

# 残余应力的 产生和对策

〔日〕米谷茂 著

# 残余应力的产生和对策

〔日〕米谷茂 著  
朱荆璞 邵会孟 译  
伍尚礼 校



机械工业出版社

本书是当前较为全面介绍“残余应力”的书籍。著作综合了本世纪来,直至七十年代初,世界各国有关残余应力的研究论著。对于机械工程中产生残余应力的各个工序(包括铸造、压力加工、焊接、机加工、热处理等)进行了系统的论述和分析。因此,本书是研究金属材料残余应力的很好的参考书。

全书共分五章:第一章残余应力的基本概念;第二章残余应力的各种检测方法;第三章机械工程中各种加工方法产生残余应力的机理;第四章残余应力对材料机械性能和工艺性能的影响;第五章消除和调整残余应力的各种工艺措施。

本书可供机械、冶金、材料、力学等方面从事科研、生产的科技人员参考,也可作为有关高等院校师生的教学参考书。

## 残留応力の発生と対策

米谷茂 著

東京株式会社養賢堂 1975

\*

## 残余应力的产生和对策

〔日〕米谷茂 著

朱荆璞 邵会孟 译

伍尚礼 校

\*

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)

轻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 787×1092 1/32·印张 11 1/8·字数 242 千字  
1983年4月北京第一版·1983年10月北京第一次印刷

印数 0,001— 8,700·定价 1.15 元

\*

科技新书目: 44-112

统一书号: 15033·5340

## 译校者的话

本书作者米谷茂先生长期以来对残余应力问题进行了许多研究，曾发表过多篇论文，并在日本《机械的研究》杂志上（1970~1972年）举办了“残余应力”连载讲座。1975年米谷茂先生著成《残留応力の発生と対策》一书，由日本養賢堂发行出版。本书即据此译出。

米谷茂先生搜集了本世纪以来，直到七十年代初期，世界各国关于残余应力的几百篇论著，将其中的一项重要研究成果均摘要地引入本书。正是由于作者这种严肃认真的态度和辛勤劳动的结果，才使我们读到了这样一本较完善的有关残余应力的参考书。在过去的一些有关材料和力学等的书籍中，由于对残余应力研究很少，因而很少论述有关这方面的问题，而这本完全以残余应力为论述对象，把多年来的全世界研究成果系统全面地介绍给读者。这对每个研究和了解残余应力的读者来说，是有一定参考价值的。

关于残余应力对材料机械性能的影响，以及它在实际工程中的巨大意义，近年来愈来愈为人们所认识。所以尽管从本世纪初就对残余应力开始了研究工作，而真正对它展开广泛工作，并取得很大进展，则还是近二十年的事情。目前全世界的有关学者正在对此展开大量的研究工作，有关论文正如雨后春笋在各国杂志上发表。我国过去对此研究得很少，但从七十年代初以来，由于X射线应力测定技术在我国逐步推广，残余应力的测定得到了有效的解决，有关残余应力的研究

也蓬勃发展起来。各方面的研究工作者深感迫切需要这样一本参考书。因此,我们获得本书后就立即动手将它翻译出来,以供大家学习参考。如果这本中译本的出版能对我国残余应力的研究起到一些促进作用,我们将为此感到十分庆幸。

本书共分五章,如前所述,包括了有关残余应力问题的各个方面。所以它不仅对机械工程、冶金工程、材料工程和力学方面的科技工作者很有参考价值,就是对其它各方面的科技人员,只要遇到有关残余应力问题,都将是一本很好的读物。

由于译校者的水平有限,从事残余应力研究的时间不长,因此书中错误之处在所难免,望读者不吝指正,我们将十分感谢。

译校者

## 序 言

机械或机械零件在制造过程中构件内部产生残余应力。构件制造时残余应力是产生变形和开裂等工艺缺陷的原因。而加工后构件内部的残余应力则将影响到腐蚀、疲劳强度等材料的各种机械性能。所以,在制造机械或零件时,对于所使用的材料来说,要保证充分发挥其理论的与实验的强度,就不仅要具备适当的和有效的设计方面、工艺方面的知识,而且还要考虑与残余应力有关的问题。

一般认为残余应力是难以理解的和触摸不到的东西,所以如此,首先是因为残余应力测定的手续复杂,极为麻烦。再者,残余应力的产生原因是复杂的,产生的状况也是多方面的,因此要想弄清楚就需要具有广泛的物理、化学及力学方面的知识。并且在考虑残余应力的影响时,离开材料的组织单独去考察其影响是极困难的。进而当人们对残余应力感兴趣,或者需要考察了解时,虽然有些入门式的说明书和有关测定方法等资料,但对其进行全面阐述的文献,却几乎没有。

本书是以从事机械制造及材料加工方面工作的技术人员和机械系、材料系的大学高年级学生为对象,对于“怎样测定残余应力,残余应力是怎样产生的,以及产生的残余应力怎样消除,残余应力的影响如何”等基础方面的问题,从理论上进行了详细阐述。

内容按照“测定方法”、“产生”、“影响”、“消除”和“调整”等方面进行叙述。这些内容就残余应力整体看是相互关联的。

(1) 关于“测定方法”，本书重点阐述机械法。对圆筒，板件等的基本测定原理进行了全面叙述。对形状复杂的实际构件的残余应力来说，将这些基本方法组合起来就可以进行测定。

(2) 关于残余应力的“产生”部分，对研究残余应力是极为重要的。其中，热处理残余应力的产生尤为重要。测定方法这部分内容包括其它残余应力产生的所有情况。在此，还增加了“热处理变形和残余应力”一节。

(3) 关于残余应力的“影响”，就残余压应力和残余拉应力来说，其影响一般可分为有利的和不利的两种情况，影响的差别极为明显。而且，残余应力可因外应力的作用而变化，还可以由此对其进行“调整”以改变其影响，这些都是值得注意的。

(4) 对于残余应力的“消除”，阐明了一般的方法及原理。不仅从消除而且从有效利用残余应力的这一方面来考虑，残余应力的“调整”也是很重要的。因此加入了校正一节。

有关残余应力的研究很早就进行了，在本世纪三十年代已在各个领域里对残余应力进行基础性的较深入广泛地研究，至今仍在继续进行研究。日本近年来也获得不少研究成果。本书的写作，参考了国内外多种文献，在此谨向各文献的作者表示衷心地敬意和感谢。其次向在本书写作过程中曾提出许多宝贵意见的东京工业大学中原一郎教授表示感谢。

最后，在本书出版之际，对完成校对及其他繁琐工作的养贤堂及川清先生和川岛利之先生表示深切的谢意。并对文献的收集，原稿的整理等其他工作中给予大力协助的高桥克明先生深致谢意。

著 者

# 目 录

译校者的话

序言

第一章 绪论 .....	1
残余应力的产生及其原因 .....	1
一、残余应力的产生 .....	2
(一)残余应力的产生原理 .....	2
(二)残余应力的分类 .....	5
(三)残余应力产生的原因 .....	6
二、基本的残余应力的产生实例 .....	7
(一)不均匀塑性变形产生的残余应力 .....	7
(二)热影响产生的残余应力 .....	10
(三)化学作用产生的残余应力 .....	13
三、微观残余应力 .....	14
参考文献 .....	17
第二章 残余应力的测定方法 .....	19
一、圆板、圆筒、球、线材残余应力的机械测定方法 .....	19
(一)圆板残余应力的测定方法 .....	19
1. 一般方法(逐层剥除法) .....	20
2. 切割法 .....	23
(二)圆筒残余应力的测定方法 .....	25
1. 一般方法(逐层剥除法) .....	26
2. 特殊方法 .....	39
(三)球的残余应力测定方法 .....	45
(四)线材的残余应力测定方法 .....	46



1. 轴向残余应力的测定方法 .....	46
2. 剪切残余应力的测定方法 .....	49
参考文献 .....	51
二、梁、板、薄壁圆管残余应力的机械测定方法 .....	52
(一)长方形截面梁的残余应力测定方法 .....	53
(二)平板残余应力的测定方法 .....	58
(三)薄壁圆管残余应力的测定方法 .....	61
1. Davidenkov 法 .....	61
2. Sachs-Espey 法 .....	66
3. Birger 法 .....	69
参考文献 .....	74
三、用切取、切槽和钻孔测定残余应力的方法 .....	75
(一)切取法与切槽法 .....	75
1. 切取法 .....	75
2. 切槽法 .....	79
(二)钻孔法 .....	86
1. 机械测长法 .....	87
2. 电阻应变仪法 .....	89
3. 应用脆性涂料的方法 .....	101
4. 光弹覆膜法 .....	102
参考文献 .....	102
四、残余应力的物理测定方法 .....	103
(一)残余应力的 X 射线测定法 .....	104
1. 测定原理 .....	104
2. 简便方法 .....	110
3. 实际测定过程 .....	112
4. 残余应力分布的测定 .....	113
(二)残余应力的磁性测定方法 .....	116
(三)其他 .....	118

参考文献 .....	123
<b>第三章 残余应力的产生 .....</b>	<b>125</b>
一、淬火残余应力的产生 .....	125
(一)热应力产生的残余应力 .....	125
(二)热应力和相变应力产生的残余应力 .....	127
1. 相变应力 .....	128
2. 残余应力的产生过程和分类 .....	131
(三)圆筒的残余应力 .....	142
参考文献 .....	143
二、表面硬化热处理残余应力的产生 .....	143
(一)火焰淬火及高频淬火产生的残余应力 .....	144
1. 残余应力的产生过程 .....	144
2. 火焰淬火产生的残余应力 .....	146
3. 高频淬火产生的残余应力 .....	149
(二)渗碳淬火产生的残余应力 .....	152
1. 残余应力的产生过程 .....	152
2. 渗碳淬火产生的残余应力 .....	154
(三)氮化的残余应力 .....	157
参考文献 .....	158
三、热处理变形与残余应力 .....	159
(一)热处理变形及其有关的各种因素 .....	160
(二)变形的产生过程 .....	162
1. 由对称性形变所引起的变形 .....	162
2. 扭曲 .....	168
(三)实际出现的变形 .....	169
1. 圆柱状试样的变形 .....	169
2. 板状试样的变形 .....	172
3. 各种试样淬火的变形及其影响因素 .....	178
(四)表面淬火产生的变形 .....	178

参考文献 .....	180
四、切削和磨削时产生的残余应力 .....	180
(一)切削加工产生的残余应力 .....	181
1. 残余应力的产生原因 .....	181
2. 简单刀具切削所产生的残余应力 .....	185
3. 铣削产生的残余应力 .....	190
(二)磨削加工产生的残余应力 .....	190
1. 残余应力的产生原因 .....	191
2. 退火材料的磨削残余应力 .....	192
3. 热处理件(高硬度材料)的磨削残余应力 .....	194
参考文献 .....	196
五、冷作加工产生的残余应力 .....	197
(一)棒材因拉拔、挤压所产生的残余应力 .....	197
1. 拉拔产生的残余应力 .....	197
2. 拉拔残余应力的各种影响因素 .....	199
3. 挤压产生的残余应力 .....	205
4. 拉拔、挤压材料的尺寸变化 .....	206
(二)拉拔圆管产生的残余应力 .....	207
1. 无芯棒拉管产生的残余应力 .....	207
2. 有芯棒拉管产生的残余应力 .....	209
(三)冷轧产生的残余应力 .....	210
(四)表面加工产生的残余应力 .....	212
参考文献 .....	214
六、铸造残余应力的发生 .....	215
(一)残余应力的产生 .....	216
1. 在构件截面内保持平衡而存在的残余应力 .....	216
2. 构件间相互保持平衡的残余应力 .....	216
3. 由于铸造型砂的阻抗而产生的残余应力 .....	217
(二)在构件截面内平衡的残余应力 .....	219

(三)在构件间保持平衡的残余应力 .....	222
参考文献 .....	228
七、电镀产生的残余应力 .....	229
(一)残余应力的测定 .....	231
(二)电镀产生的残余应力 .....	237
1. 各种因素对残余应力产生的影响 .....	237
2. 各种金属的电镀残余应力 .....	239
(三)残余应力产生的原因 .....	241
参考文献 .....	243
八、焊接产生的残余应力 .....	244
(一)焊接产生的残余应力 .....	245
1. 残余应力的分类 .....	245
2. 残余应力产生的原因和过程 .....	247
(二)各种残余应力产生的实例 .....	252
1. 平板 .....	252
2. 焊接结构 .....	256
3. 点焊产生的残余应力 .....	257
参考文献 .....	259
<b>第四章 残余应力的影响 .....</b>	<b>261</b>
一、残余应力对静强度的影响 .....	261
(一)对静强度和变形的影响 .....	261
(二)对结构件静稳定性的影响 .....	269
(三)对硬度的影响 .....	273
1. 对压入硬度的影响 .....	273
2. 对回弹硬度的影响 .....	276
参考文献 .....	277
二、残余应力对疲劳的影响 .....	278
(一)冷加工和热处理造成的残余应力对疲劳强度的影响 .....	279
1. 应力交变所引起的残余应力变化 .....	280

2. 加工对残余应力的影响 .....	285
3. 热处理产生的残余应力的影响 .....	287
(二) 各种表面处理所引起的残余应力对疲劳强度的影响 .....	289
1. 应力交变所引起的残余应力变化 .....	289
2. 各种残余应力的影响实例 .....	291
参考文献 .....	295
三、残余应力对脆性破坏和应力腐蚀开裂的影响 .....	296
(一) 残余应力对脆性破坏的影响 .....	296
(二) 残余应力对应力腐蚀开裂的影响 .....	302
参考文献 .....	307
<b>第五章 残余应力的去除和调整 .....</b>	<b>308</b>
一、用热作用对残余应力进行去除和调整 .....	308
(一) 通过热作用去除应力的原理 .....	308
(二) 淬火件和加工件残余应力的去除 .....	313
1. 淬火件残余应力的去除 .....	313
2. 加工件残余应力的去除 .....	318
参考文献 .....	320
二、用机械作用去除和调整残余应力 .....	320
(一) 校正和残余应力 .....	321
1. 用反复弯曲校正机校正及残余应力 .....	321
2. 用拉伸校正机的校正及残余应力 .....	324
3. 其他 .....	324
(二) 用拉伸法去除残余应力 .....	325
(三) 用振动法去除残余应力 .....	328
(四) 通过表面加工调整残余应力 .....	331
参考文献 .....	332
三、铸造和焊接残余应力的实际去除方法 .....	333
(一) 铸造残余应力的去除 .....	333
1. 退火去除法 .....	333

2. 自然时效去除法 .....	335
3. 用静态作用应力去除法 .....	336
4. 振动去除法 .....	336
(二) 焊接残余应力的去除 .....	339
1. 用退火——焊缝部位热处理去除法 .....	339
2. 低温去除应力法 .....	340
3. 用预热法减少残余应力的产生 .....	341
4. 静态作用去除应力法 .....	341
5. 锤击去除法 .....	342
6. 振动去除法 .....	343
参考文献 .....	343

# 第一章 绪 论

## 残余应力的产生及其原因

在各种机械和机器的制造过程中，零件内部将产生残余应力。实际上，各种零部件加工时，构件其内部不产生残余应力的情况是很少的。所产生的残余应力状态，特别是其应力值的大小，是随各种加工方法或处理方法而有差别的。机械加工如拉拔、挤压、轧制、校正、切削、磨削、表面滚压、喷丸或锤击等，以及热加工的焊接、切割、铸造还包括淬火、回火之类的热处理等，都会产生各不相同的残余应力。

加工时对残余应力必须给予应有的重视。例如经热处理和机械加工后零件尺寸大的变形、磨削时的开裂、应力腐蚀和铸造、焊接时的尺寸变化、开裂等，都与加工过程和工件的各种弊病有关。所以就要采用相应措施如：对残余应力进行测定，并对其影响做出估计。但由于工艺方法改善和材料获得改进，而使得观察不到这些弊病时，就降低了对残余应力的注意，这就是尽管很早就开展了关于残余应力的研究，但其进展一直不大的原因。

然而，残余应力存在的重大意义就在于它对构件机械性能的影响和对它的利用。实际上在机械的使用过程中，发生意外的破坏事故时，除材料本身的结构和强度之外，多数是由于残余应力的影响造成的。特别是它对材料疲劳强度的影响就更为重要。当残余应力具有良好的应力分布时，效果极好。例如，对经喷丸强化的部位施加交变应力时，因为此处已产生

有残余压应力，从而减低了初始负载作用的平均应力。最近为了有效地利用这种残余应力，进行了越来越多的研究。

## 一、残余应力的产生

### (一)残余应力的产生原理

残余应力是在无外力的作用时，以平衡状态存在于物体内部的应力。在外力的作用下，当没有通过物体表面向物体内部传递应力时，在物体内部保持平衡的应力系称为固有应力 (Inherent stress) 或初始应力 (Initial stress)。热应力 (Thermal stress) 和残余应力 (Residual stress) 是固有应力的一种。而固有应力也被一些研究者称为内应力 (Internal stress)。

现用最简单的例子说明残余应力的产生。图 1.1 所示是 1912 年 Mariens、Heyn 等提出的。设有三个弹簧，图 1.1a) 为自由状态，图 1.1b) 是用刚性板将弹簧的上下两端连接起来的状态。此时并没有从外部施加作用力，而各个弹簧之间却产生了相互的作用力。如各弹簧的长度和弹性常数为  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$  和  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ ，刚性板连接后的长度为  $l$  时，则各弹簧上产生的力  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  分别为  $P_1 = c_1(l - l_1)$ ； $P_2 = c_2(l - l_2)$ ；

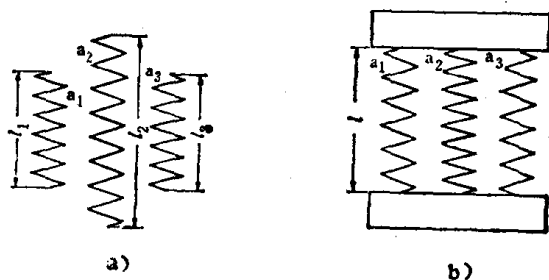


图 1.1 用弹簧模型说明残余应力产生的示意图



$P_3 = c_3(l - l_3)$ 。  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  即相当于残余应力并且  $P_1 + P_2 + P_3 = 0$ 。

一般，物体内部残余应力的产生过程可用图 1.2 说明。现在，从没有任何应力作用的物体内部  $R$  区域内，切取图中所示之正方形  $A$  部分。接着

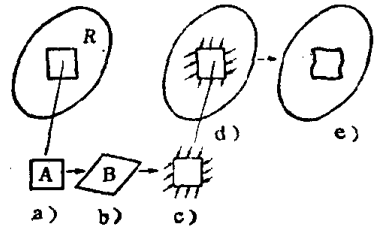


图 1.2 残余应力的产生过程

将切下的  $A$  部分用任意的操作使之进行体积变化和形状变化而成为  $B$  的形状。可以想象若将其再放入  $R$  区域内，使其成为  $c)$  所示的那样，则需由侧面施加作用力使之变形，再如  $d)$  所示将它放到原先的  $R$  内。若将施加的这个力释放时，结果则如  $e)$  所示放入的部分和其周边部分要调整变形，并在该区域产生应力场。这就是产生残余应力的状态。反之，如果测定出切取部分的变形量，即可推算出残余应力。实际上残余应力的测定，就是将物体进行切槽或切取，使残余应力部分释放或全部释放，用实验方法由释放时所产生的变形求出残余应力。

根据与上例相同的原理，也可应用弹性理论求出残余应力<sup>[4]</sup>。首先，将物体按假想状态分割成为若干分散的小部分来考虑。则这些部分将发生组织变化或塑性变形。把这些部分的永久变形在空间坐标  $x$ 、 $y$ 、 $z$  上分解成正应变(垂直应变)和切应变表示如下：

$$\varepsilon'_x, \varepsilon'_y, \varepsilon'_z, \gamma'_{xy}, \gamma'_{yz}, \gamma'_{zx} \quad (1)$$

(1)式之应变，如满足应变的适合条件式，则将各部分合成一体时，因各部分之间无不相适合的情况，所以不产生残余应力。但是，一般是不能满足适合条件式的，各部分合成一体时就显示出不相适合的情况。因此为了满足适合条件式，在各