

高端装备关键基础理论及技术丛书

先进材料

残余应力 基础理论及应用

THEORY AND APPLICATION OF RESIDUAL STRESSES

高玉魁

著



上海科学技术出版社

高端装备关键基础理论及技术丛书·先进材料

残余应力基础理论及应用

高玉魁 著



上海科学技术出版社

内 容 提 要

《残余应力基础理论及应用》共分7章。第1章系统阐述了残余应力的产生机理,并说明了残余应力的影响;第2章详细介绍了磁测法、超声波法、X射线法和中子衍射法等残余应力无损检测技术;第3章介绍了小孔法、深孔法、切槽法和云纹干涉法等残余应力有损检测技术;第4章通过各种实例,说明了工程检测特点;第5章介绍了残余应力的调控与消除方法;第6章介绍了各向异性材料的残余应力,包括单晶、织构和复合材料等;第7章结合残余应力的具体工程应用实例,对预拉伸板、喷丸成形、表面强化等残余应力加以分析,阐述了残余应力的重要作用,并分析了残余应力对裂纹萌生和扩展的影响。《残余应力基础理论及应用》理论、实验与应用并重,宏观和微观相结合,既注重理论体系的完整性,又注重工程实际的应用性,其中介绍的典型零件涵盖了航空、汽车、核电、轨交、桥梁和化工等领域。本书是对近年来有关残余应力研究很好的总结,也是一部实用性较强的专业技术工具书。

《残余应力基础理论及应用》可供从事材料基础理论、热处理、表面工程、交通、航空航天、机械专业的技术人员与科研人员参考阅读,也可作为高等院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

残余应力基础理论及应用 / 高玉魁著. —上海:
上海科学技术出版社, 2019.7
(高端装备关键基础理论及技术丛书. 先进材料)
ISBN 978-7-5478-4406-9

I. ①残… II. ①高… III. ①残余应力—研究 IV.
①0343

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 063903 号

残余应力基础理论及应用

高玉魁 著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

上海盛通时代印刷有限公司印刷
开本 787×1092 1/16 印张 21.5 插页 8
字数 410 千字
2019 年 7 月第 1 版 2019 年 7 月第 1 次印刷
ISBN 978-7-5478-4406-9/TB·10
定价: 150.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题, 请向工厂联系调换

我的学生、现为同济大学教授的高玉魁要我给《残余应力基础理论及应用》一书写序,使我感到很高兴。残余应力目前已成为机器零件制造中需要关注控制的重要问题,但对很多在生产实际中工作的技术人员而言,对其作用机理有待进一步明确,对与其有关的测试评价技术也有待进一步掌握。这本专著的出版,无疑是很有意义的。

人类社会的生活离不开各种机器。机器都是由多个零件组成,每个零件都要采用合适的材料,经过设计和加工两大步骤制造而成,其主要目标是成形和成性(使材料及零件具备所需的形状和性能),以承担机器所需的功能,并且能安全和长久地工作。此外,还希望其制造工艺简单、低廉、高效,制成的零件重量轻。实际上,除了零件本身外,制造零件的材料也需要进行成形和成性,而进行材料及零件成形和成性的各种设备和工具也属于机器,因此机器制造业的主要基础就是零件制造业。新中国成立之初,我国的机器制造业极为薄弱,“洋钉”“洋车”等这些“洋”名,是我们这辈人的亲身感受;短短近 70 年来,我们亲眼看见我国的机器制造业突飞猛进,心中的自豪之情油然而生。当然,在零件的成形和成性技术方面,我国和一些先进国家相比仍有一定差距,要使我国真正变成制造业强国,还需要做出很大努力,需要生产、科研及教学人员继续向国外先进技术学习,对当前生产实际中存在的问题深入探索,形成有自己特色的东西。

残余应力,是材料及零件成形和成性工艺中必然会形成的重要参数,是一个古老而又日新月异的话题。我国早在古代进行金属冶炼和武器(特别是铁器)制造时,就注意到残余应力造成武器变形和开裂的现象,并采取了相应的措施。到了现代机器制造业,各种成形和成性工艺不断出现,成形技术有切削加工、铸造、压力加工、焊接等;成性技术除了整体成分调整和整体热处理之外,各种表面改性技术如表面热处理、化学热处理、表面形变(喷丸、表面碾压)、镀层等也广泛应用。在这些技术中,往往会采用加力、加热(冷却)等手段,而有些材料在加热冷却过程中还会

发生内部显微组织的变化,零件表面还会发生化学成分的变化,这些因素在零件表面和内部的分布一般都不均匀的,而这正是零件在加工完成后内部存在残余应力的原因,因此几乎所有的材料和零件都会与残余应力发生关系。如前所述,残余应力最早被注意到,是因为其造成零件的非预期性变形和开裂,使零件报废;而后的实践和研究还发现,残余应力对材料及零件性能的影响还有时效性,特别是当表面出现残余拉应力时,其会使材料和零件在放置或工作一段时间后突然开裂。这种延迟断裂在工程中表现为不可预期的疲劳断裂、氢脆、白点、焊后开裂、镀后开裂、应力腐蚀等,会造成十分严重的后果。后来,技术人员意识到,残余应力的作用,在很多情况下可以认为是其与外加应力叠加的结果。于是人们开始用一些手段来消除残余应力,一些智者更反其道而行之,希望在成形或成性的工艺中,如表面喷丸、表面碾压、负前角刀具切削等,使零件表面形成压应力,可以有效地改善零件的疲劳性能。综上所述,目前,残余应力在材料及机器制造业中已是十分普遍而重要的问题,也有可能变害为利,因此已成为材料及零件制造过程中的关键内容和核心技术之一。

残余应力对于机器零件制造的重要作用,虽已得到关注,但是应该承认,目前工程技术人员对其认识还不够深入,高校内对于残余应力知识的传授也显得不足。这是因为残余应力问题涉及的面很广,从生产层面来说,涉及设计、制造、测量等方面,而从知识层面来说,则涉及材料学、各种工艺学、力学、表面技术等方面,因此要想对残余应力有深入的了解,就必须从实际到理论都具备广阔深入的知识。

本书作者高玉魁教授,在本人指导下攻读硕士学位时,就开始从事疲劳性能和残余应力的研究,以后一直从事航空航天关键零部件定寿与延寿方面的科研和教学工作。他在工作中注意深入实际,并提高到先进的理论高度来认识;他在国家出版基金项目资助下,2014年已出版了专著《表面完整性理论及应用》;又从实际中,深知残余应力在机器制造业中的重要性,近年来一直注意扩充知识,收集资料,终于写成此书,实属难能可贵。该书应对我国成为制造业强国起一定作用。

姚 敏

原哈尔滨工业大学机械工艺系教授,
后燕山大学材料科学与工程学院教授(退休),
曾任中国机械工程学会材料分会副理事长

残余应力是影响材料和零部件变形、疲劳、应力腐蚀的重要因素。搞清楚残余应力的产生机理,准确表征其数值和分布情况,弄明白残余应力的作用机制和应用领域,并在此基础上对残余应力进行适宜的调控,这不仅是材料、力学、热处理、表面工程等多方面的学者进行研究所关注的重要科学问题,而且也是工程师、设计师在实际应用残余应力来计算寿命和制造维修时经常面临的关键技术问题。

中国制造已从原来以图纸形状导向为主的“仿形加工”“成形制造”“控形制造”,转向了以使役性能导向为主的“控性制造”。“控性制造”主要是控制表面完整性,而残余应力是表面完整性中重要的力学参数。

“材料是基础、设计是关键、制造是保障”,这是航空领域对设计、材料和制造的定位和认识。制造强国的核心是要有创新自主的知识和技术,尤其是核心的关键技术。这些技术都是国家的根本利益和属于机密性的文件,是买不来的,所以对于核心的技术我们只能自主研发和研发,如航空发动机核心零部件的制造技术和飞机关键零部件的长寿命表面完整性制造,再如高性能高集成度的芯片制造技术。制造技术不只是工艺的操作和工艺参数域的确定,还有制造机理和制造工艺与性能、功能相关性的认识和研究,我们往往侧重前者而对后者的重视不够,这导致了很多问题的出现,如制造中的变形与可靠性差、寿命短和性能没法达到预期的目标等。表面完整性中的残余应力是决定零部件使役性能的关键因素,因此加强和加深对残余应力的研究和认识,重视其重要作用并控制调整其状态和分布,是非常重要的和有意义的。

本书从残余应力的定义入手,首先阐述了残余应力的产生机理,其次对测试表征方法和作用机制进行了分析,在此基础上重点介绍了残余应力的调控技术和工程应用等各个方面,尤其是给出了复合材料、单晶材料等新型各向异性材料和零部件的残余应力测试方法。通常人们总是认为残余应力是有害的,它会导致零部件变形和开裂。本书结合航空工业的案例,从调控残余应力角度阐述了残余应力也

是很有利的,如采用喷丸在表层引入残余压应力来提高疲劳性能,再如铝合金的预拉伸板去除残余应力和采用喷丸成形来制造飞机机翼等,这些都是残余应力工程应用的实际典型代表案例。

本书对于从事残余应力相关工作的科研人员和设计师、工程师具有重要的参考价值,也可以作为高等院校相关专业本科生和研究生教材使用。为便于学生和工程师实际操作来测试残余应力,本书附录给出了 X 射线残余应力的测试步骤。为方便大家查阅术语和相关内容,还在本书最后给出了索引。

20 余年我之所以能够专心于残余应力的钻研和探索,得助于恩师——燕山大学教授姚枚先生一直以来给予的鼓励和关爱,得助于家庭的理解和大力支持。感谢姚枚教授能够带领我进入残余应力领域和欣然提笔为本书作序;感谢国家自然科学基金项目(1132226)、国家 973 计划(2010CB833105)、国防 973 项目(6138503)、大飞机项目和航空科学基金项目等给予的资助;感谢我的研究生们特别是叶璋硕士和陶雪菲博士,他们对本书初稿进行了整理和修改。

本书出版的主要目的是加强大家对残余应力重要性的认识和对残余应力研究与应用的重视。因著者的水平和能力有限,书中难免存在一些错误和不当之处,谨请读者批评指正。



2019 年 3 月 4 日于同济大学

符号表

(按字母排序)

I

符号表

a_i	第 i 个点距离源区的裂纹长度
A	存在残余应力时的压痕面积
A_0	无残余应力时的压痕面积
A_1	探头的磁路有效截面积
A_2	试件的磁路有效截面积
A_c	压头的有效接触面积
c	材料的定容比热
C_0	无残余应力的载荷-位移曲线的加载曲率
d	平行原子平面的间距
d_k	炸药的临界爆炸直径
dR	应力的改变量
$d\nu$	L_{CR} 波传播速度的改变量
da/dN	长裂纹的扩展速率
da_i/dN_i	裂纹扩展速率
d_{hkl}, θ_{hkl}	产生布拉格峰的 hkl 晶面间距和布拉格角
D_0	相邻的入射光束中心的距离
e_b	基体的受冲击压缩应变
e_e	残余应力诱导的塑性流变
e_p	喷涂颗粒本身的热应变
e_{em}	初始存在的弹性应变变量
e_{ph}	金属产生的总的塑性变形量
e_{pm}	中性爆炸最终形成的塑性应变变量
E	单位面积的畴壁能

E_0	室温下涂层材料的弹性模量
E_c	涂层的弹性模量
E_i	压头材料的弹性模量
E_s	被测材料的弹性模量
E_t	复合响应模量
E_{hkl}	衍射弹性模量
f	无量纲应力强度因子
$f_r(\alpha)$	参考载荷条件下的无量纲应力强度因子
F	存在残余应力时的载荷
F_0	无残余应力时的载荷
$F_i(\alpha)$	待定函数
h_0	无残余应力时的压入深度
h_c	最大接触深度
h_f	塑性深度
h_s	表面接触周边的偏离高度
h_{max}	最大压入深度
H_0	强化层深度
H_M	受喷体金属材料的冲击硬度
HP	金属在应力集中区表面出现的漏磁场
$H_p(x)$	漏磁场的法向分量
$H_p(y)$	漏磁场的切向分量
H_{max}	最大残余应力深度
$k_0、k$	分别为基片镀膜前后的曲率半径
$k_1、k_2$	主方向 1、2 的声弹性系数
K	材料的热导率
K_f	疲劳应力集中系数
K_t	理论应力集中系数
$K_1、K_2$	松弛系数
L_1	探头的有效长度
L_2	试件的有效长度
L_{CR}	沿应力反向传播的临界折射纵波
$m(a, x)$	权函数

M	磁化强度
$M_s = E_s / (1 - \nu_s)$	基片的二维杨氏模量, 其中 E_s 、 ν_s 分别为基片材料的杨氏模量和泊松比
n	安全系数
N_f	疲劳扩展寿命
N_i	第 i 段的扩展寿命
$P_{\max}$	最大载荷
Q	疲劳缺口敏感度
r	爆炸距离
r_0	使用炸药的安全半径
$[R]$	许用应力
R_d	动应力(激励力)
R_f	薄膜应力
R_i	首次钻孔增量前的电阻应变计读数
R_m	抗拉强度
R_q	最大淬火应力
R_r	残余应力
R_s	屈服极限
$R(x)$	无裂纹体中假想裂纹处的应力分布
$R_b(Z)$	材料抗拉强度的分布
R_{op}	工作应力
R_{r0}	径向应力
R_w^r	局部疲劳极限
$R_r(Z)$	实测的残余应力分布
$R_w(Z)$	无残余应力时材料疲劳极限沿深度的分布
R_{θ_0}	环向应力
R_1 、 R_2	工件内的两个主应力
$R_{\max}$	简单加载时横截面上最大负载点的应力
$R_{r, \max}$	最大残余应力
R_{surf}	表面残余应力
$R_{w, \max}$	复杂加载时横截面上最大负载点的相当应力
R_{yield}	屈服应力

s	裂纹体特征尺寸
t	焊接试样中测得的波传播时间
t_0	零应力条件下 L_{CR} 波传播固定距离所需要的时间
t_s 、 t_f	分别为基片和薄膜的厚度
T_0	止裂温度
T_m	喷涂材料熔点
T_s	基体温度
T_t	断裂转变温度
v_0	零应力条件下纵波的传播速度
v_1 、 v_2	瑞利波沿主方向 1、2 的传播速度
V_p	MAE 脉冲信号的电压峰值
ω	调制角频率
x	距孔壁的距离
x_m	热波的最大穿透深度
α	压头边界与材料表面的夹角
α_c	基体的热膨胀系数
α_d	沉积物的热膨胀系数
α_s	涂层的热膨胀系数
β	与压头形状有关的参量
ΔK	名义应力强度因子范围
$\Delta T'$	喷涂材料熔点 (T_m) 与基体温度 (T_s) 的差值
ΔT	温度差值
$\Delta\mu$	磁导率的变化量
Δp_ϕ	距离爆炸源 r 处的超压
ΔK_{th}	长裂纹扩展门槛
ΔK_{eff}	有效应力强度因子范围
$\Delta R = R_f - R_i$	对应于每次钻孔增量
ϵ	与压头形状有关的参数
λ	入射波波长
λ_0	初始磁致伸缩系数
μ_0	材料无残余应力时的磁导率
μ_1	探头的磁导率
μ_2	试件的磁导率

μ_{r}	裂纹面张开位移
μ_{R}	材料有残余应力时的磁导率
μ_{t}	热波的热扩散长度
ν	被测材料的泊松比
ν_{c}	涂层的泊松比
ν_{i}	压头材料的泊松比
ν_{hkl}	衍射泊松比
ρ	材料的密度
$\tau_{r\theta_0}$	剪应力
Φ	探头的磁通量
φ_0	参考信号相位
ψ	断面收缩率
ω	电机转动角速度
ω_0	无应力峰值位置

目 录

符号表	I
第 1 章 绪论	1
1.1 内应力分类	1
1.1.1 宏观内应力	1
1.1.2 微观内应力	2
1.2 工程中常见的残余应力	3
1.2.1 焊接残余应力	3
1.2.2 铸造残余应力	5
1.2.3 切削残余应力	7
1.2.4 磨削残余应力	8
1.2.5 热处理残余应力	9
1.2.6 薄膜残余应力	10
1.2.7 涂层残余应力	12
1.3 残余应力的影响	15
1.3.1 残余应力对变形的影响	15
1.3.2 残余应力对尺寸稳定性的影响	18
1.3.3 残余应力对加工精度的影响	19
1.3.4 残余应力对疲劳性能的影响	19
1.3.5 残余应力对脆性断裂的影响	43
1.3.6 残余应力对应力腐蚀开裂的影响	45
1.3.7 残余应力对硬度的影响	46
1.4 残余应力检测技术概况	48

参考文献	48
第2章 残余应力无损检测技术	51
2.1 纳米压痕技术	51
2.1.1 纳米压痕技术的理论方法	51
2.1.2 纳米压痕技术检测原理	54
2.2 拉曼光谱技术	62
2.2.1 拉曼光谱技术的产生	62
2.2.2 拉曼光谱的特点	63
2.2.3 拉曼光谱技术种类	63
2.2.4 拉曼光谱技术检测原理	65
2.3 磁测技术	65
2.3.1 磁记忆检测技术	65
2.3.2 磁噪声技术	68
2.3.3 磁应变技术	69
2.3.4 磁声发射技术	71
2.4 超声波技术	74
2.4.1 超声波技术检测残余应力的特点	74
2.4.2 超声波技术检测残余应力的发展现状	74
2.4.3 超声波技术检测原理	76
2.4.4 超声波应力检测系统	78
2.5 扫描电子声显微镜	79
2.5.1 扫描电子声显微镜检测原理	79
2.5.2 扫描电子声系统	80
2.6 X射线衍射技术	81
2.6.1 布拉格定律	81
2.6.2 X射线衍射检测原理	81
2.6.3 X射线衍射技术检测残余应力的特点	84
2.7 中子衍射技术	85
2.7.1 中子衍射技术残余应力分析发展现状	85
2.7.2 中子衍射技术检测原理	85

2.7.3 中子衍射技术检测残余应力的特点	86
2.8 曲率法检测技术	87
2.8.1 曲率法检测薄膜应力	87
2.8.2 曲率法检测涂层残余应力	88
参考文献	89
第3章 残余应力无损检测技术	96
3.1 机械法	96
3.1.1 小孔释放技术	96
3.1.2 深孔技术	100
3.1.3 环芯技术	102
3.1.4 剥层技术	104
3.1.5 切槽法	107
3.2 云纹干涉技术	109
3.2.1 云纹干涉的光栅技术	110
3.2.2 云纹干涉技术的检测原理	111
3.2.3 云纹干涉技术的实验方法	113
3.2.4 云纹干涉法的发展	116
参考文献	118
第4章 残余应力检测技术的应用	120
4.1 无损检测技术的应用	120
4.1.1 纳米压痕技术的应用	120
4.1.2 拉曼光谱技术的应用	125
4.1.3 磁测技术的应用	128
4.1.4 超声技术的应用	131
4.1.5 X射线衍射技术的应用	135
4.1.6 中子衍射技术的应用	139
4.2 有损检测技术的应用	142
4.2.1 盲孔检测技术的应用	142
4.2.2 环芯检测技术的应用	146

4.2.3 云纹干涉技术的应用	149
参考文献	152

第5章 残余应力的调控与消除

5.1 时效法	156
5.1.1 自然时效	156
5.1.2 热处理时效	158
5.1.3 振动时效	160
5.2 机械法	164
5.2.1 锤击	164
5.2.2 过载处理	166
5.3 爆炸法	168
5.3.1 爆炸法的原理	168
5.3.2 爆炸法的工艺设计	169
5.3.3 爆炸法的特点及优势	171
5.3.4 爆炸法对材料性能的影响	172
5.3.5 爆炸法应用实例	173
5.4 超声冲击技术	175
5.4.1 超声冲击技术的原理	176
5.4.2 超声冲击的设备及效果	177
5.4.3 超声冲击技术的工艺	178
5.4.4 超声冲击技术的优点	179
5.4.5 超声波消除焊接残余应力的效果	179
5.5 喷丸强化法	180
5.5.1 喷丸原理	180
5.5.2 钴合金喷丸实例	182
5.6 激光冲击法	185
5.6.1 激光冲击原理	185
5.6.2 GH742 激光冲击实例	186
5.7 孔挤压强化法	190
5.7.1 孔挤压原理	190

5.7.2 300 M 超高强度钢孔挤压实例	190
参考文献	194
第 6 章 各向异性材料残余应力	197
6.1 正交各向异性材料	197
6.1.1 M12C 复合材料性能	198
6.1.2 M12C 复合材料残余应力检测实验	199
6.2 带织构材料	205
6.2.1 AA2397 铝锂合金性能	205
6.2.2 AA2397 铝锂合金残余应力检测实验	205
6.3 单晶材料	213
6.3.1 理论分析与实验方法	213
6.3.2 实验结果与讨论	215
参考文献	217
第 7 章 残余应力在工程中的应用	219
7.1 航空领域	219
7.1.1 航空发动机钛合金叶片	219
7.1.2 主起落架上转轴	224
7.1.3 GH4169 涡轮盘	229
7.1.4 铝合金喷丸成形	239
7.1.5 6061 铝合金预拉伸板	244
7.2 汽车领域	247
7.2.1 汽车驱动桥壳	247
7.2.2 汽车发动机气门弹簧	250
7.3 核电领域	253
7.3.1 反应堆压力容器顶盖 J 型接头	253
7.3.2 大型核电厚壁结构	256
7.4 轨道交通领域	259
7.4.1 高速列车车体铝合金	259
7.4.2 轨道交通车辆铝合金地板	262