

# 摘要

锅炉是在工业生产各个领域广泛应用的特种设备，由于高参数的锅炉可以带来高的能源转换效率，所以愈来愈多的锅炉被要求在高温和高压的环境下运行。在这种环境下长时间运行，并非完全没有风险，随着设备的腐蚀和疲劳，会大幅降低了设备的安全性与可靠度。它的安全事关人们生命财产的安全，避免发生事故是锅炉正常使用的前提。本文进行了BG35—54—M中型次高压锅炉集箱外表面环向裂纹产生的机理研究，对锅炉的设计、制造和运行具有一定的理论指导意义和较高的实用价值。

本文从实际工作中发现的锅炉集箱本体环向裂纹分析入手，对集箱筒体的名义应力和温度应力分别用弹性力学分析的方法进行了计算，在弹性力学的方法中分别计算温度应力和工质内压然后进行叠加。而且按照锅炉运行与停炉的周期，分析出拉压应力循环的次数，应该是属于低周应力疲劳的范畴。

对失效元件进行了化学成分和金相分析排除了集箱材质劣化，在裂纹的电镜扫描分析中，在裂纹的内部和边缘发现了含有Al, S, Cl, O, Na等元素的腐蚀产物，通过腐蚀产物分析和集箱筒体的运行环境，认定S, O的腐蚀是主要的因素。

在进行扫描电镜和金相分析的裂纹边缘形貌后。将裂纹从表面向深度扩展的侧面形貌和有关文献比后认为该裂纹是属于疲劳裂纹的范畴，但也有其特殊型，裂纹尖端为沿晶扩展，裂纹断面具有贝纹线。

根据应力分析，裂纹分析，腐蚀分析的结论，从材料的微观角度，并结合金相和电子显微镜图片，提出了微观的腐蚀与疲劳相互促进的作用机制，腐蚀造成了表面的应力集中，成为裂纹的起始点，在裂纹进展过程中，循环应力造成了腐蚀产物层的脱落，保证了致腐物质的扩散通道，由于裂纹尖端的组织和晶粒位相差异，也促进了裂纹尖端的塑性应变差异和进一步腐蚀。

最后得出的结论是：锅炉集箱裂纹是腐蚀疲劳裂纹。

**关键词：** 锅炉集箱； 腐蚀疲劳； 环形裂纹； 温度应力

# ABSTRACT

Boiler is widely used in various fields of industrial production of special equipment, due to the high parameters of the boiler can bring high energy conversion efficiency, so more and more of the boilers are required at high temperature and high pressure environment to run. Long run in this environment, not entirely without risk, as equipment corrosion and fatigue, will significantly reduce the device's safety and reliability. Its security is related to people's lives and property of the boiler to avoid accidents is the premise of normal use. This article was BG35-54-M medium plays high-pressure boiler header to the outer surface of ring mechanism of cracks on the boiler design, manufacture and operation of a certain theoretical significance and practical value.

This article find from the actual work of crack body of Boiler Header start on the thick wall cylinder tube header name and temperature stresses were elastic mechanics analysis method was calculated, in Elasticity The method of calculation of thermal stress, respectively, and the internal pressure refrigerant then superimposed. And in accordance with the boiler operation and shutdown of the cycle, analyze the frequency of tension and compression stress cycle, should belong to the scope of low cycle fatigue stress.

On the failure of components for the chemical composition and microstructure analysis ruled out the header material deterioration in the crack of the electron microscope, in the internal and edge cracks found containing Al, S, Cl, O, Na and other elements of the corrosion products, by corrosion product analysis and collection boxes cylinder operating environment, we concluded that S, O is a major factor in corrosion.

We used electron microscope and metallographic to analysis cracks' shape. The crack extended from the surface to the depth of the side of the morphology and the literature that the crack than the latter belongs to the scope of the fatigue crack, but also has a special type, the crack tip along the grain, crack section with shell ridge.

Finally, stress analysis, crack analysis, corrosion analysis, conclusion, our microscopic point of view from the material, combined with metallographic and electron microscope images, made between micro-corrosion and promote the

mechanism of fatigue, stress corrosion caused by the surface concentration become the starting point of the crack, the crack advances in process, the cyclic stress level resulted in loss of corrosion products, guaranteed rot caused by the proliferation of channels of material, due to the crack tip phase difference between the organization and grain, but also to promote the crack tip plastic strain differences and further corrosion.

Finally the conclusion is: Boiler Header's crack is corrosion fatigue crack.

**KEY WORDS:** Boiler Collecting Header, Corrosion fatigue, Circular Crack, Thermal Stress

## 第一章 绪论

### 1.1 课题的研究背景与意义

现代文明和工业的不断发展造就了先进的生产要素和生产力,工业文明的来临对生产工具和设备的要求也是不断的提高,现代工业的很多工艺过程都是在高温高压进行的。为了实现这些工艺过程,需要各种承压设备,例如化工设备中的各种反应器,尤其是火力发电厂中的大型锅炉系统的汽包、集箱、管道。受压元件内部的使用压力从几兆帕到几十兆帕甚至还要高到上百兆帕。内部使用压力的日益增高,发生失效破坏时对人民的生命财产安全会造成了难以估量的灾难性后果,所以从开始使用这些受压元件开始,锅炉受压元件的安全运行使用、失效形式成为人们日益关注的重要内容。据记载,从工业革命开始的 1870 年代到二十世纪初的近 40 年期间,仅美国、加拿大、墨西哥等北美洲地区,有记录的锅炉爆炸事故就有一万起<sup>[1]</sup>,其它各类用途的压力容器的各种爆炸事故更是层出不穷。历史的经验和教训,使人们早就对这类承受压力的设备的安全问题倍加关注。近几十年来,许多工业国家都把锅炉和压力容器作为一种特种设备,由政府设置专门机构进行安全监督。最主要的原因就是因为锅炉和压力容器要比一般工业用的机械设备更容易发生事故,而且事故的危害性往往又特别严重。

对锅炉失效的分析与研究对于避免事故,保障人民群众的生命财产安全,具有非常大的意义。而且了解特种设备的失效方式,可以有的放矢的在使用过程中对易于发生失效的部位加强监察,及时对将要发生失效的元件进行修复和更换,保障设备的可用率,避免非正常的停用,会产生巨大的经济效益,研究锅炉的各种失效机理以及防止发生被坏的措施和摸索它的安全运行规律,科学实验和分析研究是重要的方法之一。对于实际的生产过程中发生的锅炉失效事故,是难得的经验。研究锅炉的失效形式和机理,对于摸索它的安全运行规律都是十分有价值的。多年来的事故为人们积累了很多宝贵的经验。一般来说,锅炉受压元件容易发生失效的主要部位在以下的各个部位<sup>[2]</sup>:

(1)因机械应力或热应力大幅度变动引起的低周疲劳破坏,发生在几何形状突变、填角焊缝、缺陷等应力集中部位或热负荷过高并积存水垢导致壁温差过大部位;

(2)因交变热应力引起的高周疲劳破坏,发生在受热面的汽水分界面、减温器喷水雾化区段等热应力变化频率较大的部位;

(3)因超压引起的塑性破坏,发生在安全阀及燃烧自动控制设备同时失灵等情况下;

(4)因超温引起的塑性破坏(时间较短)或蠕变破坏(时间较长),发生在受热面冷却条件遭受破坏情况下;

(5)因弹性变形过大或应力松弛导致介质向外泄漏;

(6)因腐蚀过大导致介质向外泄漏,但是,有的时候对发生的失效形式进行准确判断,是十分困难的,因为实际发生的失效方式多是各种因素综合作用的结果。

## 1.2 锅炉受压元件失效方式概述

受压元件损坏形式分类方法有多种。按照破坏时宏观变形量的大小可以分为塑性破坏和脆性破坏两大类。按破坏时材料的微观断裂机制分类可以分为韧窝断裂、解理断裂、沿晶断裂和疲劳断裂。实际上,往往采用的是混合分类:以宏观分类为主,结合一些断裂特征。通常分为:韧性破坏、脆性破坏、腐蚀破坏、疲劳破坏、蠕变破坏、其他形式破坏<sup>[3]</sup>。

### 1.2.1 韧性破坏

韧性破坏是元件在内压及其他载荷的作用下破坏。

金属材料的韧性破坏是显微空洞形成和长大的过程。对碳钢和低合金钢,断裂时首先在塑性变形严重的地方形成显微孔洞。夹杂物及其他缺陷往往是空洞成核的所在,但空洞形成、长大、聚集过程总是伴随着较大的塑性变形。金属材料韧性破坏的一般特征是:

(1)发生明显的变形,管子周长伸长率有时可达10%以上;

(2)断口检查多数属穿晶断裂,断口呈暗灰色纤维状,无金属光泽,断口不齐平,与主应力方向成45度角;

(3)一般不发生碎裂,塑性材料因其具有较好的塑性和韧性,因此一般不发生碎裂,只裂开一个口,裂口大小与爆破时所释放的能量有关。对常温液体介质,只裂一个小口,高压饱和水或者气体外泄时,因具有较大的膨胀能,往往有较大的爆破,管壁常被展成平板而成刃状;

(4)应力水平较高,一般达到或接近材料的抗拉强度,超压爆破,短期超温爆破,均匀腐蚀减薄爆破,管壁磨损减薄爆破等都常常具有韧性破坏的特征。

### 1.2.2 脆性破坏

脆性破坏又称为低应力破坏。元件在破坏时其应力远未达到材料的强度极限，甚至还低于屈服极限。其破裂现象和脆性材料破裂时相似，与韧性破坏相反，故称为脆性破坏。其一般特征是：

- (1) 无明显的塑性变形；
- (2) 裂口齐平、断口呈金属光泽齐平，并与主应力方向垂直；
- (3) 往往有许多碎块(片)飞出，发生脆性破坏时其材料韧性较差，因在碎裂瞬间裂纹迅速扩展，即使较小的爆破能量(例如水压试验时脆性破坏)下，也形成许多碎片，因此脆性破坏具有较严重的后果；
- (4) 多数发生在较低温度下。因为金属材料的断裂韧性随温度降低而下降；
- (5) 破裂时部件的名义应力一般低于材料的屈服极限。

脆性破坏的主要因素：其一是部件存在缺陷，并形成应力集中；其二是材料韧性差，特别是低温韧性差。电站锅炉发生脆性破坏的情况经常是：高合金钢部件水压试验时的冷脆，苛性脆化（NaOH—低碳钢的应力腐蚀），氢脆，奥氏体不锈钢的氯脆，钢材石墨化后引起的高温脆性断裂（材料的劣化）等。

### 1.2.3 蠕变破裂

金属元件长期在一定的高温条件下，受拉应力的作用材料产生缓慢而连续的塑性变形，以致发生的破裂被称为蠕变破裂。各种材料产生蠕变破坏的温度界限互不相同，碳钢和普通低合金钢超过 300—400℃，就应当考虑蠕变破坏问题。Cr—Ni 合金钢具有较好的抗高温蠕变性能。一般认为，材料使用温度不高于其熔化温度 25%—35%时，可不考虑蠕变的影响。

蠕变时钢材珠光体球化、碳化物析出并聚集长大，合金元素缓慢地由固溶体向碳化物转移。蠕变后期，铁素体内合金元素严重贫化，钢的热强性能降低，晶界间出现微孔，并逐渐发展为孔洞链，最终出现晶间型蠕变裂纹。蠕变断裂部件宏观断口具有明显高温氧化色并有众多的蠕变裂纹。

金属发生塑性变形时，金属组织晶粒发生位移。在蠕变温度以下，主要是晶粒内部滑移，形成穿晶破裂；在蠕变温度以上主要是晶粒转移，裂损沿晶界发生形成晶界破裂。长期高温作用下的蠕变破裂一般有明显变形，但断口呈脆性，壁厚无明显减薄，断裂沿晶界发展。

锅炉过热器、再热器受热面，主汽管道、再热器管道长期超温引起蠕变破坏常具有晶界破裂形式；蒸发受热面结垢、省煤器堵管引起传热恶化导致超温爆管

时,根据部件所在部位的烟温、壁温高低不同其破坏形式可分别为晶界破裂或穿晶破裂。破裂形式:蒸发受热面结垢、省煤器堵管引起传热恶化导致超温爆管时,根据部件所在部位的烟温、壁温高低不同其破坏形式可分别为晶界破裂或穿晶破裂。

#### 1.2.4 疲劳破坏与失效

疲劳损坏是指金属部件在交变载荷作用下出现损伤以致破裂失效的现象。按部件失效前载荷交变次数的多少分为低周疲劳及高周疲劳<sup>[4]</sup>。

疲劳损坏一般具有以下特征:

(1)没有明显的伸长,壁厚无显著减薄;

(2)断口存在两个区域,即疲劳裂纹产生及扩展区和最后断裂区,在第一区可见以裂纹源为中心的弧形纹路(贝壳状花样),源发点常常在应力集中的地方,最后断裂区的形态与材料状态有关,可呈韧性破坏与脆性破坏特征;

(3)疲劳破坏一般不形成碎片;

(4)疲劳损坏进展比较缓慢,必须经过一定次数的交变载荷之后才发生。

电站锅炉和压力管道发生的疲劳损坏情况有如喷水减温器喷头的机械振动损坏,汽包、联箱内壁温度交变引起的热交变应力裂纹,管道振动引起的损坏、水平受热管汽水分层时发生的热疲劳裂纹等。结构材料承受交变载荷而产生的失效是一种疲劳失效现象。发生疲劳失效时,一般没有明显的塑性变形,它是发生在局部高应变区内。当这种局部高应变区中峰值应力超过材料的屈服强度( $R_{el}$ )时,晶粒之间发生了滑移和位错,逐渐产生了微裂纹。这种微裂纹不断扩展,形成了一条宏观的疲劳裂纹,最后导致疲劳断裂。

在锅炉中的交变应力常常是由以下几个方面的原因引起的:

(1)频繁的间断操作和开、停工造成工作压力和各种载荷的变化;

(2)运行时出现运行压力波动;

(3)运行时出现的周期性温度变化;

(4)在正常的温度变化时受压部件的膨胀和收缩受到了约束;

(5)外加载荷的反复交变和产生的强迫振动等。

在过去相当长的时期里,疲劳失效常常不是锅炉和压力容器设计时必须考虑的因素,主要是因为一般认为它不像高速回转机件那样需要承受相当高循环次数的反复载荷。同时,制造压力容器和锅炉的材料都有较高的塑性,能吸收较大的应变能而不致造成裂纹的扩展,发生疲劳失效,常常不会引起大家的重视

可是近年来,情况发生了变化。首先是随着各国锅炉和压力容器设计规范的

修订,安全系数都有不同程度的下降。这样,受压部件中实际承受的应力水平就相对也提高了。同时,随着锅炉和压力容器的不断大型化,特厚材料的应用也在不断增加,这种特厚材料在制作过程中更易产生缺陷,并且低合金高强度钢的应用也日益广泛,这种材料和它们的焊缝同样也容易形成各种缺陷,这些都使得锅炉和压力容器增加了疲劳失效的危险性。

由于疲劳裂纹总是从高应变区形成和发展的,而在锅炉和压力容器的受压部件中存在着各种型式的高应变区,如在焊接接头的附近,结构不连续部位以及有开孔和接管的附近区域等等。这种高应变区往往因为变形的不协调而形成或由原来存在的缺口所造成。因此必须特别注意这些区域的受力状况。

在现代工程实践中,绝大多数的工程项目都存在由交变应力而引起的疲劳问题。特别是随着机械速度的提高,以及航空航天等现代工业的发展,许多构件或机械工作在更加恶劣的力学环境下,疲劳破坏导致的失效事故占总事故的比例约占 70%,是相当高的。因此,人们已将更多的注意力放在解决疲劳问题上。同样在特种设备的失效分析上也越来越注意疲劳因素的影响。在锅炉和压力容器高应变区内的峰值应力(如在容器的开孔接管附近)常常可以达到容器主体薄膜应力的 2—4 倍。若筒体的许用应力是以屈服限为基准而取安全系数为 1.6(目前的强度计算标准规定),则这些峰值应力就有可能达到材料屈服限的 2 倍以上。这样高的峰值应力所造成的疲劳失效现象与通常在高速回转机件中所碰到的高周疲劳不同。高速回转机件在设计时,常以循环次数大于  $10^7$  次所得的疲劳极限作为设计依据,而一般材料的疲劳极限大体为材料强度限的 40—50%。显然在锅炉和压力容器是不能以此作为设计依据的,对于锅炉和压力容器所碰到的疲劳失效现象实际上是一种高应变低周疲劳。

因此,低周疲劳失效已成为近年来各国注意的一个中心问题。许多国家均在自己的锅炉和压力容器设计规范中制订了相应的条款,规定了疲劳设计准则和方法。如我国的 JB4732《钢制压力容器—分析设计标准》、美国机械工程师协会的 ASME VIII-2—压力容器建造另一规则等,都明确了进行强度计算后应该另外附加疲劳计算的工况和算式,在我国的锅炉强度计算标准 GB9222《水管式锅炉强度计算标准》中明确规定:对于调峰负荷机组及其它频繁启动、参数波动较大的锅炉锅筒,还应按标准的附录 A 进行疲劳强度校核计算。并且在有关锅炉和压力容器的研究发展计划中也提出了疲劳失效的近期和远期研究方向和要达到的目标。

疲劳断裂的分析和研究主要在两个方面分别进行,一方面是从用微观分析的手段了解疲劳的本质。另一方面是从宏观层面,对疲劳问题的宏观力学特征进行的分析。而且近年发展起来的断裂力学的一些观点,已取得了许多有实用价值的成果,为提供了断裂理论分析和基于安全性的强度设计方法。将宏观与微观分析



有机的结合起来，综合考虑分析疲劳断裂问题。

但是据笔者所查文献，对于锅炉受压元件的疲劳分析研究主要集中在汽包的壁温差热应力，以及喷水减温头的机械振动损坏，联箱内部的汽水分层引起的温度交变进而引起热交变应力裂纹，管道振动引起的损坏，水平受热面管汽水分层引起的破坏等等。而且疲劳失效和其他失效因素结合得也很紧密，一些小于疲劳失效的应力门槛值的工况下也产生了疲劳裂纹。

胡新芳<sup>[5]</sup>等人对华能德州发电厂 5 号炉低温过热器入口联箱管座角焊缝在管端熔合区处产生裂纹。通过有限元软件进行应力分析，对焊缝及热影响区进行了金相分析，综合考虑认为焊接工艺不当导致 HAZ 的组织产生淬硬马氏体导致和管系结构设计不合理造成的应力集中是裂纹产生的主要原因。联箱由我国沿海城市制作，由于湿度比较大，且为冬季施工，管座角焊缝焊后，没有进行热处理。另外，在焊接过程中若焊接线能量过大，焊接完成后，角焊缝外表面冷却速度较快，易形成马氏体。在金相组织中发现管子外壁的焊缝热影响区处，管子外壁边缘出现马氏体组织，马氏体的体容比较大，存在较高的残余应力，且脆性大，塑性低，抗变形能力差。塑性和抗变形能力降低，从而使管座角焊缝热影响区的性能下降。二者之间的温差使集箱与管子的胀缩不一致，且膨胀和收缩量也不同，在管子与联箱之间就会产生热应力，而由于管子与联箱接头处的应力集中造成了裂纹的产生。

### 1.2.5 腐蚀破坏

设备受腐蚀介质作用而产生元部件破裂称为腐蚀破坏。按其损坏现象可分为均匀腐蚀，点腐蚀，晶间腐蚀，应力腐蚀和腐蚀疲劳。

(1)均匀腐蚀使元部件厚度减薄并不影响金属的机械性能，损坏时一般呈韧性破坏。

(2)点腐蚀是表面局部腐蚀的结果，一般起因于电化学腐蚀。损坏时常造成穿透性孔洞导致泄漏。只有出现大面积密集斑点腐蚀才影响部件强度而造成破坏，其损坏形式也属于韧性破坏。

(3)晶间腐蚀是指腐蚀性介质渗入金属组织内，金属晶粒之间结合力因腐蚀而受到破坏，材料的强度与塑性几乎完全丧失。经受严重晶间腐蚀的奥氏体不锈钢，表面看来十分光亮，但只要用锤轻轻敲击，它就会碎成粉末。因此，晶间腐蚀是一种危险性很大的破坏形式。

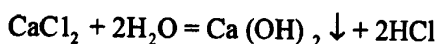
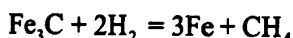
(4)应力腐蚀是金属材料在腐蚀性介质和拉应力共同作用下，经过一定时间后而发生的开裂和断裂现象。应力腐蚀裂纹起源于表面缺陷(擦伤、加工纹路、

裂纹、夹层等)和局部应力集中处。在腐蚀介质的作用下初始裂纹两侧和尖端因电化学的作用而发展,最终导致破坏。裂纹有穿晶的,也有沿晶的,其最后断裂形式是脆性断裂。

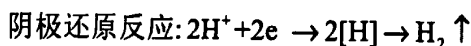
(5)腐蚀疲劳。在交变应力作用下产生的应力腐蚀,其破坏断口出现两个明显不同的区域,呈疲劳破坏特征则称腐蚀疲劳损坏。氢脆、苛性脆化、氯脆也带有腐蚀破坏性质,其断口均属脆性破坏。

电站锅炉的腐蚀破坏可分烟气侧和汽水侧两个方向。烟气侧腐蚀有低温硫腐蚀,硫腐蚀等;汽水侧腐蚀如氧腐蚀,垢下腐蚀等。

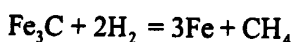
徐冬<sup>[6]</sup>在对一台热水锅炉管板裂纹的分析中认为管板产生裂纹的原因主要有热流密度过大,水的pH值较低和存在较多的铁垢。热水锅炉要严格控制热流密度,防止产生过冷沸腾。翼形烟道式锅炉的拱形管板处,由于烟气温度较高,加之烟管入口处截面变化引起的烟气扰动的增加,管板的热流密度较大。当烟气温度接近800℃时,而管板的水侧扰动较小,过冷沸腾就难以避免。当沸腾率较高时,在管板上不仅产生CaCO<sub>3</sub>水垢,有可能产生更为密实的硫酸盐水垢CaSO<sub>4</sub>等。一旦管板上生成水垢,其表面粗糙度增加,粗糙表面和表面附近的高温为水中铁的腐蚀产物的析出提供了条件,因此在白色水垢的表面形成大量的砖红色铁垢。随着水垢的密度和厚度的增加,垢下腐蚀随之发生。随着水垢厚度的增加,管板的壁温升高,渗透到水垢下的炉水会发生强烈的蒸发和浓缩,当炉水的pH值较低且浓缩的炉水中含有较多的MgCl<sub>2</sub>和CaCl<sub>2</sub>时,在水垢下将发生如下反应<sup>[6]</sup>:



反应生成的Mg(OH)<sub>2</sub>和Ca(OH)<sub>2</sub>是沉淀物,而HCl是强酸,因此在水垢下会积累起很高的H<sup>+</sup>浓度,发生酸对金属的腐蚀<sup>[6]</sup>:



由于阴极产生的氢气H<sub>2</sub>在致密的水垢下面,不能很快扩散到水中,因此一部分氢气可能扩散到受热面金属的内部和碳钢中的渗碳体(Fe<sub>3</sub>C)发生反应<sup>[6]</sup>:



从而造成碳钢脱碳,使腐蚀部位的金相组织发生变化,同时反应生成的甲烷CH<sub>4</sub>气体在金属内部产生压力,使金相组织中逐渐形成裂纹,以致开裂发生泄漏失效。

四川大学黄莹<sup>[7]</sup>等人在一起废热锅炉产生裂纹的事故的分析过程中,运用事故分析的排除方法,对发生事故的设备进行了应力分析,材质分析,运行方法分析得出了造成事故的主要原因是由于实际的热应力造成的。

上述失效形式都将造成经济损失并危害人身安全。如果导致爆炸,除设备毁

坏、人身伤亡以外，还将因停电、停止供热、停产而造成重大经济损失。特别是，而对于高参数大容量锅炉受压元件失效所造成的损失更大。

### 1.3 目前中型次高压锅炉集箱发现的开裂问题

目前锅炉受压元件的设计周期对于以蠕变破坏为失效标志的元件，已由过去的 10 万小时向 20 万小时过渡。目前以低周疲劳破坏为失效标志的元件寿命一般按 30 年考虑<sup>[8]</sup>。

但是，在近几年的锅炉检验工作中，发现多台运行 10 年左右的次高压锅炉水冷壁下集箱外表面向火侧(见图 1-1)发现环形裂纹，剖面检查发现裂纹从外壁开始向内壁深入，尚未贯通造成严重的事故，内壁无任何影响传热的水垢和附着物。

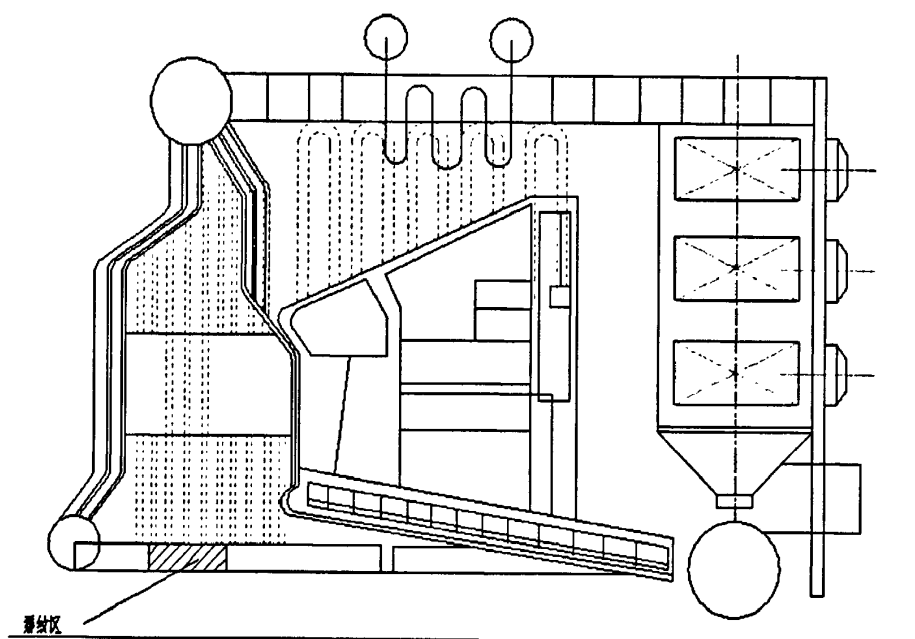


图 1-1 开裂集箱在锅炉中的位置及其裂纹区域示意图

在锅炉发生裂纹失效集箱在的外壁表面看到有氧化和腐蚀痕迹，表面随机均布腐蚀凹坑深 0.5mm 左右，直径约为  $\phi 0.5-1.0\text{mm}$  不等，数百道裂纹沿集箱筒体环向分布，裂纹是从集箱筒体外侧开裂向内侧扩展的，长短不一，裂纹张口宽度不一，还没有裂穿至内壁，尚未发生泄漏。

经数据库检索，锅炉集箱的这种失效方式到目前为止并没有明确的论文给出合理的解释，而且并没有被特种设备法规<sup>[9]</sup>列入内部检验的重点检查项目，现在比较成熟的对集箱失效的认识一般局限于集箱内壁温度交变引起的热交变应力

裂纹,集箱表面的过热和过烧等现象<sup>[10]</sup>,现在国内的科研力量主要集中在基于集箱高温材料时效变化的寿命评估分析以及集箱管接头部位应力和数值模拟计算。

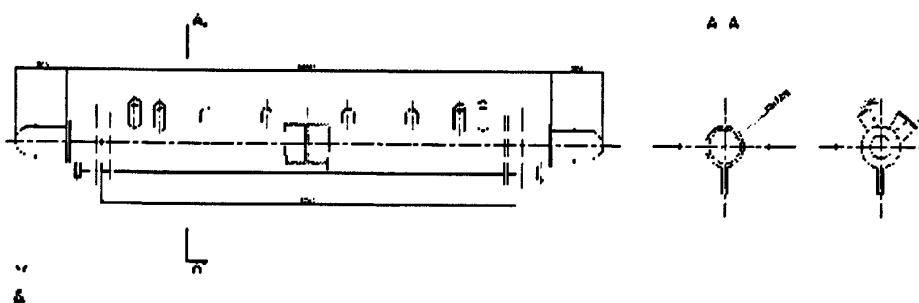


图 1-2 失效集箱零件图

锅炉厂家对于集箱的设计仅是按照强度计算中公式的要求进行壁厚计算,将重点放在了结构的布置和开孔的强度设计和校核。强度计算中规定了非绝热的集箱壁厚不应大于 30mm、45mm<sup>[11,12]</sup>,并未对要求其进行强度疲劳计算,而仅仅是在强度计算的标准设计思路认为电站锅炉集箱起停 2000 次,工业锅炉集箱起停次数 10000 次<sup>[13]</sup>,默认为对起停次数内的集箱受压元件无需进行疲劳计算,仅规定了锅筒的低周疲劳寿命计算(水管锅炉强度计算标准规范性附录 A)。

正是由于以上情况,以及发生开裂的锅炉集箱比较特殊的开裂形式,凸现了进行深入研究的重要性。可以为相关的锅炉强度计算标准提供数据支持。可以为类似工况的锅炉集箱和压力容器的厚壁圆筒检验工作重点提供理论和数据指导,保证设备的安全运行。

#### 1.4 本文的研究内容和技术路线

从失效集箱的裂纹产生的要素—应力入手,对集箱进行应力计算和分析。由于锅炉集箱运行环境的特殊性,充分的考虑环境因素的腐蚀,进行材质的化学成分检测。此外,对裂纹的起裂面和侧面进行金相分析和扫描电镜分析,对裂纹的内部用压力试验机打开进行体视显微镜分析。确定裂纹的性质和产生的机制。

## 第二章 集箱受力分析

对于锅炉受压元件的失效分析其中的重要内容是分析使元件发生失效丧失承载能力的应力状态。对于断裂失效的研究更不能脱离开，与裂纹走向垂直方向使裂纹发生、发展的应力。对于本研究课题中失效的集箱，外径为 219mm，内径为 169mm，外径与内径之比为 1.295 大于厚壁圆筒型元件的判定标准<sup>[14]</sup> (1.1—1.2)，所以应该对集箱按照厚壁圆筒进行分析。

### 2.1 厚壁圆筒的受力理论分析

如图 2-1 所示厚壁圆柱形筒体的内半径为  $R_i$ ，外半径为  $R_o$ ，承受内压为  $P_i$ ，外压为  $P_o$ 。

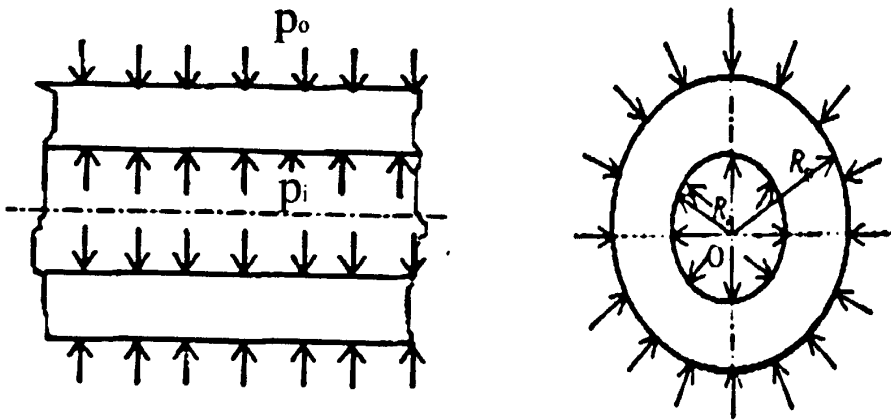


图 2-1 厚壁圆筒受力示意图

#### 2.1.1 厚壁圆筒的基本方程

由于应力分析的复杂性，如果完全精确的考虑所有方面的因素，则列出的方程肯定会十分的复杂，而且也不会得出结果，考虑了问题的主要方面，采用了弹性力学的分析方法进行计算，弹性力学作了如下的假定：假定物质是连续的；物体是完全弹性的；假定物体是均匀的；假定物体是各向同性的；假定位移和形

变是微小的。在满足弹性力学假定的前提下，通过对筒壁内任意位置的微元体进行受力平衡分析，几何变形分析，应力与应变的分析分别列出了平衡方程，几何变形方程，物理方程来进行求解。

1.平衡方程

$\sigma_r$ :径向应力;  $\sigma_\theta$ :环向应力;

$$\sum F_r = 0$$

$$\left(\sigma_r + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} dr\right)(r+dr)d\theta dz - \sigma_r r d\theta dz - 2\sigma_\theta r dr dz \sin \frac{d\theta}{2} + \left(\tau_{rz} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} dz\right)r dr d\theta - \tau_{rz} r dr d\theta + K_r r dr d\theta dz = 0 \quad (2-1)$$

$$\sum F_z = 0$$

$$\left(\sigma_z + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} dz\right)r d\theta dr - \sigma_z r d\theta dr + \left(\tau_{rz} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} dr\right)(r+dr)d\theta dz - \tau_{rz} r d\theta dz + K_z r dr d\theta dz = 0 \quad (2-2)$$

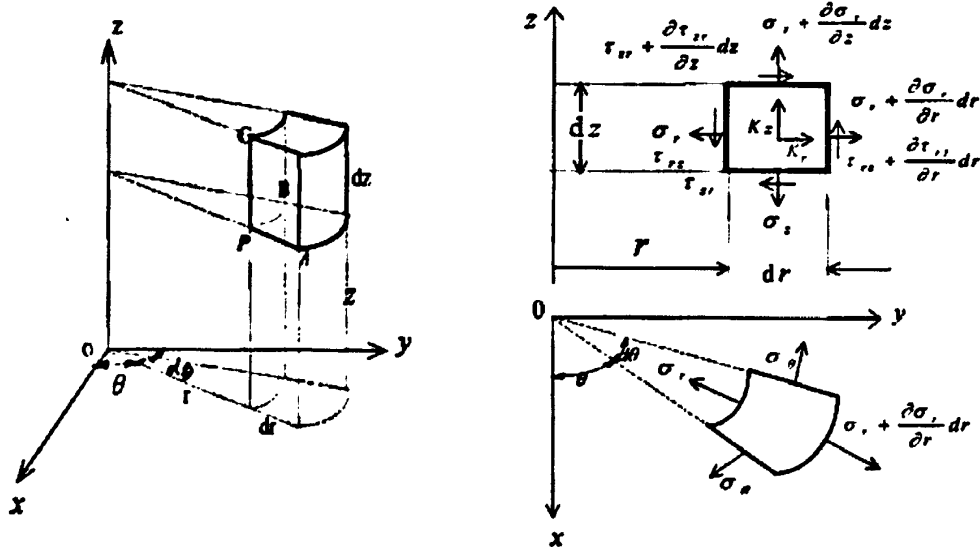


图 2-2 微元体受力示意图

因为  $d\theta$  值很小，可取  $\sin(d\theta/2) \approx d\theta/2$ ，化简并略去高阶微量，得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + K_r &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} + K_z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

## 2. 几何方程

在  $r$ - $z$  平面内, 沿  $r$  和  $z$  方向取微小长度  $PA = dr$ ,  $PC = dz$ 。假设变形后  $P$ ,  $A$ ,  $C$  分别移动到  $P'$ ,  $A'$ ,  $C'$

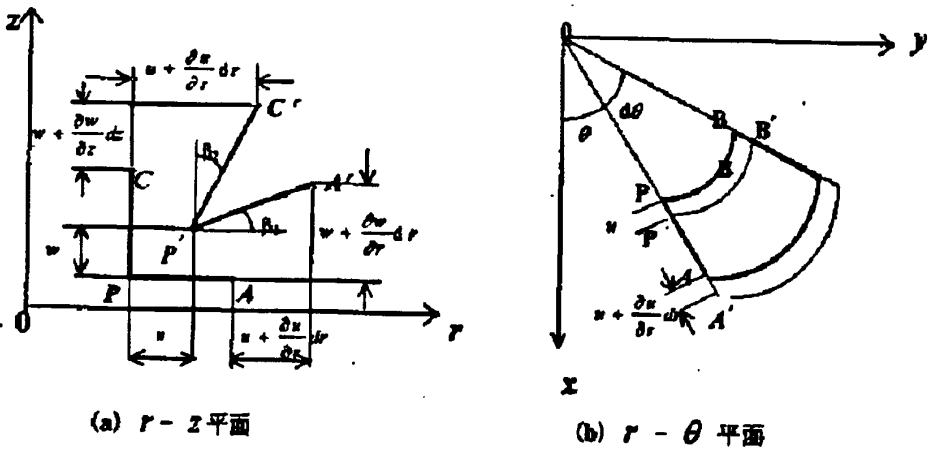


图 2-3 厚壁中的微元体位移图

由几何变形关系, 可求得线段  $PA$  的正应变  $\epsilon_r$  为

$$\epsilon_r = \frac{P'A' - PA}{PA} = \frac{(dr + u + \frac{\partial u}{\partial r} dr - u) - dr}{dr} = \frac{\partial u}{\partial r} \quad (2-4)$$

线段  $PC$  的正应变  $\epsilon_z$  为:

$$\epsilon_z = \frac{P'C' - PC}{PC} = \frac{(dz + w + \frac{\partial w}{\partial z} dz - w) - dz}{dz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2-5)$$

$PA$  和  $PC$  间的直角变化, 即剪应变为:

$$\gamma_{rz} = \beta_1 + \beta_2 = \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2-6)$$

在  $r$ - $\theta$  的平面内, 沿  $r$  和  $\theta$  方向取微元线段  $PA = dr$ ,  $PB = r d\theta$ , 变形后,  $P$ ,  $A$ ,  $B$  分别移动到  $P'$ ,  $A'$ ,  $B'$ 。由于对称性,  $P$  点和  $B$  点移到  $P'$  点和  $B'$  的位移分量均

为  $u$ , A 点移到 A' 点的位移分量为:

$$u + \frac{\partial u}{\partial r} dr \quad (2-7)$$

而 
$$\varepsilon_{\theta} = \frac{P'B' - PB}{PB} = \frac{(r+u)d\theta - r d\theta}{r d\theta} = \frac{u}{r} \quad (2-8)$$

由此, 空间轴对称的几何方程为

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\partial u}{\partial r} \\ \varepsilon_{\theta} &= \frac{u}{r} \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{rz} &= \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{aligned} \quad (2-9)$$

### 3. 物理方程

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_{\theta} + \sigma_z)] \\ \varepsilon_{\theta} &= \frac{1}{E} [\sigma_{\theta} - \mu(\sigma_r + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_{\theta})] \\ \gamma_{rz} &= \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{rz} \end{aligned} \right\} \quad (2-10)$$

$\Rightarrow$



$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1+\mu} \left( \varepsilon_r + \frac{\mu}{1-2\mu} e \right) \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1+\mu} \left( \varepsilon_\theta + \frac{\mu}{1-2\mu} e \right) \\ \sigma_z &= \frac{E}{1+\mu} \left( \varepsilon_z + \frac{\mu}{1-2\mu} e \right) \\ \tau_{rz} &= \frac{E}{2(1+\mu)} \gamma_{rz} \end{aligned} \right\} \quad (2-11)$$

具体的对于承受均匀内、外压的厚壁圆筒，若筒体的几何形状、载荷、支承情况沿  $z$  轴没有变化，所有垂直于轴线的横截面在变形后仍保持为平面，则  $\tau_{rz} = 0$ ,  $\gamma_{rz} = 0$ ，即  $u$  只决定于  $r$ ,  $w$  只决定于  $Z$ 。则各个方程简化为以下形式。

平衡方程（不计体力）：

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0 \\ \frac{d\sigma_z}{dz} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-12)$$

几何方程：

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}, \quad \varepsilon_z = \frac{dw}{dz} \quad (2-13)$$

变形协调方程：

$$\frac{d\varepsilon_\theta}{dr} = \frac{1}{r} \left( \frac{du}{dr} - \frac{u}{r} \right) = \frac{1}{r} (\varepsilon_r - \varepsilon_\theta) \quad (2-14)$$

物理方程：

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_\theta + \sigma_z)] \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \mu(\sigma_r + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_\theta)] \end{aligned} \quad (2-15)$$

$$\Rightarrow$$

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{E}{1+\mu} \left( \varepsilon_r + \frac{\mu}{1-2\mu} e \right) \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1+\mu} \left( \varepsilon_\theta + \frac{\mu}{1-2\mu} e \right) \\ \sigma_z &= \frac{E}{1+\mu} \left( \varepsilon_z + \frac{\mu}{1-2\mu} e \right)\end{aligned}\quad (2-16)$$

由式 (2-15) 得:

$$\begin{aligned}\varepsilon_r - \varepsilon_\theta &= \frac{1+\mu}{E} (\sigma_r - \sigma_\theta) \\ \frac{d\varepsilon_\theta}{dr} &= \frac{1}{E} \left( \frac{d\sigma_\theta}{dr} - \mu \frac{d\sigma_r}{dr} \right)\end{aligned}\quad (2-17)$$

将以上两式代入式 (2-14), 得到以应力分量表示的变形协调方程

$$\frac{d\sigma_\theta}{dr} - \mu \frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{1+\mu}{r} (\sigma_r - \sigma_\theta) \quad (2-18)$$

### 2.1.2 厚壁圆筒的应力和位移解

采用位移法求解在均匀内、外压作用下的厚壁圆筒。将几何方程式代入物理方程式, 得出用位移分量表示的物理方程:

$$\left. \begin{aligned}\sigma_r &= \frac{E}{1+\mu} \left( \frac{du}{dr} + \frac{\mu}{1-2\mu} e \right) \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1+\mu} \left( \frac{u}{r} + \frac{\mu}{1-2\mu} e \right) \\ \sigma_z &= \frac{E}{1+\mu} \left( \frac{dw}{dz} + \frac{\mu}{1-2\mu} e \right)\end{aligned}\right\} \quad (2-19)$$

将式(2-19)带入平衡方程式, 得:

$$\left. \begin{aligned}\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} &= 0 \\ \frac{d^2 w}{dz^2} &= 0\end{aligned}\right\} \quad (2-20)$$

它的通解为

$$u = c_1 r + \frac{c_2}{r} \quad (2-21)$$

式(2-21)中  $C_1, C_2$  为积分常数, (2-21)代入 (2-19), 得:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= c_3 - \frac{c_4}{r^2} \\ \sigma_\theta &= c_3 + \frac{c_4}{r^2} \\ \sigma_z &= 2\mu c_3 + E\varepsilon_z \end{aligned} \right\} \quad (2-22)$$

式(2-22)中

$$\left. \begin{aligned} c_3 &= \frac{E}{1+\mu} \frac{\mu\varepsilon_z + c_1}{1-2\mu} \\ c_4 &= \frac{E}{1+\mu} c_2 \end{aligned} \right\} \quad (2-23)$$

当厚壁圆筒同时承受均匀内压  $P_i$  和均匀外压  $P_o$  时, 其边界条件:

$$\left. \begin{aligned} r = R_i, \quad \sigma_r &= -p_i \\ r = R_o, \quad \sigma_r &= -p_o \end{aligned} \right\} \quad (2-24)$$

将边界条件式(2-24)代入式(2-22), 得

$$\left. \begin{aligned} c_3 &= \frac{R_i^2 p_i - R_o^2 p_o}{R_o^2 - R_i^2} \\ c_4 &= \frac{R_i^2 R_o^2 (p_i - p_o)}{R_o^2 - R_i^2} \end{aligned} \right\} \quad (2-25)$$

将  $C_3, C_4$  值代入式 (2-22), 得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{R_i^2 p_i - R_o^2 p_o}{R_o^2 - R_i^2} - \frac{R_i^2 R_o^2 (p_i - p_o)}{(R_o^2 - R_i^2) r^2} \\ \sigma_\theta &= \frac{R_i^2 p_i - R_o^2 p_o}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{R_i^2 R_o^2 (p_i - p_o)}{(R_o^2 - R_i^2) r^2} \end{aligned} \right\} \quad (2-26)$$

轴向应力  $\sigma_z$ 、轴向应变  $\varepsilon_z$  和径向位移分量  $u$ , 对于两端封闭的筒体 (筒体端部有端盖, 就是本课题相关的集箱) 轴向应力

由轴向平衡条件  $\pi(R_o^2 - R_i^2)\sigma_z = \pi R_i^2 p_i - \pi R_o^2 p_o$

求得：

$$\sigma_r = \frac{R_i^2 p_i - R_o^2 p_o}{R_o^2 - R_i^2} = c_3 \quad (2-27)$$

由式 (2-22) 的第三式、式 (2-23)，并代入  $c_3$ 、 $c_4$  值，得

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1-2\mu}{E} c_3 = \frac{1-2\mu}{E} \frac{R_i^2 p_i - R_o^2 p_o}{R_o^2 - R_i^2} \\ c_1 &= \frac{1-2\mu}{E} c_3 = \frac{1-2\mu}{E} \frac{R_i^2 p_i - R_o^2 p_o}{R_o^2 - R_i^2} \\ c_2 &= \frac{1+\mu}{E} c_4 = \frac{1+\mu}{E} \frac{R_i^2 R_o^2 (p_i - p_o)}{R_o^2 - R_i^2} \end{aligned} \right\} \quad (2-28)$$

将  $c_1$ 、 $c_2$  值代入式 (2-21)，得两端封闭的厚壁圆筒的位移表达式

$$u = \frac{1-2\mu}{E} \frac{(R_i^2 p_i - R_o^2 p_o)r}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{1+\mu}{E} \frac{R_i^2 R_o^2 (p_i - p_o)}{(R_o^2 - R_i^2)r} \quad (2-29)$$

## 2.2 厚壁圆筒温差应力分析

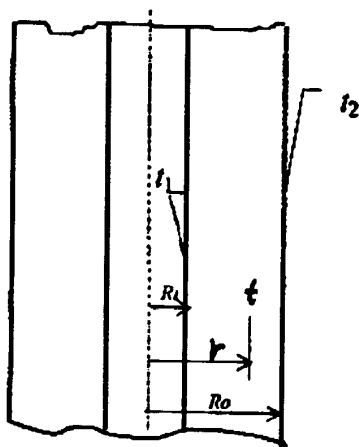


图 2-4 厚壁圆筒中的温度分布图

取基准温度为  $0^\circ\text{C}$ ，若弹性体的微单元体积加热到  $t^\circ\text{C}$ ，且允许自由膨胀，

则此单元体在各个方向产生的热应变为:

$$\varepsilon_r^{\Delta t} = \varepsilon_{\theta}^{\Delta t} = \varepsilon_z^{\Delta t} = \alpha t$$

式中  $\alpha$  为弹性体的线膨胀系数, [ $1/^\circ\text{C}$ ];  $t$  为温度差, [ $^\circ\text{C}$ ].

若弹性体受到约束, 则在弹性体内引起热应力, 而热膨胀不影响剪应变, 不产生剪应力。因此, 弹性体中每个单元体的应变为热应变与热应力引起的弹性应变所组成<sup>[15]</sup>, 即

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r' &= \frac{1}{E} [\sigma_r' - \mu(\sigma_{\theta}' + \sigma_z')] + \alpha t \\ \varepsilon_{\theta}' &= \frac{1}{E} [\sigma_{\theta}' - \mu(\sigma_r' + \sigma_z')] + \alpha t \\ \varepsilon_z' &= \frac{1}{E} [\sigma_z' - \mu(\sigma_r' + \sigma_{\theta}')] + \alpha t \\ \gamma_{zr}' &= \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{zr}' \end{aligned} \right\} \quad (2-30)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r' &= 2G(\varepsilon_r' + \frac{\mu}{1-2\mu} e - \frac{1+\mu}{1-2\mu} \alpha t) \\ \sigma_{\theta}' &= 2G(\varepsilon_{\theta}' + \frac{\mu}{1-2\mu} e - \frac{1+\mu}{1-2\mu} \alpha t) \\ \sigma_z' &= 2G(\varepsilon_z' + \frac{\mu}{1-2\mu} e - \frac{1+\mu}{1-2\mu} \alpha t) \\ \tau_{zr}' &= G\gamma_{zr}' \end{aligned} \right\} \quad (2-31)$$

式(2-31)中  $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$

$$e = \varepsilon_r' + \varepsilon_{\theta}' + \varepsilon_z' = \frac{1-2\mu}{E} (\sigma_r' + \sigma_{\theta}' + \sigma_z') + 3\alpha t$$

不计体力分量, 温差应力问题的平衡方程,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r'}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{zr}'}{\partial z} + \frac{\sigma_r' - \sigma_{\theta}'}{r} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_z'}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zr}'}{\partial r} + \frac{\tau_{zr}'}{r} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-32)$$

几何方程

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon'_r &= \frac{\partial u'}{\partial r}, & \varepsilon'_\theta &= \frac{u'}{r} \\ \varepsilon'_z &= \frac{\partial w'}{\partial z}, & \gamma'_{zr} &= \frac{\partial w'}{\partial r} + \frac{\partial u'}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (2-33)$$

由于本课题厚壁圆筒发生裂纹的部位不在端部，而在中间部位，所以可以认为不记边缘效应影响，在热应力状态下，所有垂直于轴线的断面变形相同，且保持平面，则

$$\gamma'_{r\theta} = \gamma'_{z\theta} = \gamma'_{zr} = 0 \quad \tau'_{r\theta} = \tau'_{z\theta} = \tau'_{rz} = 0$$

且  $\varepsilon'_z$  为常量，径向位移  $u$  只决定于  $r$ ，轴向位移  $w$  只决定于  $z$ ，没有  $\theta$  方向的位移，则方程简化为式

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\sigma'_r}{dr} + \frac{\sigma'_r - \sigma'_\theta}{r} &= 0 \\ \frac{d\sigma'_z}{dz} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-34)$$

$$\text{几何方程:} \quad \varepsilon'_r = \frac{du'}{dr}, \quad \varepsilon'_\theta = \frac{u'}{r}, \quad \varepsilon'_z = \frac{dw'}{dz} \quad (2-35)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_r &= 2G \left( \frac{du'}{dr} + \frac{\mu}{1-2\mu} e^{-\frac{1+\mu}{1-2\mu}\alpha t} \right) \\ \sigma'_\theta &= 2G \left( \frac{u'}{r} + \frac{\mu}{1-2\mu} e^{-\frac{1+\mu}{1-2\mu}\alpha t} \right) \\ \sigma'_z &= 2G \left( \varepsilon'_z + \frac{\mu}{1-2\mu} e^{-\frac{1+\mu}{1-2\mu}\alpha t} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2-36)$$

$$\text{式中} \quad e = \frac{du'}{dr} + \frac{u'}{r} + \varepsilon'_z$$

将物理方程代到平衡方程,有

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 u'}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du'}{dr} - \frac{u'}{r^2} &= \left( \frac{1+\mu}{1-\mu} \right) \alpha \frac{dt}{dr} \\ \frac{d^2 w'}{dz^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-37)$$

上式中第一式可写成

$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (ru') \right] = \left( \frac{1+\mu}{1-\mu} \right) \alpha \frac{dt}{dr} \quad (2-38)$$

对上式积分两次, 得

$$u = \left( \frac{1+\mu}{1-\mu} \right) \frac{\alpha}{r} \int_R^r t r dr + C_1 r + \frac{C_2}{r} \quad (2-39)$$

将上式代入几何方程式, 得

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r' &= \frac{du'}{dr} = \frac{1+\mu}{1-\mu} \left( -\frac{\alpha}{r^2} \int_R^r t r dr + \alpha t \right) + C_1 - \frac{C_2}{r^2} \\ \varepsilon_\theta' &= \frac{u'}{r} = \frac{1+\mu}{1-\mu} \frac{\alpha}{r^2} \int_R^r t r dr + C_1 + \frac{C_2}{r^2} \\ \varepsilon_z' &= \frac{dw'}{dz} = \text{常数} \end{aligned} \right\} \quad (2-40)$$

将式 (2-33) 代入式 (2-31), 得温差应力表达式:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r' &= -\frac{E\alpha}{(1-\mu)} \frac{1}{r^2} \int_R^r t r dr + C_3 - \frac{C_4}{r^2} \\ \sigma_\theta' &= \frac{E\alpha}{(1-\mu)} \frac{1}{r^2} \int_R^r t r dr - \frac{E\alpha t}{1-\mu} + C_3 + \frac{C_4}{r^2} \\ \sigma_z' &= -\frac{E\alpha t}{1-\mu} + 2\mu C_3 + E\varepsilon_z' \end{aligned} \right\} \quad (2-41)$$

式中:

$$C_3 = \frac{E(C_1 + \mu \varepsilon_z')}{(1+\mu)(1-2\mu)}$$

$$C_4 = \frac{EC_2}{1+\mu}$$

$C_3$ 、 $C_4$ 、 $\varepsilon_z'$  由应力边界条件决定。

本研究课题中由于失效集箱的裂纹为外壁环向裂纹, 从外壁向内壁深入, 只关心与垂直于裂纹方向的外壁面的应力状态, 所以先认为, 仅沿筒体壁厚方向存在温度差, 不承受其它载荷, 则边界条件为:

$$\begin{cases} r = R_i \text{ 时, } \sigma'_r = 0 \\ r = R_o \text{ 时, } \sigma'_r = 0 \\ \int_{R_i}^{R_o} 2\pi r \sigma'_z dr = 0 \end{cases}$$

将上述边界条件代入式 (2-41), 得

$$\begin{cases} -\frac{E\alpha}{(1-\mu)R_i^2} \int_{R_i}^{R_o} tr dr + C_3 - \frac{C_4}{R_i^2} = 0 \\ -\frac{E\alpha}{(1-\mu)R_o^2} \int_{R_i}^{R_o} tr dr + C_3 - \frac{C_4}{R_o^2} = 0 \\ -2\pi \int_{R_i}^{R_o} \left( \frac{E\alpha t}{1-\mu} - 2\mu C_3 - E\varepsilon'_z \right) r dr = 0 \end{cases} \quad (2-42)$$

联立求解上述方程组, 得:

$$\left. \begin{aligned} C_3 &= \frac{E\alpha}{(1-\mu)(R_o^2 - R_i^2)} \int_{R_i}^{R_o} tr dr \\ C_4 &= R_i^2 C_3 = \frac{E\alpha}{(1-\mu)(R_o^2 - R_i^2)} \int_{R_i}^{R_o} tr dr \\ \varepsilon'_z &= \frac{2(1-\mu)}{E} C_3 = \frac{2\alpha}{R_o^2 - R_i^2} \int_{R_i}^{R_o} tr dr \end{aligned} \right\} \quad (2-43)$$

圆筒体在稳定传热情况下, 沿壁厚上任意一点距离圆心  $r$  处的温度  $t$  的分布为

$$t = \frac{t_1 \ln \frac{R_o}{r} + t_2 \ln \frac{r}{R_i}}{\ln \frac{R_o}{R_i}} \quad (2-44)^{[16]}$$

将式 (2-44) 代入计算式中的积分式:

$$\int_{R_i}^{R_o} tr dr = \frac{1}{2 \ln \frac{R_o}{R_i}} \left[ \left( r^2 \ln \frac{R_o}{r} - R_i^2 \ln \frac{R_o}{R_i} + \frac{r^2 - R_i^2}{2} \right) t_1 + \left( r^2 \ln \frac{r}{R_i} - \frac{r^2 - R_i^2}{2} \right) t_2 \right] \quad (2-45)$$

由此:

$$\int_{R_i}^{R_o} tr dr = \frac{1}{2 \ln \frac{R_o}{R_i}} \left[ \left( R_o^2 \ln \frac{R_o}{R_i} - \frac{R_o^2 - R_i^2}{2} \right) t_2 - \left( R_i^2 \ln \frac{R_o}{R_i} - \frac{R_o^2 - R_i^2}{2} \right) t_1 \right] \quad (2-46)$$

将式 (2-46) 代入式 (2-43), 得:



$$\left. \begin{aligned}
 C_3 &= \frac{E\alpha}{2(1-\mu)(R_o^2 - R_i^2) \ln \frac{R_o}{R_i}} \left[ \left( R_o^2 \ln \frac{R_o}{R_i} - \frac{R_o^2 - R_i^2}{2} \right) t_2 - \left( R_i^2 \ln \frac{R_o}{R_i} - \frac{R_o^2 - R_i^2}{2} \right) t_1 \right] \\
 C_4 &= R_i^2 C_3 \\
 \epsilon'_z &= \frac{2(1-\mu)}{E} C_3
 \end{aligned} \right\} \quad (2-47)$$

将式 (2-45)、式 (2-47) 代入式 (2-41)，经化简整理得厚壁圆筒温差应力的表达式为

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma'_r &= -\frac{E\alpha(t_1 - t_2)}{2(1-\mu)} \left[ \frac{\ln \frac{R_o}{r} - \frac{R_o^2}{r^2} - 1}{\ln \frac{R_o}{R_i} - \frac{R_o^2}{R_i^2} - 1} \right] \\
 \sigma'_\theta &= -\frac{E\alpha(t_1 - t_2)}{2(1-\mu)} \left[ \frac{\ln \frac{R_o}{r} - 1 + \frac{R_o^2}{r^2} + 1}{\ln \frac{R_o}{R_i} - \frac{R_o^2}{R_i^2} - 1} \right] \\
 \sigma'_z &= -\frac{E\alpha(t_1 - t_2)}{2(1-\mu)} \left[ \frac{2 \ln \frac{R_o}{r} - 1}{\ln \frac{R_o}{R_i} - \frac{R_o^2}{R_i^2} - 1} + \frac{2}{\frac{R_o^2}{R_i^2} - 1} \right]
 \end{aligned} \right\} \quad (2-48)$$

令  $K = \frac{R_o}{R_i}$ ,  $K_r = \frac{R_o}{r}$ ,  $\Delta t = t_1 - t_2$ ,  $P_t = \frac{E\alpha(t_1 - t_2)}{2(1-\mu)}$  则式 (2-48) 变为:

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma'_r &= P_t \left[ -\frac{\ln K_r + \frac{K_r^2 - 1}{K^2 - 1}}{\ln K} \right] \\
 \sigma'_\theta &= P_t \left[ -\frac{\ln K_r - 1 + \frac{K_r^2 + 1}{K^2 - 1}}{\ln K} \right] \\
 \sigma'_z &= P_t \left[ -\frac{2 \ln K_r - 1}{\ln K} - \frac{2}{K^2 - 1} \right]
 \end{aligned} \right\} \quad (2-49)$$

式(2-49)是厚壁圆筒仅存在径向温差时的应力表达式。温差应力沿筒壁厚度的分布如图 2-5 所示。

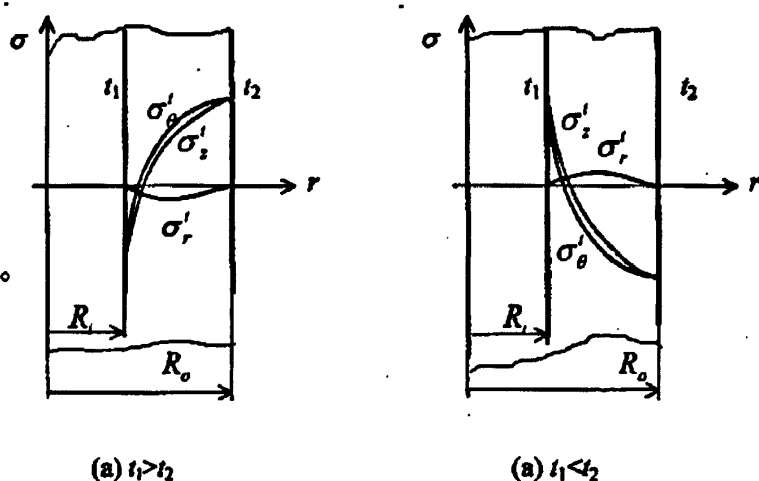


图 2-5 厚壁圆筒中的应力分布图

厚壁圆筒中，温差应力与温度差  $\Delta t$  成正比，而与温度本身的绝对数值无关，因此在圆筒内壁或外壁进行保温，以减小内、外壁的温度差，可以降低厚壁圆筒的温差应力。三向应力沿壁厚均为非均匀分布。其中，轴向应力是环（周）向应力与径向应力之和，即： $\sigma'_z = \sigma'_\theta + \sigma'_r$  在内、外壁面处，径向应力为零，轴向应力和环（周）向应力分别相等，且最大应力发生在外壁面处。温差应力是由于各部分变形相互约束而产生的，因此应力达到屈服极限而发生屈服时，温差应力不但不会继续增加，而且在很大程度上会得到缓和，这就是温差应力的自限性，它属于二次应力。

## 2.3 失效锅炉的基本情况及其计算结果

### 2.3.1 锅炉的基本情况

表 2-1 锅炉的主要规范<sup>[17, 18]</sup>

项 目	单 位	额 定 值
额定蒸发量	t/h	35
汽包工作汽压力	MPa	5.82
过热器出口压力	MPa	5.3
过热蒸汽温度	°C	485
高温过热器介质进口温度	°C	408

## 第二章 集箱受力分析

项 目	单 位	额 定 值
低温过热器介质出口温度	℃	440
省煤器进口给水温度	℃	104
炉水饱和温度	℃	278
空气预热器进口风温	℃	20~30
空气预热器出口风温	℃	130
燃烧室理论燃烧温度	℃	1650
燃烧室出口烟温	℃	993
冷渣管出口烟温	℃	960
高温过热器出口烟温	℃	870
低温过热器出口烟温	℃	637
省煤器出口烟温	℃	240
空气预热器出口烟温	℃	154
给水压力	MPa	8.75
水冷壁下集箱（发生失效）工作压力	MPa	6.0

注：燃烧方式为链条炉排层燃，设计的燃料为开滦烟煤

表 2-2 基础计算数据<sup>〔1〕</sup>

	100℃	200℃	300℃	400℃
热膨胀系数 $\alpha$ ( $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )	11.6	12.12	12.78	13.83
弹性模量 E ( $\times 10^5 \text{MPa}$ )	1.87	1.79	1.70	1.61
热导率 $\lambda$ (w / (m $\times$ K))	50.7	48.6	46.1	43.3
密度 $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )		7.82		
抗拉强度 Rm (MPa)		455		
屈服强度 Rel (MPa)		255		
泊松比 $\mu$		0.3		

### 2.3.2 应力计算结果

工况 1：正常运行，内壁温度为 278℃，外壁温度为 388℃，内外壁温差—110℃；工况 2：停炉，内壁温度 278℃，炉膛内停止燃料的投放，炉膛温度下降，下降到 278℃以后，集箱外表面开始冷却，在外壁冷却过程中内外壁最大温差 90℃；工况 3：启动锅炉，炉膛内升火，炉膛内温度达到 104℃以上时（集箱内工质的温度为 104℃），集箱外表面开始受热，内外壁最大温差—90℃。工况 2 和

工况 3 的温度差主要为锅炉的操作规程要求进行人为控制, 起炉与停炉的时间, 均约为 6 小时<sup>[20]</sup>。

将基础数据和三种不同工况下的温度数值代入式 (2-49) 得到不同工况下的应力计算数值, 见表 2-3。

表 2-3 不同工况的计算结果

	正常运行 ( $t_2 > t_1$ )	停炉降压 ( $t_2 < t_1$ )	起炉升压 ( $t_2 > t_1$ )
$\Delta t = t_1 - t_2$ (°C)	-110	90	-90
$\sigma_{Z(r=R_i)}^i$ (MPa)	155.08	-126.89	126.89
$\sigma_{Z(r=R_o)}^i$ (MPa)	-155.08	126.89	-126.89
工质内压 (MPa)	6.0	6.0	6.0
内压引起的轴向应力 (MPa)	8.83	8.83	8.83
集箱外壁面叠加应力 (MPa)	-146.25	135.72	-118.06

注: 内壁温度为  $t_1$ , 外壁温度为  $t_2$ ,  $\sigma_{Z(r=R_o)}^i$  为外壁轴向应力,  $\sigma_{Z(r=R_i)}^i$  为内壁轴向应力

### 2.3.3 锅炉应力循环说明

发生失效分析的锅炉属于某大型化工集团的自备电厂发电锅炉, 它的负荷是稳定的, 负荷的变动是要按照电网调度的指令进行, 不会随意的波动, 所以没有考虑锅炉负荷波动造成的集箱外壁面应力波动。另外需要指出的是, 在计算时还是忽视了炉膛内燃烧过程的随机因素, 因为这样的随机因素在进行锅炉设计的时候已经有了热偏差的考虑, 燃烧的随机因素对于锅炉壁面温度的影响是很小的, 所以可以只考虑了按照电网要求进行负荷变动的启停炉造成的温差应力。

本文提出的失效的集箱在 1983 年投入运行, 至 2003 年发生环向裂纹失效, 实际运行时间为 10 年, 按照调峰锅炉压机组的实际运行情况要求, 平均每年停炉约为 40 次, 按照每年 8760 小时计算, 大约每次的运行周期为 219 小时, 约为 10 天左右, 经历的启炉(6h)—运行(160h)—停炉(6h)的循环周期, 如图 2-6 所示。这样可以认为锅炉集箱使用了 20 年, 经历了共计 800 余次的应力循环发生了裂纹失效, 应该属于低周疲劳造成的失效。

图 2-6 中 0A 阶段为锅炉启动阶段炉膛内生火加热集箱外表面至 194°C, AB

阶段为控制运行阶段保证集箱的内外表面温差为 $-90^{\circ}\text{C}$ ，BC为控制温差运行结束后升压升温的过程；CD为正常运行阶段集箱的外壁温为 $388^{\circ}\text{C}$ ，内外表面温差为 $-110^{\circ}\text{C}$ ；DE阶段为停炉阶段，停止向炉膛内添加燃料后烟气冷却，集箱外壁温从 $388^{\circ}\text{C}$ 下降，当外壁温为 $278^{\circ}\text{C}$ 时温差应力为0，然后继续下降至 $188^{\circ}\text{C}$ 时采取控制冷却措施，EF为采取控制冷却措施集箱内工质温度从 $278^{\circ}\text{C}$ 下降时，控制内外壁温差为 $90^{\circ}\text{C}$ 。

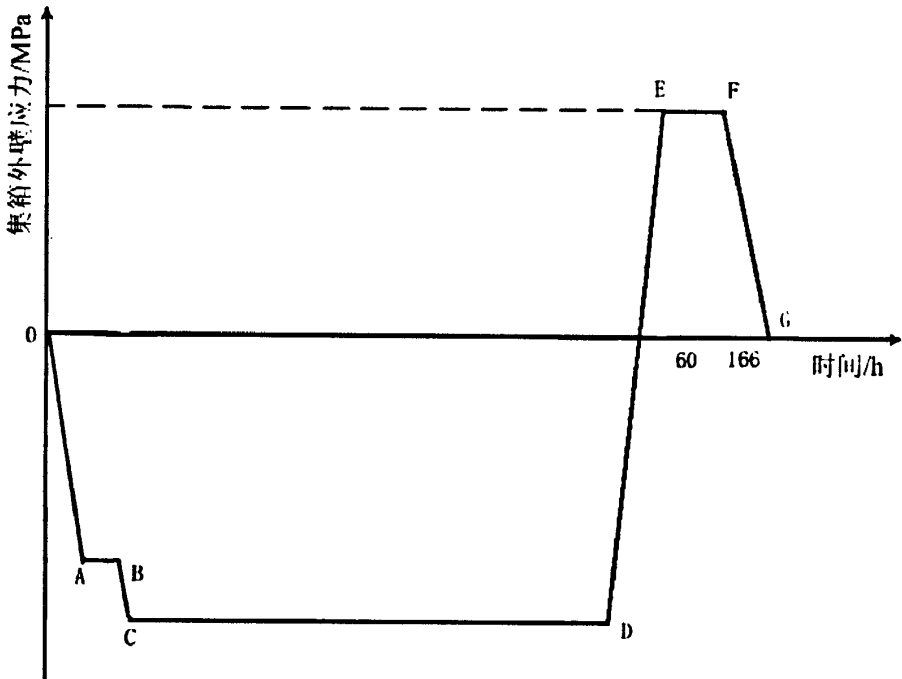


图 2-6 集箱外壁应力随锅炉工况变化示意图

## 2.4 本章小结

因为发生开裂的锅炉集箱是从外壁开裂，本章的应力分析主要考虑了外壁面的应力状态，而且关注的应力方向也是裂纹开裂垂直方向轴向应力。在轴向的应力由两部分组成，一个是工作应力 $8.83\text{MPa}$ ，已经在锅炉设计的时候考虑，并且留了相当大的强度裕量，另一个是内外壁的温度差异造成的温差应力。在进行温度应力计算的时候，作了集箱为弹性体的假设<sup>[21]</sup>，而且为了计算的简便，没有考虑工作内压造成的轴向应力，这部分应力是单独计算叠加的。计算结果不大于材料的屈服极限，这也和实际情况中裂纹区域没有任何宏观的塑性变形可以互相印

证明。同样由于计算得出的数值均小于材料的屈服极限，这样也满足了在进行计算的时候认为集箱是弹性体的假设。应力分析实际过程的结果：在锅炉启动的过程集箱外壁受压应力，正常运行时候受压应力，停炉的过程中受拉应力。

## 第三章 裂纹分析

失效元件的裂纹含有大量的信息, 裂纹以及周边的组织记录了元件在载荷与环境作用下的塑性变形, 以及裂纹萌生和扩展的全过程<sup>[22]</sup>。对裂纹以及周边的组织进行分析, 可以用来推断裂纹发生的过程, 寻找裂纹出现的原因, 取得第一手的资料。

### 3.1 化学成分分析

对失效的集箱筒体取样, 去除表面氧化腐蚀层后, 并注意选取没有裂纹的部位, 进行了化学成分分析, 结果表明, 集箱筒体的材质化学成分符合 GB5310《高压锅炉用无缝钢管》标准的化学成分的要求(见表 1)。

表 3-1 失效筒体的化学成分分析 %

20G <sup>[23]</sup>									
	C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni	V
标准值	0.17-0.24	0.35-0.65	0.17-0.37	<0.03	<0.03	≤0.2	≤0.25	≤0.25	≤0.08
检测值	0.20	0.38	0.26	0.02	0.02	0.1	0.1	0.12	0.05
结论	符合 GB5310 高压锅炉用无缝钢管的化学成分要求								

### 3.2 裂纹宏观形貌分析

图 3-1 为失效集箱筒体裂纹区失效部件的外壁表面, 图 3-2 为失效集箱筒体裂纹区失效部件的内壁表面, 其中图中黑色记号笔圈定区域为线切割后裂纹剖面进行金相分析和扫描电镜分析的试样区域。

对失效元件切取的部分进行了宏观的观察可以发现, 内壁无任何水垢的痕迹, 排除了水垢热阻造成壁温升高导致材质劣化的可能。从图 3-1 可以看到在外壁表面有氧化和腐蚀痕迹, 表面随机均布腐蚀凹坑深 0.5mm 左右, 直径约为  $\phi$  0.5—1.0mm 不等, 数百道裂纹沿集箱筒体环向分布, 裂纹是从集箱筒体外侧开裂向内侧扩展的, 长短不一, 裂纹张口宽度不一, 还没有裂穿至内壁, 尚未发生泄漏失效。

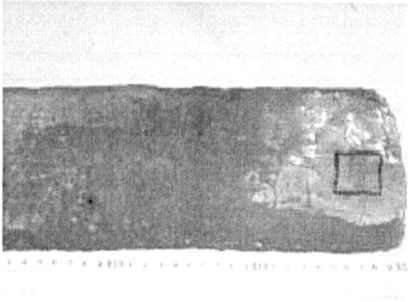


图 3-1 集箱外侧筒壁

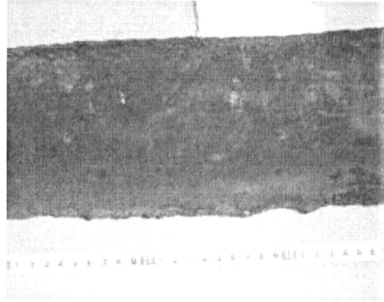


图 3-2 集箱内侧筒壁

图 3-3—图 3-6 为利用体视显微镜放大 50 倍后，对失效集箱筒体裂纹进行观察的图片，在图 3-3 中左侧的大裂纹在扩展的过程中，出现和分叉和交插，右侧相伴而生的微小裂纹有相互交插的趋势；在图 3-4 中可以看出，上部粗大而下部逐渐细小，说明裂纹的起源点在图片上部，在相应的工作条件下，经过相当长的时间，从图片的上部向下部扩展的；不同的裂纹扩展过程中互相贯通，在图 3-5 中看出一条大的裂纹扩展过程中与一条小的裂纹的分支相连接贯通；在图 3-6 中在任意选定的 15mm 长度范围区域内，计有裂纹张口宽度大于 1mm 的裂纹 2 条，裂纹张口宽度小于 1mm 的裂纹 11 条。

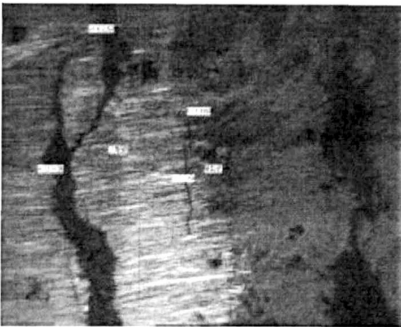


图 3-3 大裂纹与微裂纹



图 3-4 大裂纹的扩展

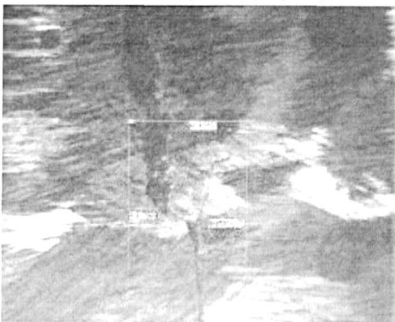


图 3-5 裂纹间的贯通

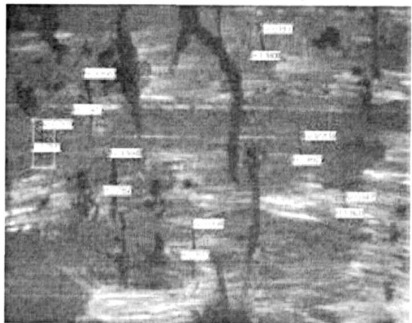


图 3-6 随机区域内的裂纹密度

由宏观形貌分析，可以看出裂纹在失效的元件界面上是随机产生的，裂纹



源的起点是在外壁,存在多个裂纹源,裂纹的张口垂直于筒体的轴向,可以推断出,引起裂纹发生发展的应力,应该是筒体的轴向应力,不同裂纹在发展扩大的过程中,会和相邻的裂纹相互作用,改变本来的方向,选择需要克服最小阻力的方向,发生偏斜。失效元件裂纹源位置也是随机的,并没有固定的位置规律可循。但是值得注意的是在失效元件的外壁表面有氧化和腐蚀痕迹,在图 3-1 中清晰可见,外壁表面未发生裂纹区域随机分布腐蚀凹坑深 0.5mm 左右,直径约为  $\Phi 0.5-1.0\text{mm}$  不等,这些腐蚀凹坑也是在裂纹集中出现的受压元件向火面集中出现,内壁和背火面的氧化和腐蚀凹坑情况就要轻很多,所以,初步认为它们与裂纹的产生应该是有一定关联的。

### 3.3 金相分析

对图 3-1 中失效集箱筒体黑色记号笔圈定区域(尺寸为  $20\times 20\text{mm}$ ,区域内有两条裂纹,大裂纹张开宽度为 1.5mm,小裂纹张开宽度为 0.5mm)线切割取样后进行金相分析。图 3-7 和图 3-8 为外壁表面抛光后观察的金相图片。图 3-7 中金相组织为珠光体+铁素体,与金相图谱<sup>[24]</sup>上 20G 材质金相图谱对比晶粒大小正常,可以肯定的是失效元件没有超温的工况。图 3-8 中可见明显的带状组织,这些带状组织的分布与走向也与管子制造过程中顶管的工艺过程相符。而且裂纹发生的方向与带状组织的走向相垂直,所以可以排除带状组织与裂纹发生、扩展的关系。



图 3-7 3%硝酸酒精腐蚀以后 F+P

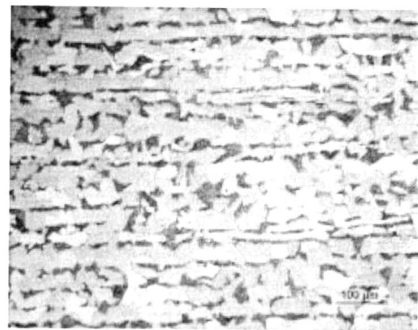


图 3-8 带状组织

图 3-9—图 3-14 为 3%硝酸酒精腐蚀试件后从外壁向内壁厚度方向剖面的金相图片,可以清楚的看到裂纹由外壁向内壁扩展的过程和形态。图 3-9 为小裂纹的大致形貌,小裂纹沿筒体壁厚方向深度为 10mm,裂纹的两侧曲折蜿蜒,没有锋利的刀刃面,可以肯定为非脆性断裂<sup>[25]</sup>,应该为典型的疲劳扩展形貌,裂纹扩展的尖端为典型塑性钝化圆形。在图 3-10 中更明显的看出裂纹的尖端为典型

的塑性钝化圆形，裂纹内部有黑色的一些腐蚀产物，并且在尖端有三处沿晶界腐蚀开裂分叉的情况。但是却与疲劳裂纹一般是穿晶断裂的经验不相符合。

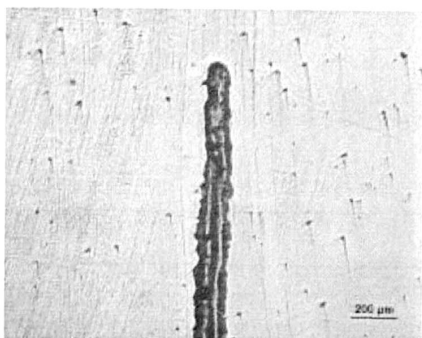


图 3-9 小裂纹形貌

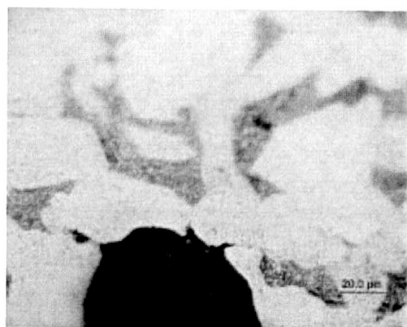


图 3-10 裂纹尖端的沿晶界开裂

图 3-11 为大裂纹的大致形貌，大裂纹沿筒体壁厚方向深度为 18mm，裂纹两侧为典型的疲劳扩展形貌；图 3-12 为裂纹尖端扩展的钝化形态，在图的左侧可以观察到裂纹沿扩展方向的垂直方向有一明显的分支，与主应力方向平行，但是分支沿带状组织的条状夹杂物方向，这说明在这个分支的扩展过程中应力的因素远远小于腐蚀的因素，主要是由腐蚀与带状组织中的条状夹杂物反应造成的裂纹分支。

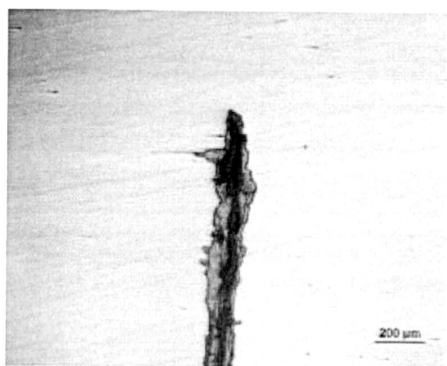


图 3-11 大裂纹



图 3-12 裂纹尖端

在图 3-13—图 3-14 中清晰可见大裂纹内部的一些附着物和腐蚀产物。图 3-13 中可以看出裂纹的宽度大于一个晶粒，裂纹内晶界处有黑色的腐蚀产物，将晶粒的分界勾勒得十分清楚，这也和图 3-10 中的裂纹头部沿晶界开裂可以相互呼应证明，腐蚀是沿晶界发生的，并最终引起了晶界弱化开裂，裂纹的边缘曲折蜿蜒但不锋利，同样也是具有疲劳断口的形貌。另外，在裂纹的边缘也是有一层黑色的腐蚀（或者氧化）产物与基体形成的明确界限。更为明显的是在图 3-14 裂纹内

部左侧边缘有类似于氧化铁样的条块状物质，裂纹中间等部位，有一些具有反射光泽特性，颜色为黄褐色，类似于熔融硫酸盐类的结晶或腐蚀产物，呈现极细的条带状分布，宽度为零点几到一微米不等，长度为贯穿整个裂纹由浅及深方向，在整个裂纹宽度内存在十余道这样的类熔盐类分布条带，也是此次裂纹分析的一个特点。

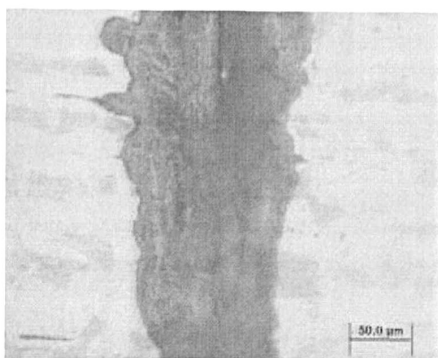


图 3-13 裂纹的边缘和内部

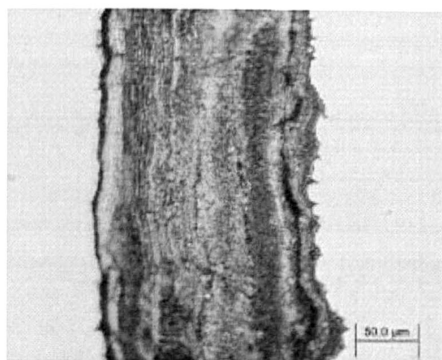


图 3-14 裂纹内部的可疑物

在对失效元件无裂纹组织进行分析发现，晶粒组织很正常，并未有粗大的现象，可以肯定的认为失效原因与超温使用无关，从大、小两条裂纹的扩展形貌观察符合疲劳断口疲劳纹（侧剖面）的非晶体学延性(高应力)形态，而且裂纹内部有腐蚀产物。所以，可以认为裂纹的产生来源于循环的应力经过一定次数循环作用产生的疲劳裂纹，但是与普通的疲劳裂纹断口又有相当的区别，首先是应力水平的差异，其次存在了腐蚀的特殊因素，而且可以初步认为腐蚀和腐蚀产物在裂纹的发生与发展过程中也起到了相当的作用，弥补了应力水平的差距，造成了开裂。在考虑腐蚀产物的时候，由于图 3-14 中所示的类似于熔融硫酸盐类的物质和实际的工作温度（在设计计算的时候选用的壁温为  $388^{\circ}\text{C}$  [26]，但是由于运行过程中的流量不均以及燃烧以及配风造成的热偏差而使壁温大于等于  $400^{\circ}\text{C}$  的可能性是相当大的），所以应该考虑烟灰和烟气的高温腐蚀。

### 3.4 扫描电镜分析

图 3-12 与表 3-2 的化学成分裂纹电子显微图片和裂纹边缘微区 1 内的面扫描化学成分分析结果，对于微区 1，它的位置是在裂纹的边缘非常靠近基体的位置，这个位置可以认为是腐蚀作用后腐蚀产物聚集的位置，是具有代表性的一个区域，这个区域中的腐蚀产物还没有（或者还较少）的受到从裂纹开口端进入的

腐蚀介质的影响，最能到代表腐蚀产物的化学成分。在化学成分表中可以看出 Fe 的含量（按原子百分比计，下同）为 39.19%，比基体组织的 Fe 的含量（一般应为 90%以上）下降得十分明显，同样的 S 的含量从基体中的 0.02%上升到 12.15%，而氧元素含量上升到了 40.30%，氧元素含量的上升一般可以认为是由于元件高温长时间使用下的氧化的必然结果，它的氧化产物为  $Fe_2O_3$ ，因为如果氧化产物是  $Fe_3O_4$ ，则会使金属的表面形成致密的保护膜，防止氧化和腐蚀，这样裂纹和腐蚀就不会扩展，与实际的情况不符合。这样，根据氧元素含量，可以认为 Fe 与 S 元素的结合形式为  $FeS$  或者  $FeSO_3$ ，分析的结果，与实际检测结果符合性是比较好的。

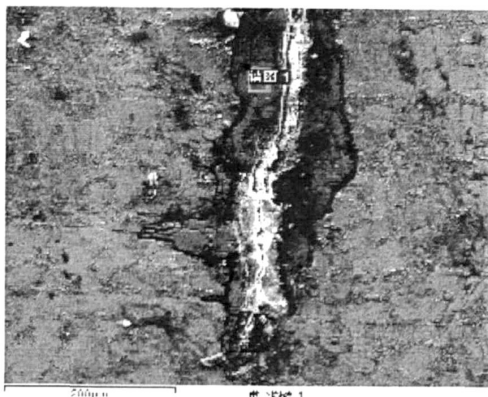


图 3-12 裂纹边缘电子显微图片

表 3-2 微区的化学成分

元素	重量%	原子%
C K	2.87	7.98
O K	19.31	40.30
S K	11.66	12.15
Mn K	0.63	0.39
Fe K	65.53	39.19
总量	100.00	

图 3-13 与表 3-3 的化学成分裂纹电子显微图片和裂纹边缘点 2 的点扫描化学成分分析结果，在化学成分的结果表中 Al 的含量明显的升高为 15.88%，Fe 的含量更是降低为 10.36%，由于进行的是点扫描，点选取的会有较大的偶然性。在结果中 Cr, Ni 含量的增加很有可能是由于试样制造过程中一些因素相关，而与腐蚀和腐蚀产物的关联度不高。

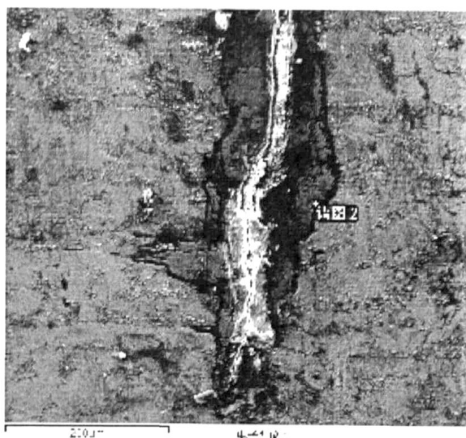


图 3-13 裂纹边缘电子显微图片

表 3-3 点的化学成分

元素	重量 百分比	原子 百分比
C K	13.10	26.53
O K	24.22	36.85
Na K	0.67	0.70
Al K	17.61	15.88
Si K	0.37	0.32
K K	0.44	0.28
Cr K	16.04	7.51
Fe K	23.78	10.36
Ni K	3.78	1.57
总量	100.00	

图 3-14 是对裂纹内部进行的扫描电镜分析，对应的表 2-4 分别为对应的图中标注的微区进行面扫描的化学成分。从图中可以很明确的看出，进行成分扫描的微区是位于裂纹中的缝隙部位，这个部位的成分应该包括腐蚀产物，基体的氧化物，腐蚀产物的氧化物，以及腐蚀介质。但是得出的结果却相对的简单，Fe 的含量进一步下降至 8.92%，而相对的氧的含量却达到了最高的 47.28%，Al 的含量也是达到了 22.09%，可以认为在缝隙中的物质氧化的程度比较高。从原子的比率上可以分析出，成分应该为  $Al_2O_3$  和  $Fe_2O_3$ 。燃料煤中是由一定量的 Al 存在的，这就决定了煤灰中会存在一定的  $Al_2O_3$ 。而  $Al_2O_3$  也是金属高温硫腐蚀的中间产物和催化剂， $Al_2O_3$  存在较高的含量的，也可以从另一个方面证明高温的硫和硫酸盐腐蚀，是造成腐蚀的重要原因。

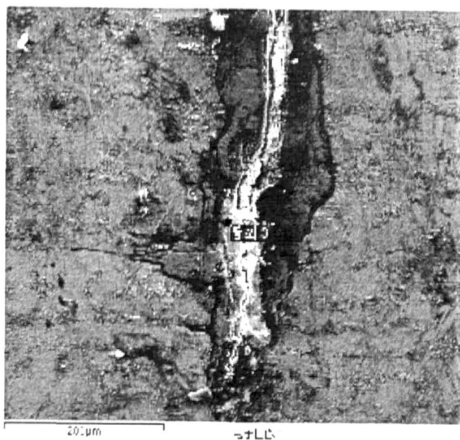


图 3-14 裂纹内部电子显微图片

表 3-4 微区的化学成分

元素	重量 百分比	原子 百分比
C K	12.35	21.71
O K	35.83	47.28
Al K	28.23	22.09
Fe K	23.59	8.92
总量	100.00	

在图 3-15 中裂纹的尖端分界线清晰可见，在裂纹的尖端呈现钝化的圆形，在裂纹尖端的内侧（已开裂区域）明显有一层沿着分界线的白色疏松状物质，在裂纹尖端的外侧（未开裂区域）也有明显的白色疏松状物质但是颜色和内侧的相比要淡一些，裂纹尖端的外侧，颜色已经发生了加深改变，而且呈现孔状（孔径大约十几微米）的疏松结构。而在化学成分的分析结果可以看出，Fe 的含量下降到 23.27%，但是氧的含量达到了几次扫描分析的最大值的 61.40%，但是硫的含量为 0.19%。在外观形态上，与基体本来的形态相比发生了较大的改变。



图 3-15 裂纹尖端电子显微图片

表 3-5 裂纹尖端点 1 的化学成分

元素	重量 百分比	原子 百分比
C K	7.22	14.87
O K	39.70	61.40
Si K	0.31	0.28
S K	0.24	0.19
Fe K	52.52	23.27
总量	100.00	

在图 3-16 中裂纹的裂纹电子显微照片中点 2 进行的电子扫描化学成分分析结果如表 3-6，点 2 的位置是在裂纹尖端的内侧（已开裂区域），对应的化学成分的分析结果可以看出，Fe 的含量下降到 37.93%，但是氧的含量达到 29.57%，硫的含量为 2.85%。



图 3-16 裂纹尖端电子显微图片

表 3-6 裂纹尖端点 2 的化学成分

元素	重量百分比	原子百分比
C K	11.72	29.65
O K	15.57	29.57
S K	3.01	2.85
Fe K	69.70	37.93
总量	100.00	

在图 3-17 中图示位置沿裂纹横截面方向进行扫描电镜元素分析，发现在微裂纹以外的基体部位，铁的元素含量占到 60—70% 以上，而对应的裂纹区域氧元素含量明显的升高达到 50% 以上。硫元素含量在裂缝的内部也是在 20% 以上，表明了无论是腐蚀产物还是裂纹内部的腐蚀介质都是含有大量的硫元素和氧元素。

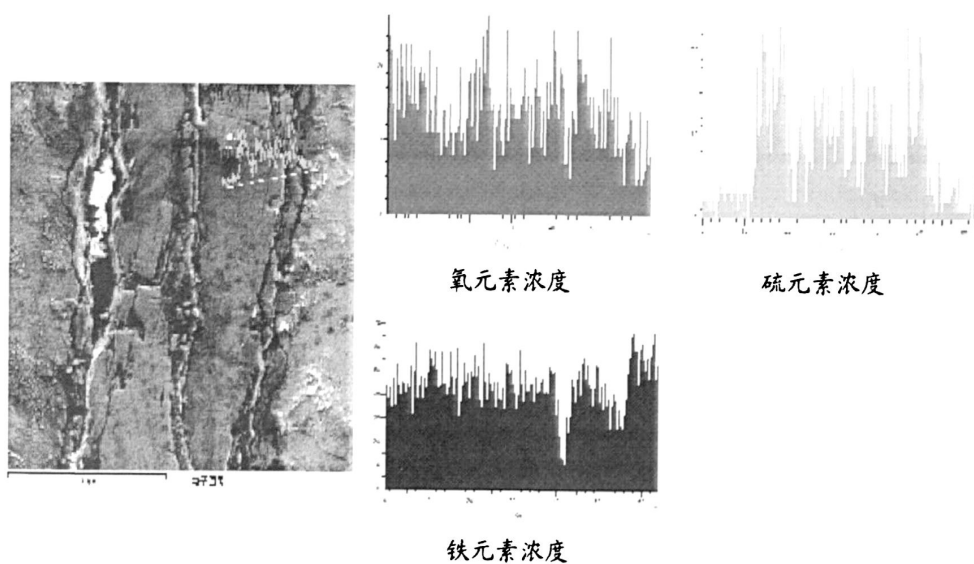


图 3-17 裂纹电子显微图片及横断面化学元素分布

在图 3-18 中图示裂纹中部位置沿裂纹横截面方向进行扫描电镜元素分析，在这次进行扫描分析中，增加了碳元素，结果表明碳元素在裂纹内部中心部位的一些部位含量几乎为零。而众所周知的是，碳元素在钢中是以渗碳体形式存在的，所以认为在裂纹的缝隙中，渗碳体已经被腐蚀剥落。

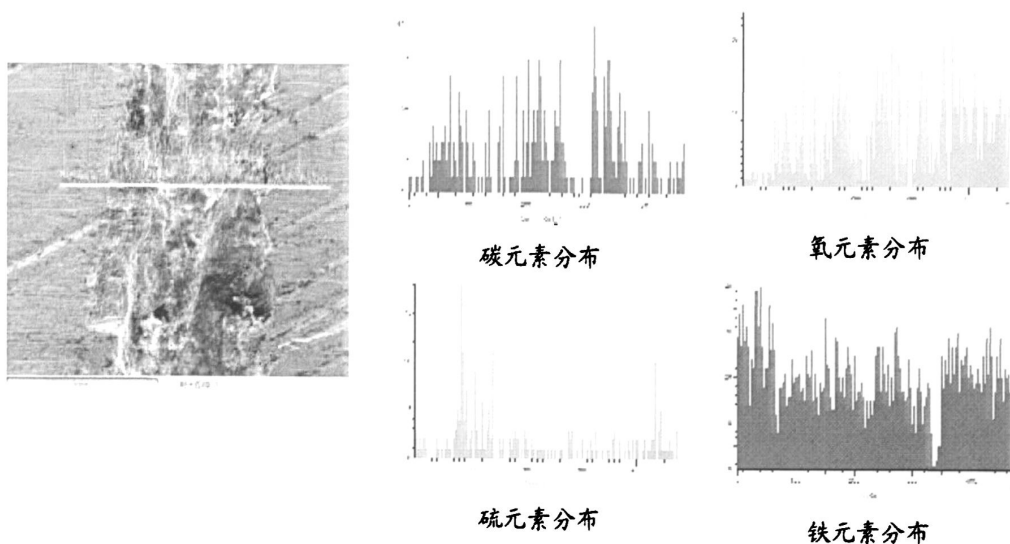


图 3-18 裂纹中部横断面扫描及化学元素分布

在图 3-19 中裂纹的边缘可见白色的将要脱落的腐蚀产物，在腐蚀产物上取了一点进行分析，结果中，含有 Na, Si, S, Cl 等元素，比较特殊的是，这个部位的碳含量为 72.51%，含碳量的高可以认为是脱落的渗碳体占了相当的成分。



图 3-19 裂纹边缘显微图片

表 3-7 裂纹边缘点 1 的化学成分

元素	重量%	原子%
C K	57.13	72.51
O K	20.35	19.39
Na K	1.89	1.25
Si K	0.58	0.31
S K	0.57	0.27
Cl K	4.62	1.99
K K	1.85	0.72
Fe K	13.01	3.55
总量	100.00	

通过对各种电镜图片的分析对比，发现腐蚀产物对裂纹的扩展作用明显，在图 3-14—图 3-16 中裂纹的边缘和内部的化学成分，可以看出氧的含量明显的增高，原子百分比从 36.85%到 47.28%，在图 3-17 中裂纹的尖端的电子显微照片中更是达到了 61.40%；值得注意的是 Al 的原子含量也是有大幅度的升高，原子



百分比从 15.88% 到 22.09%，在图 3-18 裂纹横断面的元素扫描时，Al 的含量在裂纹中间部位更是高达 50% 以上；而同样值得注意的是 Cl 的含量也有显著的升高，在图 3-19 裂纹边缘显微图片中，疑似即将脱离基体的腐蚀产物中 Cl 的原子百分比达到了 2%，而钢的元素分析中是不包含 Cl 元素和 Al 元素。可以肯定的是，腐蚀的原因和 O, Cl, Al 元素的含量升高有密不可分的关系。在图 3-16 中裂纹的尖端前部尚未开裂的部分，由于腐蚀的作用已经呈现多孔状的疏松结构，与基体本来的形态发生了明显的改变。所以，可以明确的得出结论，应力和腐蚀作用共同造成了开裂。

### 3.5 断面分析

为了更加清楚的了解裂纹内部的情况，将裂纹的试件放在 3 吨的压力试验机进行了压断，将裂纹打开。裂纹断面形貌如图 3-16—图 3-21 所示。

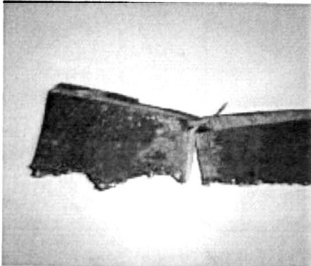


图 3-16 试件进行背弯压断

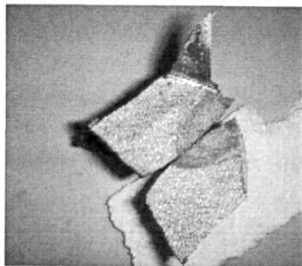


图 3-17 裂纹断口两侧截面

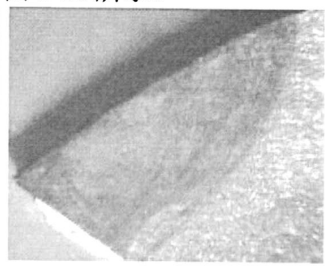


图 3-18 裂纹断口全貌

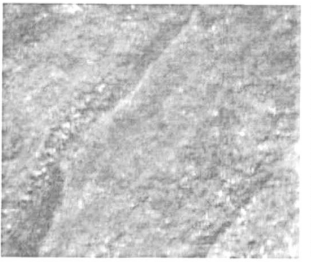


图 3-19 裂纹断口图

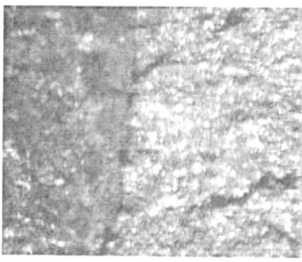


图 3-20 裂纹尖端断口界面



图 3-21 裂纹界面腐蚀产物

图 3-16 为对试件进行背弯压断。图 3-17 和图 3-18 是裂纹打开后试件的断口全貌，图 3-17 可以看到裂纹两侧的断面纹路两面对应，可以互相吻合的很好，是典型的疲劳纹路形貌<sup>[27]</sup>。图 3-18 和图 3-19 可以明显的看出疲劳痕迹<sup>[28]</sup>，表征了应力循环作用的疲劳纹路。从图 3-18 可以看出，在裂纹由浅入深的断面中，早期已经开裂的部分变成了氧化铁的砖红色，中部是一些黑灰色的腐蚀产物（在图 3-21 中可以更清楚的看到腐蚀产物）。

在图 3-19 中裂纹的尖端明显界限的位置外侧（属于基体部分）稍微的有一

些颜色的变化，明显可以得出结论在靠近裂纹的基体部分有了腐蚀作用，这也可和对裂纹尖端的电镜分析结果相吻合。

小结：将裂纹打开进行断面分析结果也支持了电镜扫描分析的结论：裂纹的发生、扩展是与应力和腐蚀作用相辅相成的结果，二者缺一不可。

### 3.6 本章小结

综合对失效的集箱筒体进行的分析，可以得出这样的结论：与普通的疲劳断裂不同的是，锅炉集箱在名义应力水平远小于材料的屈服极限的情况下开裂；此外在腐蚀产物中发现了 O, Cl, Al, Na 等元素都是原来钢中没有的元素，应该和腐蚀密切相关，裂纹的产生属于腐蚀和疲劳共同作用的结果。

## 第四章 裂纹形成及扩展机制

### 4.1 前言

由于第二章断口分析的结论认为本次的失效元件开裂与腐蚀和疲劳有密切的关系，本章就分别结合实际的情况对腐蚀和疲劳的机理分别进行分析。

裂纹内的腐蚀产物比较突出的元素有 Al, S, Cl, O, Na 等元素，探讨一下和这几种元素相关的腐蚀原因就显得十分重要了，失效的集箱位置是在锅炉的炉膛内，炉膛内煤层燃烧产生大量的烟气和飞灰，炉膛内的温度在 1000℃ 以上<sup>[29]</sup>，烟气在集箱表面通过集箱外侧壁面向内侧壁面传热，集箱内的水冷却内壁面温度，最后导致集箱的外壁面温度稳定在 388℃，内壁面温度稳定在 278℃。而烟气中的成分必然会包含大量的烟灰成分，表 4-2 为烟灰的主要成分。

表 4-1 锅炉设计煤种元素成分

项目	单位	数值
碳 (C)	%	56.78
氢 (H)	%	3.54
氧 (O)	%	5.70
氮 (N)	%	1.02
硫 (S)	%	0.96
水分 (W)	%	7.00
灰份 (A)	%	25.00
挥发分 (V)	%	34.00
低位发热量 (QY <sup>0</sup> )	kJ/kg	22572

表 4-2 锅炉烟灰成分表

烟灰成份含量	
化合物名称	含量 %
SiO <sub>2</sub>	47.68
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30.85
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.43
CaO	2.91
Na <sub>2</sub> O	1.4
SO <sub>3</sub>	1.91
K <sub>2</sub> O	1.62
TiO <sub>2</sub>	1.64
其它	47.68

### 4.2 腐蚀分析

#### 4.2.1 金属的高温氧化腐蚀

金属的高温腐蚀是指金属在高温下与气氛中的氧、硫、氮、碳等元素发生化学或电化学反应，导致金属变质或破坏的过程。高温腐蚀也被认为是广义上的高

温氧化，而狭义的高温氧化是指金属与氧反应形成各类氧化物。因此，高温腐蚀既包括高温氧化，也包括硫化、碳化、氮化等反应。由于锅炉的集箱使用的环境主要还是氧的气氛中<sup>[30]</sup>。所以 还是主要的认为发生的反应是狭义的高温氧化腐蚀。锅炉的金属构件在高温烟气的作用下，其表面会发生强烈的氧化作用，最初阶段在金属表面发生单纯的化学过程：金属与氧化合而生成金属氧化物，金属原子失去电子变为金属离子，同时氧原子获得电子成为氧离子。以氧化后变成二价金属为例，其氧化过程可用式 (4-1)表示：



金属的氧化一般分为两个阶段：初期氧化阶段和氧化膜生长阶段。初期氧化阶段是通过氧原子在金属表面的化学物理吸附，形成一个吸附层，当金属表面被吸附的氧原子饱和并继续置放在氧气中时，金属表面就会形成氧化物晶核。氧化物晶核会在表面横向生长，形成连续的薄氧化膜。对于锅炉钢管而言，这一层薄氧化膜的主要成分为  $Fe_3O_4$ 。初期氧化阶段经历的时间很短，仅为 30—40min 左右。生成的氧化膜虽然薄，但非常致密。薄氧化膜生成后，金属与氧被隔开，氧化反应只能通过氧化膜的固相扩散反应进一步进行，氧原子通过氧化膜向内部扩散，而金属原子(离子)则通过氧化膜向外扩散。一般认为，带正电且体积较小的金属离子易于通过氧化膜向外扩散，因而，氧化过程的进行主要发生在氧化膜与氧化介质的界面处。金属离子通过氧化膜及氧化膜外表面与介质中的氧发生氧化，使氧化膜不断增厚，这就是氧化膜生长阶段<sup>[31]</sup>。

金属和合金在氧气环境下的高温腐蚀的同时，在实际锅炉运行过程中，燃烧煤在放出热量的同时也产生了污染物，煤中的矿物硫、氧及灰分中的碱金属 (Na, K, Al 等) 在高温烟气的作用下也对与其接触的金属表面进行腐蚀。一般而言，在锅炉中出碳素钢或碳素合金钢制成的炉膛水冷壁和过热器管子上，常覆盖有飞灰沉积形成的附着层<sup>[32]</sup>，又经氧化作用，受热面管可分成如下几层：金属基体、氧化层、浸润性附着内层和外附着层。其中浸润性附着内层主要是由凝聚和沉积在管壁自然氧化层表面上的碱性硫酸盐组成的初始积灰层：出于它与氧化层形成化学吸附作用，用一般机械吹灰无法清除。外附着层主要由飞灰沉积造成的。由于选择性沉积原理，其内部的碱性硫酸盐含量虽比浸润性内层低，但仍比飞灰中的高。沉积过程中会形成多种低熔点的复合物，因此在外附着层中常有液相存在，成为“熔池”。

腐蚀是一个持续进行的过程：致腐物质不断补充到腐蚀的前沿是维持腐蚀过程连续的条件，同时这又取决于附着层的物理化学性质。根据致腐物质的迁移方

式和腐蚀产物的脱离方式不同，腐蚀的反应相态类型大致可分为以下几种。

(1) 纯气体腐蚀。即致腐气体渗透通过附着层到达管壁氧化膜发生腐蚀反应，生成产物不与附着层作用，通过升华或崩落离开壁面。

(2) 熔盐腐蚀。即由熔盐(致腐熔融物)对金属氧化层发生腐蚀作用，使氧化前沿不断向基体内部推进。

(3) 在固相附着物参与作用下的气体腐蚀。在这种反应中，致腐气体通过固相腐蚀物的催化作用使壁面发生腐蚀；

(4) 在致腐气体作用下的熔盐腐蚀，这是一种复合型的腐蚀过程。

#### 4.2.2 二氧化硫和三氧化硫对受热面的腐蚀

煤中的硫分在燃烧过程中生成的  $SO_2$ ，少量转化成  $SO_3$ 。 $SO_3$  形成原因有三种

(1) 燃烧反应<sup>[42]</sup>：

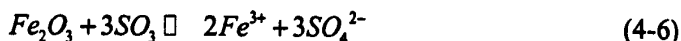


(2) 催化反应，高温烟气流过带灰受热面时，灰中  $V_2O_5$  和  $Fe_2O_3$  的催化作用，使烟气中的  $SO_2$  转化成  $SO_3$ 。实验表明，催化作用的主要温度范围为 425℃—625℃，在 550℃ 时达到最大值。催化反应方程式<sup>[42]</sup>：



对于本论文提及的失效案例这样的小型锅炉，烟气中  $SO_2$  转化为  $SO_3$  的转化率为 3.2%—7.4%。一般在烟气中  $SO_3$  的含量为 5—50g/m<sup>3</sup>，其产生的主要原因是燃烧氧化<sup>[33]</sup>。另外在高浓度  $SO_2$  下和存在积灰时，碳钢腐蚀的动态试验表明，随着时间的增加，腐蚀量下降，带有煤灰的金属表面的腐蚀速度大于清洁金属表面的腐蚀速度。

$SO_2$  本身反应缓慢，在炉烟中的低浓度下，无法形成亚硫酸盐。但当高温烟气流过带灰的受热面时， $SO_2$  与  $V_2O_5$  和  $Fe_2O_3$  结合，特别有利于生成相应的硫酸盐、这些硫酸盐在温度足够高时释放出  $SO_3$  而分解。金属表面受  $SO_2$ 、 $SO_3$  腐蚀的反应方程式<sup>[42]</sup> 见式(4-6)。



由于烟气温度高于壁温、热流方向从烟气到管壁，熔融的硫酸盐所放出的  $SO_3$  和金属氧化膜  $Fe_2O_3$  反应，生成原子态的铁和硫酸盐，且该反应是可逆的。这些硫酸盐与管壁上的氧化层形成溶解体系和混合体系、也就是形成所谓的外延

腐蚀层, 决定  $SO_3$  对金属腐蚀速度的最重要的因素, 是熔融灰垢的热流和厚度。

### 4.2.3 $H_2S$ 对受热面的腐蚀

能够引起受热面腐蚀的另外因素是烟气中的  $H_2S$ 。 $H_2S$  的形成与煤燃烧过程中缺氧有很大的关系。实践证明, 在燃烧器供氧不足时, 会使水冷壁附近出现大量的  $H_2S$ 。当过量空气系数  $\alpha < 1.0$  时,  $H_2S$  含量会急剧上升。

在壁面附近, 出于烟气中氧量较低并存在还原性气体( $CO+H_2$ ), 则可在燃烧生成  $SO_2$  和微量  $SO_3$  的同时, 还会生成少量的  $H_2S$ 。通常  $CO/(CO+CO_2)$  由 8% 上升到 24% 时,  $H_2S$  则出由 0.02% 上升到 0.07%, 这比烟气中  $SO_3$  的体积浓度约高 100 倍之多, 从而引起局部受热面管子的强烈腐蚀。腐蚀速度和管壁温度成指数关系, 当壁温低于  $300^\circ\text{C}$  时、腐蚀速度很慢。通过受热面的热负荷越高, 腐蚀越严重。一方面, 热负荷高会使壁温升高; 另一方面、热负荷很高会使管内结水垢, 进一步提高了管壁温度。

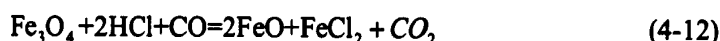
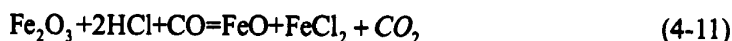
在还原性气氛下,  $H_2S$  的腐蚀件要比在氧化性气氛下大。 $H_2S$  与金属铁直接反应生成硫化铁, 然后硫化铁与纯金属反应生成低熔点的共晶体。 $H_2S$  透过疏松的  $Fe_2O_3$  层, 可以与较致密的磁性氧化铁层( $Fe_3O_4$  即  $4Fe_2O_3 \sqcup FeO$ ) 中的复合  $FeO$  作用, 其反应方程式<sup>[30]</sup>为:



反应生成的  $FeS$  会进一步氧化生成氧化铁。因此, 水冷壁外部的腐蚀产物中有硫化铁, 也有氧化铁, 而这一层氧化铁和硫化铁是多孔性的, 不起保护作用, 致腐物质可以轻易的达到新鲜的金属表面, 这样腐蚀将会继续进行<sup>[34]</sup>。

### 4.2.4 $HCl$ 对受热面的腐蚀

煤中存在的  $NaCl$  是产生的根源。在炉膛中,  $NaCl$  在高温下既能产生  $NaOH$  及  $Na_2SO_4$  等, 又能生成  $HCl$ , 而  $HCl$  在适当的条件下也会引起受热面的高温腐蚀。 $HCl$  气体对管壁可能发生的腐蚀反应式<sup>[30]</sup>为:



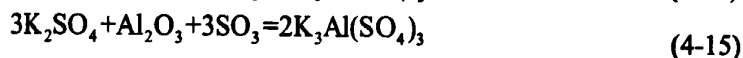
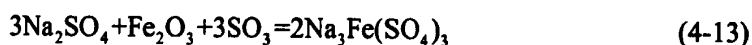
上述反应在  $400\text{—}600^\circ\text{C}$  范围内最为活跃。 $HCl$  的存在使管壁氧化膜受到破

坏,而生成的汽化点很低,迅速挥发殆尽,从而使管壁金属直接受到  $HCl$  的腐蚀。同时,由于氧化膜受到破坏,  $H_2S$  也能直接到达金属表面,加速了管壁的腐蚀速度<sup>[34]</sup>。

#### 4.2.5 硫酸盐型的高温腐蚀

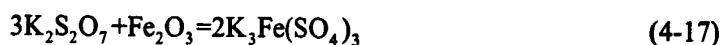
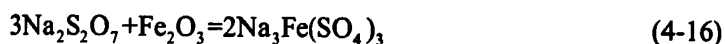
在燃烧的火焰中,矿物质中的钠挥发、升华,非挥发性硅酸铝中的钾通过置换反应被释放出来,钠和钾与烟气中的  $SO_3$  反应生成硫酸钠和硫酸钾,露点在  $877^\circ C$  左右。因此,当气态的硫酸钠与硫酸钾扩散到较冷的管子表面上时,便凝结在管壁氧化膜上。硫酸盐腐蚀过程主要有以下两种途径:

(1) 在附着层中碱性硫酸盐参与作用的气体腐蚀。受热面上熔融的硫酸盐吸收  $SO_3$ , 并在  $Fe_2O_3$  和  $Al_2O_3$  的作用下生成复合硫酸盐<sup>[35, 36]</sup>:



复合硫酸盐不像  $Fe_2O_3$  那样在管子上形成稳定的保护膜, 当  $2K_3Al(SO_4)_3 / Na_3Fe(SO_4)_3$  混合物中钾和钠的摩尔比例为 1: 1 — 4: 1 时, 熔点降至  $500^\circ C$ 。这样, 硫酸盐沉积厚度增加, 表面温度升至熔点温度时,  $Fe_2O_3$  氧化保护膜被复合硫酸盐溶解破坏, 使管壁继续腐蚀。

(2) 碱金属的焦硫酸熔盐腐蚀碱金属的焦硫酸熔盐腐蚀过程如式(4-16, 17)<sup>[35, 36]</sup>所示:



在附着层中有碱焦硫酸盐时, 由于它的熔点低, 在通常的壁温条件下即可在附着层中呈熔融状态, 形成反应速度更快的熔盐型腐蚀。

#### 4.2.6 硫化物型的高温腐蚀

硫化物型的腐蚀与还原条件有关, 其腐蚀过程<sup>[34]</sup>如下。

(1) 黄铁矿粉末随未燃尽的煤颗粒到达管壁上, 受热分解放出自由原子硫和硫化亚铁:



当管子附近有一定浓度的  $H_2S$  和  $SO_2$  时, 也可能生成自由的原子硫, 反应如式(4-19)所示:



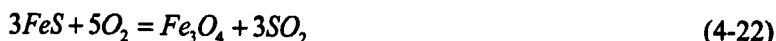
(2) 在还原性气氛中, 没有过剩的氧原子, 使单独的原子硫在管壁温度达到 623K 时便发生硫化作用, 即



(3)  $H_2S$  还可以透过疏松的  $Fe_2O_3$  层, 与较致密的磁性氧化铁层( $Fe_3O_4$  即  $4Fe_2O_3 \cdot FeO$ ) 中复合的  $FeO$  作用



(4) 硫化亚铁缓慢氧化成黑色的磁性氧化铁。



#### 4.2.7 碱土金属盐类和钒盐对受热面的高温腐蚀

酸性灰渣煤种燃烧时, 在管壁附着层内形成的各种碱金属化合物中, 以硫酸盐( $R_2SO_4$ ) 含量为最多。这些碱性硫酸盐之间相互作用可组成低熔点的复合物, 其中主要有  $Na_2SO_4 \cdot K_2SO_4$  和  $Na_2SO_4 \cdot K_2SO_4 \cdot FeSO_4$ 。当附着物中 K、Na 的分子含量之比为 1:1 时, K、Na 复合物熔点在 550—680℃ 之间。

当受热面管子表面的积灰中存在  $V_2O_5$  时, 会与碱金属化合物作用形成低熔点的共熔体。例如, 当  $V_2O_5$  和  $Na_2O$  形成共熔体时, 根据  $Na_2O/V_2O_5$  的含量比例, 其熔点可低至 500℃ 以下。低熔点共熔体在炉内高温烟气流中或以单独的液相分散微粒存在, 或以表面粘性的灰粒存在, 一旦碰撞到受热面就会粘结成焦渣, 不断生长并继续发生共熔反应, 为飞灰继续沉积创造条件。而一旦积灰中形成了复杂的碱性硫酸铁和焦性硫酸铁后, 它们就会对受热面管子产生较强的腐蚀性。<sup>[37]</sup>

#### 4.2.8 启炉过程中烟气硫酸低温结露腐蚀

由本文 4.2.2 所述, 烟气中  $SO_2$  转化为  $SO_3$  的转化率为 3.2%—7.4%。一般在烟气中  $SO_3$  的含量为 5—50g/m<sup>3</sup>, 而在表 4-1 锅炉设计煤种元素成分中可以得到 7%, 而且在挥发份的燃烧过程中也会生成一定量的水分。这样, 保守的估计水分的含量会达到 10%,  $SO_3$  会和烟气中的水蒸气形成硫酸蒸汽。一般来说, 硫酸蒸汽对管束的腐蚀是很小的, 但是凝结冷却在受热面金属表面形成  $H_2SO_4$ , 就会对金属产生腐蚀, 腐蚀的情况通常是比较严重的。通常情况下, 锅炉烟气中  $SO_3$  体积含量为  $1 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$ , 烟气温度在 200℃ 以下时,  $SO_3$  与水蒸气完全结合成  $H_2SO_4$  蒸汽, 微量的  $H_2SO_4$  蒸汽会使烟气的露点温度显著提高。当锅炉集箱的壁面温度低于烟气中的水蒸气露点温度时, 管壁表面会凝结出大量水滴。由于  $H_2SO_4$  蒸汽的露点温度高于水蒸气的露点温度, 同时烟气中的  $H_2SO_4$  蒸汽也会凝结在壁面上形成硫酸液体, 这些水滴也会对硫酸产生稀释作用, 在管壁上形成稀



硫酸。管壁温度越低，管壁上凝结的稀硫酸就会越多，这些稀硫酸对管壁产生的腐蚀会比浓硫酸腐蚀更快<sup>[38]</sup>。

考虑在锅炉启炉升压的过程中，于操作规程的规定了升压升温的限制(为了保证锅筒的安全和锅炉汽水管路膨胀)，在燃烧的调整中会在配风、给煤和引风的控制上采取控制，保证炉膛的温度不很高，这样在启炉的过程中，集箱的壁温会存在一定的时间符合硫酸蒸汽的结露温度，会造成低温腐蚀。

由于工程实践中烟灰成分的复杂性，并不能断定以上的反应到底一个会发生得多一些，因为烟灰中都有这些反应中作为原料的成分，而炉膛的温度波动范围完全满足各个腐蚀反应分别快速进行的反应温度。换句话说，各个腐蚀反应会在不同的时间，在不同的温度范围过程中作为主要的腐蚀反应而发生。这一点可以在腐蚀产物中扫描电镜分析中，存在的 Al, Cl, Na, O, S 等元素，就可以充分的说明。

### 4.3 疲劳分析

在现代工程实践中，绝大多数的工程项目都存在由交变应力而引起的疲劳问题。疲劳问题实际上包含了循环应力和循环应变两个性质上不同的领域，它们的失效可能有着不同的机理。对于某些循环载荷作用下的疲劳问题，在每一个循环期间内都出现很大的塑性变形，这种情况一般在载荷较大或有严重应力集中时出现，其相应的疲劳寿命较短，一般在 $10^2$ — $10^5$ 次左右，通常称之为低周疲劳或应变疲劳。另一类是应变循环幅度主要限制在弹性范围内，应力不大于屈服极限，这种情况通常是在轻载或应力分布较均匀的情况下出现。其相应的疲劳寿命较长，疲劳失效循环数达 $10^5$ 以上，一般称为高周疲劳。

#### 4.3.1 一般疲劳断裂的特征

工程中的疲劳断裂有着不同的原因、过程和结果，但下述几点是疲劳断裂的一般特征：

- (1) 微观上，疲劳断裂一般为穿晶断裂；
- (2) 无论脆性材料还是塑性材料，都会在没有出现明显的塑性变形情况下断裂的；
- (3) 疲劳断裂是损伤积累过程的结果，是与时间相关的破坏方式；
- (4) 受压元件对疲劳载荷的抗力比对静载荷要敏感得多，与它的形状、尺寸、

表面质量、服役条件和环境等密切相关；

(5) 疲劳断裂包括了裂纹萌生、裂纹扩展和失稳断裂三个部分，不同阶段损伤方式和损伤量不同；

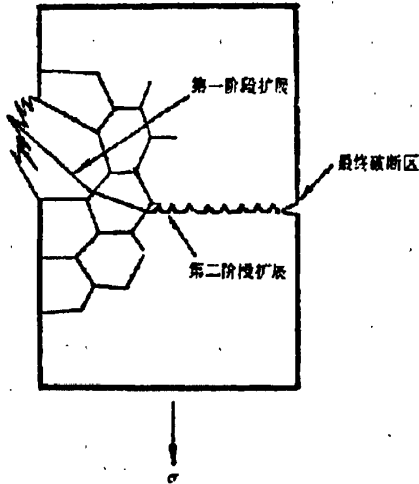


图 4-2 疲劳裂纹萌生扩展失稳断裂的示意图

(6) 造成疲劳断裂的应力远比静载下材料的抗拉强度低。

#### 4.3.2 材料疲劳的微观机制

外加的应力在缺陷处会造成应力集中（宏观的几何不连续造成的），特别是缺陷的尖端处会产生更大的应力集中。从应力集中区组织层次上看，由于尖端区组织结构不同（例如珠光体和铁素体）或者晶粒的位向差异，会导致不同组织间较大的变形能力差异，造成了硬度较低的组织或者软取向的晶粒变形较大，而硬度较高的组织或硬取向的晶粒变形较小，因此，在不同组织或不同取向晶粒的界面处（即晶界）就会存在较大的应变集中。

在拉应力周期的过程中，由于应力集中，缺陷的尖端处会产生较大的应变，在应力足够大的时候除了弹性应变还会发生塑性应变，塑性应变造成了位错在晶粒内向晶界的运动。直至位错在晶界处和晶粒内部呈现网状缠结，位错的密度增加，材料变硬，产生加工硬化，产生了对变形的阻力达到微观的应力平衡状态。

在压应力周期的过程中，同样由于应力集中，缺陷的尖端处于应力集中区内由于拉应力周期造成的初始拉伸弹性应变可以逐渐消失，但是塑性应变，却无法恢复，但是在应力集中区内足够大的压缩应力会超过其屈服强度时，导致产生与原拉伸应力产生的拉伸塑性应变相反的压缩塑性变形，这样就会在原本就存在于缺陷尖端微区内的加工硬化程度更高，晶粒内部的位错密度更高，晶界或亚晶界数量更大。

由此可见，这种循环的拉-压应力幅值达到可以使材料产生塑性应变的应力

值时会使材料承载部位，特别是应力集中部位的材料快速加工硬化，从而逐渐使材料产生疲劳。有一个前提是这种循环应力幅度必须达到材料疲劳的门槛值，也就是在裂纹尖端的应力集中要产生足够大的应力，才会使疲劳应力导致微裂纹的产生，但是本文提到的发生开裂的集箱就没有达到这样的应力值。

### 4.3.3 裂纹起裂与扩展

从宏观上看，失效集箱的组织无变化，裂纹附近没有明显的塑性变形，应该属于脆性开裂符合疲劳断口的特征。按照疲劳的理论，裂纹的扩展过程会分为三个具有不同形貌特征的区域，即萌生区、裂纹扩展区和瞬时破断区，它们分别代表了疲劳破坏的不同历程。

一般来说，材料的表面缺陷或者材料的内部缺陷都等同于尖锐缺口一样的作用，造成应力集中，使疲劳裂纹萌生。失效集箱的表面由于前文所述高温腐蚀和锅炉启炉的过程中造成的低温硫酸蒸汽露点造成的点状腐蚀，正好可以使集箱表面一些腐蚀较深的腐蚀凹坑处由于应力集中造成了较大的应力，具备了开裂的前提条件。

本文提到的失效集箱向火面开裂但是没有裂穿，所以不会有瞬时破断区这个区域过程。用低倍体视显微镜（50×）在打开的断口边缘至内部大约 1mm 位置发现了发现一个光滑、细洁的扇形小区域，根据疲劳理论的分析，它应该是疲劳开裂破坏的起点。裂纹张开位移小，扩展缓慢，反复的张开和闭合使断口两两相互挤磨，形成了断口上最细滑的区域<sup>[28]</sup>。

一般来说低周疲劳不会产生贝纹线<sup>[28]</sup>，但是对于本文提到的失效集箱，应力幅波动的循环次数为 800 次，按照定义明显属于低周疲劳范畴，但是在图 3-18 断口全貌图内，可见呈现贝纹状的条纹。这些条纹以裂纹核心为中心，向四周扩散，形成一簇弧形线条、它们垂直于裂纹扩展方向。而且裂纹的形式为沿晶裂纹，这也与疲劳裂纹一般为穿晶裂纹的特点不符，所以本文提到的裂纹和疲劳裂纹有着一定的差别。

在应力循环的过程中，一些表面的腐蚀凹坑由于应力集中的作用，在凹坑位置会产生较大的屈服应力，凹坑位置会产生弹性变形和一定量的塑性变形，在拉压应力的不同变化阶段，凹坑两侧位置的变形的金属内会产生滑移带，在最大应力的作用下，凹坑两侧位置的位错移动便会形成细小的滑移带，其高度约为 $10^{-9}$ 米。疲劳应力越大，滑移带的数量越多，高度越大，这些滑移带最终成为了萌生疲劳裂纹的区域<sup>[28]</sup>。在反复载荷的作用下，在相邻的滑移平面上将引起反向滑移，疲劳滑移带就会在凹坑位置上形成微观的沟槽和隆脊，而局部的塑性变形又会使滑移带表面粗糙，进而形成微裂纹<sup>[39]</sup>。

这里需要指出的是，腐蚀和疲劳共同造成失效并不等同于和应力腐蚀，应力腐蚀是在固定的拉应力作用下发生，腐蚀疲劳是在交变应力下发生的，应力腐蚀的特点是致腐物质与金属的两两配对<sup>[40]</sup>，而本文提到的腐蚀与疲劳的共同作用产生失效裂纹的情况，分析到的所有可能产生的腐蚀因素并不会与低碳钢配对产生应力腐蚀<sup>[41]</sup>。

所以，提出了循环应力与腐蚀相互促进的作用的机理。

### 1. 循环应力与腐蚀相互促进的作用的微观机理

(1) 循环拉-压应力造成了位错在晶界上堆积，造成了晶界的表面能增大，造成了微区内的应力集中（如本文 4.3.2 所述），从材料热力学的一般规律分析，晶界会更容易吸附 O, S 等原子来降低表面能，而且由于晶界处位错的聚集，使晶界处变得更加疏松，为 O, S 原子的扩散提供了很好的扩散通道，促进 O, S 原子与 Fe 原子的结合，促进了腐蚀。可以很好的从微观方面解释了本文研究的裂纹尖端会发生沿晶界腐蚀，并导致裂纹扩展的情况（见图 3-10）。

(2) 在形成一定厚度的腐蚀层以后，由于受到腐蚀层的屏蔽，致腐物质扩散到金属表面的阻力增加了，会使腐蚀的速度越来越慢，但是循环应力的作用会使腐蚀层撕裂，这样裂纹尖端的未腐蚀钢组织（铁素体和珠光体）就会暴露在致腐物质下，腐蚀的速度重新加快。

(3) 由于裂纹尖端金属组织微观层面上的组织差异，从致腐物质扩散的腐蚀通道上来说，珠光体和铁素体结构比较，由于其片层状的机械混合物结构具有更多的界面，具有更大的表面能，更容易产生腐蚀通道，且更容易吸附 S, O 等氧化致腐物质，可以更容易的被腐蚀。在图 3-15 裂纹尖端电子显微图片中可以明显的观察到裂纹尖端以外沿着晶界已经出现了一条白色的腐蚀通道而且腐蚀通道的周围金属基体已经变得疏松多孔。

(4) 不同的晶粒和不同的组织受力不同，会造成微观层面的应力集中，这样裂纹尖端的。这样珠光体腐蚀完毕以后，片层状结构被破坏，珠光体内部的渗碳体会随着腐蚀产物在循环应力的作用下剥离。可以证明这一点的就是图 3-19 裂纹边缘显微图片，图像中裂纹边缘的腐蚀产物的化学成分扫描中的 C 元素含量高达 72.51%，表明珠光体组织中的渗碳体已经铁素体组织被腐蚀后剥落。

### 2. 循环应力与腐蚀相互促进的作用的宏观机理

在微裂纹形成后，拉应力作用时，裂纹张开，致腐物质由于浓度高向浓度低处进行扩散，进入了裂纹缝隙，在裂纹尖端钝化后，继续腐蚀晶界，导致了裂纹尖端处的晶粒有分离的趋势；承受压应力的时候，由于应力集中的影响，造成了

裂纹开口部位两侧壁面闭合，并会产生一定的应变，包括一定的不可恢复的塑性变形，从微观层面上讲，多次往复的塑性变形会使金属内的滑移面粗糙，造成硬化并将裂纹内部的致腐物质和腐蚀产物压向裂纹尖端进行挤压，使裂纹尖端晶界处开裂，裂纹尖端重新锐化，再一次循环受拉，由于尖端的应力集中，发生了裂纹的亚临界扩展。而贝纹状推进线就是由于循环应力和腐蚀共同作用的结果，可以更进一步的说，使腐蚀层的破裂造成了贝纹线，而普通的低周应力疲劳开裂是一般没有贝纹线的。

#### 4.4 本章小结

通过从腐蚀方面和疲劳两方面进行的分析工作。提出了失效的机理，比较好的解释了在多口分析中的分析结果，比较好的解释了实际存在的失效现象及裂纹的发生和扩展，腐蚀和循环应力作用的情况下，在不到 70% 屈服应力的循环应力的作用下就会发生裂纹失效。这也是应该引起 足够重视的。

## 第五章 结论

本文通过对实际工作中出现的锅炉集箱向火面发生本体裂纹失效入手, 对从材质, 断口与断面分析, 应力计算与分析入手进行分析。采用了弹性力学的方法对集箱筒体进行了有限元模拟计算分析, 结合扫描电镜和金相分析的裂纹边缘形貌得出了以下结论。

(1) 锅炉的运行过程中, 由于煤中含有的灰分杂质, 烟气燃烧的化学反应会产生  $H_2S$ 、 $SO_2$ 、 $SO_3$  以及硫酸盐等高温腐蚀以及锅炉启动的过程产生的硫酸蒸汽低温结露腐蚀。

(2) 锅炉运行工况造成的集箱内外壁温差循环应力, 在锅炉一个运行周期内 (启炉—正常运行—停炉), 集箱外表面的应力状态为压应力 (118MPa) — 压应力 (146MPa) — 拉应力 (135MPa) 导致了疲劳裂纹产生。

(3) 裂纹的从表面向深度扩展的侧面形貌表明, 疲劳裂纹的部分特征, 但是也有因其特殊性: 裂纹尖端为沿晶扩展; 打开裂纹后的断面上具有贝纹线。

(4) 循环应力对腐蚀进展的过程中起到了重要的作用, 腐蚀层形成后会影响到腐物质向深入的金属表面进行扩散, 而正是由于循环应力造成了腐蚀层的破裂, 使腐蚀顺利进行。

(5) 裂纹尖端的应力集中也使晶粒内的位错向晶界运动集中, 晶界变得更加脆弱, 表面能升高, 易于吸附腐蚀元素, 增加了尖端的腐蚀的速度。

(6) 裂纹是由于循环应力和腐蚀共同造成。

针对研究得出的结论, 可以认为对于这样的情况无法从强度设计上避免开裂。按照规程的要求, 锅炉设备的重要受压元件在进行检验的时候, 是不允许进行裂纹剩余寿命评估的, 没有进行裂纹剩余寿命的计算和研究。为了使集箱达到设计的使用寿命, 唯一的途径就是变更它的使用环境, 无外乎两种方法, 一是将集箱外砌筑炉墙, 使之不直接受火, 减小温度应力, 但是会降低集箱的受热面积, 影响它防止结焦的作用; 另外一种办法就是在集箱的外表便进行耐热耐腐的表面涂料处理, 隔绝烟气中的致腐物质, 会取得比较好的结果。

## 参考文献

- [1] 吴粤淼, 刘清方. 锅炉压力容器安全工程学[M]. 北京: 北京经济学院出版社, 1991, 3~7.
- [2] 杨厚君. 电站锅炉压力容器安全监察[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996, 96~126.
- [3] 张光纯. 大型电站锅炉事故分析及预防措施[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [4] 张康达. 锅炉压力容器的疲劳失效[M]. 北京: 劳动人事出版社, 1988.
- [5] 胡新芳. 低温过热器入口联箱管座角焊缝裂纹原因分析[J]. 热力发电, 2008, 53(3): 72~75.
- [6] 徐冬. 拱形管板裂纹机理初探[J]. 河南机电高等专科学校学报, 2003, 11(2): 34~35.
- [7] 黄莹. 废热锅炉产生裂纹的事故分析与安全管理[J]. 四川化工, 2008, 11(6): 39~42.
- [8] 李之光, 王铣庆. 锅炉受压元件强度分析与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [9] 中华人民共和国国家质量技术监督局. 锅炉定期检验规则[Z]. 北京: 中国标准出版社, 1999-09-01.
- [10] 孟祥泽, 等. 电站锅炉压力容器事故案例分析与预防[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [11] 中华人民共和国国家质量技术监督局. 水管锅炉强度计算标准 GB / T9222-2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1988-02-01.
- [12] 中华人民共和国电力工业部. DL612-1996, 电力工业锅炉压力容器监察规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 1996-7-1.
- [13] 蒋智翔, 等. 锅炉及压力容器受压元件强度[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [14] 范应珊. 压力容器的应力分析与设计[M]. 北京: 原子能出版社, 1979, 45~51.
- [15] 李维特. 热应力理论分析及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004, 69~73, 90~93.
- [16] 杨世铭. 传热学(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社 1991.

- [17] 北京锅炉厂. BG-35/54-M 锅炉设计说明书[Z]. 1981.
- [18] 北京锅炉厂. BG-35/54-M 锅炉质量证明书[Z]. 1981.
- [19] 《火力发电厂金属材料手册》编委会. 火力发电厂金属材料手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [20] 天津渤化集团大沽化工有限责任公司. 锅炉运行操作规程[Z]. 1985.
- [21] 徐芝纶. 弹性力学[Z]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [22] 孙智. 失效分析—基础与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [23] 中华人民共和国国家质量技术监督局. 高压锅炉用无缝钢管 GB5310-1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994-07-01.
- [24] 黄振东. 钢铁金相图谱. [M]. 北京: 中国科技文化出版社, 2005, 282~285.
- [25] 钟群鹏. 断口学[M]. 北京: 高等教育出版社 2006, 140~146, 242~270.
- [26] 北京锅炉厂. BG-35/54-M 锅炉强度计算书[Z]. 1981.
- [27] 刘尚慈. 火力发电厂金属断裂与失效分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992, 61~67.
- [28] 上海交通大学《金属断口分析》编写组. 金属断口分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979, 152~202.
- [29] 北京锅炉厂. BG-35/54-M 锅炉热力计算书[Z]. 1981.
- [30] 岑可法, 樊建人, 池作和等. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀[M]. 北京: 科学出版社, 1995, 333~350, 377~396.
- [31] 李铁藩. 金属高温氧化和热腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003, 13~15.
- [32] 舒宜. 燃煤锅炉飞灰特性研究[J]. 动力工程, 1990, 10(3): 15~21.
- [33] 李绚天. 煤的燃烧过程中  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  的生成及循环流化床脱硫的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 1989.
- [34] 岑可法. 大型电站锅炉安全及优化运行技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [35] 赵彦芬. 锅炉高温部件的热腐蚀[J]. 热力发电, 1994, 2: 15~18.
- [36] 张允书. 碱金属硫酸盐沉积引起的铁基合金在中温下的热腐蚀[J]. 腐蚀科学, 1992, 4(4): 250~257.
- [37] 徐晓 于凤昌 徐静等. 几种常用钢材的熔灰腐蚀研究[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2004, 21(3): 4~8.
- [38] 赵秋洪, 王方, 王海波. 角管式热水锅炉尾部受热面严重腐蚀探讨[J]. 工业锅炉, 2009, 4: 48~50.



- [39] 哈宽富. 断裂物理基础[M]. 北京: 科学出版社, 2000, 328~353.
- [40] 魏宝明. 金属腐蚀理论及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1984, 163~164.
- [41] 肖纪美. 应力作用下的金属腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 1990.
- [42] 范从振. 锅炉原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.

## 发表论文和参加科研情况说明

### 发表的论文：

- [1] 赵秋洪, 王方, 王海波, “角管式热水锅炉尾部受热面严重腐蚀探讨”,  
《工业锅炉》, 2009 年第 4 期

### 参与的科研项目：

## 致 谢

日月荏苒，两年的硕士研究生求学生涯已告一段落，回首这段日子，着实让我提高了不少。

首先，要感谢的是我的指导老师—王惜宝老师，对我不厌其烦地耳提面命，淡泊明志处世的道理，与实事求是做事的态度，他言传身教实事求是的学术精神，更倾注了心血循循善诱引领我进入这个艰深难懂的领域，对您无怨无悔的付出，我除了感谢之外还是感激，虽然最终仍是未达到老师的期望，不过未来我会谨记老师教诲，更加积极迎向未来挑战，才不会辜负老师的一片苦心。

另外，在资料准备和课题酝酿的过程中，谢谢天津市渤化集团大沽化热电厂王晓晨、张玉国工程师提供了大量的基础性资料和失效集箱筒体的实物试件；在进行课题期间，谢谢实验室孙栋老师的帮助，焊接结构教研组的王东坡、邓彩艳老师给我的一些具体的建议和意见；关于论文部分，谢谢同窗战友高书俊，凌礼恭，魏海鸿，李庆，李扬帮助我修改论文的格式和插图的形式，同窗战友李争和学妹张海对我在有限元软件分析上的指导，同窗战友付强提供的有限元分析软件参考资料，学弟朱磊在实验中的帮忙，谢谢同窗战友李丽鸽、王瞰……等的加油打气。还有，父亲在精神上的支持让我求学生涯无后顾之忧，最后，感谢妻子宋颖在我求学期间对我的莫大帮助。总之，要感谢的人实在太多了，非言语之能言，最后，希望大家永远健康、平安快乐。