

王忠诚 齐宝森 李 杨 编著

典型零件

热处理技术

DIANXING LINGJIAN
RECHULI JISHU



化学工业出版社

王忠诚 齐宝森 李 杨 编著

典型零件 热处理技术



化学工业出版社

· 北京 ·

前 言

随着我国机械工业的迅猛发展和技术水平的不断提高，新技术、新工艺得到广泛应用并迅速转化为优质产品，这就迫切需要从事机械制造和加工的技术人员全面了解和掌握钢铁材料热处理方面的基础知识，并能自觉地、完整地、独立地执行好热处理工艺的各个环节，确保优质、高效、文明的热处理生产，从而确保产品质量落到实处。

本书总结了我们多年生产第一线的经验积累与实验研究成果，收集了国内外同行的宝贵技术，以工业用钢的合理选用及基础知识入手，紧密结合典型机械零件的应用，通过典型实例分析，详尽地介绍了常用工业用钢的各种热处理工艺技术、操作方法，常见缺陷及防止方法等。

本书力求语言深入浅出，简明扼要，并体现新工艺、新技术、新材料、新标准。在编写形式上，力求概念清晰，由浅入深，图文并茂，具有可操作性，并紧密联系生产实践。

本书主要面向机械工业生产一线的广大技术人员和工人，特别是广大热处理人员，希望能对指导生产实践提供必要的帮助。

全书共分9章。第1、2章由齐宝森编写，第3~8章由王忠诚编写，第9章由李杨编写。全书由齐宝森、王忠诚统稿。

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，恳请广大读者和专家批评指正。

编著者

目 录

第 1 章 齿轮的热处理	1
1.1 齿轮的服役条件分析与性能要求	1
1.1.1 工作条件分析	2
1.1.2 常见的主要失效形式	2
1.1.3 主要性能要求	3
1.2 齿轮钢材的冶金与热处理质量 控制	6
1.2.1 齿轮钢材的冶金质量控制	6
1.2.1.1 钢材的冶金质量	6
1.2.1.2 齿轮用钢冶金质量检验项目 及技术要求	12
1.2.2 齿轮锻件的检验及锻后热 处理	13
1.2.3 调质齿轮钢的热处理质量 控制	13
1.2.4 表面淬火齿轮钢的热处理质量 控制	15
1.2.5 渗碳齿轮钢的热处理质量 控制	18
1.2.6 渗氮齿轮钢的热处理质量 控制	18
1.3 齿轮用钢的选择	18
1.3.1 轻载、低速或中速、冲击力小、 精度较低的一般齿轮	18
1.3.2 中载、中速、受一定冲击 载荷、运动较为平稳的齿轮	18
1.3.3 重载、高速或中速、承受较大 冲击载荷的齿轮	19
1.3.4 精密传动齿轮或磨齿有困难的硬 齿面齿轮	22
1.3.5 尺寸较大、形状复杂、承受一定 冲击的齿轮	22
1.4 调质、表面淬火齿轮的热处理 工艺	23
1.4.1 常用的调质钢及表面淬火钢	23
1.4.2 齿轮的调质热处理	23
1.4.2.1 调质齿轮的选材与加工工艺 流程	23
1.4.2.2 调质齿轮的常见热处理 工艺	26
1.4.2.3 典型调质齿轮热处理工艺 实例分析	27
1.4.2.4 调质齿轮的检验项目、内容 及方法	35
1.4.2.5 调质齿轮的常见缺陷及 防止措施	37
1.4.3 表面淬火齿轮的热处理工艺	38
1.4.3.1 表面淬火的分类与特点	38
1.4.3.2 表面淬火齿轮的选材、机械加 工工艺流程与技术要求	39
1.4.3.3 表面淬火的组织与性能	40
1.4.3.4 齿轮的火焰加热表面 淬火	40
1.4.3.5 激光加热表面淬火简介	44
1.4.3.6 齿轮的感应加热表面 淬火	45
1.4.3.7 典型零件的表面淬火齿轮 热处理工艺分析	52
1.4.3.8 表面淬火齿轮的畸变及 防止	67
1.4.3.9 感应加热表面淬火齿轮的 质量检验	68
1.4.3.10 表面淬火常见的缺陷及 防止措施	71
1.5 渗碳与碳氮共渗齿轮的热处理 工艺	72
1.5.1 钢的化学热处理简介	72
1.5.2 渗碳齿轮	73
1.5.2.1 渗碳工艺概述	73
1.5.2.2 气体渗碳齿轮的工艺 特点	80
1.5.2.3 渗碳齿轮的热处理、组织与 性能	82
1.5.2.4 控制渗碳齿轮热处理畸变的 措施	84
1.5.2.5 一般渗碳齿轮的加工工艺 流程	86
1.5.2.6 典型的渗碳齿轮热处理工艺 分析	86

1.5.2.7 渗碳齿轮的质量检测	101	1.6.1.5 渗氮齿轮的质量分析	152
1.5.2.8 渗碳齿轮的常见缺陷、产生原因与防止措施	103	1.6.1.6 渗氮齿轮及气体渗氮的常见缺陷产生原因及防止措施	160
1.5.2.9 石油钻井螺旋锥齿轮常见的热处理缺陷、产生原因与防止方法	103	1.6.2 离子渗氮齿轮	160
1.5.3 碳氮共渗齿轮	103	1.6.2.1 离子渗氮概述	160
1.5.3.1 碳氮共渗概述	103	1.6.2.2 离子渗氮齿轮的工艺特点	167
1.5.3.2 气体碳氮共渗齿轮的工艺特点	119	1.6.2.3 离子渗氮齿轮的加工工艺流程	171
1.5.3.3 齿轮碳氮共渗后的热处理、组织和性能	121	1.6.2.4 典型离子渗氮齿轮的热处理工艺分析	171
1.5.3.4 气体碳氮共渗齿轮的加工工艺流程	122	1.6.2.5 齿轮离子渗氮的质量检测	178
1.5.3.5 典型碳氮共渗齿轮的热处理工艺分析	122	1.6.2.6 齿轮离子渗氮的常见缺陷及防止办法	178
1.5.3.6 碳氮共渗齿轮的质量检测	127	1.6.3 氮碳共渗齿轮	179
1.5.3.7 碳氮共渗齿轮的常见缺陷生产原因与防止措施	128	1.6.3.1 氮碳共渗简介	179
1.6 渗氮、离子渗氮与氮碳共渗齿轮的热处理工艺	132	1.6.3.2 氮碳共渗齿轮的工艺特点	186
1.6.1 渗氮齿轮	132	1.6.3.3 气体氮碳共渗齿轮的一般加工工艺流程	186
1.6.1.1 渗氮工艺概述	132	1.6.3.4 典型氮碳共渗齿轮的热处理工艺分析	186
1.6.1.2 渗氮齿轮的工艺特点	144	1.6.3.5 氮碳共渗齿轮的质量检测	191
1.6.1.3 气体渗氮齿轮的加工工艺流程	146	1.6.3.6 氮碳共渗齿轮的常见缺陷、产生原因及预防措施	191
1.6.1.4 典型渗氮齿轮的热处理工艺分析	146		
第2章 金属切削机床典型零件的热处理	193		
2.1 概述	193	处理工艺性	202
2.1.1 金属切削机床零件热处理的特点	193	2.2 机床主轴的热处理	209
2.1.2 机床零件常用的热处理工艺	194	2.2.1 机床主轴的工作条件、常见失效形式与性能要求	209
2.1.2.1 预先热处理	194	2.2.2 机床主轴材料及热处理的合理选择	209
2.1.2.2 最终热处理	195	2.2.3 机床主轴的加工工艺流程	210
2.1.3 机床零件的热处理工艺性	197	2.2.4 典型主轴的热处理工艺分析	210
2.1.4 机床零件热处理工艺性的合理选择	199	2.3 丝杠的热处理	226
2.1.4.1 机床零件热处理工艺性的结构设计	199	2.3.1 丝杠的工作条件、失效形式与性能要求	226
2.1.4.2 机床零件热处理工艺的选择	200	2.3.2 丝杠材料的合理选用	227
2.1.4.3 机床零件热处理技术要求的确定	202	2.3.3 丝杠的热处理特点	228
2.1.4.4 热处理工序的安排与热		2.3.4 丝杠热处理的质量检测	229
		2.3.5 丝杠热处理的缺陷及改进措施	231

2.3.6 丝杠典型热处理工艺分析	232	处理	264
2.4 机床导轨的热处理	246	2.5.1 热时效	264
2.4.1 导轨的工作条件、失效形式与性能要求	246	2.5.2 振动时效	266
2.4.2 导轨材料的合理选用	246	2.5.3 自然时效	267
2.4.3 导轨的热处理质量检测	248	2.6 机床附件的热处理	267
2.4.4 导轨的热处理缺陷及预防措施	251	2.6.1 分度头蜗杆的热处理	267
2.4.4.1 铸铁导轨的淬火缺陷	251	2.6.2 分度头主轴的热处理	274
2.4.4.2 镶钢导轨的缺陷	252	2.6.3 机床心轴的热处理	275
2.4.5 导轨典型热处理工艺分析	252	2.6.4 机床三爪自定心卡盘卡爪的热处理	277
2.4.5.1 铸铁导轨	252	2.6.5 机床弹簧夹头的热处理	278
2.4.5.2 镶钢导轨	256	2.7 机床花键轴和离合器摩擦片的热处理	282
2.4.5.3 直线滚动导轨的热处理	263	2.7.1 机床花键轴的热处理	282
2.5 机床床身、工作台等基础件的热处理		2.7.2 机床离合器摩擦片的热处理	285
第3章 大型铸件、锻件及焊接件的热处理	288		
3.1 概述	288	3.4.1 概述	339
3.1.1 简述	288	3.4.2 热轧工作辊	341
3.1.2 冶金质量对于大型零件质量的影响	288	3.4.3 冷轧工作辊	344
3.1.3 铸造质量对于大型零件质量的影响	289	3.4.3.1 工作条件与技术要求	344
3.1.4 锻造质量对于大型零件质量的影响	291	3.4.3.2 机械加工工艺流程	345
3.2 典型大铸件、锻件及焊接件的热处理	291	3.4.3.3 热处理工艺	345
3.2.1 大剪刀板的热处理	291	3.4.3.4 热处理工艺分析与实施要点	351
3.2.2 大型铸件的热处理	297	3.4.3.5 热处理质量检验	354
3.2.3 大型锻件的热处理	300	3.4.3.6 热处理常见缺陷分析与对策	354
3.2.4 大型焊接件的热处理	320	3.4.3.7 9Cr2Mo 钢 $\phi 660\text{mm}$ 冷轧工作辊的热处理	354
3.3 电站典型零件的热处理	322	3.4.4 支承辊和空心辊	358
3.3.1 概述	322	3.4.4.1 工作条件与技术要求	358
3.3.2 转子	322	3.4.4.2 机械加工工艺流程	359
3.3.3 汽轮机叶轮与叶片	328	3.4.4.3 热处理工艺	359
3.3.4 锅炉构件及输汽管	335	3.4.4.4 支承辊的热处理工艺分析与实施要点	363
3.4 轧机典型零件的热处理	339		
第4章 工程机械、液压与气动元件的热处理	366		
4.1 工程机械典型零件的热处理	366	4.2.4 液压阀零件	383
4.1.1 破碎机颚板	366	4.3 气动元件的热处理	386
4.1.2 破碎机板锤	369	4.3.1 凿岩机活塞	386
4.1.3 掘土机斗齿和铲齿	370	4.3.2 凿岩机钎尾	389
4.1.4 建筑机械主动圆锥齿轮	373	4.3.3 凿岩机成品钎杆	391
4.2 液压元件的热处理	375	4.4 压缩机阀片的热处理	393
4.2.1 叶片泵零件	375	4.4.1 阀片的工作条件与技术要求	393
4.2.2 齿轮泵零件	379	4.4.2 阀片的机械加工工艺流程	393
4.2.3 柱塞泵零件	381	4.4.3 阀片的热处理	394

4.4.4 阀片的热处理工艺分析与实施要点	394	4.4.6 阀片的热处理缺陷分析与对策	394
4.4.5 阀片的热处理质量检验	394		
第5章 汽车、机车及柴油机典型零件的热处理	396		
5.1 活塞环、活塞销与连杆的热处理	396	流程	435
5.1.1 活塞环的热处理	396	5.3.2.3 气门的热处理工艺规范	437
5.1.2 活塞销的热处理	399	5.3.2.4 气门的热处理工艺分析与实施要点	448
5.1.3 连杆的热处理	403	5.3.2.5 气门热处理后的质量检验	449
5.2 曲轴与凸轮轴热处理	406	5.3.2.6 进、排气门的常见热处理缺陷分析与对策	449
5.2.1 曲轴的热处理	406	5.3.2.7 气门的主要失效方式与原因	452
5.2.1.1 曲轴的工作条件与技术要求	406	5.3.2.8 气门的热处理缺陷对产品安全性的影响	453
5.2.1.2 曲轴的机械加工工艺流程	407	5.4 半轴与汽车转向系统零件的热处理	454
5.2.1.3 曲轴的热处理工艺	408	5.4.1 半轴的热处理	454
5.2.1.4 曲轴的热处理工艺分析与实施要点	415	5.4.1.1 工作条件和技术要求	454
5.2.1.5 曲轴的热处理质量检验	417	5.4.1.2 机械加工工艺流程	455
5.2.1.6 曲轴的常见感应淬火缺陷分析与对策	417	5.4.1.3 半轴的热处理工艺	455
5.2.2 凸轮轴的热处理	417	5.4.1.4 半轴的热处理工艺分析与实施要点	458
5.2.2.1 凸轮轴的工作条件和技术要求	417	5.4.1.5 半轴的热处理质量检验	460
5.2.2.2 凸轮轴的机械加工工艺流程	419	5.4.1.6 半轴调质和表面淬火的缺陷分析与对策	460
5.2.2.3 凸轮轴的热处理	419	5.4.2 汽车转向系统零件的热处理	461
5.2.2.4 凸轮轴热处理的工艺分析与实施要点	422	5.4.2.1 汽车转向节的热处理	461
5.2.2.5 凸轮轴的热处理质量检验	423	5.4.2.2 球头支承的热处理	463
5.2.2.6 凸轮轴感应淬火常见缺陷分析与对策	423	5.4.2.3 汽车转向节主销的热处理	464
5.3 气门挺杆与气阀的热处理	424	5.5 推杆、摇臂和摇臂轴、活塞杆的热处理	465
5.3.1 气门挺杆的热处理	424	5.5.1 内燃机推杆的热处理	465
5.3.1.1 工作条件和技术要求	424	5.5.2 汽车发动机的摇臂和摇臂轴的热处理	465
5.3.1.2 挺杆的机械加工工艺流程	425	5.5.3 活塞杆的热处理	466
5.3.1.3 挺杆的热处理工艺	426	5.6 油泵柱塞副与喷油嘴偶件的热处理	467
5.3.1.4 挺杆的热处理工艺分析与实施要点	432	5.6.1 工作条件和技术要求	467
5.3.1.5 挺杆的热处理质量检验	432	5.6.2 加工工艺流程	468
5.3.1.6 挺杆的热处理缺陷分析与对策	433	5.6.3 柴油机针阀体热处理	468
5.3.2 气门的热处理	434	5.6.3.1 常用材料的热处理技术要求和工艺路线	468
5.3.2.1 气门的工作条件和技术要求	434	5.6.3.2 油泵柱塞副和喷油偶件的热处理	468
5.3.2.2 气门的机械加工工艺			

5.6.4 热处理工艺分析与实施要点	470	5.7.2.2 机车车轮的热处理工艺	475
5.6.5 针阀体的热处理常见缺陷 与对策	472	5.7.3 钢轨和车轮热处理工艺分析与 实施要点	476
5.7 钢轨与机车车轮的热处理	472	5.7.4 钢轨和车轮的热处理质量 检验	477
5.7.1 钢轨与机车车轮的工作条件和 技术要求	472	5.7.5 钢轨的常见热处理缺陷分析与 对策	477
5.7.2 钢轨与车轮的热处理工艺	474		
5.7.2.1 钢轨的热处理工艺	474		
第6章 石油化工机械零件的热处理	479		
6.1 石油管道的热处理	479	6.3 泥浆泵零件	496
6.1.1 工艺管道	479	6.3.1 缸套的热处理	496
6.1.2 石油套管	482	6.3.2 阀体与阀座	499
6.2 石油钻探工具	484	6.3.3 活塞杆	500
6.2.1 石油钻杆接头	484	6.4 化工机械零件的热处理	501
6.2.2 抽油杆的热处理	487	6.4.1 压力容器	501
6.2.3 石油钻机零件	491	6.4.2 液化气贮罐	504
6.2.4 吊环的热处理	494	6.4.3 压缩机阀片	506
6.2.5 吊具的热处理	495		
第7章 常用标准件的热处理	508		
7.1 滚动轴承、弹簧零件的热处理	508	艺分析与实施要点	520
7.1.1 滚动轴承内、外套圈的热 处理	508	7.1.3.5 汽车钢板弹簧的热处理 质量检验	523
7.1.1.1 工作条件和技术要求	508	7.1.3.6 汽车钢板弹簧的常见热处理 缺陷分析与对策	523
7.1.1.2 轴承内外套圈的加工工艺 流程	509	7.1.4 高强度弹簧的热处理	523
7.1.1.3 轴承套圈的热处理工艺	509	7.1.4.1 $\phi 45\text{mm}$ 大直径热卷 50CrVA 阀门弹簧的热处理	523
7.1.1.4 轴承套圈的热处理工艺 分析	511	7.1.4.2 柴油机部件弹簧的热 处理	526
7.1.1.5 轴承套圈的热处理质量 检验	513	7.1.5 其他弹簧的热处理	527
7.1.1.6 轴承套圈常见热处理 缺陷分析与对策	513	7.1.5.1 碟簧的热处理	527
7.1.2 特大型轴承零件的热处理	515	7.1.5.2 II型弹条的热处理	529
7.1.2.1 工作条件与技术要求	515	7.1.5.3 铁路机车、车辆螺旋弹簧的 热处理	531
7.1.2.2 机械加工工艺流程	515	7.1.5.4 大型弹簧钢片的热处理	532
7.1.2.3 轴承零件的热处理	515	7.1.5.5 启动机刷簧的热处理	534
7.1.2.4 热处理工艺分析与实施 要点	516	7.1.5.6 50CrV 钢汽车扭杆弹簧的 热处理	536
7.1.3 汽车钢板弹簧的热处理	518	7.2 紧固件的热处理	536
7.1.3.1 工作条件和技术要求	518	7.2.1 高强度螺栓的热处理	536
7.1.3.2 汽车钢板弹簧的加工 流程	519	7.2.2 滚动销的热处理	539
7.1.3.3 汽车钢板弹簧的热处理 工艺规范	519	7.2.3 柴油机摇臂轴、销轴和弹簧销的 热处理	541
7.1.3.4 汽车钢板弹簧热处理工		7.2.3.1 柴油机摇臂轴、销轴和弹簧 销的工作条件与技术要求	541

7.2.3.2	柴油机摇臂轴、销轴和弹簧销 的加工程序	541	7.2.3.5	热处理的质量检验	546
7.2.3.3	柴油机摇臂轴、销轴和弹簧销 的热处理	542	7.2.3.6	常见销轴的热处理缺陷 分析与对策	546
7.2.3.4	热处理工艺分析与实施				
第8章 工、模、量具的热处理		547			
8.1	概论	547	8.2.6.2	锉刀的加工程序	580
8.1.1	工、模、量具性能要求及常见 失效形式	547	8.2.6.3	锉刀的热处理工艺	580
8.1.1.1	工、模、量具的服役条件 与技术要求	547	8.2.6.4	锉刀的热处理工艺分析 与实施要点	581
8.1.1.2	工模量具用钢的失效 形式	548	8.2.6.5	锉刀的热处理质量检验	582
8.1.2	工、模、量具用钢	549	8.2.6.6	锉刀的热处理缺陷分析 与对策	582
8.1.2.1	工具用钢	549	8.2.7	滚刀和锯片铣刀的热处理	583
8.1.2.2	模具用钢	550	8.2.7.1	滚刀和锯片铣刀的工作条件 和技术要求	583
8.1.2.3	量具用钢	552	8.2.7.2	滚刀和锯片铣刀的机械加工 工艺程序	583
8.2	工具的热处理	552	8.2.7.3	滚刀和锯片铣刀的热 处理	584
8.2.1	丝锥的热处理	552	8.2.7.4	滚刀和锯片铣刀的热处理 工艺分析与实施要点	585
8.2.2	圆板牙的热处理	557	8.2.7.5	滚刀和锯片铣刀的热处理 质量检验	586
8.2.3	搓丝板的热处理	561	8.2.7.6	滚刀和锯片铣刀的热处理 缺陷分析与对策	587
8.2.4	钻头、铰刀和钢针的热处理	565	8.2.8	拉刀的热处理	587
8.2.4.1	工作特点与技术要求	565	8.2.8.1	工作条件和技术要求	587
8.2.4.2	机械加工工艺程序	566	8.2.8.2	拉刀的机械加工程序	588
8.2.4.3	钻头、铰刀和钢针的热处理 工艺	566	8.2.8.3	拉刀的热处理工艺	588
8.2.4.4	钻头、铰刀和钢针的热处理 工艺分析及实施要点	570	8.2.8.4	拉刀的热处理工艺分析与 实施要点	590
8.2.4.5	钻头、铰刀和钢针的热处理 质量检验	571	8.2.8.5	拉刀的热处理质量检验	592
8.2.4.6	钻头、铰刀和钢针的热处理 缺陷分析与对策	572	8.2.8.6	拉刀的热处理缺陷分析 与对策	592
8.2.5	锯条的热处理	572	8.2.9	车刀的热处理	592
8.2.5.1	锯条的工作要求和技术 条件	572	8.2.9.1	工作条件和技术要求	592
8.2.5.2	锯条的机械加工工艺 程序	573	8.2.9.2	车刀的机械加工工艺 程序	593
8.2.5.3	锯条的热处理工艺	573	8.2.9.3	车刀的热处理工艺	593
8.2.5.4	锯条的热处理工艺分析与 实施要点	576	8.2.9.4	车刀的热处理工艺 分析与实施要点	595
8.2.5.5	锯条的热处理质量检验	578	8.2.9.5	车刀的热处理质量检验	597
8.2.5.6	锯条的热处理产生缺陷分析 与对策	578	8.2.9.6	车刀的热处理缺陷分析 与对策	597
8.2.6	锉刀的热处理	579	8.2.10	木工刨刀的热处理	597
8.2.6.1	锉刀的工作特点和技术 要求	579			

8.3 冷作模具的热处理	599	的热处理	609
8.3.1 电机硅钢片冷冲孔冲裁模 的热处理	599	8.4.1.4 气门热锻模的热处理	610
8.3.2 挺杆冷挤压模具的热处理	603	8.4.2 3Cr2W8V 钢热挤压凸模的 热处理	615
8.4 热作模具的热处理	605	8.4.3 铝合金压铸模的热处理	616
8.4.1 锤锻模的热处理	605	8.5 常用量具的热处理	618
8.4.1.1 3Cr2W8V 钢 6in 活扳手 热锻模的热处理	605	8.5.1 游标卡尺尺身等的热处理	618
8.4.1.2 汽车连杆锻模的热处理	606	8.5.2 千分表测杆等部件的热处理	620
8.4.1.3 3Cr2W8V 钢尖嘴钳锻模		8.5.3 工字卡规的热处理	621
		8.5.4 块规的热处理	624
第 9 章 农机、轻纺机械类零件的热处理	627		
9.1 农机具的热处理	627	9.3 纺织机针布的热处理	647
9.1.1 犁铧和犁壁的热处理	627	9.3.1 针布的工作特点和技术要求	647
9.1.2 圆盘和旋耕刀的热处理	630	9.3.2 针布的加工工艺流程	647
9.1.3 收割机刀片的热处理	633	9.3.3 热处理工艺规范	648
9.1.4 粉碎机锤片与筛片的热处理	635	9.3.4 针布的热处理工艺分析与实施 要点	648
9.2 轻纺零件的热处理	638	9.3.5 针布的热处理缺陷分析与 对策	649
9.2.1 自行车中轴、碗与挡类零件的 热处理	638	9.4 纺机罗拉、锭杆和钢领的热处理	649
9.2.1.1 自行车中轴的热处理	639	9.4.1 纺机罗拉的热处理	649
9.2.1.2 碗与挡类零件的热处理	640	9.4.2 锭杆的热处理	651
9.2.2 自行车飞轮、链条类零件的 热处理	643	9.4.3 钢领的热处理	654
9.2.2.1 自行车飞轮的热处理	643	9.4.4 针筒的热处理	656
9.2.2.2 自行车链条的热处理	644		
参考文献	659		

第1章 齿轮的热处理

齿轮在切削机床、汽车、拖拉机及其他许多工业领域中都有着广泛的应用。它是现代工农业、国防和交通运输设备的各类机械、仪表中应用最为广泛的一种机械传动零件，是机器中传递功率和运动的重要零件。与其他机械传动零件相比，齿轮传动具有：传递功率范围较宽，可以从很小功率直到几万千瓦；速度范围广，可从每秒0.1m以下到每秒100m以上；同时，传动效率高、使用寿命长、结构紧凑、工作可靠且能保证速比（传动比）恒定不变。但其缺点是：传动噪声较大、对冲击较敏感、制造与安装精度要求较高、成本较高，而且不宜用于中心距较大的传动。

齿轮的作用是传递扭矩，调整速度及改变运动方向。只有少数齿轮受力不大，仅起分度定位作用。

齿轮的种类很多，常见的分类方法有以下几种。

① 按照齿轮的形状通常分为圆柱齿轮和圆锥齿轮两大类，在每一大类中，按齿长方向的歪斜程度又可分为直齿轮（即正齿轮）、斜齿轮和圆弧齿轮三种，其中圆弧齿轮只应用于圆锥齿轮中。

② 按照齿轮轮齿的齿廓曲线的不同，可分为渐开线齿轮、摆线齿轮和双曲线齿轮等几种。

③ 按照齿轮在工作时的圆周速度 v 的不同，可分为低速、中速和高速齿轮三种。一般认为，低速传动 $v < 3\text{m/s}$ ，中速传动 $v = 3 \sim 15\text{m/s}$ ，高速传动 $v > 15\text{m/s}$ 。

④ 按照齿轮传动的工作条件不同，又可分为闭式传动齿轮、开式传动齿轮和半开式传动齿轮三种。闭式传动齿轮封闭在刚性很好的箱壳中，安装准确，密封及润滑良好，一般重要的传动齿轮都采用这种形式；开式传动齿轮是完全裸露的，安装精度较低，润滑不良，容易磨损，仅适用于低速和不重要的齿轮传动中；而半开式传动齿轮则介于两者之间，大多浸入油池内而上装护罩。

⑤ 按照齿轮的制造精度分类：标准齿轮3~5级精度；精密机床、仪器齿轮5~6级精度；一般机床、机械齿轮6~7级精度；汽车、拖拉机传动齿轮7~8级精度。

单级的圆柱和圆锥齿轮只能实现小的传动比，较大的传动比需要多级传动，蜗杆传动具有较大的单级传动比。

直齿轮制造比较简单，在传动机构中应用最多。但是直齿轮传动时，由于每对轮齿都是同时接触和脱开，容易产生冲击和噪声，故传动平稳性较差。要使传动比较平稳，有时就采用斜齿轮传动。人字齿轮相当于两个方向相反的斜齿轮，主要用于重型机械中传递大功率用。

1.1 齿轮的服役条件分析与性能要求

齿轮的工作条件很复杂，在不同工作条件下使用的齿轮造成失效的特征是不同的。

1.1.1 工作条件分析

一对齿轮副在运转工作时，两齿面啮合运动：

- ① 因传递扭矩而使齿根部受到很大的交变弯曲应力；
- ② 同时使齿面有相互滚动和滑动摩擦的摩擦力；
- ③ 在轮齿面窄小接触处承受很大的交变接触压应力；
- ④ 由于运转过程中的换挡、启动或啮合不均，使齿部承受一定的冲击载荷作用；
- ⑤ 此外，瞬时过载、润滑油腐蚀及外部硬质磨粒的侵入等情况，都可加剧齿轮工作条件的恶化。

由于齿轮的工作条件和受载情况是相当繁重、复杂的，因而其失效形式也是多种多样的。

1.1.2 常见的主要失效形式

齿轮工作时，由于受力繁重、复杂，会产生变形、齿面损伤或整体损坏等，致使其失去正常功能而失效。其主要的失效形式有以下几种。

(1) 断齿 除因超载而产生脆性折断（多发生在轮齿淬透的硬齿面齿轮或脆性材料制造的齿轮上）外，大多数情况下断齿都是由弯曲疲劳造成的。

当零件所承受的重复应力较高（接近甚至可能超过材料的屈服强度）而频率较低（低于10次/min）时，其断裂前经受的循环次数较低（往往低于 10^5 次），被称为低周疲劳。在产生低周疲劳的过程中，每次循环都产生较大的塑性变形，因此塑性变形占主导地位，故应选用塑性、韧性好的材料；反之，当重复应力较低、频率较高时，断裂前经受的循环次数较高（可达 10^7 次），称为高周疲劳。在产生高周疲劳过程中，应变循环基本上局限在弹性范围内，因此是弹性变形占主导地位，故应选用强度较高的材料。

提高齿轮弯曲疲劳强度的根本途径是提高齿根处材料的强度及改善应力状态。影响齿轮弯曲疲劳强度的因素有非金属夹杂物、表面脱碳、金相组织、残余压应力、心部硬度等。

非金属夹杂物的存在和表面脱碳使弯曲疲劳强度降低。非马氏体组织的存在使弯曲疲劳强度降低，马氏体经回火的组织提高弯曲疲劳强度。残余压应力可抑制裂纹的产生和发展，因此齿根喷丸强化可提高弯曲疲劳强度。心部硬度的提高也可提高弯曲疲劳强度。

(2) 齿面接触疲劳破坏（亦称麻点剥落或点蚀） 齿面承受大的交变接触应力作用是因局部接触应力超过材料的疲劳强度而产生的。表面疲劳使齿面表层局部产生麻点状、浅层剥落、深层剥落的破坏，这是齿轮最常见的失效形式。

表面麻点主要产生于软齿面，与齿面产生塑性变形有关。主要通过提高齿面硬度改善麻点破坏的抗力。浅层剥落是当某一点的最大切应力大于材料的剪切强度时，产生疲劳裂纹后经扩展而成。深层剥落是经表面硬化处理的齿轮，在硬化层与心部交界处形成的最大切应力超过材料的剪切强度时产生疲劳裂纹后经扩展而成的，这种裂纹可通过提高淬硬层深度加以避免。

(3) 齿面磨损 齿面磨损的种类、受力及破坏特征等见表1-1。减少齿面磨损的方法很多，主要是提高齿面硬度，采用中硬齿面、表面硬化，其中可用渗碳、碳氮共渗、渗氮、氮碳共渗等，也可采用提高基体组织的硬度、表面软层的方法，如经渗碳、渗氮后表面镀铜或镍钴合金等。

表 1-1 齿面磨损的种类、受力及破坏特征

磨损类型	载荷及运行情况	表面破坏特征	齿轮类型情况
氧化磨损	各种大小载荷及各种滑行速度	氧化膜不断形成,又不断剥落,但磨损速度小,一般为 $0.1\sim 0.5\mu\text{m/h}$;齿面均匀分布细致磨痕	各类齿轮
冷咬合磨损	高载荷、低滑行速度 $v<1\text{m/s}$	局部金属直接接触、黏着,不断从齿面剥离;磨损速度较大,一般为 $10\sim 15\mu\text{m/h}$;齿面有严重伤痕	低速重载齿轮
热咬合磨损	高载荷、高滑行速度, $v>3\sim 4\text{m/s}$	高的摩擦热使润滑油膜失效,金属间接接触,发生黏着和剥离;磨损速度一般为 $1\sim 5\mu\text{m/h}$;齿面伤痕严重	高速重载齿轮
磨粒磨损	各种大小载荷及各种滑行速度	各种磨粒进入啮合齿面,嵌入形成切刃或直接切削齿面,磨损速度为 $0.5\sim 5\mu\text{m/h}$;齿面有磨粒刮伤痕	矿山、水泥、农机等齿轮,各类开式齿轮

据美国相关资料对 931 个齿轮失效方式及原因统计结果(表 1-2)表明,疲劳断裂占失效齿轮总数的 36.8%、约 1/3 以上,居首位,过载断裂约占 24.4%,次之,这两项加起来断裂失效总计占 61.2%,是齿轮失效的主要形式;其次是表面疲劳破坏,占总数的 20.3%;而齿面磨损占总数的 13.2%。

表 1-2 美国 931 个齿轮失效方式及原因的统计结果

失效方式	统计结果/%	失效原因	统计结果/%
断裂(总计)	61.2	使用不当(总计)	74.7
疲劳断裂	32.8	润滑不良	11.0
轮齿	4.0	安装不良	21.2
轮	23.8	过载	38.9
过载断裂	0.6	其他	3.6
轮齿	20.3	设计(总计)	6.9
轮	7.2	设计不合理	2.8
表面疲劳(总计)	6.8	选材不当	1.6
麻点	6.8	热处理条件规定不当	2.5
剥落	13.2	热处理(总计)	16.2
麻点-剥落混合	10.3	淬火不良	5.9
磨损(总计)	2.9	硬化层浅	4.8
磨粒磨损		心部硬度低	2.0
黏着磨损	5.3	硬化层太深	1.8
塑性变形(总计)		其他(总计)	1.4

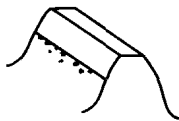
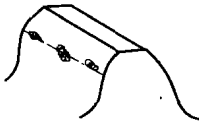
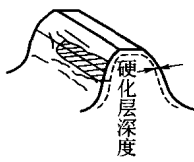
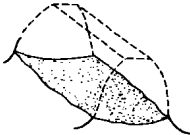
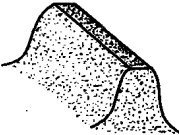
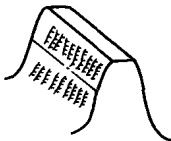
如经表面强化的汽车、拖拉机齿轮,发生失效的形式有表面疲劳剥落、表面磨损、弯曲疲劳、过载断齿以及换挡齿轮的端面磨损等。齿轮失效与齿轮所承受载荷的大小及性质有密切关系。现将齿轮常见的失效形式及其分类列于表 1-3 中。

1.1.3 主要性能要求

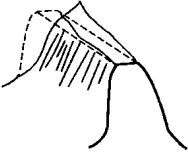
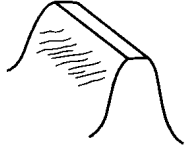
根据齿轮工作条件及失效形式的分析,对齿轮材料特提出如下性能要求。

- ① 高的弯曲疲劳强度,特别是齿根处要有足够的强度,使运行时所产生的弯曲应力不致造成疲劳断裂。
- ② 高的接触疲劳强度、高的表面硬度和耐磨性,防止齿面损伤。
- ③ 足够高的齿轮心部强度和冲击韧度,防止过载与冲击断裂。

表 1-3 齿轮失效分类及其特征

失效名称	失效特征	损坏部位示意图	举 例
表面接触 疲劳失效	麻点疲劳剥落 在轮齿节圆附近,由表面产生裂纹、造成深浅不同的点状或豆状凹坑		承受较高的接触应力的软齿面(正火调质状态)和部分硬齿面齿轮
	浅层疲劳剥落 在轮齿节圆附近,由内部或表面产生裂纹,造成深浅不同、面积大小不同的片状剥落		承受高接触应力的重载硬齿面(表面经强化处理)齿轮
	硬化层剥落 经表面强化处理的齿轮在很大接触应力作用下,出于应力/强度比值 >0.55 ,在强化层过渡区产生平行于表面的疲劳裂纹,造成硬化层压碎、大块剥落		承受高接触应力的重载硬齿面(表面经强化处理)齿轮
齿轮弯曲 断裂	疲劳断齿 表面硬化(渗碳、碳氮共渗、感应淬火等)齿轮,一般在轮齿承受最大交变弯曲应力的齿根根部产生疲劳断裂,断口呈疲劳特征		承受弯曲应力较大的变速箱齿轮和最终传动齿轮等
	过载断齿 一般发生在轮齿承受最大弯曲应力的齿根部位,由于材料脆性过大或突然受到过载和冲击,在齿根处产生脆性折断,断口粗糙		变速箱齿轮等
磨损失效	磨粒磨损 润滑介质中含有尖角硬质颗粒和金属屑粒,犹如刀刃切削轮齿表面,使齿面几何形状发生畸变,严重时会使齿顶变尖,磨得像刀刃一样		在有灰砂环境中工作的开式齿轮,矿山机械传动齿轮等
	腐蚀磨损 在润滑介质中含有化学腐蚀成分,与材料表面发生化学和电化学反应,产生红褐色腐蚀产物(主要是氧化铁)、受啮合摩擦和润滑剂的冲刷面脱落		在化学腐蚀环境中工作的齿轮
	胶合磨损 轮齿表面在相对运动时,由于速度大、齿面接触点局部温度升高(热黏合)或低速重载(冷黏合)使表面油膜破坏、产生金属局部黏合而又撕裂,一般在接近齿顶或齿根部位速度大的地方,造成与轴线垂直的刮伤痕迹和细小密集的粘焊节瘤,齿面被破坏,噪声变大		高速传动齿轮,蜗杆等
	齿端冲击磨损 变速箱换挡齿轮在换挡时齿端部受到冲击载荷,使齿端部产生磨损、打毛或崩角		变速箱换挡齿轮受多次换挡冲击载荷作用

续表

失效名称	失效特征	损坏部位示意图	举 例
齿面塑性变形	塑性变形 在瞬时过载和摩擦力很大时,软齿面齿轮表面发生塑性变形、呈现凹沟、凸角和飞边,甚至使齿轮扭曲变形造成轮齿塑性变形		软齿面齿轮过载
	压痕 当有外界异物或从轮齿上脱落的金属碎片进入啮合部位,在齿面上压出凹坑,一般凹痕线平,严重时会使轮齿局部变形		齿轮啮合时有异物压入
	塑变褶皱 当短期过载摩擦力很大时,硬齿面齿轮(尤其是双曲线齿轮)齿面出现塑性变形现象,呈波纹形褶皱,严重破坏齿廓		硬齿面齿轮过载

④ 原材料材质纯净,断面经浸蚀后,不得有肉眼可见的空隙、气泡、裂纹、非金属夹杂物及白点等缺陷,其疏松和夹杂物等级应符合有关标准规定的要求。

⑤ 还要求有良好的切削加工性,淬火变形要小,以获得高的加工精度和低的表面粗糙度值,以提高齿轮抗磨损能力。

⑥ 价格低廉,材料来源充足。

应说明,在齿轮副中两齿轮齿面硬度值应有一定差值,因小齿轮的齿根薄、轮齿受载次数多,故小齿轮硬度应比大齿轮要高些。一般两齿轮齿面硬度差:软齿面为 30~50HBW,硬齿面为 5HRC 左右。各类齿轮副的硬度选配方案见表 1-4。

表 1-4 各类齿轮副的硬度选配方案

齿面硬度	齿轮种类	热处理工艺		齿轮工作齿面 硬度差	工作齿面硬度举例	
		小齿轮	大齿轮		小齿轮/HBW	大齿轮/HBW
软 齿 面 ($\leq 350\text{HBW}$)	直齿	调质	正火调质	(硬齿面硬度 _{min} - 软齿面硬度 _{max}) $\geq 40 \sim 50\text{HBW}$	260~290 270~300	180~210 200~230
	斜齿及人字齿	调质	正火 调质 调质	(硬齿面硬度 _{min} - 软齿面硬度 _{max}) $\geq 40 \sim 50\text{HBW}$	240~270 260~290 270~300	160~190 180~210 200~230
软、硬齿面结合 (硬齿面硬度 $> 350\text{HBW}$, 软齿面硬度 $\leq 350\text{HBW}$)	斜齿及人字齿	表面淬火	调质	齿面硬度差很大	50~55HRC	270~300 200~230
		渗氮 渗碳	调质		56~62HRC	270~300 200~230
硬 齿 面 ($> 350\text{HBW}$)	直齿、斜齿及人字齿	表面淬火		齿面硬度大致相同	50~55HRC	
		渗氮 渗碳	渗碳		56~62HRC	

1.2 齿轮钢材的冶金与热处理质量控制

齿轮用钢的疲劳强度等性能取决于钢材的冶金质量, 齿轮用钢的热处理工艺、组织及表面状态等。不同的材料和热处理质量控制水平相应得到不同的齿轮疲劳强度等级。按照齿轮不同的承载能力要求分为高、中、低三个级别进行控制和检验, 分别用 ME、MQ、ML 表示。

1.2.1 齿轮钢材的冶金质量控制

1.2.1.1 钢材的冶金质量

钢材在生产过程中要经过冶炼、铸造、轧制(或锻造)等工序, 最后成材。由这些工艺过程控制的质量, 一般称为冶金质量。冶金工厂生产的各种钢材, 出厂时要按照相应的标准及技术文件的规定进行各项检验。这里主要介绍钢材的化学成分、低倍缺陷、高倍缺陷、晶粒度、淬透性及其对钢材性能的影响。

(1) 原材料化学成分波动的影响 钢件的化学成分是制定热处理工艺的基本依据, 是决定零件经热处理之后能否达到技术要求的根本条件。当工件热处理的性能达不到技术要求或发生早期失效时, 首先要检验钢件的化学成分。

测定化学成分的方法很多, 其中最传统且较准确的方法是化学分析法, 在实验室中进行。生产过程中在现场常使用的方法是光谱分析和火花鉴别法。对于化学热处理形成的由表面向内部呈梯度分布的渗层的化学成分, 可采用剥层分析方法。

(2) 钢的低倍缺陷及其对性能的影响 钢的低倍组织缺陷种类很多, 常见的有如下几种。

① 疏松 钢锭在凝固过程中, 由于枝晶之间区域内的熔体最后凝固而收缩, 以及放出气体导致产生许多细小孔隙和气体而造成的不致密性, 称为“疏松”。在经热酸腐蚀的横向试片上, 疏松呈现分散的小空隙和暗色的小圆点, 其中小空隙为多边形或圆形。疏松可分为一般疏松和中心疏松两种。若分布在整个截面上的称为“一般疏松”, 集中在钢材中心的则称为“中心疏松”。

严重的疏松会使钢件在锻造、轧制或热处理时产生内部破裂, 降低钢的横向力学性能(塑性与韧性), 对零件的加工粗糙度也有影响。防止或减少疏松的措施主要是控制冶炼和铸锭的质量, 减少钢中的杂质和气体, 轧制时加大钢材的压缩量等。

② 偏析 合金金属内各个区域化学成分的不均匀分布, 称为“偏析”。在化学成分上, 偏析带上的 CSP 及其他杂质的含量较基体偏高, 其中碳(C)增高最为明显。偏析主要有方形偏析、点状偏析、中心偏析等。方形偏析是在钢材的横截面上, 腐蚀后显现出由密集的暗色小点组成的颜色较深的方框形, 方框以内的组织没有外部致密。中心偏析是在钢材横截面的中心部位, 腐蚀后显示出形状不规则的深暗色斑点。而点状偏析是在钢材的横截面上, 腐蚀后显示出分散的、不规则形状、不同大小、略有低陷的暗黑色斑点, 在钢材的纵断面上呈暗色条带, 严重时会有气泡出现。

偏析使钢的各部分性能不均匀, 影响钢的力学性能, 且易产生热处理缺陷。此外, 偏析在钢件内造成薄弱的或脆性的区域, 在淬火应力或工作应力作用下, 极易使钢件破损。采用高温扩散退火(均匀化退火)方法, 可使偏析减轻。若钢材或锻件树枝状偏析严重时, 则钢的塑性、韧度降低。这种情况尤以中碳铬钼钢、铬镍钼钢大锻件最为普遍。在压力加工的情况下, 树枝状偏析严重时还可使锻件破裂。

大多数钢中易产生方形偏析, 一般来说, 合金钢比碳钢容易产生偏析, 且比较严重。不严重的方形偏析是允许存在的缺陷, 但严重的方形偏析会降低钢的塑性和韧度。轻微的点状

偏析对力学性能没有明显的影响,但严重的点状偏析使钢的塑性和韧性降低,特别是横向断面收缩率的降低最为显著。在合金钢中,由于合金元素的加入,使钢的流动性降低,气体析出更加困难,所以更易于出现点状偏析。

③ 白点 白点是钢中的内裂。检查白点最好在淬火状态下折断,以免试样在折断时由于塑性变形而使白点失真。白点主要发生在珠光体钢、马氏体钢、贝氏体钢的锻轧件中,以及含有 Cr、Ni、Mo、Mn 等合金元素的钢,当锻轧后冷却较快时,有出现白点的危险,白点的存在会大大降低钢的力学性能。用存在白点的钢材制成零件,在最后热处理淬火过程中,将使裂纹逐渐扩大,甚至完全开裂,所以白点是一种不允许存在的缺陷。

一方面要在原材料生产过程中防止白点产生;另一方面要预防有白点的钢件进入热处理过程。目前,防止钢产生白点的方法,主要是减少钢中的氢气。为此,在实际生产中,可在两方面采取工艺措施:一是在炼钢或浇注时,将钢中氢气减少至最低限度;二是在固态下利用热处理方法减少钢中的氢气。如采用锻后缓慢冷却、等温退火或正火加高温回火(图1-1)的方法进行去氢处理。

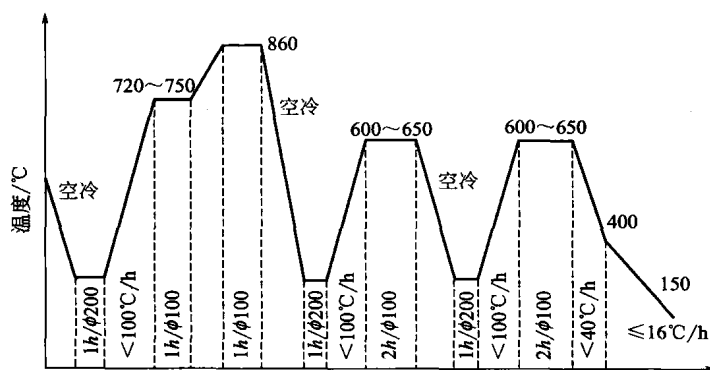


图 1-1 预防 3%Cr-Mo 钢锻件出现白点的热处理工艺

④ 气泡 根据气泡在钢中分布位置的不同,将气泡分为皮下气泡和内部气泡两种。皮下气泡分布在表皮附近。热加工用钢不允许有皮下气泡,冷加工用钢如果皮下气泡存在于表面不深的区域,在机械加工时是可以消除掉的;如果气泡存在较深,则加工后仍留在工件内,使用时会造成事故。内部气泡是镇静钢中不允许存在的缺陷。

⑤ 发纹 发纹即是裂纹,是沿钢材的加工方向呈现的类似头发丝粗细的裂纹。钢材皮下容易出现发纹。不同的钢种对发纹的敏感性不同,最容易出现发纹的是 Cr13 型不锈钢,其次是 30CrMnSiA 等钢。

发纹严重地降低钢的疲劳强度。因此,对制造重要零件所用的钢材,必须做发纹检验,并对发纹的数量、长度和分布情况严格限制。防止发纹最好的办法是提高冶炼质量,降低钢中的气体和夹杂。

⑥ 裂纹(内裂) 金属局部破断,称为裂纹。它是在应力作用下某些薄弱部分发生局部破断而形成的一种极不稳定的缺陷。在光学显微镜下观察,裂纹两侧凹凸不平,而且多数尾部是尖锐的。钢材原材料的裂纹有轴心晶间裂纹和发纹两种。轴心晶间裂纹是钢锭凝固结晶时产生的热裂纹,在热轧和锻压时未能焊合而遗留下来,在钢材横截面的中心区域,浸蚀后显示为蜘蛛网状裂纹。发纹是钢中夹杂和气孔等缺陷在加工时延伸而形成的,表现为沿钢材的加工方向类似为头发丝般粗细的裂纹。

裂纹严重地降低钢的疲劳强度。因此,对制造重要零件所用的钢材,必须做裂纹检验,并对裂纹的数量、长度和分布情况严格限制。防止裂纹的最好办法是提高冶炼质量,降低钢