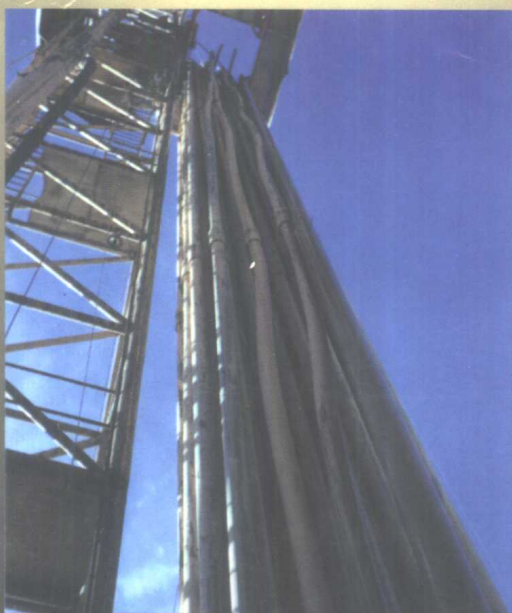


李鹤林 李平全 冯耀荣 编著

# 石油钻柱 失效分析及预防



PETROLEUM INDUSTRY PRESS  
石油工业出版社



# 石油钻柱失效分析及预防

李鹤林 李平全 冯耀荣 编著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书介绍了失效分析的基本思路和方法,论述了钻柱服役条件及主要失效类型,重点讨论了钻柱脆性断裂、疲劳、腐蚀、腐蚀疲劳、应力腐蚀开裂等的失效特点、机制、影响因素,并提出相应的预防措施。总结了国内外石油钻柱构件科学研究与失效分析的实践和最新成果,力求深入浅出。

本书可作为钻柱构件生产、使用、管理人员及失效分析与预防工作者的重要参考书,也可供石油院校高年级学生、研究生和教师参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

石油钻柱失效分析及预防/李鹤林等编著.

北京:石油工业出版社,1999.12

ISBN 7-5021-2839-5

I. 石…

II. 李…

III. ①油气钻井-钻柱-失效分析

②钻柱-损伤(力学)-预防

IV. TE921.01

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第53991号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

\*

850×1168毫米32开本9.625印张270千字印1—1500

1999年12月北京第1版1999年12月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-2839-5/TE·2219

定价:25.00元

## 序

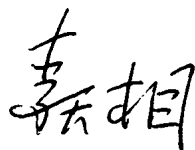
失效分析是判断机械零部件或器材的失效性质、分析失效原因、研究失效事故处理方法和预防措施的技术活动与管理活动。机械零部件或器材的失效分析和预防，是从失败入手着眼于成功和发展的科学，是从过去入手着眼于未来的科学。

在石油工业的发展历程中，许多重大工程技术问题的解决都与失效分析密切相关。1966年，四川威远气田的开发，需建威远至成都输气管线。在威远气田内部集输干线建成后进行试压时，4天时间内连续爆裂3次。经失效分析及再现试验，确认爆裂是由于天然气所含硫化氢在含水条件下应力腐蚀造成的。根据这一结论，采取了相应的预防措施，使类似事故得到了抑制，这是我国石油工业运用失效分析解决重大工程技术问题的重要开端。1977年，华北油田某井接连发生3起德国G105钻杆断裂事故，严重影响了正常的钻井生产。经失效分析确认，在处理卡钻事故时向井内注入盐酸解卡，但没有使用缓蚀剂是造成钻杆发生应力腐蚀失效的主要原因。根据这一结论，当时的石化部石油勘探开发组规定：在使用高强度钻杆时，应尽量避免注酸解卡，但在迫不得已时，注酸解卡必须加入有效的缓蚀剂。从此，很少发生类似事故。1985年，在进行钻杆失效事故调查时，发现70%的事故发生于内加厚过渡区。经失效分析，认为是由于内加厚过渡区结构不合理造成应力集中和腐蚀集中引起的早期腐蚀疲劳失效。在此基础上，采用有限元分析方法对内加厚过渡区结构进行了优化设计，使钻杆实际使用寿命提高2~3倍。1989年“全国钻具失效分析网”成立后，经过近年来的工作，使全国油田重大钻具失效事故率由原来的1000起/年左右下降到目前的250起/年左右。上述事例说明，石油装备和器材的失效分析伴随着石油

工业的发展而诞生，并随着石油工业的发展而得到了很大的发展。失效分析可以防止或减少重大失效事故的重复发生，减少经济损失和人员伤亡，提高石油装备和器材质量，促进科技进步。随着我国石油工业的进一步发展，失效分析在石油工业中的地位和作用也愈加重要。

石油钻具的失效分析与预防是石油装备与器材失效分析与预防工作的重要组成部分。《石油钻柱失效分析及预防》是作者根据石油工业的实际需要，在长期从事石油钻柱科学研究和失效分析实践的基础上编写的。该书反映了国内外钻柱构件科学研究和失效分析的最新成果，是国内第一部关于石油钻柱失效分析与预防方面的专著。该书的出版，对于进一步普及钻具失效分析知识，提高钻具的失效分析水平，推动钻具失效分析、预防及研究工作的进一步开展，具有重要的现实意义。

本书重视理论与实践的紧密结合，在失效分析的理论和实践两方面都有不少创新和发展，内容十分丰富。它适用于从事石油和地质钻井、钻具失效分析及预防、钻具生产管理和使用的工程技术人员，也可作为石油院校高年级学生、研究生和教师的参考用书，希望各方面的读者都继续关心和支持这项工作并运用这项技术去解决自己所面临的实际问题。

A handwritten signature in black ink, consisting of the characters '李相' (Lǐ Xiāng) in a cursive style.

1998.12.1

# 前 言

失效分析是一门新兴的学科。通过失效分析,找出造成机械零部件或器材失效的主要原因,并采取相应的措施,防止同类失效事故的再次发生,不但具有很大的技术价值,而且具有重大的经济意义。

石油部门是国内开展失效分析最早的部门之一。自 1981 年成立石油管材研究所后,失效分析工作有了较大的发展,每年完成失效分析近百项,解决了一大批石油工程中的重要技术问题。石油钻柱是石油钻井的重要工具,其失效事故频繁,损失严重,对石油工业影响很大。为了将失效分析工作进一步引向深入,我们以石油钻具为突破口,成立了钻具失效分析网。为了使网员掌握失效分析的基本知识,我们编写了《石油钻柱失效分析及预防》讲义,在原中国石油天然气总公司举办的钻具失效分析学习班上多次进行了讲授,反映良好。为了满足更多的石油科技人员的需要,我们将其进行修改补充予以出版。

参加本书编写工作的主要有李平全、冯耀荣。张海洋参加了书中部分章节的编写工作。全书由李鹤林审定。

本书是在我所多年来开展失效分析工作的基础上编写的,书中引用了我所大量的研究资料和技术报告。参加这些研究和实践工作的主要人员除本书的作者外,还有宋治、韩勇、郭平、赵克枫、吕拴录、安丙尧、李宝进、帅亚民、张国正等同志,石万里、徐瑛、赵国仙同志负责了书中图片的制作,赵国仙同志承担了本书的校对工作,在此表示衷心感谢。

由于我们水平有限,经验不足,书中难免有错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编著者  
1998.12

# 目 录

<b>1 概述</b> .....	(1)
1.1 失效的基本概念 .....	(1)
1.2 失效分析的意义与任务 .....	(2)
1.3 失效分析及预测预防工作发展概况 .....	(4)
<b>2 失效分析的思路及程序</b> .....	(7)
2.1 失效分析的思路 .....	(7)
2.2 失效分析的程序和步骤 .....	(10)
2.3 失效分析的辩证方法 .....	(16)
参考文献 .....	(17)
<b>3 钻柱服役条件及主要失效类型</b> .....	(18)
3.1 钻柱的服役条件分析 .....	(18)
3.2 钻柱的主要失效类型 .....	(29)
参考文献 .....	(40)
<b>4 钻柱脆性断裂失效分析及预防</b> .....	(41)
4.1 脆性断裂概述 .....	(41)
4.2 脆性断裂的特点与分类 .....	(41)
4.3 决定钻柱构件脆性断裂的因素 .....	(46)
4.4 钻柱构件的脆性断裂失效分析 .....	(54)
4.5 钻柱构件的安全韧性判据 .....	(61)
参考文献 .....	(66)
<b>5 钻柱疲劳失效分析及预防</b> .....	(68)
5.1 材料的疲劳现象及钻柱的疲劳问题 .....	(68)
5.2 疲劳断口特征 .....	(78)
5.3 疲劳应力集中系数和缺口敏感度系数 .....	(85)
5.4 钻杆内加厚过渡区应力集中引起的疲劳失效 .....	(88)

5.5	钻杆接头的疲劳失效·····	(97)
5.6	钻铤螺纹连接处的应力集中与疲劳失效·····	(109)
	参考文献·····	(120)
<b>6</b>	<b>钻柱的腐蚀疲劳失效分析及预防·····</b>	<b>(122)</b>
6.1	腐蚀疲劳及其特点·····	(122)
6.2	腐蚀疲劳裂纹和断口形貌特征·····	(123)
6.3	腐蚀疲劳机理·····	(129)
6.4	钻杆腐蚀疲劳失效过程·····	(131)
6.5	钻杆腐蚀疲劳的主要影响因素和预防措施·····	(143)
6.6	钻杆的累积腐蚀疲劳损伤·····	(152)
	参考文献·····	(157)
<b>7</b>	<b>钻柱腐蚀损伤和应力腐蚀开裂的失效分析及预防·····</b>	<b>(158)</b>
7.1	钻柱腐蚀损伤和应力腐蚀开裂概述·····	(158)
7.2	钻柱使用和存放的腐蚀环境·····	(161)
7.3	钻柱的腐蚀损伤及控制·····	(167)
7.4	含 H <sub>2</sub> S 钻井液环境中钻柱硫化物应力腐蚀开裂和 氢损伤失效分析及预防·····	(194)
7.5	无磁钻铤应力腐蚀开裂失效及其预防·····	(207)
	参考文献·····	(212)
<b>8</b>	<b>钻柱其它类型失效的分析及预防·····</b>	<b>(214)</b>
8.1	钻柱的过量变形失效分析·····	(214)
8.2	钻柱的机械损伤失效分析及预防·····	(215)
8.3	钻柱的过载断裂失效分析·····	(217)
8.4	钻柱的磨损失效分析及预防·····	(218)
8.5	钻柱的冲蚀失效分析及预防·····	(222)
<b>9</b>	<b>钻柱的适用性评价·····</b>	<b>(232)</b>
9.1	概述·····	(232)
9.2	失效评价图与断裂评定方法·····	(235)
9.3	钻柱适用性评价方法·····	(238)
9.4	钻柱构件适用性评价举例·····	(253)



参考文献	(261)
<b>10 钻柱使用管理与失效预防</b>	<b>(262)</b>
10.1 钻柱构件的合理选择与使用	(262)
10.2 钻柱构件的修复	(269)
10.3 钻柱的维护与管理	(275)
参考文献	(279)
<b>11 钻柱失效数据库及计算机辅助失效分析</b>	<b>(280)</b>
11.1 全国钻柱失效分析网	(280)
11.2 钻柱失效案例库和综合统计分析库	(283)
11.3 计算机辅助钻柱失效分析系统	(292)
参考文献	(297)

# 1 概 述

## 1.1 失效的基本概念

### 1.1.1 失效的定义

美国《金属手册》认为，机械产品的零件或部件处于下列3种状态之一时，就可定义为失效：（1）当它完全不能工作时；（2）仍然可以工作，但已不能令人满意地实现预期的功能时；（3）受到严重损伤不能可靠而安全地继续使用，必须立即从产品或装备上拆下来进行修理或更换时。

### 1.1.2 失效类型及失效机理

失效类型就是失效的外在表现形式，它相当于医学上的“病症”。机械产品或装备常见的失效类型包括变形失效、损伤失效和断裂失效3大类。

失效机理是指引起产品、部件或装备或其零部件失效的物理、化学变化等内在原因或过程。失效机理相当于医学上的“病理”。失效类型和失效机理的关系就是宏观与微观的关系。只有把两者紧密地结合起来，才能由表及里地揭示产品或装备失效的本质，提出有效的预防措施。

### 1.1.3 失效过程与分类

机械产品或装备的失效是一个由萌生（损伤）、扩展（积累）直至破坏的发展过程。不同失效类型其发展过程不同，过程的各个阶段发展速度也不相同。例如疲劳破断失效过程一般较长，发展速度较慢，而解理断裂失效过程则很短，速度很快等等。

机械产品或装备在整个使用寿命期内故障发生的规律可用“寿命特性曲线”来说明，即以失效率（ $\lambda$ ）——单位时间内发生失效的比率来描述失效的发展过程。那么在不进行预防性维修

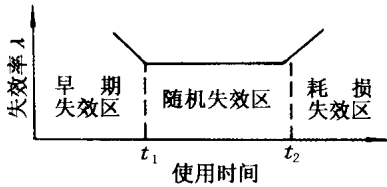


图 1-1 失效率浴盆曲线

的情况下，产品或装备的失效率 ( $\lambda$ ) 与其工作 (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，即按照产品或装备使用的过程，

可将失效分为 3 类。

(1) 早期失效：是在使用初期，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较高，但随着使用时间的延长，其失效率则很快下降。假若在产品或装备出厂前即进行旨在剔除这类缺陷的过程，即进行可靠性试验，则在产品或装备以后使用时，从一开始便可使失效率大体保持恒定值。

(2) 随机失效：在理想的情况下，产品或装备发生损伤或老化之前，应是无“失效”的。但是由于环境的偶然变化、操作时的人为差错、或者由于管理不善造成的“潜在缺陷”，仍可能产生随机失效或称偶然失效。产品或装备的偶然失效率是随机分布的，很低而且基本上是恒定的。这一时期是产品或装备的最佳工作时间，偶然失效率 ( $\lambda$ ) 的倒数即为失效的平均时间。

(3) 耗损失效：又称损伤累积失效。经过随机失效期后，产品或装备中的零部件已到了寿命终止期，于是失效开始急剧增加，这种失效叫做耗损失效或损伤累积失效。如果在进入耗损失效期之前进行必要的预防维修，它的失效率仍可保持在随机失效率附近，从而延长产品或装备的随机失效期。

## 1.2 失效分析的意义与任务

### 1.2.1 失效分析及其意义

按一定的思路和方法判断失效性质、分析失效原因、研究失效事故处理方法和预防措施的技术活动及管理活动，统称失效分

析。其意义和作用在于：

(1) 失效分析可减少和预防产品或装备同类失效现象重复发生，从而减少经济损失和提高产品质量。

(2) 失效是产品质量控制网发生偏差的反映，失效分析是可靠性工程的重要基础技术工作，是产品全面质量管理中的重要组成部分和关键技术环节。

(3) 失效分析可为技术开发、技术改造、科学技术进步提供信息、方向、途径和方法。

(4) 失效分析可为裁决事故责任、侦破犯罪案件、开展技术保险业务、修改和制订产品质量标准等提供可靠的科学技术依据。

(5) 失效分析可为各级领导进行宏观经济和技术决策提供重要的科学的信息来源。

### 1.2.2 失效分析的任务

失效分析预测预防的总任务就是不断降低产品或装备的失效率，提高可靠性，防止重大失效事故的发生，促进经济高速持续稳定发展。从系统工程的观点来看，失效分析的具体任务可归纳为：

- (1) 失效性质的判断；
- (2) 失效原因的分析；
- (3) 采取措施提高材料或产品的失效抗力。

失效性质的判断，就是根据具体失效分析判断失效机理，解释失效类型。其主要依据有：

- (1) 失效形貌特征；
- (2) 失效应力状态；
- (3) 失效材料实际强度；
- (4) 失效环境因素；
- (5) 失效相关因素（含误用性和受累性）。

近代材料科学和工程力学对破断、腐蚀、磨损及其复合型（或混合型）的失效类型和失效机理做了相当深入的研究，积累

了大量的统计资料，为失效类型的判断、失效机理及失效原因的  
解释奠定了基础，发展中的可靠性工程及完整性与适用性评价就  
是预测、预防和控制失效的技术工作和管理工作。可靠性工程是  
运用系统工程的思想和方法，权衡经济利弊，研究把设备（系  
统）的失效率降到可接受程度的措施。完整性和适用性评价则是  
研究结构或构件中原有缺欠和使用中新产生的或扩展缺陷对可靠  
性的影响，判断结构的完整性及能否适合于继续使用，或是按预  
测的剩余寿命监控使用，或是降级使用，或是返修或报废的定量  
评价。

产品或装备失效分析的目的在于失效性质的判断和失效  
原因的明确，而更重要的还在于为积极预防重复失效找到有效的  
途径。通过失效分析，找到造成产品或装备失效的真正原因，从  
而建立结构设计、材料选择与使用、加工制造、装配调整、使用  
与保养方面主要的失效抗力指标与措施，特别是确定这种失效  
抗力指标随材料成分、组织、状态的变化规律，运用金属学、材  
料强度学、工程力学等方面的研究成果，提出增强失效抗力的改  
进措施。既能做到提高产品或装备承载能力和使用寿命，又可做  
到充分发挥产品或装备的使用潜力，使材尽其用，这是产品或装  
备失效分析、预测预防研究的重要目的与内容。

### 1.3 失效分析及预测预防工作发展概况

一切发达国家均高度重视失效分析预测预防工作。美国有  
300 个研究所从事这方面的工作，对于涉及国防及尖端部门的军  
工、核工业、宇航等的失效分析在国家的研究机构（如橡树岭国  
立研究所、肯尼迪中心、约翰逊中心、西南研究院等）进行。民  
用工业的失效分析是在大公司的研究机构（如 Amoco 的研究中  
心）进行的。同时美国还有一大批商业性的失效分析公司，著名  
学者 A. Tetelman 就创办过这种公司，A. McEvily 任公司顾问。  
据资料介绍，美国每年由于断裂事故及有关的失效分析耗资达

1140 亿美元，相当于国民经济总产值的 4%。英国有国立工程研究所 (NEL)、国立物理研究所 (NPL)、焊接研究所 (WL)、中央电力局 (CEGB)、英国石油公司 (BP)、英国煤气天然气公司 (BG) 等许多世界著名的研究机构从事失效分析预测预防工作，并自 1994 年出版《工程失效分析》国际性刊物。德国有 500 个研究机构及保险公司专门从事失效分析工作，可称为失效分析工作组织化程度最高的国家。国家投资建设一批材料检验中心 (MPA)。德国的技术监督部门规定机器设备发生失效事故后必须申报备案。德国有专门的“机械失效”杂志，在国际上享有崇高声誉。日本的东京大学、东京工业大学、东北大学以及国立的日本原子力研究所、金属材料技术研究所、产业安全研究所等，均积极从事失效分析预测预防的研究工作。例如 1985 年自东京到大阪航线发生的有 520 人丧生的波音 747 空难事件就是由东京工业大学小林英男教授主持进行失效分析的，结论是尾部机舱隔板的疲劳断裂。

我国从 70 年代起在全国范围加强了失效分析工作。1980~1993 年先后召开了 8 次全国失效分析学术会议并出版了论文集。1987 年中国机械工程学会成立了失效分析与预防工作委员会，在全国范围组建了“失效分析网点”机构。1989 年国务院令第 34 号发布了“特别重大事故调查程序暂行规定”，并同时组建了“全国安全生产委员会专家组”。该专家组进行了许多特大事故的分析 and 安全隐患评估工作，其中包括 1994 年西北航空公司图 154 飞机的爆炸事故。1992 年和 1998 年由多个学会和机构联合召开了“全国机电装备失效分析预测预防战略研讨会”，并出版了概括失效分析各个领域现状的论文集。1994 年 7 月中国科协组建了有 24 个一级学会参加的最高权威机构“全国失效分析与预防中心”。

石油管材及装备的服役条件复杂恶劣，失效事故频繁，而且往往造成很严重的后果。“七五”、“八五”规划执行期间及“九五”以来，在各级领导关怀指导和各油田的积极支持下，石油管

材研究所作为我国石油天然气工业的失效分析中心，十几年来坚持为油田提供失效分析及预防服务，累计已完成 700 多例失效分析，基本覆盖了全行业。在“失效分析与反馈”的正确思路及科学研究、技术监督和失效分析三位一体的技术路线指导下，取得了一系列重大成果，收到了可观的经济和社会效益。其中钻杆失效分析及加厚过渡区优化设计项目获国家科技进步二等奖、部级一等奖，并得到美国石油学会（API）标准化委员会的高度评价。

自 1989 年以来，全国钻具失效分析网开展了大量钻具失效分析与预测预防工作，包括开发了钻柱失效案例库和计算机辅助失效分析系统，对于钻具的安全使用和延长寿命，促进油田建设方面发挥了巨大作用。全国钻具失效分析网共召开 4 次学术会议及 6 次工作会议，先后举办了 3 期失效分析学习班及 3 期现场失效分析学习班，普及了失效分析基础知识，宣传了失效分析工作的重大意义，构成了职业教育、继续教育的重要部分。

## 2 失效分析的思路及程序

### 2.1 失效分析的思路

#### 2.1.1 失效分析及防止失效的基本思路

失效分析及失效的防止好比医生治病，正确的诊断，配合对症下药才能将病治好，这是紧密联系的两个方面。其基本思路是：

(1) 对具体服役条件下的零部件进行具体分析，从中找出主要的失效形式及主要失效抗力指标。

(2) 运用金属学、材料强度学和断裂物理、化学、力学的研究成果，深入分析各种失效现象的本质，揭示失效机理。

(3) 在对零部件力学条件、环境条件、产品质量和使用情况进行综合分析研究的基础上，确定造成零部件失效的原因。

(4) 研究主要失效抗力指标与材料因素、工艺因素、结构因素、载荷与环境条件及使用因素的关系，提出预防失效再发生的措施。

#### 2.1.2 故障（失效）树分析思路

故障树分析概念是早在 1960 年为估价“民兵”导弹发射控制系统的安全性发展起来的。现在，这种分析思想已用于工程结构破坏和断裂过程的分析中，促进了失效分析技术水平的提高。故障树是一种图解技术，它以模式图的形式，对于给定的失效方式（称为系统）的可能原因依照逻辑推理予以组合，从而系统严密地描述了各种因素的作用，提出了可能的破坏路线示意图。当把它与断口学、金相学及系统所用的数据结合起来时，就能够选定最可能的破坏路线。

图 2-1 是高强度低合金钢构件破坏的故障树。它是通过断



故障树中所用符号的说明

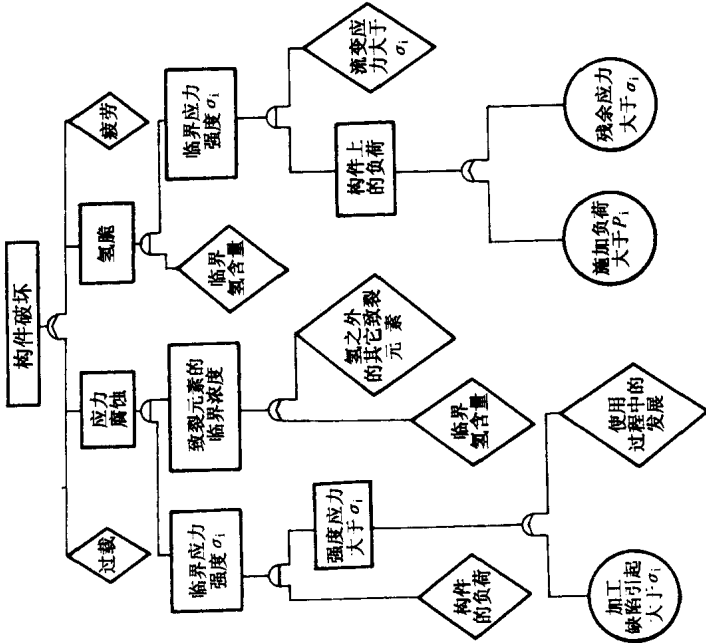
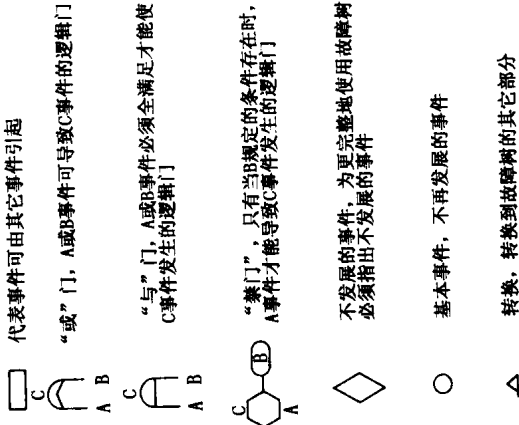


图 2-1 高强度低合金构件破坏的故障树