

锅炉承压部件 常见故障及其防止措施

国家劳动总局锅炉安全监察局

1980年

锅炉承压部件常见故障及其防止措施

锅炉承压部件的爆破和泄漏事故对锅炉的安全运行威胁极大。从全国电力系统对事故的分析 and 统计来看，一九七九年中锅炉事故约占全部发电事故的 74.7%，而承压部件的爆破泄漏又占锅炉事故的百分之五十以上。因此如何防止承压部件的爆破和泄漏就成为锅炉监察和检验工作的重点。锅炉承压部件中最常见的故障是超温、腐蚀、磨损及焊接质量不良等。

第一节 超温

过热器、再热器管中主要应力是作用于管子内壁的蒸汽压力所引起的切向应力。这类管子一般在原定的、应力水平基本不变的工况下运行。对大多数这类辐射和对流受热面管子来说，影响元件寿命的主要变量是管壁的平均运行温度。当运行时平均管壁温度超过设计许用温度时即为超温，超温会严重影响元件的使用寿命并导致爆破事故。目前，超温爆破仍是威胁锅炉安全运行的主要因素之一。

如某一电厂锅炉汽压为 100 公斤/公分²，汽温为 540℃ 自投入运行以来，多次发生超温，6 台锅炉在十一个月的时间里，就发生超温 317 次，平均每台炉每月超温 5 次，情况最严重的是，有一台炉在一个月内存超温达 28 次，~~28 次超温~~差不多天天超温了。最高的超温温度达到 530℃，~~最长累计时间达 1 分 43 秒。~~最长累计时间达 1 分 43 秒。

由于超温造成的损坏类型是 ~~不同的~~ 有长时超温损坏和短时超温损坏。一般说来，~~通过管子的检验可以断定超温损坏的确切运行原因。~~但是，如果能鉴别出是长时超温损坏或短时超温损坏，则可把可能发

生问题的范围缩小，有利检查清超温的原因。例如，若是短时超温损坏，则可查对近期运行报表和向运行人员调查是否在运行中出现过异常现象。设计要求而提早爆破损坏，即为长时超温爆管，也有叫做长期过热爆管或一般性蠕变损坏。

在长时超温过程中，钢材长期在高温和应力的作用下，由于产生了碳化物球化、碳化物沿晶界聚集长大等组织变化，在晶界上先产生微裂纹，当这些微裂纹扩展甚至连接起来而承受不了管内介质的压力时，就发生了爆破。但由于管壁温度还未达到下临界点 (A_{c1}) 温度，所以爆破时虽然有工质的激冷作用，但是除了上述的组织变化外，还不会发生相变。

长时超温爆管一般发生在高温过热器管出口段的外圈向火侧。据近几年来对过热器管子爆破事故的分析，有70%是由于长时超温而引起的。水冷壁管、凝汽管和省煤器管等偶然也会发生这类爆破损坏现象。

1、爆破口的特征

长时超温爆管的破口呈粗糙脆性断口，管壁减薄不多，管子胀粗也不很显著，爆破口附近往往有较厚的氧化铁层，如图3-1所示。

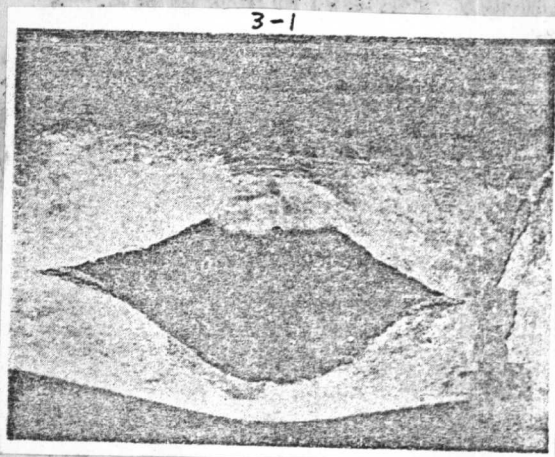


图3-1 长时超温爆管的爆破口实物照片

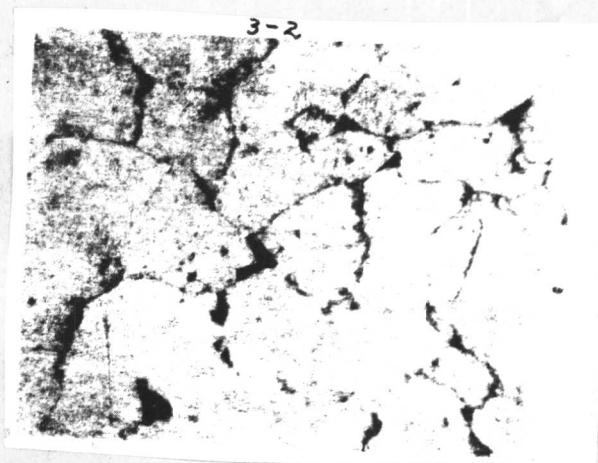


图 3-2 中间黑色三角为三晶粒结合处蠕变微裂纹

爆破口的这些特征是与钢材在长时超温运行的过程中，组织结构不断发生变化和介质的不断腐蚀有关。由于组织结构的变化和腐蚀，首先产生微细的蠕胀裂纹和应力腐蚀裂纹；后来又在继续超温运行过程中微裂纹不断的形成和发展，最后由于裂纹的扩展，便引起了爆管事故。

蠕变微裂纹一般是在沿晶界处，特别是三晶粒结合处先行产生。图 3-2 为某厂过热器管子爆破口上三晶粒结合处蠕变微裂纹的显微组织照片，中间黑色区域就是三晶粒结合处的蠕变微裂纹。

长时超温爆管过程中，钢材的组织结构往往会发生变化。当碳化物在晶界聚集长大后，大颗粒的碳化物和铁素体相接触的表面往往是微裂纹的发源地。

在长期超温过程中，孤立的微裂纹会在应力的作用下，发展、扩大甚至相互连接起来，形成大裂纹。图 3-3 为某厂高温高压锅炉的高温过热器管长期超温爆破口上的成串晶界微裂纹扩大并连接起来

形成大裂纹的微观照片。

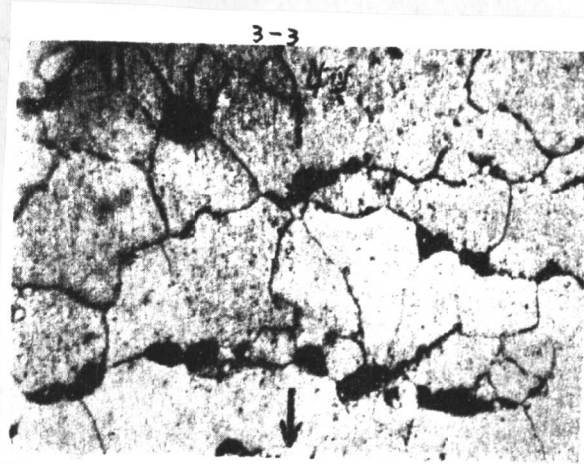


图 3—3 晶界上微裂纹连接起来形成大裂纹

一旦形成大裂纹后，管壁的有效厚度就大为减薄，剩余部分未产生裂纹的管壁所受应力相对地提高了，当承受不了加于管壁上的荷载时，受热面管子就会发生爆破。这种长时超温爆破口一般都具有断面较粗糙，呈脆性断裂，壁厚减薄不多等特征。

从端变速度加快到产生端变微裂纹直到爆破，这个过程的时间可以短至数十小时，也可以长达数千小时，甚至上万小时。这主要取决于管壁超温的高低和所承受的应力大小。

从对大量长时超温爆破的实样进行检查分析后，发现爆破口附近氧化铁层上有密集的纵向细裂纹，在裂开的地方都有应力腐蚀裂纹。当管壁温度超过了钢材的抗氧化临界温度时（如碳钢的抗氧化临界温度为 450°C ），在蒸汽和烟气的作用下会产生一层较厚的氧化铁层，这层氧化铁在受热面管子端变胀粗时易垂直于应力的方向裂开。图

3—4 为某厂长时超温爆破口附近氧化铁层裂纹的情况。当氧化铁层

裂开后，裸露的金属在拉应力和具有腐蚀性介质（蒸汽或烟气）作用下，产生电化学腐蚀，加速了裂纹向深度发展，造成沿晶界的应力腐蚀裂纹，如图 3—5 所示。这种因应力和腐蚀介质而引起的裂纹在长期运行过程中，也会由小到大地扩展，当扩展到某一极限时，剩余的管壁厚度就承受不了负荷的作用而爆破。应力腐蚀裂纹具有如下特征：（1）自管壁表面氧化铁层破裂处开始产生；（2）裂纹一般都是沿晶界发生，也呈粗糙的脆性断口；（3）裂纹内有腐蚀产物。

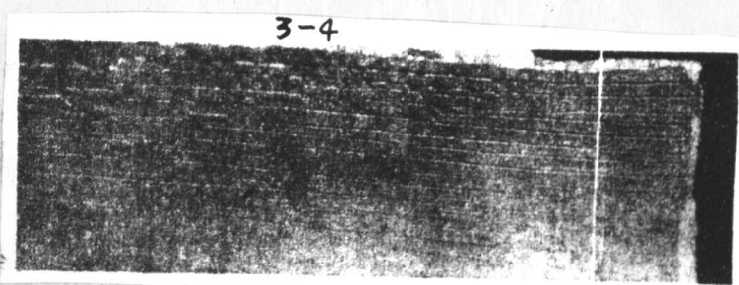


图 3—4 爆破口附近氧化铁层裂纹的情况



图 3—5 从管壁表面上开始产生的沿晶界应力腐蚀裂纹

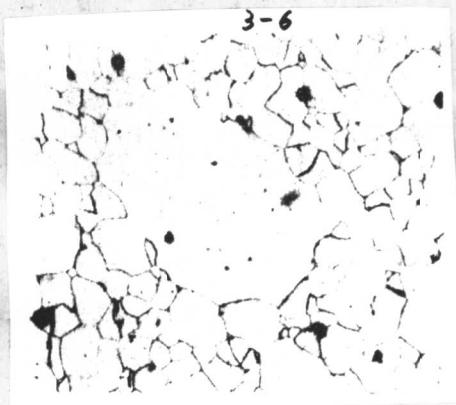


图 3-6 中间为二次再结晶粗大晶粒

2、组织结构和性能的变化

受热面管子长期在高温和应力的作用下。组织结构会发生变化。对长时超温爆管的实例检查分析后，发现显微组织会出现碳化物球化、石墨化、铁素体中析出碳化物、碳化物聚集长大以及固溶体中合金元素的贫化等，有时还可能出现二次再结晶组织。碳化物球化和聚集长大是最常见的现象。图 3-6 为 10CrMo910 钢经长期超温运行后铁素体基体出现了二次再结晶组织的金相照片。

受热面管子的组织结构发生了变化以后，性能也会改变。如 12Cr1MoV 钢管于完全球化后，持久强度将要降低三分之一，所以在检查长时超温爆管的样品时，要评定球化等级，从而可以分析估计出持久强度降低的程度。

组织和性能的变化与温度和时间有密切的关系。碳化物球化等组织变化均是一个原子扩散的过程，温度愈高或处于高温下运行的时间愈长，完全球化的时间就愈短。碳素钢具有较小的组织稳定性，最容易出现碳化物球化甚至石墨化现象。钢中加入了铬、铜、钒、钨等合金元素后，由于形成较稳定的合金碳化物，可以减慢球化等组织变化的速度，因而也就相应地提高了热强性。

(二) 短时超温爆管

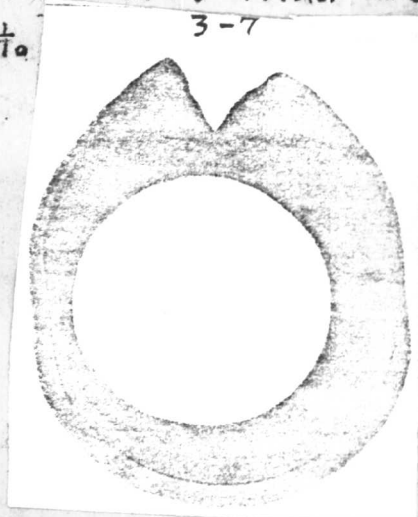
锅炉受热面管子在运行过程中，由于冷却条件的恶化，管壁温度在短时间内突然上升，达到钢的下临界点或甚至达到了上临界点以上的温度。钢在这样高的温度下短时抗拉强度急剧下降，在介质压力的作用下，温度最高的向火侧首先产生塑性变形，管径胀粗、管壁变薄，随后发生剪切断裂而爆破。爆破时，由于介质对炽热的管壁产生激冷作用，在爆破口往往有相变或不完全相变的组织结构，这种爆破就称为短时超温爆管。也有称为短时过热爆管或加速蠕变损坏。

这种短时超温爆管大多发生在水冷壁管和凝渣管上，特别是水冷壁管热负荷最高的地方，如燃烧带附近及喷燃器附近的向火侧。过热器管和省煤器管偶尔也会发生。

1. 爆破口的特征

短时超温爆破口一般胀粗较为明显，管壁减薄很多，爆破口呈尖锐的喇叭形，其边缘很锋利，具有韧性断裂的特征。爆破口附近有时有氧化铁层，有时没有，如图 3-7 所示，即为某厂 20 号碳钢水冷壁管短时超温爆破的实物照片。

短时超温爆破口的这些特征是和超温爆管时产生了较大的塑性变形，使管壁减薄，因而承受不了介质的压力而引起剪切断裂有密切的关系。

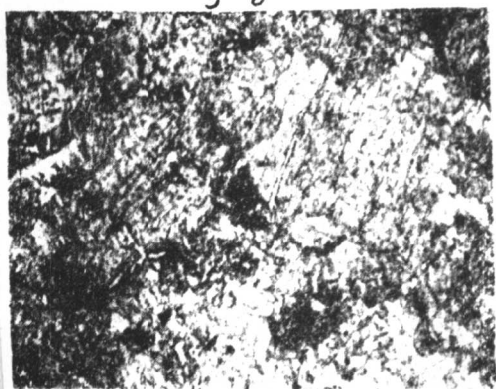


以 20 号钢为例，
当加热到上临界温度，
图 3-7 短时超温爆管的爆破口实物照片

进行高温短时拉伸试验时，由于晶内滑移延伸率非常大，应力应变曲线斜率很大，屈服点不明显，直到出现缩颈处呈 45° 方向剪切断裂。断裂后试样断面收缩率很大，断口几乎是尖的，整个试样都出现延伸收缩呈锥状，加热温度虽然很高，由于时间短故氧化铁层不厚。短时超温爆管的过程就类似这种高温短时拉伸试验，首先在管壁温度最高的一侧胀粗，管壁减薄，这样介质压力所造成的应力就更大了，很快在局部地区出现收缩现象，形成剪切裂纹而爆破。爆破口附近氧化铁层的厚度，则要从运行情况来分析。如果管子一直是在设计温度下运行的，氧化铁层就较薄。如果曾经在超温过热情况下运行过一段时间后再发生短时超温爆管，则氧化铁层就较厚，而且爆破口的背部（即背火侧）还会出现碳化物球化等组织变化。

2、组织结构和性能的变化

短时超温爆管的温度要高于钢材的 A_1 临界点，甚至有些要达到或超过 A_3 临界点，爆管后，炽热的管壁为高速喷出的介质迅速地冷却下来，因此就将像进行了一次不同程度的淬火处理。爆破口的组织结构与管壁超温的高低和冷却速度有密切的关系。将图 3—7 该管的爆破口处进行金相分析，可以观察到马氏体、贝氏体及屈氏体之类的淬硬组织。如图 3—8 所示。



组织结构变化后，机械性能也会发生改变。对爆破口进行硬度测定时，可以发现硬度有明显的增高。例如曾对一根直径为 85 毫米的碳钢水冷壁管子，因短时

3—8 图 3—8 短时超温爆管的显微组织

超温爆破后，测得其爆破口断面上各点的硬度并观察比较其组织结构的变化，发现爆破口周向断面上各点的硬度及组织结构差异甚大，其侧点位置及硬度如图 3—9 所示。

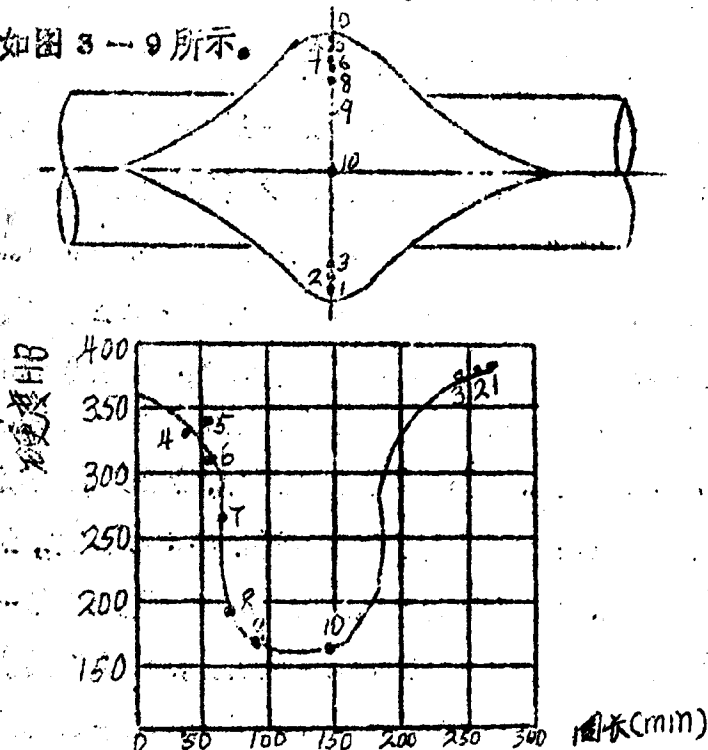


图 3—9 爆管的爆破口周向各侧点的位置及硬度值

在爆破口边缘侧点 3 及侧点 4 处硬度最高，HB 接近 400，其组织几乎全为马氏体，可以认为在该处的超温约略高于 A_3 。沿着这个区域往下，硬度就逐渐减低，组织也逐渐过渡为铁素体和珠光体的混合组织，该区域的温度约在 $A_1 \sim A_3$ 之间。在爆破口背部即侧点 10 的位置，组织为铁素体和珠光体，其硬度 $HB \approx 165$ ，表明这里的温度已在 A_1 以下。

如果在短时超温爆管前已经过了一段长时超温过热，则在爆破口的背部或在爆破口的附近，会出现碳化物球化等组织变化。有些受热面管子在短时超温爆破后，又经受炉膛高温的作用，则相当于淬火后进行一次回火处理，这样爆破口上的组织结构就更复杂了。但是，只

要很好地与背火侧或远离爆破口未超温地方的组织相比较，还是能分析估计出超温情况的。

(三) 错用钢材而引起的爆管

用于高温压锅炉的受热面管子一般要考虑其高温持久强度、抗氧化性能、组织稳定性、抗腐蚀性以及钢管的加工和焊接性能等。不同牌号和成份的受热面管子材料，上述性能也是不同的。例如，在 470°C 时，20号碳钢的持久强度为 7.1公斤/毫米^2 ，而12Cr1MoV钢则为 23公斤/毫米^2 ，20号碳钢最高抗氧化温度为 550°C ，而10CrMo910钢则为 620°C 左右。用钼脱氧的细晶粒15Mo钢，在 500°C 运行时，组织就不稳定了，往往会产生石墨化而发脆，而15CrMo钢可用在 560°C ，组织还比较稳定。所以，在制造、安装和检修时，未经计算就选用了低一级的钢管，即认为是错用钢材。受热面管子错用钢材后，由于使用温度超过了该钢材允许的工作温度，因而使蠕胀速度过快，迟早会发生爆管事故。

某高温高压锅炉的高温过热器管子曾因错用了碳钢管子经一年左右的运行时间就发生了剧烈的爆管事故，如图3-10所示。由图可看出，爆破异常剧烈，破口呈大喇叭状，边缘粗糙，为典型脆性破断。

错用钢材而引起爆管事故后，其爆破口的宏观特征和微观组织变化基本上与长时超温爆管相同。只要对该管子进行化学分析或光谱分析就可以很快判明事故的原因。

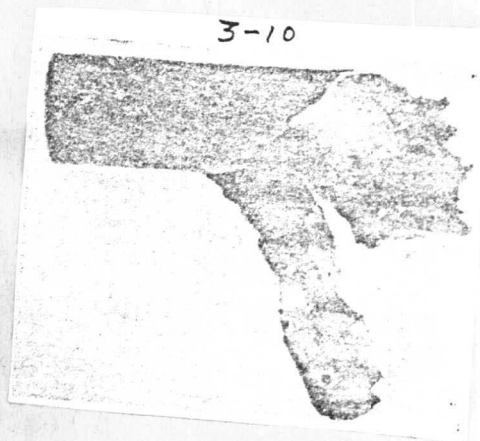


图 3-10 因错用钢材而导致猛烈爆管的宏观照片

(四) 超温损坏的实例分析

1、12Cr1MoV 钢高温过热器管长时超温运行爆破的分析：

某厂高温高压单汽包自然循环燃油锅炉，蒸发量：220 吨/时，汽压：100 公斤/公分²，汽温：540℃。该炉高温过热器管出口段采用 $\varnothing 38 \times 4.5$ 的 12Cr1MoV 钢。运行一年左右爆破。该炉在运行期间减温水用量特别大，长时期一直超过设计量的 6~8 倍。

爆破口长 107 毫米、宽 63 毫米呈菱形见图 3-11。爆破口处壁厚 3.5 毫米，呈粗糙脆性断面见图 3-12。爆破口内、外壁有厚 0.4 毫米的氧化铁层。从图中可以看到氧化铁层上有纵向裂纹。

在爆破口上取材料作金相检查，组织为铁素体和粒状碳化物，珠光体已完全球化。碳化物分布在晶界上、三晶粒结合处和多晶粒结合处见图 3-13。还可看到蠕变微裂纹。

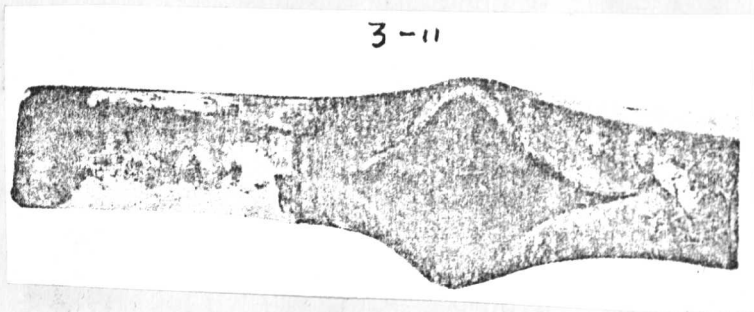


图 3-11 爆破口实物照



图 3-12 爆破口放大图

在铁素体晶内还有大量细小碳化物析出并已聚集长大。铁素体晶粒大小相当于标准 10—11 级。管壁外表面上有应力腐蚀裂纹。从仓库同批新管上取样检查，晶粒大小相当于标准 11 级左右，非金属

夹杂不多。

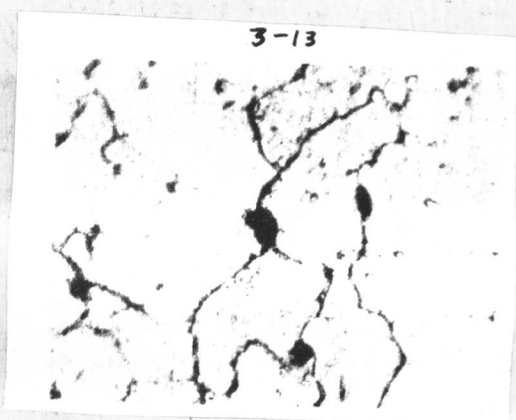


图 3-13 碳化物沿晶界和铁素体晶内分布。中间黑色部分为沿晶界和多晶粒结合处的微裂纹。

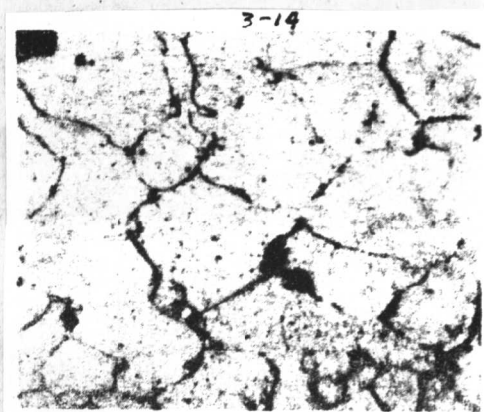


图 3-14 中间黑色部分为三晶粒结合处蠕变微裂纹

根据以上检查情况进行分析，爆破口粗糙，呈脆性断面，壁厚减薄不多，内外壁氧化铁层较厚。微观组织中珠光体已完全球化，有大量典型的蠕变微裂纹，爆破口上氧化铁层较厚，应力腐蚀裂纹也较深，说明超温运行时间已相当长了。因此，可以认为该管是由于长时超温运行而爆破。

2、20号钢水冷壁管长时超温运行爆破的分析：

某厂B & W单汽包自然循环高温高压锅炉，蒸发量：181吨/时，汽压：90公斤/公分²，汽温：510℃。该炉水冷壁管采用20号碳钢管 $\phi 81.5 \times 9$ 毫米。大修时水冷壁管颜色正常呈暗红色。为满

足用电需要曾提高出力至230吨/时，92~93公斤/公分²情况下运行，在燃烧器处增加了一根油枪，当时发现后墙水冷壁管之间的生铁砧有烧红现象，估计温度在800℃以上，在运行264小时后发现后墙水冷壁管在冷灰斗弯头以上一米处，正好是油枪对准燃烧的地方漏水，停炉后检查，水冷壁管普遍超温呈黑绿色，后墙有6根管子胀粗、鼓疱裂纹漏水，损坏位置如图3-15所示。这次损坏的6根中有2根已裂纹漏水。

该炉的水冷壁管已运行三十一年以上，直管部分一直未发生过故障。

漏水处裂纹长度超过100毫米，细小裂纹甚多见图3-16。对其中一根的内外壁进行宏观检查，向火侧氧化铁层很厚，管子内棕黑色铁垢也较厚，将漏水地方裂纹折断，断口粗糙呈脆性断面，基本上没有减薄见图3-17。

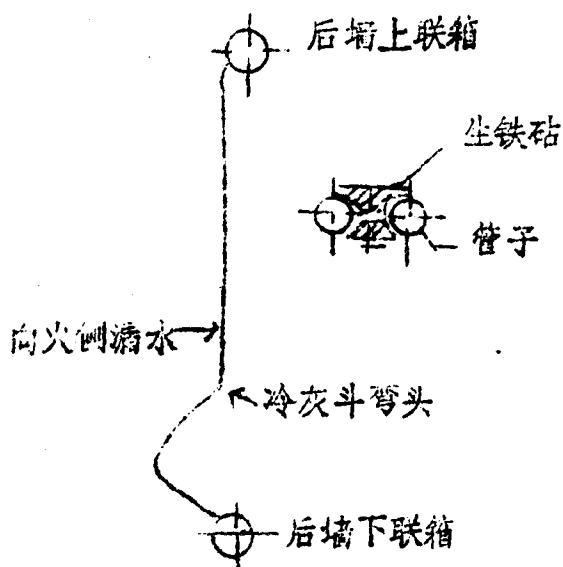


图3-15 漏水处示意图

在胀粗有裂纹的管子上和其余完好的管子上各取样进行微观检查，远离鼓疱处向火侧的组织为铁素体与珠光体，铁素体已出现有二次再结晶粗大晶粒，珠光体已球状化。在鼓疱处附近的组织为铁素体和粗粒状碳化物，碳化物沿晶界分布见图3-18。漏水处的裂纹都是沿晶界分布的蠕变裂纹见图3-19。64年割下的管子的组织为正常的铁素体和珠光体。但晶粒大小不甚均匀。宏观检查，漏水处呈粗糙脆性断面。氧化铁层较厚，微观检查，组织已完全球化，有二次再

结晶大晶粒出现，有大量沿晶界的典型蠕变微裂纹，这些都说明是长时超温运行造成裂纹而导致漏水的。结合现场运行情况，可以看出向火侧结有铁垢的地方，热负荷相当高，由于油枪喷出的火焰正好对着弯头，所以该处管壁超温就更多，经过几百个小时超温运行后钢材的组织发生了一系列的变化，持久强度大大下降，产生微小蠕变裂纹，再逐步连接起来形成大裂纹而漏水。

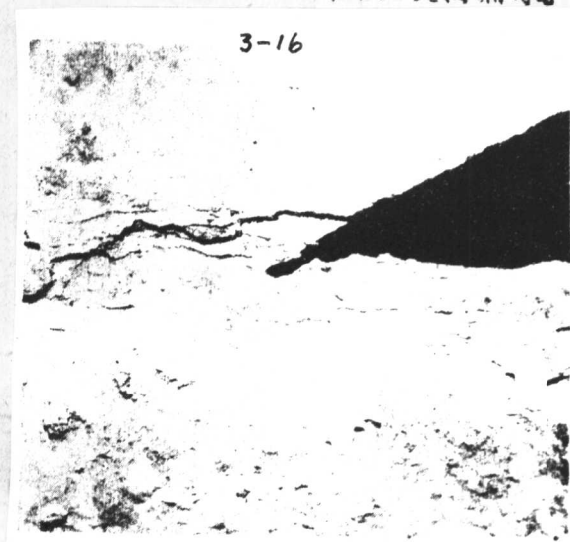


图 3-16 漏水处的
裂纹

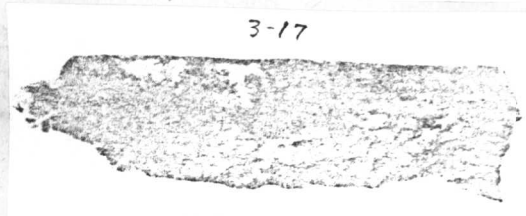


图 3-17 漏水处粗
糙断口实物照

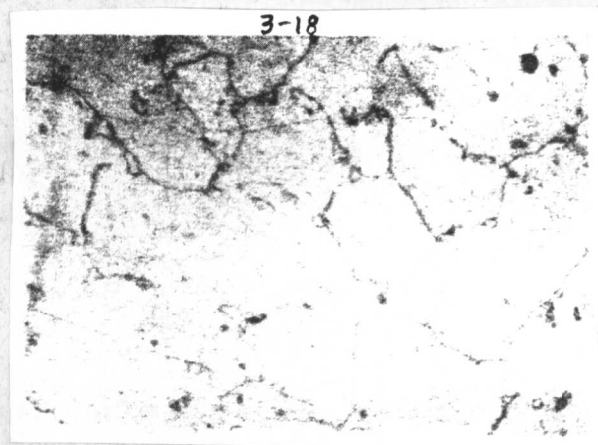


图 3-18 鼓疱处附
近组织

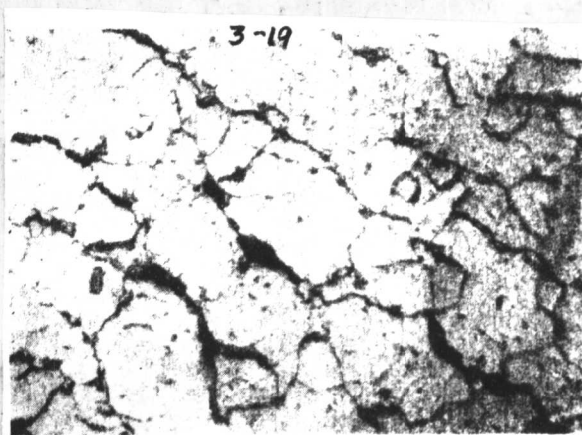


图 3-19 漏水处
组织和沿晶界蠕变
裂纹

3、低温过热器管短时超温爆破的分析：

某厂一台中温中压锅炉的低温过热器管发生爆破。除爆破的一根以外，又发现另外三根管子有的胀粗，有的鼓泡和裂纹漏汽。在一根管子的弯头内积满白色盐垢，厚达 9 毫米。该管为 $\varnothing 45 \times 4$ 毫米的 20 号钢。

爆破口很锋利，呈塑性断裂，管壁明显减薄。爆破口二侧胀粗到 $\varnothing 52$ 毫米。内、外壁上氧化铁层厚约 0.6 毫米，氧化铁层上有密集的小裂纹，爆破口尺寸并不太大见图 3-20。在爆破口边缘和背部分别取样作微观检查，发现爆破口组织为大块残余铁素体、狭条亚共析铁素体珠光体和少量碳化物见图 3-21，管子外壁有较浅的应力腐蚀裂纹见图 3-22。背火侧组织为铁素体和球状碳化物，珠光体已完全消失了。这些都说明是短时超温运行导致爆破的。从爆破口边缘的不完全相变组织来分析，说明当壁温刚超过 A_1 不多就爆破了。背火侧组织的完全球化则表明在爆破前管子曾经有长时超温运行的情况。