

# 金属热处理缺陷 分析及案例

第2版

王广生 等编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



# 金属热处理缺陷 分析及案例

第 2 版

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

本书采取理论分析与实际经验相结合的方法,对金属热处理缺陷进行了全面系统论述。本书着重介绍了热处理裂纹、热处理变形超指标、残留内应力过大、组织不合格、力学性能不合格、脆性等常见热处理缺陷的特征、产生原因、危害性及预防挽救措施;专门介绍了真空热处理、保护热处理及非铁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;最后列举了84个各种类型的热处理缺陷分析案例,可供读者有针对性的参考。

本书可供热处理工程技术人员和管理人员阅读,对从事机械产品设计和冷热加工工艺编制的技术人员,以及相关专业的在校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. —2版.

—北京:机械工业出版社,2007.8

ISBN 978-7-111-05680-5

I. 金… II. 王… III. 热处理缺陷-金属分析 IV. TG157

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第106908号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:陈保华 版式设计:冉晓华 责任校对:吴美英

封面设计:王奕文 责任印制:李妍

北京蓝海印刷有限公司印刷

2007年10月第2版·第1次印刷

169mm×239mm·15.75印张·1插页·613千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-05680-5

定价:45.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)68351729

封面无防伪标均为盗版

# 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。因此，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，于1997年编写出版了《金属热处理缺陷分析及案例》（第1版）。此书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。

热处理缺陷主要有热处理裂纹、变形超指标、残留应力过大、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，以及非铁金属热处理特殊缺陷等。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形成过程中。在全国广大热处理工作者支持下，我们收集并选登了各种热处理缺陷案例，从缺陷形貌特征、试验分析、验证试验及预防挽救措施等方面详实地介绍了常见热处理缺陷分析结果。

《金属热处理缺陷分析及案例》第1版自1997年出版以来，深受读者欢迎，已多次重印。近年来热处理技术迅速发展，热处理缺陷研究更为系统和深入。为了适应热处理行业发展形势和需求，我们对该书进行了增补和修订。在“第1章概论”中，增加了“热处理缺陷分析方法”一节；在“第5章组织不合格”中，增加了“感应加热淬火组织缺陷”一节；在“第8章其他热处理缺陷”一章中，对“真空热处理和保护热处理缺陷”进行了重写，增加了较多内容；在“第9章热处理缺陷预防与全面质量控制”中，重写了“质量管理”有关内容；第10章新增了40个案例，总共介绍了84个热处理缺陷分析案例，并按热处理缺陷性质对这84个案例进行了分类编排。此外，我们又对书中内容进行了更新，对不妥之处进行了修改。

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、研究院所的专业人员提供，由王广生、曹敏达、王志刚进行整理。全书由王广生统

#### IV 金属热处理缺陷分析及案例

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》杂志编辑部的大力支持；在编写过程中，航空热处理中心的同志给予了很多帮助，在此表示衷心感谢。

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
1.1 热处理缺陷及分类	1
1.2 热处理缺陷分析方法	4
第2章 热处理裂纹	8
2.1 热处理裂纹的一般概念	8
2.2 加热不当形成的裂纹	9
2.2.1 升温速度过快引起的 裂纹	9
2.2.2 表面增碳或脱碳引起 的裂纹	10
2.2.3 过热或过烧引起的 裂纹	10
2.2.4 在含氢气氛中加热引 起的氢致裂纹	11
2.3 金属零件的淬火裂纹	13
2.3.1 马氏体的显微裂纹	13
2.3.2 淬火裂纹	14
2.4 影响淬火裂纹形成的因素	21
2.4.1 冶金因素的影响	21
2.4.2 零件尺寸和结构的 影响	25
2.4.3 工艺因素的影响	27
2.5 预防淬火裂纹的方法	29
2.5.1 正确进行产品设计	29
2.5.2 合理安排工艺路线	35
2.5.3 确定合理的加热参数	36
2.5.4 选定合适的淬火方法	41
2.5.5 淬火介质的选择	47
2.5.6 防止淬火裂纹的其他 措施	51
2.6 其他热处理裂纹	51
2.6.1 回火裂纹	51
2.6.2 冷处理裂纹	52
2.6.3 时效裂纹	53
2.6.4 磨削裂纹	53
2.6.5 电镀裂纹	55
第3章 热处理变形	56
3.1 工件热处理的尺寸变化	56
3.2 工件热处理的形状畸变	59
3.3 热处理变形的一般规律	60
3.3.1 淬火变形的趋势	60
3.3.2 影响热处理变形的 因素	62
3.3.3 化学热处理工件的 变形	71
3.4 热处理变形的校正	75
3.4.1 机械校正法	75
3.4.2 热处理校正法	75
第4章 残留内应力	77
4.1 热处理内应力	77
4.1.1 热应力	77
4.1.2 组织应力	78
4.1.3 热处理工件的残留应 力分布及影响因素	78
4.1.4 表面淬火工件的残留 应力	80
4.1.5 化学热处理工件的残 留应力	82
4.2 残留应力对力学性能的 影响	83
4.2.1 残留应力与硬度	84
4.2.2 残留应力与磨损	84
4.2.3 残留应力与疲劳	86
4.2.4 残留应力与腐蚀	92
4.2.5 残留应力与电镀	92

## VI 金属热处理缺陷分析及案例

4.3 残留应力的调整和消除 .....	93	6.2 拉伸性能和疲劳强度不 合格 .....	124
<b>第5章 组织不合格 .....</b>	<b>96</b>	6.2.1 拉伸性能不合格 .....	125
5.1 热处理与组织、性能的关系 .....	96	6.2.2 疲劳性能不合格 .....	126
5.2 氧化与脱碳 .....	99	6.3 耐腐蚀性能不良 .....	129
5.2.1 氧化 .....	99	6.3.1 热处理对晶间腐蚀和 点腐蚀性能的影响 .....	130
5.2.2 脱碳 .....	100	6.3.2 热处理对应力腐蚀开 裂的影响 .....	132
5.2.3 防止和减轻氧化脱碳 的措施 .....	101	6.4 持久蠕变性能不合格 .....	132
5.3 过热与过烧 .....	102	6.4.1 高温合金热处理与持 久蠕变性能 .....	133
5.3.1 过热 .....	102	6.4.2 高温蠕变脆性 .....	137
5.3.2 过烧 .....	105	6.5 非铁金属合金力学性能不 合格 .....	138
5.4 低、中碳钢预备热处理球化 体级别不合格 .....	106	<b>第7章 脆性 .....</b>	<b>140</b>
5.5 感应加热淬火组织缺陷 .....	107	7.1 回火脆性 .....	140
5.6 渗碳组织缺陷 .....	109	7.1.1 第一类回火脆性 .....	140
5.6.1 表层碳化物过多、呈 大块状或网状分布 .....	109	7.1.2 第二类回火脆性 .....	142
5.6.2 残留奥氏体量过多 .....	111	7.2 低温脆性 .....	146
5.6.3 马氏体粗大 .....	111	7.2.1 低温脆性的评定 .....	146
5.6.4 内氧化 .....	112	7.2.2 钢的成分和组织对低 温脆性断裂的影响 .....	147
5.6.5 黑色组织 .....	114	7.3 氢脆性 .....	151
5.7 渗氮组织缺陷 .....	116	7.3.1 氢脆及其分类 .....	151
5.7.1 渗前原始组织中 ferrite 体过多、回火索氏体组 织粗大 .....	116	7.3.2 钢的成分和组织对氢 脆的影响 .....	152
5.7.2 化合物层疏松 .....	117	7.4 $\sigma$ 脆性 .....	153
5.7.3 针状组织 .....	119	7.4.1 $\sigma$ 相的性质及其对性 能的影响 .....	153
5.7.4 网状和脉状氮化物 .....	119	7.4.2 钢的成分、热处理与 $\sigma$ 相的形成 .....	153
5.8 渗硼组织缺陷 .....	120	7.5 电镀脆性 .....	154
5.8.1 渗硼层的非正常组织 .....	120	7.5.1 电镀脆性的影响因素 .....	154
5.8.2 渗硼层存在较多孔洞 .....	121	7.5.2 防止电镀脆性的措施 .....	155
<b>第6章 力学性能不合格 .....</b>	<b>122</b>	7.6 渗层脆性 .....	155
6.1 热处理和硬度 .....	122	7.6.1 渗氮层脆性 .....	155
6.1.1 软点 .....	123	7.6.2 渗硼层脆性 .....	156
6.1.2 硬度不足 .....	123		
6.1.3 高频感应加热淬火和 渗碳工件的软点和 硬度不足 .....	124		

<b>第 8 章 其他热处理缺陷</b> .....	158	9.4.1 待处理件的核查	215
8.1 化学热处理和表面热处理		9.4.2 预备热处理质量控制	216
特殊缺陷 .....	158	9.4.3 淬火回火质量控制	221
8.1.1 渗碳硬化层深度不合格	159	9.4.4 表面热处理与化学热	
8.1.2 渗氮硬化层深度不合格	160	处理的质量控制 .....	230
8.1.3 渗硼、渗铝硬化层深		9.5 热处理后质量控制	240
度不合格 .....	161	9.5.1 后处理质量控制	240
8.1.4 感应加热淬火硬化层		9.5.2 完善质量服务工作	244
深度不合格 .....	161	9.5.3 重视环境保护和技术	
8.1.5 火焰加热淬火硬化层		安全工作 .....	244
深度不合格 .....	162	<b>第 10 章 热处理缺陷分析</b>	
8.2 真空热处理和保护气氛热		<b>案例</b> .....	248
处理缺陷 .....	162	10.1 热处理裂纹 .....	248
8.2.1 表面不光亮和氧化色	163	10.1.1 汽车半轴淬火开裂与	
8.2.2 表面增碳或增氮	164	疲劳断裂的分析及	
8.2.3 真空热处理表面合金		防止措施 .....	248
元素贫化与粘连 .....	167	10.1.2 45 钢工件在易裂尺寸	
8.2.4 保护气氛热处理氢脆	169	范围开裂的分析及	
8.3 非铁金属合金热处理缺陷	171	防止措施 .....	251
8.3.1 铝合金热处理缺陷	171	10.1.3 本体淬火裂纹的分析	
8.3.2 镁合金热处理缺陷	172	及防止措施 .....	252
8.3.3 钛合金热处理缺陷	173	10.1.4 三硝水-空气双液淬	
8.3.4 铜合金热处理缺陷	174	火裂纹的分析及	
8.3.5 高温合金热处理缺陷	174	防止措施 .....	254
<b>第 9 章 热处理缺陷预防与</b>		10.1.5 绞肉机孔板淬火工艺	
<b>全面质量控制</b> .....	177	的改进 .....	256
9.1 热处理全面质量控制的概念	177	10.1.6 高碳钢及轴承钢零件	
9.2 基础条件控制 .....	178	淬火裂纹的分析及	
9.2.1 环境条件控制 .....	178	防止措施 .....	257
9.2.2 设备与仪表控制 .....	181	10.1.7 机床活塞超音频感应	
9.2.3 人员素质和管理水平	192	加热淬火裂纹的分析	
9.3 热处理前质量控制 .....	198	及防止措施 .....	260
9.3.1 热处理零件设计的质		10.1.8 汽车转向节中频感应	
量控制 .....	198	加热淬火裂纹的分析	
9.3.2 原材料质量控制 .....	205	及防止措施 .....	262
9.3.3 热处理前各工序质量		10.1.9 大型工件热处理过程	
控制 .....	209	中内裂的分析及防	
9.4 热处理中质量控制 .....	215	止措施 .....	265



## VIII 金属热处理缺陷分析及案例

- 10.1.10 高速钢焊接工具裂纹的分析及防止措施 ..... 271
- 10.1.11 石油钻杆接头表面开裂原因分析 ..... 274
- 10.1.12 高碳低合金冷作模具钢开裂原因分析 ..... 277
- 10.1.13 45A 钢卡爪淬火开裂原因分析 ..... 280
- 10.1.14 高碳马氏体钢球淬火热裂原因分析 ..... 284
- 10.1.15 42CrMo 钢高强度螺母裂纹分析 ..... 288
- 10.1.16 销轴淬火裂纹的产生及预防措施 ..... 291
- 10.2 热处理变形 ..... 294
  - 10.2.1 曲线齿锥齿轮热处理变形的分析及防止措施 ..... 294
  - 10.2.2 无压淬火减少曲线齿锥齿轮平面翘曲变形 ..... 297
  - 10.2.3 齿轮淬火变形的分析及防止措施 ..... 300
  - 10.2.4 锥齿轮花键孔变形的分析及防止措施 ..... 303
  - 10.2.5 汽车稳定杆淬火工艺的改进 ..... 304
  - 10.2.6 工字卡规热处理变形的分析及防止措施 ..... 305
  - 10.2.7 利用热应力预弯曲减少上导轨淬火变形 ..... 308
  - 10.2.8 碟形刀片的防止变形热处理 ..... 310
  - 10.2.9 65Mn 弹簧片热处理变形的分析及防止措施 ..... 312
  - 10.2.10 空心辊中频感应加热表面淬火变形的分析及防止措施 ..... 313
  - 10.2.11 气体氮碳共渗零件变形的分析及防止措施 ..... 317
  - 10.2.12 大型渗碳齿轮圈热处理畸变及控制 ..... 319
  - 10.2.13 高速柴油机曲轴渗氮畸变规律与控制措施 ..... 322
  - 10.2.14 活塞环的渗氮变形与控制 ..... 327
  - 10.2.15 半联轴器渗碳淬火畸变的分析及改进措施 ..... 330
  - 10.2.16 控制氮碳共渗零件变形的措施 ..... 332
  - 10.2.17 50CrV 钢针热处理工艺 ..... 335
  - 10.2.18 传动轴凸缘内孔收缩产生的原因及改进方法 ..... 337
  - 10.2.19 主减齿轮渗碳淬火畸变的控制 ..... 339
- 10.3 残留内应力 ..... 342
  - 10.3.1 T10A 模具线切割开裂的分析及防止措施 ..... 342
  - 10.3.2 大型冷冲模具热处理缺陷分析及改进措施 ..... 343
  - 10.3.3 热处理工艺对零件表面组织及磨削裂纹的影响 ..... 344
  - 10.3.4 大直径曲轴热处理后的残留应力研究 ..... 349
  - 10.3.5 CrWMn 钢模具炸裂原因分析 ..... 352
- 10.4 组织不良 ..... 355
  - 10.4.1 木工锯条热处理残品的挽救措施 ..... 355
  - 10.4.2 气体渗碳件的补修工艺 ..... 357
  - 10.4.3 高频感应加热淬火构件

低应力疲劳脆断的 分析及防止措施 .....	360	10.5.5 冷作模具失效分析及改 进措施 .....	413
10.4.4 20 钢板冷冲压产生裂纹 的原因及解决方法 .....	362	10.5.6 叉车半轴中频感应加热 淬火质量分析与工艺 改进 .....	416
10.4.5 20CrMnTi 钢预备热处理 组织缺陷分析 .....	364	10.5.7 曲轴气体渗氮后表面硬 度偏低的挽救措施 .....	418
10.4.6 45 钢渣浆泵主轴早期疲 劳断裂分析 .....	366	10.5.8 65Mn 钢爪型接地弹簧垫 圈热处理工艺改进 .....	420
10.4.7 桥间差速器壳输入花键 轴失效分析 .....	370	10.5.9 16MnCr5 钢软化退火 工艺 .....	421
10.4.8 钻机制动毂裂纹失效分 析和改进 .....	373	10.5.10 中碳铬钼钒钢调质热 处理力学性能不足的 原因分析及对策 .....	425
10.4.9 Cr12MoV 钢旋压成形轮 早期断裂失效原因 分析 .....	378	10.6 脆性 .....	429
10.4.10 Q235 钢波形护栏室温 脆断原因分析 .....	382	10.6.1 高强度钢甲醇裂解气保 护热处理氢脆 .....	429
10.4.11 斜齿轮早期断裂的原 因分析 .....	386	10.6.2 20CrMnTi 钢齿轮碳氮共 渗中的氢脆 .....	433
10.4.12 40Cr 钢活塞开裂原因 分析 .....	389	10.6.3 渗碳齿轮通氨淬火的氢 脆现象 .....	437
10.4.13 W18Cr4V 钢拉刀断裂 分析 .....	392	10.6.4 Z10 硅钢片的脆化与 防止 .....	440
10.4.14 碳氮共渗离合器主轴 的疲劳断裂 .....	395	10.6.5 25Cr2Mo1V 钢高温紧固螺 栓脆化及恢复热处理 .....	442
10.4.15 通用汽油机曲轴断裂 分析 .....	399	10.6.6 65Mn 钢垫片开裂失效 分析 .....	445
10.4.16 27SiMnMoV 钢渗碳针阀 体断裂失效分析 .....	402	10.6.7 阀体开裂原因分析 .....	448
10.5 力学性能不合格 .....	405	10.6.8 弹性薄壁紧固件产生脆 性断裂的原因分析及 防止措施 .....	452
10.5.1 20MnV 钢圆环链质量 分析 .....	405	10.6.9 液压缸断裂分析 .....	456
10.5.2 15Cr 钢活塞销淬火工艺 的改进 .....	408	10.6.10 扭力轴断裂原因 分析 .....	459
10.5.3 游标卡尺测尺热处理新 工艺 .....	409	10.7 其他热处理缺陷 .....	463
10.5.4 球墨铸铁底座退火工艺 的改进 .....	411	10.7.1 汽车渗碳零件失效 分析 .....	463
		10.7.2 1Cr18Ni9Ti 钢桔皮状	

## X 金属热处理缺陷分析及案例

表面的探讨 .....	469	10.7.6	Q-52-51 型摩托车车轮 开裂原因分析 .....	482
10.7.3 EQ1060 变速器总成二轴 断裂失效分析 .....	471	10.7.7	控制 1J79 合金磁性能 的新工艺 .....	485
10.7.4 踏板式摩托车后轮输出 轴断裂失效分析 .....	473	10.7.8	GH2132 高温合金热处理 后硬度低的原因分析 .....	487
10.7.5 5B05 防锈铝预绞丝断裂 失效分析 .....	479	参考文献 .....		490

# 第1章 概 论

热处理可通过加热和冷却,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,使零件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。

## 1.1 热处理缺陷及分类

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。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、残留应力、组织不合格、性能不合格、脆性及其他缺陷七大类,如表1-1所示。

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
残留应力	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、残留奥氏体过多、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、渗硼层孔洞、螺旋状回火带

## 2 金属热处理缺陷分析及案例

(续)

缺陷类别	热处理缺陷名称
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
脆性	退火脆性、回火脆性、氢脆、 $\sigma$ 脆性、300℃脆性、渗碳层剥落、渗氮层脆性、渗氮层剥落、渗硼层脆性、低温脆性、电镀脆性
其他缺陷	化学热处理和表面热处理的硬化层深度不合格，真空热处理和保护热处理的表面不光亮与氧化色、表面增碳或增氮、表面合金元素贫化和粘连，铝合金热处理的高温氧化、起泡、包铝板铜扩散、腐蚀或耐腐蚀性能降低，镁合金热处理的熔孔、表面氧化、晶粒畸形长大、化学氧化着色不良，钛合金热处理的渗氢、表面氧化色，铜合金热处理的黑斑点、黄铜脱锌、纯铜氢脆，铍青铜淬火失色、粘连，高温合金热处理的晶间氧化、表面成分变化、腐蚀点和腐蚀坑、粗大晶粒或混合晶粒

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。热处理裂纹主要是在淬火过程中产生的淬火裂纹；其次是由于加热不当产生的各种加热裂纹；还有淬火后各工序不当产生的延迟裂纹、冷处理裂纹、回火裂纹、时效裂纹、磨削裂纹和电镀裂纹等。热处理裂纹属于不可挽救的缺陷，一般只能将裂纹零件报废处理。如果由于漏检，将有裂纹的零件带到使用中，裂纹很容易扩展引起突然断裂，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。热处理变形包括尺寸变形和形状变形。由于热处理过程中存在相变和热应力，热处理变形总是存在的，一定量微小变形是允许的。总变形超过限度就成为热处理缺陷。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。

残留应力、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。

热处理缺陷产生的原因是多方面的，概括起来可分为热处理前、热处理中、热处理后三方面的原因。

热处理前，可能因为设计不良、原材料或毛坯缺陷等原因，热处理时产生或扩展成热处理缺陷，其责任不在热处理。零件设计中可能因选材不当、热处理技

术要求不当、截面急剧变化、锐角过渡、打标记处应力集中等不合理设计,导致热处理缺陷。原材料各种缺陷及热处理前各种加工工序缺陷,在热处理时也可导致热处理缺陷。可能导致热处理缺陷的原材料缺陷有化学成分波动和不均匀、杂质元素偏多、严重偏析、非金属夹杂物、疏松、带状组织、折叠、发纹、白点、微裂纹、氧化脱碳、划痕等;可能导致热处理缺陷的铸造、锻造、焊接、机械加工的缺陷,主要有裂纹、组织不良、外观缺陷等。

热处理后,因后续加工工序不当或使用不当,还可能产生与热处理有联系的缺陷,这些缺陷的责任不完全在热处理。后续加工工序不当可能产生的与热处理有关的缺陷有:磨削裂纹、磨削烧伤,磨削淬火、电火花加工裂纹、电镀或酸洗脆性等;使用不当可能产生与热处理有关的缺陷有:应力集中过大产生裂纹、使用温度过高产生热裂或变形、修补裂纹等。

热处理中,产生缺陷的原因可能有工艺不当、操作不当、设备和环境条件不合适等。各种热处理工艺,由于加热、冷却条件不同,产生的缺陷也不完全相同,热处理工艺常见缺陷如表 1-2 所示。

表 1-2 热处理工艺常见缺陷

热处理类型	热处理工艺	常见缺陷
整体热处理	退火与正火	软化不充分,退火脆性,渗碳体石墨化,氧化,脱碳,过热,过烧,魏氏组织,网状碳化物,球化组织不良,萁状断口,石状断口,反常组织
	淬火	淬火裂纹,淬火变形,硬化不充分,软点,氧化,脱碳,过热,过烧,鳞状断口,表面腐蚀,放置裂纹,放置变形
	回火	回火裂纹,回火脆性,回火变形,性能不合格,表面腐蚀,残留应力过大
	冷处理	冷处理裂纹,冷处理变形,冷处理不充分
化学热处理	渗碳与碳氮共渗	渗碳过度,反常组织,渗碳不均匀,内氧化,剥落,表面硬度不足,表面碳化物不合格,心部组织不合格,渗碳层深度不足,心部硬度不合格,表面硬度不足,表面脱碳
	渗氮与氮碳共渗	白层,剥落,渗层硬度低及软点,渗层深度不足,渗层网状或脉冲组织,变形,心部硬度低,渗层脆性,耐蚀性差,表面氧化
	渗金属	渗层过厚或不足,漏渗,渗层损伤,氧化,腐蚀,渗层分层、鼓包
表面热处理	感应加热	变形,裂纹,表面硬度过高、过低、不均,硬化层不足,烧伤,晶粒粗化(过热),螺旋状回火带
	火焰加热	变形,裂纹,过热,过烧,表面硬度不合格,硬化层深度不足
特种热处理	真空热处理	表面合金元素贫化,表面增碳或增氮,表面不光亮,淬火硬度不足,表面晶粒长大,粘连
	保护热处理	表面增碳或增氮,表面不光亮,氢脆,表面腐蚀,氧化,脱碳

(续)

热处理类型	热处理工艺	常见缺陷
非铁金属合金热处理	铝合金热处理	高温氧化, 起泡, 包铝板铜扩散, 腐蚀或耐蚀性能降低, 力学性能不合格, 过烧, 翘曲, 裂纹, 粗大晶粒
	镁合金热处理	熔孔, 表面氧化, 晶粒畸形长大, 化学氧化着色不良, 变形, 力学性能不合格
	钛合金热处理	渗氢, 表面氧化色, 过热, 过烧, 力学性能不合格
	铜合金热处理	黑斑点, 黄铜脱锌, 纯铜氢脆, 铍青铜淬火失色, 粘连, 淬火硬度不足, 硬度不均匀, 过热, 过烧
	高温合金热处理	晶间氧化, 表面成分变化, 腐蚀点和腐蚀坑, 粗大晶粒或混合晶粒, 氧化剥落, 翘曲, 裂纹, 过热, 过烧, 硬度不合格, 力学性能不合格

## 1.2 热处理缺陷分析方法

热处理缺陷种类和产生原因复杂多样, 其影响很大, 直接影响产品质量、使用性能和安全, 所以准确分析和判断热处理缺陷十分重要。热处理缺陷分析从断口分析入手, 辅以化学成分分析、金相分析、力学性能试验、无损检验等检验方法, 调查工艺过程, 进行必要的验证试验。最后将各种分析、试验结果及数据进行综合分析, 得出结论, 并提出改进措施。

### 1. 断口分析

在断口分析技术中, 最关键的两项工作是断口的选择和断口的观察。对于断裂原因的正确分析及断口形貌的正确解释, 在很大程度上依赖于断口样品的正确选择及断口形貌的清晰程度。

在分析断裂时, 必须从断裂零件中选取断口样品, 不仅是为了缩小检查范围, 而更重要的是为了寻找最先开裂的断裂部位。另外, 在取样时不得损伤断口表面, 并使断口保持干燥, 防止污染。

裂纹分析常常要求对有裂纹的零件进行部分破坏。对于这种情况, 在打开裂纹之前, 应对零件进行必要的检查及测量, 以确定零件的形态。常用的方法是对零件的开裂部位画出轮廓草图或进行照相等。打开裂纹的方法很多, 如拉开、扳开、压开等。但无论是哪一种方法, 都必须根据裂纹源的位置及裂纹的扩展方向, 来选择受力点。一般情况下, 都是在垂直裂纹扩展方向加力, 使带有裂纹的零件形成断口。

断口观察包括宏观观察和微观观察。断口宏观观察主要是确定裂源位置及裂

纹的扩展方向；断口微观观察是在宏观观察的基础上，对裂源区、裂纹扩展区及最终断裂区进行检验。应用电子显微镜、电子探针、离子探针及俄歇谱仪等工具观察或检查微观形貌特征、微量或痕量元素对断裂的影响等，从而进一步判断和证实断裂的性质和方式。在断口分析中，必须注意这两者的结合。

(1) 断口的宏观观察 断口的宏观观察是指用肉眼、放大镜、光学显微镜及扫描电镜的低倍观察。

首先用肉眼和放大镜观察断裂零件的外貌。应特别注意零件碎片的表面观察，看看是否有加工缺陷（如刀痕、折叠、变形、缩颈及弯曲等）、是否存在产生应力集中的薄弱环节（如夹角、油孔等）以及表面损伤（如化学腐蚀、机械磨损等）。接着，根据断口的宏观特征来确定裂纹源及裂纹的扩展方向。在此基础上，将断口按裂源区、裂纹缓慢扩展区和裂纹快速扩展区进行光学显微镜或扫描电子显微镜的低倍观察，特别是裂源区要用实体显微镜进行反复观察，因为裂源往往与材料缺陷有联系。

在断口宏观观察时，还要注意断口表面颜色。断口表面颜色反映了开裂之后的过程和温度，有利于判断开裂时机。表 1-3 列出了钢在不同回火温度的颜色。

表 1-3 钢在不同回火温度的颜色

温度（保温 1h）/℃	氧化颜色	温度（保温 8min）/℃
188	淡黄色	238
199	亮稻草色	265
210	暗稻草色	293
221	棕色	321
232	紫色	337
254	亮紫色	376

(2) 断口的微观观察 断口的微观观察通常是应用电子显微镜。断口的微观观察是在断口宏观观察的基础上进行的。通过对断口的微观观察，除可进一步澄清单裂的路径、断裂的性质、环境对断裂的影响等因素外，还将找出断裂的原因及其断裂机理等因素。但是，在进行微观观察时，要注意防止片面性，不能从局部的特征轻易地作出结论，必须进行反复的观察。对于各种显微形貌特征，要有数量的概念或统计的概念，并且还要与宏观观察的情况结合起来，才能得出正确的判断。

应用扫描电镜可直接检查实物断口表面，可以连续放大观察，电子图像立体感强。它是断裂失效分析的最有力的工具。应用透射电子显微镜不能直接检查断口表面，需要制作塑料—碳复型，且用重金属投影增强反差。用于萃取复型的一个有效的辅助方法，是通过电子衍射技术鉴别第二相粒子或者腐蚀产物等。断口上经常有夹杂物、第二相、腐蚀产物等析出或生成，它们对构件断裂，尤其是沿



晶断裂影响显著。因此,进行物相分析,通常使用X射线衍射仪、电子显微镜、电子衍射仪、离子质谱仪等,对确定其结构及化学组成是很有必要的。

### 2. 化学分析

在热处理缺陷分析中,为了查明材料是否符合规定要求,必须进行化学成分分析,考察实际使用的材料成分与规定成分是否有偏差,使用材料是否有错误。有时还需要对腐蚀表面沉积物、氧化物或者腐蚀产物,以及与被腐蚀材料接触的介质,进行化学分析,以利于分析缺陷产生的原因。

化学分析包括常规的、局部的、表面的和微区的化学分析。在分析中应当注意常规成分报告中那些没有规定限量的有害元素,例如,砷、锑、铅、锡、铋等是否超过限量。另外,还要注意气体含量,例如氢、氧、氮等也不能超过一定的限量。在缺陷分析中,还经常使用电子探针、俄歇谱仪、离子探针等仪器,来检测腐蚀产物、表面化学元素组成、化学成分的局部偏析、微量及痕量元素等。

### 3. 金相检验

金相检验在热处理缺陷分析中也是经常应用的一种重要手段,有些热处理缺陷往往只需作金相检验就可以查明损坏的原因。

金相检验的内容主要有晶粒的大小、组织形态、第二相粒子的大小及分布、晶界的变化、夹杂物、疏松、裂纹、脱碳等缺陷。特别应注意晶界的检验,是否有析出相、腐蚀等现象发生。

检查裂纹时,往往能从裂纹尖端的试样得到最有价值的情报。由于它受环境介质的影响较小,容易判别裂纹扩展路径的方式——穿晶型或沿晶型。

### 4. 力学性能试验

热处理的目的就是使零件获得要求的组织和性能,对机械零件主要的要求性能是力学性能,所以热处理后,零件或随炉试样都要进行力学性能试验检查。力学性能试验(主要是硬度试验)也是对热处理质量情况的检查;另外,力学性能试验还是考核零件材料是否合格的重要证据。因此,热处理缺陷分析中力学性能试验具有重要作用。

力学性能试验除了硬度试验,有时还要进行静拉伸、冲击、疲劳、断裂韧度及高温性能等试验。特别应当注意不同零件、不同部位力学性能的差异,是否达到技术条件要求。

### 5. 验证试验

验证试验是对热处理缺陷分析初步结果的考核和证明,再现热处理缺陷。通常是按原工艺和改进工艺进行对比试验,分析检查技术条件要求的各项指标。

### 6. 综合分析

对热处理缺陷的各种检查和试验所获得的结果及试验数据进行全面分析,得出一种或几种主要的原因,有时还要查阅相关文献资料及同类实例报告,作为参