

表面残余应力检测技术

王海斗 朱丽娜 邢志国 编著
徐滨士 主审

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



013069770

TG115.28
42

表面残余应力检测技术

王海斗 朱丽娜 邢志国 编著
徐滨士 主审



TG115.28

42



机械工业出版社



北航

C1678447

013082710

本书全面系统地介绍了各种残余应力的产生原因及其对表面性能的影响，重点详细地介绍了各种残余应力检测技术。其主要内容包括残余应力概论、残余应力无损检测技术、残余应力有损检测技术、残余应力检测技术的应用、残余应力的调控与消除。本书涉及面广，既注重理论基础，又结合生产实际，体现了多学科综合性与交叉性，对研究表面残余应力的实际问题具有较强的指导作用。

本书适于从事机械设计、材料加工、表面工程及再制造工程的科研人员与技术人员参考阅读，也可作为相关专业在校师生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

表面残余应力检测技术/王海斗, 朱丽娜, 邢志国编著. —北京: 机械工业出版社, 2013. 9

ISBN 978-7-111-43663-8

I. ①表… II. ①王… ②朱… ③邢… III. ①残余应力 - 表面层检验 IV. ①TG115. 28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 187075 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 陈保华 责任编辑: 陈保华

版式设计: 霍永明 责任校对: 张 媛

责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 13 印张 · 211 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-43663-8

定价: 38.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

策划编辑(010)88379734

社服务中心:(010)88361066

网络服务

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

读者购书热线:(010)88379203

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

前 言

在机械制造及再制造过程中，零部件的表面会不可避免地产生残余应力。此外，面向再制造的表面薄膜及表面涂层，不仅在制备过程中会产生残余应力，而且在服役过程中也会诱发残余应力。残余应力对零件、材料的性能有显著的影响，既有有害的一面，也有有利的一面，作用机制较为复杂。一般认为，残余拉应力会促进表面裂纹的产生，从而降低零件的疲劳强度和耐蚀性；而残余压应力则有助于提高零件表面的抗疲劳性能。

残余应力无法用感官直接感知，而且残余应力的状态，尤其是应力的的大小及分布会随加工方法的不同而有所差异。因此，深入了解残余应力的产生原因，快速、无损地检测出表面残余应力，并控制和调整残余应力的的大小和分布，对相关领域的科学研究和工业生产都具有非常重要的指导意义。

近年来，对残余应力的研究始终是国内外的热点方向，但是总结提炼并汇总残余应力研究成果的书籍较少且相对陈旧，对于新发展的残余应力检测技术，国内还没有专门文献对其进行全面的阐述。本书内容紧紧围绕表面残余应力检测，重点阐述了各种残余应力检测技术的测量原理、使用条件及应用实例，不仅涵盖了传统的残余应力测量方法，如钻孔法、X射线衍射法等，还系统介绍了一些新型检测技术，如纳米压痕法、拉曼光谱法、磁记忆应力检测等。此外，本书还凝聚了作者所在团队在残余应力研究方面的最新成果。

本书由王海斗、朱丽娜、邢志国编著，由我国表面工程和再制造工程学科的开拓者徐滨士院士主审，徐院士对本书提出了很多宝贵的意见。书中参考了大量的国内外文献，在此谨向相关文献的作者表示深切的谢意。此外，康嘉杰、顾林松、马建龙也对本书的编写提供了很大的帮助，在此一并表示感谢。

本书的出版工作得到了国家杰出青年科学基金（51125023）、国家973计划（2011CB013403、2011CB013405）及北京市自然科学基金重大项目（3120001）的资助。

本书涉及面广，应用面宽，限于篇幅和作者的水平，书中难免存在不足之处，敬请广大读者和专家提出批评和建议。

前 言

作 者

目 录

前言

第 1 章 残余应力概论	1
1.1 残余应力及其分类	1
1.1.1 宏观残余应力	1
1.1.2 微观残余应力	2
1.2 残余应力的产生	3
1.2.1 焊接残余应力的产生	3
1.2.2 铸造残余应力的产生	6
1.2.3 切削残余应力的产生	7
1.2.4 磨削残余应力的产生	9
1.2.5 表面热处理残余应力的产生	10
1.2.6 薄膜残余应力的产生	12
1.2.7 涂层残余应力的产生	14
1.3 残余应力的影响	18
1.3.1 残余应力对变形的影响	18
1.3.2 残余应力对尺寸稳定性的影响	19
1.3.3 残余应力对加工精度的影响	20
1.3.4 残余应力对疲劳性能的影响	20
1.3.5 残余应力对脆性断裂的影响	21
1.3.6 残余应力对应力腐蚀开裂的影响	22
1.3.7 残余应力对硬度的影响	24
1.4 残余应力检测技术概况	26
参考文献	27
第 2 章 残余应力无损检测技术	31
2.1 纳米压痕法	31
2.1.1 纳米压痕技术概述	31
2.1.2 纳米压痕技术的理论方法	31
2.1.3 纳米压痕仪	34
2.1.4 纳米压痕法测量残余应力的理论模型	39

2.2 拉曼光谱法	47
2.2.1 拉曼光谱法的发展	47
2.2.2 拉曼光谱法的产生原理	48
2.2.3 拉曼光谱的特点	49
2.2.4 拉曼光谱技术	49
2.2.5 拉曼光谱仪	51
2.2.6 拉曼光谱检测残余应力的原理	52
2.3 磁测法	53
2.3.1 磁记忆检测法	53
2.3.2 磁噪声法	60
2.3.3 磁应变法	62
2.3.4 磁声发射法	64
2.4 超声波法	67
2.4.1 超声波法检测残余应力的研究现状	67
2.4.2 超声波法检测残余应力的基本原理	68
2.4.3 超声波应力检测系统	69
2.4.4 超声法应力常数标定	70
2.4.5 超声波法检测残余应力的特点	71
2.5 扫描电子声显微镜法	71
2.6 X射线法	73
2.6.1 布拉格方程	73
2.6.2 测定原理及方法	74
2.6.3 定峰方法及其他数据处理	81
2.7 中子衍射法	85
2.7.1 中子衍射法检测残余应力的发展现状	86
2.7.2 中子衍射法检测残余应力的基本原理	86
2.7.3 中子衍射法检测残余应力的基本特点	87
2.8 曲率法	88
2.8.1 曲率法测量薄膜应力	88
2.8.2 曲率法测量涂层应力	90
参考文献	91
第3章 残余应力无损检测技术	95
3.1 机械法	95
3.1.1 盲孔法	95
3.1.2 剥层法	102

3.1.3	环芯法	103
3.1.4	剖分法	106
3.1.5	切槽法	107
3.1.6	切取法	109
3.2	云纹干涉法	111
3.2.1	光栅技术	111
3.2.2	面内位移与离面位移的光学测试原理	113
3.2.3	相移技术及其原理	115
3.2.4	应力检测	116
	参考文献	121
第4章	残余应力检测技术的应用	122
4.1	残余应力无损检测技术的应用	122
4.1.1	纳米压痕法的应用	122
4.1.2	拉曼光谱法的应用	137
4.1.3	磁测法的应用	145
4.1.4	超声波法的应用	152
4.1.5	扫描电子声显微镜法的应用	154
4.1.6	X射线法的应用	155
4.1.7	中子衍射法的应用	163
4.1.8	曲率法的应用	165
4.2	残余应力有损检测技术的应用	168
4.2.1	盲孔法的应用	168
4.2.2	环芯法的应用	170
4.2.3	云纹干涉法的应用	172
	参考文献	175
第5章	残余应力的调控与消除	178
5.1	热处理法	178
5.1.1	热处理法的原理	178
5.1.2	热处理工艺参数的确定	179
5.1.3	应用实例	179
5.2	机械法	180
5.2.1	振动时效	180
5.2.2	锤击	183
5.2.3	过载处理	187

5.3	爆炸法	188
5.3.1	爆炸法的原理	188
5.3.2	爆炸法的工艺与特点	189
5.3.3	爆炸法对材料性能的影响	191
5.3.4	应用实例	193
5.4	超声波冲击法	195
5.4.1	超声波冲击法的原理	195
5.4.2	超声波冲击法的工艺与特点	196
5.4.3	超声波冲击法的效果评估	197
	参考文献	199

第1章 残余应力概论

各种机械制造工艺（如铸造、切削、焊接、热处理、装配等）都会使工件内出现不同程度的残余应力。残余应力将会对材料的物理力学性能产生巨大影响，对结构的强度造成很大危害。此外，随着材料科学的不断进步，涂层制备技术在不断发展，涂层种类不断增多，涂层的质量和性能也在不断提高。涂层中存在的残余应力对涂层界面韧性、结合强度、耐热循环能力、耐蚀性、疲劳强度等性能都有着显著的影响，这是导致涂层表面裂纹、涂层剥落及被涂覆零件变形的一个重要因素。因此，研究和检测材料中的残余应力对生产和科学试验都有非常重要的意义。

1.1 残余应力及其分类

残余应力是当没有外力作用时，以平衡状态存在于物体内部的应力。没有通过物体表面向物体内部传递应力时，物体内部保持平衡的应力系统，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。固有应力也称为内应力（internal stress）。

残余应力的存在状态随材料性能、产生条件等的不同而不同，分类方法也不一致。按作用范围，残余应力可分为宏观残余应力与微观残余应力。

1.1.1 宏观残余应力

宏观残余应力又称为第一类残余应力，它是在宏观区域分布，跨越多个晶粒的平均应力。它的大小、方向和性质等可用常规的物理或机械方法进行测量。按残余应力产生的原因宏观残余应力可分为以下三种。

1. 不均匀塑性变形产生的残余应力

材料通常由于加工的原因而引起不均匀的塑性变形，即材料不同部分的塑性变形量不相同，这样必然会在不同部分之间出现相对的压缩或拉伸变

形，从而产生残余应力。滚压、拉拔、挤压、切削、喷丸等加工工艺都会引起不均匀的塑性变形。

2. 热影响产生的残余应力

热影响产生的残余应力是复杂的。在加热或冷却的过程中，材料内部会存在温度梯度，由于这种不均匀加热或冷却造成不均匀的热胀冷缩，从而产生热应力。而当组织转变引起材料内部产生不均匀的体积变化时，则产生相变应力。由于热影响而产生塑性变形时，材料本身的屈服强度及弹性模量等力学特征值也要受到影响，从而也会影响应力变化。

3. 化学作用产生的残余应力

这种残余应力是由于表面向内部传递的化学变化或物理变化而产生的。比如瓷器，它是在表面涂上釉子原料，然后加热形成釉子，由于釉子有较大的膨胀系数，冷却后在釉子上产生拉应力而发生龟裂。裂纹是有规律的，每条裂纹大都和另一裂纹互相连接起来，这种龟裂能使沿其垂直方向的拉应力消失。而泥土龟裂所形成的裂纹交角恰好为 120° 的星形裂纹。

钢材在进行渗氮时，表面会产生比体积较大的化合物层，表面便产生了很大的残余压应力。渗碳时也会发生类似情况。这主要是因为化学变化导致密度变化所造成的。

1.1.2 微观残余应力

微观残余应力属于显微视野范围内的应力，根据其作用的范围，又可分为两类，即第二类、第三类残余应力。第二类残余应力作用于晶粒或亚晶粒之间（约在 $0.01 \sim 1\text{mm}$ 范围内），是在此范围内的平均应力。第三类残余应力作用于晶粒内部（约在 $10^{-6} \sim 10^{-2}\text{mm}$ 范围内）。残余应力的分类见表 1-1。

表 1-1 残余应力的分类^[1]

残余应力	领域的长度/mm							
	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
第一类	不均匀的外部 载荷引起的应力							
第二类	结构的残余应力							
第三类	晶体内的残余应力							
	位错引起的残余应力							

按照残余应力产生的原因，微观残余应力可分为以下几种。

1. 由于晶粒的各向异性而产生的微观残余应力

这种残余应力包括晶体的热膨胀系数、弹性模量等的各向异性及晶粒间的方位不同而产生的微观残余应力。以晶体弹性模量的各向异性为例，铅的单晶体的弹性模量随晶体方位不同有1~3倍的变化，锌的单晶体有1~4倍的变化。绝大多数金属的弹性模量都具有各向异性，其弹性模量一般以晶体的 $\langle 111 \rangle$ 方向为最大， $\langle 100 \rangle$ 方向为最小。在多晶体中，由于各晶粒的方向不同，即使所施加的外力是均匀的，各晶粒的变形也可能不同，此时若有塑性变形发生，各晶粒的塑性变形也会不均匀，因此必然引起残余应力。

2. 由于晶粒内外的塑性变形而产生的残余应力

这种残余应力包括晶粒内的滑移、穿过晶粒间的滑移及双晶的形成等而产生的微观残余应力。例如，晶粒内有滑移变形，位错就会在晶界堆积，还可能穿过晶界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，因此这时也会在组织内不均匀地形成各种内部缺陷。这些就成为外力去除后产生微观残余应力的主要原因。

3. 由于夹杂物、沉淀相或相变出现不同相而产生的微观残余应力

在金相组织内，当夹杂物、沉淀相或相变而出现不同相时，由于体积变化及热应力的作用，可能产生相当大的微观残余应力。

1.2 残余应力的产生

1.2.1 焊接残余应力的产生

焊接构件由焊接而产生的内应力称为焊接应力。按照作用时间，焊接应力可分为焊接瞬时应力和焊接残余应力。焊接过程中，某一瞬时的焊接应力称为焊接瞬时应力，它会随时间的变化而产生变化。焊后残留在焊件内的焊接应力则称为焊接残余应力，它是由于焊接加热产生不均匀温度场而引起的^[2]。

1. 焊接残余应力的分类

焊接应力按其发生源可分为以下三种情况。

(1) 直接应力 这是由于不均匀加热和冷却的结果,是取决于加热和冷却时的温度梯度而表现出来的热应力。它是形成焊接残余应力的主要原因。

(2) 间接应力 这是由焊接前加工状况所产生的应力。构件在轧制与冷拔后其表面会产生拉应力,它与焊接产生的应力叠加,并对焊后构件的变形产生附加的影响。此外,构件受外界约束产生的拘束应力也属于此类应力。

(3) 组织应力 这是由于组织变化而产生的应力,即由于相变造成的比体积变化而产生的应力。它与碳含量及材料的其他成分有关。

2. 焊接残余应力的产生过程

在焊接过程中,工件受到电弧热的不均匀加热而产生焊接应力,当工件冷却后仍然保留在工件内部的残余应力即焊接残余应力^[3]。焊接过程是一个不均匀的受热过程,即焊缝及其相邻区金属都要被加热到很高温度,然后再快速冷却下来。由于在焊接过程中,焊件各部分的温度不同,随后的冷却速度也各不相同,因而焊件各部分在热胀冷缩和塑性变形的影响下,必然会产生焊接应力。

图 1-1 所示为焊后冷却过程中温度分布随时间的变化。当时间为零时,焊缝附近急速被加热到高温状态。因此,首先会在达到这一温度的焊缝间产生很大的热应力,并且其附近会伴随塑性变形的发生。在接合方向上显然为约束状态,因而将产生明显的压缩塑性变形;在垂直于接合的方向上,对于一般的焊接状态,也会发生塑性变形。因为此时焊缝部分的实质部分的长度变短,因此如果使各处从现在这种状态冷却到室温,必然会使实质尺寸小的焊缝部分呈拉应力状态,而这种拉应力不会超过材料的屈服强度。

图 1-2 所示为冷却过程中的温度分布和相应的热应力状态。图 1-2a 的上图给出了开始时间为零的温度分布曲线。在中央的熔化区呈山状分布,与此相对应的热应力分布如图 1-2c、图 1-2d 所示。在热应力分布曲线的中央出现的折曲,是由于熔化部分的屈服强度几乎为零而造成的。随着时间的不断延长,其温度分布逐渐趋于缓和。图 1-2b 是从冷却途中的某个时刻到另一时刻的温度变化。图 1-2c 是与温度变化相对应的热应力变化。这时的热应力不超过该温度下的屈服强度。实际的热应力(见图 1-2d)是在冷却开始时的热应力基础上再叠加上那时的热应力变化而得到的残余应力最终状态。焊接残余应力的产生就是由加热和冷却时的热应力,以及由它所产生的塑性变形来确定的。

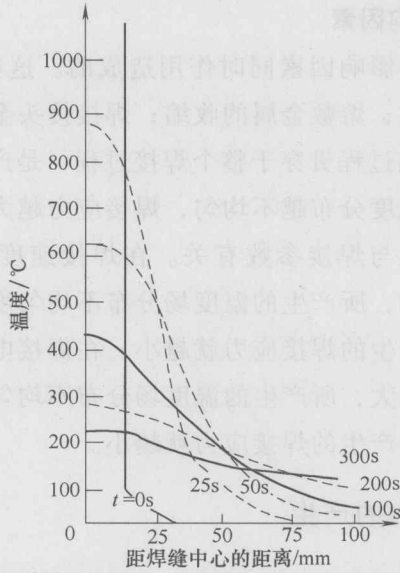


图 1-1 焊后冷却过程中温度分布随时间的变化^[2]

注：焊接板材尺寸 200mm × 12mm。

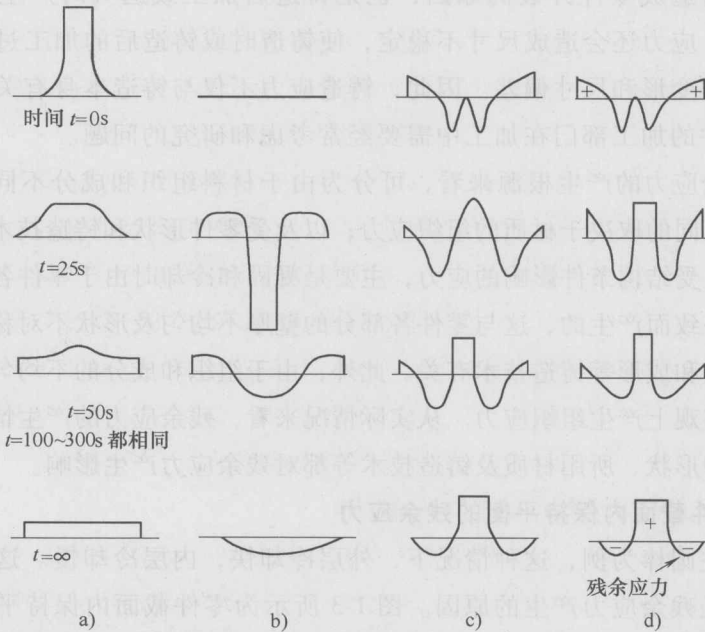


图 1-2 冷却过程中的温度分布和相应的热应力状态^[2]

a) 温度分布 b) 温度变化 c) 与温度变化相对应的热应力 d) 叠加后的热应力

3. 焊接应力的影响因素

焊接应力是由很多影响因素同时作用造成的。这些影响因素主要包括：焊接时温度分布不均匀；熔敷金属的收缩；焊接接头金属组织转变及工件的刚性约束等^[3]。焊接热过程贯穿于整个焊接过程，是产生焊接应力的决定性因素。焊接温度场的温度分布越不均匀，焊接应力越大。

此外，焊接应力还与焊接参数有关。在焊接速度一定时，焊接电流越大，不均匀热输入越大，所产生的温度场分布不均匀度越大，因此产生的焊接应力越大；反之，产生的焊接应力就越小。在焊接电流一定时，焊接速度越大，不均匀热输入越大，所产生的温度场分布不均匀度越大，因此产生的焊接应力越大；反之，产生的焊接应力就越小。

1.2.2 铸造残余应力的产生

铸造过程中零件内各部分产生的应力，包括冷却后的残余应力，都会成为零件在铸造时和铸造后形成各种缺陷的原因。铸造时发生的过大应力是凝固和冷却时造成零件开裂的原因，也是铸造后加工或退火时产生开裂的原因。此外，应力还会造成尺寸不稳定，使铸造时或铸造后的加工过程中产生无法预料的变形和尺寸偏差。因此，铸造应力不仅与铸造本身有关，而且也是使用铸件的加工部门在加工中需要经常考虑和研究的问题。

从残余应力的产生根源来看，可分为由于材料组织和成分不同，其分布和大小就不同的取决于材质的组织应力；以及受零件形状和铸造技术等影响的结构应力。受结构条件影响的应力，主要是凝固和冷却时由于零件各部分的冷却速度不一致而产生的，这与零件各部分的壁厚不均匀及形状不对称有关，而且也与浇注和成形等铸造技术有关。此外，由于组织和成分的不均匀，都会在微观上和宏观上产生组织应力。从实际情况来看，残余应力的产生情况较为复杂，构件的形状、所用材质及铸造技术等都对残余应力产生影响。

1. 零件截面内保持平衡的残余应力

以浇注圆棒为例，这种情况下，外层冷却快，内层冷却慢。这种温度梯度的存在是残余应力产生的原因。图 1-3 所示为零件截面内保持平衡的残余应力。开始凝固、冷却时，其应力分布如图 1-3a 所示。外层因迅速冷却而收缩，从而表现为拉应力状态；内层则呈压应力状态，其温度比外层高，且具有塑性。在压应力作用下，一旦发生塑性变形，这部分的实际尺寸就会减

小。随着进一步冷却，其应力分布发生反向变化，如图 1-3b 所示，得到外层压缩、内层拉伸的应力状态。

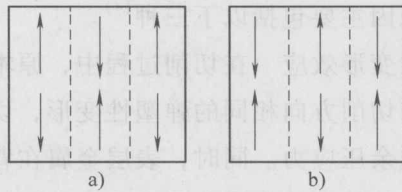


图 1-3 零件截面内保持平衡的残余应力^[1]

a) 冷却时 b) 冷却后

2. 零件间相互保持平衡的残余应力

图 1-4 所示为具有两个或两个以上截面的零件，其并列排列的两端又连接在一起的情况下产生的应力。在浇注过程中，截面积小的外侧两个构件比中间的构件冷却快。因此，在凝固、冷却初期，外侧为拉应力，中心为压应力，如图 1-4a 所示。冷却后，应力状态发生反向变化，表现出如图 1-4b 所示的残余应力分布。

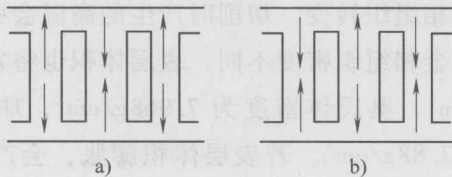


图 1-4 零件间相互保持平衡的残余应力^[1]

a) 凝固、冷却初期 b) 冷却后

3. 由于型砂抗力而产生的残余应力

由于型砂抗力而产生的残余应力实例如图 1-5 所示。H 形零件意味着，当使其各部分都受到相同的冷却时，并且由型砂所构成的铸型又足够结实时，图中的 A 部分随着冷却而发生的收缩就会受到铸型的束缚，因此将产生残余拉应力。

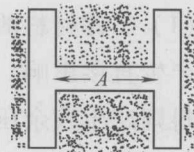


图 1-5 由于型砂抗力而产生的残余应力实例^[1]

1.2.3 切削残余应力的产生

1. 切削残余应力的产生机理

零件在进行切削时，由于已加工表面受到切削力和切削热的作用而发生严重的不均匀弹塑性变形，以及金相组织的变化影响将产生切削残余应力。产生切削残余应力的原因主要包括以下三种^[4]。

(1) 机械应力塑性变形效应 在切削过程中，原本与切屑相连的表面层金属产生相当大的、与切削方向相同的弹塑性变形，切屑切离后使表面呈现残余拉应力而心部为残余压应力。同时，表层金属在背向力方向也发生塑性变形，刀具对加工表面的挤压使表层金属发生拉伸塑性变形，但由于受到基体金属的阻碍，从而在工件表层产生残余压应力。另外，表层金属的冷态塑性变形使晶格扭曲而疏松，密度减小，体积增大，也会使表层产生残余压应力而心部为残余拉应力。

(2) 热应力塑性变形效应 切削时，强烈的塑性变形和摩擦使已加工表面层的温度很高，而心部温度较低。当热应力超过材料的屈服强度时，表层在高温下将伸长，但由于受到基体材料的限制，本应该发生的伸长被压缩。在切削后的冷却过程中，金属弹性逐渐恢复。当冷却到室温时，表层金属要收缩，但由于受到基体金属的阻碍，工件表层产生残余拉应力。

(3) 表层局部金相组织转变 切削时产生的高温会引起表面层金相组织的变化，由于不同的金相组织密度不同，表层体积也将发生变化。例如，马氏体密度为 $7.75\text{g}/\text{cm}^3$ ，奥氏体密度为 $7.968\text{g}/\text{cm}^3$ ，珠光体密度为 $7.78\text{g}/\text{cm}^3$ ，铁素体密度为 $7.88\text{g}/\text{cm}^3$ 。若表层体积膨胀，会产生残余压应力；反之，则产生残余拉应力。

2. 切削残余应力的影响因素

切削残余应力的性质和大小受很多因素的影响，掌握这些因素的影响规律并进行合理选择，对于降低残余应力和优化切削过程是很有必要的^[5]。

(1) 工件材料的影响 工件材料本身状态及其物理力学性能对切削残余应力产生直接影响。塑性好的材料切削加工后通常产生残余拉应力；塑性差的材料则产生残余压应力。根据工件材料的具体初始应力状态，切削加工可能使工件内残余应力值增大或减小。

(2) 切削参数的影响 切削速度的影响一般是通过“温度因素”来进行的。切削速度较低时，易产生残余拉应力；切削速度较高时，由于切削温度升高，易产生残余压应力。

增加进给量和切削深度时，被切削层金属的截面及体积增大，使刀刃前