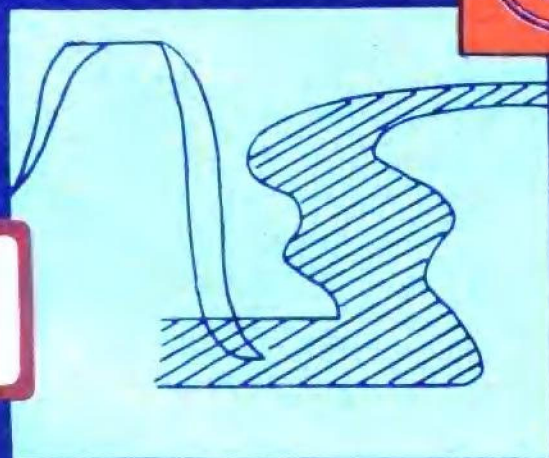
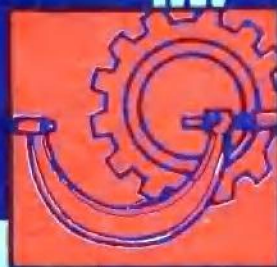


常见零件 热处理变形 与控制

朱培瑜 编著



机械工业出版社

常见零件热处理变形与控制

朱培瑜 编著



机械工业出版社

本书是作者从事热处理技术工作30多年所积累的大量试验数据和实际经验的总结。全书共分8章。第一章简要介绍了热处理变形的基本概念；第二章简要分析了热处理变形的原因；第三章至第六章，分别以不同类型钢材的套类、齿轮、轴类零件试样或实例，详细讨论了进行常规热处理、表面淬火、渗碳和渗氮等不同热处理工艺后零件的变形情况、变形规律及其控制方法；第七章介绍了影响零件热处理变形的其他因素；第八章总的介绍了预防和控制热处理变形的方法和措施。本书的特点是实用数据多、实际例子多、实用性强。全书共有插图278幅，表格124个，实例112个。

本书由中国热处理协会常务理事、上海市热处理协会副理事长兼秘书长、高级工程师朱培瑜编著。由北京第一机床厂高级工程师丁仲元审稿。

常见零件热处理变形与控制

朱培瑜 编著

*

责任编辑：崔世荣 版式设计：吴静霞

封面设计：郭景云 责任校对：熊天荣

责任印制：王国光

*

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 11¹/₈·字数 246 千字

1990年12月北京第一版·1990年12月北京第一次印刷

印数 0,001—3,750·定价：7.10元

*

ISBN 7-111-02092-8/TG·537

前 言

机械零件和工模具在淬火后进行质量检查时，除了因为开裂而报废外，还往往出现硬度虽然合格，但是由于变形超差，而且是不可挽救了，因而也不得不报废。特别是随着我国机械产品的更新换代和采用国际标准后，对机械的精度要求越来越高，因而对零件的热处理变形要求也越来越严格，这已成为许多企业生产中的关键问题。

本书编入了作者从事热处理技术工作30余年中，从生产中搜集的大量典型零件的各种常规热处理后的变形数据和从大量的试验研究工作中所总结出的减小与控制热处理变形的规律和经验，并参考了国内外有关的文献资料，经综合整理而成。书中所讨论的虽然主要是机床零件的热处理变形问题，但是其变形规律、控制方法和补救措施等同样也适用于其他产品的零件。

热处理变形问题是很复杂的，单纯依靠热处理手段是难以全部解决的。但是，我们可以采用多种方法，互相配合，解决这个难题是完全可能的。为此，书中还介绍了改进零件设计、选择最佳原材料、采用新的机械加工工艺等方法，并列举了一些实例。

本书可供热处理工作者参考，也可供机械设计和机械加工工艺人员参考。本书如能在四化建设中，为提高机电产品质量、减少热处理废品损失起到一点微薄的作用，将是作者的最大欣慰。

还应特别说明,在本书的资料搜集过程中,曾得到上海机床厂的王鸿生、严瑞贞、吴健耕、钱模豪、杨期敦工程师,以及曾在该厂毕业实习的上海交通大学、北京钢铁学院、北京机械学院、浙江大学和上海市机电工业专科学校第三分校的师生们的大力支持,做了大量的试验和测试工作,为本书提供了大量试验数据;在本书的编写过程中,还曾得到了朱毓英、包善明、周美芳、袁公博工程师,以及徐香珠、孙绍彬、王维翰、唐鼎亚、唐明我等同志的帮助,在此仅向以上各位同志表示衷心地感谢。

朱培瑜

于上海市热处理协会

1987年10月

目 录

前言

第一章	热处理变形的基本概念	1
第一节	什么叫热处理变形	1
第二节	热处理变形的种类	2
第三节	零件中的内应力与热处理变形	4
第二章	热处理变形的原因分析	8
第一节	热应力引起的变形	8
第二节	组织应力引起的变形	16
第三节	热应力和组织应力共同作用引起的变形	25
第三章	套类零件的热处理变形	31
第一节	低碳钢套类零件的热处理变形	31
第二节	低碳合金钢套类零件的热处理变形	44
第三节	中碳钢套类零件的热处理变形	51
第四节	中碳低合金钢套类零件的热处理变形	90
第五节	高碳钢套类零件的热处理变形	109
第六节	高合金钢套类零件的热处理变形	122
第四章	套类、齿轮、轴类零件的表面淬火变形	132
第一节	表面淬火方法概述	132
第二节	零件表面淬火后的变形	138
第五章	轴类零件的渗氮处理变形	159
第一节	轴类零件渗氮概述	159
第二节	影响轴类零件渗氮变形的因素	162
第三节	轴类零件的渗氮变形试验与变形实例	167
第四节	轴类零件渗氮变形规律及控制变形的措施	175
第六章	轴类零件的常规热处理变形	177
第一节	轴类零件热处理变形的一般概念	177
第二节	轴类零件的热处理变形	180
第三节	低碳钢和低碳合金钢带键槽轴的淬火变形试验	189

VI

第四节	中碳钢和中碳合金钢轴类零件淬火变形试验	198
第五节	高碳钢和高合金钢轴类零件淬火变形试验	222
第七章	影响零件热处理变形的其他因素	229
第一节	钢的淬透性对零件变形的影响	230
第二节	钢的含碳量对零件变形的影响	234
第三节	钢中合金元素对零件变形的影响	237
第四节	零件截面尺寸对零件变形的影响	238
第五节	冷却速度对零件变形的影响	243
第六节	淬火温度对零件变形的影响	247
第七节	回火温度对零件变形的影响	250
第八节	残余应力对零件变形的影响	253
第九节	钢的原始组织对零件变形的影响	255
第十节	钢的纤维方向对零件变形的影响	256
第十一节	淬火操作对零件变形的影响	259
第十二节	其他因素对零件变形的影响	260
第八章	预防和控制热处理变形的方法及措施	265
第一节	改进设计	265
第二节	改进工艺	278
第三节	减小和消除毛坯锻造及机械加工残余应力	282
第四节	减小热应力	287
第五节	改变工艺	305
第六节	改进操作	311
第七节	采用新工艺	322
第八节	采用新材料	331
第九节	零件淬火变形后的加工和修正	335
第十节	加强工艺管理	341
附录	不同钢材套类零件的预留余量	345
参考文献		347

第一章 热处理变形 的基本概念

在机械制造工艺中，热处理是提高零件和工、模具内在质量，延长其使用寿命的重要手段。

在生产现场，检查零件的热处理质量的主要依据是硬度和金相组织，化学热处理有时还需要检查渗层深度。一般来说，硬度符合要求，没有氧化、脱碳、裂纹、碰伤、拉毛和锈蚀，就是合格件。但是实际上往往还有不少零件，虽然在热处理车间时，上述各项检查是合格的，而送到加工车间后，却由于外形变形超差，无法加工到图样要求的公差范围。例如，有的工、模具，由于型腔尺寸已超出了形位公差和几何精度要求，不得不报废，造成先前各道工序的人力物力的损失。这是由于热处理变形造成的。因此，零件的精度要求愈高，控制热处理变形愈重要。

第一节 什么叫热处理变形

所谓热处理变形，是指零件在热处理后其变形量超过了图样公差要求的一种物理现象。它是一种热处理缺陷。

零件在热处理过程中，造成变形的因素是很多的。例如，零件的毛坯如果经过锻造，就有锻造应力产生；锻坯在退火时，如果操作不当（例如装炉过多，炉温不均匀），就会使锻造应力得不到完全的消除；还有热处理之前的切削加工，也会使零件产生加工应力；再加上零件在热处理时，在加热、

冷却过程中所产生的热应力和组织应力等，都是造成热处理变形的因素。问题是热处理后的变形量是否超差。如果产生了变形，但却是在图样公差范围内，仍然可以继续加工到尺寸要求，我们可以不“认为”它产生了变形。例如，一根短轴的毛坯，尺寸为 $\phi 50 \times 450\text{mm}$ ，在调质处理后，弯曲了 1.5mm ，但其加工余量每边为 2mm ，仍然可以继续加工，因此我们就不“认为”这根轴是变形的。由于不存在质量问题，自然是合格品。但是实际上它是变了形的。又如，另外一根轴，在淬火前，外圆预留余量为 $0.30 \sim 0.40\text{mm}$ 。淬火后弯曲了 0.25mm （振摆 0.50mm ）。这样，虽然它的绝对弯曲变形量比前一根轴小得多，但是由于已不可能加工到要求尺寸了，因而就成了废品。如果能将其变形量校直到 0.20mm （振摆），并允许校直后再磨出，它仍然是合格品。

第二节 热处理变形的种类

热处理变形的种类主要有 3 种：

1. 外形变形 这是由于复杂应力综合作用的结果。例如，丝杆类细长零件的弯曲；导轨类不等截面零件的扭曲，板状剪刀片类零件的翘曲，以及大直径薄壁套环类零件端面翘曲等。这类变形是比较明显的，也是比较容易判断的，很容易目测。测量变形量时，可将零件放在平板上，用千分垫法测量，或放在顶尖架上，用千分表测量。零件热处理前后的外形变形见图1-1。

2. 体积变形，这是由于组织转变引起的，例如，模块尺寸的胀大或缩小；圆柱形等截面零件的轴向伸长、缩短等。这类变形量一般是比较小的，目测难以发现零件热处理前后的体积变形，见图1-2。

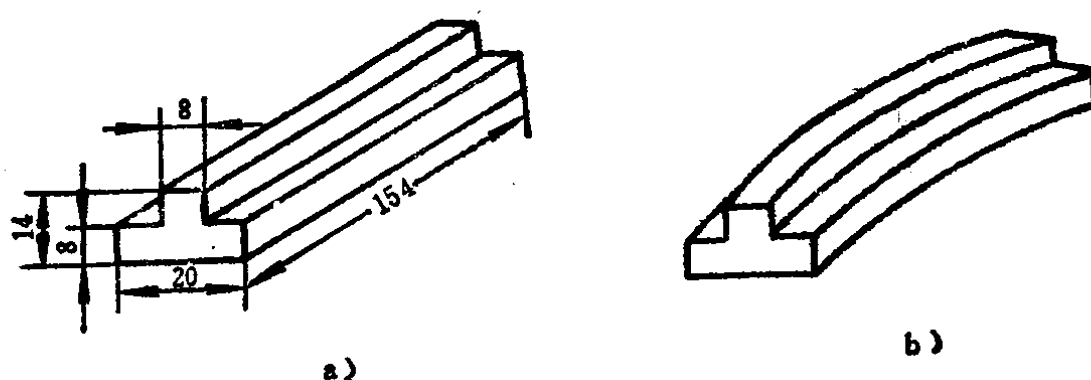


图1-1 零件热处理前后的外形变形情况

a) 热处理前 b) 热处理后

零件热处理后的外形变形和体积变形可能是同时发生的，也可能是单独发生的，但是一般来说两者是同时发生的。

3. 微小变形

这是由于随着时间的推移，组织状态改变或应力松弛引起的。这种变形主要发生在经过淬火、冰冷处理、低温回火和磨加工后

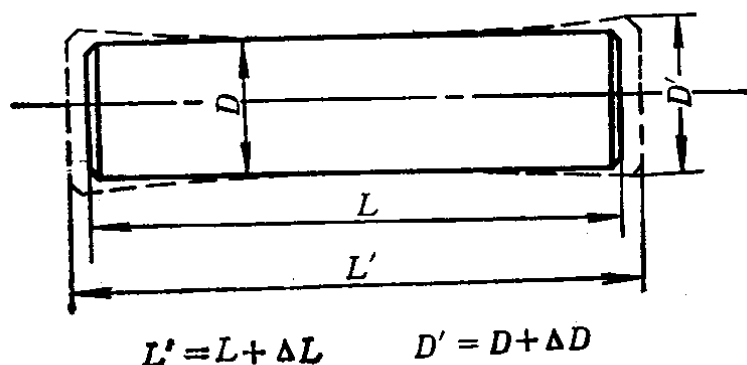


图1-2 零件热处理前后的体积变形情况

——处理前 ----处理后

的高硬度精密量具（例如0～1级的块规）及高精度零件（例如磨床的丝杆、齿轮磨床的渐开线样板）等上，变形量极其微小。例如，由CrWMn钢制成的高精度螺纹磨床丝杆，螺纹精度误差、相邻误差和累积误差都在 $2\mu\text{m}$ 以内，因此丝杆长度的一些微小变形（一般呈膨胀或伸长），也会给机床的精度带来一定影响。又如，渗碳或高频淬火后的齿

轮齿形表面形状的变化（公法线长度和齿厚），是造成啮合传动时的噪声源，而且齿轮的传动功率愈大，转速愈高，噪声也愈大。此外，由于啮合不良，齿面负荷不均匀，齿轮使用寿命也受到影

第三节 零件中的内应力与热处理变形

1. 内应力的影响 一般来说，变形是由内应力引起的。显示应力在零件中的存在是不容易的。然而，细长零件在调质处理后，经过校直、大进给量切削加工以及预先热处理操作不当（例如退火后在温度不均匀的场合下快速冷却等），就会产生应力，并在零件的表面上达到最大值。图 1-3 是一根经过校直的轴中应力的分布示意图。在冷态，所有应力的总

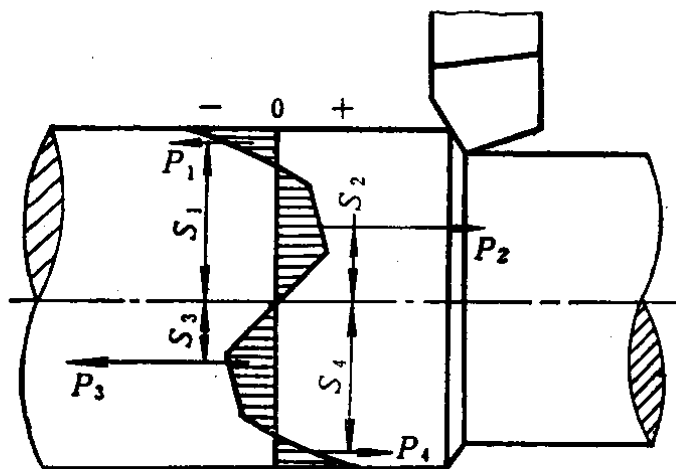


图1-3 经过校直的轴中应力的分布情况

和应等于零，因此存在于应力的各层间的扭矩的总和也为零。但是，当再进行加热时，不论是整体加热或局部加热，当加热到塑性状态后，轴将会弯曲，自行恢复到校直前的状态，以使应力平衡。

上海机床厂为解决 $\phi 75 \times 1800\text{mm}$ 镗床主轴的热处理变形问题，曾进行了大量的工艺试验。例如，采用 40CrMo 钢全部加热油冷，弯曲变形最高可达 20mm，最少也有 2mm。即使采用变形最小的火焰表面淬火法处理，材料改用 T8Mn

钢也不能完全避免变形问题。实践证明，经过校直的长轴，除非在机械加工后和表面淬火前，对零件进行一次良好的消除应力处理，使应力消除掉。否则，要避免或减小热处理后的变形是不可能的。

在轴类零件中，只要应力分布均匀对称，在车削加工或表面淬火时，一般只有轴向长度上的微量变化（伸长或缩短），在径向不会弯曲。但是，如果应力分布不均匀，例如调质处理过的轴，经过校直而未经消除应力处理，则在车削加工时使应力诱发，致使轴再度发生弯曲。如果校直后再淬火，则犹如“组织遗传”一样，一经加热就会发生变形弯曲到原来的形状，即使采用正常情况下变形最小的工艺来进行表面淬火或渗氮，也不例外。

2. 内应力的消除 零件中的内应力可以通过消除应力处理来消除。即把零件加热到 550°C 左右，保持一定时间，这时材料在塑性状态下，应力使零件“复苏”而变形，从而应力也基本上得到消除（处于新的平衡状态）。消除应力处理温度愈高，材料塑性愈好，消除应力效果也愈好。

消除应力处理时，应该注意消除应力处理的后期阶段必须均匀地冷却到 250°C 以下，否则仍有可能产生新的应力，因此最好是随炉缓冷。

应力的平衡，取决于材料的塑性，也就是热态的强度。因此，材料屈服强度较高的零件，消除应力处理温度应高些。例如，45钢的消除应力处理温度应为 550°C ，38CrMoAl钢在调质及加工后的消除应力处理温度应为 600°C 。消除应力处理温度在 500°C 以下时，实际上是没有效果的。因为在 400°C 左右时，材料还处于弹性状态，不能产生塑性变形，所以应力得不到消除。

不均匀的冷却，对产生应力影响最大。例如，一根直径为100mm、长为2000mm的轴，如果在加热后冷却不均匀，当两面的温差为30℃时，将产生4000N/mm²的应力。此外，在零件平放时，由于零件自身重量的影响，也会产生新的应力。例如，同样的轴，支点距离为2000mm时，由于零件的自重而产生的弯曲应力将达到3200N/mm²。

经过消除应力处理的零件若还存在弯曲怎么办？如果弯曲量不可能在机械加工中消除，而必须进行校直的话，则必须在校直后再进行一次消除应力处理。为了避免这种情况的出现，有经验的校直者在第一次校直时往往予以“矫枉过正”，使其向反方向弯曲，这样在消除应力处理后平直度就将恰到好处，不再需要校直了。

国外最新资料对消除应力处理的效果是否有效？是否有必要？提出了不同的看法。笔者认为，消除应力处理对于减小变形，特别是对于减小细长零件渗氮后的变形是必不可少的。至于能否应用振动时效来消除应力，在铸铁件上已做过试验，其效果也是不错的。但能否去除校直应力，还有待于进一步试验确定。

3. 内应力的计算 当零件中的内应力超过了材料的弹性极限时，将使零件产生塑性变形。为了说明淬火时所产生的应力将超过材料弹性极限，可通过下述例子的计算来验证。

已知材料膨胀系数 $\alpha = 11.5 \times 10^{-6} \text{mm}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C})$ ；弹性模量 $E = 205800 \text{N}/\text{mm}^2$ ；泊松比 $\mu = 0.3$ ；淬火加热温度 $T_1 = 830^\circ\text{C}$ ；冷却后温度 $T_2 = 180^\circ\text{C}$ 。

当零件快速冷却时，由热胀到冷缩状态的应力 F 为：

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{\alpha E}{1 - \mu} (T_1 - T_2) \\
 &= \frac{11.5 \times 10^{-6} \times 205800}{1 - 0.3} (830 - 180) \\
 &= 2197 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

常用钢号的弹性极限均小于此值，也就是说，这种淬火应力是远远大于弹性极限的。这也说明既要淬火，就必须在加热后快速冷却，内应力也就伴随产生，要求淬火而不产生淬火应力，是不可能的。

4. 热处理内应力的组成 零件由高温（830℃）到低温（180℃），即由热胀的状态迅速冷却到冷缩的状态时所产生的内应力，我们称之为热应力。热应力是大于零件材料的弹性极限的，因此零件变形是难以避免的。

实际上，造成零件变形的热处理内应力还有组织应力。所谓组织应力，是在淬火冷却过程中，零件从奥氏体转变为马氏体，由于二者比容是不同的，即奥氏体比容小，马氏体比容大，这样在组织转变时，在同一个零件上，体积先后膨胀，这种由于组织转变引起的比容变化，以及组织转变的不等时性所造成的应力，我们称之为组织应力。

由此可见，导致热处理变形的内应力是热应力和组织应力共同作用形成的复合应力。严格地说，除了热应力和组织应力的影响外，还有一些其它因素，例如操作中的零件吊挂、装炉不当、冷却时的碰撞以及产品设计、选材和工艺参数等，这些因素均有可能对热处理变形产生影响，我们将在后面加以讨论。

第二章 热处理变形的原因分析

零件加热到淬火温度时，屈服强度明显降低，塑性则大为提高。当应力超过屈服强度时，就会产生塑性变形，也就是永久变形。如果应力集中到零件的某一部位，并超过了材料的抗拉强度，就会造成零件的淬裂。也就是说，在某些情况下，变形往往是淬裂的前奏。

第一节 热应力引起的变形

1. 加热时产生的热应力引起的变形 当零件浸入盐浴炉加热时，零件的表面立即受热而膨胀，加热的温度愈高，材料的线膨胀系数愈大，则膨胀量也愈多。

现以图 2-1 圆柱试样在加热时的变形为例。当刚开始加热时，试样表层加热快，受热膨胀，使长度伸长；此时心部因加热慢、温度低，所以伸长较少。试样表层受到内层的约束，受压应力；而心部受到表层拉长的影响，受拉应力，见图 2-1 τ_1 。

继续升温时，试样表层和心部的温差进一步扩大，表层压应力增加，心部拉应力也增加，见图 2-1 τ_2 。

再继续升温，由于表层的塑性提高，则屈服强度下降。当应力值大到足以产生塑性变形时，因表层温度高于心部，首先产生塑性变形，这就造成了热应力反向，即表层受到拉应力，而心部则受到压应力，心部受热膨胀后的长度超过了表层，见图 2-1 τ_3 。

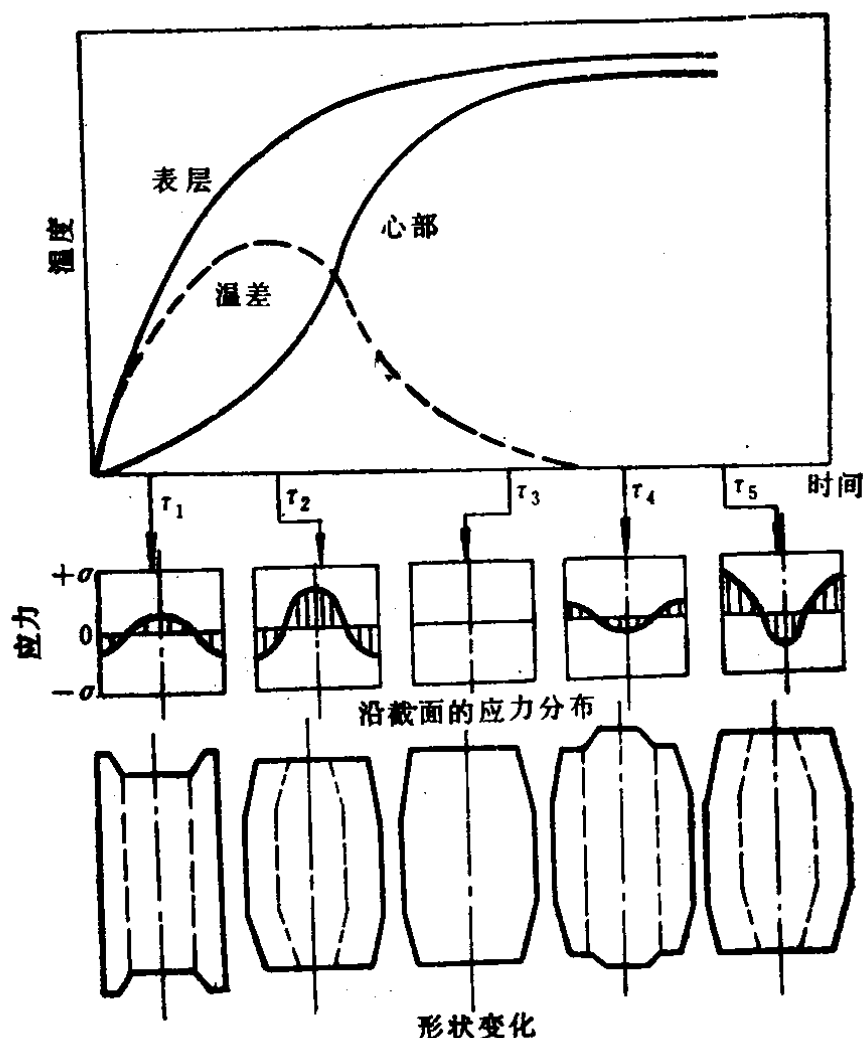


图2-1 圆柱体试样加热时热应力对变形的影响

当试样表层温度接近炉温时，由于温差悬殊，内应力加剧，外层的拉应力增加，心部的压应力也增加，此时的应力处于最大值，见图2-1 τ_1 。

当试样温度到达炉温时，心部温度和表层温度几乎一样，内外层温差极小，应力已基本松弛，残余应力小于屈服强度，此时不再产生塑性变形。但是实际上由于前一阶段的塑性变形，心部比表层长得多了一些，因此试样加热之后形成鼓状变形，即外径中间部位胀大，见图2-1 τ_5 。

零件在加热时会产生热应力，但在生产过程中往往容

易被人们忽视。实际上，导热性差的高碳合金钢，例如Cr12MoV、Cr12Mo、W18Cr4V之类的工具钢，如果不采用多次预热或缓慢加热，不但会造成零件变形，而且会导致零件开裂而报废。这种现象称为“热震”。实际上是加热过快的毛病。所以，为了减小加热时产生的热应力，零件必须先经过预热再逐步加热到高温。即使对于温度低、变形小的渗氮工艺，缓慢升温往往也是保证减小变形的有效措施之一。

此外，铸钢件和锻件毛坯，如果表层存在着一层脱碳层（脱碳层导热性较好），由于导热性能不同，在淬火加热较快时也会产生热应力而引起变形。但由于毛坯的加工余量较大，绝大多数仍可以加工到要求尺寸，因此通常不大会引起人们的注意。

2. 冷却时产生的热应力引起的变形 零件冷却时所产生的热应力比零件加热时所产生的热应力，对热处理变形的影响更大，特别是碳钢零件在盐水中冷却时，由于温差大，热应力往往是造成零件变形的主要原因。

有人曾进行过一系列试验，即把各种不同材料的尺寸为 $\phi 25 \times 145\text{mm}$ 的圆柱体试样和 $25 \times 25 \times 25\text{mm}$ 的立方体试样，分别加热到相变温度以下，然后冷却并测定其变形量。

（1） $\phi 25 \times 145\text{mm}$ 圆柱体试样变形情况：将试样加热到 500°C ，然后在水中冷却。由于试样在 500°C 以下加热时，没有组织转变，也不会产生组织应力。材料在此温度下屈服强度仍然不低。但是由于温度低，温差小，热应力比材料的弹性极限要小得多，因此试样的变形极小，用常规检测手段几乎测量不出来，可以忽略不计。当将试样升温到 $700 \sim 750^{\circ}\text{C}$ ，再淬水冷却时，其长度、中间部位和两端面的外径部分都发生了变化，见表2-1。