影响钢件热处理变形的因素	186
1. 钢件热处理时变形敏感性的评定	186
2. 钢材化学成分对热处理变形的影响	188
3. 淬火前的组织和应力状态对变形的影响	201
4. 钢件的几何形状对淬火变形的影响	207
5. 热处理工艺参数对变形的影响	228
6. 淬火操作因素对变形的影响	247
7. 回火、冷处理和时效过程对淬火变形的影响	248
8. 化学热处理对钢件淬火变形的影响	255
四、控制和减少钢件热处理变形的措施	261
1. 合理设计(正确处理使用性能与 热处理工艺性的关系)	262
2. 钢件毛坯进行合理锻造和预先热处理	266
3. 合理调整冷热加工工序	268
4. 采用减少变形的先进热处理工艺	271

5. 减小变形的淬火操作要点	300
6. 其他减小变形的的方法	306
7. 真空淬火	308
五、关于钢件热处理变形的讨论结语	310
第四章 钢件热处理变形的校正工作	314
一、变形的校直方法综述	315
1. 冷态校直	315
2. 热态校直	318
3. 淬火状态校直	323
4. 回火状态校直	326
二、轴(板)类零件翘曲变形的校正	328
1. 轴(板)类钢件变形校正用的设备	328
2. 钢件淬火变形的校直实例	337
三、套(环)类钢件孔径变形的校正	342
1. “缩内孔”处理	343
2. 校正椭圆的件例	344
3. 椭圆的热点校正	345
四、方(圆)类钢件体积变形的校正	346
五、形状复杂钢件歪扭变形的校正	348
第五章 几种典型易变形钢件的热处理	352
一、薄片件的热处理	352
1. 30CrMnSi 钢制阀片的热处理	353
2. 组合式片铣刀的热处理	356
3. 锯片的热处理	358
4. 齿轮的热处理	360
二、细长件的热处理	381
1. 丝杠的热处理	381
2. 细长刀具的热处理	385
3. 长板量规的热处理	395

三、精密件的热处理	396
1. 精密偶件的热处理	396
2. 精密刀具——齿轮滚刀的热处理	399
3. 几种模具的热处理及其变形分析	401
四、形状复杂件的热处理	412
1. 多孔钻模板的热处理	412
2. 形状复杂的冷冲压模的热处理	415
3. 弹簧夹头套的热处理	416
参考文献	418

第一章 钢的热处理应力

钢件热处理时，特别是淬火过程，由于截面各部分加热和冷却速度不一致而存在温度差，加之组织转变的不等时性等原因，使得钢件截面各部分的体积胀缩不均一，组织转变的不均匀以及弹塑性变形的不一致而导致热处理应力的产生。热处理应力的大小直接影响到热处理质量，例如，较高的淬火应力一旦超过钢的屈服极限和破断抗力时，就会引起钢件的变形，以致开裂。同时，热处理应力也与钢件的使用性能和寿命有着密切关系。例如，经过喷丸处理或其他表面强化处理的零件，由于表面处于压应力状态，则可以提高其疲劳寿命。所以说，热处理应力对工件质量的影响有其不利的一面，应极力减小和消除；但也有其有利一面是可以被利用的。尤其是应力对热处理变形和裂纹的影响更不能忽视。

热处理应力的产生原因较复杂，影响因素也较多。如钢材的化学成分、原始组织状态、工件的结构形状、尺寸大小以及热处理的工艺操作方法等均可能使钢件在热处理过程产生不同程度的变形、甚至裂纹。因此，在研究钢件的热处理变形与裂纹的问题时，首先要了解产生钢的热处理应力的有关问题。如热处理应力的类型、产生原因、影响因素、热处理应力对钢件热处理变形与开裂的作用以及降低和消除热处理应力的方法等。

1107198

一、热处理应力的分类

热处理应力主要可分为热应力和组织应力两种。它们在钢件内存在的状态和起的作用有所不同。由于加热或冷却不均匀所造成的钢件内应力叫做热应力；由于组织转变的不等时性所造成的内应力叫做组织应力。此外，由于钢件内部组织转变的不均匀而引起的内应力叫做附加应力。热处理后钢件的最终应力状态及大小取决于它们之和。称为合应力或残余应力。

钢件热处理变形与裂纹的产生，就是这些内应力综合作用的结果。同时，在热处理应力的作用下，有时会使钢件的某一部分处于拉应力状态（以“+”号表示），而另一部分处于压应力状态（以“-”表示），有时则使得钢件内部各部分的应力状态分布得十分复杂。为了讨论方便，下面分别叙述。

1. 热应力

如前所述，热应力是热处理过程，钢件的表面和中心或薄的地方和厚的地方之间由于加热或冷却速度的不一致（形成温度差）导致体积胀缩不均而产生的内应力。

如图 1-1 a 和 b 所示，即将钢制圆柱形试样加热到低于相变点的温度后，分别在水中和油中的冷却情况。可以看出，钢件无论在水中还是在油中冷却，其表面的冷却速度都比中心的冷速快得多。从而造成表面首先发生较大的收缩，中心收缩得较小。

加热或冷却速度愈快，钢件表面与中心的温度差则愈大，热应力亦愈大。由图 1-2 可以看出，钢件快冷时热应力的变化情况。冷却初期，由于表面冷却较快温度较低，而心部冷却较慢温度尚较高，表面激烈收缩受到心部的阻碍，从而表

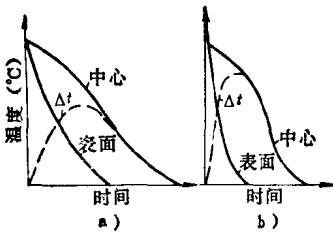


图1-1 工件表面和中心的冷却曲线

a) 缓慢冷却 b) 快速冷却

Δt —表面与中心的温差

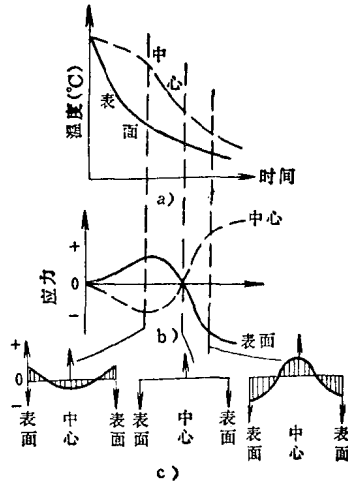


图1-2 圆柱形试样急冷时的温度和应力随时间的变化

面受拉应力作用，心部则受压应力作用。如图 1-2 c 所示。随时间的增长，冷却到最终，表层呈现压应力，心部受拉应力作用。内应力随时间变化的规律如图 1-2 b 中的曲线所示。表层和中心的应力随冷却时间的增长而达到极限值，以后又在继续冷却过程中，随着试样内外温差的减小，应力亦逐步减小到零。冷至最终则因内部冷却收缩而使表面层和中心的应力符号发生变化，即表面由拉应力转变为压应力；中心由压应力转变为拉应力。因此，热应力的作用结果最终是使钢件表面呈压应力状态。

冷却速度对热应力的影响极大。冷速愈快则热应力愈大（如图 1-3）。图 1-4 为含 0.3% C 的碳钢圆柱形试样（ $\phi 44$ 毫米），加热至 700℃ 后分别在水和油中冷却的应力分布情况。可以看出，水冷后的应力大于油冷后的应力。

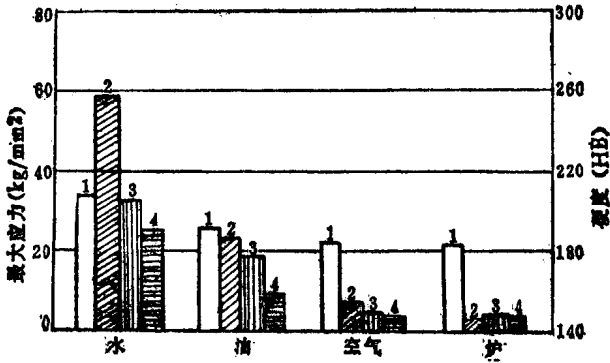


图1-3 含碳0.3%的碳钢圆柱形试样 ($\phi 50\text{ mm}$),
从650°C冷后冷速对残留应力的影响

1—硬度 2—轴向应力 3—切向应力 4—径向应力

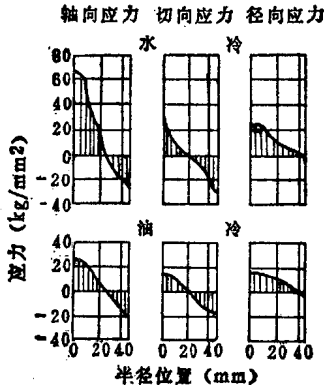


图1-4 0.3%碳钢制 $\phi 44\text{ mm}$ 试样, 从700°C
水冷和油冷时的应力分布

2. 组织应力

由于奥氏体与马氏体的比容不同, 前者小于后者。因而在淬火冷却时, 奥氏体向马氏体转变的结果必然引起体积的膨胀。组织应力就是钢在淬火冷却时, 由于表面冷却得快先

发生奥氏体向马氏体转变(膨胀), 中心或冷却较慢的部分后发生这种转变(亦膨胀), 从而造成体积变化的不等时性所产生的内应力。简单地说, 由于相变引起的比容变化的不等时性所产生的内应力叫做组织应力。

钢件整体穿透淬火时组织应力的变化情况, 如图 1-5 所示。淬火冷却过程中, 由于表面先冷却到 M_s 点以下, 表面先形成了马氏体并伴随体积膨胀。此时表面的膨胀却受到未转变的中心部分的限制。此时表面受压应力, 中心受拉应力。当继续冷却时, 中心发生奥氏体向马氏体转变(表面已转变结束, 形成强固的马氏体外壳) 伴随体积膨胀, 使表面受到一种扩张力的作用。可见, 由于组织转变的先后不同所造成的比容变化的不等时性, 使表层形成拉应力, 而中心形成压应力。因此, 组织应力最终导致钢件表层处于拉应力状态。

3. 附加应力

如前所述, 钢件热处理过程, 除能形成热应力和组织

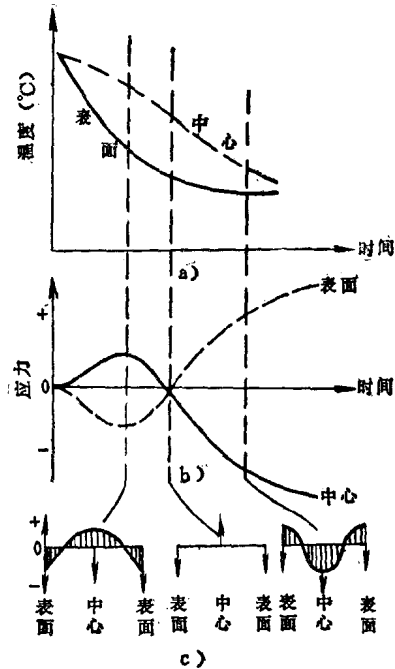


图1-5 钢制圆柱形试样急冷时的
温度和组织应力随时间的变化

力外，由于钢件表面和心部组织结构的不均匀性以及钢件内部的弹塑性变形不一致也能形成内应力。这种内应力称为附加应力。例如，钢件表面层的脱碳或增碳；表面局部强化；快速加热以及其他能导致钢件表面和心部结构组织不均的因素，均能产生热处理的附加应力。

(1) 局部淬火或表面淬火时，仅在被淬火的部分形成马氏体组织，未被淬火的部分仍是原始组织，从而造成整个工件上比容的差别。在这种情况下，由于表面层马氏体的比容大引起的膨胀受到中心部分的限制，使表面受到压应力，中心受拉应力作用。

(2) 渗碳件淬火时，由于表层含碳量高，内部含碳量低，则表层和心部的相变温度(M_s 点)不同，即表层较心部的相变温度低(因为含碳量愈高，钢的 M_s 点愈低)。因此，内部首先发生组织转变而膨胀。这时表层组织仍是奥氏体，即处于塑性状态。初期表面受拉应力的作用，心部受压应力作用。由于表层的极好塑性，在拉应力作用下易发生塑性变形而导致应力松弛，即其应力值有所减小。随后，待高碳的表层也发生马氏体转变(也相应膨胀)时，表层和中心的应力符号正好与初期相反。即表面是压应力，心部是拉应力。应当说明，最近的研究指出，由于含碳量的增加(或奥氏体中碳浓度的增加)可能引起马氏体转变量降低。最大的压应力不在渗碳层的最外层，而存在于渗碳层表面以里约50~60%的深度处。此处的碳浓度低于0.5%。因此，渗碳件表层压应力不是单纯的由于含碳量不同而导致比容差的结果^[62]。

4. 合应力(残余应力)

如前所述，热处理时只要伴随有相变过程，热应力和组织应力将同时产生。钢的最终应力状态取决于各种应力作用

之和。热处理后最终保留下来的内应力，叫做合应力或残余应力。如果合应力的符号为“+”号者，称之为残余拉应力。相反，则称之为残余压应力。

图 1-6 示出大截面钢件水中冷却时，整个截面未淬透时所呈现的应力情况。

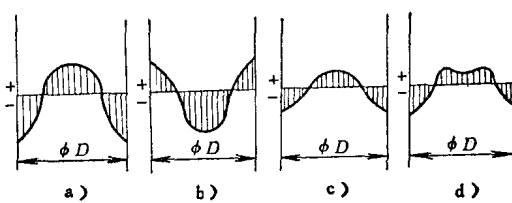


图1-6 残余应力总合示意图

a) 热应力 b) 组织应力 c) 由于组织转变不均引起的应力 d) 合应力（残余应力）

最后还应说明，影响残余应力状态、大小及其分布的因素很多，如加热温度、冷却速度、钢件尺寸、几何形状、钢的化学成分、淬透性以及淬火前的原始组织等。因此，对淬火应力的分析是比较复杂的，必须根据具体情况进行分析。实践证明，为了减小钢件淬火变形，应尽量减小热处理应力；为了避免裂纹必须预防钢件中的拉应力，即淬火过程应尽可能地减少组织应力。或增加热应力也可达到同样的目的。

二、残余应力的测定

钢件热处理时所产生的内应力对钢件的使用性能的影响、以及可能造成的变形和开裂的危险程度取决于内应力的大小和分布特点。然而，要研究热处理过程钢件内部应力的大小和分布状态，便需要掌握它的测量方法。

一般地说，测量残余应力有机械测试和物理测试两种方法。前者应用较多。但是机械测试法只适用形状简单且对称的钢件，如圆柱体、板、套、管形件等，不适用于形状复杂的钢件。然而，残余应力在很大程度上取决于零件的形状。所以，对于形状复杂的钢件测定其残余应力是比较困难的。另外，有的零件也可用X-射线方法进行测定。

我们知道，残余应力在钢件内是相对平衡的，即在任何截面上作用的应力和力距都等于零。因而，如果在具有残余应力的钢件上切去一部分，必然要使其应力状态失掉平衡。从而要引起钢件内的弹性变形或塑性变形。测得这些变形量，再经进一步计算便可以确定出残余应力值。

残余应力的机械测定法，可按如下三个步骤进行：

(1) 将具有残余应力的钢件，切去一部分或切断钢件内应力的联系（如钻孔、镗孔、车削等）；

(2) 切去后测量因破坏钢件内应力的平衡条件而引起的变形量；

(3) 根据测定的变形量，计算残余应力值。

应当指出，在进行切除时，应注意不使钢件发热和显现附加的塑性变形。淬火或淬火并低温回火后的钢，车削或镗孔是比较困难的。

1. 圆柱体钢件残余应力的测定

圆柱形钢件的内应力可由轴向应力、切应力和径向应力等三个主应力来表示（如图 1-7）。

图 1-8 所示是赛兹 (G. Sachs) 法测定残余应力时的尺寸测量简图。首先将圆柱形钢样的表面和端面进行精磨（保证其端面与外表面及轴线互相垂直）。沿着三个部位测量它的直径。将其三等分（对称的），标写记号，分别测其长度。其