

# 铸件的变形与时效

高 瑛 马敬仲 编



TG 2.1  
G

232838

# 铸件的变形与时效

高 瑛、马 敬、仲、编



机械工业出版社

本书专门论述铸件残余应力、变形和减小铸件变形的方  
法。书中综合了多年来国内外大量的理论研究成果和丰富的  
生产实践经验,详细地论述了铸件残余应力的形成及其计算、  
测量方法;铸件在工作应力和残余应力作用下的变形机理、  
应力松弛及其影响因素;减少铸件变形途径及各种时效方法。

本书对提高零件尺寸精度稳定性和指导寻求新的尺寸稳  
定化处理工艺,会有较大的参考价值。

本书可供铸造方面的科研、技术、生产人员以及大专院  
校师生参考。

## 铸件的变形与时效

高 瑛 马敬仲 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性印书业出字第 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  $787 \times 1092^{1/32}$  · 印张  $7^{2/3}$  · 字数 159 千字  
1985年9月北京第一版·1985年9月北京第一次印刷  
印数 0,001—7,760 · 定价 1.80 元

统一书号: 15033·5851

## 前 言

零件在成形过程中，必然会产生残余应力。零件中存在残余应力有时是有利的，如用预应力使零件产生预变形来增加零件在外力作用下的工作强度和刚度；用喷丸或其它表面处理方法使零件表面产生压应力，从而提高其疲劳强度等。但是，在很多情况下，残余应力直接影响零件的强度、疲劳极限、耐腐蚀性、刚性等重要性能，同时，还影响零件的尺寸精度，因而严重地影响了零件的服役状态，降低了零件的使用寿命。

随着科学技术的发展，人们把使用材料的合理性和可靠性视为最重要的原则。那些在高速、高温、高负荷条件下工作或要求保持高精度的零件，必须首先注意其安全和可靠。残余应力能使材料性能和零件的工作状况发生改变，因而对残余应力的研究，日益受到重视。一个世纪以来，对残余应力的形成机理、零件中残余应力的分布、它对材料或零件性能的影响、残余应力的测试方法以及利用或消除残余应力的各种工艺等，从理论研究或实际应用上都做了大量的工作，并取得了较大的进展。

众所周知，精度要求较高的机器，其基础件（如床身、工作台、立柱等）的初始尺寸，形状和精度的保持，对保证机器的整体精度具有重要意义。这些零件的变形或精度丧失皆会使精密机床或仪器部分地或全部地丧失其使用价值。

基础零件尺寸在使用过程中，主要是由于工作面的磨损和零件发生不可逆变形而丧失精度。对于高精度机床和精密

仪器而言，后者往往比前者更为重要。

零件产生不可逆变形的原因，可能是金属材料本身的组织变化；外力作用下产生的塑性变形及零件残余应力引起的塑性变形所造成的。通常，比较注意因零件材料和结构刚性差、环境温度变化、支承或受力状态不合理等外界条件所引起的变形，而容易忽视残余应力随时间发生缓慢松弛所引起的塑性变形。但正是由于这种塑性变形变化的不规律性，往往成为影响零件精度保持性的重要原因。

过去一般地认为，存有残余应力的零件，其尺寸精度不能保持稳定。经过一段时间的放置，零件会由于残余应力而自行变形。残余应力越大，产生的变形就越大。为了防止这种变形，需要采用自然时效、热时效、振动时效等稳定化处理方法来消除应力，并用残余应力值的大小作为衡量零件是否会发生变形的指标。

近年来，从残余应力与零件变形之间关系的研究中发现，这种认识不够全面。铸铁在自然时效后，尽管残余应力值减少不多（约5~20%），但却不再发生进一步的变形，而能获得良好的尺寸稳定性。这是因为零件的变形不仅是由于第一类平均残余应力的松弛引起的，而主要是微观应力集中处的残余应力的松弛所造成的。应力松弛的机理是：零件的第一类平均应力在微观组织的各种应力集中处（对铸铁而言主要是在石墨附近）急剧增大，故基体所受的不仅是平均宏观应力的作用，而且受大量的微观过载应力的作用。应力集中处宏观应力增大的程度取决于应力集中处的尺寸和形状。由于应力集中很大，以至当平均应力还很低的时候，局部地方的微观应力即可能达到基体的屈服极限，使此处的金属基体产生局部的塑性变形，同时应力集中处的残余应力得到松

弛。

试验证明，任何金属，包括钢在内，都存在应力松弛现象。而且，松弛都是在本身残余应力的作用下，随着时间的延续缓慢发生塑性变形的结果。如果金属中的作用应力不能引起其塑性变形，应力松弛就不会发生。所以为了使零件尺寸稳定，必须防止应力松弛。为此，需降低残余应力。但这仅是一个方面，它还可通过提高金属材料抵抗塑性变形能力的方法，即提高松弛刚性（或称松弛强度）的方法来达到。

常温下的零件，因其残余应力而发生的变形，会同时产生两个结果：一是使存在的残余应力降低；二是由于塑性变形而使金属基体强化，从而提高松弛刚性。当松弛刚性提高到足以制止残余应力引起塑性变形时，应力松弛便停止，零件的尺寸即得到稳定。

上述理论不仅较好地解释了已有的各种时效方法对零件尺寸精度稳定化的作用，还可用它来指导寻求新的尺寸稳定化处理工艺，对提高产品质量、降低成本，延长使用寿命均能收到较好效果。为了总结这方面的经验，我们编写了这本书。

本书在编写过程中，得到李龙城、陈国桢同志的大力支持，在此表示感谢。

编者八三、十

# 目 录

## 前言

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第一章 残余应力               | 1   |
| 第一节 残余应力的分类            | 1   |
| 第二节 铸造残余应力的产生          | 5   |
| 第三节 影响铸造残余应力的因素        | 15  |
| 第四节 铸造应力试样             | 20  |
| 第五节 铸件残余应力的计算法         | 23  |
| 第六节 残余应力的测定法           | 32  |
| 第二章 铸件残余应力松弛和变形        | 48  |
| 第一节 残余应力对零件使用性能的影响     | 48  |
| 第二节 影响零件变形的因素          | 54  |
| 第三节 金属材料在力作用下的变形特性     | 59  |
| 第四节 铸铁组织对力学特性的影响       | 75  |
| 第五节 残余应力的松弛与铸件变形       | 80  |
| 第六节 铸铁的相对变形系数          | 86  |
| 第三章 减少铸件变形的途径          | 89  |
| 第一节 高刚性、低应力、小变形铸铁      | 90  |
| 第二节 控制铸件在铸型中的冷却获得低应力铸件 | 100 |
| 第三节 铸件尺寸精度稳定化的时效处理     | 105 |
| 第四章 热时效(消除应力退火)        | 110 |
| 第一节 热时效对消除残余应力的影响      | 110 |
| 第二节 热时效温度与保温时间的确定      | 115 |
| 第三节 热时效升温速度的确定         | 121 |
| 第四节 热时效降温速度的确定         | 122 |
| 第五节 时效炉温炉差对热时效效果的影响    | 124 |
| 第六节 铸件在时效炉中的放置与支承      | 126 |

|      |                         |     |
|------|-------------------------|-----|
| 第七节  | 热时效工序的安排 .....          | 127 |
| 第八节  | 两次热时效和复合时效 .....        | 128 |
| 第九节  | 热时效工艺的选择 .....          | 131 |
| 第十节  | 热时效工艺应用实例 .....         | 134 |
| 第五章  | 振动时效 .....              | 138 |
| 第一节  | 振动时效的特点 .....           | 138 |
| 第二节  | 振动时效对金属零件残余应力的影响 .....  | 141 |
| 第三节  | 振动时效对零件抗变形能力的影响 .....   | 151 |
| 第四节  | 振动时效对零件尺寸精度的影响 .....    | 154 |
| 第五节  | 振动时效的机理 .....           | 159 |
| 第六节  | 振动时效工艺过程 .....          | 160 |
| 第七节  | 振动时效频率参数的选择 .....       | 168 |
| 第八节  | 动应力的选择 .....            | 178 |
| 第九节  | 振动时间的选择 .....           | 187 |
| 第十节  | 鉴定振动时效效果 .....          | 189 |
| 第十一节 | 振动时效的激振装置 .....         | 199 |
| 第六章  | 自然时效、静态过载法和热冲击时效法 ..... | 204 |
| 第一节  | 自然时效 .....              | 204 |
| 第二节  | 静态过载法 .....             | 209 |
| 第三节  | 热冲击时效法 .....            | 218 |

# 第一章 残余应力

## 第一节 残余应力的分类

零件的成形工艺不同，则零件上产生残余应力的原因、过程、应力大小和分布也各有差异。但是概括起来，残余应力和应力不是一个概念，残余应力是在没有外力作用时，物体内部保持平衡而存在的应力。这种应力的产生可用图1-1来说明：

假定在没有任何应力作用的物体内部，在某部位取下圆形部分“*A*”（图1-1a），余下的部分为*R*。倘若“*A*”未经任何变化，仍然装入原来部位（图1-1b），此时物体并没有什么变化，内部不产生应力场，物体处于没有残余应力的状态。若将“*A*”进行某种处理，使原来的圆形变成“*B*”那样的椭圆，再装入原来部位（图1-1c），不难想象，原来的“*R*”和“*B*”两者都要在体积和形状上进行某种调整，从而相互适应。这样，“*R*”和“*B*”在调整过程中所发生的变形就产生了应力场，物体中就产生了残余应力。故残余应力产生的原因就是零件

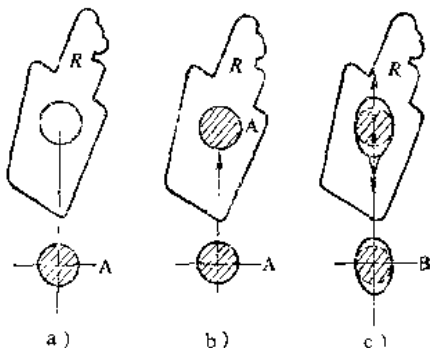


图1-1 残余应力形成示意图

的某些部位体积和形状产生了某些变化的结果。

残余应力一般有以下几种分类方法。

### **一、按应力相互作用或平衡范围分类**

1. 第一类残余应力或称宏观应力 应力存在的区域具有宏观特征，在物体全部或部分范围内平衡。

2. 第二类残余应力或称显微应力 应力存在的区域具有微观特征，在物体的晶格范围内平衡。

3. 第三类残余应力或称超显微应力 应力在个别晶格内平衡。

### **二、按金属学分类**

1. 体积应力与宏观应力对应。

2. 组织应力与显微应力对应。

3. 镶嵌应力与超显微应力对应。

### **三、按应力产生的工艺过程分类**

1. 铸造残余应力。

2. 焊接残余应力。

3. 压力加工残余应力。

4. 切削加工残余应力。

5. 热处理残余应力。

6. 镀层残余应力。

7. 表面硬化处理残余应力。

### **四、按引起应力的工艺机构分类**

1. 结构应力 由于结构设计、几何形状和尺寸等原因而引起的零件残余应力。

2. 工艺应力 由于零件制造工艺和使用过程中的某些原因而引起的残余应力。

### **五、按物理学分类**

1. 热应力或温度应力 由于零件不均匀的冷却或加热过程中温度的影响,使零件产生不均匀的收缩或膨胀所引起的残余应力。

2. 相变应力 由于金属材料进行相变或扩散过程而形成的应力。

3. 加工应力 零件加工时,受切削力的作用所产生的塑性变形及温度变化而引起的残余应力。

## 六、按应力存在时间的长短分类

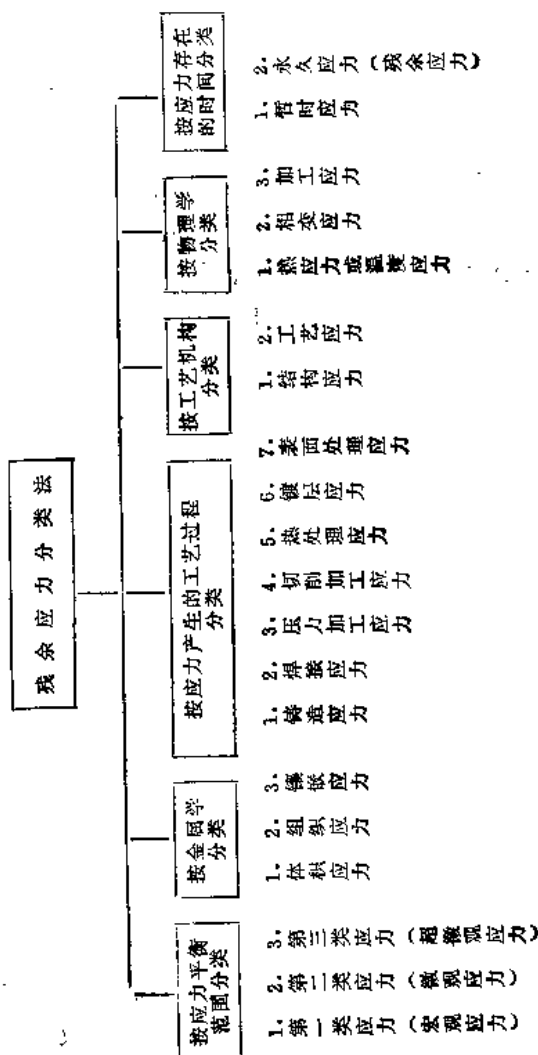
1. 暂时应力 在零件制造工艺过程中发生又随工艺过程的结束而消失的应力。

2. 永久性应力 在零件制造过程的某一阶段产生,但当此过程结束后,一部分应力仍然保留在零件内而形成的残余应力。

残余应力的详细分类,见表1-1。这是为了从各个不同角度来说明它的特征,以便掌握和分析残余应力产生的原因。例如,一个铸件中的应力是以铸造应力为主(这是由工艺引起的),那么该应力是热应力、收缩应力和相变应力叠加的结果,其中有宏观应力,也有显微应力和超显微应力。在铸件的残余应力中,还可能包括由于时效、淬火等工序引起的热处理应力和切削应力,铸件在冷却过程中还常常产生一些暂时应力。形成这些应力的条件一旦去掉,这些应力就会消除。它们基本上不影响铸件的性能。

但是,铸件中经常产生有害的残余应力,即使比使用应力小很多,对铸件性能的影响也不可忽视。为了消除有害的残余应力,必须了解应力的产生过程和类型,故在残余应力的研究中,分类占有重要位置。

表1-1 残余应力的分类



## 第二节 铸造残余应力的产生

在机械制造业中,就毛坯重量而言,铸铁件占70%以上;在机床行业中,铸铁件占产品总重量的60~90%。因此,作为最广泛用于机器基础件的铸铁件,其残余应力的产生及其对零件变形的影响必然日益受到重视。

### 一、铸铁件应力的发展过程

铸件的残余应力是由于不均匀冷却(铸铁件主要是在700~400℃的范围内)造成的。如果铸件上各部分的冷却速度完全一致,铸件会均匀收缩,在冷却后不产生残余应力。但对于实际铸件来说,这种条件是不可能实现的,即使是形状最简单的圆棒,表层和心部的冷却速度也不相同,冷却后表层将产生压应力,心部产生拉应力。铸造应力的形成过程可用三杆应力-时间曲线来表明,如图2-1所示。

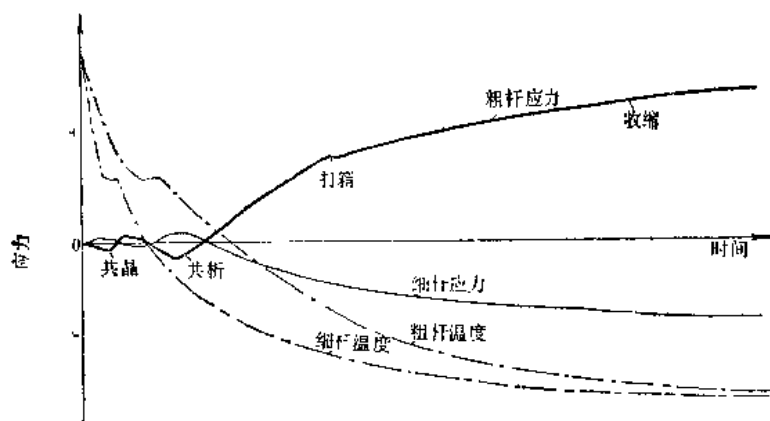


图1-2 灰铸铁的动态应力曲线

由图可见,铸铁在共晶结晶时,粗杆由于析出石墨产生

体积膨胀,使粗杆中间受压应力。共晶结晶后,随温度的降低,试样的长度缩短,粗杆应力逐渐变为拉应力。在共析前的收缩过程中,由于铸铁的温度较高,粗、细杆均处于塑性状态,应力虽然不断地产生,但又不不断地被塑性变形所松弛,应力数值并不大。当粗杆温度下降至 $750^{\circ}\text{C}$ 左右,铸铁发生共析转变,在 $\gamma\text{-Fe}$ 转变为 $\alpha\text{-Fe}$ 时伴随着比容的增大(由 $0.124\text{cm}^3/\text{g}$ 增大到 $0.127\text{cm}^3/\text{g}$ ),试样产生了明显的相变应力。应力棚的粗杆形成压应力,直至共析转变结束。这个相变应力也是发生在铸铁的塑性温度范围,其符号与降温时形成的热应力相反。在此后的冷却过程中,相变应力的作用被逐渐抵消。在共析后的冷却过程中,由于粗细杆冷却速度不同所造成的热应力(温度应力)起主要作用。粗杆所受的拉应力随温度降低而不断加大,到室温时达到最大值,并保留下来形成残余应力。由动态应力曲线上还可以看出,当试样打箱时,即去除了砂型的阻力后,铸件的应力下降。这说明型芯阻力是影响铸件应力的因素之一。由型芯阻力产生的应力称为收缩阻力。一般来说收缩应力多为暂时应力,因当型、芯去除后这个应力亦随之消失。

由动态应力曲线可以看出,铸铁在冷却过程中产生的应力是由相变应力、热应力(温度应力)和收缩应力三部分构成的。在共析转变后的冷却过程中产生的热应力是铸造残余应力的主体。它的大小决定了试样(或铸件)的残余应力值。因而,对铸件残余应力的研究,主要着力于残余热应力。

## 二、铸件冷却时的热应力

一般说来,铸铁在冷却过程中的变形 $\varepsilon$ 是由四部分变形所组成,即温度降低所引起的收缩变形 $\delta$ 、塑性变形 $\varepsilon_p$ 、弹性变形 $\varepsilon_e$ 和组织转变引起的变形 $\varepsilon_o$ ,可写为:

$$\varepsilon = \delta + \varepsilon_u + \varepsilon_v + \varepsilon_e \quad (1.1)$$

前已述及，铸铁的残余应力主要是共析转变后形成的，因此，组织转变引起的变形可以不考虑。

铸铁自高温冷却下来，其弹性和塑性性质随温度而发生改变。这两种性能及它们变化的规律直接影响到热应力的形成。

假若金属是塑性的，应力栅冷却时由粗细杆的温差所造成的不均匀变形，会由于产生塑性变形所补偿，在铸件或试样中不产生热应力。反之，若金属是纯弹性的，任何外力都不会使它产生塑性变形，那么，由于开始冷却和冷却至室温时粗细杆的温度都是一致的，所以尽管在冷却过程中会产生不均匀的变形和应力，但在冷却终了时，这种应力状态不会保留下来，试样中仍然不存在残余应力。

然而，铸铁和大多数金属都不是纯弹性或纯塑性材料，在冷却过程中往往会发生塑性至弹性的转变。对于铸铁来说，这个塑性-弹性转变温度区间为 $700 \sim 400^\circ\text{C}$ ，而且这个温度范围与铸铁所受的应力大小还有关系。

现以厚薄不均匀的T形梁（图1-3）为例来讨论残余热应力的形成过程。T形梁铸件由较厚的杆I和较薄的杆II组成。为了简化分析，需作以下假设：

1. 两杆由同一温度 $t_n$ 开始冷却，最后冷却至同一温度 $t_0$ ；
2. 合金的塑-弹性转变是在一个临界温度 $t_k$ 下发生的。高于 $t_k$ ，合金处于塑性状态；低于 $t_k$ ，合金处于弹性状态；
3. 冷却过程中不发生相变，铸件的收缩不受铸型阻碍；
4. 材料的线膨胀系数 $\alpha$ 和弹性模量为一常数，不随温度变化；

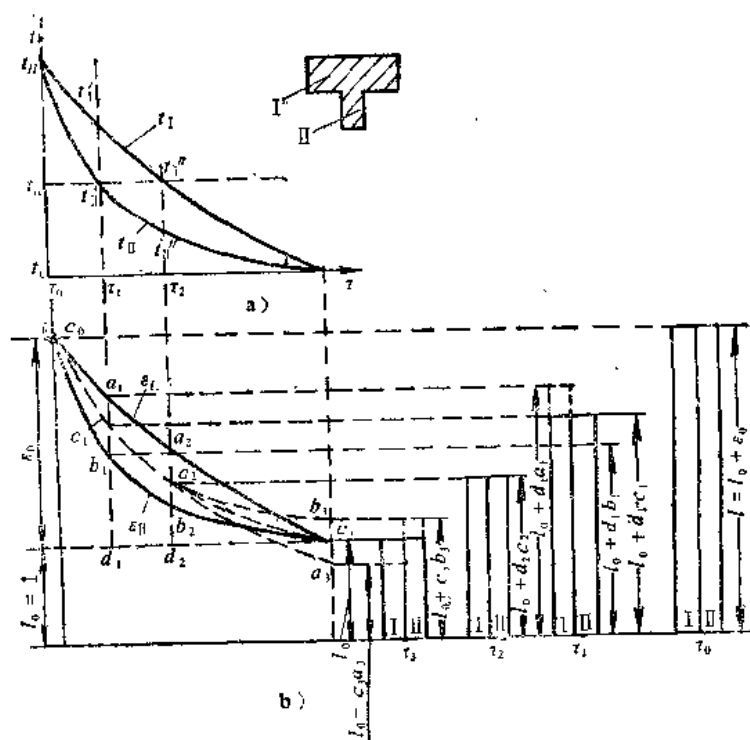


图1-3 T形梁铸件冷却时热应力形成过程的示意图

a) 冷却曲线 ( $t-\tau$ ) b) 线收缩曲线 ( $\varepsilon-\tau$ ) 和铸件长度的变化

5. 杆 I 和杆 II 之间无热交换。

图1-3 a 示出杆 I 和杆 II 的冷却曲线 ( $t-\tau$ )。开始冷却时两杆温度均为  $t_n$ ，冷却至最后的温度均为  $t_0$ 。由于杆 II 比杆 I 薄，故开始冷却时杆 II 比杆 I 冷却快，后期，杆 I 的冷却速度比杆 II 快。

由于假定线膨胀（收缩）系数为一常数，故铸件在各个温度时的自由收缩量  $\varepsilon$  与温度成正比，线收缩曲线 ( $\varepsilon-\tau$ ) 在外形上与冷却曲线 ( $t-\tau$ ) 一致（图1-3 b）。虚线  $c_0c_0$

是两杆联在一起时实际的（即T形梁铸件的）线收缩曲线。

热应力的形成过程可分下列三个阶段。

第一阶段（ $\tau_0$ 到 $\tau_1$ ）：此时I、II杆的温度 $t_I$ 和 $t_{II}$ 均大于 $t_A$ ，两杆处于塑性状态。如两杆能够自由收缩，则杆I长度为 $l_0 + d_1 a_1$ ，杆II长度为 $l_0 + d_1 b_1$ 。但实际上两杆相联，彼此制约，实际长度为 $l_0 + d_1 c_1$ 。这样，杆I被塑性压缩 $a_1 c_1$ ，而杆II被塑性拉伸 $b_1 c_1$ 。两杆产生塑性变形后，铸件中不形成残余热应力。

第二阶段（ $\tau_1$ 到 $\tau_2$ ）：此时杆II的温度已降至 $t_A$ 以下，转变为弹性状态，而杆I仍处于塑性状态。由于弹性杆的变形比塑性杆困难得多，所以整个铸件的收缩由变形较困难的杆II所决定，即 $c_1 c_2$ 应平行于 $b_1 b_2$ 。杆II不再增加新的变形（ $b_2 c_2 = b_1 c_1$ ），而杆I继续发生塑性变形。在 $\tau_2$ 时两杆应具有同一长度 $l_0 + d_1 c_2$ 。由于杆I仍处于塑性状态，所以铸件中仍不形成残余应力。

第三阶段（ $\tau_2$ 到 $\tau_3$ ）：此时I、II杆均冷却到临界温度 $t_A$ 以下，处于弹性状态。 $\tau_2$ 时两杆长度相同但温度不同，杆I的温度 $t_I''$ 高于杆II的温度 $t_{II}''$ 。如果两杆各自能够自由收缩，则杆I长度应沿 $c_1 a_3$ 变化（ $c_1 a_3 \parallel a_2 c_3$ ），杆II的长度沿 $c_2 b_3$ 变化（ $c_2 b_3 \parallel b_2 c_3$ ），但由于两杆联在一起，只能具有同一长度，即杆长沿 $c_1 c_3$ 变化到 $c_3$ 。因此， $\tau_3$ 时杆I被弹性拉长了 $\epsilon_I = a_2 c_3$ ，杆II被弹性压缩了 $\epsilon_{II} = b_2 c_3$ 。由于这个阶段两杆均处于弹性阶段，所以杆I内有拉应力，杆II内有压应力，冷却至常温时残留于铸件中成为残余热应力。

如果T形梁铸件在应力作用下不产生弯曲变形，则两杆中的残余热应力与所产生的弹性变形量（ $\epsilon_I$ 和 $\epsilon_{II}$ ）有关。

以 $\sigma_I$ 、 $\sigma_{II}$ 表示杆I和杆II的应力； $F_I$ 和 $F_{II}$ 表示两杆的