

过程设备失效分析

王志文 关凯书 编著

GUOCHENG SHEBEI
SHIXIAO FENXI



化学工业出版社

过程设备失效分析

GUOCHENG SHEBEI
SHIXIAO FENXI

王志文 关凯书 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要阐述了流程工业中过程设备的失效与失效分析问题,内容包括过程设备失效的基本概念与基本理论,较深入的过程设备失效分析案例。分述韧性失效、脆性断裂失效、疲劳失效、腐蚀失效、蠕变失效等常规失效问题,论述了承压设备的密封接头泄漏失效、各种氢损伤失效、高温下钢材的各种损伤和失效、薄壳结构的各种失稳屈曲失效。本书的特点是不仅从材料角度阐述失效问题,还从结构角度、载荷与应力角度、环境与介质角度、使用管理角度等全方位地阐述了工程结构的失效问题,并配有相当深度的案例来进行过程设备失效分析。

本书可作为过程装备与控制工程专业、安全工程专业的本科生及研究生的选修课程教材或参考书,也可作为设备管理、安全管理、特种设备安全监察及检验检测技术人员、压力容器设计人员在进行压力容器失效风险评估时作参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

过程设备失效分析/王志文,关凯书编著. —北京:化学工业出版社, 2016.12

ISBN 978-7-122-28294-1

I. ①过… II. ①王…②关… III. ①化工过程-化工设备-失效分析 IV. ①TQ051

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 249676 号

责任编辑:程树珍

装帧设计:韩 飞

责任校对:王素芹

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 装:中煤(北京)印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 32³/₄ 字数 836 千字 2017 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: 268.00 元

版权所有 违者必究

过程设备是流程工业中的核心设备。过程设备运行时内部所进行的工艺过程可能是传热过程、传质过程、反应过程或流体输送过程，其共同特点均是在密闭系统中进行，需要采用容器类设备，并用管道相连通，同时具有压力、温度条件、且有化学介质。系统内的压力有的是常压、低压或是中压、高压、超高压，也有负压，或真空、高真空。温度可能各异，低温或超低温、常温、中温、高温（上不封顶）。而内部（或外部）介质也千变万化，可能具有各异的毒性、腐蚀性、渗透性，或不同的气、液、固相态。过程设备在各种不同工况条件下运行的过程发生失效，其表现的形态各色各样，但又具有一些相似的特点，不仅仅是单纯的过度变形或断裂，爆炸或泄漏也会出现。

失效学是伴随机械工程和各行业的机械装备的发展而诞生、发展和成熟的。失效学可以帮助弄清楚机械故障或事故发生的原因，饱含科学与技术。失效学反过来又促进各项技术的发展和革新。工程设备最早最典型的失效与事故是动力工业中的锅炉压力容器爆炸、火电厂的锅炉和管道的爆炸，逐而催生了锅炉行业标准及后来的锅炉压力容器的标准（如 ASME 锅炉压力容器标准）。标准促进了行业的技术进步，减少了失效和事故，促进了社会进步，但不等于可永远杜绝失效和事故。同时工业新技术不断发展，新工艺、新材料不断被采用，又会导致新的失效问题出现。这样周而复始、螺旋式进步。

失效学是基于材料科学的进步，清楚了金属和非金属材料的变形与断裂机制，加上各种现代技术、仪器的进步，从而已经形成了完整的失效学。传统的失效学著作中是从材料科学出发，清晰地阐述金属材料的各种类型变形与断裂的机制，如脆断中的解理断裂；塑性变形最终导致微孔聚集型的韧性断裂；在交变载荷作用下由表面材料晶格滑移形成挤出嵌入的疲劳裂纹萌生机制加上后续的疲劳裂纹尖端塑性区张开-闭合滑移扩展机制直至断裂；高温下晶界成为薄弱区时形成蠕变裂纹的蠕变断裂机制；环境导致的金属电化学腐蚀或化学腐蚀导致的金属失效机制，加上宏观断口学及微观/细观断口学形貌分析及断口理化分析的断口学，从而构成了近代的失效学体系。有深厚材料科学基础又兼备丰富工程实践经验的学者专家可以顺理成章的担当起工程失效分析专家，国内外均如此。由这样的专家学者撰写的失效学专著，大部分具备这样的结构：金属晶体结构学简述；脆断、韧性变形与断裂、疲劳裂纹的萌生-扩展-断裂、蠕变空洞的萌生到蠕变断裂等几类断裂问题的金属学机制及各自的断口宏观及

细观或微观形貌；金相与断口图像学；现代断口观测仪器及断口微区化学组分分析检测仪器；失效分析中的逻辑思维及现代系统工程方法等。有的还涉及腐蚀失效的论述。各种版本内容有深有浅，次序有异，基本是由材料科学学者撰写。

近代经济规模的迅速扩张，工业门类增多，产业规模及装置大型化，当今的失效及其导致的事故非但不见减少，而灾难性事故此起彼伏。造成的失效事故损失、伤亡和环境伤害有时达到史无前例的程度。回顾一些重大事故往往是很综合性的，不再是仅由材料单一原因所导致，有时涉及消防、危险化学品管理，有时涉及承压设备的爆炸，既有焊接结构的缺陷，也有危险化学品的燃烧爆炸。这当中既有材料问题，也有结构设计、建造、监理、检验检测或使用管理的问题。失效原因少数是因对常见问题缺少认识，多数是由于各环节的管控不严，极少数是由于低级的无知而酿成大祸。当今的工程失效分析工作有的是相当综合性的，不再是单纯材料专家可以单独完成的，常需要多学科专家共同承担失效分析的任务。

笔者在自身的失效分析工程实践中深深体会到，在一本有限篇幅的失效分析专著中是无法阐明失效分析中方方面面的问题，既有理论又有工程问题，既能深入又综合得十分完美。笔者只能根据自身的专业基础，以及长期从事过程设备的教学、科研及工程实践的积累，撰写一本针对过程设备，特别是压力容器失效这一有限范围的专著。力图涵盖金属材料变形与断裂失效机理、宏观失效形貌及断口形貌等基础知识，又能超越材料失效领域而进入结构失效领域，更具有专业特色。因此本书的爆炸及压力容器爆炸失效分析、承压设备密封接头的泄漏失效、焊接结构的断裂失效、高温设备蠕变断裂失效及材料高温下组织与性能退化失效、特殊环境服役条件下钢材的各种氢损伤失效的腐蚀失效，还有承受压应力条件下的失稳和屈曲失效。这些结构失效的集中论述将成为本专著的特色。结构失效既有材料因素可能包涵其内，并无新的材料失效机理，更有结构失效的多种因素，如结构因素、应力分析及强度设计因素、应变分析及刚度设计因素，建造过程中的施工因素、监理因素、管理因素、或使用中工况变化因素等等。虽意图如此，但作者受学识和工程知识所限，并不能如愿撰写出能令人满意的著作。

笔者在撰写本书的前几年，曾与徐宏教授、张莉教授合作，在华东理工大学研究生院和华东理工大学出版社的帮助下，于2011年出版了硕士研究生教材《化工设备失效原理与案例分析》。数千本在一年内便告售罄。在该书中仅作了结构失效分析的初步尝试。限于教材的要求，深感意犹未尽，仅初步具有专业特色，并适用颇广。在化学工业出版社长时间鼓励之下，主要作者又做了三年多的时间准备并写作，作了重大改版终于完成了这部新作。本书保留了《化工设备失效原理与案例分析》前几章框架，做了精简、修正、增补之外，新增加了本书第2章的承压设备爆炸问题分析及爆炸能量的计算；第7章的氢损伤失效；第9章的承压设备密封接头泄漏失效与预防；第10章的薄壳结构的屈曲失效与预防。本书的第1章～第5章、第9章、第10章由王志文执笔，

第6章~第8章由关凯书执笔。本书在写作中得到了蔡仁良教授、寿比南教授、徐宏教授、张莉教授、陈进高级工程师及石岩老师的大力支持与帮助。在此深表感谢。由于作者水平的限制，书中诸多问题与不妥，尤其在各章的案例中对失效的工程问题分析也会有不同见解，真诚欢迎诸多专家学者及广大的读者给予批评指正。

希望本书能对失效分析工作者，特别是从事过程设备、承压设备的爆炸失效或泄漏失效的失效分析、或事故鉴定的科技工作者略有收益。本书也可作为过程装备与控制工程专业、安全工程专业的本科生及研究生的选修课教材或参考书，也可为设备管理、安全管理、特种设备安全监察及检验检测技术人员和压力容器设计人员进行压力容器失效风险评估时作参考。

编著者

2016年6月

第 1 章 过程设备失效分析导论	1
1.1 金属材料变形及断裂的机制概述	1
1.1.1 金属材料的变形与断裂机制	1
1.1.2 金属裂纹扩展和断裂的微观途径	6
1.1.3 典型断口的电子显微形貌	7
1.1.4 金属材料断裂类型的分类	13
1.2 过程设备的载荷特点与失效类型分类	14
1.2.1 过程装备的载荷特点	14
1.2.2 过程承压设备失效的特点及失效类型的分类	16
1.3 过程承压设备失效分析工作的内容与方法	19
1.3.1 失效分析工作概述	19
1.3.2 失效现场的处理和调查	19
1.3.3 失效分析中的诊断技术	21
1.3.4 验证性试验	24
1.3.5 计算分析	25
1.4 失效分析中的综合分析	26
1.4.1 确定失效形式	26
1.4.2 确定失效类型	27
1.4.3 确定失效原因	27
1.4.4 确定失效原因中的综合诊断方法	30
1.5 失效分析中常用的仪器	35
1.5.1 光学显微镜 (optical microscope, 简称 OM)	35
1.5.2 透射电子显微镜 (transmission electron microscope, 简称 TEM)	36
1.5.3 扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, 简称 SEM)	36
1.5.4 失效分析中常用的化学成分分析仪器	37

2.1 化学介质的燃烧与爆炸..... 39

2.1.1 化学介质的燃烧与爆炸概述..... 39

2.1.2 爆炸的分类..... 41

2.2 压力容器爆炸问题..... 42

2.3 压力容器超压爆破（物理性爆炸）过程分析..... 45

2.3.1 超压变形和爆破试验的爆破曲线..... 45

2.3.2 压力容器爆破过程分析..... 46

2.3.3 容器屈服压力和爆破压力的理论估算与测量..... 50

2.3.4 容器韧性爆炸断裂的实质..... 53

2.4 压力容器爆炸能量计算..... 54

2.4.1 盛装液体的容器爆炸能量..... 54

2.4.2 盛装压缩气体的容器爆炸能量..... 55

2.4.3 水蒸气的爆炸能量..... 56

2.4.4 盛装液化气与高温饱和水容器的爆炸能量——爆沸能量 56

2.4.5 关于化学爆炸能量计算问题..... 57

2.5 根据现场破坏情况估算爆炸能量的方法..... 58

2.5.1 冲击波概念..... 58

2.5.2 爆炸现场冲击波超压的估算..... 61

2.5.3 现场破坏能量推算..... 62

2.5.4 容器爆炸能量与现场破坏能量之间的关系..... 63

3.1 过程承压设备韧性失效的特征..... 65

3.1.1 承压设备韧性失效的形态特征..... 65

3.1.2 承压设备韧性失效的失效分析..... 67

3.1.3 圆筒形压力容器韧性失效基本规律的讨论..... 71

3.2 承压设备韧性断裂后的断口宏观和细观形貌分析..... 78

3.2.1 韧性断裂断口的宏观特征..... 78

3.2.2 压力容器韧性爆破断口的宏观形貌..... 84

3.2.3 韧性断裂断口的电子显微形貌特征..... 86

3.3 压力容器韧性失效的原因分析..... 93

3.3.1 压力超载——超压..... 93

3.3.2 温度超载——超温..... 94

3.3.3 腐蚀减薄——应力（应变）超载..... 97

3.4	压力容器韧性失效的预防	99
3.4.1	防止超载或防止超装	99
3.4.2	防止超温	99
3.4.3	防止壁厚减薄	101
3.5	案例	101
3.5.1	低压蒸汽管道超压爆炸事故分析	101
3.5.2	年产30万吨氨合成塔开工加热炉炉管爆炸事故分析	108
3.5.3	吉林某禽业“6.3”冷冻设备火灾爆炸事故分析	120
3.5.4	四氢呋喃装置大型列管式固定床反应器超温失效案例简介	132

第4章 过程设备脆性断裂失效及案例

134

4.1	过程承压设备脆断失效的定义及特征	134
4.1.1	化工承压设备脆断失效的定义	134
4.1.2	承压设备脆断失效的特征	134
4.1.3	承压设备脆断失效的类型	135
4.2	因材料脆性而导致的承压设备的脆断	135
4.2.1	因材料原本属于脆性材料而造成的脆断	135
4.2.2	材料因低温发生韧脆转变而脆断	136
4.2.3	焊接热影响区的脆化	138
4.2.4	钢材加工制造过程中的脆化	147
4.2.5	应变时效脆化	148
4.2.6	高温长期运行引起的钢材脆化	149
4.2.7	环境致脆	151
4.3	宏观缺陷引起的低应力脆断	152
4.3.1	低应力脆断的基本概念	152
4.3.2	断裂力学与低应力脆断的关系	154
4.3.3	失效评定曲线(FAC)简介	157
4.4	脆断失效的断口分析	159
4.4.1	低温冷脆型断口的特征	159
4.4.2	长期中高温服役脆化后脆性断裂的断口	160
4.4.3	环境氢脆断口特征	163
4.4.4	低应力脆断的断口特征	163
4.5	脆性断裂的预防	165
4.5.1	确保材料始终有足够的韧性	165
4.5.2	避免和降低结构的应力集中	167
4.5.3	采取必要的工艺措施	167

4.6 案例	169
4.6.1 渣油加氢装置热高分空冷气入口管线水压试验爆管	169
4.6.2 LNG 管道环锻法兰气压试验中脆断爆炸失效分析	179
4.6.3 液氨管线焊缝断裂事故分析	188

第5章 过程设备的疲劳失效分析

199

5.1 交变载荷、应力集中与疲劳失效	199
5.1.1 过程设备交变载荷的特点	199
5.1.2 结构的应力集中	201
5.1.3 疲劳断裂失效的三个阶段	201
5.1.4 疲劳失效的主要特征	203
5.2 过程设备疲劳失效的特点	207
5.2.1 压力容器的低周疲劳失效	207
5.2.2 棘轮效应	210
5.2.3 容易与疲劳断口相混淆的其他断口	211
5.2.4 过程设备的热疲劳失效	213
5.2.5 腐蚀疲劳失效	214
5.2.6 流体激振疲劳失效	219
5.3 疲劳失效的预防	222
5.3.1 抗疲劳失效的设计	222
5.3.2 制造过程和在役检验中应注意的问题	224
5.3.3 疲劳寿命的延寿措施	225
5.4 案例	225
5.4.1 空裸高塔风振焊缝开裂失效分析	225
5.4.2 催化外取热器的热疲劳断裂失效分析	235
5.4.3 制氢转化炉催化剂管热疲劳开裂失效分析	242
5.4.4 液环真空泵叶轮疲劳断裂失效分析	248

第6章 化工设备高温蠕变失效分析及案例

256

6.1 金属高温蠕变现象	256
6.2 高温蠕变机理	258
6.2.1 蠕变变形机理	258
6.2.2 蠕变断裂机理	258
6.3 高温蠕变过程中的微观组织演化	262
6.3.1 铁素体钢的微观组织分解	262

6.3.2	奥氏体不锈钢的析出相	264
6.4	高温蠕变失效	268
6.4.1	宏观特征	268
6.4.2	蠕变失效及断裂的金相和断口特征	271
6.5	短期过热失效	274
6.5.1	宏观特征	274
6.5.2	金相组织特征	276
6.5.3	短期过热和长期过热爆管的区分	276
6.6	高温蠕变寿命评估方法	277
6.6.1	高温蠕变试验和持久强度试验	278
6.6.2	蠕变断裂(持久强度)试验及 Larson-Miller 参数法评估	278
6.6.3	Omega 蠕变寿命评估方法	279
6.6.4	小冲杆测试方法评估材料持久寿命	284
6.6.5	蠕变空洞模型法	286
6.7	案例	288
6.7.1	某热电厂锅炉高温过热器管多次爆管失效分析	288
6.7.2	乙烯裂解炉局部过热原因分析	291
6.7.3	锅炉过热器高温蠕变失效案例	295

第7章 化工设备腐蚀失效及案例

308

7.1	腐蚀失效分类	308
7.1.1	按腐蚀机理分类	308
7.1.2	按腐蚀破坏的形式分类	310
7.2	电偶腐蚀	312
7.3	点腐蚀和缝隙腐蚀失效	312
7.3.1	点腐蚀失效	312
7.3.2	缝隙腐蚀失效	313
7.3.3	点腐蚀和缝隙腐蚀宏观形貌	313
7.3.4	奥氏体不锈钢点腐蚀和缝隙腐蚀模式和机理	315
7.3.5	点腐蚀和缝隙腐蚀失效的金相形貌	316
7.3.6	点腐蚀和缝隙腐蚀的影响因素和防止措施	316
7.3.7	抗点腐蚀和缝隙腐蚀能力的表示方法	318
7.4	晶间腐蚀失效	319
7.4.1	奥氏体不锈钢晶间腐蚀机理	319
7.4.2	晶间腐蚀的宏观特征	321
7.4.3	晶间腐蚀的金相特征和检验	321

7.4.4	晶间腐蚀的预防	323
7.5	选择性腐蚀	323
7.5.1	机理	323
7.5.2	脱锌	324
7.5.3	石墨腐蚀	324
7.5.4	选择性腐蚀的特征	325
7.6	冲刷腐蚀失效	325
7.7	流动诱导腐蚀 (FIC)	327
7.8	应力腐蚀开裂失效	328
7.8.1	应力腐蚀破裂的条件与特点	328
7.8.2	应力作用	329
7.8.3	敏感性介质	329
7.8.4	应力腐蚀裂纹宏观形貌特征	329
7.8.5	应力腐蚀开裂的显微形貌	331
7.8.6	奥氏体不锈钢在沿海大气中的应力腐蚀开裂	335
7.8.7	应变强化奥氏体不锈钢在湿 H ₂ S 溶液中的应力腐蚀影响	336
7.8.8	双相不锈钢的应力腐蚀失效	337
7.9	液态金属和固态金属致脆	343
7.9.1	金属致脆基本理论	343
7.9.2	固态金属致脆和液态金属致脆的特征	343
7.9.3	固体金属致脆和液体金属致脆的产生条件	344
7.9.4	铜致脆裂纹	345
7.9.5	锌致裂纹	345
7.9.6	固体和液体金属致脆失效分析方法	348
7.10	案例	348
7.10.1	再沸器管板缝隙腐蚀失效分析	348
7.10.2	冷凝器管束沉积物下点腐蚀失效分析	352
7.10.3	奥氏体不锈钢管道点腐蚀失效分析	355
7.10.4	奥氏体不锈钢螺栓在沿海大气应力腐蚀开裂失效分析	358
7.10.5	高速液体对金属管道冲蚀失效分析	364
7.10.6	奥氏体不锈钢焊接接头铜致脆失效分析	366

第8章 氢损伤导致的各种失效

370

8.1	氢损伤的形式和分类	370
8.1.1	按氢的来源分类	370
8.1.2	按氢对金属脆化的力学效应和可逆性分类	371

8.1.3	按氢与金属相互作用分类	371
8.2	氢与金属的相互作用	372
8.2.1	氢进入金属的方式及氢在金属内的存在形式	372
8.2.2	氢在不同类型金属内的溶解度和扩散速度	373
8.2.3	氢在金属缺陷内的存在形式	375
8.3	氢损伤机理	375
8.3.1	氢压理论	375
8.3.2	氢降低表面能理论	376
8.3.3	氢降低原子键合力理论	376
8.3.4	氢促进局部塑性变形从而促进氢脆断理论	376
8.3.5	氢腐蚀机理	377
8.3.6	氢化物致脆机理	377
8.4	氢损伤失效的模式及特征	379
8.4.1	内氢致开裂	379
8.4.2	氢鼓包失效及特征	382
8.4.3	氢脆失效及特征	384
8.4.4	氢致开裂失效及特征	386
8.4.5	氢腐蚀失效及特征	388
8.5	氢损伤失效的预防	393
8.5.1	关于材料选用中的预防氢损伤失效措施	394
8.5.2	消氢热处理的重要性	397
8.5.3	在役临氢设备氢损伤的监控	397
8.6	案例	398
8.6.1	氢腐蚀引起的管道失效案例	398
8.6.2	螺栓的氢脆断裂案例	402
8.6.3	锅炉水冷壁管氢腐蚀失效案例	404

第9章 承压设备密封接头泄漏失效与预防

407

9.1	密封接头泄漏失效机理和泄漏失效综述	407
9.1.1	密封接头最基本的两类机械结构	407
9.1.2	密封机构的泄漏机理概述	408
9.1.3	密封接头泄漏失效原因的综述	410
9.2	垫片与垫片的失效	411
9.2.1	垫片与垫圈概述	411

9.2.2	垫片的重要力学性能：压缩-回弹性能	418
9.2.3	密封垫片泄漏失效的基本原因和影响因素	420
9.3	法兰接头密封失效分析	421
9.3.1	法兰密封接头的失效模式	421
9.3.2	由法兰导致的泄漏失效	422
9.3.3	由垫片导致的泄漏失效	424
9.3.4	由螺栓导致的泄漏失效	428
9.4	法兰接头泄漏失效的预防	430
9.4.1	法兰必须有严格的质量要求	430
9.4.2	垫片及垫圈的注意事项	431
9.4.3	螺栓选材中必须考虑的问题	433
9.4.4	法兰密封接头螺栓预紧程序化	434
9.4.5	预防法兰密封失效的密封结构改进及 MMC 型垫片	436
9.5	案例	439
9.5.1	氧气管道不锈钢法兰泄漏火灾事故的失效分析	439
9.5.2	金属缠绕垫片外环断裂失效分析	443
9.5.3	压缩机大型气罐出口法兰缠绕垫片泄漏失效分析	450
9.5.4	阀门盖密封接头因螺栓断裂导致泄漏的失效分析	457

第 10 章 薄壳结构的屈曲失效与预防

464

10.1	屈曲失效概述	464
10.2	薄壁圆筒的基本屈曲失效模式及载荷类型	465
10.2.1	圆筒在径向外压作用下的屈曲失效	465
10.2.2	薄壁圆筒轴向压缩失稳后的屈曲失效形式	466
10.2.3	薄壁圆筒纵向弯曲失稳的屈曲失效形式	466
10.2.4	薄壁圆筒承受扭转切应力时的屈曲失效形式	467
10.2.5	薄壁圆筒受集中载荷时的屈曲失效形式	468
10.3	工程中薄壁圆筒的屈曲失效及实例	469
10.3.1	外压容器的失稳屈曲失效及实例	469
10.3.2	大型立式储罐的屈曲失效及实例	471
10.3.3	直立设备的屈曲失效及垮塌实例	473
10.3.4	焦炭塔轴向皱折径向鼓胀失效的分析	478
10.3.5	大型卧式容器的屈曲失效及实例	481
10.3.6	凸形封头的屈曲失效	484
10.3.7	裙式支座的纵向屈曲问题	487

10.4 壳体屈曲失效的影响因素..... 489

10.4.1 结构的刚度因素..... 489

10.4.2 建造质量因素..... 491

10.4.3 运行与管理因素..... 492

10.5 薄壁承压设备压缩屈曲失效的预防..... 493

10.5.1 壳体预防屈曲失效的刚度设计问题..... 493

10.5.2 建造阶段必须提高相关精度的要求..... 500

10.5.3 建立全面的使用管理全过程防屈曲预案..... 500

1.1 金属材料变形及断裂的机制概述

金属材料一般均为晶体的组织结构，与非晶体材料最大区别是有特定的结晶温度，亦即熔点。最常见的金属晶体有体心立方、面心立方和密排立方三种晶胞结构。一般说金属材料最为严重的失效是断裂失效，而受载断裂之前都会经历过较大的变形。人们最早认识金属材料的断裂仅局限于断裂前是否发生过明显的塑性变形，于是将金属材料大体上区分为延性材料和脆性材料两大类，凡断裂前能发生明显塑性变形的材料称为延性材料，而未经塑性变形就会发生断裂的材料称为脆性材料。这一被工业上应用了近 200 年的术语和概念一直沿用至今，但区分两种材料断裂行为变形量明显与否的界限始终定不出来，人们只能根据工业应用的要求来规定材料断后伸长率必须达到多少才是可以保证安全和可以接受。例如用于制造压力容器的钢材断后伸长率必须大于 14% 才允许使用，这已经成为行业共识，但实际近代的压力容器用钢这一指标可以达到的数值会高得多。但低于 14% 则肯定在工程上不能被接受。随着科学与技术的进步，人们对于金属材料断裂问题的认识早就突破了延性（韧性）断裂及脆性断裂两种断裂模式，随着从机理（或称机制）上认识金属断裂机制本质的深入，人们又逐步认识到疲劳机制的断裂失效、蠕变断裂机制的断裂失效，以及各种环境作用下的腐蚀失效。下面针对失效机制作一概要介绍。

1.1.1 金属材料的变形与断裂机制

金属材料在受力后首先会发生弹性变形。弹性变形阶段的变形规律是应力与应变规律符合胡克定律，即线弹性规律。

对于脆性的金属材料（如白口铸铁）当弹性变形并不很大时就会发生断裂。其单向拉伸试验时的应力应变曲线始终保持线性，不出现屈服现象，断裂时的应力可能不低，但应变量很小，宏观上的伸长量也很小，宏观断口与最大主应力相垂直，即断口为正断型的，断口面积与原始截面积相等，即断裂处无颈缩现象。脆性材料断裂的断口其细观上为穿晶型的解理断口或沿晶型呈晶间断口。

对于延性（或称韧性）金属材料，例如低碳钢、低合金钢，铜、钛、铝等有色金属材料，当弹性变形随载荷加大到一定程度后会出现屈服现象，而后随载荷继续增大，则继而发生塑性变形直至断裂。如果说在弹性变形阶段主要是应力导致原子间距离微小变化而导致变形的話，进入塑性变形阶段则主要是受切应力分量作用导致原子间的切变变形，最大切应力存在于与最大主应力呈 45° 方向上，与此方向相适应的晶格原子会发生剪切滑动可导致原子产生位错，位错可在晶格内移动（迁移）、增值。应力增大时还会产生位错积塞，直至发生

晶格内的滑移。所以宏观上的塑性变形，实质上是晶内滑移的结果，而滑移本质上又是晶体内的位错造成的。晶粒的晶界、晶内的第二相粒子的边界、或者晶内夹杂物的边界都可能是位错运动的阻碍，所以位错迁移到这些边界时位移会被迫停止，所以晶界的存在使金属宏观上表现出塑性变形后的强化效应，只有提高外载荷才可使塑性变形继续发生下去。塑性变形再发展下去之后就会达到一种极端状态，即晶内（高温时在晶界上）出现微空洞，相邻空洞相互连接后微观上便形成金属的分离即出现微裂纹，微裂纹再发展就会形成宏观断口，最终全部断裂。

以上的解释就形成了人们对金属材料不同的断裂机理的认识。到目前可以总结出以下若干断裂机理（亦称机制 Mechanism）。

（1）解理断裂机制

晶体材料受载到一定程度时发生沿晶内某一结晶学平面的断裂称为解理（cleavage）断裂。例如铁素体类钢材是体心立方晶体组成的，但到低温下的脆断常常是解理机制的断裂。体心立方晶体的 $\{100\}$ 或 $\{001\}$ 晶面是主解理面， $\{110\}$ 为次解理面（可参见文献 [1] 的图 1-5）。解理断裂的金属构件，在宏观上变形量非常小，因而总是宏观上呈脆性断裂的性状。解理裂纹的微观走向总是穿晶的。

解理断裂后的断口放在电子显微镜中观察其断口细观形貌时总是呈“河流状”花样。因为实际金属材料是多晶体结构，晶内存在位错缺陷或其他类型的晶体缺陷，以及晶体与晶体之间的界面（晶界），并且相邻晶体间结晶相位的差异，因而会形成不同解理面交汇时的解理台阶，所以河流状花样中的河流即代表着台阶，并且在晶界两侧河流的相位会显示出明显改变，所以也能判别出晶界，具体可参见文献 [1] 第 17～第 20 页。

用肉眼无法观察解理断口的河流状花样，但这种断口新鲜时肉眼可见的是有闪光的“结晶状”宏观形貌，是因不同相位的微小解理面而反射光线造成的视觉感受。解理断裂时的变形量极为有限，所以总是对应脆性断裂的。出现这种结晶状宏观断口时一般总与脆断相关联。

高强度低塑性钢材在低温下发生低温冷脆转变之后特别容易出现解理脆断，对承压设备来说将导致很大安全危害。但一些高韧性的奥氏体不锈钢因介质环境影响产生应力腐蚀开裂时，例如在 Cl^- 环境中 18-8 型的不锈钢母材也会产生穿晶的解理型应力腐蚀断裂（SCC），但这与低温冷脆毫不相干，科学上尚无确切的解释。

（2）微孔聚积型断裂机制

塑性与韧性优良的金属材料承受拉伸应力进入屈服并达到相当量的截面颈缩之后，材料内部的滑移变形加剧，到局部地方出现微空洞，意味着逐步进入了断裂阶段。随着拉伸变形的增大，此时载荷已无法增大，材料内部的空洞继续增多和变大，颈缩部位截面上将发生空洞的合并，断裂面积增大，直至截面完全断开。这一过程简称为“微孔聚积”。因此韧性断裂的机制就是微孔聚积。相伴这一拉伸过程所产生宏观变形量是十分明显的，像拉伸试棒这样的单向拉伸受力的构件，最初的微空洞产生于试棒的中心区域，然后向四周扩展直至边缘完全断开，最后边缘区由于变形约束越来越小，在切应力分量作用下形成了约 45° 方向的剪切断口。所以试棒拉伸断裂时的宏观断口形貌是中心区为正断型的“纤维状”断口，断面四周边缘区为倾斜的“剪切唇”，这一断裂过程可参见文献 [1] 的图 1-14～图 1-16。

韧断的断裂机制是微孔聚集，但对于晶粒断裂的微观途径而言也是穿晶的。与解理断裂的穿晶断裂相比，这两种微观机制不同的断裂形态上的最大区别是宏观变形量相差巨大，韧断的断后伸长率比脆断的大数个数量级。