

938721

金属冷热加工 的残余应力

中国纺织大学 方博武 编著

TG111
0041



高等教育出版社

金属冷热加工的残余应力

中国纺织大学 方博武 编著

高等教育出版社

内 容 简 介

本书主要论述:残余应力的形成机理及残余应力对零件机械性能和加工精度、尺寸稳定性的影响;热处理、铸造、压力加工、焊接、切削等冷热加工工艺的残余应力;形变强化(喷丸、冷滚压、锤击和拍打等)的残余应力;应力腐蚀和残余应力测定;典型零件实例的残余应力分析。

本书蒐集作者近年科研成果及国内外最近的文献资料,取材翔实,论述力求深入浅出,并紧密结合科研、生产实际。在编写本书过程中,曾广泛征求过有关专家及厂、所技术人员的意见。

本书可作为高等学校机械类专业的选修课教材和金属工艺学课程的参考书,亦适合机械设计和生产部门技术人员阅读参考。

金属冷热加工的残余应力

中国纺织大学 方博武 编著

*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 6.375 字数 159 000

1991年7月第1版 1991年7月第1次印刷

印数 0001—1 471

ISBN 7-04-002951-0/TH·234

定价 4.00 元

前 言

残余应力是指在无外力或温度差等外来因素作用的情况下,存在于金属材料或机械零件内部并保持平衡的应力。机械零件加工之后,总伴随产生残余应力,它对零件的性能有着不容忽视的影响。这种影响主要反映在疲劳强度、抗应力腐蚀能力和零件精度、尺寸稳定性等方面。因此,近年来国内外的研究单位和生产部门对加工所引起的残余应力日益关注,已经有许多研究报告和理论文章公开发表。

笔者近年从事残余应力的研究,曾在这个基础上编写过《金属冷热加工残余应力》讲义,作为我校机械制造及机械设计专业的选修课教材,以更新教学内容。此后,又在上海市农机学会、上海市金属切削协会支持下,开设“金属加工残余应力”讲座。在这期间,广泛听取了从事机械设计与加工工艺技术人员有关当今国内生产实际情况的各种意见。生产实际中有关残余应力的问题是大量存在的。例如,喷丸处理工艺,虽然不少工厂采用,但多半仅限于清理工序,而较少考虑到喷丸后表层残余应力对零件疲劳寿命的显著影响。事实上,表层残余压应力在一定条件下能使疲劳寿命成倍增长。

最近几年,已有越来越多的单位前来咨询生产中遇到的残余应力问题,其内容涉及热处理、焊接、切削加工和形变强化等很多方面。

鉴于上述形势,笔者以选修课讲义和讲座讲义为蓝本,再充实国内外最新资料提供的部分内容,编著成本书,作为机械制造与机械设计等机械类专业的选修课教材和金属工艺学课程的教学参

考书，也可供有关专业技术人员阅读。

全书共分十一章，其中第一、二两章分析残余应力产生的原因，残余应力对零件性能的影响；第三至七章分别介绍热处理、铸造、压力加工、焊接及切削加工等工艺对残余应力的影响。此外，还介绍了形变强化残余应力及其对零件性能的影响、应力腐蚀、残余应力测定和典型零件的残余应力分析。

本书承天津轻工业学院郭晓鹏教授审稿，并提出很多积极建议和补充资料，在此表示衷心感谢。编写时还蒙校友谢颖武老师大力支持，特此致谢。

本书在理论上力求深入浅出，并使理论与生产实际密切结合。限于笔者水平，书中欠妥之处在所难免，希专家、读者不吝批评指正。

编 者

1989年8月

常用符号

A	截面面积
a_r	切削深度
B	磁感应强度
\mathbf{B}	磁感应强度向量
d	晶面间距
E	弹性模量
F	载荷(外力)
H	磁场强度
\mathbf{H}	磁场强度向量
HRB	洛氏硬度(B标尺)
HRC	洛氏硬度(C标尺)
HV	维氏硬度
L	轴向;纵向;长度
l	长度
M	力矩
M_s	马氏体终止转变温度
M_s	马氏体开始转变温度
N	循环次数(寿命)
R	径向;半径
r	半径
r_n	刀具刃口圆弧半径
r_s	刀具刀尖圆弧半径
T	切向;温度

t	温度
v	切削速度
v_k	临界冷却速度
z	轴向,纵向
α_0	刀具后角
γ_0	刀具前角
ϵ	应变变量(相对变形量)
θ	掠射角; 切向
κ_r	主偏角
κ'_r	副偏角
λ	波长
λ_s	刀具刃倾角
μ	磁导率
ν	泊桑比
σ	应力(正应力)
σ_{-1}	弯曲对称循环变应力的疲劳极限
σ_a	应力幅
σ_b	抗拉强度极限
σ_r	径向应力; 残余应力
σ_s	屈服强度极限
σ_z	纵向应力
σ_y	横向应力
σ_x	轴向应力
σ_θ	切向应力
τ	时间; 剪切应力
ϕ	直径
ψ	晶面方向角

目 录

常用符号	3
绪论	1
一、应力、应变和残余应力	1
二、残余应力的形成机理	4
三、残余应力对零件的影响	6
第一章 金属冷热加工中残余应力的形成	7
一、残余应力的成因	7
二、多道工序中的残余应力	17
第二章 残余应力对零件机械性能的影响	19
一、零件的疲劳破坏过程	19
二、残余应力对疲劳强度的影响	25
三、残余应力与疲劳强度计算	29
四、残余应力对加工精度的影响	31
五、残余应力对尺寸稳定性的影响	34
第三章 钢的热处理残余应力	38
一、钢的热处理应力的形成	38
二、钢件的淬火应力和影响应力的因素	43
三、钢的表面热处理残余应力	49
第四章 铸造残余应力	66
一、铸件中残余应力的形成	66
二、影响铸件残余应力的因素	71
三、铸件残余应力的消除	76
第五章 压力加工残余应力	81
一、热变形工艺残余应力	81
二、冷变形工艺残余应力	83

第六章 焊接残余应力	93
一、焊接残余应力的分析	93
二、焊件的热应力	94
三、焊件残余应力分布的典型示例	96
四、不同材料焊件中的残余应力	103
五、提高焊件疲劳强度的方法	105
第七章 切削加工的残余应力	112
一、已加工表面的形成过程	112
二、金属切削表层残余应力的形成	113
三、单刃切削的残余应力	115
四、磨削残余应力	120
第八章 形变强化的残余应力	125
一、喷丸强化	125
二、冷滚压强化的残余应力	138
三、锤击强化残余应力与疲劳寿命	142
四、旋片拍打强化的残余应力	143
第九章 应力腐蚀	145
一、金属应力腐蚀开裂的特征	145
二、碳钢和低合金钢的应力腐蚀开裂	149
三、奥氏体不锈钢的应力腐蚀开裂	151
四、黄铜的应力腐蚀开裂	153
五、应力腐蚀的预防	156
第十章 残余应力测定	159
一、应力松弛法测定残余应力	159
二、X射线衍射法测定残余应力	165
三、应力敏感性法测定残余应力	176
四、残余应力测定方法的选择	181
第十一章 典型零件残余应力分析	182
一、弹簧的残余应力	182
二、齿轮的残余应力	184

三、发动机连杆的残余应力	188
四、止退弹簧卡环应力腐蚀	189
五、切削残余应力对扭杆不回零角影响	190
参考文献	193

绪 论

一、应力、应变和残余应力

当物体在外力作用下变形时,内部各部分之间由于相对位移而引起的相互作用力叫内力。例如图0-1即为试棒在外力 F 单向拉伸下发生变形而有伸长量 Δl ,这时试棒任意截面 $R-B$ 内将产生内力,它与外力 F 相平衡。面积为 A_0 的原始截面上各点内力的强弱程度,在平均分布条件下常表示作:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

这里的 σ 就叫做应力。

长度为 l_0 的试棒受外力拉伸后,长度方向的总变形量记作 Δl ,则其相对变形量常表示作:

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\%$$

这里的 e 就叫做应变量。

力学中以下式表示应力和应变的关系:

$$\sigma = E e$$

这里的 E 是试棒材料的弹性模量。

物体除了由外力产生的应力之外,温度差也会引起应力,例如图0-2所示的物体,单侧受到阳光照射受热而伸长,另一侧就会由于温度相对较低而遏制向阳一侧的热膨胀,从而在物体内部引起相对变形而产生应力。

以上这种由应变而产生应力的力学基本规律已为人所熟知。而本书将论述的残余应力,则是指在外界因素(外力或外部的温度差异)作用的情况下,由于种种原因而存在于物体(金属材料、

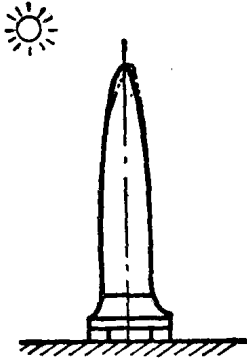


图 0-1 圆形试棒的拉伸

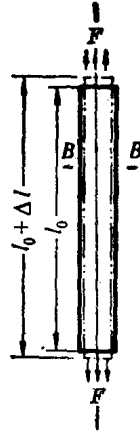


图 0-2 由温差引起应力的物体

机械零件、构件)内部并保持着平衡的应力。事实上,金属零件无论经过热加工或冷加工,都会产生残余应力,而它的分布则是各种各样的。图0-3是一种金属板料冷轧后的残余应力分布示意图。这种残余应力是由表层^①和心部材料的塑性变形程度不一致而造成的。一般讲,金属材料经冷轧后表层将呈现残余压应力,而心部则为残余拉应力^②。

图0-4是平面磨削后的残余应力分布示意图。

磨削残余应力的生成除了与塑性变形有关外,还有磨削温度引起的热应力以及其他因素的作用。这将在以后的有关章节中详细分析。

这里残余应力的分布呈现为表层压应力,而向里是拉应力。

图0-5是焊接后的残余应力分布示意图。

焊接残余应力是由焊接过程中不均匀加热引起的不均匀塑性

① 表层和表面是近义词,在本书中表层表示表面层,表面表示外表面。同理,心部和中心也是一对近义词。

② 正值表示拉应力,负值表示压应力。

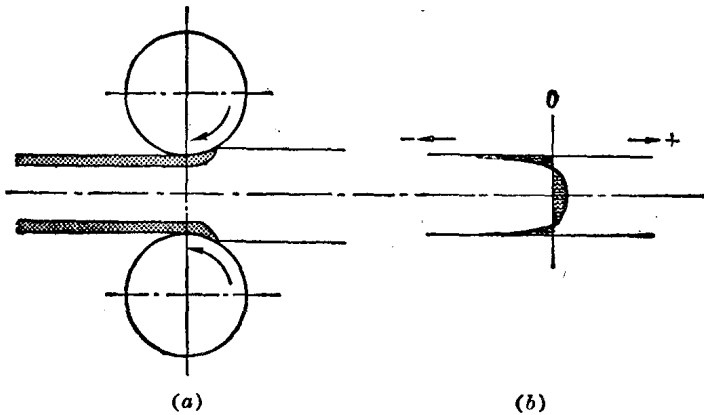


图 0-3 板料冷轧后残余应力分布
(a) 轧制过程的不均匀塑性变形；(b) 轧制后的残余应力分布

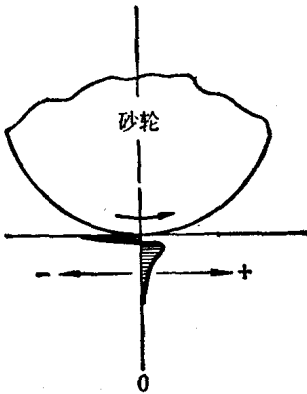


图 0-4 磨削后残余应力分布

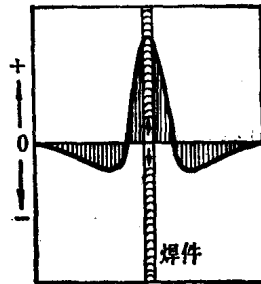


图 0-5 焊接后纵向残余应力分布

变形而形成的。它在贴近焊缝处呈现拉应力，外侧则为压应力。

残余应力是物体(零件)内部自相平衡的应力，但它的影响范围却可以有很大的差别。因此，常根据应力范围的大小，把残余应力分为下列三类：

(1) 宏观应力(第一类应力)

残余应力在全零件范围，或者其中较大的区域内(二维空间内线性尺度大于 0.1 mm)处于平衡状态。

显然,上述各例都应是这类残余应力。

(2) 微观应力(第二类应力)

残余应力在金属晶粒范围内(线性尺度在 $10^{-2} \sim 0.1$ mm 之间)处于平衡状态。

(3) 超微观应力(第三类应力)

指存在于金属晶界、滑移面、位错附近等,以及更微小的区域内的残余应力。

各类残余应力可用相应的测量方法进行测定。例如用 X 射线衍射法(详见第十章)测量时,则第一类应力能使衍射线发生位移;第二类应力能使衍射线宽化;第三类应力能使衍射线强度减弱。

本书主要讨论宏观残余应力的产生原因和对金属材料的影响,分析各种冷热加工中的残余应力,并介绍残余应力的多种测量方法。

二、残余应力的形成机理

如果从金属材料内部发生的变化过程来寻找残余应力的根源,则不难理解下述几方面的变化对残余应力的形成将起着主要的作用:

(1) 不均匀塑性变形

金属材料常由于加工的原因而引起不均匀的塑性变形,也就是材料的不同部分塑性变形量大小不一。这样,势必在不同部分之间出现相对的压缩或拉伸形变,从而形成残余应力。

滚压、拉拔、挤压、切削、喷丸等加工方式都能引起不均匀塑性变形。

(2) 金属的相变

金属材料常利用相变来获得所需要的性能。钢材热处理就是这样,目的是使材料发生所要求的组织转变,从而满足使用上的需要。但是,各种金相组织的比容不相同,它们之间就会出现相对的

形变,从而产生残余应力。例如,表层淬火后的马氏体比容较大而相对膨胀,在受到心部材料的阻碍后就在表面形成很高的残余压应力。

金属材料在热处理、焊接、锻造等热加工以及磨削等切削加工之后会出现相变应力。

(3) 温度差异

金属材料各部分之间如果有温度的差异(温度梯度),则由于它们膨胀不一致而产生热应力。当这种热应力超过屈服极限时,就会出现上面已讲到过的不均匀塑性变形,从而导致残余应力。

铸造、焊接、热处理等热加工方式,以至磨削加工,都能引起温度差异。

(4) 化学成分的差异

化学成分不同的金属材料,其比容也不相同。如果在一个机械零件上出现成分不同的部分,则根据前述同样的机理,零件内将产生残余应力。

化学热处理、喷镀等加工方式和表面脱碳都能引起化学成分的差异。

根据上述残余应力的形成机理可知,残余应力的出现虽有种种不同原因,但都是与材料内部的相对形变相联系的。因此,在分析机械零件或构件的残余应力时,必须注意下列三个方面的问题:

(1) 残余应力的平衡条件

存在于一个零件内的残余应力必须处于静态平衡,即该零件任一截面的合力和合力矩都为零:

$$\int \sigma dA = 0$$

$$\int dM = 0$$

(2) 残余应力的性质

残余应力属于弹性应力性质,也就是说,只有弹性应变才能产

生残余应力。塑性变形不可能有残余应力。

(3) 残余应力的极限

金属材料残余应力的极限值是该材料在应力形成时的屈服应力。如果应力超过屈服应力,则通过塑性变形而自动释放能量,使应力发生松弛,一直下降到该材料的屈服应力为止。

三、残余应力对零件的影响

早在西汉时期,我国就已经对残余应力有了认识。上海博物馆珍藏一面透光铜镜。这面铜镜的镜面平亮如水,而一旦有光照上镜面时,铜镜背面的花纹字迹就能清晰地反映于墙上。根据现有资料论证,这面铜镜的“透光”能力是与铜镜铸造和磨镜过程中所残留下来的应力有关的,而这种应力正是现代概念中的残余应力。

残余应力显著影响机械零件、构件的性能,这一点已在现代机器设计和制造业中越来越多地受到重视。

残余应力能影响零件的疲劳强度。当零件表面为压应力时,疲劳强度大大提高;反之,表面呈拉应力时,则又使疲劳强度明显下降。

残余应力能影响零件的加工精度,这是由于机械加工将引起前道工序的残余应力重新分布,从而导致零件变形的缘故。同样,残余应力随着时间的推移而进行缓慢松弛和再分布,则能破坏零件的尺寸稳定性。

另外,残余应力又是引起零件腐蚀破坏的一个重要因素(应力腐蚀)。表面拉应力能促使零件的应力腐蚀;而表面压应力则有利于提高零件的抗应力腐蚀能力。

以上涉及的内容本书都将分章详加论述。

总之,残余应力的出现,对机械零件、构件的性能存在有利和有弊两个方面。设计制造人员应根据具体条件选用合理的工艺,力求零件得到有利的残余应力分布。

第一章 金属冷热加工中残余应力的形成

金属材料在经过各种热成形和冷成形(铸造、锻造、焊接、轧制、拉拔、挤压和切削加工)以及热处理时,都会出现一些能引起残余应力的宏观过程。本章将根据残余应力的形成机理,讨论下列常见宏观过程中残余应力的成因:棒料弯曲,圆杆扭转,单向拉伸,局部加热,整体加热,不均匀相变,不等时相变。此外,本章还将分析多道工序中残余应力的相互影响。

一、残余应力的成因

1. 棒料弯曲过程

棒形零件如果在加工过程中有弯曲现象,就能在材料内部出现不均匀塑性变形,从而导致残余应力。

现在以矩形截面试棒为例,来说明这种残余应力的形成过程和它的分布。

设对某试棒施加一个向下的弯矩进行弯曲试验,则该材料的应力-应变性能如图 1-1 a 中的曲线 aO 所示。试棒在弯曲时,它中心线以上的各个纵向纤维将经受程度不同的拉伸,上表面伸长量最大,沿着中心线的垂线方向朝下逐渐减小,直到中心线处为零;在中心线以下,则纵向相似地经受压缩,压缩量中心线处为零,朝下增大,直到下表面处为最大值。如果试棒的弯曲应力没有超过材料的弹性极限,则在外加弯矩消失后,显然,试棒恢复原来的形状,即卸载后不会留下残余应力。但当试棒的弯曲应力超过屈服极限时,则试棒在弹性变形的同时又发生了塑性变形。这时试棒纵向