



丁惠麟 金荣芳 编著



机械零件

缺陷、失效分析与实例

JIXIE LINGJIAN
QUEXIAN SHIXIAO FENXI YU SHILI



化学工业出版社

机械零件缺陷、失效分析与实例

丁惠麟 金荣芳 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书通过大量实例,结合金相照片,详细介绍了机械零件由于设计不当;材料缺陷;铸造、锻造、焊接、热处理、冷加工等工艺不当以及安装和使用不当而造成的零件失效的缺陷分析和处理对策。

本书适宜从事冶金、材料、机械等专业的质量控制和失效分析的人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

机械零件缺陷、失效分析与实例/丁惠麟,金荣芳编
著. —北京:化学工业出版社,2013.1
ISBN 978-7-122-15841-3

I. ①机… II. ①丁…②金… III. ①机械元件-缺陷-研究 IV. ①TH13

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第267004号

责任编辑:邢涛

装帧设计:韩飞

责任校对:顾淑云

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张30½ 字数787千字 2013年5月北京第1版第1次印刷

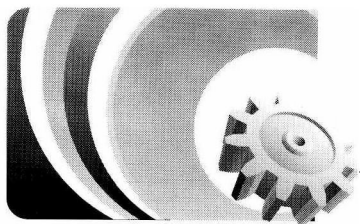
购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:138.00元

版权所有 违者必究



随着科学技术和工业生产的迅速发展，人们对机械零部件的质量要求也越来越高。材料质量和零部件的精度虽得到很大的提高，但各行业中使用的机械零部件的早期失效仍时有发生。通过失效分析，找出失效原因，提出有效改进措施以防止类似失效事故的重复发生，从而保证工程的安全运行是必不可缺的。

经长期失效分析，笔者深感缺陷分析是失效分析的重要基础之一。一般失效分析常以脆性断裂、疲劳断裂、塑性断裂、蠕变断裂和剥落、腐蚀、磨损等失效模式来描述失效形式，但不是失效的原因。造成结构失效的根本原因往往是材料或零部件制造过程遗留的各种缺陷或设计考虑不周、安装与使用不当、使用环境等因素引起应力集中、受力状态的改变及表面损伤导致零部件的变形与裂纹的形成或多种因素综合的结果。

本书是笔者在长期从事金相检测和失效分析、生产实践经验积累和收集相关资料的基础上编写而成。全书共分八章，第1章为设计不当引起的失效，第2章为金属材料缺陷与失效，第3章至第6章为铸造、锻造、焊接和热处理生产过程中形成的缺陷与由此引起的失效，第7章为冷加工缺陷与失效，第8章为安装和使用不当引起的失效。各章分别介绍了材料和制造过程中常见的各种缺陷与设计、管理和使用不当导致零部件的早期失效。突出了各种缺陷的形成、特征及其危害和失效分析中的断口、组织形貌，并附有各类缺陷引起的失效案例。

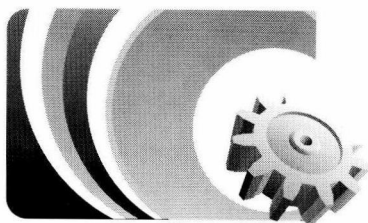
本书内容翔实，图文并茂，可供机械、冶金、航空、电力、汽车、轻工等企业和技术部门的金相检测、铸造、热处理、锻造、焊接和设计等与失效分析人员使用，也可供高等院校相关专业师生参考。

本书编写过程中得到了江苏省机械研究设计院等单位和王建怀高级工程师的帮助和支持，引用了一些单位和学者发表的科技资料和技术标准，在此一并表示衷心感谢。

由于水平有限，书中不足之处，敬请读者赐教和指正。

编著者

2012年10月



第 1 章 设计不当引起的失效 1

1.1 常见的设计不合理因素	1
1.1.1 几何形状	1
1.1.2 对零件制造应力认识不足, 设计结构不合理	3
1.1.3 设计硬度要求不合理	6
1.1.4 选材和状态要求不合理	10
1.2 设计不当引起的失效案例	16
1.2.1 计量泵失效分析	16
1.2.2 齿轮端面开裂失效分析	19
1.2.3 液压泵斜盘失效分析	22
1.2.4 齿轮泵齿轮与轴咬合失效分析	25
1.2.5 齿轮泵主动齿轮轴折断分析	27
1.2.6 配油盘压印模冲头失效分析	30
1.2.7 传动轴断裂失效分析	33
1.2.8 F3 主减速箱大齿轮失效分析	37
1.2.9 提升机构制动器轴断裂分析	42

第 2 章 材料缺陷与失效 45

2.1 常见的材料缺陷	45
2.1.1 疏松	45
2.1.2 锭形偏析 (也称方形偏析)	46
2.1.3 点状偏析 (又称斑点状偏析)	47
2.1.4 皮下气泡	47
2.1.5 残余缩孔 (又称缩尾)	47
2.1.6 翻皮	49
2.1.7 轴心晶间裂缝	51
2.1.8 非金属夹杂物	52
2.1.9 白点	61
2.1.10 异金属夹杂	63
2.1.11 成分不均匀和轴心碳偏析	63
2.1.12 表面腐蚀	67
2.2 材料缺陷引起的失效案例	68

2.2.1	双头螺柱断裂分析	68
2.2.2	托轮轴断裂失效分析	71
2.2.3	接骨板断裂失效分析	75
2.2.4	六角锁紧螺栓断裂分析	79
2.2.5	连接螺栓失效分析	83
2.2.6	A14 传动轴淬火开裂分析	87
2.2.7	GIS 气管连接螺母失效分析	91
2.2.8	大齿轮组装开裂原因分析	94
2.2.9	球磨机变速箱输出轴断裂分析	98
2.2.10	离合器膜片弹簧断裂分析	102
2.2.11	解吸塔再沸器上管板失效分析	105
2.2.12	二米辗压机锥辊轴断裂分析	110
2.2.13	摩托车齿轮失效分析	115
2.2.14	前轮毂压铸模失效分析	117
2.2.15	材质对压铸模具失效和使用寿命的影响	120

第 3 章 铸造缺陷与失效

131

3.1	常见的铸造缺陷及其影响	131
3.1.1	缩孔和缩松（疏松）	131
3.1.2	白口和反白口	134
3.1.3	球墨铸铁球化不良与衰退	135
3.1.4	夹渣（夹杂）	136
3.1.5	石墨漂浮（开花状石墨）	140
3.1.6	偏析碳化物与磷共晶的影响	142
3.1.7	铁素体形态和数量	143
3.1.8	铸造裂纹	146
3.1.9	灰铸铁件中常见的不良石墨形态	146
3.2	铸造缺陷引起的失效案例	148
3.2.1	航空液压泵斜盘断裂分析	148
3.2.2	柴油机汽缸套的咬合损伤失效分析	150
3.2.3	隔离开关拐臂断裂失效分析	153
3.2.4	柴油机曲轴断裂失效分析	156
3.2.5	转子与柱塞卡死问题的分析	159

第 4 章 锻造缺陷与失效分析

164

4.1	锻造缺陷的常见形式	164
4.1.1	过热和过烧	164
4.1.2	锻造裂纹	168
4.1.3	锻造折叠	173
4.1.4	热脆和铜脆	177

4.1.5	低合金钢高温内氧化	177
4.1.6	锻后退火不充分	178
4.1.7	锻造白点	179
4.1.8	锻造流线缺陷	179
4.2	锻造缺陷案例	180
4.2.1	大型输出轴齿轮开裂分析	180
4.2.2	航空液压泵斜盘断裂失效分析	184
4.2.3	内齿轮淬火断裂分析	189

第5章 焊接缺陷与失效

192

5.1	常见的焊接缺陷	192
5.1.1	焊接裂纹	192
5.1.2	焊缝中夹渣与气孔	204
5.1.3	未焊透和未熔合	207
5.1.4	咬边	209
5.1.5	焊接预热不当形成的缺陷	209
5.1.6	钎焊缺陷	213
5.1.7	接触焊(点焊、滚焊)常见缺陷	215
5.1.8	摩擦焊的缺陷与失效	219
5.2	奥氏体钢焊接件的晶间腐蚀破坏	221
5.2.1	晶间腐蚀	221
5.2.2	刀状腐蚀	222
5.2.3	应力腐蚀	222
5.3	焊接缺陷引起的失效案例	223
5.3.1	汽车转向器断裂失效分析	223
5.3.2	水环真空泵叶片断裂分析	225
5.3.3	开关铝筒失效分析	230
5.3.4	闸阀焊接件断裂分析	233
5.3.5	摆臂支撑板断裂分析	236
5.3.6	供热管道开裂失效分析	238
5.3.7	污水泵叶片断裂分析	241
5.3.8	汽车驱动桥壳带套管断裂分析	245

第6章 热处理缺陷与失效

249

6.1	常见的热处理缺陷	249
6.1.1	淬火裂纹	249
6.1.2	回火裂纹	263
6.1.3	钢的表层脱碳	263
6.1.4	校正裂纹	264
6.1.5	渗碳、碳氮共渗缺陷	265

6.1.6	渗氮缺陷	277
6.1.7	氮碳共渗(软氮化)缺陷	282
6.2	热处理缺陷引起的失效实例	284
6.2.1	摩托车100124-1骨架开裂分析	284
6.2.2	柱塞帽组装收口开裂	286
6.2.3	铰盘车传动轴齿部断裂分析	287
6.2.4	电机主轴断裂失效分析	291
6.2.5	太阳轮失效分析	294
6.2.6	风力发电机高速轴失效分析	297
6.2.7	真空泵驱动接头断裂分析	301
6.2.8	机油泵主动齿轮断齿原因分析	304

第7章 冷加工成形缺陷与失效

309

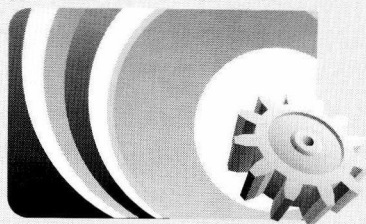
7.1	常见的磨削缺陷	309
7.1.1	磨削烧伤及其特征	309
7.1.2	磨削裂纹	311
7.1.3	磨削应力的形成	313
7.1.4	影响磨削烧伤和磨削裂纹的因素	314
7.2	切削加工缺陷与失效	323
7.3	电火花线切割加工缺陷与失效	327
7.3.1	变质层组织与缺陷	328
7.3.2	线切割变形与开裂	329
7.4	冷镦缺陷与失效	330
7.4.1	冷镦硬化	330
7.4.2	冷镦折叠	331
7.4.3	冷镦螺栓头部断裂	331
7.4.4	十字槽和内六角螺钉掉头	332
7.5	滚丝不当产生的缺陷与失效	333
7.6	冲、挤和拉伸成形缺陷	337
7.7	其它加工缺陷与失效	339
7.7.1	剪切缺陷	339
7.7.2	加工毛刺与失效	342
7.7.3	电解加工的缺陷	344
7.7.4	机械损伤与变形	345
7.7.5	电镀氢脆断裂	350
7.8	冷加工不当引起的失效	352
7.8.1	FD齿轮失效分析	352
7.8.2	齿轮轴齿面裂纹分析	355
7.8.3	镀锌水管断裂分析	358
7.8.4	ZD51-4和ZD41-4电机轴断裂分析	361
7.8.5	输入齿轮轴断裂失效分析	365
7.8.6	收缩盘外环断裂分析	368

7.8.7	低温过热器管裂纹分析	373
7.8.8	铰盘车 YTJ12 提升机构失效分析	378
7.8.9	75kW 齿轮变速箱中间轴断裂分析	383
7.8.10	汽车发动机曲轴断裂失效分析	386
7.8.11	双头螺栓断裂分析	390
7.8.12	低速级齿轮断裂分析	393
7.8.13	电力中温再热器冷却管爆管分析	396
7.8.14	拨叉锻模断裂失效	399
7.8.15	滚丝轮崩齿问题的分析	402
7.8.16	显像管包箍断裂失效分析	405
7.8.17	同轴泵齿轮轴断裂分析	409

第 8 章 安装、使用和维护不当引起的失效

413

8.1	安装不当	413
8.1.1	安装紧度控制不妥	413
8.1.2	安装清洁度的影响	416
8.1.3	安装零件的混错	419
8.1.4	安装中心距偏差与受力不均	419
8.1.5	安装零位表面损伤	422
8.2	使用不当	425
8.2.1	过载断裂	425
8.2.2	操作不当	426
8.3	使用、维修和保养	430
8.4	环境介质影响	433
8.4.1	温度的影响	433
8.4.2	气氛与介质	434
8.4.3	管道的爆裂与应力腐蚀	439
8.5	管理不当	449
8.6	安装、使用和维护不当引起的失效案例	451
8.6.1	一段预热管渗漏事故分析	451
8.6.2	变速箱齿轮失效分析	454
8.6.3	汽车发动机曲轴断裂分析	458
8.6.4	主动锥齿轮崩齿失效分析	460
8.6.5	齿轮轴齿磨损分析	463
8.6.6	汽轮机第十二级动叶片开裂分析	465
8.6.7	涡轮盘裂纹分析	469
8.6.8	凝结水泵筒体连接螺栓断裂失效分析	472
8.6.9	变速箱齿轮轴断裂分析	476



设计不当引起的失效

构件的失效原因是非常复杂的，它涉及材料选择、加工制造导致的表面缺陷（尖角、毛刺、切削加工刀痕）、使用、环境温度、介质、载荷条件、装配、调试和保养等诸多因素。有部分失效事故是由于设计时没有估计到的原因，如零件尖角的影响、服役条件和失效特点等。有些虽对零部件整个服役期限内的安全性和可靠性已做了充分的考虑与核算，照理在服役过程中不会发生断裂，但零部件的断裂仍然时有发生。这是因为在设计过程中有许多因素不是都能准确考虑到的，例如，作用在零部件的外力有的不能利用理论公式进行正确计算，关键零件的使用特点和新的工作条件下可能形成的失效形式认识不足，如加工过程中产生的有害残余应力和使用过程中可能发生的振动应力等，都可能导致零件的早期失效。如某航空附件厂从 1972~1990 年间在装试和使用过程中发生的 55 次失效事件中，由于设计引起的失效占全部失效事件的 25.3%，如图 1-1 和表 1-1，可见，A 类因素是造成失效的关键所在，其中设计、装配和铸造显得尤为突出，占整个失效事件的 56.2%。

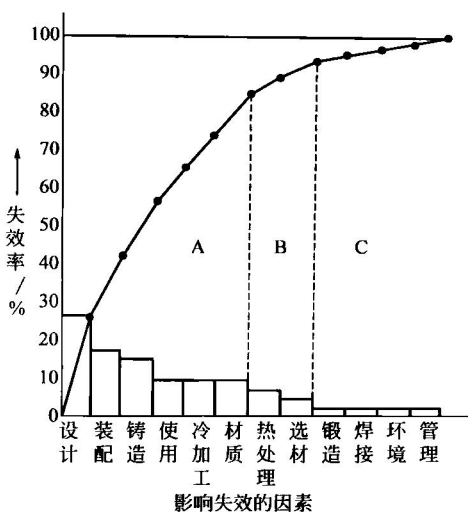


图 1-1 巴雪特曲线

表 1-1 1972~1990 年在装试和使用过程中发生的失效事故统计表

序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
分类	设计	装配	铸造	使用	冷加工	材质	热处理	选材	锻造	焊接	环境	管理
失效次数	14	9	8	5	5	5	3	2	1	1	1	1
比例/%	25.3	16.4	14.5	9.1	9.1	9.1	5.5	3.6	1.8	1.8	1.8	1.8

1.1 常见的设计不合理因素

1.1.1 几何形状

忽略了零部件形状突变处的尖角和粗糙度对使用性能的影响，是造成零部件失效的重要

因素。在航空辅机系统的失效案例中有 57% 左右是由于零件边缘未倒角、转角处 R 半径过小和表面粗糙度要求不当或毛刺引起应力集中成为疲劳断裂的起始点而导致失效。如飞行器上的右轮轴在右转弯轻带刹车时折断（图 1-2），是由于拐角处无圆角过渡（图 1-3），当受到较大的侧向应力时，尖角处应力集中，导致尖角处裂纹的形成和快速扩展至断裂。有的联接轴的花键和键槽的槽底尖角处产生应力集中，裂纹将在尖角处产生，并沿与最大拉伸应力相垂直的方向扩展。特别是花键轴可能在各尖角处都出现微裂纹形成疲劳核心并各自沿着与正应力相垂直的方向扩展，并在轴的中心区汇合，形成星形断面。如生产车间行车在运行约 284 天，发生故障，突然停止运转。拆下检查后发现，转子轴的花键根部断裂（图 1-4），断口呈星形形貌（图 1-5），裂源均处于键槽的尖角部位。

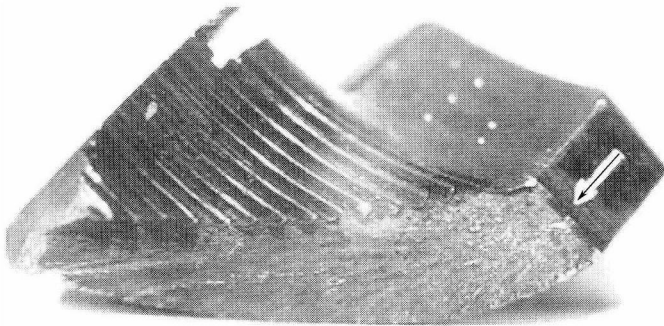


图 1-2 右轮轴直角处快速断裂后的断口形貌

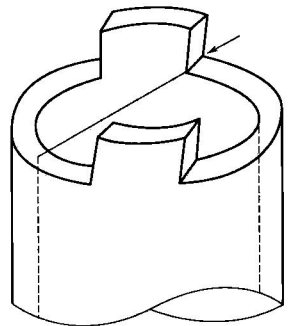


图 1-3 右轮轴断裂部位示意图

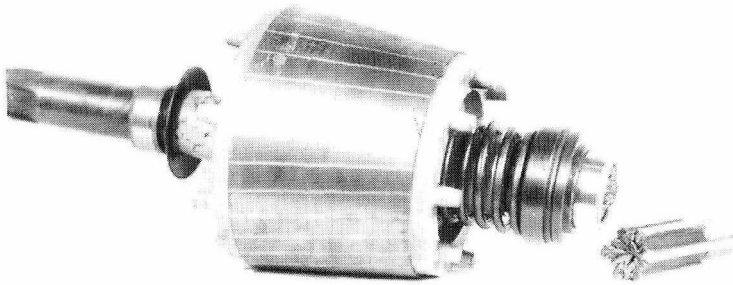
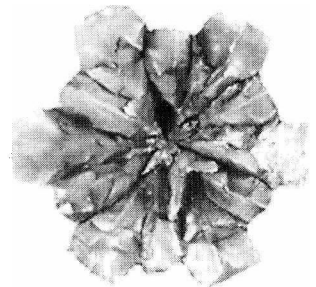
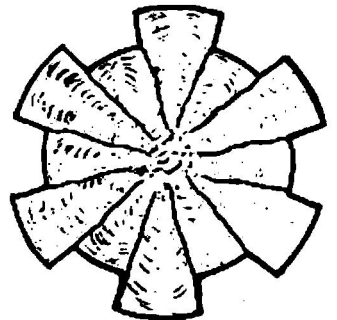


图 1-4 断裂的转子轴部位及其形态



(a) 实物的星形断口形貌



(b) 断口形貌的示意图

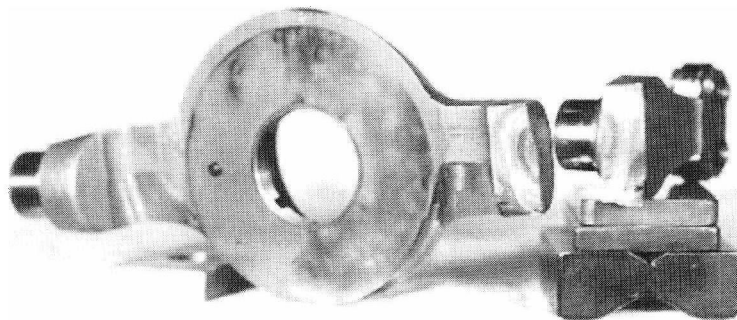


图 1-6 斜盘摆架断裂实物 1:2

图 1-5 花键轴断口形貌

设计人员往往只注意到零部件配合面尺寸、截面突变处的圆角半径和表面粗糙度，而忽略了非配合面的形态要求。例如，某液压泵斜盘在运行仅数十小时的磨合试车过程中就发生斜盘摆架断裂（图 1-6）。斜盘材料为 18Cr2Ni4WA 钢，经锻造成形，正火、调质处理后的硬度为 38HRC（设计要求为 33~40HRC），组织为回火索氏体，锻造纤维方向、非金属夹杂物和晶粒度均符合相关技术要求。从断裂部位和形态可知，产生断裂的原因是斜盘摆架下部外缘非接触面的圆弧处不仅粗糙度较差，而且呈尖角形态（图 1-7），在使用应力的作用下形成应力集中导致微裂纹的萌生，在最大载荷为 22600N 的交变应力作用下，裂纹逐步扩展，形成典型的疲劳断裂（图 1-8）。

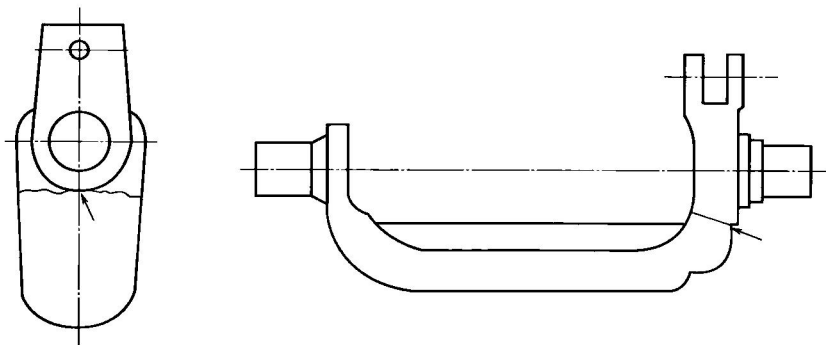


图 1-7 断裂部位（箭头处）和斜盘形态示意图

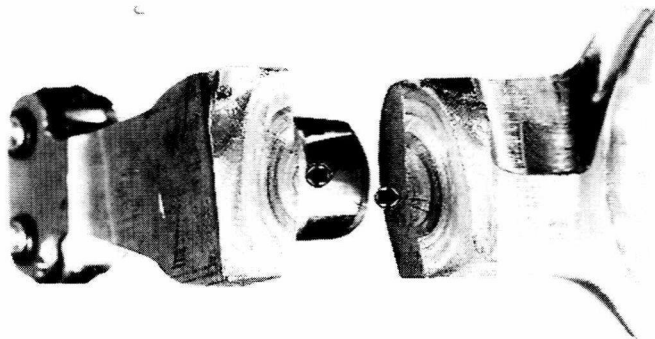


图 1-8 摆架疲劳断裂的断口形貌

有的零部件受力不大，其拐角半径不被重视，忽略了实际使用应力的复杂性。如振动应力的产生使尖角部位应力水平提高，形成微裂纹，最终导致疲劳断裂的情况也时有发生。例如，恒速装置支架的连接拐角处无圆弧过渡，在使用时的振动应力作用下，在尖角处形成应力集中，导致疲劳断裂（图 1-9）。

对于承受反复冲击载荷的零件，由于在使用过程中承受的冲击和振动应力较大，其截面拐角的过渡圆弧“R”半径和加工粗糙度显得尤为重要。图 1-10 为 5CrW2Si 钢制的矿山用冲击钻冲击杆，由于安装柄和杆身连接处的圆角半径较小，在使用过程中的冲击力的作用下，在圆角半径处形成应力的高度集中，导致冲击杆的早期疲劳断裂。

1.1.2 对零件制造应力认识不足，设计结构不合理

设计零部件时力求加工方便、周期短、成本低、使用寿命长、安全可靠，但由于对使用条件的实际状态认识的局限性，往往导致零部件早期失效的情况时有发生。航空液压泵中 $\phi 3\text{mm}$ 的柱塞销设计为过渡配合，装机后在第四次升空仅 2.5h 就发生柱塞销松动滑出切断，

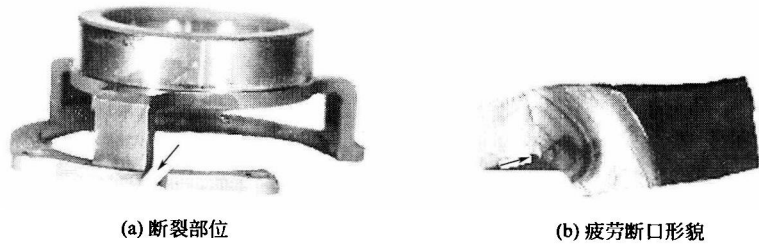


图 1-9 恒装支架断裂后的形态

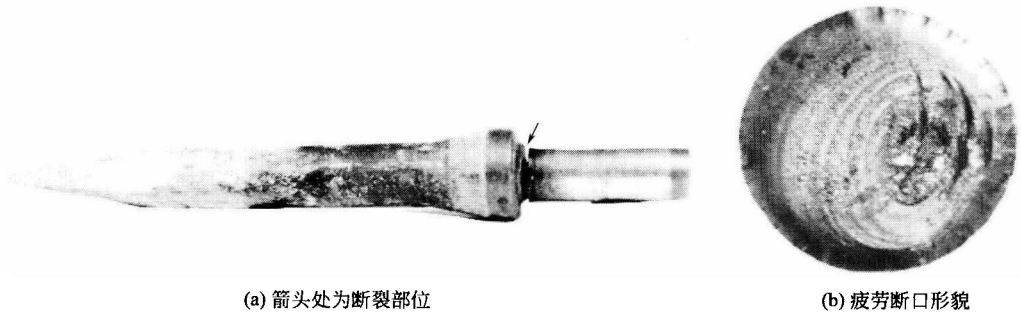


图 1-10 冲击杆安装柄根部断裂形态

引起柱塞卡死而扭断，导致柱塞球头拉脱掉入螺盖边缘卡死，联轴器扭断，引起主系统压力迅速下降。将柱塞销的过渡配合改为紧配合（0~0.02 的紧度），消除了柱塞松动滑出，保证了飞行安全。

对于较大尺寸的零部件，设计人员往往仅考虑到热加工过程中的变形问题对零件的影响，而忽略了热应力、组织应力和加工后表面状态的影响，结果使零部件的使用寿命大大降低。例如铝板轧制机变速箱大齿轮，由于体积过大，热处理工艺不当导致很大的残余热应力，仅使用一个月就开裂失效。又如直径为 400mm 长为 1200mm 的冷轧辊，采用 9Cr2W 钢制作，轧辊表面硬度要求为 58~60HRC，硬化层深度为 15mm，其余部位的硬度要求不大于 278HB。设计时考虑到大直径轧辊在淬火过程中的热应力较大，为了防止中心裂纹的产生，在轧辊中心钻 $\phi 80\text{mm}$ 的内孔，以利于整体淬火时内孔同时通水冷却来降低淬火应力，防止内裂。实际上这对轧辊的使用寿命并没有起到预期效果，在使用过程中多次发生轧辊的断裂失效（图 1-11）。由于轧辊内孔是在热处理前加工，深孔内壁粗糙度较差，因此在使用应力的作用下，在加工痕迹处形成应力集中，导致裂源在加工痕迹处形成并向四周扩展，最终导致疲劳断裂。热处理过程中内孔表面氧化脱碳，降低了孔壁表面的疲劳强度。另外，加工内孔不仅增加了生产周期和制造成本，而且使心部材质缺陷暴露于表面。这些都是促进轧

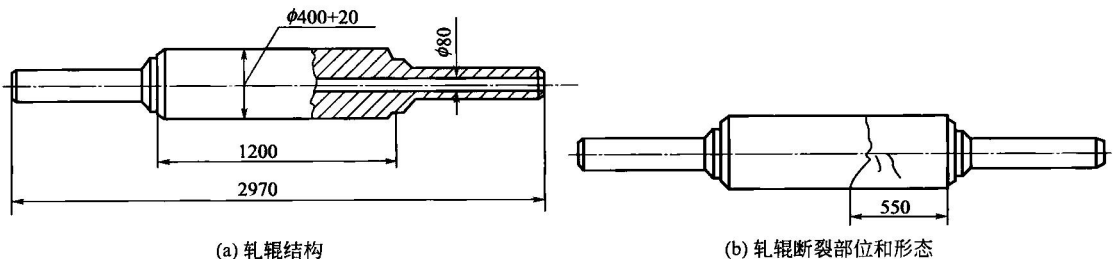


图 1-11 轧辊结构和断裂示意图

辊断裂的因素。经修改设计，取消 $\phi 80\text{mm}$ 的内孔，改为实心轧辊，在改变热处理工艺、降低热应力、防止内裂的条件下制造的轧辊，在长期使用中均未发生轧辊断裂，避免了因断裂事故遭受的经济损失。

对于一些承受复杂应力的重要零部件，其结构较复杂时，加工和装配紧度误差设计若考虑不周，在以后的运行过程中易引起非正常摩擦磨损，导致零部件的损伤或断裂失效。例如，航空应急泵铝合金叶片在运行过程中除了承受旋转时的离心力外，还承受弯曲和扭转应力的共同作用。因此，按设计要求组装后的大轴承内圈和叶片轴颈端面通过螺套和螺母的拧紧，使轴颈和大轴承无任何相对运动（图 1-12）。由于不锈钢垫圈内孔直径为 13.5mm ，而轴颈直径为 13mm ，轴颈根部 R 为 $1.1\sim 1.45\text{mm}$ （实测），因而在装配时的压紧过程中使图 1-12中 a、b 两个垫圈在有 R 处形成喇叭状（图 1-13），对叶片轴颈产生干涉，造成轴承内圈和叶片端面不能紧密接触。因此，叶片在高速运转过程中在旋转弯曲和振动应力的共同作用下，轴颈和轴承内圈之间产生一定的相对摆动位移，其大小决定于轴颈 R 和垫片内孔尺寸。由微动磨损的一般机理可知，两个紧固的组合件之间产生往复而微小的相对位移时会引起摩擦。其结果将使零件接触表面氧化膜发生破裂，导致微凸体产生塑性变形和重复出现微焊和断裂，从而引起金属的转移和摩擦热的产生，使一部分金属粒子氧化生成黑色 Al_2O_3 产物。 Al_2O_3 硬度高于基体，形成磨粒磨损，尤其是不锈钢垫圈形成喇叭形后，与铝合金叶片轴颈更容易产生微动磨损。因此导致磨损区内形成点蚀坑和微疲劳裂纹，在磨损和接触应力的周期作用下，导致微裂纹的逐渐扩展，最后导致轴颈处的折断（图 1-14 和图 1-15），断口上呈现出明显的疲劳条带形貌（图 1-16）。

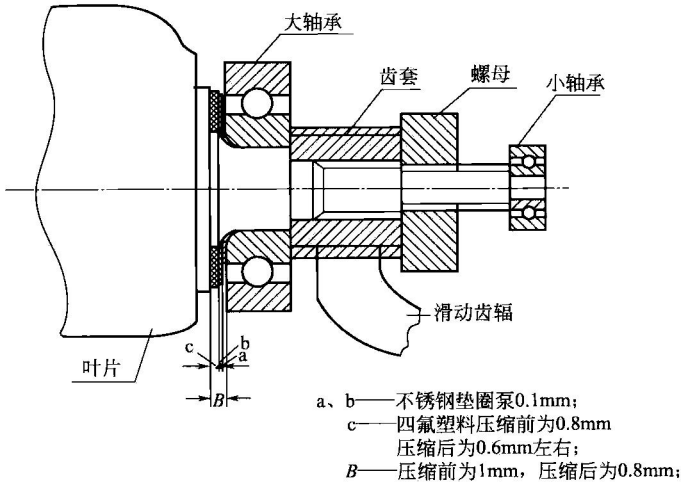


图 1-12 叶片断裂部位的组装示意图

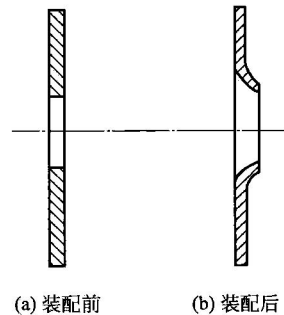
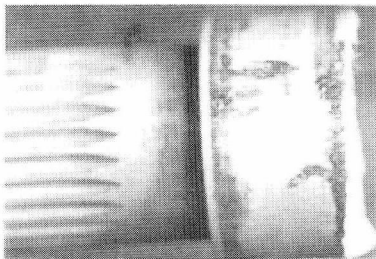
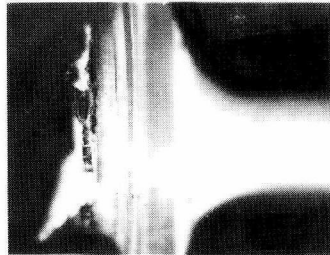


图 1-13 不锈钢垫圈装配前后的形状



(a) 轴承部位的损伤和黑色附着物



(b) 经清洗后可见折断处的撕裂片残存

图 1-14 轴颈折断部位的外貌 4×

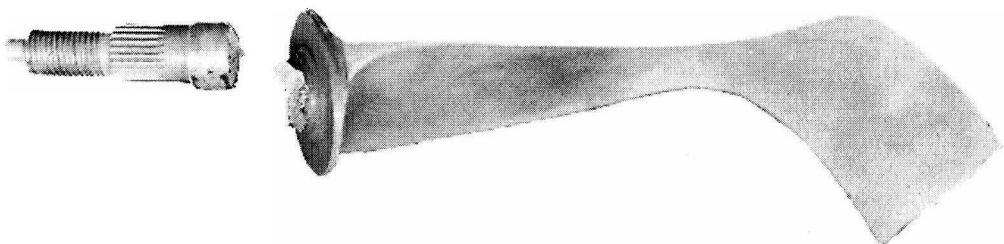


图 1-15 折断叶片全貌（尾部因折断后飞出撞弯）

对叶片设计结构进行改进，将三个垫片改成钢质内圆环和四氟塑料为外圆环组成的垫片（图 1-17），依靠叶片端面台阶定位，消除了轴颈的干涉，使轴承内圈和叶片端面之间紧密接触，从而消除了轴颈端面和轴承内圈之间微隙和偏摆，消除了轴颈处的微动磨损和折断现象。



图 1-16 扩展区的疲劳条带

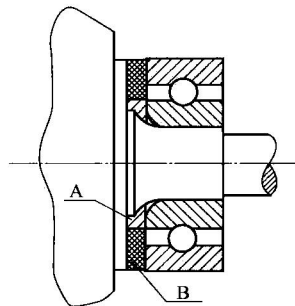


图 1-17 垫圈改进后的示意图
A—不锈钢垫圈；B—四氟塑料垫圈

1.1.3 设计硬度要求不合理

1.1.3.1 硬度过高

对耐磨件片面地追求高硬度来提高耐磨性，而忽略了材料的综合性能往往导致严重后果。

例如，航空液压泵输出轴的材料为 GCr15SiMn 钢，设计要求硬度为 60~65HRC，实测硬度为 62~63HRC，在装配和使用中多次发生折断（图 1-18）。断裂部位处于轴台阶的 R 处，实测 R 为 0.7~0.8mm（使用后的美国同类产品硬度为 60~60.5HRC、 R 为 0.4mm）。断口呈灰白细瓷状，有明显的快速断裂的三个区域（图 1-19）。取同批生产的三只成品，检测 R 部位的残余应力，结果轴向应力值为 -480MPa。显微组织为隐针状回火马氏体+细小颗粒状碳化物+少量残余奥氏体（图 1-20）。经调整热处理工艺将硬度降低至 59~62HRC，

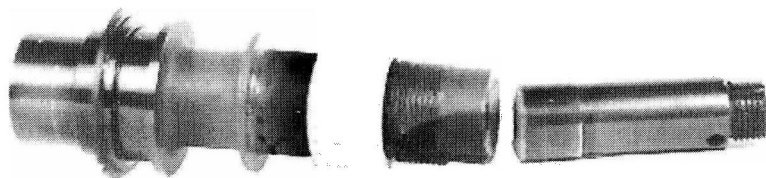


图 1-18 输出轴折断件

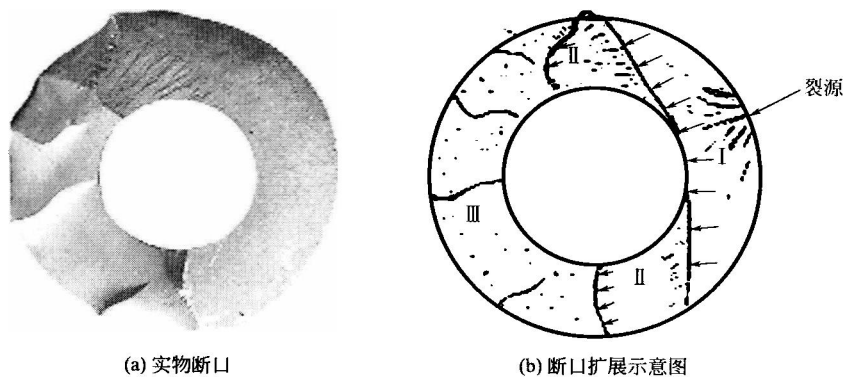


图 1-19 输出轴断口形貌

提高材料韧性后，消除了折断现象。

图 1-21 为液压泵斜盘，由 GCr15SiMn 钢锻造成毛坯，经粗加工后热处理，然后精加工成形，设计要求硬度为 60~66HRC。热处理工艺为 840℃ 盐炉加热，保温 8~12min，油冷淬火，150℃ 低温回火，实测硬度为 64~64.5HRC（美国同类产品硬度为 59~60HRC），显微组织中有较多的针状马氏体（白区）和隐针状马氏体+少量颗粒状碳化物+残余奥氏体（图 1-22）。在使用仅数小时，甚至在磨合试车过程中就发生断裂（图 1-23）。断裂均处于 R 部位，断口均呈瓷状脆性快速断裂特征（图 1-24）。将零件硬度要求改为 59~62HRC，热处理工艺调整为 820~830℃ 盐炉加热，保温 8~12min，油冷淬火，200℃ 低温回火处理后，显微组织为隐针状为主的回火马氏体+较多的颗粒状碳化物+少量残余奥氏体（图 1-25）。不仅增加了材质的韧性，而且由于颗粒状碳化物较多，有良好的耐磨性，大大提高了斜盘的使用寿命，消除了脆性断裂现象。

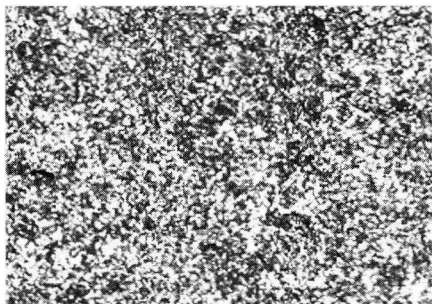


图 1-20 断裂件显微组织

隐针状回火马氏体+细颗粒状碳化物+少量残余奥氏体 500×

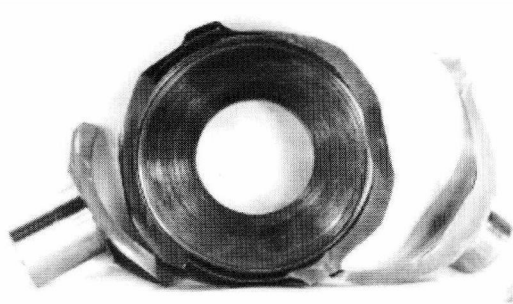


图 1-21 断裂斜盘

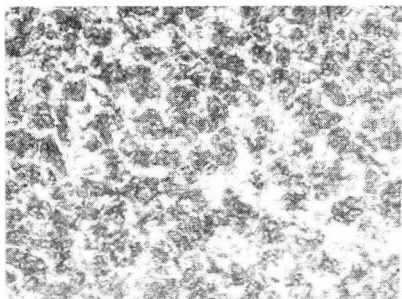


图 1-22 断裂件显微组织 500×

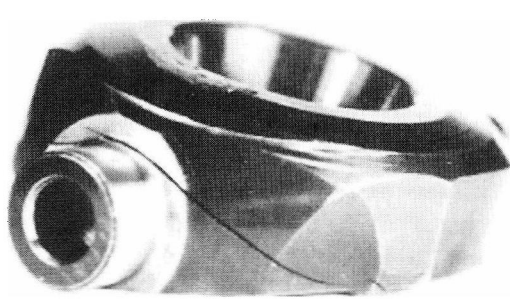


图 1-23 磨合试车时断裂斜盘

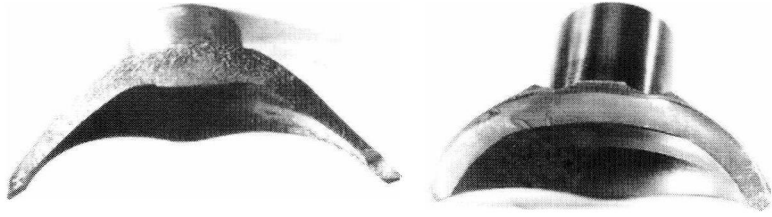


图 1-24 两只断裂斜盘的不同形态

1. 1. 3. 2 硬度偏低

对受力较小的零部件忽略了对材质强度的核算，材料选择后，对零件材质状态和硬度不提出明确要求，往往由于零部件硬度和强度过低，导致过载失效。

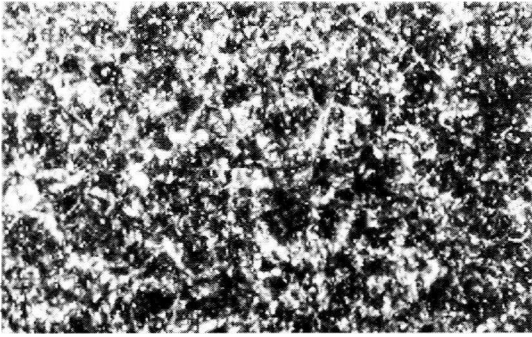


图 1-25 淬回火处理后的组织
隐针状为主的回火马氏体+少量
针状马氏体+颗粒状碳化物+
少量残余奥氏体 500×

例如，1.5kW 的电动机传动轴，转速为 1425r/min，运行时电动机最大扭力仅为 400N，但在使用仅 10h 左右就连续发生两起传动轴断裂事件。断裂部位均处于粗糙度较差的退刀槽的根部（图 1-26），断口平整，垂直于轴，呈扭转剪切断裂形貌（图 1-27）。对传动轴进行理化检查，其材料为 45 钢（成分为 0.42% C、0.6% Mn、0.3% Si），硬度为 167~172HBS，显微组织为退火状态的片状珠光体+网络状铁素体（图 1-28）。按相关资料，根据硬度换算其剪切强度（ τ_b ）仅为 412~482MPa，由

此可知未充分发挥 45 钢应有的性能潜力。同时，退刀槽部位加工较粗糙，加工痕迹处形成应力集中，在较大的扭转作用下，促进了传动轴的断裂。将传动轴进行调质处理，硬度提高至 30~35HRC 后，消除了断裂的再现。

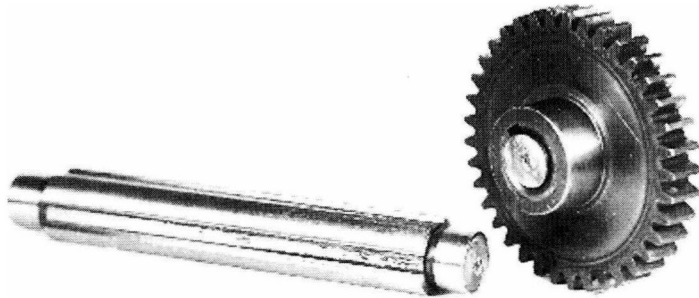


图 1-26 传动轴断裂后实物

立铣传动轴，采用 40 钢未经调质处理，硬度仅为 197~201HBS。在使用过程中，在圈套的扭转力矩的作用下，仅运行 10 余小时就在靠近键槽的退刀槽处发生扭转断裂（图 1-29）。宏观断口出现典型的剪切断裂形貌（图 1-30），显微组织呈现为退火状态下的珠光体+铁素体（图 1-31）。由于硬度过低，抗扭剪切强度不能满足使用应力的要求，导致传动轴的早期断裂。将传动轴进行调质处理，硬度提高至 30~36HRC 后，消除了传动轴在使用中的断裂现象。