

胡世炎等编著

机械失效分析手册

四川科学技术出版社

责任编辑：崔泽海

特约编辑：梁与廷 胡忠安 张敬神

封面设计：曾辉禄

技术设计：金 力

机械失效分析手册

胡世炎 等编著

四川科学技术出版社出版发行

(成都盐道街1号)

新华书店重庆发行所经销

四川科技出版社资中印刷厂印刷

ISBN7-5364-0812-9/TH·26

1989年4月第1版 开本 787×1092毫米 1/16

1989年4月第1次印刷 字数1150千 插页4

印数1—5,650 册 印张40.5

定 价：14.50元

前 言

机械失效分析,是研究机械产品丧失其规定功能的现象、规律、失效分析技术及预防技术的跨学科综合性技术;在工业、农业和国防中具有重要的实用价值。

继“破断故障金相分析”(1979年2月)和“金属断口分析”(1979年7月)出版后,中国机械工程学会机械产品失效分析讨论会及材料学会成立大会于1980年12月在北京召开,会议的主要任务就是进行失效分析的学术讨论;大会收到论文、报告和案例共311篇,通过报告和讨论,大家进一步认识到失效分析的重要性,明确了失效分析的研究方向和任务,并提出了许多有益的建议和措施。

在中国机械工程学会领导下,1983年4月又在杭州召开了第二次机械失效分析学术讨论会。并于1986年8月在北京正式成立了由37个单位53名委员组成的中国机械工程学会失效分析工作委员会。1987年9月又在北京召开了全国机械装备失效分析工作评比交流会。“机械产品失效分析丛书”全套共11册,1986年4月也开始陆续出版……这都标志着机械失效分析技术已在我国得到了迅速的发展,并受到政府、学会和产业各部门的重视,必将为我国机械产品性能和质量,更高速度地达到世界先进水平,进入国际市场发挥越来越大的作用。

“机械失效分析手册”系统地介绍了现代机械失效理论,阐明了机械应力、机械材料强度、机械设计、冷热加工缺陷、装配及使用与机械失效的关系;叙述了各种机械失效形貌特征、性质判断、原因分析及失效抗力提高方法;并对各种机械失效分析技术与设备,典型机械零件失效模式、恶性失效事故实例及复合材料与非金属材料失效特征均作了介绍;同时,对犯罪案件物证分析方法也作了介绍。

“机械失效分析手册”力求做到全面性、系统性、实用性、可查性,强调综合分析,帮助读者正确地进行机械产品失效分析工作,并有效地提出改进措施;为不断提高我国机械产品的可靠性和竞争能力服务;为机械产品不断改进和技术进步服务。

本书经机械失效分析研讨班学员审阅并修改了初稿。成都飞机公司失效分析试验室和金相试验室提供了部分资料。书中部分图片由徐建彭、张绍焰、邓礼芬、马春林、宋金蓉制备;杨远方、张菊英、余桂琴、孙雅玲、张维疆、迟文妍、邵丽、陈景、王福坚、项文艳、赵影等同志为本书编写付出了辛勤劳动。书中引用和参考了许多科研单位、学校及工厂的有关资料和图片,借此机会,谨向在编写过程中给予帮助和支持的单位与个人致以诚挚的谢意。

由于本人学识浅薄,错误之处实在难免。希望有关学者、专家和广大读者批评指正。

编 著 者

1987年10月

内 容 提 要

机械失效分析,是研究机械产品丧失其规定功能的现象、规律、失效分析技术及预防技术,是跨学科综合性技术;在工业、农业和国防中具有重要的实用价值。

机械失效分析的目的在于分析机械失效的原因,找出导致机械失效的责任,并提出改进和预防措施;从而提高机械产品的可靠性和竞争能力。因此,机械失效分析是机械产品生产过程和质量管理中不可缺少的环节和重要手段,受到世界各国企业家和学者的重视。

本书共20章、115万字,全面系统地介绍了现代机械失效分析理论;阐明了机械应力、机械材料强度、机械设计、冷热加工缺陷、装配及使用与机械失效的关系;叙述了各种机械失效形貌特征、性质判断、原因分析及失效抗力提高方法;并对各种机械失效分析技术与设备、典型机械零件失效模式、恶性失效事故实例及复合材料与非金属材料失效特征均作了介绍;同时,对犯罪案件物证分析方法也作了介绍。适合于从事宇航、船舰、交通运输机械、农业机械、矿山机械、冶金机械、轻纺机械、电站设备、石油化工设备、环保设备、工模具制造、锅炉和压力容器……等机械设计、机械制造质量控制和失效分析工程技术人员参考;也可供科研、高等院校及公安机关有关专业科研人员和师生参考。

目 录

第1章 机械失效与失效分析	
§ 1.1 机械失效基本概念	1
1.1.1 机械失效与机械损伤	1
1.1.2 机械失效模式及失效机理	1
1.1.3 机械失效过程与分类	2
§ 1.2 机械失效分析功能	5
1.2.1 机械失效分析及其意义	5
1.2.2 机械失效分析与产品质量	5
1.2.3 机械失效分析与科技进步	6
1.2.4 机械失效分析与经济效益	7
1.2.5 机械失效分析与社会效益	9
§ 1.3 机械失效分析任务	9
1.3.1 机械失效性质判断及原因分析	9
1.3.2 机械失效预防及能力提高	10
§ 1.4 机械失效原因分析方法及程序	11
1.4.1 机械失效原因分析方法	11
1.4.2 机械失效原因分析程序	12
1.4.3 机械失效原因参量分析法	14
§ 1.5 机械失效原因残骸分析法	14
1.5.1 机械失效残骸拼凑分析法	14
1.5.2 机械失效医学诊断分析法	15
1.5.3 机械失效相关性综合分析法	17
§ 1.6 机械失效分析报告与论文	18
1.6.1 机械失效分析报告与分类	18
1.6.2 简单失效分析报告要求及实例	19
1.6.3 详细失效分析报告要求及实例	23
1.6.4 机械失效分析论文要求及实例	29
§ 1.7 机械失效规律研究	39
1.7.1 机械失效规律研究内容	39
1.7.2 机械失效形貌特征研究	40
1.7.3 机械失效机理研究	40
1.7.4 机械失效分析技术研究	40
第2章 机械应力与机械失效	
§ 2.1 机械应力与机械状态	41
2.1.1 机械应力与应力表示方法	41
2.1.2 机械应力状态与失效模式	44
2.1.3 机械接触应力与变形	45
§ 2.2 应力集中与机械失效	48
2.2.1 应力集中与应力集中系数	48
2.2.2 机械零件沟槽结构应力集中系数	50
2.2.3 机械零件台肩圆角应力集中系数	50
2.2.4 机械零件开孔结构应力集中系数	50
2.2.5 应力集中与破断起源的关系	55
2.2.6 降低机械零件应力集中系数的方法	56
§ 2.3 机械零件中的残余应力	57
2.3.1 机械零件残余应力及分类	57
2.3.2 残余应力与机械零件失效	58
2.3.3 机械残余应力的消除和调整	61
第3章 机械材料强度与机械失效	
§ 3.1 机械材料强度与零件强度	64
3.1.1 机械材料失效与机械零件失效	64
3.1.2 机械材料抗失效性能指标	65
§ 3.2 金属材料抗弹性变形失效指标	66
3.2.1 金属材料静载荷下失效四阶段	66
3.2.2 金属材料弹性模量及影响因素	67
3.2.3 金属材料弹性极限及影响因素	68
§ 3.3 金属材料抗塑性变形失效指标	70
3.3.1 金属材料屈服强度及影响因素	70
3.3.2 金属材料硬度及影响因素	73
3.3.3 金属材料形变强化及影响因素	74
3.3.4 延伸率和断面收缩率意义及影响因素	75
§ 3.4 金属材料抗破断失效指标	

.....	76
3.4.1 金属材料断裂抗力及影响因素	76
3.4.2 金属材料实际断裂强度及影响因素	76
3.4.3 金属材料冲击抗力及影响因素	77
§ 3.5 金属材料抗疲劳失效指标	80
3.5.1 金属材料疲劳失效三阶段	80
3.5.2 金属材料疲劳极限及影响因素	81
3.5.3 金属材料 d_a/d_N 及影响因素	84
3.5.4 金属材料 d_a/d_t 及影响因素	86
§ 3.6 金属材料抗环境失效指标	87
3.6.1 金属材料蠕变极限及影响因素	87
3.6.2 金属材料持久强度及影响因素	87
§ 3.7 金属材料抗失效断裂韧性指标	88
3.7.1 金属材料 K_{Ic} 及影响因素	88
3.7.2 金属材料 G_{Ic} 及影响因素	89
3.7.3 金属材料 δ_c 及影响因素	90
3.7.4 金属材料 J_{Ic} 及影响因素	91
3.7.5 金属材料 K_{Isc} 及影响因素	91
§ 3.8 金属材料其它抗失效指标	92
3.8.1 金属材料FATT及影响因素	92
3.8.2 金属材料 q 及影响因素	92
3.8.3 抗蠕变——低周疲劳复合失效指标	94
§ 3.9 金属材料组织与机械失效	96
3.9.1 金属材料纯洁度与机械失效	96
3.9.2 金属材料组织稳定性与机械失效	97
第4章 机械零件设计与机械失效	
§ 4.1 机械零件许用应力与安全系数	98
4.1.1 机械零件许用应力与强度判据	98
4.1.2 机械零件安全系数与强度判据	98
4.1.3 室温静应力下的安全系数与强度判据	99
4.1.4 高温静应力下的安全系数与强度判据	100
4.1.5 变应力下的安全系数与强度判据	101

4.1.6 机械零件可靠设计的安全系数	102
4.1.7 提高机械零件安全度的方法	104

§ 4.2 机械零件设计失误与失效

.....	104
4.2.1 设计载荷判误导致机械失效	104
4.2.2 设计结构不合理导致机械失效	106
4.2.3 设计材料选择不当导致机械失效	107

第5章 金属零件热加工缺陷与失效

§ 5.1 金属零件铸造缺陷与失效

.....	110
5.1.1 金属零件铸造加工方法	110
5.1.2 金属零件铸造加工缺陷	111
5.1.3 铸造缺陷致使机械失效模式及实例	118

§ 5.2 金属零件锻造缺陷与失效

.....	120
5.2.1 金属零件锻造加工方法	120
5.2.2 金属零件锻造加工缺陷	122
5.2.3 锻造缺陷致使机械失效模式及实例	125

§ 5.3 金属零件热处理缺陷与失效

.....	127
5.3.1 金属零件热处理加工方法	127
5.3.2 金属零件热处理加工缺陷	132
5.3.3 热处理缺陷致使机械失效模式及实例	138

§ 5.4 金属零件表面处理缺陷与失效

.....	140
5.4.1 金属材料表面处理加工方法	140
5.4.2 金属零件表面处理加工缺陷	143
5.4.3 表面处理缺陷致使机械失效模式及实例	145

第6章 金属零件冷加工缺陷与失效

§ 6.1 金属零件切削加工缺陷与失效

.....	146
6.1.1 金属零件切削加工方法	146
6.1.2 金属零件切削加工缺陷	147
6.1.3 切削缺陷致使机械失效模式及实例	150

§ 6.2 金属零件磨削加工缺陷与失效

.....	152
-------	-----

6.2.1 金属零件磨削加工方法	152	8.1.2 金属零件超量弹性变形特征	191
6.2.2 金属零件磨削加工缺陷	154	8.1.3 金属零件塑性变形特征	191
6.2.3 磨削缺陷致使机械失效模式及实例	156	8.1.4 金属零件过载压痕损伤形貌特征	194
§ 6.3 金属零件冷作加工缺陷与失效	157	8.1.5 金属零件冲击损伤形貌特征	195
6.3.1 金属零件冷冲拉缺陷与失效	157	8.1.6 金属零件微动损伤形貌特征	195
6.3.2 金属零件冷弯扩缺陷与失效	160	§ 8.2 金属零件腐蚀损伤形貌特征	198
§ 6.4 金属零件电加工缺陷与失效	162	8.2.1 金属零件腐蚀损伤及分类	198
6.4.1 金属零件电火花加工缺陷与失效	162	8.2.2 金属零件化学腐蚀损伤形貌特征	202
6.4.2 金属零件电解加工及缺陷	164	8.2.3 金属零件高温腐蚀形貌特征	205
6.4.3 金属零件线切割加工及缺陷	164	8.2.4 金属零件电化学腐蚀形貌特征	296
第7章 金属零件装配与失效		8.2.5 金属零件大气腐蚀形貌特征	208
§ 7.1 金属零件焊接装配与失效	166	8.2.6 金属零件海水腐蚀形貌特征	209
7.1.1 金属零件焊接装配方法	166	8.2.7 金属零件接触腐蚀形貌特征	210
7.1.2 金属零件焊接装配缺陷	170	8.2.8 金属零件点腐蚀形貌特征	211
7.1.3 焊接缺陷致使机械失效模式及实例	173	8.2.9 金属零件缝隙腐蚀形貌特征	214
§ 7.2 金属零件螺接装配与失效	176	8.2.10 金属零件晶间腐蚀形貌特征	215
7.2.1 金属零件螺接结构及应力状态	176	8.2.11 金属零件剥蚀损伤形貌特征	216
7.2.2 螺接装配致使机械失效模式及实例	180	8.2.12 金属零件气蚀形貌特征	217
7.2.3 提高金属螺栓抗失效性能方法	182	8.2.13 金属零件熔融物腐蚀形貌特征	219
§ 7.3 金属零件铆接装配与失效	183	8.2.14 金属零件摩擦腐蚀形貌特征	220
7.3.1 金属零件铆接装配方法	183	§ 8.3 金属零件其它损伤形貌特征	221
7.3.2 金属铆钉材料及铆接装配缺陷	185	8.3.1 金属零件微生物腐蚀形貌特征	221
7.3.3 金属零件铆接装配失效模式及实例	186	8.3.2 金属零件辐射损伤形貌特征	222
§ 7.4 机械零件装配多余物与失效	188	第9章 金属零件破裂形貌及分析	
7.4.1 机械零件装配多余物	188	§ 9.1 金属裂缝及其鉴别	223
7.4.2 多余物致使机械失效模式及实例	189	9.1.1 金属裂缝基本形貌特征	223
7.4.3 机械零件装配多余物控制方法	189	9.1.2 钢中发纹基本形貌特征	223
第8章 金属零件损伤形貌特征		9.1.3 金属拉痕基本形貌特征	224
§ 8.1 金属零件机械损伤形貌特征	191	9.1.4 金属折迭基本形貌特征	225
8.1.1 金属零件损伤及分类	191	9.1.5 金属胡须组织基本形貌特征	226
		9.1.6 金属裂缝的高温氧化	227
		9.1.7 破断中的次生裂缝	229
		9.1.8 金属零件皱折与皱裂	230
		§ 9.2 金属零件中的表面龟裂	230
		9.2.1 金属零件表面龟裂分类	230
		9.2.2 金属铸件表面龟裂	231
		9.2.3 金属锻件表面龟裂	231
		9.2.4 金属焊件表面龟裂	231
		9.2.5 金属热处理件表面龟裂	232
		9.2.6 金属零件使用中的龟裂	232

§ 9.3 金属铸造裂缝形成及形貌特征	233
9.3.1 金属铸造裂缝分类	233
9.3.2 铸件夹杂裂缝形成及形貌特征	234
9.3.3 铸件收缩裂缝形成及形貌特征	234
9.3.4 铸件热裂缝形成及形貌特征	235
9.3.5 铸件冷裂缝形成及形貌特征	236
§ 9.4 金属锻轧裂缝形成及形貌特征	236
9.4.1 金属零件锻轧裂缝分类	236
9.4.2 金属锻轧扩展裂缝形成及形貌特征	237
9.4.3 金属超温锻轧裂缝形成及形貌特征	237
9.4.4 金属低温锻轧裂缝形成及形貌特征	238
9.4.5 金属锻轧应力裂缝形成及形貌特征	238
9.4.6 金属锻轧后冷裂缝形成及形貌特征	240
9.4.7 金属锻件切边裂缝形成及形貌特征	240
§ 9.5 金属零件焊接裂缝形成及形貌特征	241
9.5.1 金属熔焊裂缝形成及分类	241
9.5.2 金属熔焊结晶裂缝形成及形貌特征	244
9.5.3 金属熔焊液化裂缝形成及形貌特征	247
9.5.4 金属熔焊低塑裂缝形成及形貌特征	249
9.5.5 金属熔焊孔穴裂缝形成及形貌特征	252
9.5.6 金属熔焊再热裂缝形成及形貌特征	253
9.5.7 金属熔焊延迟裂缝形成及形貌特征	255
9.5.8 金属熔焊应力裂缝形成及形貌特征	258
9.5.9 金属熔焊层状撕裂形成及形貌特征	258
9.5.10 金属接触焊裂缝形成及形貌特征	259

§ 9.6 金属零件机加裂缝形成及形貌特征	261
9.6.1 金属零件磨削裂缝形成及形貌特征	261
9.6.2 金属零件冷作裂缝形成及形貌特征	263
§ 9.7 金属零件淬火裂缝形成及形貌特征	264
9.7.1 金属零件淬火裂缝分类	264
9.7.2 金属淬火应力裂缝形成及形貌特征	266
9.7.3 金属超温淬火裂缝形成及形貌特征	270
9.7.4 金属淬火扩展裂缝形成及形貌特征	271
§ 9.8 金属疲劳裂缝形貌特征	273
9.8.1 金属机械疲劳裂缝形貌特征	273
9.8.2 金属接触疲劳裂缝形貌特征	274
9.8.3 金属热疲劳裂缝形貌特征	275
9.8.4 金属腐蚀疲劳裂缝形貌特征	276
§ 9.9 金属环境损伤裂缝形貌特征	276
9.9.1 金属应力腐蚀裂缝形貌特征	276
9.9.2 金属晶间腐蚀裂缝形貌特征	278
9.9.3 金属高温蠕变裂缝形貌特征	279
9.9.4 金属侵蚀致脆裂缝形貌特征	279
9.9.5 氢蚀致脆裂缝形貌特征	280

第10章 金属静载断口形貌特征

§ 10.1 金属解理断口形貌特征	281
10.1.1 金属解理断口宏观形貌特征	281
10.1.2 金属解理断口微观形貌特征	282
10.1.3 金属解理断口源区判别	286
10.1.4 影响金属解理断口形貌因素	287
10.1.5 金属准解理断口形貌特征	288
§ 10.2 金属韧窝断口形貌特征	289
10.2.1 金属韧窝断口宏观形貌特征	289
10.2.2 金属韧窝断口微观形貌特征	289
10.2.3 影响金属韧窝断口形貌因素	292
§ 10.3 金属沿晶脆断口形貌特征	295
10.3.1 金属沿晶脆断口宏观形貌特征	295

10.3.2 金属沿晶脆断口微观形貌特征	296	11.3.3 金属振动疲劳断口形貌特征	337
10.3.3 影响金属沿晶脆断口形貌因素	297	11.3.4 金属接触疲劳断口形貌特征	337
§ 10.4 金属特性断口形貌特征	297	§ 11.4 金属复合疲劳断口形貌特征	338
10.4.1 金属蠕变断口形貌特征	297	11.4.1 金属腐蚀疲劳断口形貌特征	338
10.4.2 金属应力腐蚀断口形貌特征	298	11.4.2 金属热疲劳断口形貌特征	339
10.4.3 金属氢脆断口形貌特征	302	11.4.3 金属晶间疲劳断口形貌特征	340
10.4.4 金属侵蚀致脆断口形貌特征	304	第12章 金属零件损伤失效分析及预防	
10.4.5 三轴向应力致脆断口形貌特征	305	§ 12.1 金属机械损伤失效分析及预防	341
10.4.6 温度过高致脆断口形貌特征	306	12.1.1 金属零件机械损伤失效	341
10.4.7 回火致脆断口形貌特征	307	12.1.2 金属零件弹性变形失效分析及预防	342
§ 10.5 金属质检断口形貌及缺陷	307	12.1.3 金属零件塑性变形失效分析及预防	343
10.5.1 金属材质的断口检验	307	§ 12.2 金属腐蚀损伤失效分析及预防	343
10.5.2 钢材质质检断口形貌及缺陷	307	12.2.1 金属零件腐蚀损伤失效	343
10.5.3 钢材拉伸断口形貌及缺陷	310	12.2.2 金属零件腐蚀损伤失效原因分析	346
第11章 金属疲劳断口形貌特征		12.2.3 腐蚀损伤致使机械失效模式及实例	348
§ 11.1 金属疲劳断口宏观形貌特征	314	§ 12.3 金属疲劳损伤失效分析及预防	348
11.1.1 金属疲劳断口宏观形貌结构	314	12.3.1 金属零件疲劳损伤失效	348
11.1.2 金属疲劳断口宏观形貌基本特征	315	12.3.2 金属零件磨损疲劳失效分析及预防	348
11.1.3 金属疲劳断口宏观源区判别	317	12.3.3 金属零件接触疲劳失效分析及预防	350
11.1.4 金属疲劳断口载荷类型宏观判别	319	12.3.4 金属零件磨蚀疲劳失效分析及预防	353
11.1.5 金属疲劳断口载荷大小宏观判别	322	第13章 金属延性破断失效分析及预防	
§ 11.2 金属疲劳断口微观形貌特征	325	§ 13.1 金属延性破断失效及判别	356
11.2.1 金属疲劳断口微观形貌基本特征	325	13.1.1 金属零件延性破断失效	356
11.2.2 金属延性疲劳条痕形貌特征	327	13.1.2 金属延性裂缝萌生与扩展	356
11.2.3 金属脆性疲劳条痕形貌特征	329	13.1.3 金属延性破断失效性质判别	358
11.2.4 金属疲劳沟线形貌特征	330	§ 13.2 金属延性破断原因及抗力提高	358
11.2.5 金属疲劳轮胎痕形貌特征	330	13.2.1 金属延性破断失效原因分析	358
11.2.6 容易与疲劳条痕混淆的形貌特征	331		
11.2.7 金属疲劳源区微观形貌特征	332		
11.2.8 金属疲劳条痕与应力及寿命关系	332		
§ 11.3 金属机械疲劳断口形貌特征	335		
11.3.1 金属高周疲劳断口形貌特征	335		
11.3.2 金属低周疲劳断口形貌特征	335		

13.2.2 提高金属延性破断失效抗力的方法.....	358
§ 13.3 金属延性破断失效模式及实例.....	359
13.3.1 设计原因致使延性失效模式及实例.....	359
13.3.2 加工原因致使延性失效模式及实例.....	359
13.3.3 使用原因致使延性失效模式及实例.....	360

第14章 金属脆性破断失效分析及预防

§ 14.1 金属穿晶脆破断失效分析及预防.....	362
14.1.1 金属零件穿晶脆性破断失效	362
14.1.2 金属解理裂缝萌生与扩展	362
14.1.3 金属解理破断性质判别	365
14.1.4 金属解理破断原因分析	366
14.1.5 提高金属解理破断失效抗力的方法.....	366
14.1.6 金属解理破断失效模式及实例	367
14.1.7 金属准解理破断失效分析及预防	367
§ 14.2 金属沿晶脆破断失效分析及预防.....	368
14.2.1 金属零件沿晶脆性破断失效	368
14.2.2 金属沿晶脆裂缝萌生与扩展	369
14.2.3 金属沿晶脆破断性质判别.....	369
14.2.4 金属沿晶脆破断原因分析.....	370
14.2.5 提高金属沿晶脆破断失效抗力的方法.....	370
14.2.6 金属沿晶脆破断失效模式及实例	370
§ 14.3 金属特性脆破断失效分析及预防.....	371
14.3.1 金属三轴向应力脆破断分析及预防.....	371
14.3.2 金属回火致脆破断分析及预防	372
14.3.3 金属偏析致脆破断分析及预防	373
14.3.4 金属过热致脆破断分析及预防	373
14.3.5 金属硬化致脆破断分析及预防	374

第15章 金属疲劳破断失效分析及预防

§ 15.1 金属疲劳裂缝萌生特征	375
15.1.1 金属疲劳破断失效及分类	375
15.1.2 金属疲劳裂缝及尺度	375
15.1.3 金属疲劳裂缝萌生模型	376
15.1.4 金属疲劳裂缝萌生部位	377
§ 15.2 金属疲劳裂缝扩展特性	379
15.2.1 金属疲劳裂缝类型及扩展过程	379
15.2.2 门槛值应力强度因子 ΔK_{th}	384
15.2.3 金属疲劳裂缝的闭合效应.....	385
§ 15.3 金属疲劳裂缝扩展模型	386
15.3.1 金属疲劳裂缝扩展Paris模型	386
15.3.2 金属疲劳裂缝扩展位错模型	389
15.3.3 金属疲劳裂缝扩展COD模型	391
15.3.4 金属疲劳裂缝扩展断裂准则模型	391
15.3.5 金属疲劳裂缝扩展低周疲劳模型	392
15.3.6 金属疲劳裂缝扩展能量逸散模型	392
15.3.7 金属疲劳裂缝扩展Scnijve模型	393
15.3.8 金属疲劳裂缝扩展Forman模型	393
§ 15.4 金属零件疲劳破断失效分析	394
15.4.1 金属零件疲劳破断性质判别	394
15.4.2 金属零件疲劳破断原因分析	395
15.4.3 提高金属零件疲劳抗力的方法	397
§ 15.5 金属高周疲劳失效分析及预防	401
15.5.1 金属零件高周疲劳破断失效	401
15.5.2 金属零件高周疲劳失效性质判别	401
15.5.3 金属零件高周疲劳失效模式及实例	401
§ 15.6 金属低周疲劳失效分析及预防	402
15.6.1 金属零件低周疲劳破断失效	402
15.6.2 金属零件低周疲劳失效性质判别	405
15.6.3 金属零件低周疲劳失效原因分析	405

15.6.4 金属零件低周疲劳失效模式及实例.....	406	16.4.2 金属蠕变裂缝的萌生与扩展	424
§ 15.7 金属振动疲劳失效分析及预防	403	16.4.3 金属蠕变破断失效性质判别	428
15.7.1 金属零件振动疲劳破断失效	408	16.4.4 金属蠕变破断失效原因分析	428
15.7.2 金属零件振动疲劳失效模式及实例.....	410	16.4.5 提高金属蠕变破断失效抗力的方法.....	428
第16章 金属零件环境失效分析及预防		16.4.6 金属零件蠕变破断失效模式及实例.....	428
§ 16.1 金属腐蚀疲劳失效分析及预防	411	16.4.7 金属零件蠕变/腐蚀/疲劳失效分析.....	429
16.1.1 金属零件腐蚀疲劳破断失效	411	§ 16.5 金属氢致破断失效分析及预防	430
16.1.2 金属零件腐蚀疲劳失效性质判别	412	16.5.1 金属零件氢脆破断失效	430
16.1.3 金属零件腐蚀疲劳失效原因分析	412	16.5.2 金属氢损伤裂缝萌生与扩展	432
16.1.4 提高金属腐蚀疲劳失效抗力的方法.....	414	16.5.3 金属零件氢致破断失效性质判别	433
16.1.5 金属零件腐蚀疲劳失效模式及实例.....	414	16.5.4 金属零件氢致破断失效原因分析	434
§ 16.2 金属热疲劳失效分析及预防	415	16.5.5 提高金属氢致破断失效抗力的方法.....	434
16.2.1 金属零件热疲劳破断失效	415	16.5.6 金属零件氢致破断失效模式及实例.....	436
16.2.2 金属零件热疲劳失效性质判别	416	§ 16.6 金属应力腐蚀破断失效分析及预防	437
16.2.3 金属零件热疲劳失效原因分析	417	16.6.1 金属零件应力腐蚀破断失效	437
16.2.4 提高金属热疲劳失效抗力的方法	417	16.6.2 金属应力腐蚀裂缝萌生与扩展	440
16.2.5 金属零件热疲劳失效模式及实例	418	16.6.3 金属零件应力腐蚀破断失效性质判别.....	443
§ 16.3 金属高温疲劳失效分析及预防	419	16.6.4 金属零件应力腐蚀破断失效原因分析.....	443
16.3.1 金属零件高温疲劳破断失效	419	16.6.5 提高金属应力腐蚀破断失效抗力的方法.....	447
16.3.2 金属零件高温疲劳失效性质判别	421	16.6.6 金属零件应力腐蚀破断失效模式及实例.....	447
16.3.3 金属零件高温疲劳失效原因分析	421	§ 16.7 金属低温致脆失效分析及预防	448
16.3.4 提高金属高温疲劳失效抗力的方法.....	421	16.7.1 金属零件低温致脆破断失效	448
16.3.5 金属零件高温疲劳失效模式及实例.....	423	16.7.2 金属零件低温致脆失效性质判别	449
§ 16.4 金属蠕变破断失效分析及预防	424	16.7.3 金属零件低温致脆失效原因分析	450
16.4.1 金属蠕变破断失效	424	16.7.4 提高金属低温致脆失效抗力的方法.....	450
		16.7.5 金属零件低温致脆失效模式及实	

例..... 451

§ 16.8 金属侵蚀致脆失效分析及

预防..... 452

16.8.1 金属侵蚀致脆断裂失效 452

16.8.2 金属侵蚀致脆裂纹萌生与扩展 ... 452

16.8.3 金属辐脆断裂失效分析及预防 ... 453

16.8.4 金属焊锡致脆失效分析及预防 ... 454

第17章 典型金属零件失效分析及预防

§ 17.1 金属弹簧失效分析及预防

..... 456

17.1.1 金属弹簧结构及应力状态 456

17.1.2 金属弹簧常用材料及性能 458

17.1.3 金属弹簧加工方法及缺陷 461

17.1.4 金属弹簧失效模式及实例 463

17.1.5 提高金属弹簧抗失效性能方法 ... 465

§ 17.2 金属压力容器失效分析及

预防..... 466

17.2.1 金属压力容器结构及应力状态 ... 466

17.2.2 金属压力容器常用材料及性能 ... 469

17.2.3 金属压力容器失效模式及实例..... 470

§ 17.3 金属热作模具失效分析及

预防..... 471

17.3.1 金属热作模具结构及应力状态 ... 471

17.3.2 金属热作模具常用材料及性能 ... 472

17.3.4 金属热作模具失效模式及实例 ... 473

§ 17.4 金属冷作模具失效分析及

预防..... 474

17.4.1 金属冷作模具结构及应力状态 ... 474

17.4.2 金属冷作模具常用材料及性能 ... 475

17.4.3 金属冷作模具失效模式及实例 ... 475

§ 17.5 金属旋转圆盘失效分析及

预防..... 478

17.5.1 金属旋转圆盘结构及应力状态 ... 478

17.5.2 金属旋转圆盘失效模式及实例 ... 479

§ 17.6 金属滑动轴承失效分析及

预防..... 480

17.6.1 金属滑动轴承结构及应力状态 ... 480

17.6.2 金属滑动轴承常用材料及性能 ... 480

17.6.3 金属滑动轴承加工方法及缺陷 ... 481

17.6.4 金属滑动轴承失效模式及实例 ... 483

17.6.5 提高金属滑动轴承抗失效性能方法

..... 484

§ 17.7 金属滚动轴承失效分析及

预防..... 485

17.7.1 金属滚动轴承结构及应力状态 ... 485

17.7.2 金属滚动轴承常用材料及性能 ... 487

17.7.3 金属滚动轴承加工方法及缺陷 ... 488

17.7.4 金属滚动轴承失效模式及实例

..... 489

17.7.5 提高滚动轴承抗失效性能的方法

..... 490

§ 17.8 金属轴失效分析及预防... 491

17.8.1 金属轴结构及应力状态 491

17.8.2 金属轴失效模式及实例 492

17.8.3 提高金属轴抗失效性能方法..... 494

§ 17.9 金属齿轮失效分析及预防

..... 494

17.9.1 金属齿轮传动的分类及特点 494

17.9.2 金属齿轮常用材料及性能 495

17.9.3 金属齿轮失效模式及实例 497

第18章 非金属零件失效分析及预防

§ 18.1 复合材料零件失效分析及

预防..... 501

18.1.1 复合材料的分类及特征 501

18.1.2 复合材料零件叠层结构受力特征... 503

18.1.3 复合材料零件结构形式 504

18.1.4 复合材料零件制造及缺陷 505

18.1.5 复合材料断口形貌显示及特征 ... 508

18.1.6 复合材料零件失效模式及特征 ... 509

§ 18.2 塑料零件失效分析及预防

..... 512

18.2.1 塑料的分类及特征 512

18.2.2 有机玻璃零件加工及缺陷 513

18.2.3 有机玻璃断口形貌显示及特征 ... 518

18.2.4 有机玻璃零件失效模式及实例 ... 521

§ 18.3 其它非金属零件失效分析

及预防..... 522

18.3.1 橡胶零件失效分析及预防 522

18.3.2 胶接蜂窝结构失效分析及预防 ... 523

18.3.3 复合玻璃零件失效分析及预防 ... 524

第19章 机械失效恶性事故及分析

§ 19.1 钢制桥梁失效恶性事故

失效分析.....	525		551
19.1.1 Kings桥事故及分析.....	525	20.3.1 扫描电镜分析方法及设备.....	551
19.1.2 Point Pleasant桥事故及分析.....	525	20.3.2 扫描电镜的特点和主要用途.....	556
§ 19.2 宇航机械失效恶性事故及失效分析.....	526	20.3.3 微观形貌扫描电镜分析法.....	559
19.2.1 “挑战者”号空中爆炸失效事故及分析.....	526	20.3.4 微区域成分扫描电镜分析法.....	561
19.2.2 飞机空中解体失效事故及分析.....	527	20.3.5 扫描电镜立体分析技术.....	562
19.2.3 “长征二号”导线断裂失效事故及分析.....	529	20.3.6 裂缝尖端张开位移扫描电镜测定.....	563
§ 19.3 电站设备失效恶性事故及分析.....	530	§ 20.4 透射电镜分析技术及设备.....	563
19.3.1 电站设备失效及分析.....	530	20.4.1 透射电镜分析方法及设备.....	563
19.3.2 密云水电站2号机组失效事故及分析.....	533	20.4.2 透射电镜样品制备与观察.....	565
19.3.3 回转圆盘断裂失效事故及分析.....	534	20.4.3 疲劳条痕透射电镜观察与周次计算.....	571
19.3.4 减压阀护套破裂失效事故及分析.....	535	§ 20.5 应力分析技术及设备.....	574
§ 19.4 压力容器失效恶性事故及分析.....	536	20.5.1 应力分析方法及设备.....	574
19.4.1 氨冷凝器爆炸失效事故及分析.....	536	20.5.2 X射线应力分析.....	578
19.4.2 液化石油气贮缸破裂失效事故及分析.....	536	20.5.3 解理断裂应力测定.....	579
19.4.3 储油罐炸裂失效事故及分析.....	536	20.5.4 金属表层三维应力测定.....	580
§ 19.5 铁路轮船失效恶性事故及分析.....	537	§ 20.6 微区成份分析技术及设备.....	582
19.5.1 十里山2号隧道行车失效事故及分析.....	537	20.6.1 微区成份分析方法及设备.....	582
19.5.2 广河轮主机曲轴断裂失效事故及分析.....	538	20.6.2 电子探针X射线微区成份分析.....	584
第20章 机械失效分析技术及设备		20.6.3 俄歇电子能谱微区成份分析.....	585
§ 20.1 宏观形貌分析技术及设备.....	539	20.6.4 离子探针质谱仪微区成份分析.....	586
20.1.1 宏观形貌分析方法及设备.....	539	§ 20.7 无损检测及其它测试技术应用.....	587
20.1.2 最先破断失效件宏观判别.....	541	20.7.1 无损检测技术的应用.....	587
20.1.3 破断失效源区宏观判别.....	542	20.7.2 X射线结构分析技术应用.....	589
§ 20.2 光学显微分析技术及设备.....	544	20.7.3 差热分析技术的应用.....	591
20.2.1 光学显微分析方法及设备.....	544	20.7.4 常规金相机械性能试验方法.....	591
20.2.2 显微形貌光镜直接分析法.....	546	§ 20.8 机械失效再现试验及设备.....	593
20.2.3 显微形貌光镜复型分析法.....	550	20.8.1 机械失效再现试验设计.....	593
20.2.4 次生裂缝形貌光镜观察.....	550	20.8.2 机械失效再现试验数据分析.....	597
§ 20.3 扫描电镜分析技术及设备		§ 20.9 机械失效宏观统计分析方法.....	600
		20.9.1 机械失效的宏观统计分析.....	600
		20.9.2 机械失效宏观规律统计分析法.....	601
		20.9.3 机械失效宏观统计故障树法.....	603
		§ 20.10 机械失效分析计算机技术应用.....	605

20.10.1	机械失效分析过程计算机化	605
20.10.2	机械失效分析案例库	605
20.10.3	机械失效分析辅助诊断系统	606
§ 20.11	失效样品制备与保护	607
20.11.1	失效分析样品机械取样方法	607
20.11.2	失效分析样品复型取样法	608
20.11.3	失效件断口的清洗与处理	610
20.11.4	失效样品的保护	612

20.11.5	失效件宏观摄影及设备	613
---------	------------------	-----

§ 20.12 失效分析技术在侦破中的应用

20.12.1	真空镀膜显示指纹印痕方法	614
20.12.2	微量物证的提取及分析	615
	参考文献	617
	附录	621

第1章 机械失效与失效分析

§ 1.1 机械失效基本概念

1.1.1 机械失效与机械损伤

机械零部件、装置和系统在制造或服役过程中丧失其规定功能不能服役，或不能继续可靠地服役的现象统称为机械失效（或不可接受的故障）。

机械零部件、装置和系统表面或内部在制造或服役过程中，发生有不符合原设计要求的缺陷，但不丧失原设计规定功能仍能服役，或仍能继续可靠地服役的现象称为机械损伤（或可接受的故障）。机械产品在实际制造和使用过程中，机械损伤或缺陷是难免的，也往往是导致机械零件失效的直接原因或成为破断失效源。所以，机械损伤又称机械失效征候或潜在的机械失效。

机械失效也称不可接受的机械故障，美国军用标准M-IL-STD-721B中定义为：失效就是一个产品在预先规定的限度内丧失工作能力。

1.1.2 机械失效模式及失效机理

表1-1 常见的机械失效模式

序号	机械失效模式	备 注
1	变形失效	弹性变形、塑性变形
2	损伤失效	表面损伤、内部损伤
3	破裂失效	铸造裂纹、锻造裂纹……
4	断裂失效	延性断裂、脆性断裂……

机械失效模式就是机械失效的外在表现形式。它相当于医学上的“病症”。它是机械零件失效的物理和（或）化学过程。在此过程中机械零件的尺寸、形状、状态或性能发生变化，并由此导致整个机械产品的失效。

可能出现的机械失效模式列于表 1

—1。

机械失效机理是指引起机械失效的物理、化学变化等内在原因或过程。以人生病为例，失效机理相当于病理，而失效模式则相当于基本的病症。机械失效模式和机械失效机理的关系就是宏观与微观的关系。只有两者相结合，才能由表及里地揭示机械失效的物理本质。提出有效的预防措施。

机械失效机理是揭示机械失效本质原因和机械可靠性服役的基础。

可能出现的机械失效机理列于表 1—2

表1-2

常见的机械失效机理

序号	机械失效机理	相对应的失效模式
1	变形机理	弹性或塑性变形失效
2	磨损机理	磨损失效
3	腐蚀机理	腐蚀失效
4	磨蚀机理	磨蚀+腐蚀失效
5	汽蚀机理	冲蚀或汽蚀失效
6	烧蚀机理	腐蚀+冲蚀失效
7	电蚀机理	电蚀失效
8	热蚀机理	热蚀失效
9	解理断裂机理	脆性断裂失效、脆性疲劳……失效
10	准解理断裂机理	脆性与延性混合断裂失效
11	切变断裂机理	延性断裂失效、脆性疲劳……失效
12	沿晶断裂机理	蠕变失效、脆性、高温应力……失效
13	疲劳断裂机理	疲劳断裂失效……

1.1.3 机械失效过程与分类

机械产品失效是一个由萌生(损伤)、扩展(积累)、破裂、直至断裂的发展过程。不同失效模式其发展过程不同,过程的各个阶段发展速度也不相同。例如,疲劳断裂失效过程一般较长,发展速度较慢;而解理断裂失效则过程很短,速度很快……等等。

机械失效分类的目的在于明确各种机械失效的物理概念,进而分门别类地解决各种类型的机械失效系统工程问题。

机械失效分类有广义的失效分类和狭义的失效分类两种。广义的失效分类按GB3187—82规定和有关资料介绍,列于表1—3。

狭义的机械失效分类主要有按经济法观点分类、按机械产品使用过程分类和按机械失效模式及失效机理分类三种。

根据经济法观点,全部机械失效分析工作的最终归宿于明确失效造成损失的法律责任和经济损失。因此,按经济法观点,机械失效往往分为:

(1)正常损耗失效:属正常失效,应由产品使用者承担责任;但若产品制造者提供的使用说明没有明确的规定,产品制造者也要承担责任。

(2)产品缺陷失效:亦称本质失效,属于产品质量问题,应由产品制造者承担责任。

(3)误用失效:属使用不当造成的失效,应由产品使用者承担责任;但若产品制造者提供的使用说明没有明确的规定,产品制造者也要承担责任。

(4)受累性失效:属他因失效,如水灾、火灾、炸弹爆炸等不可抗拒他因所导致的产品失效。

世界上任何事物都有一个发生、发展和灭亡的过程。对于机械产品的失效发生规律也有早期、中期和末期三个阶段。如果把一台机器从使用到出现故障、排除故障,再使用,再出现故障、再排除……以此下去,把每发生一次故障的时间记录下来就会发现,一般的机械设各在整个使用寿命期内故障发生的规律,可用有名的“寿命特性曲线”(通常称为“浴盆曲线”)作最形象的说明(见图1—1)。即以失效率(λ)—单位时间内发生失效的比率—来描述机械失效的发展过程,那么在不进行预防性维修的情况下,设备、元件的失效率(λ)与其工作

表1-3

广义的失效分类方法

分 类	名 称	定 义	资 料
按 失 效 原 因 分 类	误用失效	不按规定条件使用产品而引起失效	GB 3187—82
	本质失效	产品在规定的条件下使用, 由于产品本身固有的弱点而引起的失效	GB 3187—82
	初次失效	一个产品的失效不是由于另一个产品的失效而直接或间接引起的失效	IEC—217—74
	独立失效	不是由于另一个产品失效而引起的失效	GB 3187—82
	早期失效	产品由于设计制造缺陷而引起的失效	GB 3187—82
	偶然失效	产品由于偶然因素发生的失效	GB 3187—82
按失效的急 速程度分类	突然失效	通过事前测试或监控不能预测到的失效	GB 3187—82
	渐变失效	通过事前测试或监控可以预测到的失效	GB 3187—82
按失效影响 程度分类	部分失效	产品性能超过某种规定的界限, 但没有完全丧失规定功能的失效	GB 3187—82
	完全失效	产品性能超过某种规定的界限, 以致完全丧失规定功能的失效	GB 3187—82
	间歇失效	产品失效后, 不能修复而在限定时间内, 能自行恢复功能的失效	GB 3187—82
按失效影响 程度分类	轻度失效	不致引起复杂产品完成规定功能能力, 降低的产品组成单元的失效	GB 3187—82
	严重失效	可能导致复杂产品完成规定功能能力, 降低产品组成单元的失效	GB 3187—82
	致命失效	可能导致人或物重大损失的失效	GB 3187—82
按失效的突 然性与影响 程度的组合 进行分类	突变失效	突然而完全的失效	GB 3187—82
	退化失效	渐变而部分的失效	GB 3187—82
按功能分类	功能失效 潜在失效	某项目(或含此项目的设备)不能满足规定性能指标的失效 指失效即将发生而可以监别的失效	
按失效责任 分 类	关联失效	在解释试验结果或计算可靠性特征量的数值时必须计入的失效	GB 3187—82
	非关联失效	在解释试验结果或计算可靠性特征量的数值时不应计入的失效	GB 3187—82
	非责任失效	属非关联失效 事先已规定不是该组织机构责任范围内造成的关联失效	MIL—STD —721

(使用)时间(t)之间具有图 1—1 所示的典型失效曲线, 俗称“浴盆曲线”。

按照“浴盆曲线”的形状, 即按照机械失效的过程, 可将机械失效分为三类。

(1) 早期失效

在机械使用初期, 由于设计和制造上的缺陷而诱发的失效。因为使用初期, 容易暴露上述缺陷所导致的失效, 因此早期失效率往往很高, 但随着使用时间的延长, 其失效率则很快下降。机械的早期失效期相当于人的“幼年期”。假若在机械产品出厂前即进行旨在删除这类缺陷的“老练”过程, 即进行可靠性试验, 则

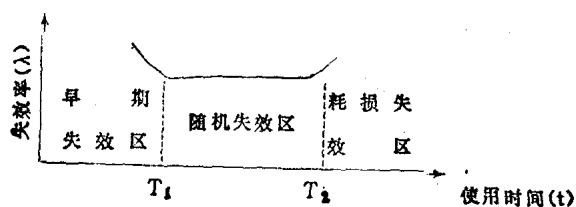


图 1—1 机械失效率浴盆曲线