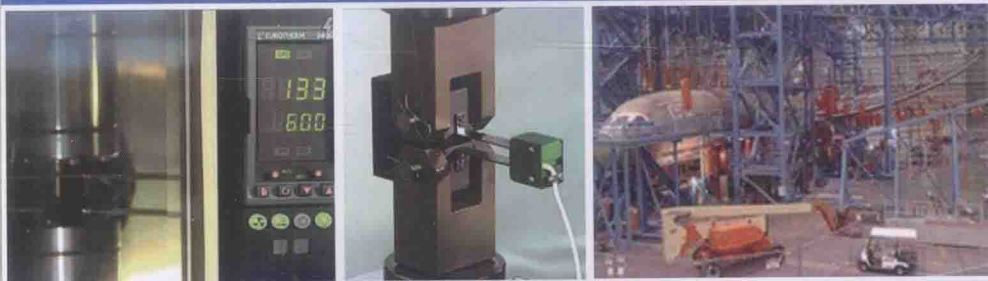




普通高等院校民航
特色专业统编教材

机务专业本科适用



飞机结构 疲劳与断裂

Fatigue and Fracture of Aircraft Structures

© 卿光辉 主编



中国民航出版社

普通高等院校民航特色专业统编教材·机务专业本科适用

飞机结构疲劳与断裂

卿光辉 主编

中国民航出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

飞机结构疲劳与断裂/卿光辉主编. —北京: 中国民航出版社, 2015. 6
ISBN 978-7-5128-0252-0

I. ①飞... II. ①卿... III. ①飞机-构造-疲劳强度-疲劳-分析-高等学校-教材②飞机-构造-断裂-分析-高等学校-教材 IV. ①V22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 127745 号

飞机结构疲劳与断裂

卿光辉 主编

责任编辑 杨玉芹
出 版 中国民航出版社 (010) 64279457
地 址 北京市朝阳区光熙门北里甲 31 号楼 (100028)
排 版 中国民航出版社录排室
印 刷 北京金吉士印刷有限责任公司
发 行 中国民航出版社 (010) 64297307 64290477
开 本 787×1092 1/16
印 张 22.25
字 数 510 千字
版 印 次 2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5128-0252-0

定 价 58.00 元

官方微博: <http://weibo.com/phcaac>

淘宝网: <http://shop106992650.taobao.com>

E-mail: phcaac@sina.com

民航特色专业统编教材编写委员会

主任委员：周来振

副主任委员：任英利 刘金波 刘 锋 胡振江
杨桢梅 佟岱山 张瑞庆 张晓军
李其国 于 剑 陈布科 闫植林
黄永宁 于 再 刘树国 王永亮

委 员：赵洪海 胡 嘉 苏 红 齐 纲
张 森 张 锐 郭 静 王立军
詹建明 韩 雁 何秋钊 耿 杰
史晓强 陆 周 李 梅 王成华

出版前言

当前，我国民航事业呈现快速发展态势，人才需求巨大，人才缺口矛盾突出。为深入实施“科教兴业”和“人才强业”战略，进一步加快民航专业人才培养，提高人才培养质量，努力为推动民航强国建设提供更加强有力的人才保障，在院校教育方面必须十分注重教学基本建设，编写民航统编教材便是其中的一项重要工作。

民航局高度重视统编教材编写工作，自2012年首次推出“空管专业统编教材”以来，其他特色专业教材也得到了系统开发，此次机务专业统编教材的编写出版就是在民航局高度重视下取得的又一成果。

本套教材在编写过程中紧密结合民航机务专业本科和高职人才培养目标的不同要求，在教材编写上各有侧重：机务专业高职教材在编写原则上贯彻以学生为主体的教学思想，理论知识以“必需”和“够用”为度，重点突出实际操作技能；机务专业本科教材在编写原则上是从培养民航高级机务维修和管理人才的目标出发，注重学生理论素养的提升，尽可能吸收民航发展的最新技术和成果。同时，为保证教材的实用性、先进性，并能反映维修过程中的技术水平，本套教材的开发、编写由来自中国民航大学、中国民航飞行学院、中国民航管理干部学院、广州民航职业技术学院、上海民航职业技术学院的机务专业教师与来自中国国际航空股份有限公司、中国东方航空股份有限公司、中国南方航空股份有限公司等企业的专业人员共同完成，使教材内容更具有针对性，更加贴近社会需要和岗位需求标准。

本套教材秉承民航特色专业统编教材的编撰宗旨，在内容、体例、规范等方面更加严谨、务实，编者多是长期从事机务专业教学和研究工作的资深教师及富有飞机维修经验的一线专业人员，书稿中的重要内容均经过行业专家审核把关。该套丛书体现了权威、创新、普适的特点，丰富、更新并完善了近年来机务专业的教材体系，既适合民航大中专院校、社会上各类机务培训机构用作教材，也可作为民航一线维修人员拓展知识、提高实操能力的培训用书。

此次机务专业统编教材的组织编写专业细分性较强，涉及面广，不足之处在所难免，诚恳地欢迎大家在教材使用过程中提出改进意见，使统编教材日臻完善。

中国民航出版社

2015年6月

前 言

本书为适应现代高等院校“专题化”、“综合化”和“实践化”工程教育改革，为民航高等院校飞行器制造工程相关专业编写的教材，也可供从事飞机结构维修和飞机结构设计的工程技术人员参考。

本书内容包括：疲劳破坏断口分析、应力疲劳、疲劳强度及影响因素、飞机疲劳载荷谱、线性累积损伤理论、飞机结构疲劳寿命的估算（名义应力法）、飞机结构疲劳试验、线弹性断裂力学基础、平面应变断裂韧度测定方法和影响因素、应力强度因子的计算与测定方法、复合型断裂判据、平面应力断裂问题、疲劳裂纹扩展规律与寿命计算、应力腐蚀开裂与腐蚀疲劳、细节疲劳额定强度法、现代抗疲劳设计思想等。

本书编写原则：力求结构层次分明，原理表述透彻，概念表述清晰，公式演绎完整，推导步骤详细，图文相结合；每章后的小结包含“知识要点”、“重要术语”和“知识结构图”。每一章均配有一定量的习题，以利于读者更深入地掌握本书的基本内容。另外，本书在很多章节中为读者提供了一些阅读材料，一方面有助于读者了解有关经典理论的历史背景知识；另一方面增强了教材的趣味性。书后附录 A 的目的是方便广大读者随时查阅必要的材料力学知识。附录 B 给出了一些常见模型的应力强度因子公式，以方便应用。本书的部分章节带有“*”标记，为选学内容。

本书重点参考的文献资料包括：《飞机结构疲劳强度与断裂分析》（杜洪增）、《疲劳与断裂》（陈传尧）、《结构疲劳强度》（吴富民）、《断裂与损伤力学》（张行）、《断裂力学》（程斯、赵树山等）、《工程断裂力学基础》（洪启超）、《工程断裂力学》（高庆）、《实用飞机结构工程设计》（牛春匀）、《航空制造工程手册》和《飞机设计手册》等。本书从以上著作中汲取了很多有价值的素材和好的讲法。

本书第 1 章、第 2 章、第 7 章至第 11 章和第 15 章由卿光辉编写，第 3 章至第 6 章由卢翔编写，第 12 章至第 14 章由中国民用航空飞行学院周斌编写，第 16 章、第 17 章及附录由王毅强编写。全书由卿光辉担任主编。

本书初稿承蒙南京航空航天大学魏志毅教授和中国民航大学徐建新教授审阅，并提出了许多宝贵意见。在编写过程中也采纳了中国民航大学航空工程学院飞机系郭巧荣、蔺越国和王轩等老师的许多建议与意见。张小欢和谭斌等研究生参与了部分文字录入和插图的绘制工作。对于所有给予本书帮助的老师和学生以及所有参考资料的作者，在此一并致以诚挚的谢意。特别感谢中国民航出版社的杨玉芹等编辑对本书原稿进行的认真审阅和编辑。

由于编者理论水平有限，书中可能存在一些缺点和不足之处，欢迎广大读者和专家批评指正。

卿光辉

2015年3月于天津

目 录

出版前言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 疲劳断裂破坏的严重性	1
1.2 疲劳力学与断裂力学	5
小结	8
习题	9
第 2 章 疲劳破坏断口分析	10
2.1 交变应力与疲劳破坏	10
2.2 疲劳破坏的断口分析	14
2.3 载荷类型对疲劳断口宏观形貌的影响	20
小结	26
习题	28
第 3 章 应力疲劳、疲劳强度及影响因素	29
3.1 交变应力的性质、特征及其分类	29
3.2 金属材料的 $S-N$ 曲线和疲劳极限	32
3.3 不同特征值下的疲劳强度	36
3.4 影响疲劳强度的因素	40
3.5 复合应力状态下的疲劳强度	52
小结	54
习题	57
第 4 章 飞机疲劳载荷谱简介	58
4.1 飞机疲劳载荷谱及其分类	58

4.2	飞机疲劳载荷谱的编制	67
小结		70
习题		71
第5章	线性累积损伤理论、随机载荷谱与循环计数法	72
5.1	线性累积损伤理论及其应用	72
5.2	相对线性累积损伤理论及其应用	78
5.3	随机载荷谱与循环计数法	80
小结		86
习题		87
第6章	飞机结构疲劳寿命的估算（名义应力法）	89
6.1	结构疲劳寿命估算	89
6.2	综合实例分析	95
小结		108
习题		109
第7章	飞机结构疲劳试验	110
7.1	疲劳试验的分类	110
7.2	疲劳试验载荷	112
7.3	全尺寸结构疲劳试验	115
7.4	典型大型客机的全尺寸疲劳试验简介	120
7.5	疲劳寿命分散系数	125
小结		127
习题		128
第8章	线弹性断裂力学基础	129
8.1	线弹性断裂理论	129
8.2	Griffith 脆性断裂理论	132
8.3	裂纹尖端附近的应力场和位移场	139
8.4	小范围屈服时线弹性断裂力学的应用	145
8.5	应力强度因子断裂判据	151
8.6	能量释放率与应力强度因子之间的关系	155
小结		159
习题		161

第 9 章 平面应变断裂韧度测定方法和影响因素 *	164
9.1 测定 K_{Ic} 的标准方法	164
9.2 影响材料断裂韧度的主要因素	174
小结	175
习题	176
第 10 章 应力强度因子的计算与测定方法	177
10.1 叠加原理及应用	177
10.2 权函数法	185
10.3 组合法	189
10.4 确定应力强度因子的实测法	193
小结	197
习题	198
第 11 章 复合型断裂判据	200
11.1 最大周向拉应力理论	201
11.2 最大能量释放率理论	206
11.3 应变能密度因子理论	207
11.4 复合型裂纹的工程断裂判据	212
小结	214
习题	215
第 12 章 平面应力断裂问题	217
12.1 平面应力断裂问题的特性	217
12.2 薄板的 R 曲线	220
12.3 飞机机身加筋板的断裂分析	224
小结	230
习题	231
第 13 章 弹塑性断裂力学基础 *	232
13.1 J 积分的定义及其守恒性	232
13.2 J 积分判据及其有效性分析	236
13.3 COD 理论	239
13.4 J 积分与 COD 理论的关系	250
小结	251
习题	252

第 14 章 疲劳裂纹扩展规律与寿命计算	254
14.1 疲劳裂纹亚临界扩展规律	254
14.2 影响疲劳裂纹扩展的因素	256
14.3 疲劳裂纹扩展寿命计算	261
小结	268
习题	269
第 15 章 应力腐蚀开裂与腐蚀疲劳	270
15.1 应力腐蚀开裂过程与临界应力强度因子	270
15.2 应力腐蚀裂纹扩展速率及寿命计算	272
15.3 应力腐蚀的三要素、方向敏感性和影响因素	274
15.4 应力腐蚀裂纹特征	277
15.5 腐蚀疲劳	282
小结	287
习题	288
第 16 章 细节疲劳额定强度法 (DFR 法) *	289
16.1 细节疲劳额定强度的概念	289
16.2 DFR 的截止值与光滑试件的 DFR 值	295
16.3 疲劳安全寿命的计算	298
16.4 确定飞机的疲劳裕度	301
小结	306
习题	307
第 17 章 抗疲劳设计思想	308
17.1 安全寿命设计思想	308
17.2 破损安全与损伤容限设计思想	310
17.3 耐久性设计	320
17.4 耐久性设计和损伤容限设计之间的联系与区别	321
小结	322
习题	324
附录 A 强度理论概要	325
A.1 第一强度理论	325
A.2 第二强度理论	325
A.3 第三强度理论	326

A. 4 第四强度理论	326
附录 B 常用应力强度因子汇集	328
B. 1 无限大板	328
B. 2 半无限大板	331
B. 3 有限宽板条	332
B. 4 有限大小的板	333
B. 5 一般杆件	335
参考文献	337

第1章 绪论

20世纪50年代前期,世界各国的飞机强度规范中对疲劳强度没有具体要求,也不要求飞机结构进行全尺寸疲劳试验。随着航空事业的不断发展,飞机的性能不断提高,适用寿命延长,新结构、新材料不断出现,飞机结构在使用中破坏与安全可靠之间的矛盾逐渐显露出来。因此,半个多世纪以来,飞机结构的疲劳与断裂问题不断地引起业界的重视。

1.1 疲劳断裂破坏的严重性

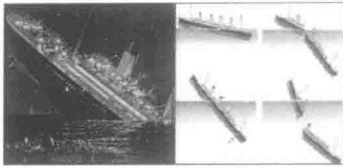
事实上,疲劳与断裂是引起工程结构和构件失效最主要的原因之一。历史上有文字记载的疲劳断裂事件屡见不鲜。以下列举的灾难性事故值得我们回顾和深思。



凡尔赛铁路事故 1842年5月8日,法国民众在国王路易·菲利普一世的凡尔赛官庆典结束后,搭乘返回巴黎的列车。列车行经默东途中,车头轮轴脱落出轨,燃煤翻覆散落,导致后面的车厢在倾覆后发生严重大火。这是法国的第一起铁路事故,也是世界首例铁路大灾难,约有52至200名乘客死亡,其中包括法国著名

探险家J. D. 迪维尔。这起意外也迫使当时的法国政府取消了把乘客锁在车厢内的规定。

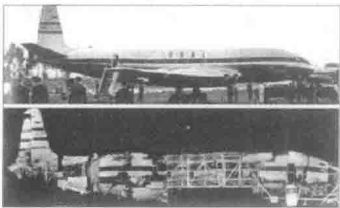
当时金属冶炼的品质较差,对金属疲劳的认识不足,因而导致轮轴脱落,这起事故开启了人们对金属疲劳的系统研究。事故不久后,苏格兰人J. V. 朗肯提出了一套解决轮轴疲劳的方法。1856年至1870年,德国铁路工程师A. 沃勒改进了轮轴测试方式,大大地增加了可用年限。



泰坦尼克号海难 1912年4月12日，由英国白星航运公司建造的泰坦尼克号游轮，从英国南安普敦出发，前往美国纽约，中途撞上冰山最终船体裂成两半后沉入大西洋，船上1500多人丧生。泰坦尼克号海难为和平时期死伤人数最惨重的海难之一。

此后，科学家和造船工程师们对船体残骸分析，由于泰坦尼克号在设计之初，只考虑了增加钢的强度，而忽视了在增加钢材强度的同时会引起材料抗断裂能力的降低，加之泰坦尼克号在海水中浸泡使得材料变脆，更容易折断。

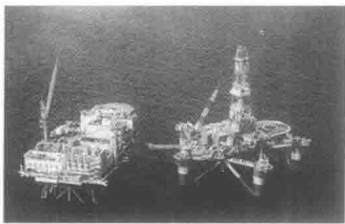
英国政府对事故进行了调查和处理。在英国的倡议下，1913年在伦敦召开了第一次关于海上人命安全的国际会议，讨论了救生设备、无线电通信、冰区附近航行的减速或转向等事项，之后签订了第一个国际海上人命安全公约。



彗星号空难 1954年1月10日，一架英国海外航空公司（BOAC）的“彗星”1型客机（航班编号781号）从意大利罗马起飞飞往目的地英国伦敦。飞机起飞后26分钟，机身在空中解体，坠入地中海。机上所有乘客和机组人员全部遇难。这次事故震惊了全世界，英国成立了专门的调查组调查事故。该型机停飞两个月

后，由英国海外航空公司总裁保证不会出事后时隔不久，另一架彗星客机也发生了同样的空中解体事故，坠毁在意大利那不勒斯附近海中。在一年的时间里，有3架彗星客机在空中解体坠毁。

研究发现“彗星”1型机增压舱的开口处应力值远远高于其他部位，尤其是在有尖角的开口处更为明显。飞机采用的是方形舷窗，使用加压客舱的客机多次起降，在方形舷窗拐角处会出现金属疲劳导致的裂隙。彗星号之后的客机舷窗都采用圆形或设计有很大的圆角，从而减小应力集中，提高金属疲劳强度。



挪威石油钻井平台事故 1980年3月27日傍晚，由于大雨、大风和大雾等原因，200多工作人员下班后都回到 Alexander L. Kielland 号钻井平台上休息。当时风速达40NM/h，浪高12m。18点53分随着最后一个锚索的断开，钻井平台翻了个底朝天。平台上的212人中，死亡123人，这起事故是二战以后挪威海域上最严重的灾难。一年后，事故调查报告给出了结论，平台的

倾覆是由于与断裂的那根支柱（D支柱）相连的6个撑管中有一个撑管（D-6）上产生了疲劳裂纹。这个撑管上焊接了一个非承载的法兰盘，形成了一条6毫米的角焊缝，焊接该法兰盘是为了安装钻井作业过程中使用的声呐设备。处理欠佳的角焊缝截面降低了疲劳强度。调查还在法兰盘上发现了大量的裂纹和冷裂纹。焊接产生的冷裂纹、法兰盘

产生的应力集中、焊缝成形差，再加上北海区域常见的周期性载荷，这些因素的综合影响最终造成了平台的倾覆。



日航 123 班机空难 1985 年 8 月 12 日，日本航空 123 号班机（波音 747-100SR 型）搭载 509 名乘客及 15 名机组成员，从日本东京的羽田机场，预定飞往大阪伊丹机场。飞机在关东地区群马县御巢鹰山区附近的高天原山（距离东京约 100 公里）坠毁，520 人罹难，包括宝冢剧团著名演员北原遥子、知名歌星坂本九。但有 4 名女性奇迹生还。此次空难是世界上单一一架次死伤人数最多的空难。

1978 年 6 月 2 日，该飞机在大阪的伊丹机场曾损伤到机尾。机尾受损后，波音公司没有妥善修补，正常需要两排铆钉，但维修人员只是将损伤的部分补了一排铆钉，所以增加了接合点附近金属蒙皮所承受的剪力，使该处累积了金属疲劳的现象。

日航的几位高级主管及基层职员，因为班机维修不当导致坠毁，而羞愧自杀，但他们与事故没有关联。波音公司的一位工程师，也因背负维修不当的罪名而自杀。



阿罗哈航空空难 1988 年 4 月 28 日，阿罗哈航空 243 号班机（波音 737-200 型），又称夏威夷航空 243 号班机，在飞行途中发生爆炸性失压的事故，头等舱部位的上半部外壳几乎完全破损，机头与机身随时有分离解体的危险，但 10 多分钟后奇迹般地在茂宜岛的卡富鲁伊机场安全迫降。在此事件中，一名机组人员不幸被吸

出机舱外死亡，而其余 65 名机组人员和乘客则分别受到轻重伤。

该事件发生后，美国国家交通安全运输委员会（NTSB）展开全面调查。最后作出总结，事故是由裂缝氧化导致金属疲劳引起的（飞机经常在带盐水的空气环境下操作）。最根本的原因在于黏合铝片的铝片黏合剂失去效用。当黏合剂失去效用时，水分就能进入机体空隙，继而开始氧化。因为氧化的部分体积比下层的金属大，两片金属片被迫分离，令该处的铆钉承受额外的压力。同时机龄也是导致此事件发生的关键因素，当时客机已使用了 19 年，同时已经做了 89090 次的飞行，超过了设计时预计的 75000 次飞行。



以色列航空空难 1992 年 10 月 4 日，以色列航空 1862 号班机（机型为波音 747-258F）发生空难。此航班由美国纽约前往以色列特拉维夫，中途停在荷兰阿姆斯特丹加油和装货。在荷兰史基浦机场起飞不久坠毁于

阿姆斯特丹庇基莫米尔的一个住宅区，导致机上 4 人及地面 39 人，总计 43 人死亡，多人受伤。

经过努力的调查，调查小组认定导致 3 号引擎脱落的主要原因是引擎两个关键的保险栓（把引擎固定在机翼上的金属的东西）之一发生了金属疲劳断裂，因而导致发动机脱落引发了这次空难。



台湾华航空难（又称“澎湖空难”）2002 年 5 月 25 日，我国台湾华航的一架波音 747-200 型、编号 B-18255 的客机，搭载 206 名乘客及 19 名机组成员，在途中于澎湖县马公市东北方 23 海里的 34900 英尺（约 10640 米）高空处解体成四块坠毁，造成机上人员全数罹难，该空难为发生在台湾境内死伤最惨重的空难。

“飞安会”的调查发现，大部分的疲劳裂纹生长的起源点为 1980 年 2 月 7 日该机在香港发生机尾触地事件造成的刮痕处。该机于 1980 年机尾触地事件后的永久性修理，未割除该机 46 段受损处蒙皮，且修理补片覆盖的区域不足以重建受损部位的强度，不符合波音飞机公司结构修理手册的规范，事故前的维修检查皆未察觉该机于 1980 年结构修理的缺失及补片下的疲劳裂纹。

1984 年，《国际疲劳》杂志（Int. J. Fatigue, Vol. 6, No. 1）发表了国际民航组织（ICAO）撰写的《涉及金属疲劳断裂的重大飞机失事调查》，该报告指出：“80 年代以来，由金属疲劳断裂引起的机毁人亡重大事故，平均每年 100 次。”20 世纪的最后 10 年，尽管安全水平有了进一步提高，但世界民航每年发生重大死亡的飞行事故次数仍在 48~57 次之间。1999 年，发生飞行死亡事故次数为 48 起，事故死亡人数为 730 人。^[1]

20 世纪 80 年代初，美国众议院科技委员会委托美国国家标准局进行了一次关于断裂所造成的损失的大型综合调查。1983 年，在《国际断裂》杂志（Int. J. Fracture, Vol. 23, No. 3, 1983. 译文见《力学进展》，No. 2, 1985）上发表了调查委员会给国会的报告。报告指出，断裂使美国一年损失 1190 亿美元，占 1982 年美国国家总产值的 4%。遭受损失最严重的三个行业是：车辆业（125 亿美元/年），建筑业（100 亿美元/年），航空工业（67 亿美元/年）。值得注意的是，报告还指出，向工程技术人员普及关于疲劳和断裂的基本概念和知识，可减少损失 29%（345 亿美元/年）；应用现有成果，可再减少损失 24%（285 亿美元/年）。因此，向工程技术人员普及关于疲劳和断裂的基本概念和知识，是十分必要的。^[1]

有关数据统计表明，工程实际中所发生的疲劳断裂破坏，占全部力学破坏的 50%~90%。疲劳断裂是机械和结构失效的最常见形式。因此，机械设计与制造领域内的工程技术人员在设计 and 制造过程中必须认真考虑可能的疲劳断裂问题。^[1]

1.2 疲劳力学与断裂力学

一百多年来, 各行业具体疲劳断裂事故不断涌现, 人们为认识和控制疲劳断裂进行了不懈的努力, 在疲劳断裂现象的观察、机理的认识、规律的研究、寿命的预测和抗疲劳断裂设计技术的发展等方面积累了丰富的知识。

1. 疲劳力学简介

有关史料记载, 最早(1829年)进行疲劳试验的人是德国的W. A. 艾伯特。法国的J. V. 彭赛列于1839年首先论述了疲劳问题, 并提出“疲劳”这一术语。继J. V. 彭赛列之后, 1843年, 苏格兰人W. J. 朗肯在他的论文中系统地讨论了疲劳问题。但疲劳研究的奠基人则是德国的A. 沃勒, 沃勒在19世纪50—60年代最早得到表征疲劳性能的S-N曲线并提出疲劳极限的概念。1945年, 美国的M. A. 迈因纳提出了线性损伤累积理论。1953年, 美国的A. K. 黑德提出了疲劳裂纹扩展理论。

疲劳力学是固体力学中的一个重要分支, 其主要研究内容是: 材料或零构件发生疲劳的机理、累积损伤规律和裂纹扩展规律, 以提高工程结构的抗疲劳性能和准确估计工程结构的疲劳寿命。计算带裂纹零件的剩余寿命的具体应用, 则形成了损伤容限设计思想。20世纪60年代, 疲劳力学的发展, 促进了可靠性理论开始在结构疲劳强度设计中的应用。

材料发生疲劳破坏, 要经历裂纹起始或萌生、裂纹稳定扩展和裂纹失稳扩展(断裂)三个阶段。这三个阶段都是在交变载荷作用下形成的结果。因此, 疲劳力学最核心的研究内容是材料或构件中裂纹的萌生开始, 然后扩展直至断裂的整个过程。因为裂纹失稳扩展是快速扩展, 对寿命的影响很小, 所以在估算寿命时通常不予考虑。故一般可将总寿命分为裂纹起始(或萌生)寿命与裂纹扩展寿命两部分。进行裂纹起始寿命分析时, 一般按应力-寿命或应变-寿命关系进行分析, 称为传统疲劳; 疲劳裂纹扩展寿命分析则必须考虑裂纹的存在, 需用断裂力学方法研究, 故称为断裂疲劳。

早期设计飞机只从静强度上考虑, 只要通过计算和试验证明飞机结构能承受得住设计载荷(实际使用中所出现的最大载荷乘以安全系数), 就认为飞机结构具有足够的强度。另一方面, 早期设计的飞机, 应力水平不高, 强度储备较大。因此, 飞机结构的疲劳问题并不突出, 疲劳强度问题并没有引起足够的重视。实际上, 飞机结构在使用过程中受到各种冲击载荷和振动的作用, 例如, 飞行过程中非平稳气流作用, 附面层湍流压力脉动或急剧机动飞行产生的各种动载荷, 机动重复载荷, 着陆撞击重复载荷, 地面滑行重复载荷和飞机动力装置产生的振动激励等。所以, 飞机结构在使用过程中不断承受着交变载荷作用, 某些部件常常因这种交变载荷的作用而产生疲劳裂纹、疲劳破坏。