

机械零件是怎样失效的

贵州省图书馆

1978



重庆重型汽车研究所

编辑出版发行

重庆重型汽车研究所
《汽车资料》编译组
(四川重庆4803信箱)

印 刷
出 版 时 间

重 庆 印 制 第 一 厂
1 9 7 8 年 月 日

内 部 资 料

工 本 费： 元

简 介

本文系由Donald J. wulpi根据美国万国收割机公司工程材料研究部所编著的“零件失效分析手册”资料编写的内容丰富的一系列文章，分别登载于美国“金属进展”杂志（1965年9月至1966年9月）上，并于1966年出单行本，最近又经重印。

全文从金属零件失效的基本原理开始，包括载荷的种类，各种不同因素的影响，疲劳特性，表面损坏（磨损和腐蚀）和表面疲劳，轴的弯曲和扭转断裂以及齿轮的断裂和表面损伤。并以汽车拖拉机零件的破坏为例来说明其失效原因，解释和防止方法。对于零件失效分析，保证质量，提高零件可靠性有很大的助益。

虽然本文发表较早，但从今天来说，对我们提高汽车零件的质量还有很大的实用价值，特译出以供参考，译文有不妥之处，希予指正。

目 录

关于这本书 (原序)	(1)
第一章 断裂的型式	(3)
第二章 载荷的类型	(12)
第三章 各种不同因素的影响	(21)
第四章 疲劳断裂的特性	(35)
第五章 表面损伤——磨损和疲劳的影响	(45)
第六章 表面损伤——腐蚀的影响	(59)
第七章 轴的弯曲和拉伸破坏	(67)
第八章 轴的扭转破坏	(76)
第九章 轮齿的断裂	(84)
第十章 齿轮的表面损伤	(92)

关于这本书（原序）

不论它是一辆汽车、一架飞机、一台拖拉机或是一具烤面包器，所有生产的目的都是保证用户对产品感到满意。产品质量不可避免地与用户的满意程度相关连的，而今天的购买者对于他花费一定价值所购机器的可靠性比以往提出了更高的要求。

虽然通过工程技术上的努力可以产生一种可靠性，使产品具备超过其竞争者的优点。但是获得这一效果的一个重要因素，则是要有一种恰当的方法用于分析在工程试验或者产品使用中发生的不可避免的零件失效。

对零件失效历史过程的研究，可提供有价值的背景资料，以适应今后的设计要求，并能提供原材料和制造工艺所存在缺点的线索。在这方面某些厂家提供的零件服役失效的定量数据，为工程师和设计师的技术知识作出了有价值的贡献。

工程技术人员在他们的工作中，经常要去检查轴、梁、齿轮或其他受应力的零件，并提出如何防止这些零件失效的措施，因此就特别强调需要更多更好的零件失效分析报告的发表。

为了满足这种需要，《金属进展》杂志发表了由D. J. Wulpi所写的，讨论“机械零件是怎样失效的”各方面原因的论文集，这些论文是以万国收割机公司的零件失效分析手册为基础。这本手册是该公司工程材料研究部的许多人共同编写的。这组成员之一Wulpi负责编辑这一手册，最初是为了帮助提高万国收割公司产品的可靠性而准备的。

当这些论文发表之后，各方面的需要都很大，因而《金属进展》杂志社决定用单册出版全文。现在本册内的论文以简便的形

式提供给对零件失效的各方面——它的失效原因，解释和防止方法——深感兴趣的人使用。

即使用最精细的程序作投产前的试验，也决不可能模拟出产品在用户手中的全部使用条件。对于提高产品可靠性和用户满意程度来说，送回零件失效情况的有关报告是重要的。我们相信《金属进展》的这本“机械零件是怎样失效的”论文集所提出的建议，将为许多制造厂家有利地运用。

美国《金属进展》杂志总编辑Allen G. Gray

第一章 断裂的型式

正确的断口分析常常能得出有关影响因素的有价值的报告，并有助于消除产生失效的原因。但是，常常由于缺少专门的技术背景资料，或者虽有有价值的意外损坏实例但无确证的证据，因而有时得不到这种所需要的报告。为此我们就以讨论断裂的机理和研究不同的断裂现象开始论述本文。

基本断裂型式

金属零件发生断裂是由于有使某些结晶学平面产生滑移运动的剪切力，或是有引起解理或裂开的拉伸力。在绝大多数断裂中，这两种断裂型式在不同程度上同时并存。由于每一种加载方式所产生的最大拉伸力、压缩力、和剪切力的取向均有其特殊形式，因而对断裂机理的鉴别，往往可以确定断裂开始时的载荷方式。反之，加载方式与断口特征的相互关系的知识，则有助于判定断裂的性质究竟是韧性（剪切）的还是脆性（解理）的。

图1示出特意拉至断裂的两根螺栓，来说明韧性的和脆性的行为。其中之一是软的（Rc15），它以剪切型式引起大量塑性变形的韧性损坏。另一个硬度高（Rc57），并且以脆性方式损坏而无明显的塑性流动。

疲劳或渐进断裂也是以剪切和解理而引起的。初始破坏是由远远低于屈服强度的循环载荷应力所引起，先以剪切或滑移型式出现。当一个微小剪切裂纹一旦发生，裂纹就会以解理型式扩大而不产生塑性变形。这样两种基本断裂型式就与单一载荷和复合载荷密切相关。

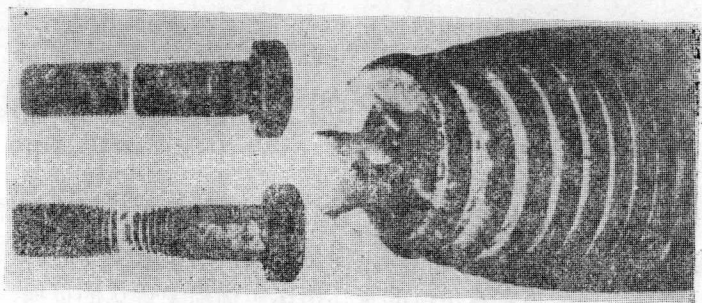


图1 两个特意用拉力拉断的螺栓，以示出其脆性的和韧性的情况。

上：脆性螺栓是高硬度材料 (Rc57)。

下：韧性螺栓是软的 (Rc15)

图2 图1下面的螺栓断口放大后，表明韧性断裂是暗灰色的，并有大量变形的纤维状断口。

剪切断裂

由单一载荷引起的剪切断裂，其断口呈暗灰色并往往带有经塑性变形的刃状纤维，图2示出图1中严重变形螺栓的断口详细情况。

剪切断裂因剪切应力的作用而发生，它可以与分开一付纸牌相比较，当这付牌的一部分滑移过另一部分，直到将这付牌分成两堆为止。

这种断裂型式发生在滑移面或剪切面上，例如穿过一个铁的体心立方晶体晶胞的对角面(图3左)。一个金属晶体系由几百万这样取向相同的晶胞所组成。在这种排列下晶胞立方体的每个角上和中心都有一个原子。滑移或塑性流动因某些结晶学平面的相互剪切作用而产生。铁的晶格有三个滑移面，全都有共同的滑移方向——立方体的对顶斜线。

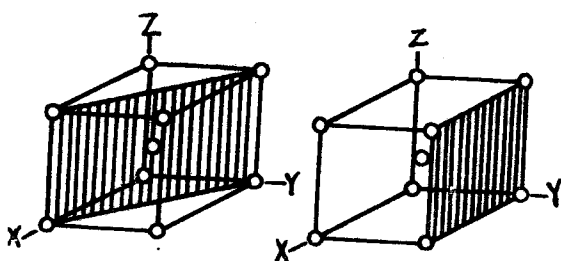


图 3 在体心立方单位晶胞中，剪切断裂面与晶胞对顶面重合（左），而理解断裂面则与晶面重合（右）。

解理断裂

脆性或解理断裂一般呈现光亮和结晶状断口。每个晶体都倾向于在单一晶面上断裂，在集合体内的这一晶面从一个晶体至另一晶体有微小变化。因此一个多晶试样的解理断口在手中转动时，通常会发出闪光。

脆性断口有时具有特别的外貌，由断裂的源点，形成一种特殊的“人字形”或“鱼骨形”纹理，并指向断裂的源点（图 4），通常需要用强光以低入射角照亮断口才能看清这种纹理。

云母的各片层被剥开而发生的断裂就是由法向应力或拉应力引起的解理断裂的典型。在铁中这些断口发生在一组与剪切断裂完全不同的结晶学平面上。从图 3（右）可见分离发生在平行于立方体表面之一的一个平面上。

这样两种根本不同的断裂机理，由于他们具有不同的结晶学平面，各自的断裂性质常常可用金相检验来判定。

单纯的解理断裂或剪切断裂是少有的。结构内部常常存在变化的应力状态，在断裂扩展的过程中，应力状态的变化或者晶胞取向的显微差异，一般产生的断口均会兼有剪切区或解理区。对断口复合型式的研究能得出有关断裂性质的报告。例如：图 5 示

出同一材料的三种试样，在不同温度下经受缺口冲击试验的结果，从左到右断口型式是：大部份是剪切断口；剪切和解理的复合断口；只有解理断口。

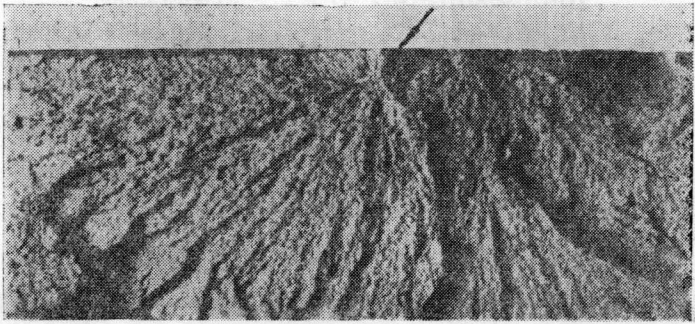


图 4 此试样内的“人字形”纹理指向脆性断裂源（箭头）右上角也有明显的疲劳断裂。

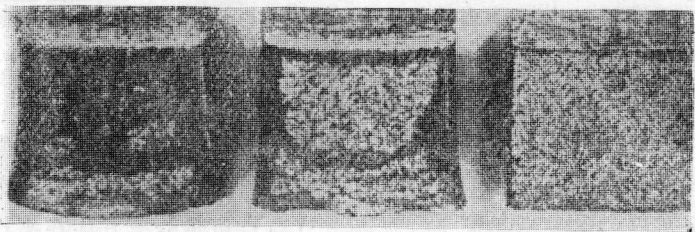


图 5 不同温度下断裂的三种冲击试验试样断口所表示的复合断裂型式，左，大部分是剪切断口；中，剪切和解理的复合断口；右，解理断口。

断裂可以用不同科学学科原理进行研究。冶金学、物理学、力学的专家们，几乎每天都在对认识断裂现象作出贡献。读者如果对进一步研究断裂机理有兴趣，可以参考有关位错概念和断裂力学一系列的优秀论文和教科书。

应力和强度

通常所有承载的构件均具有对施加载荷的抗力。在这种作用下，构件内部产生了内应力条件。依据载荷的类型和零件的几何形状，这种应力状态将是不同的，可以从简单的单向应力直到多向应力的复杂系统。加载方式可以从单一载荷直至在很宽广的振幅和频率范围内交变的一系列波动载荷。为了使零件满意地工作（换句话说就是保持零件的工作外形，断裂抗力或两者均备），在构件内发生的应力必须由材料的强度特性来恰当地平衡。

应力状态

我们所谓的应力，是指在物体内部由于外加载荷所引起的，或在某些制造工序以后保留在物体内的力的强度（后者称为残余应力）。应变则是伴随应力的发生而引起的尺寸变化，可以是弹性应变（随应力消失而消失）或塑性应变（在应力去除后仍然存在）。为方便起见，应力和应变可分为两类：法向的和切向的，依他们是产生分离还是滑移而定。法向应变与法向应力同向，而切应变则以一个平面对另一与其平行的另一平面的位移，并且以其分开的单位距离来测量。

习惯上常用希腊字母表示这些应力。字母 Sigma (σ) 表示法向应力，字母 tau (τ) 表示剪切应力。在一个物体内有无数个平面，应力系统可以对它们进行描述。不论存在的应力如何复杂，物体任一点上的应力状态总是可以用一组三个互相垂直的向量来描述，这些代表最大的法向应力，称为主应力，它们分别以 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 来表示。并根据它们是拉伸或压缩的性质来确定是正还是负。最大的一个应力总是用 σ_1 表示，最小的一个总是用 σ_3 表示。在垂直于这些向量的三个互相垂直平面内，不存在剪切应力。这样，这个应力系统就完全地统一起来了！

除了三向等应力状态 ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) 以外, 主应力总是伴随着剪切应力同时存在。最大的剪切应力 (图 6) 在与初始主应力呈 45° 的方向上发生, 其值等于最大主应力与最小主应力之差的一半。

$$\left(\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)$$

在单向拉伸试验中, 有无数个与拉伸轴线呈 45° 的最大剪切应力平面。

有关应力状态的知识有助于断裂原因分析, 不论它是由于单一载荷或波动载荷所引起的, 也不论它是剪切的或解理的断裂。因为材料具有抗拉 (内聚) 强度和剪切强度, 所以它的性能在很大程度上受相应的应力间的关系所支配。对于拉伸或弯曲,

σ 与 τ 的关系为: $\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sigma_{\max}$ 。对于扭转: $\tau_{\max} = \sigma_{\max}$ 。

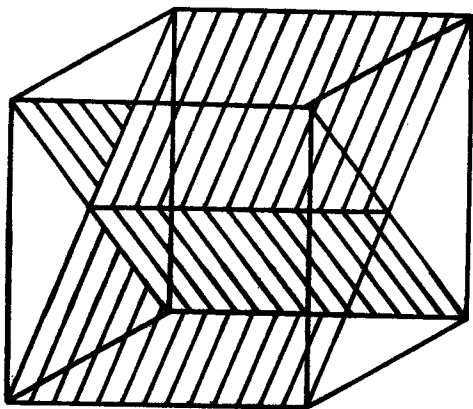


图 6 图中示出在体心立方晶体晶格中的最大剪切应力平面。

这就是说: 对于一个给定的 σ_{\max} 值而言, 在扭转时其相应的 τ_{\max} 为在拉伸时 τ_{\max} 的二倍。由于韧性材料的剪切强度小于

其内聚强度（抗拉强度），所以一根光滑圆杆施加扭转载荷到损坏时，其剪切应力将超过材料的剪切强度。图7示出在扭转时的应力状态和最大应力作用的平面。

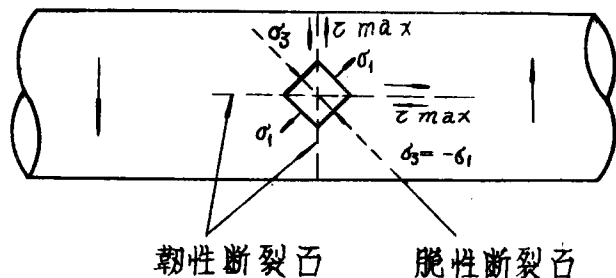


图7 圆棒扭转时产生扭力，最大应力沿着指定平面作用着。

强度状态

在单一载荷施加的影响下，在断裂点上材料表现出三种不同的强度状态：剪切屈服强度（ τ 应力超过此点时发生塑性流变）剪切极限强度（ τ 应力达到此点时发生韧性断裂），以及内聚强度（即抗拉强度）（ σ 应力超过此点发生脆性断裂）。拉伸时的屈服强度，常被测定并提出作为设计标准，实际上它是在材料剪切屈服强度时的主应力值。因此它就不能算是一个基本特性。同样抗拉强度（最大载荷除以拉伸试样的原始面积）也常被测定和报导。虽然这一特性可以用来作为对不同批量金属质量一致性的控制检验，但它也不是一个基本特性，因而它对设计师的用处不大。

当施加载荷以后，不管载荷有多大，首先有一个与载荷成正比的弹性反作用力；其次如果对韧性材料施加的载荷足够高，就会发生结晶学平面滑移引起的流变，而金属最后将以剪切或解理型式断裂。在纯脆性材料中不会发生结晶学平面滑移或流变，断

裂总是以解理型式出现。

流变强度和引起流变的应力之间的关系已是十分熟知的。而断裂则仍是很复杂的。然而支配断裂的规律在定性方面也是清楚的。简言之屈服仅在剪切应力超过剪切屈服强度时发生；而脆性断裂则在主应力或拉应力超过内聚强度（抗拉强度）的发生。

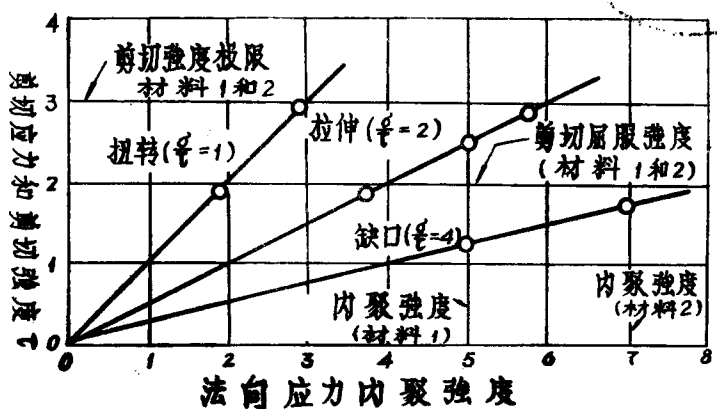
这一原理可用图 8 所示的图解法来说明。这里考虑了两种材料，它们的剪切强度和内聚强度分别用水平线和垂直线来表示。当施加载荷时这些材料的行为表现取决于应力系统或主应力与剪切应力之比。三种应力的比值用三根对角线来表示。各应力线与各强度线相交处就是“匹配点”。从此图中可以看出，扭转是一个韧性载荷系统，因为在低的法向应力水平上达到剪切强度，并且这两种材料的屈服和断裂都是剪切引起。相反一个尖锐缺口就产生脆性载荷系统，因为内聚强度（抗拉强度）与低的剪切应力水平上匹配，并且两种材料都是脆性的或解理的断裂。

由应力线和强度线相交点（或匹配点）所决定的，不同的断裂行为归纳于图 8 表中。

这一概念在断裂分析中非常有用，因为它能够从不同的载荷变化或材料特性，而能预先定性地了解断裂特征的变化。例如材料 1 的温度如果降低到足够低时能使剪切屈服强度上升约 25% 达到 $2\frac{1}{2}$ ，然后脆性断裂可望发生。

由波动载荷引起的失效，其关系更为复杂。虽然疲劳损坏无疑地是起源于剪切，但研究者们并未成功地将韧性金属的剪切强度与其疲劳强度特性的关系找出来。然而可供实用的耐久性与抗拉强度之间的一般关系业已发现。这一关系常被用来作为设计标准，下文将再作讨论。

总之，本节的讨论是以最大剪切应力理论为基础，这一理论说明：在最大剪切应力与弯曲或扭转中出现的引起同样断裂的应



材 料 1				材 料 2			
载 荷	屈 服 (流变)	断 裂		载 荷	屈 服 (流变)	断 裂	
		剪 切	解 理			剪 切	解 理
扭 转	○	○		扭 转	○	○	
拉 伸	○		○	拉 伸	○	○	
缺 口			○	缺 口			○

图 8 材料破坏方式很大程度上取决于系统中的应力分布。

力相等时，断裂就会发生。这一近似方法肯定是过于简单的了，仅供帮助了解材料的特性，但没必要作为设计基础来推荐，在实际试验中，导致断裂的应力-强度关系，并不总是与这一简单方法相一致。

第二章 载荷的类型

很多工业企业为了使机械零件服役失效的可能性减至最小，作为技术发展的一部分而进行了大量的产品试验。为暴露设计中的薄弱环节，试验是特意在苛刻的条件下进行的。因而工程技术人员必须研究各种零件的失效以判定作用在零件上的载荷类型。由于这一原因，关于载荷在导致断裂中所起作用的知识对零件失效分析是很重要的。

前章已经概述了应用最大剪切理论以推论应力-强度的关系。对韧性金属而言，畸变能量理论是与观察到的结果非常接近的。



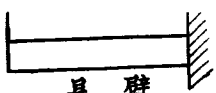


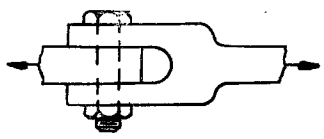
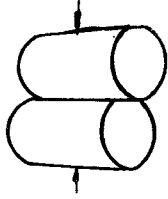
五种载荷类型

如表1中的图例说明，基本上有五种载荷类型：轴向载荷（拉伸或压缩）、弯曲载荷、扭转载荷、直接剪切载荷和接触载荷。轴向载荷的加载方向是与零件的轴线一致的。弯曲载荷是作用于轴线的外加力偶产生的，由零件本身承担载荷抗力。扭转载荷是一对与轴线垂直的平面上的力偶所引起。直接剪切载荷是使相互平行平面间产生变形的力。接触载荷是两个表面间的垂直压力和滑动压力。实际上，经常发生的是这些载荷型式的组合，即所谓“复合载荷”。

所有这些载荷类型都会引起法向应力和剪切应力，这些应力必须为材料的内聚强度和剪切强度所平衡。由于法向应力和剪切应力受到应力集中的不连续性的不同影响，因此工程技术人员必须具备在不同载荷类型时有关法向应力(σ) / 剪切应力(τ)比率和有效应力的知识。同样，每一种载荷类型各有其特有的应力

表 1

载 荷 类 型

 拉 伸	轴向载荷 $\frac{\text{法向主应力}(\sigma)}{\text{最大剪切应力}(\tau)} = \sqrt{3}$
 压 缩	横截面分布: 均匀 例: 拉伸试样; 支撑钢丝,
 悬 臂  简 支	弯曲载荷 $\frac{\text{法向主应力}(\sigma)}{\text{最大剪切应力}(\tau)} = \sqrt{3}$ 横截面分布 (垂直于最大主应力): 从表面最大变至中性轴为0. 例: 齿轮的齿根圆角, 横梁,
	扭转载荷 $\frac{\text{法向主应力}(\sigma)}{\text{最大剪切应力}(\tau)} = 1$ 横截面分布 (垂直于扭转轴): 从表面最大变至中性轴为0. 例: 全浮式半轴, 螺旋弹簧.
	直接剪切载荷 $\frac{\text{法向主应力}(\sigma)}{\text{最大剪切应力}(\tau)} = 1$ 横截面分布 (平行于最大剪切应力): 均匀 例: 铆钉, 螺栓
	接触载荷 法向主应力(σ)和最大剪切应力(τ)的比值是可变的。 横截面分布 (在接触处垂直于最大主应力): 随着深度和力的方向而变化。 例: 滚柱轴承, 齿轮齿。