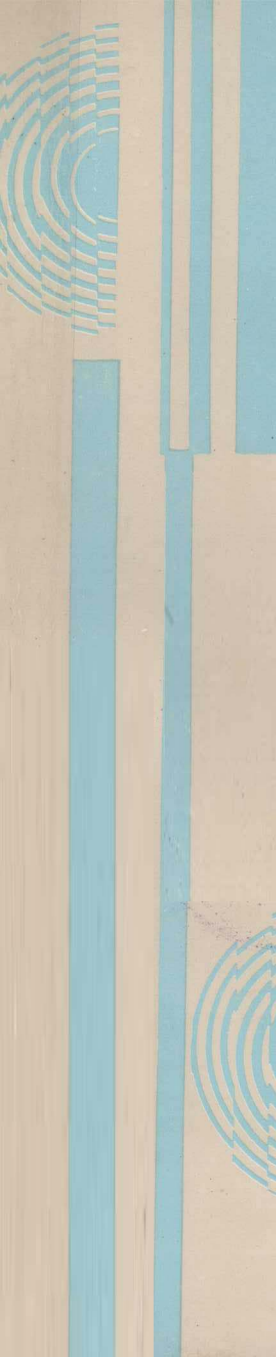


房德馨 主编

金属的残余应力 与 振动处理技术



大连理工大学出版社

金属的残余应力 与振动处理技术

江苏工业学院图书馆
藏书章

孙丰华 编著
张锡成 审校

大连理工大学出版社

内 容 提 要

本书比较系统地阐述了金属构件残余应力的基本概念、产生过程和影响,及目前通常采用的各种测试方法的原理和技术,简单地论述了各种调整残余应力工艺的力学原理。对目前正在发展的较先进的调整残余应力新技术——振动时效工艺的原理、作用和技术做了全面的介绍。

本书取材新颖、结构紧凑、实用性强。既可作为高等工业学校工程力学、航空、造船、机械等专业的教材,也可供专门从事残余应力课题研究的工程技术人员参考。特别是对于从事振动时效工艺研究的技术人员更有其实用价值。

金属的残余应力与振动处理技术

Jinshu de Canyuyingli Yu Zhendong Chuli Jishu

房德馨 主编

大连理工大学出版社出版发行
(大连市凌水河)

大连船舶印刷公司印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 5

字数: 107 千字

1989年12月第1版

1989年12月第1次印刷

印数: 0001—2000

责任编辑: 罗鸿

责任校对: 里 木

封面设计: 羊戈

ISBN 7-5611-0223-2/TH·9

定价: 1.04元

前 言

金属的焊接、淬火、铸造等工艺过程都会使构件产生残余应力。残余拉应力的存在降低了构件的使用强度和疲劳寿命，增强了应力腐蚀作用。残余应力的存在又将使构件产生较大的变形而影响尺寸精度。由于残余应力是构件产生变形和开裂的重要原因之一，因此在机械设计中必须考虑它的存在。

目前，国内外都在认真地研究残余应力问题。但是，由于残余应力受产生的条件影响很大，且随时间的变化在不断改变其量值，再加上测试技术的限制，所以残余应力在分布和量值上具有很大的随机性。这样一来使得对残余应力的观察及其对构件影响的研究都产生了很大的困难。近年来，由于测试技术的逐步提高，测试手段的逐步更新，使对残余应力的研究取得了一定的进展，已有了不少关于残余应力产生机理、测试手段、残余应力调整等方面的文献资料。但关于残余应力的专著国内外还不多。

有关残余应力的研究，虽然从本世纪初就已开始，但至今仍在进行深入的研究。也就是说至今的研究成果，仍不能定量地满足工程设计需要。特别是随着断裂力学的发展，残余应力做为一个重要影响因素，更加引起人们的重视。

本书是作者根据有关文献资料并结合自己的科研成果编写而成，比较简明地阐述了金属构件残余应力产生的机理、

残余应力的测试技术、残余应力对金属构件机械性能的影响，并对残余应力的调整方法及原理，特别是用振动消除残余应力的原理和应用做了较多的论述。本书按如下顺序编写：

（1）残余应力产生机理。通过力学模型阐明了残余应力产生的力学机理及其对金属材料力学性能的影响。并通过几种典型工况产生的残余应力分布规律来说明其一般性与特殊性。

（2）残余应力的测试方法。残余应力测试技术的研究是一个重要问题，目前所有的测试方法都有一定的局限性，因此国内外都在积极研究新方法。原有的各种方法都有其各自的适用范围，因此本书除超声法（尚不成熟）之外，对其它方法均加以简要的说明。对于一些复杂结构，综合使用各种测试方法进行残余应力测试，可以得到较满意的结果。

（3）残余应力的调整。根据残余应力对金属构件性能影响的阐述，残余拉应力对金属构件一般来说是不利的，而残余压应力是有利的。从这一点出发，多少年来人们一直在研究调整残余应力的各种方法。本书除简要地介绍了常用的各种方法之外，更详细地阐述了目前国内外正在开始采用的一种新方法——振动调整应力法。系统地论述了这种方法的原理、设备及工艺，并给出实例。期望对从事振动处理技术的工程技术人员有所帮助。

由于我们水平有限，缺点错误在所难免，望读者批评指正。

本书由大连理工大学工程力学系房德馨主编，参加编写的还有孙丰华及贾阿兴、官照坤等。张锡成教授审阅了全书。

本书在编写过程中得到了齐齐哈尔第一机床厂汪显志高级工程师、西北工业大学高飞副教授、海伦振动时效设备厂等单位和个人的大力支持，在内容和编排上提出了宝贵的建议，特此表示感谢。本书在内容上参考和引用了国内外的有关文献和资料，在此谨向各文献的作者表示衷心的感谢。

编者

1987年6月于大连理工大学

目 录

第一章 概论	1
§ 1—1 残余应力.....	1
§ 1—2 残余应力的产生机理.....	2
一、机械加工引起的残余应力.....	2
二、温度不均引起的残余应力.....	4
三、构件尺寸公差引起的残余应力.....	9
§ 1—3 残余应力的影响.....	9
一、对金属材料屈服极限 (σ_s) 的影响.....	9
二、残余应力对疲劳寿命的影响.....	10
三、残余应力对构件变形的影响.....	13
四、残余应力对金属脆性破坏的影响.....	13
五、残余应力对应力腐蚀开裂的影响.....	14
§ 1—4 残余应力的分类.....	15
第二章 几种典型工况下残余应力产生过程	17
§ 2—1 铸造引起的残余应力.....	17
一、截面内保持自相平衡的残余应力.....	17
二、构件之间保持平衡的残余应力.....	18
三、型砂抗力产生的残余应力.....	19
四、组织应力的产生.....	19
§ 2—2 淬火产生的残余应力.....	20

一、由热应力产生的残余应力·····	20
二、由相变产生的残余应力·····	21
§ 2—3 焊接残余应力·····	23
一、焊接残余应力的产生·····	23
二、几种典型的焊接应力·····	24
第三章 残余应力的测定方法 ·····	27
§ 3—1 分离法测量残余应力·····	28
一、切割法·····	28
二、套环法·····	29
三、切割法与套环法的对比实验·····	30
§ 3—2 盲孔法测量残余应力·····	31
一、理论公式的推导·····	32
二、实验标定法·····	37
三、钻孔装置及钻孔要求·····	40
§ 3—3 喷砂打孔法·····	42
§ 3—4 X射线法测定残余应力·····	44
一、X射线法测应力的基本原理·····	44
二、应力计算公式的推导·····	46
三、测试程序框图·····	50
§ 3—5 磁性法测残余应力·····	51
一、测量装置原理·····	52
二、实验步骤·····	55
第四章 残余应力调整技术 ·····	61
§ 4—1 热作用对残余应力的影响·····	62
一、热作用调整残余应力的原理·····	62
二、热作用法去除残余应力的实例·····	64

§ 4—2 机械作用法去除和调整残余应力·····	66
一、机械法调整残余应力的原理·····	66
二、机械法调整残余应力常用工艺·····	70
第五章 振动处理技术的原理与应用·····	72
§ 5—1 振动时效的特点及其发展概况·····	72
一、振动时效工艺的简单程序·····	72
二、振动时效工艺的特点·····	73
三、振动时效工艺的发展及应用·····	74
§ 5—2 振动调整应力的原理·····	77
一、等幅荷载作用下金属材料的应力与应变·····	77
二、振动处理过程中材料的应力和应变·····	78
三、残余应力与作用应力关系的实验研究·····	79
§ 5—3 振动时效工艺的制定·····	82
一、交变应力下结构动态参数的变化·····	82
二、振动处理工艺的制定方法·····	90
三、振动处理工艺主要参数选择标准·····	108
四、构件的组合振动时效技术·····	109
第六章 振动时效对金属构件的作用·····	112
§ 6—1 振动处理对金属材料力学性能的影响·····	112
一、金属材料的抗拉性能试验结果·····	112
二、材料断裂韧性的测试和分析·····	113
三、振动处理对材料疲劳极限的影响·····	114
§ 6—2 振动时效对构件变形的作用·····	118
一、振动时效对零件尺寸精度的影响·····	118
二、振动时效提高工件抗静、动荷载变形能力的 作用·····	120

§ 6—3 振动处理对构件残余应力的影响·····	122
一、振动时效处理对A272F—0139并条机车面 残余应力的影响·····	122
二、振动处理对焊接管节点焊址处残余应力的 影响·····	123
§ 6—4 振动处理对焊接构件疲劳寿命的影响·····	129
§ 6—5 振动处理技术的适用性·····	131
第七章 振动处理工艺应用实例·····	134
§ 7—1 C620 床身铸件振动处理工艺制定·····	134
一、振动处理参数的选择·····	134
二、C620 床身铸件振动处理工艺·····	136
§ 7—2 QA11-6.3×2000A 剪板机滑块振动时 效工艺规程·····	137
一、工艺参数·····	137
二、工艺卡·····	139
三、振动处理的作用·····	140
§ 7—3 提高焊接构件疲劳寿命的振动处 理 技 术·····	141
一、用振动处理提高焊接管节点疲劳寿命的试 验过程和结果·····	141
二、用于提高焊接构件疲劳寿命的振动处理工 艺参数的选择标准·····	149

概 论

§ 1—1 残余应力

残余应力是指在没有对物体施加外力时，物体内部存在的保持自相平衡的应力系统。它是固有应力或内应力的一个。

现用最简单的例子来说明残余应力的产生，图 1.1 所示是 1912 年 Martens, Heya 等人提出的模型^[1]。设有三个弹簧，图 1.1 (a) 为自由状态，图 1.1 (b) 为用刚性板将弹簧的上下

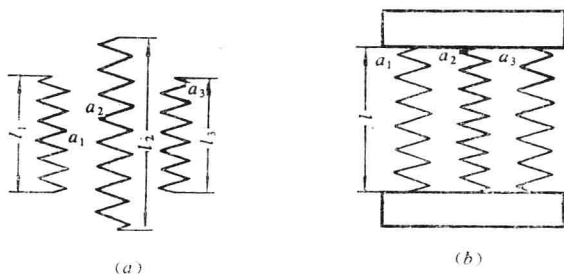


图1.1 用弹簧模型说明残余应力产生的示意图

两端连接起来的状态。由于三根弹簧长度与弹性常数均不同，刚性板连接后三根弹簧都发生了变形，产生了相互作用

力。假如各弹簧的长度和弹性常数分别为 l_1, l_2, l_3 和 a_1, a_2, a_3 , 当用刚性板连接后长度均为 l 。这时每个弹簧上受力分别为 $P_1 = a_1 (l - l_1)$; $P_2 = a_2 (l - l_2)$; $P_3 = a_3 (l - l_3)$ 。且有 $P_1 + P_2 + P_3 = 0$ 。这里 P_1, P_2, P_3 就相当于残余应力, 且自相平衡。

§ 1—2 产生残余应力的机理

各种机械工艺如铸造、切削、焊接、热处理、装配等都会使构件内出现不同程度的残余应力。从残余应力产生的原因来说, 可分成如下几类:

1. 由于机械加工产生不均匀的塑性变形引起的残余应力。

2. 由于温度不均造成的局部热塑性变形或相变作用引起的不均匀塑性变形而产生的残余应力。

3. 由于装配公差产生的残余应力。

此外还有化学变化等多种原因都可产生残余应力。

由于产生残余应力的原因不同, 因此构件内残余应力的分布和量值也不相同。某点的最终残余应力的量值, 是由各种原因产生的残余应力的综合值。

现将产生残余应力的几种主要原因的力学模型分述如下。

一、机械加工引起的残余应力

这是金属构件在加工中最易产生的残余应力。当施加外力时, 物体的一部分出现塑性变形, 卸载后, 塑性变形部分限制了与其相邻部分变形的恢复, 因而出现了残余应力。

如图 1.2 (a) 所示, 当一均匀梁受纯弯曲且上下表面进入塑性时, 沿横截面各层上的应变分布如 aa' 线所示。其中 mn 部分产生了塑性变形, 而 no 部分仍处于弹性状态。当外力去除

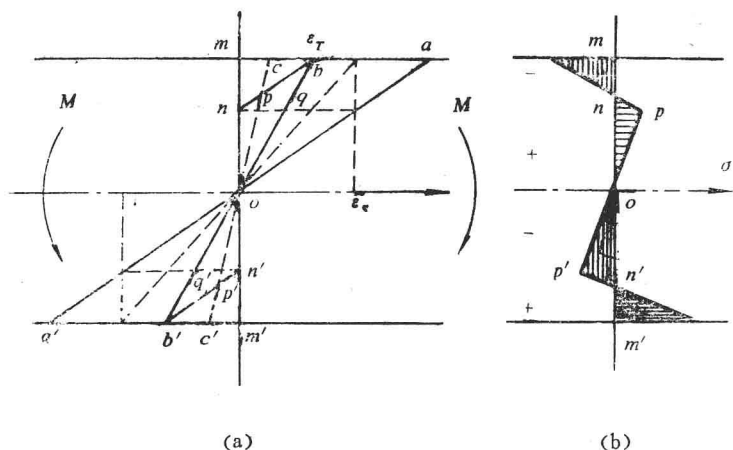


图1.2 弹塑性梁残余应力的产生

时梁的变形得到恢复, 各点的应变也得到释放, 但梁的上表面 m 点深至 n 点这一层内已产生塑性变形, 设上表面 m 点的塑性应变为 ϵ_T , 则当截面 mm' 各点的应变恢复到折线 $bnon'b'$ 时, 整个截面内将不存在应力。但实际上梁截面内应变分布是以中性层为坐标原点的线性分布, 所以当上表面的应变值从 ϵ_e 降至 ϵ_T 时, 截面内各点仍有不平衡的弹性应变如 $\triangle bon$ 所示。因此梁的变形将继续恢复, 并使表面往下某一深度内产生压缩应变如 $\triangle bpc$ 所示。这时梁内出现了如图 1.2 (b) 所示的应力分布。直到所有的应力在梁轴向总和为零且对 o 点的力矩为 0 时, 截面处于平衡状态而不再发生变形。这时沿

截面各点出现了正负相间的自相平衡的应力系统，这就是残余应力。

上述分析可见，构件在外力作用下出现局部的塑性变形，当外力去除时，这些局部的塑性变形限制了整个截面变形的恢复，因此产生了残余应力。

这种由局部塑性变形引起的残余应力，在很多加工工艺中均会出现，如锻压、切削、冷拔、冷弯等等。这种残余应力往往是很大的。

二、温度不均引起的残余应力

这种残余应力的产生主要有下面两种原因：

其一，是由于温度不均造成局部热塑性变形；

其二，是由于相变引起的体积膨胀不均。

温度的变化和在温度作用下材料力学性能的变化是引起上述两种现象的主要原因。

1. 由于热塑性变形不均产生的残余应力^[2]

(1) 钢材屈服极限随温度变化曲线

金属材料在高温下其性能将发生很大的变化，如屈服极限、弹性模量随温度的升高而下降。如果构件上温度场的温度梯度较大，则屈服极限和弹性模量的分布也是不均的，因此在高温下出现的热塑性也是不均匀的。

采用标准拉伸试件测量钢材在不同温度场中的屈服极限 σ_s 值，并绘制成如图1.3所示的曲线。

从图中可见，随着温度的变化，材料的屈服极限不是一个定值。为了分析和计算上的需要，有人根据曲线变化规律做了如下假设：

①在 $0\sim 500^{\circ}\text{C}$ 阶段材料的屈服极限不变，等于常温时

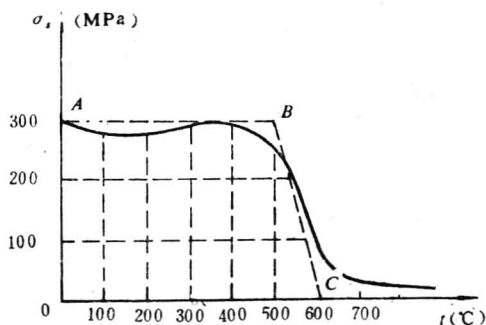


图1.3 σ_s - t 曲线示意图

的屈服极限 σ_s 。

②当温度在 $500 \sim 600^\circ\text{C}$ 阶段时，材料的屈服极限成线性下降至零。

③当温度超过 600°C 以后，可以认为屈服极限为零。

上述假设是近似地描述钢材随温度变化的规律。事实上当温度超过 600°C 时屈服极限只是越来越小趋近于 0。实践证明上述近似假设基本上可以满足工程实际要求。

(2) 钢杆在 500°C 以下均匀加热时的变形

现以一端固定支承，另一端有不同边界条件的均质钢杆在 500°C 以下均匀加热时的变形及应力情况说明由于热塑性变形产生残余应力的过程。

①一端固定而另一端自由的情况

如图1.4所示，当温度上升时，杆将自由伸长。现以 T_0 为变化温度值，且有

$$0 < T_0 < 500^\circ\text{C}$$

则杆的伸长为

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot T_0 \quad (1)$$

式中： l 为杆的原长， Δl 为温度升高 T_0 时杆的伸长量， α 为材料的线膨胀系数。

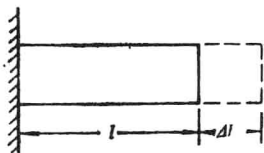


图1.4

(1) 式表明，在均匀温度场中，随着温度的上升，杆的热伸长 Δl 将成线性增加。但由于这时是处于自由热膨胀，不受任何约束，因此杆内并无应力存在。降温过程同升温过程一样，当温度降到初始温度时 $\Delta l = 0$ ，则 $\varepsilon = 0$ ， $\sigma = 0$ 。

②杆的伸长受到约束的情况

如图 1.5 所示，在加热过程中杆的伸长受到阻碍，使伸长量只有 b ，总的长度为 $l + b$ 。如果杆的伸长不受阻碍时其伸长量应为(1)式 $\Delta l = \alpha \cdot l \cdot T_0$ ， $\Delta l > b$ 。因此杆伸长受阻后实际被压缩 $\Delta l - b$ ，故杆内有应变

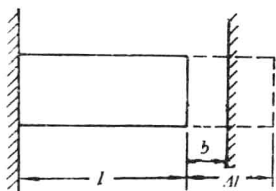


图1.5

$$\varepsilon = \frac{\Delta l - b}{l}$$

再由虎克定律可得杆内应力

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \left(\frac{\Delta l - b}{l} \right) = E \left(\alpha T_0 - \frac{b}{l} \right) \quad (2)$$

当 $\sigma < \sigma_s$ 时，降到初始温度则有 $\alpha T_0 = \frac{b}{l}$ ，所以 (2) 式变

为 $\sigma = 0$ 。

上述说明，尽管加热后变形受到约束，使构件内出现应力，但如果这个应力为热弹性应力，则降温后构件内仍无残余应力存在。

如果在加热伸长过程中，杆件在阻力作用下有 $\sigma > \sigma_s$ ，则在热弹性变形之外还存在热塑性变形，其应变值为

$$\varepsilon_T = \left(\alpha T_0 - \frac{b}{l} \right) - \varepsilon_s \quad (3)$$

其中： ε_T 为热塑性应变， ε_s 为温度达到 T_0 时的屈服应变极限值。

逐项分析可知， αT_0 为杆件温升 T_0 时自由伸长总变形率， $\frac{b}{l}$ 为杆件伸长受阻后实际变形率， ε_s 相当于热弹性应变，显然 ε_T 即为杆件的热塑性应变。

当温度下降时，杆件开始收缩。首先恢复的是弹性部分，其应变恢复量为 ε_s 。当温度降至原有温度时，由于杆件曾出现塑性压缩而减少 $\Delta l = l \cdot \varepsilon_T$ ，故这时的杆长应为

$$\begin{aligned} l' &= l (1 - \varepsilon_T) \\ &= l \left(1 - \alpha T_0 + \frac{b}{l} + \varepsilon_s \right) \end{aligned} \quad (4)$$

即冷却后杆件缩短，其量值等于加热时的热塑性变形。但在冷却时杆的恢复呈自由状态，因此杆内仍无应力存在。

③杆件在伸长和恢复时均受到约束

图 1.6 表明不但构件的伸长受到限制，而且其收缩也受到限制。当温度升至 T_0 时，塑性应变