

# 机械失效模式、原因和机理的诊断思路 and 主要依据

钟群鹏 宋光雄 张 峥 骆红云

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 从断口、裂纹、痕迹和参数等 4 个方面阐述了机械失效模式、原因和机理诊断的主要依据,列出了机械使用失效的主要模式、原因和失效的主要形成条件和主要的诊断思路,并从单项分析和综合分析的角度给出了失效模式、原因和机理诊断所需要的“多维”信息系统,为分析和确认各种失效模式、原因和机理提供了主要的推理规则和基本方法;最后分析比较了各种二级疲劳失效模式和各种与应力腐蚀有关的失效模式之间的主要诊断依据和应注意的几个问题,为疑难二级失效模式的诊断问题提供了分析研究方向。

**关 键 词:** 失效分析; 失效判据; 机械失效模式

**中图分类号:** TG 115

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2004)10-0913-06

## Diagnosis methods and criterions for mechanical failure modes , causes and mechanisms

Zhong Qunpeng Song Guangxiong Zhang Zheng Luo Hongyun

(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Mechanical failure modes, causes and mechanisms were described, based on four kinds of failure information including fracture, cracking, related failure marks and certain parameters. Mechanical failure modes, causes, main causing conditions and identifying principles were summarized and listed, “multi phase” information system was provided with single phase analysis and synthetic analysis, which provide reasoning rules and principal methods for mechanical failure analysis. Main criterions for discriminating fatigue failure mode, stress corrosion cracking (SCC) and relevant failure modes were also concerned, which offer signposts for recognizing 2<sup>nd</sup> level failure modes.

**Key words:** failure analysis; failure criterion; mechanical failure mode

机械失效的诊断是机械失效分析的主要任务之一。机械失效诊断的理论、技术和方法的核心是其推理规则和方法论,它是一种系统工程,是贯穿在整个机械失效事故分析诊断预测预防过程中的思维路线和科学依据<sup>[1,2]</sup>。

机械失效诊断依据其目的要求和内容深度可分 3 个层次:即机械失效模式诊断、机械失效原因诊断和机械失效机理诊断。它们的诊断思路 and 主要依据有内在的联系,但各有侧重,应根据用户的

要求和本质规律的揭示加以分别关注<sup>[1]</sup>。

长期以来,对机械失效的诊断主要依据断口,但是,对一个复杂的多因素的疑难机械失效事故,只依据断口的诊断是不够的,有时可能是偏面的。而必须从断口、裂纹、痕迹和参数等方面加以重点的、全面和综合的诊断,为此,分别给出它们的主要诊断依据和内容、揭示它们的主要功效以及它们与主要的机械失效模式的内在联系,从而找出主要的诊断思路 and 规则是十分必要的<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2004-04-28

基金项目: 国家“973”基金资助项目

作者简介: 钟群鹏 (1934 - ),男,浙江上虞人,院士, ZhongQunpeng @263.net.

值得特别指出的是,对于一些复杂的多因素的疑难的重大机械失效事故的诊断,特别是对它们的二级失效模式、原因和机理的诊断,有时是非常困难的<sup>[4]</sup>.

为此有必要对机械疲劳断裂和与应力腐蚀有关的各种二级失效模式、原因和机理的诊断问题加以专门的分析、讨论和阐述,以便为甄别和寻找它们之间细小差别依据提供分析依据,并为进一步深入和系统地研究提供线索<sup>[3]</sup>.

## 1 诊断的主要依据

机械失效的诊断可依据断口、裂纹、痕迹和参数等 4 个方面参考表 1 的内容进行.

### 1.1 断口诊断的主要依据

宏观断口:

- 1) 断口的平直情况和断口的主要特征形貌;
- 2) 断口的颜色(如氧化色、腐蚀产物颜色、夹杂物颜色、光亮情况等);
- 3) 断口与主正应力(或主切应力)方向的关系;
- 4) 断口与成形方向(轧制方向、流线方向)的关系;
- 5) 断口周围的塑性变形大小、或有无;
- 6) 断口的边缘锐利情况;
- 7) 断口与零件形状或应力集中的情况;
- 8) 断口各特征形貌面积的比例.

微观断口:

- 1) 断口与晶面、晶向之间的关系;
- 2) 断口与晶界的关系;
- 3) 断口与显微组织的关系(是否沿相界面或弱相断裂);
- 4) 断裂源区的情况(源区是否存在材质缺陷或几何缺陷等);
- 5) 断口的化学成分、或杂质环境元素的分布情况;
- 6) 断口上二次裂纹的有无或多少、分布情况.

### 1.2 裂纹诊断的主要依据

宏观裂纹:

- 1) 裂纹的平直情况、或分叉情况、或宏观走向的变化等;
- 2) 裂纹与主应力方向(或切应力方向)之间的关系;

3) 裂纹与材料成形方向(轧制方向、流线方向)的关系;

4) 裂纹的啮合情况(紧密配合,还是分离);

5) 裂纹尖端的情况(尖锐或圆钝);

6) 裂纹起始位置与零件形状的关系(是否有应力集中).

微观裂纹:

1) 裂纹周围的氧化、脱碳情况或杂质元素、环境元素的分布等;

2) 裂纹与显微组织的关系(或沿晶界、或沿相界、或穿晶等);

3) 裂纹源的情况(是否有加工缺陷、材质缺陷、腐蚀缺陷等)裂纹的长短、多少或分布情况.

### 1.3 痕迹诊断的主要依据

- 1) 塑性变形痕迹的分析;
- 2) 撞击印记、痕迹的分析;
- 3) 摩擦痕迹的分析;
- 4) 腐蚀痕迹的分析;
- 5) 燃烧残迹的分析;
- 6) 爆炸残迹的分析.

### 1.4 参数诊断的主要依据

- 1) 受载、应力参数、以及加载速率的分析;
- 2) 振动(特别是共振)模态及特征频率的分析;
- 3) 环境参量的分析;
- 4) 温度参量的分析;
- 5) 材料抗力指标的确定、测试和选取(在特定失效模式、特定环境(温度、环境)和特定材质、特定部位的材料抗力指标的确定、测试和选取).

表 1 给出机械使用失效的主要模式、原因和机理的主要形成条件和主要诊断思路<sup>[3]</sup>.

为了更便于应用,表 2 给出机械失效模式和原因的诊断信息系统,表 2 中初步列出了 5 大类、16 项、共 52 种失效信息.每一种失效信息都是失效的一个特征或影响失效的一个因素或条件;综合几种失效信息可以诊断出失效的模式,进而推理出失效的原因和机理,这是失效诊断的正向归纳方法.反之,也可认为一特定的失效模式、原因和机理归纳总结出一些相应的失效信息(特征).从而通过失效事件本身反映出来的失效信息建立诊断失效模式、原因和机理的失效诊断系统,这是失效诊断的逆向归纳方法,可以认为建立正确的失效信息系统,可以帮助人们进行失效研究.

表 1 机械使用失效的主要模式、原因和机理的主要形成条件和主要诊断思路

失效分类和形成主要条件(或初步特征)					诊断的主要依据					
断裂与 否	宏观塑性 变形大小	载荷循 环与否	有无腐 蚀介质	腐蚀介质的种类或环境、 条件和失效模式	断口诊 断依据	裂纹诊 断依据	痕迹诊 断依据	参数诊 断依据		
断裂 失效	宏观塑性 变形小	载荷 不循 环	有腐蚀性介质 (材料脆性)	无腐蚀性介质 (材料脆性)	材料的 $0.2/b-1$	有时断口 有夹杂物	宏观平直, 微观沿夹杂物	工作应力 $f > b, 0.2b$		
				无腐蚀性介质 (低温脆性)	体心立方、密排六方金属基体 等材料,工作温度低于材料的 韧脆转变温度	解理或准解理, 有时有少量沿晶	宏观平直, 微观弯折	有时有撞 击痕迹	工作温度 $T_{\text{工作}} < \text{韧脆转变温度 } T_c$	
				无腐蚀性介质 (缺口脆性)	$K_{IC}$ 低	裂纹深度 $a > \text{临界裂纹深度 } a_c$ ( $a$ 很小)	宏观平直		$K_I > K_{IC}$ 或 $a > a_c$	
				氢脆(氢介质)	冰糖断口; 有鸡爪形花样	宏观平直				
				碱脆(碱介质)	沿晶,有碱金属残留	沿晶裂纹				
				低熔点金属脆性 (低熔点金属)	沿晶或准解理, 有低熔点金属 痕迹	沿晶或 穿晶				
				辐照脆性(辐照环境)	沿晶或准解理					
				液体浸蚀脆性(腐蚀液体)	沿晶 有浸蚀液残留	沿晶或穿晶、 沿晶				
				晶间腐蚀(晶间贫 Cr + 电化学腐蚀环境)	沿晶 晶间附近贫 Cr	宏观平直, 微观曲折	各种腐 蚀痕迹	有环境参数		
				应力腐蚀 (介质与材料匹配)	沿晶或准解理 有时有腐蚀产物	有时裂纹分叉、沿晶 或穿晶				
				氢腐蚀 ( $4H + Fe_3C \rightarrow CH_4 + 3Fe$ )	沿晶 晶界上有 $CH_4$ 气泡	沿晶,有 $CH_4$ 气泡				
							室温机械应力疲劳断裂 (机械循环应力引起)	疲劳弧线或疲 劳条带或台阶	一般平直,穿晶, 裂纹吻合性好	平均应力 $a > \text{交变应力 } R$
				载荷 循环	无腐蚀性介质	热应力疲劳断裂 (温度交变引起)	疲劳条带间隔大,二 次裂纹多,氧化严重	一般平直,穿 晶,有时沿晶	氧化腐蚀 痕迹,产物	有温度的 交变
						高温机械疲劳断裂	疲劳弧线、条 带、台阶、舌头	裂纹内有氧化 或腐蚀	高温腐蚀、 氧化痕迹	$a > R$
				有腐蚀性介质	腐蚀疲劳(凡是对材料有 腐蚀作用的介质均会引起 腐蚀疲劳断裂)	疲劳弧线、条带不清 晰,有腐蚀产物	有时沿晶,有时穿 晶,吻合差,有时裂 纹内有腐蚀产物	有腐蚀 痕迹	腐蚀参数	
			一般塑性断裂(或应力大, 或材料强度低)	鹅毛绒状或 纤维状韧窝	穿晶,吻合差	塑性变形大	$f > b$			
	宏观塑性 变形大	无腐蚀性介质	蠕变断裂 (高温导致蠕变)	沿晶,晶界有空洞 或楔形裂纹,氧化	沿晶,吻合性差		$T_{\text{工作}}/T_{\text{熔点}} > 0.3$			
非断裂 失效 (腐蚀失效)		载荷 不循 环	有腐蚀性介质	低周疲劳断裂(或循环 应力大,或循环应变大)	疲劳条带间隔大, 有时有成排韧窝	一般较粗糙	有塑性变 形痕迹	$a > 0.2$ 、疲劳寿 命 $N_f < 10^5$		
				非电化学腐蚀(高温氧化)	表面氧化膜,有的材 料氧化膜剥落,点蚀	一般穿晶腐蚀,有时 沿晶				
				电化学腐蚀 (一般电化学腐蚀)						
				电化学腐蚀(液滴下的 氧电池腐蚀)	一般为沿晶	沿晶表面裂纹	有腐蚀痕迹	氧化或 腐蚀参数		
				电化学腐蚀(缝隙腐蚀)						
				电化学腐蚀 (显微选择性腐蚀)	异相遭腐蚀,或相 界扩展(孔洞)	沿相界腐蚀				
				电化学腐蚀(其他电化学腐蚀)						
非断裂 失效 (磨损失效)	载荷 循环	可以有,也可以 无腐蚀介质环境	微动磨损	磨蚀坑、表面碾压塑 性变形痕迹或微裂 纹(表面特征)	磨擦痕一般与相 对运动方向垂直					
			磨粒磨损	磨蚀坑、划痕(表面 特征),或微裂纹						
			腐蚀磨损	有腐蚀产物		磨擦痕迹和 磨削形貌	相对运动、润滑及 应力参数			
			疲劳磨损(接触疲劳)	次表面萌生裂纹,磨 蚀坑、“鱼眼”断口						
			粘着磨损	有粘着、脱落 (表面特征)						
非断裂 失效 (变形失效)	无宏观塑性变形 (弹性变形大)	一般 无腐 蚀	弹性失稳失效				$> \text{失稳}$			
			塑性变形失效	各种形式的塑 性变形痕迹		塑性变 形痕迹	$> 0.2$			
			形状和尺寸变形失效 (可引起显微组织稳定性和 内部应力联合作用)	形状和尺寸 的变化痕迹			尺寸稳定性参数			

表 2 失效模式、原因和机理的失效信息系统

信息	项目	失效信息名称	主要失效模式和特征					
			脆性解理断裂	脆性沿晶断裂	脆性沿夹杂物断裂	塑性断裂	疲劳断裂	应力腐蚀沿晶断裂 应力腐蚀穿晶断裂
裂纹信息	裂纹起源位置和扩展方向	与零件应力、焊缝的关系	在应力集中处 在焊缝区 非应力集中区					
		与接触介质的关系	在介质接触的表面 在点蚀(磨蚀)坑处 与接触介质无关					
		与主正应力或主切应力方向关系	与主正应力方向垂直 与主切应力方向平行 与主正应力、主切应力无关					
		与显微组织的关系	在夹杂物处 在某一相组织处 与显微组织无关					
		与晶粒边界的关系	在晶粒边界或相界处 在晶内或相内 既在晶界也在晶内处					
	裂纹分布和形貌	与晶面晶向的关系	在某一特定的晶面或晶向 非特定的晶面、晶向 混合情况					
		按点、线分布情况	以点放射分布 沿线分布 不规则分布					
		数量和平直情况	单条、“平直”状 分叉或台阶或锯齿状 网状或龟裂形貌					
		啮合和间隙情况	啮合好、间隙小、裂尖尖锐 啮合差、间隙大、裂尖圆钝					
		与显微组织的关系	在夹杂物处 在某一相组织处 与显微组织无关					
断口信息	断口的形貌和特征	与晶粒边界的关系	在晶粒边界或相界处 在晶内或相内 既在晶界也在晶内处					
		与晶面晶向的关系	在某一特定的晶面或晶向 非特定的晶面、晶向 混合情况					
		断口附近的残留塑性变形	塑性变形大、断口凹凸不平 塑性变形小、断口比较平直					
		断口的颜色	断口为本色 断口上有氧化或腐蚀产物的颜色					
		断口的形貌特征	纤维状(鹅毛绒状) 结晶状(颗粒状) 放射状(人字纹) 贝壳状(弧线状)					
	断口的形貌和特征	微观断口的形貌特征	韧窝(撕裂棱、微孔等) 解理(河流、扇形、台阶等) 沿晶(岩石、冰糖块等) 条带(辉纹、“轮胎”痕迹等) “鸡爪状”形貌 腐蚀产物(氧化物、腐蚀产物、泥纹等) 其它形貌					
		材料腐蚀介质和特征形貌	碳钢及合金钢在 HCl、碱、硝酸盐、HNO <sub>3</sub> 、海岸大气、工业大气、H <sub>2</sub> S、H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + HNO <sub>3</sub> 等中 铬不锈钢在 NaCl、氧化物、氟化物、溴化物、碘化物、HCl、海岸大气、工业大气、水及蒸汽、H <sub>2</sub> S 等中 奥氏体不锈钢在氟化物、氯化物、碱、海岸大气等中 奥氏体不锈钢在碱、FeCl <sub>2</sub> 、FeCl <sub>3</sub> 、H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 等中 材料上有腐蚀性的介质					
		腐蚀形貌特征	腐蚀产物附着、剥离 表面颜色发暗、敲击声音频率降低 腐蚀坑					
		应力性特征	静载荷 ( $\sigma_b$ 或 $k_{Ic}$ ) 交变载荷 ( $\sigma_{-1}$ ) 冲击载荷 ( $a_{Ic}$ 或 $k_{Ic}$ )					
		应力性特征						

## 2 几个值得注意的问题

### 2.1 关于疲劳断裂模式的诊断依据(规则)问题

疲劳断裂的诊断依据,宏观特征是疲劳弧线(贝壳花样),微观特征是疲劳条带,两者只要有一项即可,不必两者俱全。其他的疲劳断裂特征还有疲劳台阶(疲劳沟线)、轮胎花样(只有在大应力低周疲劳时或在某些特殊的合金或条件下才产生)只能作为辅助依据。

在下述情况下,因为微观的疲劳条带特征不明显,因此最好用宏观疲劳弧线(贝壳花样)作疲劳断裂模式的诊断依据:超高强度钢,甚至高强度钢,或高强度铝合金;低周疲劳或疲劳断裂的扩展速率很大时(如大于该合金在正常条件下的静载条件下断裂的微观韧窝尺寸时),条带变为成排的韧窝带;腐蚀性较强条件下的腐蚀疲劳断裂,微观疲劳条带被微观的腐蚀特征所掩盖,但宏观的疲劳弧有时被宏观的腐蚀弧所替代;铸造合金的疲劳断裂时的疲劳条带有时被该合金的铸造合金显微组织特征所掩盖;疲劳源区的疲劳断裂微观特征——疲劳条带由于疲劳裂纹的扩展速率很小,加上疲劳匹配面的相对接触多次造成磨损,疲劳条带特征模糊,不易识别,有时还可能被源区的滑移线干扰;片状珠光体钢的疲劳断裂的微观特征有可能被珠光体片的形态所干扰,不易区分识别。

对疲劳断裂模式中的各二级疲劳断裂模式的诊断依据主要靠参数诊断依据。

一般疲劳(室温空气中的疲劳)与腐蚀疲劳,除了在断口上找到具体导致疲劳的腐蚀产物或痕迹外,最重要的是靠腐蚀参量的诊断。各种具体的腐蚀疲劳断裂模式更是要找到“具体的、特有的”腐蚀参量才行。

一般疲劳断裂模式与高温疲劳断裂模式的区别则在于前者发生在室温下,后者发生在高温下,因此两者的诊断依据除了要寻找断口在高温下的氧化(或腐蚀)的痕迹之外,最主要的是确定其温度环境参数。

机械疲劳断裂模式与热疲劳断裂模式之间的差别主要是前者的交变(或循环)应力来源于机械载荷,而后者因温度交变引起疲劳破坏。当然这两者疲劳断裂的断口形貌上也有差别,前者较为“典型”、“正规”,而后者较为“不典型”、“条带较宽”、“二次裂纹较多”,还有氧化或腐蚀的痕迹。

高周疲劳断裂模式与低周疲劳断裂模式之间

的差别除了断口上的条带间距(前者小、后者宽)以外,主要是要诊断应力参数和寿命参量,前者的应力一般小于材料的屈服应力,断裂寿命大于  $10^5$  次,而后者的应力则往往大于材料的屈服应力,断裂寿命小于  $10^5$  次。

拉-拉疲劳断裂模式与接触疲劳断裂模式在断口上有很大的差别,前者疲劳源一般在零件的表面应力集中或夹杂物处或起源于远离表面的材料缺陷处,而后者则起源于零件接触部位的次表面,形成所谓的“鱼眼”断口,随着接触应力的加大,“鱼眼”中心逐渐向零件表面移动,除此之外,还要分析两者的工况受力参数,前者是拉-拉应力或弯曲应力交变引起的,后者则是由于交变接触应力造成的。

至于一般的腐蚀疲劳断裂模式与应力腐蚀疲劳断裂之间在断口上很难找到差别,而主要是要分析引起疲劳断裂的腐蚀介质与材料之间是否有应力腐蚀的匹配关系。一般腐蚀断裂模式的腐蚀介质与材料无应力腐蚀匹配关系,而应力腐蚀疲劳断裂的腐蚀介质与材料有应力腐蚀的匹配关系。这就是说,区分两者的主要依据是腐蚀介质的参数分析和确认。

### 2.2 关于应力腐蚀、氢脆(发纹、白点)、氢腐蚀和腐蚀疲劳等断裂模式的诊断依据(规则)问题

应力腐蚀从定义上来看是腐蚀介质和应力(可以是施加的外应力,也可能是残余的应力,一般要求是正应力)联合作用下的破坏。从原理上讲它是一种局部电化学作用引起的阳极溶解机制(如最常见的机械-电化学反应假说)。值得指出的是,在应力腐蚀阳极溶解的同时,其阴极(或称正极)却是析氢反应,析出的氢气(氢原子)从原理上看有可能引起阴极材料的“氢脆”。因此,应力腐蚀和“氢脆”是一对“双胞胎”,是很难截然分离的。从这个意义上讲,应力腐蚀应该认为是应力腐蚀+氢脆,只不过常常是应力腐蚀的特征很突出,而“氢脆”的特征不明显而已。

真正的氢脆(发纹或白点)与应力腐蚀中的阴极“氢脆”有很大的不同:第1,氢气(或氢原子)的来源不同,应力腐蚀-氢脆中的氢来自电化学阴极反应,而氢脆中(发纹或白点)的氢则来源于金属内部的溶解析出;第2,两者发生的过程不同,应力腐蚀-氢脆是发生在电化学反应过程;而氢脆(发纹或白点)则是发生在原来溶解在金属内的氢原子的析出过程中(如锻件的以较快速度冷却的过程中);第3是诊断的依据不同,应力腐蚀-氢脆

主要采用应力腐蚀断裂模式的诊断依据,如表现为沿晶断裂、裂尖分叉现象等,而氢脆(发纹或白点)在平行于锻造变形方向(纵向)上表现为白点,在垂直于变形方向(横向)则表现为发纹,此外钢坯的脱氢参数分析和锻造工艺参数的分析也是十分重要的诊断依据;第4,预防的措施也不相同,应力腐蚀-氢脆的预防措施主要是防止电化学过程的发生,以及尽可能使应力(外应力+残余应力)小于应力腐蚀的门槛值(或应力强度因子 $K_I$ 值小于应力腐蚀临界应力强度因子门槛值 $K_{ISCC}$ ),而氢脆(发纹或白点)的预防措施则主要是在钢(或其他金属)的熔炼过程中减小氢的含量(如采用除氢工艺等),在锻造过程中要采用慢冷,使原来溶入金属材料中的氢原子逸出金属的表面,而不致在金属内部析出,形成氢气泡,这种氢气泡在随后的变形过程成为发纹和白点。值得指出的是,除了氢脆(发纹、白点),还有一种氢脆,这种氢脆的氢来源于电镀工艺,如同应力腐蚀中氢脆的氢来源于电化学反应的阴极析氢过程一样,它也是电镀时的阴极金属氢吸收(扩散)造成的。电镀工艺中造成的氢脆与一般应力腐蚀中的氢脆不同的是,它没有应力腐蚀的干扰,因此它表现出典型的氢脆行为。对这种氢脆的诊断,除了一定要分析电镀及其随后有无除氢热处理工序以外,有时还可以在其微观的“平坦”断口上留下氢的积聚点的痕迹——人们称之为“鸡爪花样”。但要小心认定是否是真正的“鸡爪花样”。

氢腐蚀与氢脆都是由于氢的析出引起的一种脆性损伤,但它们析出氢的过程不同,氢脆析出纯的氢,由氢原子结合而成氢分子,再由多个氢分子在某处(可能是缺陷处、夹杂物处等)聚集成氢气泡,这种氢气泡的聚集处在断口上的微观形态就是“鸡爪花样”。而氢腐蚀是氢原子与渗碳体发生化学反应( $4H + Fe_3C \rightarrow CH_4 + 3Fe$ )形成甲烷气体( $CH_4$ ),并在晶界(一般在晶界)或缺陷处聚集成“空洞”。由于 $H_2$ 与 $CH_4$ 均具有还原性,气泡的表面均被还原成“白色”(金属本色),一旦断裂,它们均已逸出,不存在 $CH_4$ 气的“痕迹”。因此,要从气体性质来区分诊断它们是困难的。一般要进行工艺参数的分析,有时在氢腐蚀 $CH_4$ 气泡的附近有可能找到渗碳体( $Fe_3C$ )减少的情况,也可以作为参考的断口诊断依据,但要从断口上看到渗碳体形貌,并判断其多少是一种叫做“断口金相”的技术,技术要求较高,要认真的分析才能得出明确

的结论。还可以在断口近平行于断口切面的金相检验和分析中得出是否是氢腐蚀的旁证。

腐蚀疲劳断裂模式的诊断依据主要是其宏观断口形貌,因此,对腐蚀疲劳断裂的断口不能进行清洗。腐蚀疲劳断裂与应力腐蚀的甄别主要从应力循环与否和腐蚀介质与其材料之间是有“应力腐蚀匹配”关系。

### 3 结束语

机械失效模式、原因和机理诊断的理论、技术和方法研究已有雏形,但仍需要加强、深化和系统化。我们的总体目标是要对每起机械失效事故的模式、原因和机理进行准确的、客观的、科学的和适时的诊断,为此,应在实践中不断积累经验和总结规律的同时,强化对机械失效模式、原因和机理深入和系统的科学研究,从而不断揭示失效的规律和本质,提高我们诊断的能力和水平,并逐步建立和发展一整套关于机械失效事故模式、原因和机理诊断理论、思路、技术和方法的学术体系——机械失效诊断学。

### 参考文献 (References)

- [1] 钟群鹏,王仁智,陈玉民,等.我国机电装备失效分析预测预防实践和学术方面的重大进展——失效学体系的形成和发展[A].第三次全国机电装备失效分析预测预防战略研讨会论文集[C].北京,1998.5~25  
Zhong Qunpeng, Wang Renzhi, Chen Yumin, et al. The principal improvements of academic and practical aspects in chinese mechanical & electrical equipment failure analysis, prevention and forecast——failure investigation architecture formation and development [A]. Proc 3rd Chinese Conf Mechanical & Electrical Failure Analysis, Prevention and Forecasting Strategy [C]. Beijing, 1998. 5 ~ 25 (in Chinese)
- [2] 钟群鹏,傅国如,张 峥,等.机械装备失效研究的内涵和科学问题的探索[J].机械工程学报,2003,39(10):13~20  
Zhong Qunpeng, Fu Guoru, Zhang Zheng, et al. Connotation and scientific investigation in mechanical equipment failure analysis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(10): 13 ~ 20 (in Chinese)
- [3] 刘民治,钟明勋.失效分析的思路与诊断[M].北京:机械工业出版社,1999  
Liu Minzhi, Zhong Mingxun. Ideological road and diagnosis of failure analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 1999 (in Chinese)
- [4] 钟群鹏,田永江.失效分析基础[M].北京:机械工业出版社,1989  
Zhong Qunpeng, Tian Yongjiang. Basis of mechanical failure analysis [M]. Beijing: China Machine Press, 1989 (in Chinese)