

破断故障金相分析

国防工业出版社

破断故障金相分析

胡世炎 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书主要根据工厂实践，系统地介绍了金属零件制造、使用过程中所发生的裂缝、断裂故障原因的金相分析方法；各种裂缝、断裂故障的形成机理、形态特征及影响因素。此外，对疲劳断口的定量金相分析及其它测试技术的应用也作了简单的介绍。

本书可供工厂金相试验室和从事金属零件设计、生产、质量检验的工人、工程技术人员及大专院校有关专业师生参考。

破断故障金相分析

胡世炎 编

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

太原印刷厂印装

*

850×1168¹/32 印张10⁷/8 276千字

1979年2月第一版 1979年2月第一次印刷 印数：00,001—23,000册

统一书号：15034·1750 定价1.35元

前 言

人类在生产实践中应用金属及合金材料已经有几千年的历史。通过生产实践，劳动人民为了发展生产、提高产品质量，曾经同金属零件在制造与使用过程中不断发生的破断故障进行了长期复杂的斗争，积累了各种分析金属零件破断性质及原因的实践经验。本书的基本任务是力求以破断故障原因金相分析为依据，将一些分散的实践经验及有关的理论研究成果加以系统化，探明金属零件在制造、使用过程中发生各种破断故障与金属材料冶金质量、制造工艺及使用条件的关系；研究各种原因造成的裂缝、断裂故障形态特征；微观机制与组织结构、性能及应力性质的关系和有关的金相分析技术。为工厂破断故障原因金相分析提供参考。

破断故障金相分析是一门随着现代工业发展起来的新兴学科，现在正处在发展阶段，目前对许多问题尚缺乏一致的看法。本书根据编者近廿年来与同志们一道从事破断故障原因金相分析的实践而编写的。由于水平有限，书中一定会存在不少缺点和谬误，希望大家提出宝贵意见。

在本书编写过程中，承蒙邓日红、郝应麒、欧阳杰等同志审阅了初稿；北京航空学院教师陈昌麒、钟群鹏和75届金相进修班学员协助修改了初稿；并得到峨嵋机械厂有关领导及理化试验室金相热处理组、红山机械研究所有关同志的热情支持和帮助；书中引用和参考了许多工厂、科研单位和学校的有关资料与图片，借此机会，谨向在编写过程中给予帮助的单位和个人致以诚挚的谢意。

1978年1月于北京

目 录

第一章 概述	1
一、破断与破断原因分析	1
1. 破断与破断过程	1
2. 破断原因的综合分析	2
3. 金相分析的任务与方法	3
二、应力与应力集中	3
1. 应力状态与破断形态的关系	3
2. 应力集中与破断起源的关系	6
第二章 分析方法	9
一、试样的制备与保存	9
1. 试样的截取	9
2. 断口的清洗	11
3. 金相磨片的制备	14
4. 试样的保存	16
5. 破断件的宏观摄影	17
二、宏观分析法	19
1. 引言	19
2. 裂缝源区宏观位置的确定	20
3. 断裂源区宏观位置的确定	24
4. 断口表面的宏观分析	27
5. 最初破断件的宏观判断	30
三、光学显微镜分析法	31
1. 直接观察法	31
2. 复型金相法	44
3. 次生裂缝的观察	46
四、电子显微镜的特点及类型	48
1. 电子显微镜的特点	48
2. 电子显微镜的类型	50
五、透射电子显微镜分析方法	57
1. 透射电镜的构造与成像原理	57
2. 试样的制备与观察	61

六、扫描电子显微镜分析法	71
1. 扫描电镜的基本原理与构造	71
2. 扫描电镜的特点和主要用途	79
3. 断口的扫描电镜分析	82
七、其它测试技术的应用	91
1. 无损探伤方法的应用	91
2. X射线结构分析	93
3. 电子探针X射线显微分析	96
4. 离子探针分析	97
第三章 裂缝	101
一、裂缝的形态与分类	101
1. 裂缝的鉴别	101
2. 裂缝的分类	106
二、工艺裂缝	110
1. 铸造裂缝	110
2. 锻造裂缝	115
3. 焊接裂缝	119
4. 热处理裂缝	129
5. 磨削裂缝	139
6. 敏裂与皱折	142
三、使用裂缝	143
1. 引言	143
2. 机械冷应力裂缝	143
第四章 断裂	148
一、断裂与断裂类型	148
1. 断裂与断口	148
2. 断裂形态分类	148
二、延性断裂	151
1. 裂缝的起源与扩展	151
2. 断口的宏观形态	153
3. 断口的微观形态	156
三、解理断裂	162
1. 裂缝的起源与扩展	162
2. 断口的宏观形态	166
3. 断口的微观形态	168
4. 疲劳断裂	174
5. 脆性断裂	178

1. 裂缝的起源与扩展	178
2. 断口的宏观形态	180
3. 断口的微观形态	181
五、崩刃断裂与混合断裂	183
1. 崩刃断裂	183
2. 混合断裂	184
第五章 疲劳	188
一、金属的疲劳	188
1. 疲劳破断	188
2. 疲劳强度	195
二、疲劳裂缝	200
1. 疲劳裂缝的起源	200
2. 疲劳裂缝的扩展	209
3. 疲劳裂缝形态特征	215
三、疲劳断口的宏观分析	220
1. 宏观形态的基本特征	220
2. 疲劳源区的宏观判断	229
3. 载荷类型的宏观判断	233
四、疲劳断口的微观分析	253
1. 微观形态的基本特征	253
2. 延性疲劳条痕	261
3. 脆性疲劳条痕	266
4. 疲劳源区的微观特征	268
五、疲劳性质的综合分析	273
1. 断口形态的综合分析	273
2. 疲劳源性质的综合分析	274
3. 疲劳断口的定量分析	280
第六章 环境破断	291
一、应力腐蚀破断	291
1. 裂缝的起源与扩展	293
2. 裂缝的形态特征	398
3. 断口的形态特征	301
二、氢脆断裂	308
1. 裂缝的起源与扩展	308
2. 氢脆断口的形态特征	311
3. 氢脆断裂与应力腐蚀断裂的区别	312
三、蠕变破断	313

1. 裂缝的起源与扩展	314
2. 裂缝的形态特征	320
四、腐蚀疲劳破断	322
1. 裂缝的起源与扩展	323
2. 裂缝的形态特征	325
3. 断口的形态特征	326
五、热疲劳破断	327
1. 裂缝的起源与扩展	329
2. 热疲劳裂缝及断口的形态特征	332
六、低熔点金属接触破断	336
1. 裂缝的起源与扩展	336
2. 裂缝及断口的形态特征	338
参考资料	340

第一章 概 述

一、破断与破断原因分析

1. 破断与破断过程

金属材料在外力作用下，当作用应力达到一定值时，金属材料的局部或整个截面相邻两部分发生分离的自然现象，统称破断。局部分离称为局部破断，整个截面分离称为完全破断。

在实际中，通常将金属材料的完全破断称为断裂，将金属材料的局部破断称为裂缝或破裂，俗称裂纹。但裂纹属于分开的纹缕，不能充分表达局部破断具有尖锐的尾端和不稳定的特征，因此，严格地说称为裂缝较为恰当。

任何破断都是一个由局部到整体的发展过程。全过程按其特征一般可分为裂缝的起源、裂缝的扩展、最终导致断裂等三个阶段。由于应力性质和大小、合金成分和性能、破断部位的截面形状与尺寸不同，破断过程三个阶段的明显程度在断口面上的表征也不相同。例如高强度结构钢轴形零件的疲劳断裂，其破断过程的三个阶段由宏观断口即可观察到；而静力试验的薄片试样断裂过程三阶段的断口宏观特征就不明显。

因此，根据破断是由三个基本过程组成的特点，也可以说：裂缝是有寿命的破断，属于金属材料（或零件）中的一种可挽救的故障；而断裂则是无寿命的破断，属于金属零件无可挽救的故障。

在实际破断过程中，显微组织的局部差异、应力状态、应力强度因子（ K ）的变化、化学环境或热学环境的变化对裂缝的起源、扩展，以致整个破断过程都有很大影响。例如，两种或多种

组织的存在，可能在同一破断面上引起不同的破断机制和不同的断口形态；又如，同一钢材在延性-脆性转变温度以上产生的破断呈延性断裂，在该温度以下则呈脆性断裂，而在该温度范围内呈混合断裂。

因此，根据破断过程的上述讨论，为了提高金属零件的使用寿命，保证使用安全，就必须首先全面、具体地分析引起破断的确切原因，设法抑制裂缝的起始和扩展。例如，在实际零件制造中，为提高零件的疲劳抗力，一方面用渗碳、氮化、表面淬火、喷丸或辊压等方法，提高零件表面的强度，减少表面的缺陷和改善表面的应力状态（形成残余压应力），阻碍疲劳裂缝在零件表面的起源；另一方面，使零件的中心具有强度和韧性的很好配合，降低疲劳裂缝的扩展速率，从而提高疲劳寿命。

2. 破断原因的综合分析

随着现代工业产品愈来愈复杂，要求愈来愈高，金属零件即使经过精心设计、慎重选材、精确制造，在实际制造与使用过程中，破断的现象仍然不断发生，影响着生产的顺利进行和使用安全，甚至造成灾难性破坏事故。所以，对破断故障原因的准确分析，不仅能及时发现零件在设计、选材和制造上的问题；而且对提高产品质量、保证使用安全，避免灾难性破坏重演和生产顺利进行提供依据。同时，根据破断的启示，对某些有价值的（即经常出现的或具有独特性质的）破断故障进行比较系统的分析研究、反复实践、反复总结，找出内在的规律性，使其更有效地为改进工艺、设计和发展生产服务。例如断裂力学就是人们从大量的破断故障力学分析中，总结和研究出来的新兴力学学科。

实际生产和使用中的情况是复杂的，导致各种破断故障的原因也是多方面的。它往往需要从原材料的化学成分、力学性能、显微结构、表面质量、冶金缺陷；零件的制造工艺、几何形状和使用条件以及破断的宏观与微观特征等多方面进行分析，互相印证，才能较准确地分析出破断的原因。因此，破断故障原因的分

析实际上是一项综合分析过程。破断故障原因的金相分析，则是破断故障原因综合分析的一个重要组成部分。

3. 金相分析的任务与方法

破断故障金相分析，就是直接根据破断的形态特征、零件材料的内部结构及缺陷，判定破断的性质，分析破断故障的原因是否与原材料冶金质量、组织、性能、制造工艺（尤其是热加工工艺）及使用条件直接有关。

破断故障金相分析也须采用综合分析方法进行全面分析与研究，需要低倍观察与高倍观察相结合；宏观分析、光学显微镜分析和电子显微镜分析相结合；同时还要重视破断历史的调查和其它测试技术的应用等。例如，在实际破断故障金相分析中，使用肉眼或低倍率光学仪器可以清楚地观察到疲劳断口的疲劳弧带宏观特征，但是有的用电子显微镜观察就可能观察不到，或仅仅观察到比较模糊的疲劳条痕微观特征。因此，破断故障金相分析不能只采用一种分析手段，否则容易产生错误的判断。对于重大破断故障的金相分析，尚需要通过故障再现专题试验来验证结论正确与否。

同时，在破断故障金相分析中，还需要特别注意零件的应力与应力集中状况，实际破断形态及原因往往与此直接有关。

二、应力与应力集中

1. 应力状态与破断形态的关系

应力状态是指零件实际承受载荷的类型（拉、切应力）、数量、大小和方向。最大拉伸应力（ $\sigma_{\max}$ ）和最大切应力（ $\tau_{\max}$ ）对形变和破断分别起不同的作用。最大切应力促进塑性滑移的发展，是位错移动的推动力，它对形变和破断的发生和发展过程都产生影响；而最大拉伸应力则只促进脆性裂缝的扩展。因此，最大拉应力与最大切应力的比值 $\left(\frac{\sigma_{\max}}{\tau_{\max}}\right)$ 对破断过程有很大影响。各种应力状态下的 $\left(\frac{\sigma_{\max}}{\tau_{\max}}\right)$ 比值列于表 1-1。

表1-1 各种应力状态下的 $\frac{\sigma_{\max}}{\tau_{\max}}$ 比值

应 力 状 态		$\sigma_{\max}$	$\tau_{\max}$	$\frac{\sigma_{\max}}{\tau_{\max}}$
三向压缩	三向应力相等	$-\sigma_1$	0	$-\infty$
	三向应力不等	$-\frac{1}{2}\sigma_1$	$\frac{1}{4}\sigma_1$	-2
单向压缩		0	$\frac{\sigma_1}{2}$	0
扭 转		τ_1	τ_1	1
单向拉伸		σ_1	$\frac{\sigma_1}{2}$	2
三向拉伸	三向应力相等	σ_1	0	∞
	三向应力不等	σ_1	$\frac{1}{4}\sigma_1$	4

由表 1-1 可以看出, 在三向拉伸应力状态下、 $\frac{\sigma_{\max}}{\tau_{\max}}$ 值最大, 所以极易导致脆性断裂。在实际零件中, 纯受三向拉伸应力的情况很少, 大都是由于应力分布不均匀而造成三向应力状态。例如零件中缺口尖端或裂缝尖端局部区域的应力集中引起的应力不均匀分布, 周围区域为了保持变形的一致性, 便对高应力区以约束作用, 即造成三向拉伸应力状态。所以在厚大零件的中心区域为平面应变状态, 容易造成脆性破断。

应力状态对破断形态影响的典型实例, 在螺丝、螺栓等实际滚丝中往往发现。由于滚丝的毛胚杆料直径过大, 或滚丝机调整不当, 造成滚丝时压力过大而引起螺丝、螺栓等轴心部位成空腔式破裂 (图 1-1)。它的形成机制如图 1-2 所示。

材料在滚丝时受到滚丝轮的径向压力 P 和一个扭转力矩 M 。产生的内应力一个是正应力 σ , 另一个是扭转时所产生的剪应力 τ (图 1-2)。图示的径向、轴向、切向三个方向的正应力实际是外

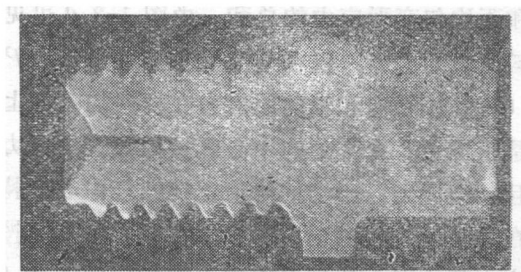


图1-1 螺栓轴心部位因滚丝机调整不当而呈空腔状破裂(纵剖面)

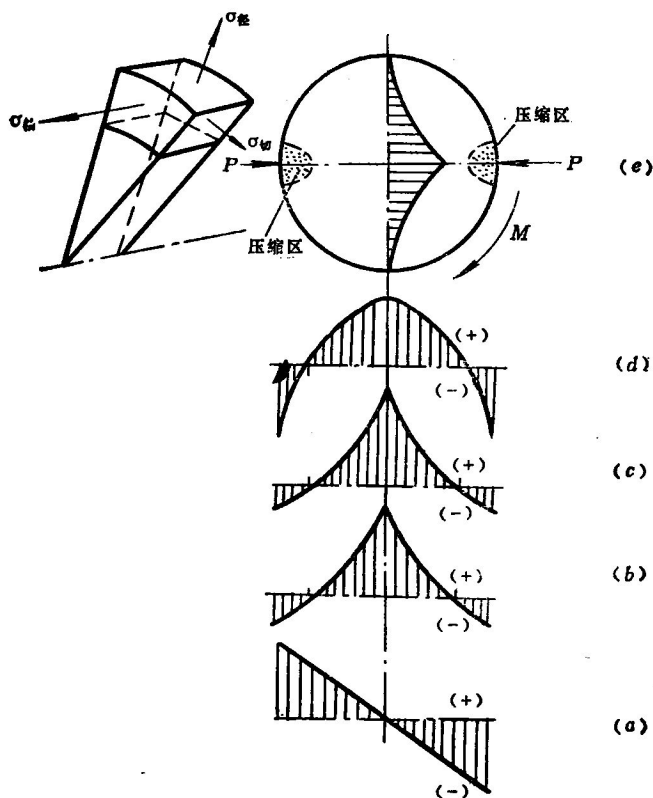


图1-2 螺栓滚丝时形成空腔机制示意图

(a) — 扭矩剪应力 τ ; (b) — 切向正应力 $\sigma_{\text{切}}$; (c) — 轴向正应力 $\sigma_{\text{轴}}$;
(d) — 径向正应力 $\sigma_{\text{径}}$; (e) — 其它径向上的径向正应力 $\sigma_{\text{径}}$ 。

力的应力和不均匀变形应力的总和。由图 1-2 a 可见, 径向正应力 σ 在杆料截面的分布, 仅在与滚丝轮接触受压力 P 的很小区域是压应力 ($-\sigma$), 切向和轴向正应力在杆料的截面上分布也仅在边缘区域是压应力。大部分的中心区域都处于拉应力 ($+\sigma$) 状态下。并且, 拉应力 ($+\sigma$) 的峰值正在螺杆中心。特别是径向正应力, 仅在与滚丝轮接触正应力 P 的直径方向上是按图 1-2 a 分布, 在其它直径方向上的径向正应力则类似图 1-2 d 的分布 (图 1-2 d 是与压应力 P 的方向成 90° 的直径上的径向正应力分布, 即整个杆料截面上的径向正应力大部分都处于拉应力 ($+\sigma$) 状态。当内应力 σ 大到超过螺杆材料强度极限 σ_s 时, 截面中心区域的金属就有可能首先形成裂缝并扩大, 当螺杆继续旋转, 并轮流在各个不同的直径方向上施加压力的情况下, 则形成空腔破裂。

2. 应力集中与破断起源的关系

按照位错观点, 对于延性或半脆性材料来说, 形变和破断两个过程的共同存在和发展的必要条件是使金属发生屈服。当金属发生屈服以后, 大量的位错在其运动过程中, 由于受障碍物作用而堆积起来, 就造成了应力集中。这个集中的应力若被形变过程所松弛, 则破断过程被抑制, 变形得以继续进行而不破断; 反之, 若以裂缝的发生与发展过程来松弛, 则材料即会发生破断。

实际使用过程中, 零件的形状和材料性质急剧改变的地方, 会产生局部的高应力, 其附近的应力状态也不均匀, 这种局部应力高于平均应力的现象就是应力集中。应力集中的程度, 通常以应力集中系数 K 表示 (图 1-3)。

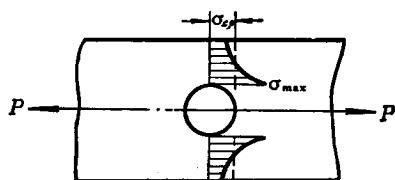


图1-3 应力集中示意图

$$K = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{ep}}$$

式中 $\sigma_{\max}$ ——应力集中处的最大应力；

σ_{ep} ——平均应力（或公称名义应力）。

表 1-2 为具有小半径不同形状切口的各种形状金属试样在弹性范围内的应力集中系数。

表1-2 不同试样的应力集中系数表

形状	应 力 集 中 类 型	载荷类型	应力集中系数 (K)	
			集中特性 t/r_H	
			5	10
板材	细小的单边或双边切口 $r_H \leq 0.1$ 毫米	拉伸和弯曲	5.5	7.5
棒材	细小的环形外部切口或内部小空腔 $r_H \leq 0.1$ 毫米	拉伸	3.5~4.0	4.5~5.0
		弯曲	2.7~2.8	3.5
		扭 外部切口	3.0	4.0
		转 内部空腔	1.6	2.0
管材	内部或外部的细小环形切口 $r_H \leq 0.1$ 毫米	拉伸和弯曲	3.5~4.0	4.5~5.0
		扭转	3.0	4.0

表中： t ——切口深度；

r_H ——切口尖端半径。

由表 1-2 可知，切口深度较切口宽度或零件壁厚小得多，应力的存在就会在切口尾端附近引起局部畸变，且 $\frac{t}{r_H}$ 比值愈大，应力集中系数也愈大。因此，在实际破断故障分析中，就往往发现破断总是起源于零件的应力集中处。例如，淬火零件在凹角、缺口或凸边过渡处，冷却速度小（有人测得凹角部位的淬火冷却

速度仅相当于平面部分的 $\frac{1}{3}$ ），由于应力集中会使这些部位的拉应力大小达到平均值的数倍，而往往在这些部位引起淬火裂缝（图1-4）。

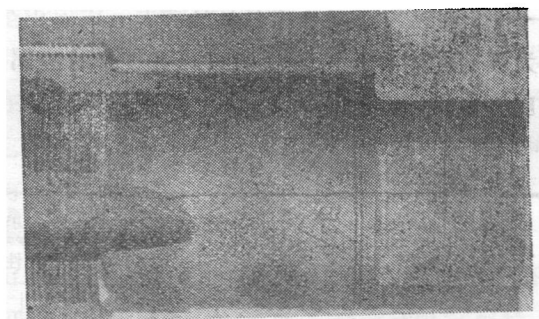


图1-4 W18Cr4V丝攻淬火时因应力集中沿“A”字淬裂

第二章 分析方法

一、试样的制备与保存

1. 试样的截取

为了确切分析各种破断故障的原因，破断试样的制备与保存是整个破断故障分析工作的重要前提。其主要内容有分析试样的截取与制备、断口表面处理与试样保存等。

光学和电子显微镜直接观察零件表面能够提供显微组织特征与形变和破断过程的相互关系的详细情况；由于零件表面只显示破断过程的一个方面，为了揭示其详细内容尚需要截取符合显微镜观察尺寸的样品进一步分析。例如，这些截面也许会交截到一些与裂缝无关的表面裂缝；但也反映了在破断过程中较主裂缝为早的阶段，因此对它们进行分析后，可获得关于裂缝起源和扩展机制有价值的线索；由零件表面起源的裂缝，其破断方式往往随着深度的不同，其破断机制也发生变化；此外对破断处截面试样的观察还可确定内部破断和形变的程度，这也有利于对破断性质的了解。

分析破断试样的截取除选取分析零件及取样部位应具有充分的代表性外（即发现成批破断零件时应分类选择零件取样。取样时应同时分别在不同程度破断处和无破断处取样分析，以资比较），还应选取最好的冷却方法，和最小的切割缝隙进行切割，以便最大限度减少切割时的热影响。例如，高强度合金钢裂缝原因分析时碰到二次淬火马氏体假象，往往就是试样切割时冷却不好的缘故。由于冷却不好，局部区域被切割热加热到奥氏体区域，随后冷却下来即转变为马氏体，不注意时，甚至会得出错误的判