

# 残余应力

(上)

康大毅 1977, 11)

一机部机械院机电研究所 二室  
情报室

一九七七年三月

## 编者说明

机械零件的残余应力影响着零件的强度、疲劳、尺寸稳定性和耐腐蚀等性能。近几年来，我国的X射线残余应力测定技术有了很大发展，有关残余应力的试验研究工作也引起了各方面的重视，并取得了可喜的成绩。

遵照伟大领袖毛主席“洋为中用”的教导，我们将日刊《机械の研究》一九七〇年至一九七二年各期上连载的米谷 茂撰写的十九篇残余应力的文章翻译汇编成册(分上下二册)，供有关同志参考。参加本书翻译汇编工作的，还有陕西机械学院伍尚礼同志。

由于我们水平所限，错误在所难免，请同志们批评指正。

一九七七年二月

米谷 茂

# 目 录

一、残余应力的产生及其原因	(1)
1. 前言	(1)
2. 残余应力的产生和分类	(2)
3. 宏观残余应力	(4)
3.1 不均匀塑性变形的残余应力	(4)
3.2 热影响所产生的残余应力	(5)
3.3 化学变化所产生的残余应力	(6)
4. 微观残余应力	(6)
二、残余应力的产生	(9)
1. 热处理残余应力的产生	(9)
1.1 由热应力产生的残余应力	(9)
1.2 由热应力和相变应力产生的残余应力	(10)
2. 表面硬化处理的残余应力	(18)
2.1 火焰淬火和高温淬火的残余应力	(18)
2.2 渗碳淬火的残余应力	(22)
2.3 氮化工艺的残余应力	(24)
3. 热处理变形和残余应力	(26)
3.1 热处理变形及其有关的各种因素	(26)
3.2 变形的产生过程	(27)
3.3 实际出现的变形	(30)
4. 切削、磨削残余应力	(34)
4.1 切削加工残余应力	(34)
4.2 磨削加工残余应力	(39)
5. 冷压力加工残余应力	(43)
5.1 棒材拉拔和挤压残余应力	(43)
5.2 圆管拉拔加工残余应力	(48)
5.3 板材冷轧残余应力	(50)
6. 铸造残余应力	(53)
6.1 铸造应力的产生	(53)
6.2 零件截面内平衡的残余应力	(55)
6.3 零件间保持平衡的残余应力	(56)
7. 镀层残余应力	(59)
7.1 镀层残余应力的测量方法	(60)
7.2 镀层残余应力的产生	(63)
8. 焊接残余应力	(68)
8.1 焊接残余应力的产生	(68)
8.2 产生残余应力的例子	(71)

# 一、残余应力的产生及其原因

## 1. 前 言

近年来,在设计机械零件时,要求材料能承受高功率、高速和高温的倾向一年比一年更甚。另一方面,在实际的设计和制造中,过去选择材料以及对材料的技术要求,主要是从经济的观点出发,而最近在技术上的应用价值却比经济价值更为重要,对材料的要求也越来越严格。因此,当然要寻找和研究高强度的材料。最近所进行的残余应力的探讨和研究,其意义就在于保证这些材料的应用设计的可靠性。

从设计的角度来说,残余应力的研究就是如何按照实际作用应力来确定设计应力这样一个技术问题。除了这些设计本身的技术问题外,材料本身还有材质和热处理等影响。例如轴承材料,既要求材料没有非金属杂质和晶格缺陷,还必须要求维持有效的残余应力。至于残余应力,它是在生产过程中必然伴随产生的。为了提高材料的机械性能,有的是从消极的意义上消除残余应力,有的是从积极的方面用某种方法产生有益的残余应力,例如喷丸处理,可提高材料的疲劳极限等等。

我们对一般材料的检验,首先是进行拉伸试验,这是简便而经济的方法。但是遗憾的是,拉伸试验所测得的抗拉强度和延伸率等性能,由于试验本身与实际工作状态不同,所以从试验的破坏状态所得的性能,并不表示与实际破坏状态之间有直接的对应关系。破坏时裂纹是如何发展的,以及存在的裂纹在什么情况下才不是有害的等等,目前还没有这方面的知识。残余应力虽说重要,但它和材料的强度特性有何相互关系,目前还不十分清楚。实际的破坏事故,究其原因,是由于材料本身的处理和强度,还是残余应力的影响,很多情况下是不清楚的。

关于残余应力的作用,仅以下述例子来说明<sup>1)</sup>。图1表示的机械性能和残余应力的关系就是一个明显的例子。将泵传递动力用的传动转子进行疲劳试验,显示了残余应力和破坏率的关系。可看出实际强度(抗拉强度-残余应力)与破坏率的相互关系。图2表示经渗碳淬火的SAE-8620钢进行交变弯曲疲劳试验时,材料的表面残余应力(X射线法测量)与疲劳寿命的关系。这时看不出表面残余应力与寿命有关系,这里有许多原因。首先,除表面残余应力外,还应考虑表面附近的残余应力,以及与渗碳硬化深度相对应的、从表面向内的残余

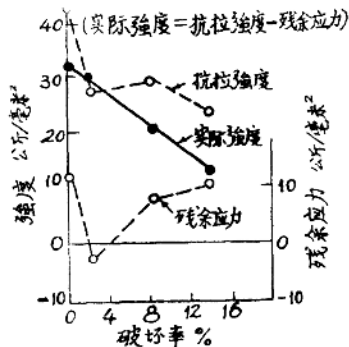


图1 动力传递用的泵转子的疲劳可靠性<sup>1)</sup>

应力分布等问题。又如图3所示，所得的残余应力是宏观的，再从微观来看，也许是以变动的应力分布的平均值显示的，因此，对微观应力也应给予考虑。

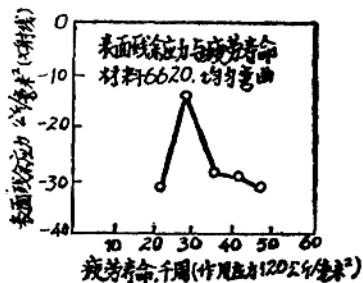


图2 渗碳淬火钢的疲劳寿命与表面残余应力

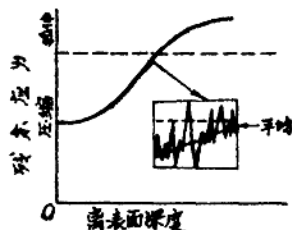


图3 渗碳淬火的硬化部分的残余应力状态

## 2. 残余应力的产生和分类

残余应力是当没有外力作用时，在物体内部保持平衡而存在的应力。就是说，没有通过物体表面向物体内部传递垂直应力和切应力的外力作用时，物体内部保持平衡的应力系统，称为固有应力或初始应力，残余应力和热应力是固有应力的一种。有的研究人员也把固有应力称为内应力。

例如，取一根杆，假定其材料有足够高的弹性极限。将其两端弯曲焊接成圆环。加工后环内产生应力，这就是具有固有应力的状态。为了用图解说明物体内部残余应力的产生过程，用图4表示。在没有任何应力作用的物体内部，在R范围内切取如图那样的正方形部分A，然后假定将A部分进行某种操作，使体积和形状变成B的样子，再研究其放入R的情况。如(c)所示，假如从侧面施加外力，该状态如(d)，放入R，因此，若释放B上施加的力，则如(e)所示，放进去的部分和周围的部分要调整其变形，在周围部分产生应力场。而将这样的过程进行相反的操作，并测得切取部分的变形，就可测定物体内部存在的残余应力。实际的残余应力的测量中，是将物体进行切除或切取，使残余应力部分释放或全部释放，由这时产生的变形，求出实际的残余应力。

作为固有应力的残余应力，在原理上可和上例一样考虑，采用弹性理论求得<sup>2</sup>。首先将物体假想地分割成小部分，然后假设各部分经塑性变形或组织转变而产生永久变形。各部分的永久变形，以空间坐标系x、y、z的垂直和剪切应变表示如下：

$$\epsilon_x', \epsilon_y', \epsilon_z', \gamma_{xy}', \gamma_{yz}', \gamma_{zx}' \dots (1)$$

如果(1)式的应变是满足平衡条件式的，则各部分结合起来也没有什么不一致，所以

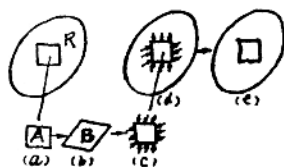


图4 残余应力的产生过程

就没有固有应力发生。然而，一般并不满足平衡条件式，各部分结合时要出现不一致，为了使它们满足平衡条件式，各小部分的表面就要加上作用力。假定在产生永久变形(1)后，材料是处于弹性状态，对这个小部分施加垂直应力 $\sigma_x'$ ……，切应力 $\sigma_y'$ ……，使之消去永久变形成分(1)。采用应力和应变等关系，这些力可由(2)式求得。

$$\sigma_x' = -(\lambda e' + 2G\epsilon_x') \dots \dots \tau_{xy}' = -G\gamma_{xy}' \dots \dots (2)$$

式中 $e' = \epsilon_x' + \epsilon_y' + \epsilon_z'$ ， $\lambda = \nu E / (1 + \nu)(1 - 2\nu)$ ，

$E$ ：杨氏模量， $\nu$ ：泊松比， $G$ ：切变弹性模量。把体积力 $X$ ……，和表面力 $\bar{X}$ ……作用于由这些小部分组成的全体积的物体也可求得这个表面力(2)。因此，(2)式的表面力可以用这样的体积力和表面力代换。这些应力当然必须满足应力的平衡式和边界条件，用应力成分(2)代入，即得必须的体积力和表面力为：

$$X = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda e' + 2G\epsilon_x') + \frac{\partial}{\partial y}(G\gamma_{xy}') + \frac{\partial}{\partial z}(G\gamma_{xz}') \dots \dots (3)$$

$$\bar{X} = -(\lambda e' + 2G\epsilon_x')l - G\gamma_{xy}'m - G\gamma_{xz}'n \dots \dots (4)$$

$l, m, n$ ：表面力对表面垂直方向的方向余弦。

当(3)(4)式所示的体积力和表面力发生作用时，就可除去永久变形(1)，因此，将分割成的小部分合起来，然后除去(3)(4)式的力，这样，产生固有应力的状态就造成了。所以，如下面(5)(6)式所示，求得弹性体内体积力和表面力作用时的应力，把它加上(2)式所示的应力 $\sigma_x'$ ，……， $\tau_{xy}'$ ，……，即可求出固有应力。

$$X = -\frac{\partial}{\partial x}(\lambda e' + 2G\epsilon_x') - \frac{\partial}{\partial y}(G\gamma_{xy}') - \frac{\partial}{\partial z}(G\gamma_{xz}') \dots \dots (5)$$

$$\bar{X} = (\lambda e' + 2G\epsilon_x')l + G\gamma_{xy}'m + G\gamma_{xz}'n \dots \dots (6)$$

在热应力的特殊情况下， $\epsilon_x' = \epsilon_y' = \epsilon_z' = \alpha T$ ， $\gamma_{xy}' = \gamma_{xz}' = \gamma_{yz}' = 0$ 。

残余应力作为固有应力，就可以由上述计算求得。然而，实际上产生的原因和过程是多种多样的，产生的残余应力也是复杂的，按过去的惯例，残余应力的分类如下：

(1)按残余应力相互作用范围的大小，可分为宏观应力和微观应力；

(2)或者考虑到材料的组织和残余应力产生的原因等方面，暂可分为体积应力（与宏观应力相对应）和组织应力<sup>3)</sup>或镶嵌应力<sup>4)</sup>（与微观应力相对应）。

这个分类是Orowan<sup>3)</sup>等人采用的。从产生过程来说，体积应力是由于外部的机械作用、热作用或化学作用，对物体不均匀的影响而产生的。因此，即使材料是完全均匀的也会产生体积应力。组织应力则显然是由于组织不均匀而产生的。所谓组织不均匀，就是外加的宏观作用（变形、加热和冷却、或化学变化等）即使都一样时，也会产生残余应力的情况。

还有的研究人员将体积应力和组织应力看作第一类和第二类残余应力。用这种分类时，由于实际上显示的残余应力是多种多样的，有时难以判断是哪一种，似乎不能明确分类。如果像分类(1)那样，仅以应力相互影响的范围来说，微观应力即使在很小范围里自身平衡、对宏观应力没有影响，但是其影响的范围仍然是个问题。

例如，对具有尖锐缺口或小裂纹的物体，研究其塑性变形所产生的残余应力的情况。这时缺口或裂纹端部的小体积内所出现的残余应力，若以晶粒大小的范围来说，它是微观应力。若将应力的影响范围扩大，则是宏观应力。按照分类(2)的定义，小部分的应力也还是体积应力。

又如两个较大的晶粒构成的材料，加以同样的外力，各晶粒产生塑性变形时，由于晶粒的各向异性，两个晶粒间要互相影响而产生残余应力，即使这个晶粒是肉眼可见的，按分类(2)，仍属于组织应力，按分类(1)是宏观应力。

从各种情况的详细研究来看，关于残余应力的分类好像还没有明确的分界线。这是由于残余应力这种现象所涉及的范围很广。另一个原因，可能是由于测定时宏观应力借助于机械测定方法，而微观应力借助于物理测定法，两者的结果尚未确定明显的关系。

### 3. 宏观残余应力

以下按照宏观残余应力产生的原因，对其产生状况加以分类，并举例加以说明。

#### 3.1 不均匀塑性变形的残余应力

这是材料加工过程中最易出现的残余应力。施加外力时，物体的一部分产生塑性变形，卸载后，这部分就产生残余应力。而没有产生塑性变形的部分，也由于残余应力本身要达到平衡而产生应力。

最简单的例子是将杆进行均匀弯曲的情况，当施加的弯曲应力超过了材料的屈服应力时，拉伸侧和压缩侧都要产生塑性变形，卸载后，各部分分别产生压缩和拉伸残余应力。因为在进行塑性弯曲时，杆内产生与弹性应力平衡的弯矩，当卸载时，就要在相反的方向加上同样大小的弹性弯矩，所以产生残余应力。

对于具有明显屈服点的材料，可如下近似地计算残余应力。像低碳钢那样的理想塑性体，具有如图5所示的应力—应变曲线。设屈服应力为 $\sigma_0$ ，与屈服应力B相反方向的屈服应力为D。因此，塑性变形到B时的垂直和剪切应力为：

$$\sigma_x^*, \sigma_y^*, \sigma_z^*, \tau_{xy}^*, \tau_{xz}^*, \tau_{yz}^* \dots \dots \dots (7)$$

因而卸载时，就加上了一个同原作用于物体上的大小相同而方向相反的弯矩，应力显示了弹性的变化，沿BD线移动。设该应力变化为：

$$\sigma_x', \sigma_y', \sigma_z', \tau_{xy}', \tau_{xz}', \tau_{yz}' \dots \dots \dots (8)$$

则残余应力为：

$$\sigma_x = \sigma_x^* - \sigma_x', \dots \dots, \tau_{xz} = \tau_{xz}^* - \tau_{xz}' \dots \dots \dots (9)$$

例如，求中碳钢圆棒进行塑性扭转时的残余应

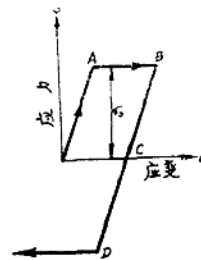


图5 对理想塑性材料加载和卸载时的应力—应变曲线

力<sup>51</sup>，如图6所示，OAB表示加载时的剪切应力 $\tau^*$ 。 $\tau_0$ 是屈服应力。现加一扭转力矩，假定达到相对扭转角 $\Theta^*$ （棒的单位长度的扭转角）扭转时，半径 $r$ 上的剪切应力为 $\tau^*$ ，这部分的切应变为 $\gamma^*$ （ $\gamma^* = r\Theta^*$ ）。因此除去扭转力矩时，棒就向相反方向旋转，使相对扭转角减少 $\Theta'$ 。又设切应变 $\gamma^*$ 也减少 $\gamma'$ ，则半径 $r$ 的切应变 $\gamma$ 为：

$$\gamma = \gamma^* - \gamma' = r(\Theta^* - \Theta') \dots\dots\dots(10)$$

若剪切应力 $\tau^*$ 也同样减少 $\tau'$ ，则

$$\tau' = G\Theta' r = \tau_0' r/a \dots\dots\dots(11)$$

这个剪切应力 $\tau'$ 如下求出。如图7所示，扭转时弹性范围的半径为 $C$ ，施加的扭转力矩 $M^*$ 为：

$$M^* = \pi\tau_0 \left( \frac{2a^3}{3} - \frac{c^3}{6} \right) \dots\dots\dots(12)$$

而去除时，就会附加一个弹性的 $-M'$ 力矩。当 $r = a$ ，卸载时的应力变化为 $\tau_a'$ ，

$$\text{则： } M' = \frac{1}{2} \pi a^3 \tau_a' = \frac{1}{2} \pi a^3 a \Theta' \dots\dots\dots(13)$$

若设 $M^* = M'$ ，则由(11)(12)

(13)式求得 $\tau'$ 。于是残余应力为：

$$\tau = \tau^* - \tau' \dots\dots\dots(14)$$

图解法示于图7，以 $O'$ 为原点的 $O'B'$ 表示 $\tau'$ ，以 $O$ 为原点的 $OAB$ 扣去 $O'B'$ 得到的 $OA'B'$ 表示 $\tau$ 。

下面说明计算时应注意的事项。由于存在鲍辛格(Bauschinger)效应，使图5中D点的值减少，万一在卸载时，向相反方向作用的弹性应力 $\tau'$ 超过D'值，则这样的计算是不适当的。

例如图8所示的U型杆出现的情况，在杆的两端连一根细长的棒，加作用力 $F$ ，连接棒受塑性压缩，而U型杆只进行弹性弯曲。这时U型杆的弹性弯曲所需要的那部分力，如果比产生塑性压缩作用的力大，那么在卸载后，杆的弹性力使连接棒产生塑性拉伸。因此，计算残余应力时，一般假定卸载时没有塑性变形，这一点要注意。

### 3.2 热影响所产生的残余应力

不均匀塑性变形所产生的残余应力与热影响所产生的残余应力不同，前者相当于外力的作用，而后者是基于热应力等的体积变化而产生的应力。热应力本身就是由于物体内各部分的膨胀不均匀而产生的。前者是在除去外力时，由于要调整塑性变形的不均匀性而产生残余应力，而后者经平衡温度消除其热应力，就会有不均匀塑性变形发生，有的情况还有体积的永久变形残余，因而产生残余应力。在加热和冷却过程中，有时材料既有相变等组织变化，又有不均匀的体积永久变形。

最简单的例子可举玻璃板回火时的情况。先将玻璃板加热到软化温度，接着用空气吹，

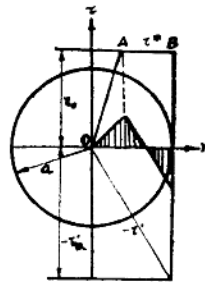


图6 塑性扭转的残余应力

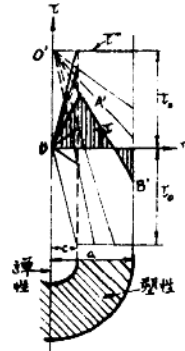


图7 残余应力的图解

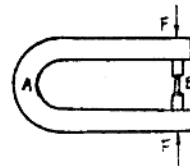


图8 U型杆和连接棒



于是表面失去流动性，紧接着内部也失去流动性。再进一步冷却，玻璃变硬时，即使内部还没有发生应力，而这时表面温度比内部低，冷却到室温时表面收缩，使之产生压缩残余应力，有助于提高玻璃板的破坏强度。然而当加热到高于软化温度时，玻璃板因自身的残余应力而破坏。又如，众所周知，当钢加热到相变点以下的高温后，再淬火，这样处理的钢的表面就产生压缩残余应力。

上述例子中残余应力的产生主要是因为有不均匀的塑性变形。在这种情况下，不能像前节那样简单地计算残余应力。因为加载和卸载过程不能分开表示，又因为屈服应力还依赖于温度等因素，所以塑性变形不能简单求得。

下面再看一般淬火，除热应力外，同时伴有体积变化的相变应力作用的情况，就更为复杂了。随着相变而引起的相变区域的体积变化，远比热应力引起的体积变化为大。相变区域显示一种所谓相变塑性的粘性状态。随着物体的冷却而逐步产生相变，既产生相变应力，又和热应力重叠，其结果是，在组织转变的体积变化加上塑性变形的状态下产生残余应力。

图9是用著者的方法<sup>14</sup>测定 $\phi 19$ 毫米滚珠在淬火后各部分的比容。横轴用重量代替 $r^3$ （试样半径 $r$ ）表示。设各部分自身的比容为 $v^0$ ，试样的平均比容为 $v_0$ ，则与(1)式所示的永久变形的关系为：

$$\frac{v^0 - v_0}{v_0} = \epsilon_x' + \epsilon_y' + \epsilon_z' \dots \dots \dots (15)$$

这个变形作为永久变形，就引起残余应力。但是这个比容的状态，实际上是不现实的，因为试样内存在这种比容状态时，加上残余应力，比容大的地方变小，而比容小的地方要变大。本例就是伴有相变的物体，由于不均匀体积变化而产生残余应力的情况。

### 3.3 化学变化所产生的残余应力

这种情况的残余应力，是由于从表面向内部扩展的化学或物理化学的变化而产生的。

一个简单的例子如泥层，它由于表面变干而收缩，其结果表面产生龟裂。又如磁器，在表面上涂一层热膨胀系数很大的釉，进行加热。于是冷却后釉产生拉伸应力，而出现龟裂。这两种情况，裂纹两端差不多达到别的裂纹，两个裂纹成直角相交。这是由于龟裂使其垂直方向的拉伸残余应力消失而造成的，此外，泥层裂纹有时正好以 $120^\circ$ 角相交，呈现星状裂纹。

钢进行氮化时，在钢的表面形成体积很大的化合物层，使表面产生显著的压缩残余应力。进行渗碳时也同样。这些残余应力的产生主要是化学变化而引起密度的变化。

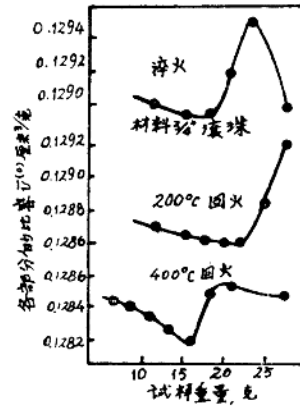


图9 滚珠淬火和回火时各部分的比容 $v^0$  (10<sup>-3</sup>)

## 4. 微观残余应力

如分类(1)所示，以应力相互影响的范围进行分类，微观残余应力是在显微镜视野范围内

的应力。但是，由于组织转变的不均匀，也使应力发生改变，按分类(2)，也可以认为微观残余应力包括在可见尺寸的范围到显微镜下晶粒的范围内。最小的单位是单个晶格缺陷，它一旦在缺陷周围形成应力场，就划入内应力范围，而从本文主题来说，因为位错等现象是可变的，应力不稳定，范围又小，所以暂且可以不把它包括在残余应力的范畴内。

以前Laszlo<sup>1</sup>把微观应力称为镶嵌应力，这方面已有详细的研究报告。本文再对微观应力进行分类，分为相邻晶粒方位不同而产生的组织应力和由于不同相之间相互作用等原因产生的组织应力。按照Orowan<sup>7</sup>等人的分类，从产生的原因可分为下述几种：

(1)由于晶粒的各向异性而产生的残余应力。这包括晶体的热膨胀系数、弹性系数等的各向异性和晶粒间的方位不同而产生的残余应力。

(2)由于晶粒内外的塑性变形而产生的残余应力。这包括晶粒内的滑移；穿过晶粒间的滑移，出现吕德斯(Lüder's)线；以及双晶的形成而产生的残余应力。

(3)由于夹杂物、析出物或相变而使第二相出现所产生的应力。

下面以简单例子说明各种情况。情况(1)，以晶体本身弹性系数的各向异性为例，铅的单晶体的杨氏模量，随晶体方位不同有3:1的变化，锌的单晶体有4:1的变化，金属的弹性系数大体上都有各向异性，多数晶体的 $\langle 111 \rangle$ 方向的杨氏模量为最大， $\langle 100 \rangle$ 方向为最小。多晶体中，由于各晶粒的方位不同，尽管加以均匀的外应力，各晶粒的变形却不同，因此在多晶体中如果有塑性变形，必然在晶粒内外产生微观应力。

情况(2)，例如晶粒内有滑移变形，则位错就在晶界堆积。又如穿过晶粒在更广的范围内进行滑移，显示出折曲带等情况，由于位错穿过晶粒并不消失，所以这时也在组织内不均匀地形成各种内部缺陷。这些就成为外应力去除后生成微观残余应力的主要原因。形成双晶的情况也是如此。

情况(3)，以Laszlo<sup>1</sup>的计算结果为例。它是简单的假定，计算组织内出现杂质、析出物、第二相时微观范围的应力。首先假定理想的组织内没有这些现象，并将这时残余的空穴和杂质等粒子的长度变化率称为“晶格变形率”，即假定晶格变形率 =  $\{(\text{粒子}) - (\text{空穴长度})\} / (\text{粒子长度})$ ，以此式计算了各种情况的应力。

在有析出物等情况下，晶格变形率往往在1%左右，最大限度为15%。关于碳素钢，亚共析钢，以及在晶粒内具有孤立的珠光体钢材，由晶格变形率计算的主应力为7.5公斤/毫米<sup>2</sup>、7.5公斤/毫米<sup>2</sup>、0公斤/毫米<sup>2</sup>。同样，过共析钢最大应力为5~7公斤/毫米<sup>2</sup>。下面是在铁素体基体上包含球状渗碳体颗粒的情况，根据计算，周界约为35公斤/毫米<sup>2</sup>的水静压力。但这超过了铁素体的屈服应力，当然渗碳体周界的铁素体的屈服应力应该更低。又如以灰口铁铸件为例，石墨的热膨胀系数为 $3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，铁素体和渗碳体分别为 $15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 和 $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，二者相差很大。同样，从简单的计算求冷却时热应力所产生的应力，则回火渗碳体周围产生140公斤/毫米<sup>2</sup>的应力，这对周围组织影响极大。但是如果形状是层状的，则应力大幅度减少到1/10左右。当渗碳体分解成铁素体和石墨时，出现4.3%的体积变化。如同这些例子所示，可以预料，在组织内因杂质、析出物以及相变而出现第二相时，由于体积变化和热应力，就会产生相当大的微观应力。

以上对微观残余应力产生的原因作了说明。实际上所出现的微观应力，由于其原因包括组织的转变，所以比宏观残余应力复杂得多。因而，残余应力的测量，对宏观应力有许多方法，可求出定量的结果，而对微观应力目前多数情况只能得到定性的结果。

### 参 考 文 献

1. R.F.Thomson: Internal Stress and Fatigue in Metals, 1(1959),  
Elesvier Publishing Company.
2. S.Timosenko, J.N.Goodier: Theory of Elasticity, 399(1951),  
The Maple Press Company.
3. E.Orowan: Symposium on Internal Stresses in Metals and  
Alloy, 47(1948), Institute of Metals.
4. F.Laszlo: J.Iron and Steel Inst., 147, 173(1943), 118, 137  
(1943), 150, 183(1944), 162, 207(1945).
5. A.Nadai: Theory of Flow and Fracture of Solids.vol.2, 420  
(1963), MacGraw-Hill Book Company.
6. 米谷 茂: 日本机械学会论文集 23, 753(昭37)
7. E.Orowan: Internal Stresses and Fatigue in Metals, 59(1959),  
Elesvier Publishing Company.

## 二、残余应力的产生

### 1. 热处理残余应力的产生

进行淬火等热处理后，材料内部产生残余应力。如果材料内各部分的形状和体积发生不均匀的变化，则残余应力的产生是不可避免的。在以后的使用状态中，热处理残余应力的分布对材料的机械性能有很大的影响，成为产生各种缺陷的原因。残余应力的控制和变形的控制都是设计中的重要问题。

在本文里我们要说明圆柱形试样在通常的淬火状态下残余应力的产生过程，并以归纳整理的结果对残余应力分布予以解释。残余应力产生的原因，是淬火时试样外表和心部的温差而形成的热应力，再加上因相变的体积变化而产生的相变应力。自从Bühler和Scheil研究以来，应力分布可按其产生的形式分为热应力型和相变应力型两种分布进行解释<sup>1,2</sup>。但是，由于材料的成份、试样大小、淬火方法的不同，实际上所显示的残余应力是复杂而多样的。过去虽进行过许多研究，但需要考虑的条件很复杂，因此除了Bühler<sup>3,4</sup>的总结性结果外，其它研究结果还很少。

#### 1.1 由热应力产生的残余应力

先说明淬火的冷却过程中试样无组织转变时残余应力的产生。图1表示了这个过程。冷却时，外表R和心部K的冷却状态不同，出现温度差，因而产生热应力。图1表示冷却过程中的热应力和最终状态的残余应力。外表和心部的温差最大时，即在W的状态，外表的拉伸应力和心部的压缩应力均增加。经过W以后，温差逐渐减小，因此两部分的应力也减小。在达到W以前的时间内，外表承受的拉伸应力很大，超过了该温度下材料的屈服应力。现设W时的温差为600°C，则外表和心部的长度差为0.5%。因此外表产生塑性变形。图1中曲线a表示外表和心部都处于完全弹性状态下的外表应力，曲线b表示实际应力。应力(b)相当于该温度下材料的屈服应力。曲线c是心部应力。经过W后不再有塑性变形，随着两部分的温差减小，应力分布在U处发生反向。最终得到外表为压缩应力、心部为拉伸应力的残余应力状态。因此，这时残余应力的大小，由经过W时的温差和材料的屈服强度所决定。温差决定于材料的直径、热传导系数、冷却剂的冷却能力。

残余应力随材料而不同，例如Borchers等<sup>5</sup>将阿姆柯铁(0.018%C)加热到845°C后在165°C盐浴中淬火；再将奥氏体钢(0.18%C、20%Cr、12%Ni)进行同样淬火，研究这二者

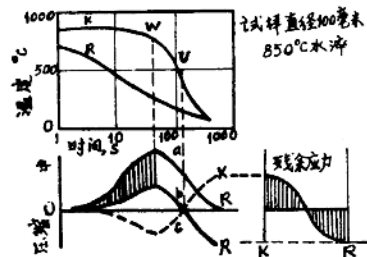


图1 无相变过程的冷却所产生的热应力  
R: 外表 K: 心部

的残余应力。前者外表有12公斤/毫米<sup>2</sup>压应力,而后者有47公斤/毫米<sup>2</sup>,由此可见,材料的高温屈服应力所产生的影响是很显著的。

淬火温度的影响是,淬火温度越高,冷却到W时的塑性变形和温差越大,从而影响残余应力的大小。Bühler<sup>7</sup>研究了φ50毫米和φ250毫米的阿姆柯铁(0.025%C)在各种温度下淬火的残余应力。截面内最大的残余应力是心部的拉伸应力。轴向残余应力与直径无关,而切向残余应力随直径的大小而不同。淬火温度对心部最大拉伸应力的影响示于图2。这是试样直径为50毫米时的结果。图中的硬度是截面内各点的平均值。淬火温度越高,由热应力产生的残余应力就越大。

### 1.2 由热应力和相变应力产生的残余应力

冷却时的热应力,加上相变产生的应力(相变应力),冷却后就得到各种各样的应力分布。残余应力随试样成分、大小、冷却剂的冷却能力等条件而变化。

产生马氏体相变时,该部分的体积膨胀,这就是产生相变应力的原因。冷却到马氏体开始转变温度(M<sub>s</sub>)的部分,开始体积膨胀而产生应力,与热应力相叠加。在什么样的热应力状态下这部分开始发生相变,有着重要的影响。也就是说,图1所示的模型中,材料的外表或心部的相变是在热应力反向期U之前还是之后进行,这就决定了最终的残余应力分布状态。

如果在应力反向期U之后,心部发生相变,则由于心部体积膨胀而使总体平衡的内应力减少。如果外表进行相变,则其效应相反。当应力反向期之前产生相变,若心部相变则使总体平衡的内应力增加;而外表相变则内应力减少。

#### 1.2.1 关于相变应力

在说明淬火残余应力的产生过程之前,先叙述一下与相变应力的发生和变形有关的基本事项。

为了消去热应力,仅得到相变应力所产生的残余应力分布,Bühler、Scheil<sup>1</sup>进行了下述实验。将含镍17%的镍钢(相变开始温度M<sub>s</sub>为360°C)加热到900°C,使其奥氏体化,然后缓冷到360°C,接着在冰水中淬火。由于缓冷到360°C,消除了热应力,所以淬火后的残余应力表现为仅受相变应力的影响。应力的测量结果示于图3。相变应力型分布和热应力型分布形式刚好相反。

马氏体相变的体积膨胀一般依赖于试样的成分,因为体积变化决定于晶格转变而产生的晶格尺寸的变化。因而,现在假设截面内具有均匀一致的体积变化,则在上例情况中,在相变开始之前,实际尺寸没有因塑性变形而变化

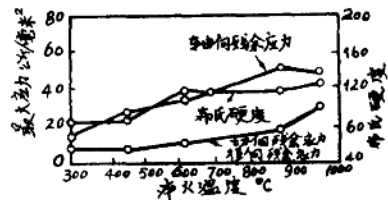


图2 淬火后的最大残余应力(心部)和淬火温度的关系  
试样: φ50毫米, 0.22%C钢, 水淬

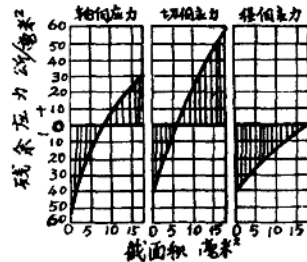


图3 相变应力型分布  
试样直径: φ50毫米, 镍钢(17% Ni)  
从900°C缓冷到360°C, 冰水中淬火

很大，而且消去了热应力，所以相变终止后理应没有残余应力。因此上例所出现的残余应力，其原因可以认为是，在相变终止后再冷却到室温的阶段，伴有塑性变形而显示的应力，或者是由于相变终止时试样内各部分的尺寸变得不一样而造成的应力。至于前一个原因，由于马氏体相变后材料有极大的刚性，因此不可能出现塑性变形，当然后者就为其原因了。作者<sup>8-9</sup>对淬火的球和圆棒等进行了研究，用作者的方法测量试样各部分的比容，证实了淬火后各部分的残余应力分布是不均匀的。

若在试样内开始马氏体相变，则其体积膨胀不仅对其他部分产生应力，而且该应力对相变本身也产生影响。据说<sup>10</sup>，马氏体相变本身是由各奥氏体晶格的微观切应变所形成的，当外应力作用于该晶格时，相变后总容积内要产生很大的变形。已经证实，相变的部分具有显著的可塑性，产生所谓的相变塑性<sup>11,12</sup>。这就是产生相变应力型分布的原因。

此外，作用力也影响相变开始的状态。由于热应力或者试样内发生部分相变而产生的应力，对未相变部分产生作用时，不同的应力状态对相变开始产生不同的影响。单向应力使相变开始温度 $M_s$ 点提高<sup>13,14,15</sup>，流体压缩状态（即三轴压缩状态——译注）使 $M_s$ 点大为降低，相变迟滞<sup>16</sup>。图4是Patel、Cohen<sup>17</sup>的测量结果之一。应力对相变迟滞产生的影响，对高碳钢的（特别是渗碳的）工件等产生重要影响。若有残余奥氏体存在，则总体积变化要变小，应力分布也明显改变<sup>18</sup>。相变终了时体积变化的大小在研究上也是重要的。在这方面，有的研究结果认为它依赖于含碳量 $C\%$ ，但也有的认为不依赖于 $C\%$ 。按Hourdremond等人<sup>19</sup>的研究，含碳量由0.4%到1.4%的碳钢，当奥氏体—马氏体相变时，从理论上计算约有2.7~2.9%的体积膨胀，和含碳量没有太大的依赖关系。

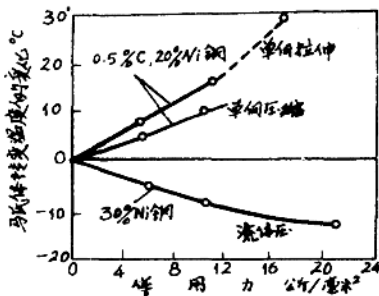


图4 单向应力和流体压缩状态对马氏体转变温度的影响<sup>17)</sup>

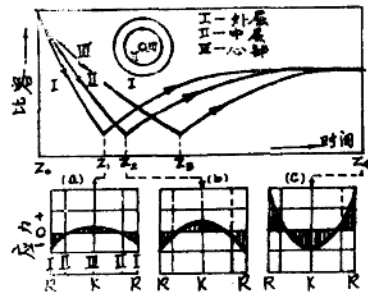


图5 热应力反向后开始相变，各部分的体积变化和应力  
R：外表 K：心部

### 1.2.2 残余应力的产生过程和分类

在这一节里叙述不包含渗碳等表面硬化处理的普通淬火状态下残余应力的产生过程。首先，介绍Bühler、Scheil<sup>1)</sup>关于镍钢淬火应力的研究结果。如图1所示，残余应力的产生，受到在热应力反向前后进行相变的极大影响。下面列举两个残余应力产生的极端情况，说明其产生过程。(1)是在应力反向期之后才开始相变，而且达到室温时还未转变终了；(2)是在应力反向期之前开始相变，而到室温之前就已经转变终了。图5和图6表示上述两种情况，图中示出了冷却时外表、中间和心部的比容变化和内应力。

图5是(1)的情况。冷却时，首先在时间 $Z_1$ 外表开始相变。这时热应力分布已发生反向。因此，外表体积增加，外表压应力增加，中心拉应力也增加。而到了时间 $Z_2$ 、 $Z_3$ ，由于进行相变，伴随着向心部的体积膨胀，所以外表和内部的应力达到最大值后又下降，当心部的相变终了后，应力分布发生反向，变成外表显示拉应力的分布。从残余应力产生的过程来说，可暂先认为是如此，而最后的应力分布，则决定于热应力对相变应力的比例。即，热应力较大，外表显示压应力；相变应力较大，外表显示拉应力。

图6是热应力反向前开始相变的情况(2)，一般来说，这种情况的相变开始温度较高。在时间 $Z_1$ 的应力分布仍然是外表为拉伸应力，心部为压缩应力。因此当外表进行相变时，由于外表的体积增加，应力分布立即发生图中(b)所示的反向，外表变为压缩应力。相变再继而向内部进展，从时间 $Z_2$ 到 $Z_5$ 之间，已相变区和未相变区之间的正在相变区，其边界显示极大的压缩内应力，变成如(c)那样的状态。然后，从时间 $Z_6$ 心部开始相变。又由于体积膨胀，变成如(d)那样的内应力分布，心部为压缩应力，外表为拉伸应力。与情况(1)比较起来，情况(2)由于从相变开始温度到相变终止温度都比室温高得多，因此再进一步冷却到室温，就成为(e)所示的残余应力分布。若相变终止温度更高，就产生(f)那样的反向，得到外表为压缩、心部为拉伸的残余应力分布。

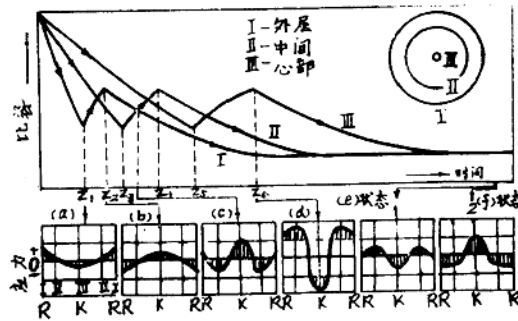


图6 热应力反向前开始相变情况下各部分的体积变化和应力<sup>1)</sup>

R: 外表      K: 心部

为了要得到一般的各种残余应力的分布，Bühler、Scheil<sup>1)</sup>就镍钢进行了研究，作了多种含镍量(Ni%)的试样，进行淬火，测量其残余应力。残余应力的分布示于图7。含镍量的大小与相变开始温度的高低相对应。因此，从这个结果就可知道，相变开始温度对残余应力分布的影响。含Ni17%的试样，其相变终止温度低达室温。因此上述状态(1)相当于含Ni17%以上，状态(2)相当于含Ni17%以下的情况。

此结果不能直接应用于碳素钢等一般钢种。奥氏体的高温强度受含碳量的影响，与含Ni时不同。但从定性来说，可得同样的结果<sup>7)</sup>。

上述情况是指一定直径和特定成分的试样而言的，要预测一般直径不同的各种钢的淬火残余应力，还是不充分的。关于工业用的各种碳钢的过冷奥氏体行为，求出了恒温相变曲线，所以可联系连续相变曲线，讨论其淬火时残余应力的产生。下面说明一般钢种淬火时残余应力的产生<sup>5)</sup>。

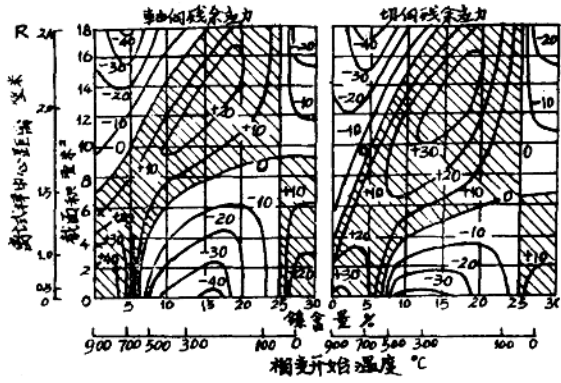


图7 含镍量和相变开始温度对轴向和切向残余应力分布的影响<sup>1)</sup>

材料:  $\phi 84$ 毫米镍钢, 900°C冰水中淬火 R: 外表 K: 心部  
+ : 拉伸应力 - : 压缩应力

图8示出一个实例, 图中画出了连续相变曲线中的试样外表和心部的冷却曲线, 并表示了与冷却曲线相对应的外表应力和冷却后的残余应力。这时心部没有硬化。与图1的情况相同, 在W, 外表和心部的温差最大, 是产生最大热应力的时期。正好在W时, 中心部首先进入珠光体相变范围。因此, 若将图上虚线所示的弹性状态下的应力认为是内应力, 那末由于心部相变而体积增加, 外表的拉伸应力急剧增加。但是这个应力已经超过该温度下的屈服强度, 所以实际的应力变成实线所示的样子。若在热应力反向前心部发生相变, 则如图所示, 外表在内应力反转期间才进行马氏体相变。由于相变而体积膨胀, 外表的压缩应力急剧增加, 得到很大的压缩残余应力。这种分布是热应力型的分布。

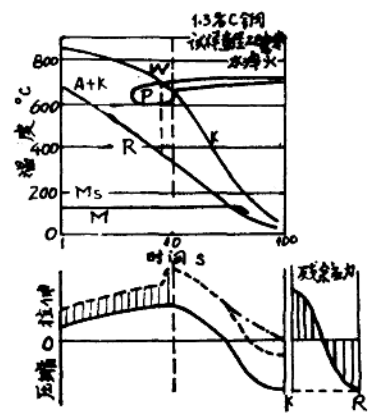


图8 心部未淬硬时产生的残余应力  
R: 外表 K: 心部

心部充分淬硬的情况示于图9。材料为含碳量低、马氏体产生温度较高的22CrMo22, 心部不经过珠光体转变, 外表和心部都进行马氏体相变。冷却时在最大温差W后, 外表立即发生相变。因而外表的应力急剧向压缩应力转化。这个内应力的反向是迅速进行的。这时外表的应力也不能超过该温度下的塑性压缩强度, 又由于心部塑性变形的影响, 实际上成为实线所示的应力。于是, 当相变从外表向心部进展时, 由于体积膨胀, 外表的压缩应力急剧减少, 内应力反向, 外表变为拉伸应力。其结果显示相变应力型分布。因此, 要得到相变应力型分布, 试样要能全截面淬硬。试样的截面小, 冷却剂的冷却能力大, 而且材料的高温强度大, 就能比较容易实现全截面淬硬。



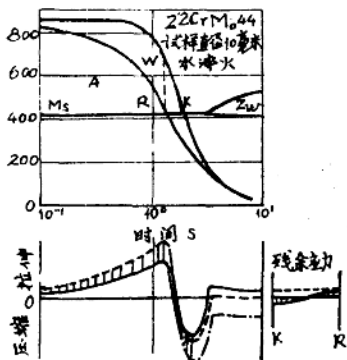


图9 心部淬硬时残余应力的产生  
R: 外表 K: 心部

以上是极端情况的例子。实际上由于试样成份的不同，连续相变曲线是多样的，另外，试样的直径当然也是不同的，因此，对于残余应力的产生必须研究某些判别条件。一般来说，心部相变在外表相变之后出现，是呈现相变应力型分布的标准之一。在这方面，根据各种材料的连续相变曲线和实际的相变行为进行了推断，当冷却到450℃期间，心部不经过珠光体相变等中间阶段的组织变化，而到450℃以下就完全进行马氏体相变，即得到完全的相变应力型分布，这就是一种判别条件。实际上，许多钢种淬火后，心部大多是马氏体和上述中间阶段的相变组织混在一起。在这种情况下，残余应力的分布也介于热应力型和相变应力型之间。对于这类分布，如果以450℃前后所出现的组织的相对量作为标准，也就可以把相对量与残余应力的分布相联系。

根据上述观点，将22CrMo44(C 0.19~0.26% Cr 0.90~1.20% Mo 0.40~0.50%) 钢材的10、30、100毫米直径的试样进行淬火，分别求出其连续相变曲线和冷却曲线、产生的内部应力和残余应力，还求出各种情况在450℃以下所生成的马氏体量，其结果示于图10。斜线部分表示组织内的马氏体量。残余应力是轴向残余应力。其分布属于下述图11的1~5组情况。

许多钢种的残余应力分布的研究结果中，可分为图11所示的5种类型，各分布中斜线部分表示出现次数较多的分布状态。此外，归纳这五种类型的残余应力分布，其试样直径和冷却到450℃的心部所生成的中间组织量之间的关系示于图12。从100%减去横轴的组织量，就是450℃以下生成马氏体的相变量。图12是水淬试样的结果，若淬火时急冷条件不同，则心部和外表的冷却曲线关系将改变很大，与此对应的残余应力分布范围也要变化。

以上，以水淬的残余应力的产生为对象，进行了说明，这些结果不能完全适用于油淬的情况。按过去的观察，在淬火的冷却过程中，油淬时外表和心部的温差，比水淬时小，而且两者由于冷却时热应力变化所产生的变形速度也有明显的区别，显然，两者高温时的塑性屈服状态也不一样。油淬时冷却过程中产生的热

以上是极端情况的例子。实际上由于试样成份的不同，连续相变曲线是多样的，另外，试样的直径当然也是不同的，因此，对于残余应力的产生必须研究某些判别条件。一般来说，心部相变在外表相变之后出现，是呈现相变应力型分布的标准之一。在这方面，根据各种材料的连续相变曲线和实际的相变行为进行了推断，当冷却到450℃期间，心部不经过珠光体相变等中间阶段的组织变化，而到450℃以下就完全进行马氏体相变，即得到完全的相变应力型分布，这就是一种判别条件。实际上，许多钢种淬火后，心部大多是马氏体和上述中间阶段的相变组织混在一起。在这种情况下，残余应力的分布也介于热应力型和相变应力型之间。

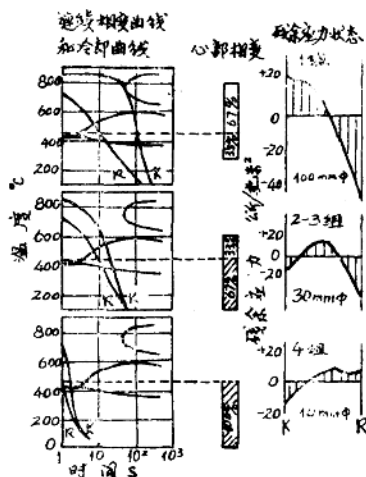


图10 不同直径的20CrMo44钢的连续相变曲线，冷却曲线和残余应力<sup>5)</sup> (图中斜线表示心部的马氏体量)  
R: 外表 K: 心部