
金属热处理 缺陷分析及案例

王广生等 编著

机械工业出版社

金属热处理缺陷分析及案例

王广生 石康才 周敬恩 等编著
曹敏达 王志刚



机械工业出版社

本书对热处理缺陷进行了全面系统论述,着重阐述了热处理裂纹、变形超指标、残余应力过大、组织不合格、性能不合格、脆性等常见热处理缺陷,采取理论分析与实际经验相结合的方法,讨论了各种热处理缺陷的特征、产生原因、危害性及预防挽救措施,专门介绍了真空热处理、保护热处理及有色金属热处理可能出现的缺陷;从预防的角度介绍了热处理质量全面控制;最后一章还列举了各种类型热处理缺陷分析的案例。

本书可供热处理研究、生产、检验的工程技术人员及管理人员阅读,对机械产品设计、冷热加工工艺和维修人员,以及高等院校金属材料及热处理专业师生也具有重要参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

金属热处理缺陷分析及案例/王广生等编著. —北京:
机械工业出版社, 1997
ISBN 7-111-05680-9

I. 金… II. 王… III. 热处理缺陷-分析 IV. TG157

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第10934号

出版人: 马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)
责任编辑: 韩会民 版式设计: 冉晓华 责任校对: 林春菲
封面设计: 郭景云 责任印制: 卢子祥
机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
1997年12月第1版第1次印刷
787mm×1092mm¹/₃₂·17.5印张·3插页·386千字
0 001—3 000册
定价: 28.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

前 言

热处理质量直接影响各种机械产品的性能和使用安全，对开发新产品和提高产品竞争力有着重要作用，所以，减少和避免热处理缺陷、提高热处理质量是机械行业关注的焦点之一，也是热处理工作者的重要使命。为了推动热处理技术进步和生产发展，促进机械产品质量提高，我们受全国热处理学会委托，编写了这本关于热处理缺陷方面的专著，全面系统地阐述了热处理缺陷分析理论，列举了生产中发生的典型实例，填补了热处理专业书库的缺项，对热处理生产具有借鉴和参考价值。

热处理缺陷包括热处理生产过程中产生的使零件失去使用价值或不符合技术条件要求的各种不足，以及会使热处理以后的后道工序工艺性能变坏或降低使用性能的热处理隐患。主要有热处理裂纹、变形超指标、残余应力过大、组织不合格、力学性能不合格、脆性，还有表面热处理和化学热处理硬化层深度不合格、真空热处理和保护热处理表面层元素变化、表面不光亮，以及有色金属热处理特殊缺陷等等。本书对各种热处理缺陷的形态和危害、产生原因、预防和补救措施等方面，进行了全面分析论述。从预防热处理缺陷角度介绍了热处理全面质量控制，根治热处理缺陷的重要措施是对热处理全过程，包括热处理前、热处理中、热处理后，进行认真质量控制，对热处理生产的环境、设备、工艺、原材料、人员等环节严格要求和控制，把热处理缺陷消灭在质量形成过程中。在全国广大热处理工作者支持下，我们收集到了58例热处理缺陷分析案例，书中选登了其中44例，从缺

陷形貌特征、试验分析、验证实验及预防挽救措施等方面详实的介绍了常见热处理缺陷分析结果。

本书第1、8、9章由王广生编写，第2章由石康才编写，第3、4、6、7章由周敬恩编写，第5章由王广生、石康才编写，第10章的案例由有关工厂、研究院所提供，王广生、曹敏达、王志刚收集整理。全书由王广生统稿。在热处理缺陷分析案例收集过程中得到了有关作者和《金属热处理》杂志编辑部大力支持，在编写过程中航空热处理中心的同志给予了很多帮助，谨此致谢。

由于我们水平有限，书中难免有缺点和不妥之处，望广大读者批评指正。

作 者

目 录

前言

第 1 章 概论	1
第 2 章 热处理裂纹	7
1 热处理裂纹的一般概念	7
2 加热不当形成的裂纹	9
2.1 升温速度过快引起的裂纹	9
2.2 表面增碳或脱碳引起的裂纹	10
2.3 过热或过烧引起的裂纹	11
2.4 在含氢气氛中加热引起的氢致裂纹	12
3 金属零件的淬火裂纹	14
3.1 马氏体的显微裂纹	14
3.2 淬火裂纹	16
3.2.1 纵向裂纹	18
3.2.2 横向裂纹(弧形裂纹)	20
3.2.3 网状裂纹	22
3.2.4 剥离裂纹	25
3.2.5 应力集中裂纹	26
3.2.6 过热淬火裂纹	27
4 影响淬火裂纹形成的因素	27
4.1 冶金因素的影响	28
4.1.1 钢件的冶金质量	28
4.1.2 钢件的化学成分	31
4.1.3 原始组织的影响	32
4.2 零件尺寸和结构的影响	33
4.3 工艺因素的影响	36

4.3.1	加热因素的影响	37
4.3.2	冷却因素的影响	38
5	预防淬火裂纹的方法	40
5.1	正确进行产品设计	40
5.1.1	材料选择	40
5.1.2	零件的结构设计	42
5.1.3	热处理技术条件	43
5.2	合理安排工艺路线	50
5.3	恰当确定加热参数	52
5.3.1	加热介质	52
5.3.2	加热速度	53
5.3.3	加热温度	54
5.3.4	保温时间	56
5.4	选定合适的淬火方法	60
5.5	淬火介质的选择	70
5.5.1	淬火介质的冷却能力	70
5.5.2	淬火介质特点与选择	73
5.6	防止淬火裂纹的其他措施	76
6	其他热处理裂纹	77
6.1	回火裂纹	77
6.2	冷处理裂纹	78
6.3	时效裂纹	79
6.4	磨削裂纹	79
6.5	电镀裂纹	82
第3章	热处理变形	84
1	工件热处理的尺寸变化	85
2	工件热处理的形状畸变	89
3	热处理变形的一般规律	90
3.1	淬火变形的趋势	90

3.2	影响热处理变形的因素	92
3.2.1	化学成分对热处理变形的影响	92
3.2.2	原始组织和应力状态对热处理变形的影响	97
3.2.3	工件几何形状对热处理变形的影响	100
3.2.4	工艺参数对热处理变形的影响	101
3.2.5	时效与冷处理对热处理变形的影响	106
3.3	化学热处理工件的变形	109
3.3.1	渗碳工件的变形	109
3.3.2	渗氮工件的变形	114
4	热处理变形的校正	116
4.1	机械校正法	116
4.2	热处理校正法	116
第4章	残余内应力	119
1	热处理内应力	119
1.1	热应力	119
1.2	组织应力	121
1.3	热处理工件的残余应力分布及影响因素	122
1.4	表面淬火工件的残余应力	124
1.5	化学热处理工件的残余应力	128
2	残余应力对力学性能的影响	129
2.1	残余应力与硬度	129
2.2	残余应力与磨损	130
2.3	残余应力与疲劳	133
2.3.1	残余压应力提高工件的疲劳强度	133
2.3.2	残余应力对疲劳强度影响的机理	137
2.4	残余应力与腐蚀	141
2.5	残余应力与电镀	142
3	残余应力的调整和消除	143
3.1	热处理对消除残余应力的作用	144

3.1.1	消除应力退火	144
3.1.2	回火与残余应力的去除	145
第5章	组织不合格	147
1	热处理与组织、性能的关系	147
2	氧化与脱碳	150
2.1	氧化	150
2.2	脱碳	151
2.3	防止和减轻氧化脱碳的措施	153
3	过热与过烧	155
3.1	过热	155
3.2	过烧	160
4	低、中碳钢预备热处理球化体级别不合格	160
5	渗碳组织缺陷	161
5.1	表层碳化物过多,呈大块状或网状分布	162
5.2	残余奥氏体量过多	163
5.3	马氏体粗大	164
5.4	内氧化	164
5.5	黑色组织	166
5.5.1	黑色点状组织	167
5.5.2	黑色网状组织	169
5.5.3	托氏体黑色网带组织	170
6	渗氮组织缺陷	170
6.1	渗前原始组织中 铁素体过多、回火索氏体 组织粗大	170
6.2	化合物层疏松	172
6.3	针状组织	173
6.4	网状和脉状氮化物	174
7	渗硼组织缺陷	175
7.1	渗硼层的非正常组织	175

7.2 硼化层较多孔洞	177
第6章 力学性能不合格	178
1 热处理和硬度	178
1.1 软点	179
1.2 硬度不足	180
1.3 高频淬火和渗碳工件的软点和硬度不足	181
2 拉伸性能和疲劳强度不合格	182
2.1 拉伸性能不合格	182
2.2 疲劳性能不合格	183
2.2.1 淬火不充分的影响	183
2.2.2 渗碳层内氧化的影响	184
2.2.3 碳氮共渗层中黑色组织的影响	185
2.2.4 渗碳层中过量残余奥氏体的影响	185
2.2.5 渗碳层中网状和大块状碳化物的影响	186
2.2.6 脱碳的影响	187
3 耐腐蚀性能不良	188
3.1 热处理对晶间腐蚀和点腐蚀性能的影响	190
3.2 热处理对应力腐蚀开裂的影响	193
4 持久蠕变性能不合格	194
4.1 高温合金热处理与持久蠕变性能	195
4.1.1 高温合金中的常见相	195
4.1.2 高温合金热处理对持久蠕变性能的影响	195
4.2 高温蠕变脆性	200
5 非铁金属合金力学性能不合格	202
第7章 脆性	206
1 回火脆性	206
1.1 第一类回火脆性	207
1.1.1 第一类回火脆性机理	208
1.1.2 第一类回火脆性的抑制和防止	209

1.2	第二类回火脆性	210
1.2.1	影响第二类回火脆性的因素	211
1.2.2	第二类回火脆性机理	213
1.2.3	第二类回火脆性的抑制和防止	214
2	低温脆性	216
2.1	低温脆性的评定	216
2.2	钢的成分和组织对低温脆性断裂的影响	217
2.2.1	合金元素和杂质的影响	218
2.2.2	组织的影响	219
3	氢脆性	222
3.1	氢脆及其分类	222
3.2	钢的成分和组织对氢脆的影响	223
4	σ 脆性	225
4.1	σ 相的性质及其对性能的影响	225
4.2	钢的成分、热处理与 σ 相的形成	226
5	电镀脆性	227
5.1	电镀脆性的影响因素	227
5.2	防止电镀脆性的措施	228
6	渗层脆性	229
6.1	渗氮层脆性	229
6.2	渗硼层脆性	230
第8章 其他热处理缺陷		232
1	化学热处理和表面热处理特殊缺陷	232
1.1	渗碳硬化层深度不合格	233
1.2	渗氮硬化层深度不合格	236
1.3	渗硼、渗铝硬化层深度不合格	237
1.4	感应加热淬火硬化层深度不合格	237
1.5	火焰加热淬火硬化层深度不合格	238
2	真空热处理和保护热处理缺陷	239

2.1	真空热处理表面合金元素贫化与粘连	239
2.2	表面不光亮和氧化色	242
2.3	表面增碳或增氮	244
3	有色金属合金热处理缺陷	245
3.1	铝合金热处理缺陷	246
3.2	镁合金热处理缺陷	248
3.3	钛合金热处理缺陷	249
3.4	铜合金热处理缺陷	249
3.5	高温合金热处理缺陷	251
第9章 热处理缺陷预防与全面质量控制		254
1	热处理全面质量控制的观念	254
2	基础条件控制	255
2.1	环境条件控制	255
2.1.1	厂房	255
2.1.2	温度	258
2.1.3	照明与噪声	260
2.2	设备与仪表控制	261
2.2.1	热处理炉的炉温均匀性及分类	261
2.2.2	热处理炉气氛控制	263
2.2.3	冷却设备控制	267
2.2.4	检验设备控制	270
2.2.5	温度仪表及控制系统	271
2.2.6	气氛仪表及控制系统	274
2.3	人员素质和管理水平	277
2.3.1	人员素质	277
2.3.2	质量管理	277
3	热处理前质量控制	281
3.1	热处理零件设计的质量控制	281
3.1.1	材料选择	281

3.1.2	热处理技术要求的确定和标注	285
3.1.3	热处理零件结构形状设计	291
3.2	原材料质量控制	293
3.2.1	零件原材料质量控制	293
3.2.2	热处理工艺材料质量控制	298
3.3	热处理前各工序质量控制	302
3.3.1	锻造质量控制	302
3.3.2	铸造质量控制	308
3.3.3	焊接质量控制	309
3.3.4	机械加工质量控制	311
4	热处理中质量控制	312
4.1	待处理件的核查	313
4.2	预备热处理质量控制	314
4.3	最终热处理质量控制	322
4.3.1	工艺控制	322
4.3.2	设备选择与槽液控制	333
4.3.3	生产操作控制	334
4.3.4	质量要求与检验	335
4.4	表面热处理与化学热处理的质量控制	336
4.4.1	工艺方法选择	337
4.4.2	表面淬火质量控制	339
4.4.3	渗碳质量控制	342
4.4.4	渗氮质量控制	345
4.4.5	渗硼质量控制	350
4.4.6	渗铝质量控制	352
5	热处理后质量控制	353
5.1	后处理质量控制	354
5.1.1	热处理后防锈	354
5.1.2	表面强化	354
5.1.3	磨削加工	356

5.1.4	电镀	358
5.2	完善质量服务工作	360
5.3	重视环保技术安全工作	361
5.3.1	热处理生产的环境保护	361
5.3.2	热处理生产的技术安全	363
第 10 章	热处理缺陷分析案例	367
1	汽车半轴淬火开裂与疲劳断裂的分析及防止措施	367
2	45 钢工件在易裂尺寸范围开裂的分析及防止措施	372
3	本体淬火裂纹的分析及防止措施	374
4	三硝水-空气双液淬火裂纹的分析及防止措施	377
5	绞肉机孔板淬火工艺的改进	380
6	高碳钢及轴承钢零件淬火裂纹的分析及防止措施	382
7	机床活塞超声淬火裂纹的分析及防止措施	387
8	汽车转向节中频淬火裂纹的分析及防止措施	389
9	大型工件热处理过程中内裂的分析及防止措施	394
10	高速钢焊接工具裂纹的分析及防止措施	403
11	曲线齿锥齿轮热处理变形的分析及防止措施	409
12	无压淬火减少曲线齿锥齿轮平面翘曲变形	414
13	齿轮淬火变形的分析及防止措施	419
14	锥齿轮花键孔变形的分析及防止措施	423
15	汽车稳定杆淬火工艺的改进	425
16	工字卡规热处理变形的分析及防止措施	428
17	利用热应力预弯曲减少上导轨淬火变形	433
18	碟形刀片的防止变形热处理	437
19	65Mn 弹簧片热处理变形的分析及防止措施	440
20	空心辊中频表面淬火变形的分析及防止措施	442
21	气体氮碳共渗零件变形的分析及防止措施	448
22	T10A 模具线切割开裂的分析及防止措施	451
23	大型冷冲模具热处理缺陷分析及改进措施	453

24	热处理工艺对零件表面组织及磨削裂纹的影响	455
25	木工锯条热处理残品的挽救措施	461
26	气体渗碳件的补修工艺	465
27	高频淬火构件低应力疲劳脆断的分析及防止措施	468
28	20 钢板冷冲压产生裂纹的原因及解决方法	472
29	20CrMnTi 钢预备热处理组织缺陷分析	474
30	20MnV 钢圆环链质量分析	478
31	15Cr 钢活塞销淬火工艺的改进	483
32	游标卡尺测尺热处理新工艺	485
33	球墨铸铁底座退火工艺的改进	488
34	冷作模具失效分析及改进措施	491
35	叉车半轴中频淬火质量分析与工艺改进	496
36	曲轴气体渗氮后表面硬度偏低的挽救措施	500
37	65Mn 钢爪型接地弹簧垫圈热处理工艺改进	503
38	高强度钢甲醇裂解气保护热处理氢脆	505
39	20CrMnTi 钢齿轮碳氮共渗中的氢脆	510
40	渗碳齿轮通氮淬火的氢脆现象	516
41	Z10 硅钢片的脆化与防止	521
42	25Cr2Mo1V 钢高温紧固螺栓脆化及恢复热处理	524
43	汽车渗碳零件失效分析	529
44	1Cr18Ni9Ti 钢桔皮状表面的探讨	538
参考文献		542

第 1 章 概 论

热处理通过加热和冷却，使零件获得适应工作条件需要的使用性能，达到充分发挥材料潜力、提高产品质量、延长使用寿命的目的。如果出现热处理缺陷，热处理就无法达到预期的目的，成为不合格品或废品，造成经济损失；如果热处理缺陷不能及时发现，带有缺陷的零件或产品投入使用，可能引起重大事故，工程上这类事件时有发生。由于热处理是通过改变材料内部微观组织结构，达到零件宏观性能要求的特种工艺，所以热处理缺陷除一部分是宏观的，大部分是微观的，必须使用仪器检查，给热处理缺陷检查和发现带来困难。另一方面，热处理属于批量连续生产，一旦发生热处理缺陷，一般情况涉及范围都比较大，因此，热处理缺陷是危害性大的缺陷，应大力防止产生这类缺陷。

热处理缺陷一般按缺陷性质分类，主要包括热处理裂纹、变形、残余应力、组织不合格、性能不合格、脆性及其他缺陷等七大类，如表 1-1 所示。

热处理缺陷中最危险的是裂纹，一般称之为第一类热处理缺陷。它属于不可挽救的缺陷，一般只能将裂纹零件报废处理，如果漏检带到使用中，很容易扩散引起突然断裂，造成重大事故，所以热处理生产中要特别注意设法避免产生裂纹，并严格检查，防止漏检。

热处理变形是最常见的热处理缺陷，淬火变形占淬火缺陷的 40%~50%，一般称之为第二类热处理缺陷。虽然热处理变形一般可用校正法修复，但耗时费工，经济损失严重，所

以在热处理生产中要认真研究变形规律，尽量设法减少或避免变形。

残余应力、组织不合格、性能不合格、脆性及其他缺陷，从发生频率及严重性来讲，相对裂纹和变形，属于第三位，一般统称为第三类热处理缺陷。这类缺陷的特点是一般需用专门仪器和方法来检测，漏检可能性较大，对使用带来较大的潜在危害，所以在热处理生产中要特别重视全面质量控制，加强检验，减少这类缺陷，严防漏检。

表 1-1 热处理缺陷分类

缺陷类别	热处理缺陷名称
裂纹	淬火裂纹、放置裂纹、延迟裂纹、回火裂纹、时效裂纹、冷处理裂纹、感应加热淬火裂纹、火焰加热淬火裂纹、剥落、分层、鼓包、磨削裂纹、电镀裂纹
变形	尺寸变形：胀大、缩小、伸长、缩短 形状变形：弯曲、扭曲、翘曲 微小变形
残余应力	组织应力 热应力 综合应力
组织不合格	氧化、脱碳、过热、过烧、粗晶、魏氏组织、碳化物石墨化、网状碳化物、共晶组织、萁状断口、石状断口、鳞状断口、球化组织不良、反常组织、内氧化、黑色组织、渗碳层碳化物过多及大块状或网状分布、残余奥氏体过多、马氏体粗大、渗氮前组织铁素体过多、渗氮白层、渗氮化合物层疏松、针状组织、网状和脉冲氮化物、渗硼层非正常组织、硼化层孔洞、螺旋状回火带
性能不合格	硬度不合格、软点、硬化不均匀、软化不均匀、拉伸性能不合格、疲劳性能不好、耐腐蚀性能不良、持久蠕变性能不合格、渗碳表面硬度不足和心部硬度不合格、渗氮表面硬度不足和心部硬度不合格、感应加热淬火硬度不足和不均匀、火焰加热淬火硬度不足和不均匀