

齿轮的 热处理畸变、裂纹 与控制方法

金荣植 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

014021389

TG162. 73
01

齿轮的热处理畸变、裂纹 与控制方法

金荣植 编著



机械工业出版社



北航

C1706045

TG162.73

01

288150410

本书对齿轮热处理畸变、裂纹产生原因、影响因素等进行了详细分析和探讨,同时提出了控制与预防的方法和措施。其主要内容包括:热处理应力的概述、热处理畸变及其原因分析和规律、齿轮的整体热处理畸变与控制、齿轮的化学热处理畸变与控制、齿轮的感应热处理畸变与控制、影响齿轮热处理畸变的(其他)因素、减小与控制齿轮热处理畸变的方法与措施、齿轮热处理畸变的校正、齿轮的热处理裂纹原因分析与防止措施。书中列举了大量的实例加以分析说明与改进,既有理论分析,又有丰富的生产实践经验,对控制、预防及解决实际生产中遇到的齿轮畸变与裂纹问题具有较强的指导意义和实用价值。

本书可供热处理工程技术人员、工人阅读使用,也可供相关专业在校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

齿轮的热处理畸变、裂纹与控制方法/金荣植编著. —北京:机械工业出版社, 2014. 1

ISBN 978-7-111-44505-0

I. ①齿… II. ①金… III. ①齿轮钢—热处理—研究 IV. ①TG162. 73

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第251128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 章承林

版式设计:霍永明 责任校对:姜艳丽

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)

2014年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·23.5印张·523千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-44505-0

定价:59.00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

改革开放以来,我国齿轮行业伴随国民经济的快速发展取得了巨大进步。齿轮产品种类齐全,广泛应用于航空、船舶、兵器装备、汽车摩托、农机、机床工具、工程机械、轨道交通、起重运输、矿山冶金、电力能源、石油化工和仪器等 20 多个领域,形成了独立完整的工业体系。

热处理是提高齿轮强度、硬度、耐磨性、韧性及综合疲劳性能的重要工艺方法。但是,在热处理过程中,常因原材料、设计、工艺及操作等方面的问题,导致齿轮产生裂纹而报废,给企业造成了较大的经济损失。因此,齿轮的热处理裂纹是齿轮热处理生产中最严重的缺陷之一。研究与掌握齿轮热处理裂纹的成因、影响规律并提出预防措施与方法,是提高产品质量,减少损失,延长齿轮使用寿命的重要内容。

齿轮在热处理过程中,由于热应力和组织应力的作用,导致齿轮的尺寸和形状发生变化,即产生热处理畸变。畸变不仅使齿轮的精度降低,而且还影响齿轮的强度和使用寿命,也是产生噪声和局部应力集中的根源。对于不磨削(齿面)齿轮,畸变过大会引起偏载;对于磨削(齿面)齿轮,因畸变而引起的偏磨(削)会造成齿面烧伤、产生磨削台阶而发生早期点蚀和疲劳断齿。因此,齿轮的热处理畸变控制非常重要。

齿轮热处理畸变,特别是渗碳淬火畸变属于世界性的难题,畸变之所以难以控制,是因为影响因素太多,而且其中很多因素彼此交互影响,难以控制。因此,有人称热处理畸变控制是一项复杂的“畸变工程”。人们也逐渐认识到工件最终畸变并非完全由热处理淬火引起,淬火工序仅仅释放了潜在的畸变因素,引起畸变的潜在畸变因素在各个生产工序中就已逐步积累,如设计、材质、锻造、铸造、机械加工、热处理、磨削等。因此,畸变的控制应该是生产过程全方位的系统工程,但热处理是齿轮生产过程中畸变控制的一道关键工序,如果掌握了热处理畸变的规律,并将其控制在较小的范围内,则在很多情况下,可以在热处理前调整齿轮的机械加工尺寸,使热处理后能够满足齿轮公差要求,就能够省去加工成本很高的齿轮精整工序(如剃齿、珩齿、磨齿等)。

减少齿轮畸变、防止裂纹产生最主要的途径是研究和掌握各类齿轮在各种不同热处理条件下,各种因素对畸变与裂纹形成的影响特点,分析与认识产生畸变、裂纹的原因和规律,进而找到控制与预防齿轮畸变、裂纹产生的方法与措施。

本书主要介绍了齿轮在热处理过程中的畸变与裂纹形成的一般规律,通过大量生产实例阐述了控制与预防齿轮畸变、裂纹形成的方法与措施,同时对影响畸变、裂纹形成的各种因素及其特点作了详细论述。

由于齿轮形状与结构千差万别,大小不一,材料不同,用途不同。因此,热处理畸变的表现形式也不同。本书主要根据较为典型的齿轮形状、结构等加以叙述。

在本书编写过程中,作者参阅并引用了一些有关热处理方面的专著及文章,在此谨向这些作者表示衷心感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请广大读者和专家批评指正。

金荣植

目 录

前言

第 1 章 热处理应力的概述	1
1.1 热处理应力及其分类	1
1.2 热处理残余应力	2
第 2 章 热处理畸变及其原因分析和规律	4
2.1 热处理畸变机理	4
2.2 热处理畸变的种类	4
2.3 外应力与热处理畸变	5
2.4 内应力与热处理畸变	5
2.5 热处理畸变原因分析及畸变规律	6
第 3 章 齿轮的整体热处理畸变与控制	11
3.1 环套类齿轮的热处理畸变与控制	11
3.1.1 中碳钢环套类齿轮的热处理畸变与控制	11
3.1.2 中碳低合金钢环套类齿轮的热处理畸变与控制	12
3.2 轴类齿轮的热处理畸变与控制	14
3.2.1 轴类齿轮的热处理畸变	14
3.2.2 轴类齿轮的热处理畸变影响因素及其控制措施	14
3.2.3 中碳钢和中碳合金钢带键槽齿轮轴的热处理畸变与控制	17
第 4 章 齿轮的化学热处理畸变与控制	18
4.1 齿轮的渗碳热处理畸变与控制	18
4.1.1 齿轮的渗碳热处理畸变	19
4.1.2 齿轮的渗碳热处理畸变影响因素	23
4.1.3 控制与减小齿轮渗碳热处理畸变的措施	27
4.1.4 环形齿轮（盘形齿轮、齿圈）的渗碳热处理畸变与控制	41
4.1.5 带内花键齿轮的渗碳淬火畸变与控制	44
4.1.6 双联齿轮的渗碳淬火畸变与控制	57
4.1.7 齿轮轴的渗碳淬火畸变与控制	59
4.1.8 大型齿轮（轴）的渗碳淬火畸变与控制	60
4.1.9 大型焊接齿轮的渗碳淬火畸变与控制	72
4.1.10 齿轮的碳氮共渗热处理畸变与控制	72
4.2 齿轮的渗氮热处理畸变与控制	74
4.2.1 渗氮热处理及其特点	74
4.2.2 渗氮对齿轮热处理畸变的影响	75
4.2.3 齿轮的气体渗氮和离子渗氮畸变与控制	75

4.2.4	环套类齿轮的渗氮热处理畸变与控制	80
4.2.5	轴类齿轮的渗氮热处理畸变与控制	81
4.2.6	齿轮的氮碳共渗热处理畸变与控制	84
4.2.7	齿轮的低压真空氮碳共渗技术	86
4.2.8	齿轮的深层渗氮技术	87
4.2.9	齿轮的稀土催渗氮技术	88
第5章	齿轮的感应热处理畸变与控制	89
5.1	齿轮的感应热处理及其特点	89
5.2	齿轮的感应淬火畸变与控制	89
5.2.1	感应淬火的特点	90
5.2.2	感应淬火的畸变	91
5.2.3	减小与控制齿轮感应淬火畸变的措施	93
5.3	齿轮的高频感应淬火畸变与控制	99
5.3.1	齿轮的高频感应淬火畸变特点及其影响因素	99
5.3.2	不同高频感应淬火方法及其畸变特点	100
5.3.3	齿轮高频感应淬火后的畸变	101
5.4	齿轮的中频感应淬火畸变与控制	114
5.4.1	轴类齿轮的中频感应淬火畸变与控制	114
5.4.2	环套类齿轮的中频感应淬火畸变与控制	115
5.5	埋液感应淬火畸变控制技术	117
第6章	影响齿轮热处理畸变的(其他)因素	119
6.1	钢中含碳量对畸变的影响	121
6.2	钢中合金元素对畸变的影响	122
6.3	钢的淬透性对畸变的影响	123
6.4	齿轮形状、截面尺寸对畸变的影响	126
6.5	钢的原始组织对畸变的影响	128
6.5.1	钢的原始组织对热处理畸变的影响	128
6.5.2	连铸坯形对齿轮热处理畸变的影响	131
6.6	锻造对畸变的影响	132
6.7	毛坯预备热处理对畸变的影响	133
6.8	残余应力对畸变的影响	134
6.9	淬火加热过程对畸变的影响	136
6.10	淬火温度对畸变的影响	139
6.11	淬火冷却对畸变的影响	140
6.11.1	冷却速度与淬火冷却介质对畸变的影响	141
6.11.2	冷却不均匀引起的畸变	142
6.11.3	淬火冷却介质温度对畸变的影响	143
6.12	淬火操作对畸变的影响	144
6.12.1	齿轮装夹及支承方式对畸变的影响	144
6.12.2	淬火加热温度及加热均匀性对畸变的影响	148

6.12.3 重复淬火对畸变的影响	148
6.12.4 淬火冷却对畸变的影响	148
6.12.5 其他操作因素对畸变的影响	149
6.13 回火、冷处理及时效处理对畸变的影响	149
6.13.1 回火对畸变的影响	149
6.13.2 冷处理对畸变的影响	150
6.13.3 时效处理对畸变的影响	151
第7章 减小与控制齿轮热处理畸变的方法与措施	152
7.1 合理选材和正确设计	152
7.1.1 合理选材	152
7.1.2 正确设计齿轮结构	156
7.1.3 正确设计齿轮硬度	161
7.2 优化锻造	162
7.3 采用预备热处理	163
7.3.1 预备退火处理	163
7.3.2 齿轮半成品的预备热处理	164
7.3.3 铸钢齿轮的预备热处理	166
7.3.4 渗碳齿轮毛坯的预备热处理	170
7.3.5 渗碳齿轮毛坯的等温正火处理	171
7.3.6 预备调质处理	174
7.4 消除机械加工残余应力	177
7.4.1 合理选择切削用量	177
7.4.2 热处理前的残余应力消除	177
7.5 合理调整冷热加工工序	180
7.5.1 畸变试样及畸变试验	180
7.5.2 合理安排冷热加工工序	180
7.5.3 预留加工余量	182
7.5.4 进行预先修正	183
7.5.5 采用预先胀大花键孔方法	185
7.5.6 感应加热预先收缩内孔方法	186
7.5.7 采用“去渗碳层→二次加热淬火”方法	187
7.6 合理选择装炉及支承方式	187
7.7 减小热应力	189
7.7.1 选择合理的加热方法	189
7.7.2 选择适当的淬火加热温度、加热速度和保温时间	189
7.7.3 提高淬火油温度	193
7.7.4 采用分级淬火工艺	195
7.7.5 采用等温淬火工艺	199
7.7.6 采用亚温淬火（临界温度淬火）工艺	201
7.7.7 采用喷液淬火方法	203

7.7.8 合理选择淬火冷却介质及淬火方式	204
7.8 改进热处理工艺与材料	214
7.8.1 采用渗氮（或氮碳共渗）工艺代替渗碳淬火	214
7.8.2 采用“中碳钢调质+感应淬火”代替渗碳淬火	214
7.8.3 采用局部感应淬火代替整体加热淬火	216
7.8.4 采用盐浴快速加热淬火工艺	216
7.8.5 采用碳氮共渗代替渗碳淬火	217
7.8.6 采用“正火+回火”代替调质处理	218
7.8.7 改变齿轮材料	220
7.9 采用减小齿轮畸变的热处理工艺方法与装备	221
7.9.1 减小齿轮畸变的热处理工艺方法	222
7.9.2 减小细长齿轮轴、薄片盘形齿轮和薄壁齿套畸变的工艺方法	222
7.9.3 减小复杂齿轮体积畸变和翘曲畸变的工艺方法	223
7.9.4 减小齿轮时效畸变的工艺方法	225
7.9.5 采用压床淬火	226
7.10 采用先进的工艺和装备减小与控制齿轮热处理畸变	233
7.10.1 采用低压真空热处理炉与高压气淬设备及其工艺	233
7.10.2 采用激光热处理技术与装备	238
7.10.3 采用稀土渗碳（碳氮共渗）技术与BH催渗碳技术	241
7.10.4 采用双频感应淬火技术与装备	244
7.10.5 采用渗碳后感应淬火技术	245
7.10.6 采用新的模压式感应淬火技术	247
7.10.7 采用同步双频感应淬火技术	248
7.11 采用微小畸变钢材减小齿轮畸变	250
第8章 齿轮热处理畸变的校正	252
8.1 齿轮热处理畸变的校正方法	252
8.1.1 冷态校正方法	253
8.1.2 热态校正方法	254
8.1.3 淬火状态校正方法	255
8.1.4 回火校正方法	256
8.2 轴类齿轮热处理畸变的校直方法	256
8.2.1 冷态校直方法	256
8.2.2 热态校直方法	258
8.3 环套类齿轮热处理畸变的校正方法	260
8.3.1 收缩（内）孔方法	260
8.3.2 胀大（内）孔方法	266
8.3.3 使用胎具回火定型校正方法	266
8.3.4 采用回火校正花键孔方法	267
8.3.5 采取喷砂校正方法	268
8.3.6 环形齿轮圆度畸变的热点校正方法	268

8.3.7 采用淬火压床的校正方法	268
8.3.8 采用圆度校正机校正圆度畸变方法	269
8.3.9 采用翻面装夹方式校正畸变方法	270
8.3.10 齿轮花键孔的校正方法	271
8.3.11 齿轮的感应加热应力校正方法	271
8.3.12 齿轮的双液淬火收缩内孔方法	273
8.3.13 齿轮的淬火校正方法	273
8.3.14 缩孔齿轮的化学酸蚀挽救方法	274
8.3.15 渗碳齿轮的旋转校直方法	275
8.4 齿轮齿形的校正方法	275
8.4.1 齿部校正	275
8.4.2 硬齿面切削加工校正方法	276
第9章 齿轮的热处理裂纹原因分析与防止措施	278
9.1 淬火残余应力的类型、作用特点及裂纹的形成规律	278
9.1.1 淬火残余应力的类型	278
9.1.2 淬火残余应力的作用特点及裂纹的形成规律	279
9.1.3 淬火应力对工件裂纹的作用	279
9.2 热处理裂纹的分类	280
9.3 热处理裂纹的特征与类型	280
9.3.1 淬火裂纹的特征	281
9.3.2 热处理裂纹的类型	282
9.4 形成齿轮淬火裂纹的影响因素	287
9.4.1 钢的化学成分对淬火裂纹的影响	288
9.4.2 原材料缺陷对齿轮淬火时形成裂纹的影响	293
9.4.3 齿轮结构对形成裂纹的影响	296
9.4.4 淬火前的原始组织及应力状态对形成裂纹的影响	298
9.4.5 加热因素对形成淬火裂纹的影响	300
9.4.6 冷却因素对形成淬火裂纹的影响	302
9.4.7 齿轮表面脱碳对形成淬火裂纹的影响	303
9.4.8 回火对形成裂纹的影响	304
9.5 防止齿轮形成裂纹的方法与措施	304
9.5.1 合理设计齿轮结构与优选钢材	305
9.5.2 改善齿轮锻造质量	307
9.5.3 适当安排冷热加工工序及正确选择预备热处理	307
9.5.4 正确选择加热介质、加热温度及保温时间	308
9.5.5 消除齿轮的残余应力	310
9.5.6 合理选用淬火冷却介质和淬火方法	310
9.5.7 预防白点退火	316
9.5.8 防止淬火裂纹的其他方法	317
9.6 齿轮的感应淬火裂纹形成原因及其防止措施	320

9.6.1 齿轮结构或表面质量造成的淬火裂纹及其防止措施	323
9.6.2 齿轮材料因素造成的淬火裂纹及其防止措施	325
9.6.3 加热温度过高或加热不均造成的淬火裂纹及其防止措施	326
9.6.4 冷却条件不良造成的淬火裂纹及其防止措施	326
9.6.5 齿轮的喷液及浸液感应淬火	328
9.6.6 齿轮高频感应淬火裂纹特征及其形成原因和防止措施	329
9.6.7 齿轮中频感应淬火裂纹的形成原因及其防止措施	335
9.6.8 采用埋液感应淬火预防齿轮感应淬火裂纹	338
9.6.9 齿轮超音频感应淬火裂纹形成原因及其防止措施	338
9.7 齿轮的化学热处理裂纹形成原因及其防止措施	340
9.7.1 渗碳齿轮表面裂纹形成原因及其防止措施	340
9.7.2 渗氮齿轮表面裂纹形成原因及其防止措施	350
9.8 齿轮的喷丸处理形成裂纹原因及其防止措施	352
9.9 齿轮的磨削裂纹形成原因及其防止措施	352
9.9.1 齿轮磨削裂纹的特征	353
9.9.2 齿轮的磨齿裂纹	354
9.9.3 齿轮花键的磨削裂纹	354
9.9.4 齿轮磨削裂纹与淬火裂纹的区别	354
9.9.5 齿轮的磨削裂纹产生原因分析	354
9.9.6 防止齿轮磨削裂纹的措施	355
9.9.7 防止齿轮磨削裂纹的实例	358
9.10 调质齿轮淬火裂纹形成原因分析及其防止措施	359
参考文献	361

第 1 章 热处理应力的概述

工件在热处理时，特别是淬火过程中，因其截面各部分加热和冷却速度不一致而存在温差，加上组织转变的不等时性等原因，使得工件截面上各部分的体积胀缩不均匀，组织转变不均匀，以及弹塑性畸变不一致，从而导致热处理应力的产生。热处理应力的产生、大小、状态及其分布直接影响到热处理质量。例如，较高的淬火应力一旦超过钢的屈服强度和脆断强度时，将会引起工件的畸变，甚至开裂。

热处理应力的产生原因比较复杂，影响因素也较多。如钢的化学成分、原始组织、工件形状、尺寸大小及热处理操作方法等都可能使工件在热处理过程中产生畸变，甚至开裂。因此，在分析工件热处理过程中出现的畸变和裂纹时，首先要了解产生热处理应力的类型、原因、影响因素，以及热处理应力对工件畸变与裂纹的作用，其次制订出减少和消除热处理应力的措施与方法等。

1.1 热处理应力及其分类

热处理应力主要可以分为热应力和组织应力两种。工件的热处理畸变是热应力和组织应力综合作用的结果。热处理应力在工件内存在的状态及其引起的作用是有不同的。因加热或冷却不均匀而造成的内应力称为热应力；因组织转变的不等时性所造成的内应力称为组织应力。另外，因工件内部组织转变的不均匀而引起的内应力称为附加应力。热处理后工件的最终应力状态及应力大小取决于热应力、组织应力及附加应力之和，称之为残余应力。

工件在热处理时形成的畸变与裂纹，就是这些内应力综合作用的结果。同时，在热处理应力的作用下，有时会使工件的某一部分处于拉应力状态，而另一部分处于压应力状态，有时可能使工件内部各部分的应力状态分布十分复杂。对此，应根据实际情况加以分析。

1. 热应力

热应力是热处理过程中，工件的表面与中心或薄的部位和厚的部位之间因加热或冷却速度的不同导致体积胀缩不均而产生的内应力。通常，加热或冷却速度越快，产生的热应力越大。

2. 组织应力

由相变引起的比体积变化的不等时性所产生的内应力称为组织应力，组织应力又称相变应力。通常，组织结构转变前后其比体积越大、各部位转变的时间差越大，则组织应力也越大。

3. 附加应力

工件在热处理过程中,除了能够形成热应力与组织应力外,因工件表面与中心处组织的不均匀性以及工件内部的弹性畸变不一致也能形成内应力,称之为附加应力。例如,工件表层的增碳或者脱碳,表面淬火或局部淬火以及其他能够导致工件表面和中心处组织不均的因素,均能够产生热处理的附加应力。

(1) 表面淬火或者局部淬火时形成的附加应力 局部淬火或者表面淬火(如感应淬火、火焰淬火和激光淬火等)时,仅在被淬火的部分形成马氏体组织,没有淬火的部分仍是原始组织,从而导致整个工件上比体积的差别。此时,因工件表层马氏体比体积增大引起的膨胀受到中心部分的限制,使表面受到压应力、中心受到拉应力的作用。

(2) 渗碳淬火时形成的附加应力 渗碳工件淬火时,因其表层含碳量较高,内部含碳量低(钢材的原始含碳量),则表层与心部的相变温度(即 M_s 点)不同(表层较心部的相变温度低)。因此,内部首先发生组织转变而膨胀。这时表层组织仍为奥氏体,仍处于塑性状态。初期表面受到拉应力的作用,心部受到压应力作用。因表层的塑性极好,在拉应力作用下易发生塑性畸变而导致应力松弛,即其应力值有所减小。随后,待高碳的表层也发生马氏体转变而膨胀时,表层与中心的应力正好相反,即表面是压应力,心部是拉应力。

4. 残余应力

热处理时只要伴随有相变过程,热应力与组织应力将同时产生。工件的最终应力状态取决于热应力、组织应力及附加应力之和。热处理后最终保留下来的内应力,称为残余应力。其分为残余拉应力(以“+”表示)与残余压应力(以“-”表示)。

1.2 热处理残余应力

热处理过程中所形成的内应力是不断变化着的瞬时应力。热处理后在工件中存在的内应力是残余应力。瞬时应力随着温度的变化和组织转变的进程而不断地改变其大小和方向,也改变着分布状态。

由于工件的热处理工艺不同,其形成的热处理残余应力也不尽相同,如表面淬火后形成的残余应力(包括感应淬火、火焰淬火及激光淬火后形成的残余应力),以及化学热处理后形成的残余应力(包括渗碳、碳氮共渗、渗氮及氮碳共渗后形成的残余应力)等。

1. 感应淬火后的残余应力

感应淬火是将工件表层快速加热到钢材的临界点以上温度,然后进行急冷淬火的过程。因感应淬火过程中工件心部未被加热,因而必然导致热应力的产生。表层因伴随组织转变而产生组织应力。因此,感应淬火后工件的残余应力也是热应力与组织应力的综合作用结果。

2. 渗碳淬火后的残余应力

工件经渗碳淬火后,因渗碳层与内部的含碳量不同,以及其在渗碳的加热、冷却

及淬火过程中所发生的胀缩和马氏体相变的膨胀作用，特别是由于工件表面与心部因含碳量的差异造成的比体积变化和马氏体转变温度 (M_s 点) 的差别等原因，将造成工件存在残余应力。

碳氮共渗具有跟渗碳淬火相似的表面压应力。若渗层内残留奥氏体量过多会降低压应力。若表层出现非马氏体组织，表层还会出现残余拉应力。

3. 渗氮处理的残余应力

工件在进行渗氮处理时会形成残余应力，其产生原因是：渗氮时由于氮原子渗入到工件的表层，而造成渗氮层的体积增大（膨胀），所以表层产生了压应力，而内部呈现拉应力状态。由于渗氮件表面与心部组织的比体积差大，因此渗氮层受压应力一般较大。工件直径越大，渗氮后表层的压应力也越大，而内部的拉应力逐渐减小。

第2章 热处理畸变及其原因分析和规律

热处理畸变是指工件经热处理后其形状和尺寸发生变化的一种物理现象。引起热处理畸变要具备三个条件：应力、塑性及作用时间。任何热处理畸变都需要这三个条件，只是三者的关系是可以变化的。

齿轮热处理畸变除了圆度畸变、锥度畸变和翘曲畸变外，还有齿形偏差、齿向偏差，以及径向圆跳动和轴线偏差等。畸变量是指淬火后的工件最大尺寸与名义尺寸之差。

2.1 热处理畸变机理

热处理畸变是热处理生产过程的主要缺陷之一。工件在热处理过程中会引起体积的变化，如加热时会引起体积膨胀，冷却时会引起体积收缩。此外，在相变时由于各种相的比体积不同也会引起体积的变化，如钢材加热到临界点以上转变成奥氏体，由于奥氏体的比体积较小而收缩，钢材淬火时转变成马氏体，由于马氏体的比体积大而引起膨胀。工件在加热和冷却时内外层的温度有差别，发生相变的时间也不一致，以及组织结构的不均匀性，必然会使工件内部产生热处理应力，从而导致工件的畸变。

将工件加热到较高温度，然后进行快速冷却，就会产生热处理应力，同时工件的形状、材料成分、机械加工、工件自重以及摆放方式等也会影响工件的热处理畸变。工件淬火要经过三个阶段：加热过程（释放内应力）、保温（工件的自重和高温蠕变作用）、冷却（不均匀的冷却和相变）。这三个阶段应力相互叠加将导致工件最终的淬火畸变。

2.2 热处理畸变的种类

工件的热处理畸变按其产生时期可分为：淬火时产生的畸变（即淬火畸变）和热处理后放置时间内产生的畸变（即时效畸变）；按产生畸变的形式可分为：形状畸变（几何形状的翘曲、扭曲、弯曲）和体积畸变（体积的胀缩）。然而，实际上这两种形式的畸变很少单独存在，由于钢材成分、工件加工形状差异和工艺操作等因素影响，上述两种形式经常同时发生。

1. 形状畸变

热处理时工件形状的变化是由于内应力和外应力综合作用形成的，在加热和冷却过程中工件的各部分温度有差异，热胀冷缩不均和组织转变不同时，内部就产生了内应力。形状复杂、截面尺寸相差大、尺寸大的工件产生的内应力更大。当内应力超过

了材料的屈服强度,就要发生塑性畸变,由此引起工件形状变化。工件的自重引起下垂并产生应力,导致形状的翘曲、弯曲及扭曲等非正常畸变,例如,长齿轮轴的弯曲,大直径盘形齿轮及薄壁齿圈、齿套等的翘曲或圆度畸变等。这类畸变是比较明显的,容易通过目测来判断。

工件产生形状畸变的形成条件是:当工件本身受到某种应力(外加机械应力、热应力或组织应力等)作用,其应力值超过了工件材料在该状态下的屈服强度后产生翘曲、扭曲等形式的塑性畸变。

2. 体积畸变

工件经热处理后其金相组织发生了改变,各种组织的比体积差异引起工件呈比例的胀缩,体积变化不会影响该工件原来的形状,例如,齿轮轴的轴向伸长、缩短等。这类畸变量一般较小,目测很难判断。

工件的体积畸变与各相组织转变时的成分和合应力有关,而与热处理应力作用的大小无关。体积变化的大小与下列因素和条件有关:①淬火前后组织比体积差越大,体积的畸变越大;②提高淬火温度,奥氏体中合金元素的含量提高,使马氏体的比体积增大,残留奥氏体增加;③全部淬透后的工件体积畸变最大。

3. 微畸变

微畸变是由于热处理后的不稳定组织(如淬火后的马氏体和残留奥氏体)和不稳定的应力状态(无论压应力或拉应力),在常温或零下温度较长时间的放置或使用过程中,逐渐发生转变并趋于稳定,由此而伴随有畸变的出现,例如,渗碳或感应淬火后的齿轮齿形、表面形状的变化(如公法线长度和齿厚变化)。微畸变是造成齿轮工作时产生噪声的原因之一。

2.3 外应力与热处理畸变

在工件热处理过程中,当外应力很大而且材料的塑性好时,即使作用时间短,也会引起大的畸变,如红热齿轮在出炉转移过程中受到冲撞力引起的畸变;当外应力小,但材料的塑性好,而且作用时间长,也可以引起大的畸变,如淬火加热过程中,工件装夹或堆放不当,因相互挤压或自重引起的应力虽然不大,但是工件塑性好,加热时间长,也会造成较大的畸变。

2.4 内应力与热处理畸变

在热处理过程中,内应力的形成是不断发生瞬时变化的,其大小、方向和分布状态随着温度的变化和组织转变的进程而不断改变。因此,由内应力引起的畸变就比较复杂。

1. 热处理内应力的种类

热处理产生的内应力主要是热应力和组织应力两类。工件在加热和冷却时,一方

面由于内外存在温差而引起比体积差,同时,表面与心部的不等时性相变也会造成比体积差,这种比体积差便是热处理应力产生的根本原因。而工件最后的残余应力则是热应力和组织应力综合作用的结果。热应力是温度梯度的函数,它取决于加热温度、加热速度、工件截面厚度的差异程度、材料的散热率、比热容、膨胀系数,以及加热、冷却的均匀性等。组织应力取决于马氏体转变温度、马氏体的正方性及残留奥氏体量。此外,钢的淬透性、钢的原始组织、淬火温度、冷却速度也是影响组织应力的重要因素。

2. 内应力的计算

当工件中的内应力超过了材料的屈服强度时,将使工件产生塑性畸变。为了说明普通淬火时所产生的应力将超过材料屈服强度,可通过下面的计算来加以验证。

已知材料线胀系数 $\alpha_l = 11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; 弹性模量 $E = 205.8 \text{ kPa}$; 泊松比 $\mu = 0.3$; 淬火加热温度 $T_1 = 830 \text{ } ^\circ\text{C}$; 冷却后温度 $T_2 = 180 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

当工件快速冷却时,由热胀到冷缩状态的应力 σ 为

$$\sigma = \alpha_l E (T_1 - T_2) / (1 - \mu) = \frac{11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 205.8 \text{ kPa} \times (830 - 180) \text{ } ^\circ\text{C}}{1 - 0.3} \\ = 2.197 \text{ kPa}$$

常用钢材的屈服强度均小于此值,即这种淬火应力远远大于屈服强度,淬火工件将产生塑性畸变。这也说明要进行淬火,就必须在加热后快速冷却,内应力也就伴随产生,要求淬火而不产生淬火应力是不可能的。

2.5 热处理畸变原因分析及畸变规律

齿轮的热处理,如整体热处理、表面热处理及化学热处理等均需要通过加热和冷却的过程。因此,热处理不可避免地造成了齿轮内部产生热应力和组织应力。但其中最容易造成畸变的是淬火过程,由于淬火过程中组织比体积变化大、加热温度高、冷却激烈等,因此导致畸变的因素较多。

工件因冷却不均匀,产生翘曲畸变,其畸变趋势取决于当时的热应力、组织应力 and 体积畸变量的大小。当热应力作用占主导时,工件向快冷面凸起;反之,以组织应力占主导时,使工件向慢冷面凸起。冷却速度越快,造成冷却不均匀程度越严重,则翘曲畸变越显著。实践证明,形状不对称工件,无论什么钢种,在完全淬硬的情况下,若采用水或盐水淬火,多数是冷却快的一面凸起;如果油淬或硝酸盐分级淬火,则多是慢冷面凸起。显然,前者是因为水的冷却速度快,热应力显著;后者则组织应力显著,因此产生了完全相反的畸变。

为了减小工件热处理畸变,应尽量减小热处理应力。为了避免裂纹产生,应预防工件中出现较大的拉应力,即淬火过程应尽可能减少组织应力,或者增加热应力也可以达到同样的目的。

1. 热应力引起的畸变及其畸变规律

热应力引起的畸变主要发生在热应力产生的初期,这时工件内部处在塑性较好的