

陆世英 王欣增 李丕钟 王洁 著

# BUXIUGANG

不锈钢应力腐蚀事故分析  
与耐应力腐蚀不锈钢

原子能出版社

# 不锈钢应力腐蚀事故分析 与耐应力腐蚀不锈钢

陆世英 王欣增 著  
李丕钟 王 洁

原子能

## 内 容 简 介

本书共分两部分，第一部分介绍了不锈钢应力腐蚀事故分析的步骤和方法；不锈钢应力腐蚀的宏观与微观特征，裂纹、断口形貌以及与晶间腐蚀、腐蚀疲劳等其它局部腐蚀破坏的区别与鉴别；详细讨论了影响不锈钢应力腐蚀的环境、力学和材料因素及其在实际工程事故中的作用；列出了国内一些工业部门不锈钢设备、部件应力腐蚀事故21例及事故产生的原因和裂纹、断口的金相图谱。第二部分介绍了为解决18-8、18-12-Mo等Cr-Ni奥氏体不锈钢的应力腐蚀而发展的高铬铁素体不锈钢， $\alpha+\gamma$ 双相不锈钢以及一些高镍不锈钢和合金的成分、组织、性能及其选择和使用条件。

本书可供冶金、化工、原子能、机械、石油、轻纺等工业部门中不锈钢的生产、使用、科研、设计等单位的工程技术人员使用，也可做为高等院校的金属材料、金属腐蚀与保护和化工机械等专业师生的参考书。

### 不锈钢应力腐蚀事故分析

#### 与耐应力腐蚀不锈钢

陆世英 王欣增 著  
李丕钟 王 洁

原子能出版社出版  
(北京 2108 信箱)

八九九二〇部队印刷厂印刷  
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16·印张24 5/8·字数429千字

1985年9月第一版·1985年9月第一次印刷

印数1—4,300·统一书号：15175·579

定价：4.50元

# 前 言

不锈钢，特别是大量使用的18-8、18-12-Mo等Cr-Ni奥氏体不锈钢的应力腐蚀，60年代以来已经成为国内外不锈钢领域中的重要研究课题，同时也是应用不锈钢的各工业部门急待解决的重要工程问题。大量统计表明，Cr-Ni不锈钢的应力腐蚀破裂事故已占不锈钢湿态腐蚀破坏事例的40—60%。Cr-Ni奥氏体不锈钢的应力腐蚀几乎遍及使用不锈钢的所有工业部门，其中尤以大量使用不锈钢的化工、石油、原子能、湿法冶金、动力工业等更为突出。由于应力腐蚀破裂事故，导致工厂停工，设备非计划检修、拆换，建设工程推迟等等亦经常发生。一些重要的不锈钢设备、部件，因出现应力腐蚀破裂所造成的经济损失是相当惊人的。为此，对工程中所出现的应力腐蚀事故进行分析，以确定其断裂性质，找出断裂原因，进而采取防止应力腐蚀再现的措施是至关重要的。由于应力腐蚀的复杂性，截至目前为止，虽然人们对不锈钢产生应力腐蚀的机理尚未取得统一的见解，但从材料选择、应力消除、环境控制等方面入手，防止应力腐蚀的出现则是完全可能的。由于选择适宜的耐应力腐蚀材料是防止Cr-Ni奥氏体不锈钢应力腐蚀的根本措施之一，为此，本书在介绍不锈钢应力腐蚀工程事故分析的同时，还详细介绍了耐应力腐蚀不锈钢的成分、组织、性能及其合理选择。

本书分为两部分，共九章。第一、二、三、四章和第七、九章由陆世英同志执笔。第五章由王欣增同志执笔。第六章由王欣增、王洁二同志整理并由王欣增同志执笔。第八章由王欣增和李丕钟同志共同执笔。全书最后由陆世英同志校阅。

本书的完成，曾得到与作者们共同工作的院内外许多同志的热情支持和协作。书中有些数据和图片的获得就是大家集体劳动的结果。秦森同志和江君照同志还在百忙中对本书第一部分进行了仔细的审阅。在此一并表示谢意。

由于作者水平所限，又加时间仓促，书中错误和不当之处尚希读者给予批评指正。

作者

于北京钢铁研究总院

1982年6月

# 目 录

## 第一部分 不锈钢应力腐蚀事故分析

第一章 金属应力腐蚀的研究简史及不锈钢应力腐蚀问题的现状 .....	1
第二章 不锈钢应力腐蚀事故分析 .....	5
§2.1 事故分析目的 .....	5
§2.2 事故分析步骤 .....	5
§2.3 事故分析方法 .....	7
第三章 产生应力腐蚀的不锈钢设备、部件的外观和裂纹断口形貌特征的观察 .....	8
§3.1 设备部件的宏观检查 .....	8
3.1.1 普查 .....	8
3.1.2 详查 .....	9
3.1.3 对不锈钢应力腐蚀实际事故进行普查、详查后获得的主要印象 .....	9
3.1.4 破损表现规律的统计分析 .....	12
§3.2 应力腐蚀裂纹的宏观及微观形貌 .....	17
3.2.1 应力腐蚀裂纹的宏观形貌 .....	17
3.2.2 应力腐蚀裂纹的微观形貌 .....	20
§3.3 应力腐蚀断口的宏观及微观形貌 .....	25
3.3.1 断口的分类 .....	25
3.3.2 断口形貌与微观组织的显示和断口蚀坑技术 .....	26
3.3.3 一些常见微观断口形貌的说明 .....	27
3.3.4 宏观断口分析手段和不锈钢应力腐蚀宏观断口形貌 .....	29
3.3.5 微观断口分析手段和不锈钢应力腐蚀微观断口形貌 .....	30
§3.4 应力腐蚀断裂与其它局部腐蚀破坏的区别与鉴别 .....	38
3.4.1 不锈钢晶间应力腐蚀与一般晶间腐蚀的区别与鉴别 .....	40
3.4.2 不锈钢应力腐蚀与腐蚀疲劳的区别与鉴别 .....	48
第四章 不锈钢产生应力腐蚀断裂的基本条件和它们的作用 .....	56
§4.1 基本条件 .....	56
§4.2 应力的作用 .....	56
4.2.1 应力的分类 .....	56
4.2.2 残余应力的主要来源 .....	57
4.2.3 腐蚀产物体积增加所产生的应力 .....	64
4.2.4 应力的作用和应变速度的影响 .....	65
4.2.5 应力在不锈钢应力腐蚀断裂事故中所起作用的实例 .....	73
§4.3 介质的作用 .....	81
4.3.1 引起不锈钢应力腐蚀的常见介质及其来源 .....	81
4.3.2 介质的影响 .....	83

4.3.3	在应力腐蚀事故分析中, 确定引起应力腐蚀介质因素的主要手段	105
4.3.4	在实际应力腐蚀工程事故中, 所见介质因素的影响	107
	<b>第五章 不锈钢应力腐蚀的验证试验</b>	116
§5.1	验证试验的目的	116
§5.2	验证试验方法	116
5.2.1	介质的选择	117
5.2.2	样品的制备	123
5.2.3	应力腐蚀试验方法	124
§5.3	验证试验举例	130
	<b>第六章 不锈钢设备和部件应力腐蚀工程事故实例</b>	137
例1	二氯化烷裂解炉预热管道的破裂	137
例2	CO <sub>2</sub> 高压热交换器管的破裂	138
例3	发电厂锅炉高温再热器管的自然放置损坏	140
例4	发电厂锅炉过热器管的破裂	141
例5	炼油厂一蒸馏装置常压塔顶冷凝器管的损坏	143
例6	卸料用不锈钢管的破裂	144
例7	炼油厂反应器用浮阀的损坏	145
例8	CO <sub>2</sub> 压缩机三段冷却器管束的断裂	147
例9	水泵站紧固螺母的损坏	149
例10	不锈钢管道焊缝的破裂	151
例11	软水加热器的破裂	152
例12	有机溶剂装置的泄漏	154
例13	合成氨装置CO <sub>2</sub> 再生塔内件的损坏	155
例14	炼油厂反应产物换热器的破裂	157
例15	紧固螺栓的断裂	159
例16	海水冷却器的破裂	160
例17	热交换器管的破裂	162
例18	18-8热交换器管的破裂	164
例19	化工厂某设备急冷室管壁的破裂	166
例20	化肥厂冷却器管的破损	168
例21	1Cr18Ni9Ti不锈钢管的破裂	170
	<b>第二部分 耐应力腐蚀不锈钢和合金</b>	172
	<b>第七章 高铬铁素体不锈钢</b>	174
§7.1	影响普通高铬铁素体不锈钢广泛应用的几个问题	174
7.1.1	高铬铁素体不锈钢的三个脆化区	174
7.1.2	脆性转变温度高和缺口敏感性大	179
7.1.3	较高的晶间腐蚀倾向	182
§7.2	高铬铁素体不锈钢的耐应力腐蚀性能	184
7.2.1	在高浓氯化物中	184
7.2.2	在热水和高温水中	192
7.2.3	在苛性水溶液中	195
7.2.4	铁素体不锈钢的氢脆	196

§7.3 耐应力腐蚀铁素体不锈钢的成份与性能 .....	199
7.3.1 Cr18型铁素体不锈钢 .....	200
7.3.2 Cr25型铁素体不锈钢 .....	207
7.3.3 Cr28型铁素体不锈钢 .....	219
7.3.4 Cr30型铁素体不锈钢 .....	226
第八章 双相不锈钢 .....	232
§8.1 双相不锈钢中的相 .....	232
8.1.1 合金元素的作用 .....	232
8.1.2 相成分——合金元素在两相中的分配 .....	234
8.1.3 相比例的测定方法 .....	235
§8.2 双相不锈钢中的组织转变 .....	237
8.2.1 二次奥氏体的析出 .....	237
8.2.2 碳化物析出 .....	239
8.2.3 金属间相的形成 .....	239
§8.3 双相不锈钢的耐应力腐蚀性能 .....	242
8.3.1 耐应力腐蚀性能 .....	242
8.3.2 双相不锈钢的应力腐蚀机理 .....	245
8.3.3 影响双相不锈钢耐应力腐蚀性能的一些因素 .....	247
§8.4 耐应力腐蚀双相不锈钢的成分和性能 .....	258
8.4.1 Cr18型双相不锈钢 .....	258
8.4.2 Cr21型双相不锈钢 .....	274
8.4.3 Cr25型双相不锈钢 .....	281
第九章 高镍不锈钢和合金 .....	308
§9.1 高镍不锈钢和合金的成分与组织 .....	308
§9.2 镍对Fe-Cr-Ni合金耐应力腐蚀性能的影响 .....	310
§9.3 耐应力腐蚀高镍不锈钢和合金的成分与性能 .....	315
9.3.1 00Cr25Ni25Si2V2Ti(Nb)高镍不锈钢 .....	315
9.3.2 00Cr20Ni25Mo4.5Cu高镍不锈钢 .....	322
9.3.3 Cr20Ni32型耐应力腐蚀合金 .....	329
9.3.4 新13号耐应力腐蚀合金 .....	341
9.3.5 1Cr15Ni75Fe耐应力腐蚀合金 .....	348
9.3.6 0Cr30Ni60Fe10耐应力腐蚀合金 .....	357
小结 .....	366
参考文献 .....	369

# 第一章 金属应力腐蚀的研究简史及不 锈钢应力腐蚀问题的现状

有色金属产生应力腐蚀断裂 (SCC)● 的最早事例系1886年 Au-Cu-Ag 合金在  $\text{FeCl}_3$  溶液中的破坏。随后,黄铜弹壳的应力腐蚀成为最引人注目的实例<sup>[1]</sup>。那时人们对应力腐蚀破坏还不认识,因此,仅根据其宏观的破裂特征曾称为干裂,即象风干的木材那样的开裂,或根据其每到雨季就出现破裂而称作季裂。到本世纪初才知道,引起黄铜弹壳断裂的内因是冷加工留下的残余应力,外因是由于大气中含有微量的氨。此种断裂在金属表面上并不产生明显的腐蚀产物,而当时宏观上也没有发现表面有潮湿现象,因此,长期以来人们并没有把这种破裂同电化学腐蚀联系起来。直到1918年, W.H.Bassett 才指出了此种破裂与腐蚀的关系并建议命名为腐蚀断裂(开裂,破裂)<sup>[2]</sup>。1919年以后,铝和铝合金也相继出现此种断裂。60年代初以来,钛合金和锆合金的应力腐蚀断裂也不断出现。在钢铁材料中,最早的应力腐蚀断裂的例子是1865年铆接锅炉用碳钢的碱脆。1930—1937年发表了Cr-Ni奥氏体不锈钢产生氯化物穿晶型应力腐蚀的报告。1940年, Hodge和Miller将应力腐蚀与晶间腐蚀明确地区别开来并认为不锈钢的应力腐蚀与氯化物有关<sup>[3]</sup>。

由于30年代不锈钢的生产和使用量还较少,应用的范围也还不广,应力腐蚀断裂事故相对来说不多,并没有引起人们的足够重视。应力腐蚀在人们心目中仅是一种有趣的现象而并未认识到它是一个严重的实际工程问题。在1944年国际上召开了首次有关应力腐蚀问题的学术讨论会后<sup>[4]</sup>,随着化学、石油、动力等工业向高温、高压方向发展,不锈钢品种的增长、产量的增加和使用范围的扩大,应力腐蚀断裂事故的不断增多,不锈钢,特别是大量使用的Cr-Ni奥氏体不锈钢的应力腐蚀断裂问题才成为化工和其它工业部门的重要问题。文献[5]最早总结了化工、石油、造纸、动力等工业部门中129件Cr-Ni不锈钢应力腐蚀破坏的实例。50年代末期,开始报道18-8不锈钢在核动力工程中的应力腐蚀断裂。而60年代中期以后,镍基耐蚀合金在核蒸发器用途中的应力腐蚀问题也开始出现<sup>[6]</sup>。目前,不锈钢,特别是Cr-Ni奥氏体不锈钢的应力腐蚀断裂不仅成了不锈钢领域中最重要而又急待解决的实际工程问题,而且也是日益引人注目的重大的理论课题。

首先, Cr-Ni奥氏体不锈钢的应力腐蚀破坏事故在数量上已居整个湿态腐蚀破坏事故的首位。

图1-1-1和图1-1-2为在大量统计的Cr-Ni不锈钢湿态腐蚀事故中,应力腐蚀事故所占的百分数。从图中可看出:

1. 应力腐蚀破坏事故已占Cr-Ni不锈钢整个湿态腐蚀破坏事例的首位,高达40—60%。而且,这种趋势从50年代末期开始,一直延续到现在。在应力腐蚀断裂事故中,穿晶形式的

● 应力腐蚀断裂 (SCC—Stress Corrosion Cracking)。



占绝大多数，而晶间形式的数量相对较少。

2. 孔蚀，包括缝隙腐蚀占20%左右。其数量居湿态腐蚀破坏事故的第二位。但其绝对事例数仅为应力腐蚀的1/3左右。显然数量远比应力腐蚀事故少得多。

3. 在50年代以前引人注目的晶间腐蚀破坏事例已很少，一般不超过10%。这与超低碳不锈钢的大量应用有关。根据图1-1-2的统计，70年代以来晶间腐蚀事故数继续降低，显然与不锈钢生产中二次精炼工艺的发展，超低碳不锈钢的生产有关。

4. 腐蚀疲劳已经作为Cr-Ni不锈钢的腐蚀事故在工程中出现，其事例的绝对值甚至达到了与均匀（一般）腐蚀相近的程度，并已开始引起了国内外的重视。

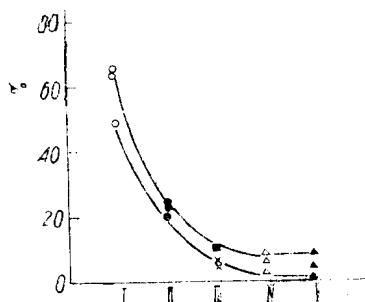


图1-1-1 不锈钢湿态腐蚀破坏事故中，各种类型的腐蚀破坏所占的百分数（近800件实例的统计结果）

- 应力腐蚀断裂（I）；
- 孔（点）蚀和缝隙腐蚀（II）；
- ×——晶间腐蚀（III）；
- △——均匀（一般，全面）腐蚀（IV）；
- ▲——腐蚀疲劳和其它形式的破坏（V）。

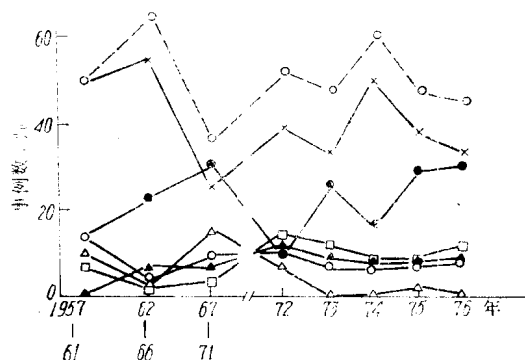


图1-1-2 不锈钢湿态腐蚀破坏形态随年代的变化

- 穿晶+晶间应力腐蚀；
- ×——穿晶应力腐蚀；
- ▲——晶间应力腐蚀；
- 孔（点）蚀（包括缝隙腐蚀）；
- 腐蚀疲劳；
- 均匀（一般）腐蚀；
- △——晶间腐蚀。

第二，应力腐蚀几乎遍及使用Cr-Ni不锈钢的所有工业部门。

国内外的化工、石油、动力、航空、湿法冶金、原子能、合成纤维、制盐、造纸等工业中均出现了不锈钢的应力腐蚀破坏事例<sup>[7]</sup>，其中尤以化工、原子能和石油工业等使用不锈钢数量大的部门为最多。这三个工业部门中，几乎每个使用Cr-Ni不锈钢较多的工厂均存在着不同程度的应力腐蚀断裂问题。国内实际调研表明，应力腐蚀严重的一些大工厂、甚至可同时发现数例以至十例以上的应力腐蚀事故<sup>[8]</sup>。

第三，应力腐蚀几乎出现在目前工程中所选用的所有常用不锈钢和合金中。

在工程中，为解决腐蚀问题经常选用且用量最大的18-8型和18-12-Mo型Cr-Ni钢中，例如，1Cr18Ni10，0Cr18Ni10，00Cr18Ni10，1Cr18Ni9Ti，0Cr18Ni9Ti，0Cr18Ni11Nb，1Cr18Ni10Mo2Ti，0Cr18Ni12Mo2Ti，00Cr18Ni14Mo2，1Cr18Ni12Mo3Ti，0Cr18Ni13Mo3Ti，00Cr18Ni14Mo3等十几个牌号，应力腐蚀实例最为常见，约占整个不锈钢和耐蚀合金应力腐蚀事例的80%以上。此外，更高牌号的不锈钢，例如，Cr25Ni20，Cr18Ni14Mo2Cu2，Cr20Ni29Mo2Cu2，Cr23Ni28Mo3Cu3Ti等也有不少应力腐蚀断裂的事例。甚至含Ni更高的铁镍基和镍基合金，例如，0Cr20Ni32Fe（Incoloy800），Ni70Cu30（Monel400），0Cr15Ni75Fe（Inconel500），0Cr16Ni60Mo16W4（Hastelloy C）等，在一些条件

下,也产生了应力腐蚀破坏。

除Fe-Cr-Ni合金外,马氏体Cr不锈钢(Cr13型和Cr17Ni2型),高Cr低Ni的双相不锈钢(00Cr18Ni5Mo3Si,0Cr25Ni5Mo2)以及各种高强度不锈钢(包括马氏体型,半奥氏体型和沉淀硬化型)也均有应力腐蚀断裂的事例。

第四,不锈钢应力腐蚀破坏可导致工厂的停产,设备的非计划检修、拆换,工程计划的推迟等等,从而给经济上带来很大损失。与此同时,应力腐蚀有时还会引起人身的伤亡等事故。

由于不锈钢设备和构件的应力腐蚀断裂,都是在没有产生任何明显的宏观变形,不出现任何预兆的情况下发生的迅速而突然的破坏,因此,截至目前为止,尚难在设备和部件生产、使用和运行过程中进行有效的监测(或在役检查)。同时,不锈钢的应力腐蚀破坏既可以出现在设备使用和生产、运行过程中,也可以出现在设备使用以前,甚至在它们加工、成型和制造期间。因此,应力腐蚀的迅速、突然产生,会引起非计划的停产、检修和设备的更换。计划中的工程,由于设备未使用或在加工、制造期间就产生了应力腐蚀破坏,只有重新投料,重新加工制造设备或重新更换已破损的设备,从而使工期显著推迟。这些都会在经济上造成很大损失。在我们所遇到的不锈钢应力腐蚀事故中,仅一项事例就引起高达百万元以至数百万元的经济损失。

综上所述,可以看出,50年代以前,晶间腐蚀破坏是Cr-Ni奥氏体不锈钢中的重要问题,而50年代末期,特别是60年代以来,不锈钢领域中最重要、最急待解决的课题就是Cr-Ni奥氏体不锈钢的应力腐蚀断裂问题。

正是由于上述原因,国际上不锈钢应力腐蚀断裂的研究非常活跃。1956—1966年,曾多次召开专门会议,讨论交流金属应力腐蚀的学术问题,出版了专集<sup>[4,9-11]</sup>。1973年,国际上召开了铁基合金应力腐蚀与氢脆会议<sup>[12]</sup>。在这些会议和专集中,有大量论文涉及不锈钢。不锈钢的应力腐蚀断裂问题也是历届国际腐蚀会议交流的重要内容。近十多年来,在各种刊物上发表的有关应力腐蚀的论文、报告,其数量之多也远远超过对其它任何腐蚀问题的报道。

由于金属的应力腐蚀断裂系由应力、腐蚀的共同作用而导致的断裂,它涉及金属、应力和介质环境三个因素。因此,金属物理、金属化学和金属力学工作者,从各自的领域出发对金属的应力腐蚀问题进行了大量的研究工作,做出了各自的贡献。图1-1-3系从各个学科的角度对金属应力腐蚀问题的系统分析<sup>[13,14]</sup>。图的右方指出了与晶界有关的各种现象,如晶界沉淀、晶界贫乏区、晶间吸附、偏聚等;图的中部则示出了裂纹尖端的应力场强度、塑性区、相变、吸附反应、位错交互作用以及裂纹内部的电化学反应和输送过程;图的上方示出了金属表面的电化学反应和产物以及表面膜的破裂、修复和成分的变化;图的下方还指出了应力作用下位错和亚结构的交互作用。可以认为,此图基本上概括了目前已知的影响不锈钢晶间型、穿晶型以及晶间+穿晶混合型应力腐蚀断裂的重要过程和因素。

1962年开始从金属物理角度研究位错与穿晶应力腐蚀断裂的关系。采用预裂纹试样,引入断裂力学研究应力腐蚀断裂问题则始于1965年。有关应力腐蚀裂纹中溶液性质的资料是1969年由Brown取得的。而从电化学方面研究应力腐蚀过程,虽然早在1932年Hoar就曾采用极化曲线来阐明铁的湿态腐蚀过程,但应用于腐蚀研究还是1949年以后的事情。前面提到的碳钢碱脆现象早在上个世纪就已为人们所了解,但采用恒电位和低形变速率试验技术研究

碳钢在苛性介质中的应力腐蚀行为，则始于近一个世纪后的1967年。采用恒形变速率试验技术研究不锈钢的应力腐蚀行为只是在不久以前才开始进行。近来，采用透射电子显微镜薄膜技术研究微观组织结构参量对不锈钢应力腐蚀断裂的影响已较前更加深入，而采用扫描电子显微镜观察应力腐蚀断口已经相当普遍。应用蚀坑技术研究断裂表面的结晶学性质已受到普遍重视。断裂力学从应用于高强度不锈钢，进而应用于低强度的Cr-Ni奥氏体不锈钢也取得了初步进展。有关不锈钢表面膜的各种分析测试技术，例如椭圆仪(Ellipsometry)，X射线显微分析仪(电子探针)，扫描电镜各种能谱，光电子谱仪(ESCA)和俄歇谱仪(AES)等也均得到不同程度的应用。但是，不锈钢应力腐蚀断裂至今仍无公认的机理。同时，有许多与解决实际工程中应力腐蚀密切相关的问题，例如试验室内加速试验方法的研究以及它们与实际使用条件下应力腐蚀断裂的关系，不锈钢在各种不同环境条件下应力腐蚀断裂之间的区别和相互联系，耐应力腐蚀不锈钢和合金的发展等等，都有待于进一步研究解决。

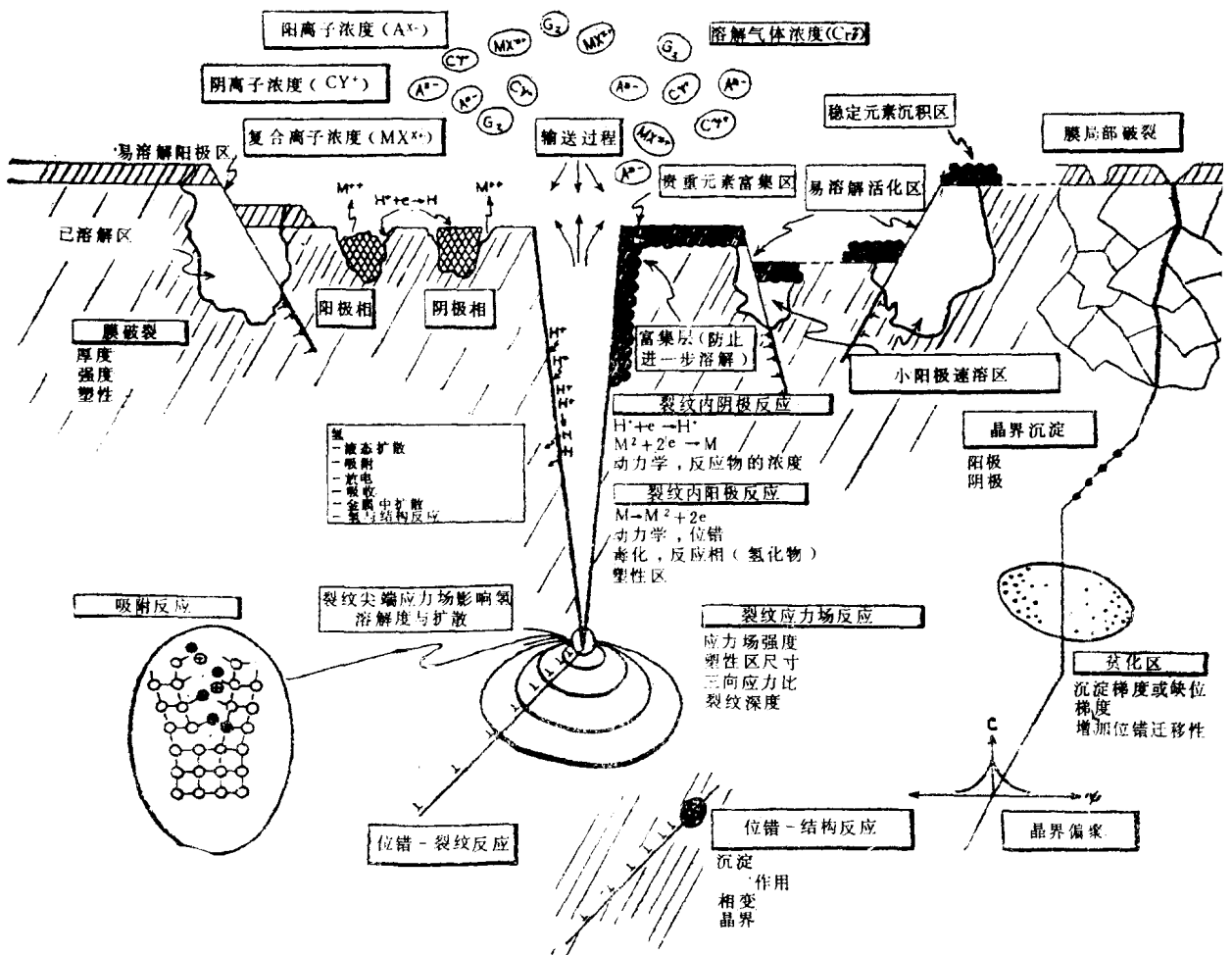


图1-1-3 影响应力腐蚀重要过程的综合分析图

## 第二章 不锈钢应力腐蚀事故分析

### §2.1 事故分析目的

在不锈钢制设备、部件出现腐蚀破坏后，不能采取坏了就换，换下的设备、部件一扔了事的做法。这样，不仅解决不了腐蚀断裂问题，而且会给国家造成巨大的浪费。正确的做法是对破损的设备和部件进行认真的事事故分析，其主要目的是：

- 第一，确定不锈钢设备和部件腐蚀断裂的性质，找出引起腐蚀破坏的原因；
- 第二，提出防止或克服腐蚀破坏事故的措施，防患于未然，不使事故再现；
- 第三，收集和整理重要的现象和数据，为研究和验证腐蚀断裂机理提供可靠的依据。

### §2.2 事故分析步骤

对于一些不锈钢制重要设备和重大腐蚀破坏事故的分析，不应简单从事，以免造成“误诊”。一般需采取下述步骤：

#### 1. 了解应力腐蚀的特征、产生条件和国内外同类事故的统计规律

特征，即宏观和微观形貌以及与其它破坏形态的区别和联系。

产生条件，即在何种情况下，具备哪些条件才能产生应力腐蚀破坏。

统计规律，即根据国内外所报道的大量应力腐蚀事故的统计，对产生应力腐蚀的常见钢种、应力来源、介质环境条件、设备和部件名称以及出现部位等等有一概括的了解。当然，在已经积累了大量资料且具有丰富实践经验的情况下，此一步骤可以从简或省略。

#### 2. 实际工况或现场的调查

除文献、资料调研外，为了针对所遇到的具体破坏事例进行事故的分析，还要进行实际工况或生产、使用现场的调查。

(1) 设备、部件所使用的不锈钢材生产工艺情况的调查。因为不锈钢设备、部件的应力腐蚀与钢材本身的成分、性能、生产工艺条件、交货状况、表面质量、应力状态等冶金因素直接有关。

(2) 破损设备或部件的加工制造工艺过程的调查。要了解从不锈钢材进厂到加工制成设备的全过程。

(3) 破损的设备实际使用情况和破坏发现过程的调查，其中包括国内正在使用的同类型设备情况的调查。因为产生与没有产生应力腐蚀破坏的同类型设备的对比，会给我们分析应力腐蚀原因提供重要的线索。

对产生应力腐蚀的设备的实际工况或现场的调查，一般应包括的项目和内容见下表。

应力腐蚀事故调查项目和内容

项 目	内 容
设备基本情况	设备使用单位 设备名称、型式、结构等 破损部件和部位 事故发生日期 设备（部件）使用时间 过去同一事故的发生情况
破损处的宏观形态	见本书“设备、部件的宏观检查”
材质情况	名称或钢号 提供单位，交货和使用状态 设备加工、制造单位及材料生产，设备加工、制造历史 化学成份 力学性能 内在及表面质量 规格、尺寸 材料使用前的保管情况
介质（环境）情况	工作环境 主要介质成分和浓度 外来介质 有害介质（ $Cl^-$ ， $OH^-$ 等）的有无及其含量 介质的温度 介质的pH值 溶解氧（或氧化剂）量 流速 腐蚀电位
应力情况	应力的性质 应力的来源 应力值（实测或计算）

### 3. 事故的分析和研究

这是不锈钢应力腐蚀断裂事故分析的核心。不锈钢的应力腐蚀断裂影响因素很多，涉及的学科广，现象比较复杂，因此对于一些重要设备的重大事故分析，最好由有关专业人员，例如从事材料、化学、物理、力学以及设计人员等组成不同的专题组来进行。

### 4. 实际使用条件的重复试验和试验室内的模拟试验

在事故分析和研究的基础上，当材料、时间、介质等条件允许时，可在出现应力腐蚀断裂的实际条件下进行重复试验，也可在试验室内模拟现场出现应力腐蚀断裂的条件或采用能预示实际条件下应力腐蚀断裂倾向的快速试验方法，对所观察到的应力腐蚀断裂现象和有关影响因素进行验证和模拟。

### 5. 讨论和总结

这是不锈钢应力腐蚀工程事故分析的最后阶段，也是最重要的一个阶段。此时，各种专业人员，可根据自己的分析，研究结果，从不同的角度发表意见，这样可以集思广益，较易得出正确的结论，还可从各个方面提出防止事故再现的措施并付诸实现。当然，对于一些简

单设备、部件或一般的应力腐蚀断裂事故和分析，上述步骤和人员组成方面有一些是可以简化的。

## §2.3 事故分析方法

为了对不锈钢应力腐蚀工程事故进行分析，一般采用的方法有：

第一，破损设备和部件的宏观检查。

宏观检查的目的在于了解破损情况的概貌。为分析破损原因、制定取样计划提供依据。

第二，裂纹和断口形貌的分析。

这是确定断裂性质的主要依据。因为工程事故分析的特点是通过分析裂纹和断口形貌去判断原来的断裂过程和断裂原因。因为裂纹和断口真实地记录着腐蚀断裂是如何产生的和如何进行的，它们的特征是确定断裂性质和断裂原因的可靠证据。

为了进行裂纹和断口形貌的观察和分析，采用的手段主要是光学和电子金相技术。常用的设备有光学显微镜、扫描电镜和透射电镜。这些设备各有优缺点，因此一般系搭配使用。

裂纹和断口形貌的分析，实际上是为了确定断裂的性质。

第三，工作介质（或周围环境）、腐蚀产物、污垢和锈层等的组成和结构的分析（其中包括裂纹内或孔、坑内积存物的分析）。

这是确定引起不锈钢应力腐蚀断裂的介质因素时不可缺少的。

对于组成或成分的分析一般采用化学分析（包括各种光谱分析）、电子探针微区分析和扫描电镜能谱分析等方法。必要时还可采用俄歇和光电子谱仪进行表面和界面的分析。结构分析一般可用X射线和电子衍射分析。

第四，应力的分析和测量。

静拉伸应力的存在是产生应力腐蚀断裂的必要条件。引起应力腐蚀最常见的应力有工作应力、热应力、结构应力以及由于各种原因造成的残余应力。工作应力和热应力一般可通过计算得到，而结构应力和各种残余应力则多采用应变片、X射线衍射聚焦法等来加以测定。

上述第三和第四实际是弄清楚引起应力腐蚀断裂的外因和内因。

第五，所用不锈钢成分、组织和性能的复验。

这实际上是检查所选用的材质有无异常。在复验过程中，除技术条件或验收标准中所规定的常规检验项目外，还可根据检查应力腐蚀性能的需要补充一些项目。一般复验的项目有：

1. 化学成分，
2. 力学性能，
3. 非金属夹杂，
4. 晶粒度，
5. 金相组织，
6. 晶间腐蚀、孔蚀、缝隙腐蚀和应力腐蚀的敏感程度，
7. 表面质量，
8. 交货状态的残余应力，
9. 其它需要复验的项目。

## 第三章 产生应力腐蚀的不锈钢设备、部件的外观和裂纹断口形貌特征的观察

### §3.1 设备部件的宏观检查

对于出现了应力腐蚀破坏的设备、部件，一般用肉眼或放大镜来进行观察。但是，有时为了找出用肉眼和放大镜无法发现的应力腐蚀裂纹及其它有关缺陷，也常常针对设备的不同特点，采用一些物理方法，如着色、超声波和涡流探伤以及X射线照像（对焊缝）等。对于管材制设备和容器也可采用打压试验，以确定设备是否泄漏以及泄漏的部位和泄漏的严重程度。但在采用上述物理方法和打压试验时，要考虑这些方法所带来的外来因素是否会影响设备破损原因分析结果的正确性。

宏观检查基本上包括三部分内容，即普查、详查和根据普查、详查所获得的大量数据进行统计分析，找出设备、部件破损情况的表现规律。

#### 3.1.1 普查

普查系对于已产生腐蚀破坏的设备和部件进行普遍的检查。其中包括破损部位，也包括未破损的完好部位。

当破损设备、构件解剖、打开或切取下来以后，一般不要立即取样进行裂纹、断口等的分析，而首先要对设备进行整体观查和对破损部件逐个检查。以便对破损情况的全貌有一清楚、完整的了解。

腐蚀产物及污垢，裂纹及其它类型的腐蚀缺陷，构件的表面状况等的检查是普查的主要内容。

##### 1. 腐蚀产物及污垢的情况

一般情况下，经过使用的不锈钢设备、部件，在产生腐蚀破坏后，除少数事例外，均附着或堆积有自身产生的和外来的、程度不同的锈层、腐蚀产物、污垢（包括水垢）等。它们的颜色、分布、堆积情况，它们与不锈钢构件的粘附程度等都属于检查之列。

##### 2. 裂纹及其它类型腐蚀缺陷的情况

对于设备、部件上所出现的裂纹，可根据其形状、尺寸、走向、所处的部位、数量等分别加以了解。对于所观察到的其它肉眼可识别的腐蚀类型，如孔蚀、缝隙腐蚀、溃疡腐蚀等也要加以记载。

##### 3. 构件的表面状况

表面状况系指除上述情况外，不锈钢表面均匀（一般）腐蚀的情况以及极易辨认的原始表面（即未使用前钢材表面）所存在的缺陷情况。如划碰伤、打磨痕、打字头、管材矫直、痕

有无焊渣和焊接时熔化金属的液滴等以及在使用过程中，由于振动、液体冲刷和检修不慎所造成的表面缺陷。

对于结构复杂、不锈钢用量较大的设备，普查的工作量较大。但是，为了弄清设备破损原因，防止事故再现，普查是不可缺少的一个环节，而对于产生应力腐蚀断裂的简单设备或单个部件，普查的工作量显然较小，普查的内容亦可相应简化。

### 3.1.2 详查

详查即详细检查。详细检查的部位主要是设备的局部地区，特别是破损部位以及与事故原因有密切关系的一些重要现象。详细检查的内容基本上同于普查。

对于结构较复杂的不锈钢设备，详查时要对构成这一设备的每一个破裂部件和构件，如热交换设备中的破裂管材、隔板、管板（滑板）等进行详细地检查，并尽量找出腐蚀产物、污垢、裂纹、其它类型的腐蚀、表面状态以及其它缺陷等与设备应力腐蚀的关系。

当构成此破损设备的部件过多，或不准备整体解剖检查时，也可根据情况，按设备的部位或区域选取各种典型样品进行抽查。当然，所抽查的样品一定要具有代表性，其所得结果能够反映整台设备的实际破损情况。

### 3.1.3 对不锈钢应力腐蚀实际事故进行普查、详查后获得的主要印象

根据我们对大量已产生应力腐蚀断裂的设备和部件进行普查和详查的结果，一般具有下述印象<sup>[21-24]</sup>。

1. 在大气（包括海洋大气）中放置的，没有经过实际使用就产生了应力腐蚀的工程设备和部件，一般没有明显的腐蚀产物、锈层等的附着和堆积。但经常可发现有轻微的或较严重的孔蚀。有的应力腐蚀裂纹肉眼可见，有的裂纹则需经酸洗后才能清晰地看到。图1-3-1系采用8—12毫米厚的0Cr18Ni10不锈钢板焊成的 $\phi 800$ 管道，在海洋大气中长期放置后，引起的环焊缝应力腐蚀断裂外貌。

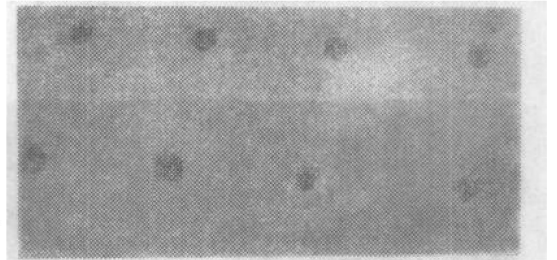


图1-3-1 0Cr18Ni10不锈钢板焊接管道，在焊缝上的应力腐蚀裂纹（在海洋大气中长期放置后）

2. 在一些中性水介质中，例如在热水（ $\geq 40^{\circ}\text{C}$ ）和高温水（ $\geq 100^{\circ}\text{C}$ 以至 $250-350^{\circ}\text{C}$ ）中使用的工程设备，产生应力腐蚀破坏后，一般有腐蚀产物，锈层等的附着。在一些液体流动不畅的死区，有时有大量的污垢堆积。在用天然水和工业水等非去离子水做

冷却剂的热交换器等设备中，在冷却水侧，常常存在着大量水垢，特别是在管间和缝隙部位更为严重。当表面存在腐蚀产物时，应力腐蚀裂纹较易分辨。一般说来，腐蚀产物或锈层突出处，便系裂纹（图1-3-2）。

在中性水介质中，产生应力腐蚀的设备在许多情况下虽存在孔蚀，但一般腐蚀并不严



重。例如，当将腐蚀产物、锈层、水垢等去除后，即使应力腐蚀破坏相当严重且伴随有严重孔蚀、溃疡腐蚀的设备，宏观上也观察不到任何明显的均匀腐蚀迹象。此时，不锈钢表面仍具有金属光泽，它们的原始表面缺陷，如划伤、碰伤以至管材的矫直痕等均仍清晰可见。

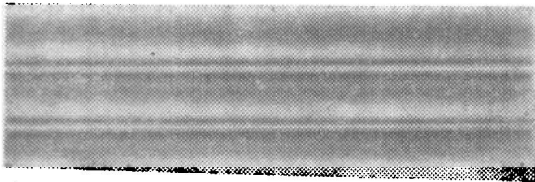


图1-3-2 0Cr18Ni9Ti不锈钢管制蒸发器外表面水侧的应力腐蚀裂纹(锈层突出部位)

在日常遇到的不锈钢应力腐蚀工程事故中，宏观检查后，前二种占大多数。概括说来，受到应力腐蚀破坏的设备和部件仅有局部腐蚀(应力腐蚀裂纹以及孔蚀，缝隙腐蚀)，而无明显的一般腐蚀。即使受到极严重的应力腐蚀破坏的设备亦不例外。

3. 在一些介质中，有时既有严重的应力腐蚀(或伴随有严重的孔蚀)，又有相当严重的一般腐蚀。

这种事例虽然较少，但在实际工程事故中的确是存在的。这些设备和部件不仅受到严重的应力腐蚀，而且受到严重的一般腐蚀。这些设备、部件的外观有的呈朽木状，既无任何塑性变形，落地也无任何金属声。

图1-3-3系一台硫酸离心机 Cr-Ni 不锈钢滚筒腐蚀破坏后的外观。可以看到，在同一滚筒上，有网状(图1-3-3中3)和放射状裂纹(图1-3-3中1和2)以及基本垂直于焊缝的直裂纹(图1-3-3中2)，还有严重的一般腐蚀和其它腐蚀(图1-3-3中1、2、3、4)。此设备的一般腐蚀已严重到使表面变得相当粗糙。

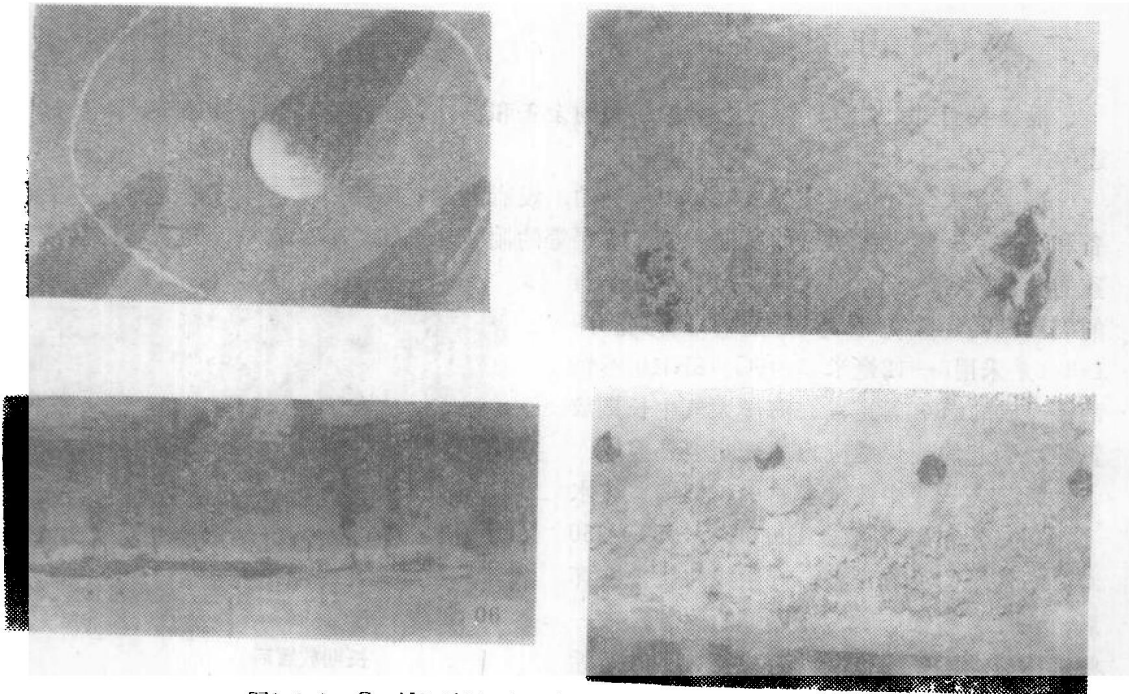


图1-3-3 Cr-Ni不锈钢硫酸离心机滚筒的腐蚀破坏外观

- 1——钻孔周围有放射状应力腐蚀裂纹，其余部分有明显均匀腐蚀；
- 2——焊缝及其相邻地区和圆孔边部均有应力腐蚀裂纹；
- 3——有大量网状应力腐蚀裂纹且均匀腐蚀严重；
- 4——严重的腐蚀和焊缝及圆孔处的应力腐蚀。

图1-3-4系 00Cr18Ni14Mo2Cu2 不锈钢板制造的淋洗盘和拖液，在含Cl<sup>-</sup>的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 中使