

许大维 冯志军 徐慧之 编著

细长零件 热处理

机械工业出版社

2.7

细长零件热处理

许大维 冯志军 徐慧之 编著



机械工业出版社

本书为作者积30年热处理工艺实践经验编写而成的。全书系统、全面地介绍了细长零件的热处理,包括:对称、不对称形状细长轴类零件,简单与复杂板条状零件,各种丝杠(淬硬与不淬硬,滚珠,低、中碳钢,不锈、轴承钢类)的热处理。着重结合实例介绍各种热处理工艺、材料选用、操作要点,分析热处理时可能产生的各种缺陷的原因,提出其检查方法以及防止和挽救措施。

本书取材于生产实际,内容丰富,资料来源相当广泛,对现场生产具有指导意义和实用价值。

细长零件热处理

许大维 冯志军 徐慧之 编著

责任编辑:程淑华 责任校对:姜仲选

封面设计:姚毅 版式设计:张世琴

责任印制:张俊民

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许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经销

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张 $8^{1/2}$ ·字数 188 千字

1990年6月北京第一版·1990年6月北京第一次印刷

·印数 0,001—2,600·定价:5.10元

ISBN 7-111-01951-2/TG·495

前 言

细长零件是机械制造中最常见的零件之一。由于其长度远远大于其直径或横截面上的尺寸，所以在冷、热加工时困难较多：变形大，不易控制，很难达到技术要求。而细长零件的热处理就更加显得困难，变形情况错综复杂，有弯曲变形，伸长缩短变形；也有残余应力大，加工后产生变形；也有热处理后零件组织不稳定，产生时效变形。近年来，工业生产飞速发展，机械制造中遇到的细长零件的热处理问题也更加繁多，有高精度刻线尺和磁栅尺的稳定性，精密丝杠和滚珠丝杠的耐磨性、强韧性和稳定性，有长拉刀和花键轴的弯曲变形等。这些问题产生的原因，有技术要求和用料不当的，也有形状复杂的，而大部分是和热处理工艺和热处理操作有关。

本书编写的目的是针对各种类型的细长零件，结合实例介绍各种细长零件的热处理工艺、材料选用、分析缺陷与废品产生的原因、各种影响因素，提出其检查方法以及防止、减少和挽救废品的措施。

作者长期从事精密零件的热处理研究，特别是丝杠的材料和热处理，因此本书的资料都来源于生产实践。

本书可供工厂热处理工人、工程技术人员、有关专业技术人员和大专院校师生阅读。

本书编写中，得到南京工艺装备厂、北京机床研究所、上海机床厂等单位有关工程师的帮助，谨此表示谢意。由于水平所限，存在错误的地方，请批评指正。

作 者

目 录

前言

第一章 热处理的应力和变形	1
一、热应力	2
二、组织应力	5
三、残余应力	9
四、降低应力和减少变形	10
第二章 细长轴类零件的热处理	14
一、对称形状细长轴类零件的热处理	14
二、不对称形状细长轴类零件的热处理	48
第三章 细长板条形状零件的热处理	68
一、简单板条形状零件的热处理	68
二、复杂板条形状零件的热处理	78
三、高精度的板条零件的热处理	85
第四章 丝杠的热处理	92
一、概述	92
二、不淬硬丝杠的材料选用和热处理	98
三、淬硬丝杠的材料选用和热处理	143
四、不锈钢丝杠的热处理	178
五、丝杠及细长零件的化学热处理	180
第五章 滚珠丝杠的材料选用与热处理	186
一、滚珠丝杠的特点与要求	186
二、低碳钢渗碳淬硬滚珠丝杠的材料与热处理	191
三、轴承钢滚珠丝杠的材料与热处理	206
四、中碳与中碳合金钢滚珠丝杠的材料与热处理	216

五、不锈钢滚珠丝杠的材料与热处理	219
第六章 细长零件热处理的缺陷及其分析与对策	222
一、原材料问题	222
二、锻造与压力加工	233
三、预备热处理的问题	238
四、淬硬及回火、校直等处理的问题	243
五、生产制造的工艺性问题	258

第一章 热处理的应力和变形

零件热处理时，由于截面上各部分的加热或冷却速度快慢不一，产生温度差，造成零件各部分的胀缩不一；加热或冷却越快，截面上温度差就越大，胀缩所引起的体积差或长度差也越大，内应力也就越大。这种因加热或冷却产生的内应力叫热应力。此外，还有加热和冷却中产生组织变化，形成比容大小不同的组织，和组织转变的不等时性所产生的组织应力。不论是热应力或组织应力，或者是两种内应力的组合，残存于零件内部的应力一般都叫残余应力。应力越大或越不均匀，零件的变形也越大；当内应力超过零件材料的断裂强度后就会产生开裂。材料的抗拉强度远低于抗压强度，所以残余拉应力是开裂报废的主要因素。

不论是热应力还是组织应力，在圆柱形的轴类零件截面上，残余应力一般分为轴向应力（ $\sigma_{\text{轴}}$ ）、径向应力（ $\sigma_{\text{径}}$ ）和切向应力（ $\sigma_{\text{切}}$ ）三个方向的主应力，见图1-1所示。这三个主应力中以 $\sigma_{\text{轴}}$ 最具有代表性。 $\sigma_{\text{轴}}$ 与 $\sigma_{\text{切}}$ 是引起零件变形和开裂的主要应力。残余轴向拉应力用 $\sigma_{\text{轴}}$ 或 $+\sigma_{\text{轴}}$ 表示；轴向压应力用 $-\sigma_{\text{轴}}$ 表示。

不论是圆柱形轴类零件或别的其他形状的零件，零件内的某一部分如果存在有残余拉应力，其对应的另一部分就一定有残余压应力；而且两者在截面上应力值的代数和等于零，应力方向相反，应力绝对值相等。对圆柱形零件，如果表面层为拉应力，心部必定是压应力。形状不对称截面的零件，如果薄截面一侧是压应力，则厚截面一侧必定是拉应

力。使零件内达到应力值相等，方向相反，处于暂时的相对的平衡。一般情况下，内应力越大，变形和开裂的倾向也越大。

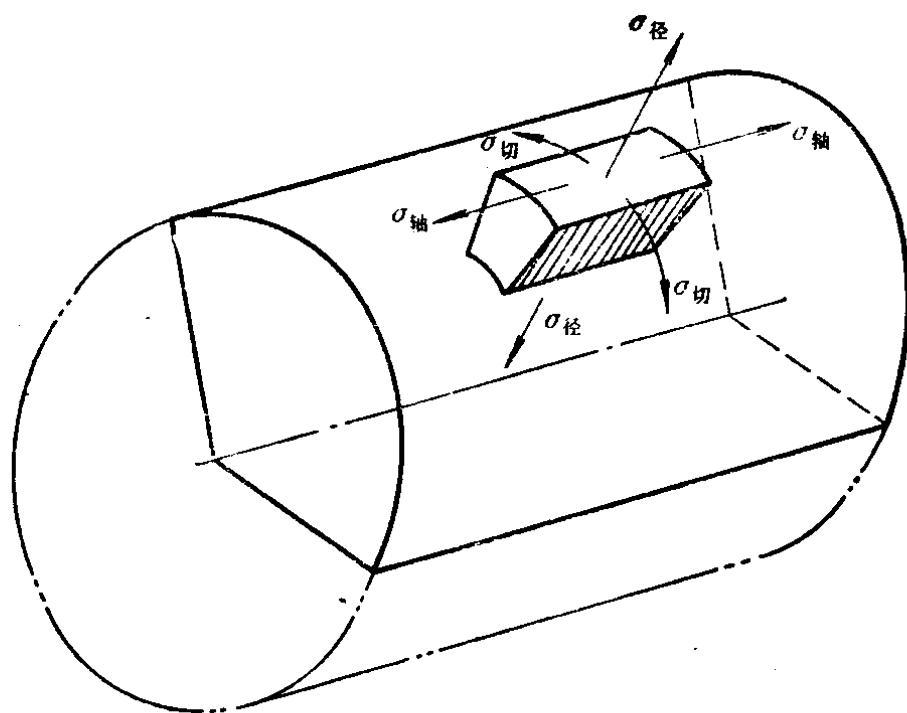


图1-1 圆柱形轴类零件截面上的主应力示意图

一、热 应 力

热应力是零件在加热或冷却过程中产生温度差所引起的，温度差越大，热应力也越大。加热时，温度差所引起的应力，往往在零件升到加热温度后会得到松弛或消除。零件在高温时塑性很好，热应力可以因塑性变形而得到松弛，逐渐消除。但是，在冷却过程中产生的热应力就不容易松弛了，冷却温度越低，材料屈服强度越高；冷却越快，应力越大。图1-2表示加热和冷却快慢与零件表面与心部瞬时温度差关系的示意图。温差越大，应力值越大，应力峰值越高，见图1-2中5。从图中的4、5两个小图可以看到，热应力

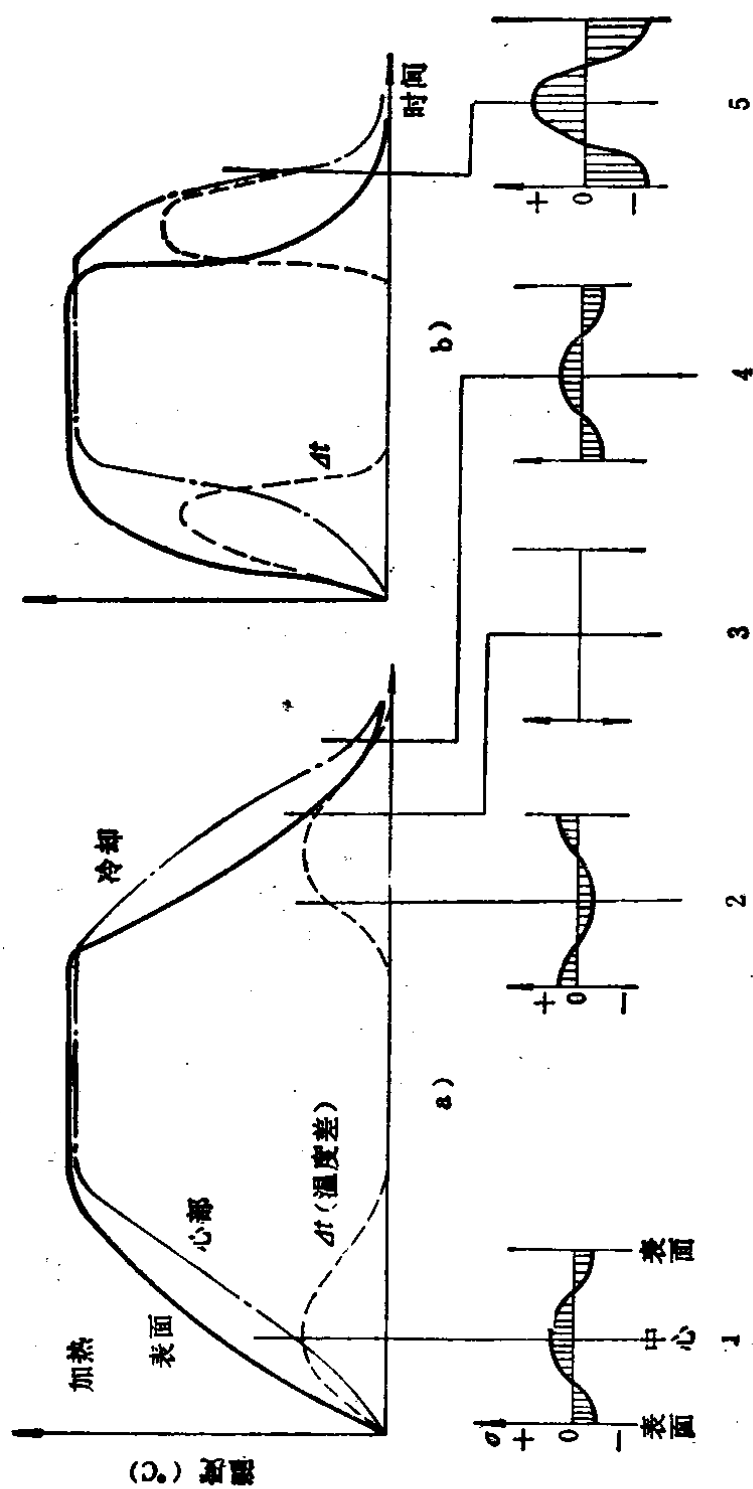


图1-2 圆柱体零件加热和冷却速度不同，表心温度差和热应力变化示意图

a) 加热冷却比较缓慢 b) 加热冷却比较快

1~5—各时期热应力示意图

最终结果为表面压应力：冷却慢的，压应力值低一些，冷却快的，表面压应力值高一些。

(一) 热应力对圆柱体形状零件的影响

1. 应力分布：在单纯的热应力作用下，冷却越快，表面压应力越大，应力峰值越高；心部为相对应的拉应力。

2. 变形情况：圆柱体形零件，一般为中段直径变粗，两端变化不大；整个长度趋向缩短。作用次数越多，变形量越大，形成腰鼓形。

钢件在 A_1 线以下加热后快冷，其结果就是这样。这就是热应力引起的尺寸变形。

(二) 热应力对厚薄不均的不对称截面形状零件的影响

1. 应力分布：厚薄不均的不对称零件，如图1-3举例所示，a为板条类零件，b为不对称截面圆柱形轴类零件，c为两块厚薄不均组合而成的弓形零件——典型的应力弓零件。这类零件的共同特点是一致的，在热应力作用下，薄的一侧冷却快先收缩；此时厚的一侧处于较高温度下，受收缩力作用，产生横向缩短或凸起的塑性变形。当薄的一侧冷却到低温后，薄壁一侧的尺寸基本固定时，厚壁的一侧开始进一步冷却收缩，同时受到薄壁一侧的阻碍而不能自由缩短。结果，厚壁一侧形成拉应力，薄壁一侧形成压应力，见示意图1-3中的c。

2. 变形情况：由于厚的一侧是拉应力，所以其变形必然是薄的一侧外凸，厚的一侧内凹。如果混入组织转变，又有组织应力影响，就要看哪个应力影响大，视作用大小如何而定。

3. 厚薄不均的不对称的铸锻件，在热应力作用下的变形倾向也是相同的。如长度较长的机床灰铸铁件床身，导轨截

面厚而宽，下部的壳壁厚度较薄。在浇铸后冷却过程中，导轨厚截面与壳壁薄截面的冷却速度不一致。薄壁冷却快，最后呈压应力；导轨冷却慢，最后呈拉应力。这就是为什么机床床身在浇铸后一定是导轨面向下凹的原因，也是机床床身在日后的长期工作使用中，导轨精度不稳定，产生中间下凹的原因。

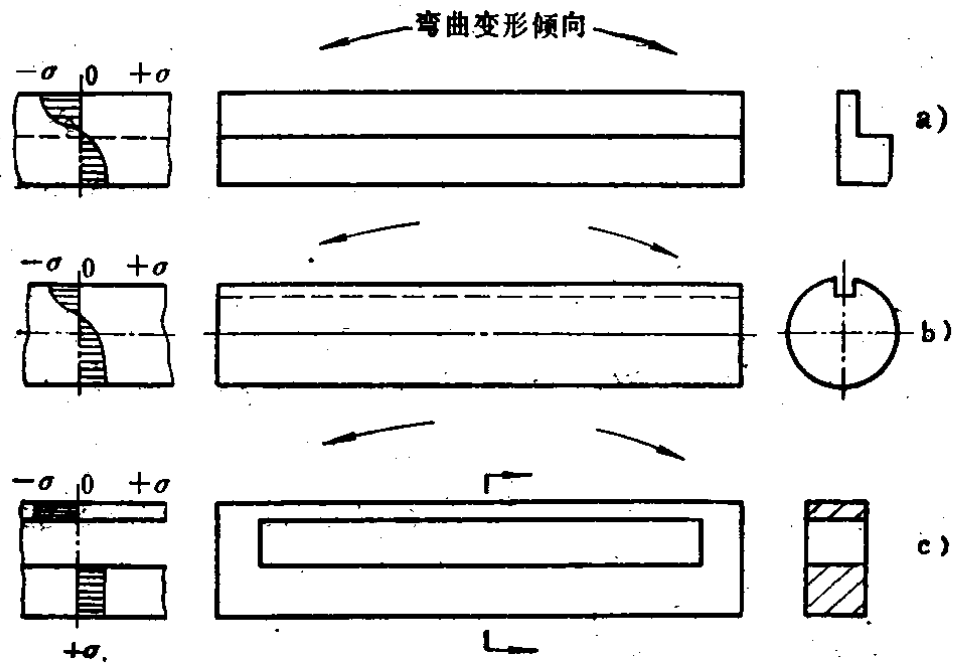


图1-3 厚薄不均的不对称零件在热应力作用下的残余应力分布及变形方向示意图

由上述可知，用任何材料制造的厚薄不均的形状不对称的零件，在单纯热应力的作用下，一定会产生上述倾向的变形和残余应力。

二、组织应力

组织应力是零件在加热和冷却过程中，因为组织转变而产生的应力。对钢铁材料讲，它的含碳量从0.02%到6.7%，

范围很大；单以钢来讲，有小于C 0.25%的低碳钢、C 0.30~0.60%的中碳钢、C 0.60~1.20%的高碳钢。如果加入其他合金元素，组织转变更加复杂。在这些钢中，最常见的组织有铁素体，有C 6.7%的渗碳体及两种混合的珠光体。加热到 A_1 线以上后转变为奥氏体，奥氏体冷却后可以转变为珠光体、贝氏体和马氏体等。这些组织都有一定的组织结构，马氏体组织的比容（单位重量的体积）大，珠光体的比容小。工件冷却时，不同部位冷却速度不同，可得到不同的组织，由于这些组织的比容不同，形成了组织应力。再加上组织转变的不等时性，加热和冷却快的部位先转变，加热和冷却慢的部位后转变，也产生一定的组织应力。淬硬后的组织为高强度、高硬度和高脆性的马氏体；未发生组织转变的奥氏体，体积小，韧性和塑性好；中温转变的组织有索氏体、屈氏体和上贝氏体、下贝氏体，还有沉淀析出的不同形态和结构的渗碳体。所有各种组织，都具有其各自独特的性能和比容。

（一）钢铁组织的结构与体积

以X射线为基础，对钢铁各种组织结构的晶格常数与晶体结构进行测定，碳素钢的各种组织结构、晶格形式、晶格常数等见表1-1所示。从表1-1可以看到，在20℃恒温下测量，低碳钢奥氏体的体积比铁素体小4.642%；从而可以知道，加热和冷却时通过 A_1 线的转变，钢的铁素体与奥氏体转变时，体积变化是非常大的。如果以钢中含C 0.8%的T8钢为例，奥氏体转变为马氏体，体积相差4.25%，见例1。

例：T8钢从奥氏体转变为马氏体，体积增加多少（引用表1-1有关数据）？

$$\begin{aligned}
 V_{\text{差}} &= \frac{V_{\text{马}} - V_{\text{奥}}}{V_{\text{奥}}} \\
 &= \frac{(0.1271 + 0.0025 \times 0.8) - (0.1212 + 0.0033 \times 0.8)}{0.1212 + 0.0033 \times 0.8} \\
 &= \frac{0.1291 - 0.12384}{0.12384} = 4.25\%
 \end{aligned}$$

表1-1 碳素钢常见组织的晶格常数与比容

组 织 (相)	20℃时的晶格常数 ($\times 10^{-10}\text{m}$)	含碳量 (%)	晶格形式	20℃时测定出的比容 cm^3/g
奥 氏 体	$a = 3.548 + 0.044(\text{C}\%)$	0~2	面心立方	$0.1212 + 0.0033(\text{C}\%)$
马 氏 体	$c = 2.861 + 0.116(\text{C}\%)$ $a = 2.861 - 0.013(\text{C}\%)$	0~2	体心正方	$0.1271 + 0.0025(\text{C}\%)$
铁 素 体	$a = 2.861$	0~0.02	体心立方	0.1271
渗 碳 体	$a = 4.516$ $b = 5.077$ $c = 6.727$	6.7 ± 0.2	斜方晶格	0.130 ± 0.001
e 渗 碳 体	$a = 2.74$ $c = 4.34$	8.5 ± 0.7	密排六方	0.140 ± 0.002
珠 光 体	$\alpha^0\text{Fe} + \text{Fe}_3\text{C}$	0~2	混 合 相	$0.1271 + 0.0005(\text{C}\%)$
低碳马氏体 + e 渗碳体	$\text{M} + \text{eFe}_3\text{C}$	0~2	混 合 相	$0.1277 + 0.0015(\text{C}\% - 0.25)$
铁素体 + e 渗 碳体(贝氏体)	$\alpha^0\text{Fe} + \text{eFe}_3\text{C}$	0~2	混 合 相	$0.1271 + 0.0015(\text{C}\%)$
石 墨	$a = 2.46$ $c = 6.69$	100	六 角 形	0.451

如果以T8钢原始组织100%转变为马氏体考虑, C0.8%珠光体的体积是: $0.1271 + 0.0005 \times 0.8 = 0.1275 \text{cm}^3/\text{g}$; 淬

火后假定全部转变为马氏体，其体积是 $0.1291\text{cm}^3/\text{g}$ ，比珠光体增大 1.255% 。以上各种组织的转变，必然造成尺寸变形和内应力增加；再加上实际零件在淬火过程中的冷却时间很短，冷却有先有后；组织转变也有先有后，转变的不等时性造成组织应力和尺寸变化的复杂性。淬火后，形成表面拉应力的，容易产生开裂，增加了发生裂纹的倾向；表面产生压应力的，对减少开裂有利。热处理工作者要充分了解和掌握不同钢号、不同形状的零件，在不同的热处理操作下的组织转变和体积变化，以减少废品提高质量。

(二) 组织转变与尺寸变化

从表1-1可以知道，钢的各种常见组织的比容都不一样。所以，当组织发生转变时，体积也必然发生变化。球状珠光体——铁素体+渗碳体的混合相，加热转变为奥氏体，奥氏体冷却变为马氏体、下贝氏体、上贝氏体，或者珠光体类型的组织——索氏体、屈氏体，都必然产生不同程度的尺寸变化。以最常见的碳素工具钢为例，其各种组织转变的结果所产生的尺寸变化参考值见表1-2。取表中的参数举例： $C0.8\%$ 的T8钢共析球状珠光体，如果 100% 地转变为马氏体，其单位尺寸增加量 $\Delta l = 0.0056 \times 0.8 = 0.00448\text{mm}/\text{mm}$ 。亦即表示， 1000mm 长的零件可伸长 4.48mm 。实际生产中的情况并不完全相同。在实际生产中，为了减少开裂与变形，减少热应力，奥氏体化的加热温度一般偏低一些。因此，在奥氏体化加热时，球状珠光体一般都不是 100% 地转变为奥氏体。在淬火冷却时，也不可能全部转变为马氏体，部分可能转变为贝氏体或珠光体型组织，也可能残留部分未转变的奥氏体。所以，其尺寸变化量一般都小于用表1-2所计算得到的数值。这中间，尚有由于工件实际直径的不同所引起的差异，表面冷

却快,转变量比较多一些;心部冷却慢,转变量就要少一些。再加上热应力的作用,尺寸变化与应力变化一样,也是错综复杂的。表1-2列出各种转变所产生的尺寸变化值,我们应注意其倾向,即体积变化量越大,其组织转变后的应力也一定越大,开裂与变形的倾向也越大。

表1-2 碳素工具钢组织转变时的尺寸变化

组织转变的反应	体积变化 (%)	尺寸变化 (mm/mm)
球状珠光体→奥氏体	$-4.64+2.21 (C\%)$	$-0.0155+0.0074 (C\%)$
奥氏体→马氏体	$4.64-0.53 (C\%)$	$0.0155-0.0018 (C\%)$
球状珠光体→马氏体	$1.62 (C\%)$	$0.0056 (C\%)$
奥氏体→下贝氏体	$4.64-1.43 (C\%)$	$0.0155-0.0048 (C\%)$
球状珠光体→下贝氏体	$0.78 (C\%)$	$0.0026 (C\%)$
奥氏体→上贝氏体	$4.64-2.21 (C\%)$	$0.0155-0.0074 (C\%)$
球状珠光体→上贝氏体	0	0

三、残余应力

铸件、锻件和热处理件中存在内应力,冷作件、冷挤压、冷冲拉件以及机械加工件也或多或少地存在内应力。凡是存在于工件内部的各种应力,统称残余应力。它可能是铸钢件或铸铁件在铸造冷却过程中所形成的热应力;也可能是热处理件在淬火冷却时的热应力和淬硬后获得马氏体等组织变化的组织应力;还可能是机械零件在切削加工时在金属零件表面的切削、剪断、撕拉、挤压等而造成的表面切削应力和磨削应力。在切削和磨削时,也可能产生组织变化,淬硬件因磨削发热而产生磨退火和磨回火,甚至产生磨削发热到 A_{c1} 或 A_{c3} 以上,在冷却剂的冲刷冷却下,发生磨淬火硬化。

还有金属材料因为冷作硬化和局部弹塑性变形而产生的附加应力等等。这些应力都是残余应力。在各个加工工序进行中，会加重或减轻工件内的残余应力，会破坏工件内残余应力的相对平衡，引起后续加工工序中的不同程度的变形。残余应力存在于热处理工件中，可增加淬火以及其他各种热处理过程时的变形、开裂倾向。残余应力可增加机械加工过程中的变形。残余应力可使产品中零件因为应力松弛和组织趋向稳定化而在工作服役期中产生时效变形。

细长零件的形状条件决定了它是最容易变形的零件，是热处理变形最难控制的零件种类之一，因此要认真对待，积累经验。

四、降低应力和减少变形

不论是热应力还是组织应力，或者是两种应力的综合，还有各种加工应力，冷、热塑性变形产生的应力，以及各种微观或宏观的应力，残留于工件内部都会引起变形，甚至引起开裂。为了减少工件变形，必须采用各种不同工艺方法，降低工件的残余应力。一般讲，残余应力越低，工件的变形就越小；残余应力越对称、越平衡，工件的翘曲变形也越小；工件热处理后组织越稳定，服役期间的组织变化越小，工件内的应力变化越小，服役期的变形也就越小。热处理工艺的目的，就是用最小的代价，用最简单的工艺方法、最短的工艺时间，达到零件的技术要求。热处理工艺方法必须是恰当的，不允许采用过高的工艺代价来保证工件的某项技术要求。

最常用的降低残余应力和减少零件变形的工艺方法，主要是采用各种热处理工艺方法，以达到稳定组织，减少变

形。对细长零件，常用的工艺方法有下面所述的一些，简要地介绍分析如下。

(一) 改善组织、降低内应力、减少变形、改变机械性能的工艺

1. 退火：退火是降低残余应力和减少变形最常用的工艺方法。退火适用于铸钢件、锻件、热轧加工件的毛坯处理。一般零件只要安放平稳就可以了，对于细长零件，应该垂直吊挂。对于中碳或中碳合金钢，采用在 $A_{c_3}+30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 下保温后缓慢冷却，可降低硬度，消除残余内应力。对高碳工具钢或合金工具钢，采用在 A_{c_1} 和 A_{c_m} 之间加热、随炉缓冷的不完全退火。如果高碳钢中的碳化物网状严重，可采用 $930\sim 950^{\circ}\text{C}$ ，按工件的大小保温 $3\sim 6\text{ h}$ 后，快冷正火，甚至油冷淬火，以消除碳化物网状组织，使球化退火后获得弥散均匀、球化良好的球状珠光体。对于莱氏体钢和高合金工具钢，固溶和弥散碳化物网状组织的加热温度就要更高一些。一般加热到 1000°C 以上，也很难获得良好的均匀的组织。最有效的办法应该是，进行必要的热塑性变形，以粉碎和均匀化粗大的碳化物网状组织。常用办法是加热到 $1100\sim 1180^{\circ}\text{C}$ 透烧后，进行镦粗、拔长反复交替的热塑性变形，一般镦、拔 $3\sim 5$ 次，可获得相当良好的金相组织。高速钢刀具或高碳高铬工模具，采用镦拔锻造后，可获得良好的组织和大大提高刀具和工模具寿命。

2. 正火：对于中碳钢、低合金中碳钢，为了改善组织，降低残余应力；可以采用 $A_{c_3}+30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 保温后在空气中冷却的正火处理。正火，操作方便，时间短，效率高，是值得推广的预先热处理工艺。正火也是改善铁素体带状分布和碳化物网状组织的比较有效的工艺方法。但正火是在空气中冷