

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.04.12

# 火电厂锅炉水冷壁焊缝泄漏失效分析

校林飞, 杨占君, 郑准备, 张建伟, 周 宁, 何 华, 谭永生, 陈 璟, 吴宇星

大唐西北电力试验研究院, 陕西 西安 710021

**摘 要:** 某 12Cr1MoV 水冷壁对接焊缝中部出现周向裂纹导致泄漏失效, 为调查泄漏失效原因, 对焊缝进行了宏观检查、磁粉检测、硬度检验、金相分析、全元素分析和能谱分析, 并建立模型分四个阶段讨论了水冷壁焊缝泄漏失效的原因。研究表明: 焊缝中夹杂的 S 元素是焊缝泄漏失效的主要因素, 收缩拉应力为偏析在晶界的低熔点共晶物提供了形成沿晶热裂纹的条件, 氧气的介入造成热裂纹的局部氧化, 实际运行的综合应力使氧化的沿晶热裂纹多点扩展、融合, 形成宏观裂纹, 最终导致焊缝泄漏失效。

**关键词:** 水冷壁; 焊缝; 泄漏失效; 结晶裂纹; 元素偏析; 低熔点共晶物

中图分类号: TG441.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)04-0084-07

## Failure Analysis on Weld Leakage of Boiler Water Wall in Thermal Power Plant

XIAO Linfei, YANG Zhanjun, ZHENG Zhunbei, ZHANG Jianwei, ZHOU Ning, HE Hua,  
TAN Yongsheng, CHEN Jing, WU Yuxing

Datang Northwest Electric Power Test & Research Institute, Xi'an 710021, China

**Abstract:** A circumferential crack appeared in the middle of a 12Cr1MoV water wall butt weld, leading to leakage failure. In order to investigate the cause of leakage failure, macro inspection, magnetic particle testing, hardness testing, metallographic analysis, full element analysis and energy spectrum analysis were carried out on the weld, and a model was established to discuss the causes of water wall weld leakage failure in four stages. The research shows that the inclusion of S element in the weld is the main control factor of the weld leakage failure. The contraction tensile stress provides the conditions for the formation of intergranular hot cracks for the low melting point eutectic that segregates at the grain boundary. The intervention of oxygen causes local oxidation of the hot cracks. The actual operation comprehensive stress makes the oxidized intergranular hot cracks expand and fuse at multiple points, forming macro cracks, and finally leading to weld leakage. It provides a theoretical reference for leakage failure caused by intergranular thermal cracks in water wall welds of thermal power plants.

**Keywords:** water wall; weld line; leakage; crystal crack; element segregation; low melting point eutectic

**引用格式:** 校林飞, 杨占君, 郑准备, 等. 火电厂锅炉水冷壁焊缝泄漏失效分析[J]. 电焊机, 2024, 54(4): 84-90.

**Citation:** XIAO Linfei, YANG Zhanjun, ZHENG Zhunbei, et al. Failure Analysis on Weld Leakage of Boiler Water Wall in Thermal Power Plant[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4): 84-90.

## 0 引言

锅炉是火电机组三大主设备之一, 锅炉四管(水冷壁、过热器、再热器和省煤器)的稳定安全运

行关乎电力生产的稳定性<sup>[1-2]</sup>。Daneshvar-Fatah<sup>[3]</sup>和 Ameri<sup>[4]</sup>等人的研究表明锅炉事故造成的非停占比超过火力发电事故的 40%, 锅炉四管失效造成的非停占比 70%, 每年直接经济损失约 50 亿美元<sup>[5]</sup>,

收稿日期: 2023-01-12 修回日期: 2024-03-16

作者简介: 校林飞(1996—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事火电厂金属部件的监督检验和失效分析。E-mail: 18292878327@163.com。

水冷壁管道的泄漏失效占比40%<sup>[6]</sup>。水冷壁由多排钢管组成并分布于炉膛的四周,通过管内流动的水或蒸汽吸收炉膛高温燃烧产物的辐射热,具有保护炉墙的作用。基于水冷壁管道的实际工况和服役条件,可将水冷壁的失效原因归结为材料使用不当、热疲劳<sup>[7]</sup>、应力腐蚀失效<sup>[8]</sup>、化学腐蚀失效<sup>[9-10]</sup>和焊接缺陷引发的失效<sup>[11]</sup>等。此外, Kim等人<sup>[12]</sup>研究表明水冷壁破裂失效是由于温度升高导致锅炉内水不足而导致过热。Duarte等人<sup>[13]</sup>发现水冷壁管使用前未充分消除应力而产生的拉伸残余应力和给水中高浓度的溶解氧是水冷壁失效的主要原因。

某热电厂2号锅炉为超临界参数变压运行直流炉,锅炉采用切圆燃烧方式,主燃烧器布置在水冷壁四角,SOFA燃烧器布置在主燃烧器区上方水冷壁的四角,以实现分级燃烧,降低NO<sub>x</sub>排放。截至该锅炉运行9 190 h,标高45.5 m,炉右侧垂直水冷壁自炉前向炉后数第123根管子发生泄漏。泄漏水冷壁管的材质为12Cr1MoVG,尺寸 $\phi 32\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ ,焊接方法为高效率钨极气体保护焊(H-GTAW)打底和盖面填充,填充金属为 $\phi 1.2\text{ mm}$ 的ER55-B2-MnV焊材。本文就该水冷壁焊缝中部泄漏失效进行了分析,找出导致泄漏的主要原因,从焊接缺陷层面推演了微裂纹形成、氧化、扩展到最终泄漏失效的过程,并提出相应的预防和改进措施,以提高火电厂锅炉水冷壁的可靠性和安全性,减少因设备失效带来的经济损失和安全隐患。

## 1 试验材料和方法

采用直读光谱仪检测失效水冷壁管母材的化学成分,结果见表1,水冷壁管母材满足GB/T 5310—2017的标准要求。对水冷壁管进行清洁烘干处理后在焊缝裂纹处垂直于管径方向线切割制取金相试样,如图1中区域1和区域2所示;结合ZCM-DA1203型磁力探伤仪观察焊缝裂纹的宏观形貌;采用Leica DMI3000M倒置金相显微镜观察试样的金相组织和裂纹形貌;采用显微维氏硬度计测试不同区域的硬度;根据GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法》从相邻水冷壁管制取带焊缝的拉伸试样,采用电子万能试验机对

对比试样进行拉伸实验,以表征水冷壁管的屈服强度和抗拉强度;焊缝的化学成分由EDX-6800型全元素分析仪测定;采用JSM-6700F型场发射扫描电子显微镜确定选定区域的成分。

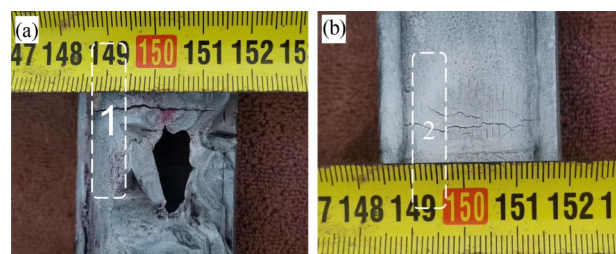
表1 泄漏水冷壁管母材的化学成分(质量分数,%)

| 项目                            | C         | S         | Mn        | Cr        |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 焊缝上侧母材                        | 0.11      | 0.27      | 0.58      | 1.03      |
| 焊缝下侧母材                        | 0.13      | 0.31      | 0.56      | 1.04      |
| GB/T 5310—2017<br>(12Cr1MoVG) | 0.08~0.15 | 0.17~0.37 | 0.40~0.70 | 0.90~1.20 |
| 项目                            | Mo        | V         | P         | S         |
| 焊缝上侧母材                        | 0.32      | 0.22      | 0.009     | 0.002     |
| 焊缝下侧母材                        | 0.30      | 0.22      | 0.012     | 0.004     |
| GB/T 5310—2017<br>(12Cr1MoVG) | 0.25~0.35 | 0.15~0.30 | ≤0.025    | ≤0.010    |

## 2 实验结果与分析

### 2.1 焊缝的宏观检查

水冷壁管失效部位向火侧和背火侧的宏观形态如图1所示。由图可知,水冷壁管未见明显的变形及胀粗现象,但水冷壁管焊缝中部存在整圈周向裂纹,裂纹并未扩展至鳍片。向火侧焊缝裂纹宽度大,沿主裂纹扩展的次生裂纹少,近焊缝母材有明显吹损减薄现象且存在长轴约为18 cm的类椭圆形爆口;背火侧焊缝未见吹损减薄现象及爆口,但沿主裂纹衍生出多条呈河流状发散的次生裂纹。



(a)向火侧焊缝

(b)背火侧焊缝

图1 水冷壁管焊缝宏观形貌

Fig. 1 Macro morphology of water wall pipe welds

### 2.2 焊缝的硬度检测

焊缝热影响区的组织分布不均,不同部位的硬度值不同。在载荷为9.807 N的标准条件对水冷壁管向火侧母材和焊缝显微维氏硬度进行检测,结果

如图2所示。焊缝和母材平均硬度值分别为262.3 HV0.1和165.5 HV0.1,依据式(1)换算为布氏硬度为260.5 HB和167.6 HB,平均硬度差值为92.9 HB,均符合DL/T 438—2016《火力发电厂金属技术监督规程》和DL/T 869—2021《火力发电厂焊接技术规程》的标准要求。

$$HB = (HV + 10.5) / 1.05 \quad (1)$$

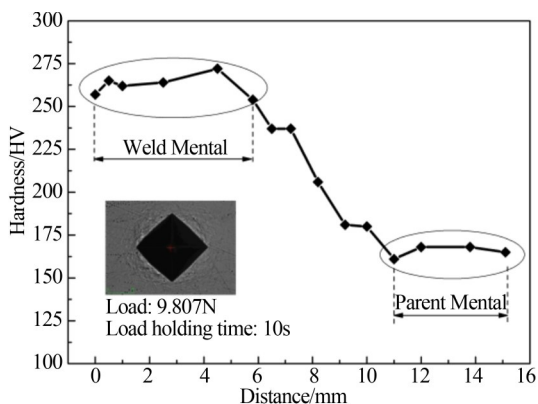


图2 向火侧焊缝和母材显微维氏硬度

Fig. 2 Vickers hardness of welds and base metal on the firefacing side weld

### 2.3 拉伸实验

取与泄漏水冷壁管相邻的合格管子作为对比管样,对比管与失效管具有相同的制造背景和工艺特点。在对比管样向火侧和背火侧焊缝处分别制取一个拉伸试样,进行室温拉伸性能实验,拉伸试样取样位置及尺寸图如图3所示。结果表明:对比水冷壁管样向火侧和背火侧焊缝的屈服强度和抗拉强度均满足标准要求,拉伸试样均断于母材处,完全符合焊接接头部位强度高于母材强度的焊接结构设计原则,实验数据见表2。

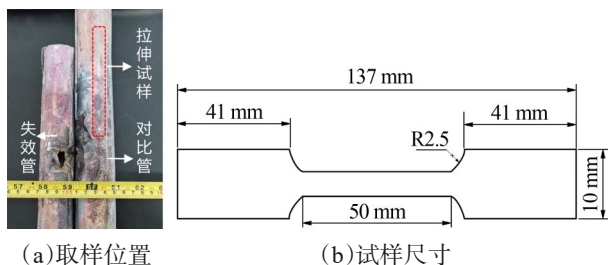


图3 水冷壁管拉伸试样取样位置及尺寸

Fig. 3 Water-cooled wall pipe tensile specimen sampling location and dimensions

### 2.4 焊缝组织和裂纹的微结构分析

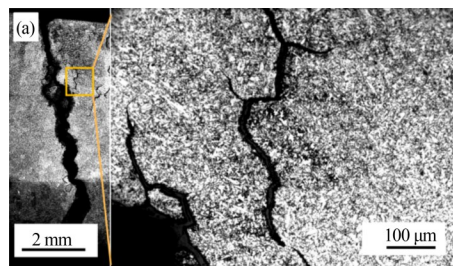
图4为焊缝的金相组织和裂纹形貌,向火侧和

表2 对比水冷壁管室温拉伸性能

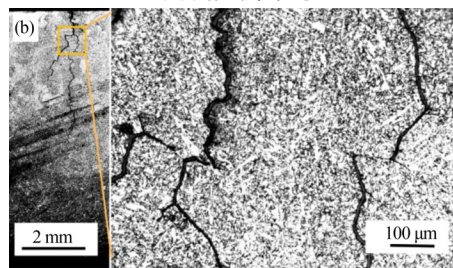
Table 1 Comparison of room temperature tensile properties of water wall tubes

| 拉伸试样位置                        | 屈服强度                |                       | 抗拉强度             |
|-------------------------------|---------------------|-----------------------|------------------|
|                               | $R_{el}/\text{MPa}$ | $R_{p0.2}/\text{MPa}$ | $R_m/\text{MPa}$ |
| 向火侧                           | —                   | 380                   | 578              |
| 背火侧                           | —                   | 357                   | 580              |
| GB/T 5310—2017<br>(12Cr1MoVG) | $\geq 255$          |                       | 470~640          |

背火侧焊缝的组织均为先共析铁素体+贝氏体,向火侧焊缝存在贯穿截面的主裂纹,最大宽度约为800  $\mu\text{m}$ ,主裂纹附近存在大量沿晶开裂的伴生微裂纹,裂纹尖端尖锐,扩展趋势严重,多为闭合性裂纹,局部原奥氏体晶界处有夹杂物存在,如图4a所示。背火侧焊缝裂纹深度约为壁厚的1/2,最大宽度约为40  $\mu\text{m}$ ,裂纹呈现沿晶开裂状态,如图4b所示。焊接热裂纹是高温下产生的,按照裂纹形态和起裂源位置的不同可分为沿晶裂纹、高温液化裂纹和多边裂纹,本次泄漏失效的水冷壁管焊缝整圈存在沿晶裂纹,裂纹的位置均位于焊缝中部且与焊缝的长度方向平行,裂纹沿晶界扩展开裂并未延展至热影响区和母材,裂口处有氧化特征,由此可以判定该裂纹为热裂纹中的结晶裂纹。



(a) 向火侧焊缝



(b) 背火侧焊缝

图4 向火侧和背火侧焊缝金相

Fig. 4 Metallography of welds on the fire facing side and back side

相关研究表明<sup>[14-15]</sup>,结晶裂纹的形成可以归结为冶金因素和力学因素(工艺因素)两大类。热裂

纹敏感系数HCS(hot-tearing sensitivity coefficient)可以用来表征不同母材在焊接条件下的热裂纹倾向,如式(2)所示,12Cr1MoVG水冷壁管母材的HCS<3.6,标准焊接规范下产生焊接热裂纹的倾向低,另外,Cr、Mo、V等元素的添加增加了母材的化学稳定性,降低了热裂纹产生的倾向,因此焊丝成分和母材成分决定的冶金因素不是造成12Cr1MoVG焊缝热裂纹的主要原因。另一方面,焊接工艺使用不当(如焊接电流过大、焊接电压过大,焊接方法选用错误等)或者焊接过程中杂质元素的引入也极易使12Cr1MoVG焊缝产生热裂纹<sup>[9,16]</sup>。

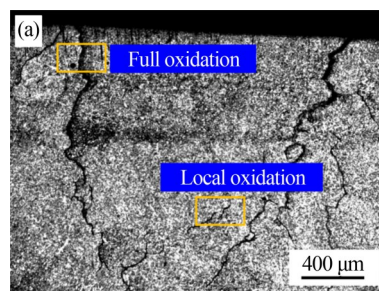
$$HCS = \frac{C \left[ P + S + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right]}{3Mn + Mo + Cr + V} \times 10^3 \quad (2)$$

图5为向火侧沿晶微裂纹扫描电子形貌。晶界上元素的偏析和夹杂很容易成为氧化反应的核心,向火侧焊缝的微裂纹在高于350℃的高温条件下是熵增的过程,近外壁的前沿裂纹发生高温氧化反应( $Fe + O_2 \rightarrow Fe_3O_4$ ),氧化物由近外壁的致密层和内层的疏松层组成。图中可看出微裂纹的氧化反应沿着晶界进行,结晶裂纹的氧化形态呈现充分氧化和局部断续氧化两种氧化特征。充分氧化主要发生在沿着焊缝中部扩展的主裂纹上,填充氧化物致密度高且宽度大,氧化物的致密填充表明以Fe为主的合金元素与O在长时间(大约几千小时)的维度上氧化充分;局部断续氧化主要发生在伴生裂纹上,氧化物疏松且裂纹宽度小,氧化反应时间短(大约几百小时),不足以引起裂纹中合金元素的充分氧化而变得疏松,表现为裂纹中间夹杂着反应不充分的断续氧化物。

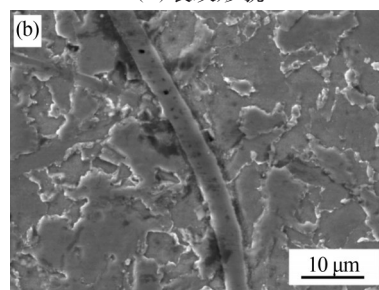
## 2.5 裂纹的元素分析

全元素分析可以定量表征焊缝整体元素相对含量,对向火侧焊缝进行全元素分析,结果如表3所示。焊缝化学成分符合《火力发电厂焊接技术规程》(DL/T 869—2012)的标准要求。其中,Mn/S比为222.5,当Mn/S≥30才能防止热裂纹,可见该焊缝的热裂纹倾向并不明显。

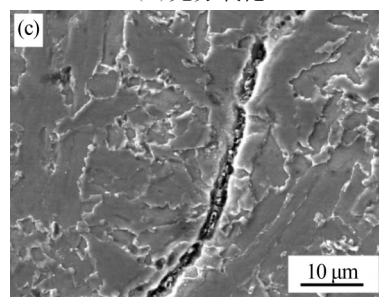
引起结晶裂纹的冶金因素不仅体现在焊缝整体元素的含量,有害元素(尤其是S和P)的局部偏析会形成低熔点共晶物,成为热裂纹或冷裂纹的起



(a) 裂纹形貌



(b) 充分氧化



(c) 局部氧化

图5 向火侧焊缝沿晶裂纹氧化形态

Fig. 5 Oxidation morphology of intergranular crack of weld at fire facing side

表3 向火侧焊缝化学元素分析(质量分数,%)

Table 3 Chemical element analysis data of firefacing side weld (wt. %)

| 数值              | C         | Si      | Mn        | P         |
|-----------------|-----------|---------|-----------|-----------|
| 实测              | 0.063     | 0.54    | 0.89      | 0.013     |
| 标准 <sup>①</sup> | 0.05~0.12 | ≤0.6    | ≤0.9      | ≤0.035    |
| 数值              | S         | Cr      | Mo        | V         |
| 实测              | 0.004     | 1.12    | 0.48      | 0.19      |
| 标准 <sup>①</sup> | ≤0.035    | 0.8~1.5 | 0.40~0.65 | 0.10~0.35 |

注:①DL/T 869—2012标准规定E5515-B2型号焊条熔敷金属的元素含量。

裂源,外力作用下多点起裂,扩展融合也会引起焊缝的泄漏失效。对向火侧沿晶裂纹进行能谱分析以定量表征局部区域元素的相对含量,结果如表4、图6所示。能谱定量结果表明沿晶裂纹中氧化物的主要成分为Cr、Mn和Fe,主要以Fe-O化合物为主,Cr和Mn的相对含量较高和其亲氧度高有关,Fe-O

化合物的存在证实了上述热裂纹有沿晶氧化的特点。裂纹形成的不同时效对裂纹氧化物的形貌和组成产生了显著差异,图 6b 裂纹呈现出局部氧化的特征,这是由于焊接过程中氧气进入沿晶微裂纹,引发了点状氧化行为。而图 6a 中的裂纹则展现出充分氧化的特点,这是局部氧化裂纹在机组长时间运行后的氧化结果。定量分析结果表明充分氧化产物中 O 的相对质量百分比约为局部氧化产物 O 含量的 2 倍。图 6a 中的谱图显示了裂纹已经经历了充分氧化,裂纹被 Fe-O 化合物充分填充。因此,裂纹表面或接近表面的 1 μm 区域内 S 元素的含量几乎

可以忽略不计,甚至可能完全不存在,这就导致 S 元素特征 X 射线的有效激发变得不可能。而图 6b 揭示了裂纹氧化物在局部区域含有 0.35 wt.% 的 S 元素,这归因于裂纹表面局部氧化的过程中引入了 S 元素,进而能够触发 X 射线光子的能量释放。S 元素是引起焊缝热裂纹的主要元素,虽然室温下 Fe 和 S 的溶解度仅为 0.015%~0.02%,但焊接熔融阶段的液态 Fe 和夹杂的 S 可以无限互溶,熔池的结晶会使 S、O、Fe 形成低熔点共晶物(以 Fe+FeS 或 FeS+FeO 为主),并偏析在晶界上,形成的液态薄膜大大增加了焊缝的结晶热裂纹倾向。

表 4 向火侧焊缝裂纹能谱元素(质量分数,%)

Table 4 Energy spectrum element data of weld crack on the fire facing side (wt. %)

| 元素   | C K  | O K   | Si K | S K  | Cl K | V K  | Cr K | Mn K | Fe K  | Mo L |
|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| 谱图 a | 0.14 | 24.54 | 0.39 | —    | —    | —    | 0.37 | 1.28 | 73.29 | —    |
| 谱图 b | —    | 12.33 | 2.42 | 0.35 | 0.41 | 0.59 | 3.07 | 4.50 | 76.33 | —    |

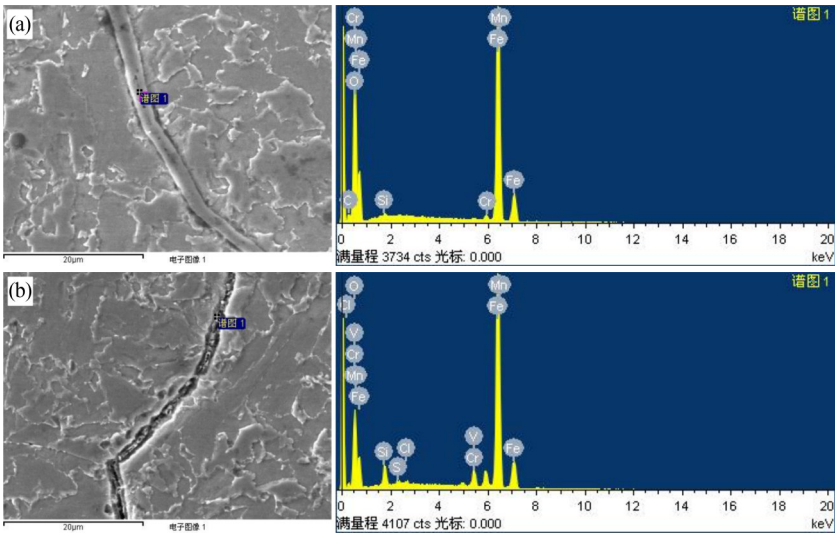


图 6 向火侧焊缝沿晶裂纹能谱图

Fig. 6 Energy spectrum diagram of intergranular crack of weld at fire facing side

焊缝断口处的能谱分析可以更直观地表征焊缝的 S 含量,将向火侧的焊缝进行截断处理,图 7a 和图 7c 断口互为偶对,对图 7a 断口 A 区域、图 7c 断口 B 区域进行能谱分析,结果依次见图 7b、图 7d 所示。由图可知,新断口的厚度约为 750 μm,旧断口

是由热裂纹扩展所引起的宏观断裂,其表面发生了严重的氧化。能谱定量分析(见表 5)表明两面断口的局部位置均检测出了超标的 S,相对质量百分比分别为 0.4 wt.% 和 1.23 wt.%,S 元素的存在为低熔点共晶物的偏聚创造了有利条件。

表 5 向火侧焊缝断口能谱元素(质量分数,%)

Table 4 Energy spectrum element data of weld fracture on the fire facing side (wt. %)

| 元素   | C K  | O K  | Si K | S K  | Cl K | V K | Cr K | Mn K | Fe K  | Mo L |
|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|-------|------|
| 谱图 a | 0.49 | 11.5 | 0.6  | 0.4  | —    | —   | 1.06 | 0.86 | 85.09 | —    |
| 谱图 b | —    | —    | 2.67 | 1.23 | —    | —   | 1.33 | 3.77 | 91.01 | —    |

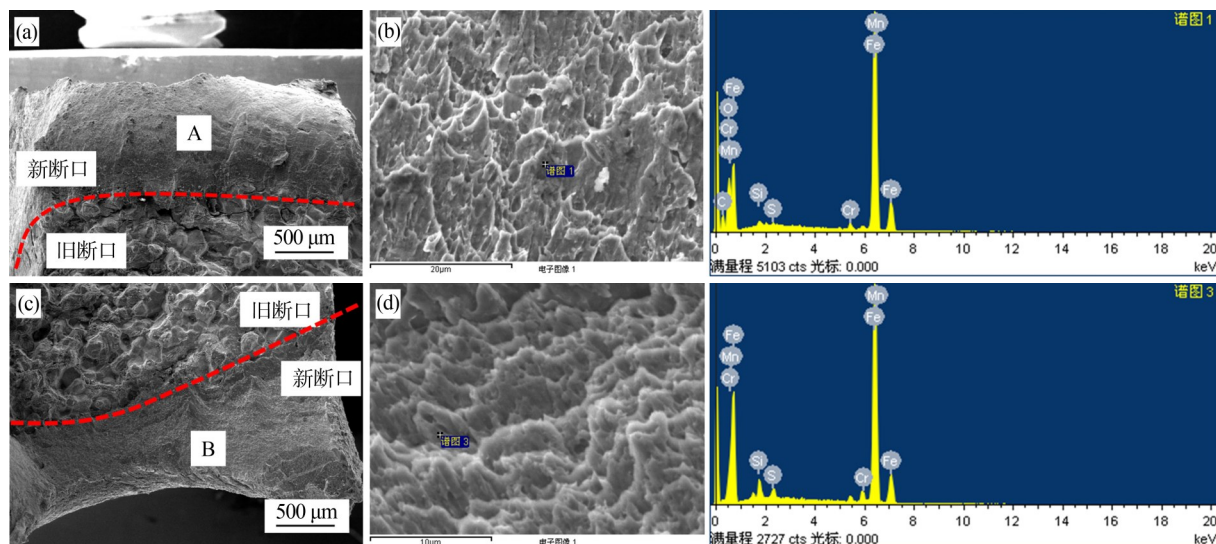


图7 向火侧焊缝断口能谱图

Fig. 7 Energy spectrum of weld fracture on the fire facing side

### 3 裂纹产生原因分析

综合上述实验结果可将沿晶热裂纹的形成、扩展和最终形成宏观裂纹的过程分为四个阶段,如图8所示。能谱分析结果表明焊缝中部局部晶界区域S含量超标,焊接液固状态下(固相线附近)的结晶偏析使局部S与Fe生成低熔点共晶物( $\text{FeS}$ )<sup>[17]</sup>,并富集于晶界处,凝固金属收缩时,残余液体不能及时填充而形成液态薄膜,如阶段1所示;低熔点共晶物偏聚引起的液态薄膜弱化了原奥氏体晶界,收缩应力的作用使薄弱处沿奥氏体晶界形成沿晶微裂纹,沿晶微裂纹一旦形成就很难弥合,实际工况的应力会直接导致沿晶微裂纹作为起裂源沿着奥氏体晶界扩展,如阶段2所示;实际焊接操作不当导致氧气沿第二阶段形成的沿晶微裂纹进入焊缝的沿晶微裂纹内,局部区域发生氧化,沿着微裂纹形成了断续的点状氧化物,如阶段3所示;机组在长时间的运行过程中,焊缝外表面的微缝成为氧气扩展进入主裂纹的路径,造成了近外表面微裂纹中部的充分氧化,使沿晶微裂纹进一步失稳,实际运行过程中的介质压力、热应力和残余应力等综合应力引发沿晶热裂纹沿着氧化物填充的薄弱晶界多点扩展,充分氧化裂纹与局部氧化裂纹相互融合,形成宏观裂纹,如阶段4所示。当水冷壁管的拉伸应变量大

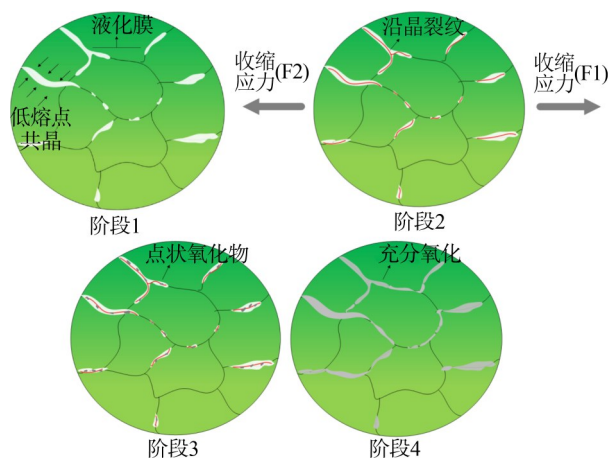


图8 焊接结晶裂纹发展的四个阶段

Fig. 8 Four stages of welding crystal crack development

于剩余壁厚金属的塑性变形能力时,焊缝中部开裂引起泄漏。

### 4 结论与建议

失效管样的金相组织、硬度和元素含量均无异常。焊缝向火侧和背火侧中部出现了周向裂纹,裂纹沿晶扩展,属于沿晶热裂纹,并呈现外部裂纹充分氧化、内部裂纹局部氧化的特征。分析认为实际焊接操作不当引入的S元素是此次水冷壁管失效的主要因素,S在晶界上偏聚,形成低熔点共晶物,实际运行的综合应力使氧化的沿晶热裂纹形成宏观

裂纹,引起焊缝泄漏。

为确保机组安全、稳定、正常地运行,提出以下建议:(1)焊接时应严格按照《火力发电行焊接技术规程》进行焊接,采用有效的措施清理干净焊接坡口的所有杂质和水分,保证焊接接头的质量。(2)电厂应对本次水冷壁管泄漏建立详细的台账,加强机组检修过程中防磨防爆检查质量的把控,尤其是同批次水冷壁管焊缝的监督检验。

#### 参考文献:

- [1] Dhua S K. Metallurgical investigation of failed boiler water-wall tubes received from a thermal power station [J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 7(17): 1572-1579.
- [2] Soudabeh A N, Price J W H. A risk approach to the management of boiler tube thinning [J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236: 406-414.
- [3] Daneshvar-Fatah F, Mostafaei A, Hosseinzadeh T R, et al. Caustic corrosion in a boiler waterside tube: Root cause and mechanism [J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 28: 69-77.
- [4] Ameri M, Shamshirgaran S R. A case study: The effects of the design factors on the thermal profile of Shahid Rajaiee boiler [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(8-9): 955-961.
- [5] Rahman M M, Purbolaksono J, Ahmad J. Root cause failure analysis of a division wall superheater tube of a coal-fired power station [J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17(6): 1490-1494.
- [6] 张冰清,田进,张志博,等. 火电厂锅炉水冷壁管失效原因分析[J]. 热力发电, 2019, 48(5): 97-101.  
ZHANG B Q, TIAN J, ZHANG Z B, et al. Failure analysis for boiler water wall tubes in thermal power plants [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(5): 97-101.
- [7] Chaudhuri S. Some aspects of metallurgical assessment of boiler tubes—Basic principles and case studies [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 432(1-2): 90-99.
- [8] Singh P M, Mahmood J. Stress assisted corrosion of waterwall tubes in recovery boiler tubes: failure analysis [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2007, 7(5): 361-370.
- [9] 张兆林. SA-213TP347HFG 膜式水冷壁角焊缝热裂纹原因分析[J]. 电焊机, 2021, 51(12): 50-55.  
ZHANG Z L. Analysis of hot crack in fillet weld of SA-213TP347HFG membrane water wall [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(12): 50-55.
- [10] Xue S, Guo R, Hu F, et al. Analysis of the causes of leakages and preventive strategies of boiler water-wall tubes in a thermal power plant [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 110: 104381.
- [11] 董志红,蒙殿武,沈全宏,等. 锅炉水冷壁横向裂纹开裂原因分析[J]. 电焊机, 2020, 50(5): 57-61.  
DONG Z H, MENG D W, SHEN Q H, et al. Analysis of transverse crack and high temperature corrosion of boiler water cooled wall [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(5): 57-61.
- [12] Kim E S. Fracture analysis of tube boiler for physical explosion accident [J]. Forensic science international, 2017, 278: 1-7.
- [13] Duarte C A, Espejo E, Martinez J C. Failure analysis of the wall tubes of a water-tube boiler [J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 79: 704-713.
- [14] 张文钺. 焊接冶金学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [15] 李亚江,王娟. 焊接缺陷分析与对策 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [16] 王香云. 12Cr1MoVG 钢焊接接头热裂纹原因分析及对策 [J]. 焊管, 2010, 33(4): 13-17.  
WANG X Y. Hot Cracking Reason Analysis and Counter measures for 12Cr1MoVG Steel welding Joint [J]. Welded Pipe and Tube, 2010, 33(4): 13-17.
- [17] 肖东平,华金良,高淼淼,等. 某 12Cr1MoVG 水冷壁管对接焊缝热裂纹成因分析及预防 [J]. 电焊机, 2019, 49(10): 92-96.  
XIAO D P, HUA J L, GAO M M, et al. Reason analysis and prevention measures on hot crack in butt weld of 12Cr1MoVG water wall tubes [J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(10): 92-96.