

基于涡流检测的换热器钛管表面损伤性质分析

吴强¹ 丁清越² 畅璐璐² 伏思汀¹

(1 苏州热工研究院有限公司 江苏 苏州 215004; 2 阳江核电有限公司 广东 阳江 529500)

摘要: 针对某电厂大修期间闭式冷却水系统 (SRI) 折流杆式换热器钛管涡流检测后发现多处超标缺陷, 进一步的损伤性质分析结果表明钛管表面损伤属于磨损缺陷, 是钛管与对应位置部件间相互摩擦造成的。为进一步确认涡流技术分析结论, 对存在超标缺陷的传热管进行抽样后, 借助体视显微镜、扫描电镜、能谱分析等分析手段辅助验证了损伤性质判定的合理性及准确性。

关键词: 换热器; 钛管; 涡流检测; 损伤性质分析

0 引言

钛及钛合金由于其具有比强度高、耐热性和加工性较好、耐腐蚀性强和换热性能优异等优点, 在换热器中的应用越来越广。在核电 SRI 系统中, 采用钛作为换热管材质, 由于使用海水作为冷却水, 因此钛管的耐腐蚀性、耐热性及换热性能等特性都是极其重要的。在 SRI 系统中, 相比应用较多的板式换热器, 管壳式换热器因无需加过滤装置及升压泵, 具有系统节能效果好, 运行安全性高, 设备投资维护成本低等优点, 因此在能源电力行业的应用占比较高。对于管壳式换热器, 主要通过管束支撑结构实现管间流速的加强, 流体的横向流动及湍流的增加, 最终达到壳程强化换热的目的。但传统的支撑板型管壳式换热器为实现强化换热的目的需具有较长的壳程及管程, 与此同时就会导致存在流致振动及换热盲区等缺点, 影响换热效率并且在管板区域因流质流动不畅容易形成杂质沉积造成管束腐蚀。同时由于支承板改变了流质流向会对传热管形成横向冲刷, 管束受横向力产生振动, 振动严重的会导致管束磨损甚至损坏。

折流杆式换热器的出现能很好的改善流致振动及换热死区等问题, 同时可以增加壳程流体流速, 且流体会平行冲刷管束, 一定程度上减少了结垢的问题。但是壳程流体进出口区域仍然会对换热管束形成一定的横向冲刷作用, 随着运行时间的增长, 管束大概率出现磨损的情况。本文旨在针对折流杆式换热器采用涡流内穿检测, 结合体视显微镜、扫描电镜, 能谱分析等辅助验证手段针对取样管束进行损伤性质的判定。

1 换热器基本情况

图 1 为闭式冷却水系统 (SRI) 换热器结构示意图, 管程为一次侧, 流体介质为海水; 壳程为二次侧, 流体介质为除盐水, 其作用是利用海水来冷却闭式循环工业水。换热器传热管

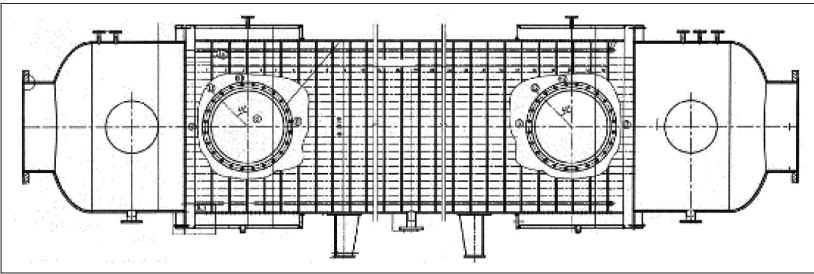


图 1 SRI101RF 和 SRI201RF 换热器结构图

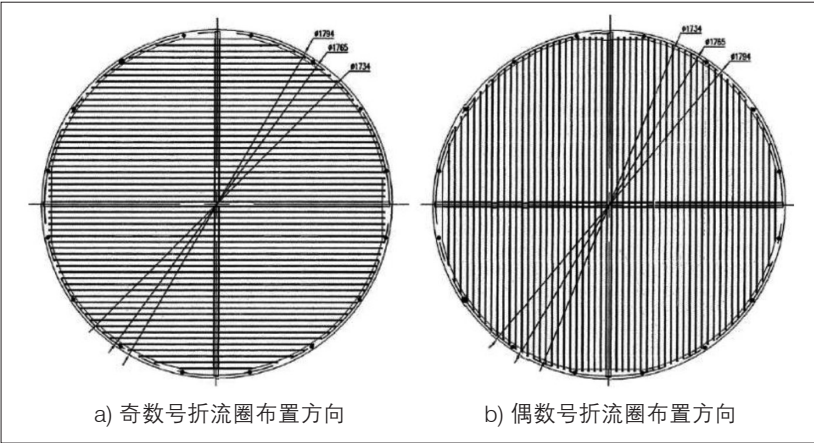


图 2 折流圈结构

表 1 SRI 换热器技术参数

序号	名称	单位	数值
1	一次水水量	t/h	4200
2	一次水最高温度	℃	33
3	一次水出口温度	℃	36.7
4	一次水工作压力	MPa(g)	0.074~0.3
5	一次水降压	kPa	≤ 29
6	一次水水质	海水	
7	二次水水量	t/h	3000
8	二次水出口温度	℃	38
9	二次水工作压力	MPa(g)	0.6
10	二次水降压	kPa	≤ 30
11	二次水水质	除盐水	

为钛管，牌号 Gr.2，规格为 $\Phi 25\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 。表 1 为 SRI 换热器技术参数。传热管由奇偶数相隔的折流圈和两端的钛-钢复合管板支撑。图 2 为折流圈结构示意图。

2 传热管抽样

大修期间 SRI 系统 2 台换热器（SRI101RF、SRI201RF）传热管经涡流检测后发现存在多处超标缺陷，包含减薄和内

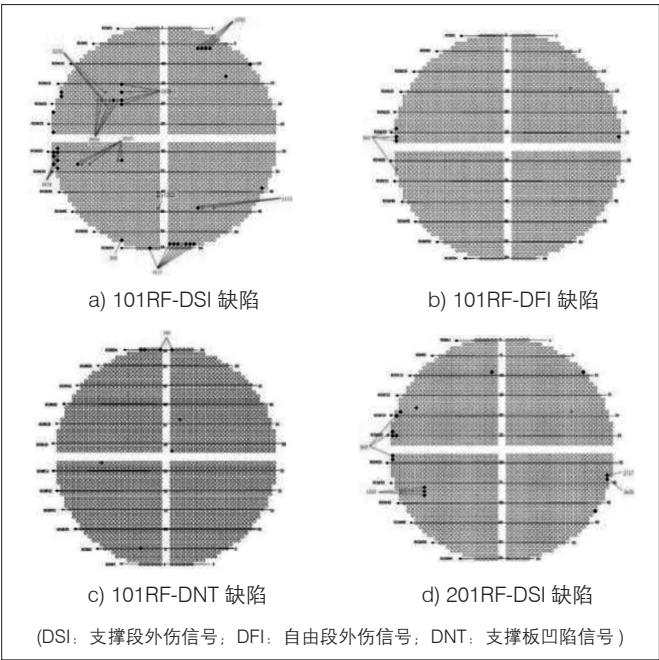


图 3 101RF 和 201RF 缺陷分布情况

凹两种。具体分布如图 3 所示。为进一步对含有减薄缺陷的传热管作损伤性质分析，在两换热器上各截取一段 1 米长的缺陷管进行送检分析。

3 涡流检测

两根抽样管编号为 R006C025 及 R042C046，经内穿式涡流检测发现 R006C025 上第 35 个折流圈位置损伤 71%，R042C046 上第 6 个折流圈位置损伤 93%。样管损伤最深位

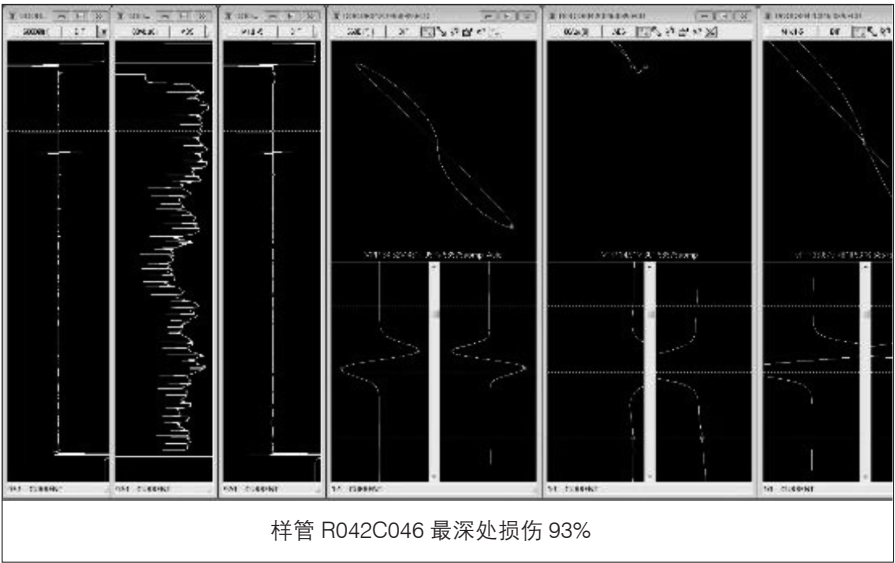


图 4 样管涡流检测结果

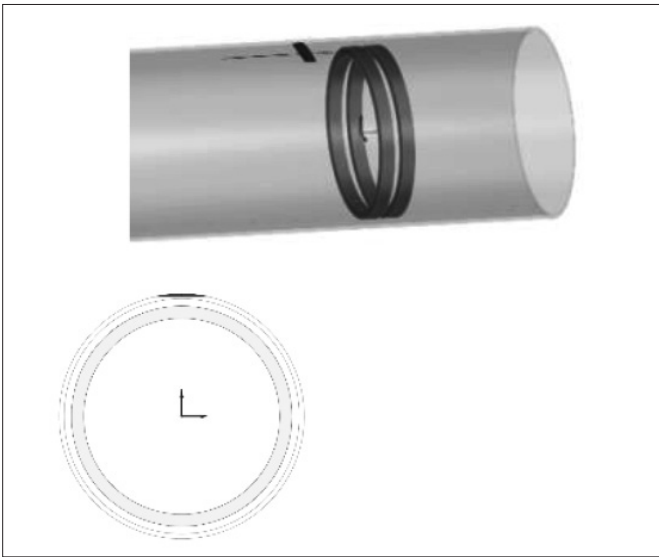


图 5 涡流仿真示意图

表 2 仿真过程磨损类缺陷

编号	轴向长度 /mm	环向角度	伤深占壁厚百分比 /%
#1	1mm	14°	10
#2	1mm	14°	20
#3	1mm	14°	40
#4	1mm	14°	60

置的信号如图 4 所示。

同时为验证涡流检测工艺参数的可靠性，利用 CIVA 仿真平台进行了钛管内穿式的涡流检测仿真，如图 5 所示。所添加缺陷如表 2 所示，以此模拟涡流检测时的缺陷响应情况。

通过涡流仿真可以发现，所得出的缺陷响应信号各绝对与差分通道的阻抗平面图及其 X、Y 分量与实际检测结果基本吻合，且随着损伤的深度的增大，响应信号的幅值及其 X、Y 分量也呈现增大趋势。对比仿真及实际检测结果验证了实际检测的工艺参数及对最深处损伤的准确判断，如图 6、

图 7 所示。

4 宏观检查

图 8 为从 101RF、201RF 取下的钛管宏观照片。钛管被分割成了三小节，管上存在多处损伤。其中损伤缺陷以 X-Y(Z) 的形式进行标识，其含义为：

X 分别为 101RF 或 201RF ；

Y 为支撑条编码，从海水出口侧起始编号分别为 1-52 ；

Z 取值 3、6、9、12，对应从海水入口侧向出口侧看分别 3 点方向、6 点方向、9 点方向及 12 点方向。

经宏观检查发现，送检的换热器钛管外表面共有 48 处损伤，主要为椭圆状或点状损伤，其中 SRI101RF 送检管段损伤最严重的位置管壁明显减薄，

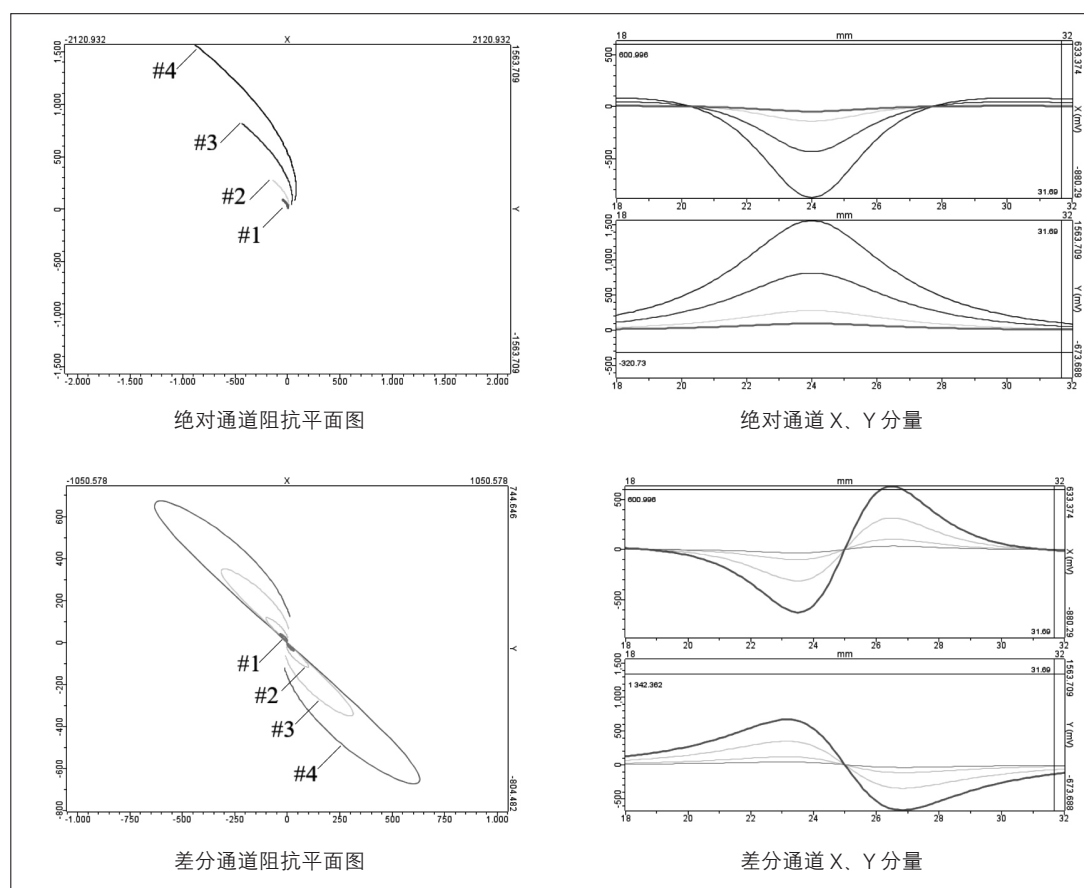


图 6 频率 80KHz 时不同深度缺陷的响应对比结果

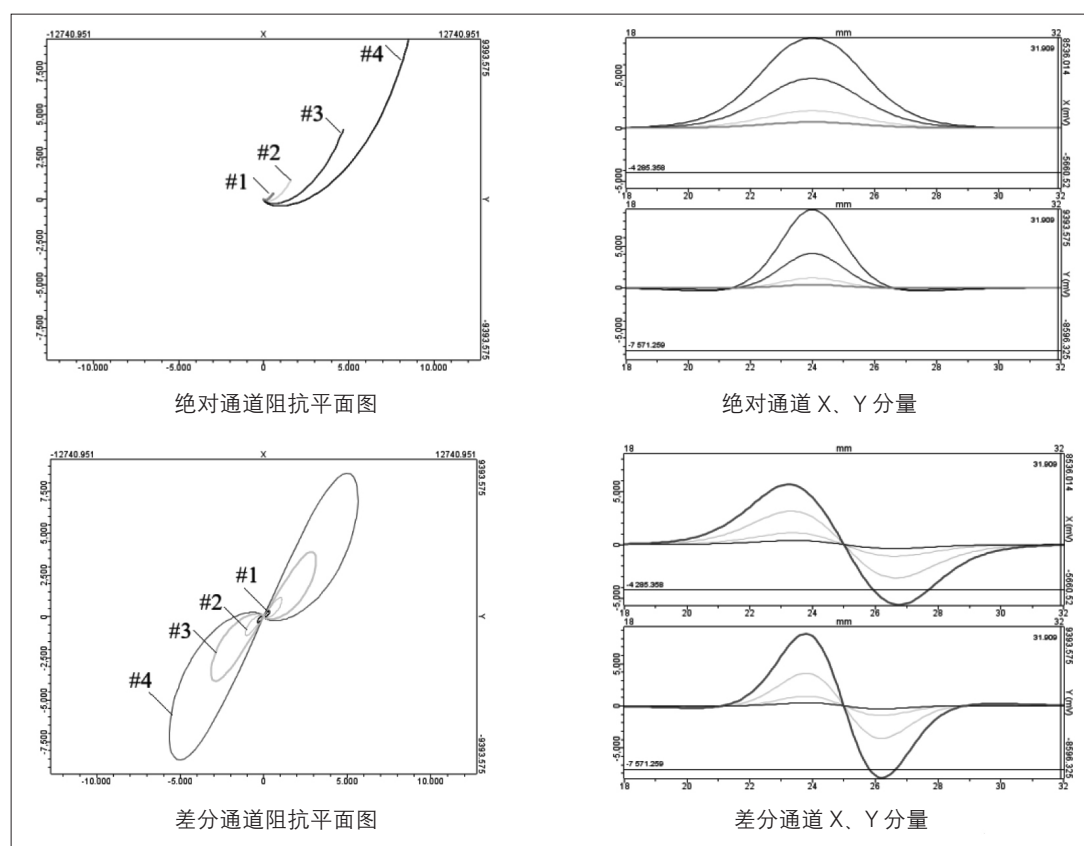


图 7 频率 660KHz 时不同深度缺陷的响应对比结果

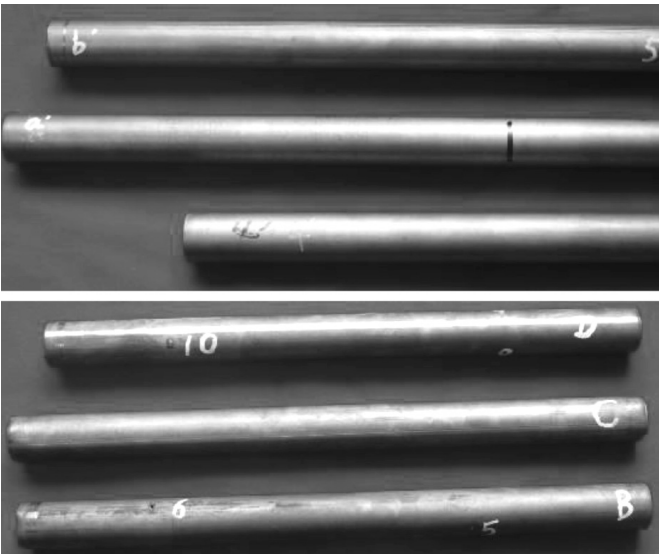


图 8 送检钛管宏观形貌

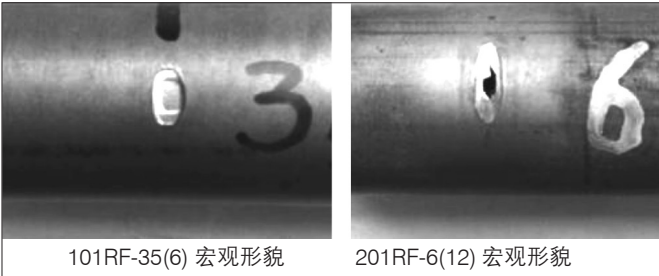


图 9 送检钛管缺陷明显处外观形貌

SRI201RF 损伤最严重的一处位置已穿孔。钛管外壁损伤分布呈现出明显的规律性，相邻损伤的间隔基本上是 167mm 或 167mm 的倍数，该数值大小与相邻折流圈之间的间隔大小吻合，仅个别数据存在偏差。且从损伤的外观来看，整体上损伤形状较为规则，磨损面较为平整，如图 9 所示。

5 体镜检查

宏观检查之后，另对送检钛管损伤部位进行了体视显微镜检查，观察钛管外表面损伤位置处的微观形貌，如图 10 所示。经体镜检查后发现，送检钛管外表面有多处近似椭圆状或点状损伤，其中 SRI101RF 送检样上 101RF-35(6) 处损伤最为严重，损伤深度约为 332 μm；SRI201RF 送检样上损伤最严重位置为 201RF-6 (12) 处，已经穿孔。

经过体镜及宏观检查统计得出，送检钛管的 48 处损伤中，共有 47

处为环向（垂直钛管）损伤，仅一处为轴向（沿钛管方向）损伤。

6 电镜分析

为进一步明确钛管表面损伤的性质，对送检钛管部分损伤部位进行了扫描电镜微观形貌分析，分析仪器为 TESCAN VEGA TS5136XM 扫描电子显微镜，微观形貌如图 11、12 所示，图中附上了不同区域及不同放大倍数的下扫描电镜形貌图。

观察扫描电镜结果可以看出，送检钛管损伤表面具有清晰的窄而浅的沟槽和明显的挤压变形特征。同时，沟槽还呈现出显著的方向性：电镜所观察的损伤中，除 101RF-35(6) 处损伤呈轴向（沿钛管方向）分布外，其余各处损伤均呈环向分布，该结果与体镜及宏观检查结果吻合。

7 能谱分析

为明确钛管表面损伤处垢区的成分组成，对 201RF-6(12) 处损伤表面的垢区进行能谱微区分析，结果如图 13 所示。从能谱分析谱线中可知，垢区成分以 Fe 及 O 元素为主，二者占比远高于其它元素，因此可以判断损伤处垢区主要成分为铁的氧化物。

8 结语

通过对送检钛管表面损伤处进行宏观检查和测量、体镜观察、扫描电镜和能谱分析后，结论如下：

（1）钛管表面损伤多呈椭圆状或点状，形状较为规整。其中，SRI101RF-35(6)

损伤处的管壁减薄约 332 μm，SRI201RF-6(12) 损伤处

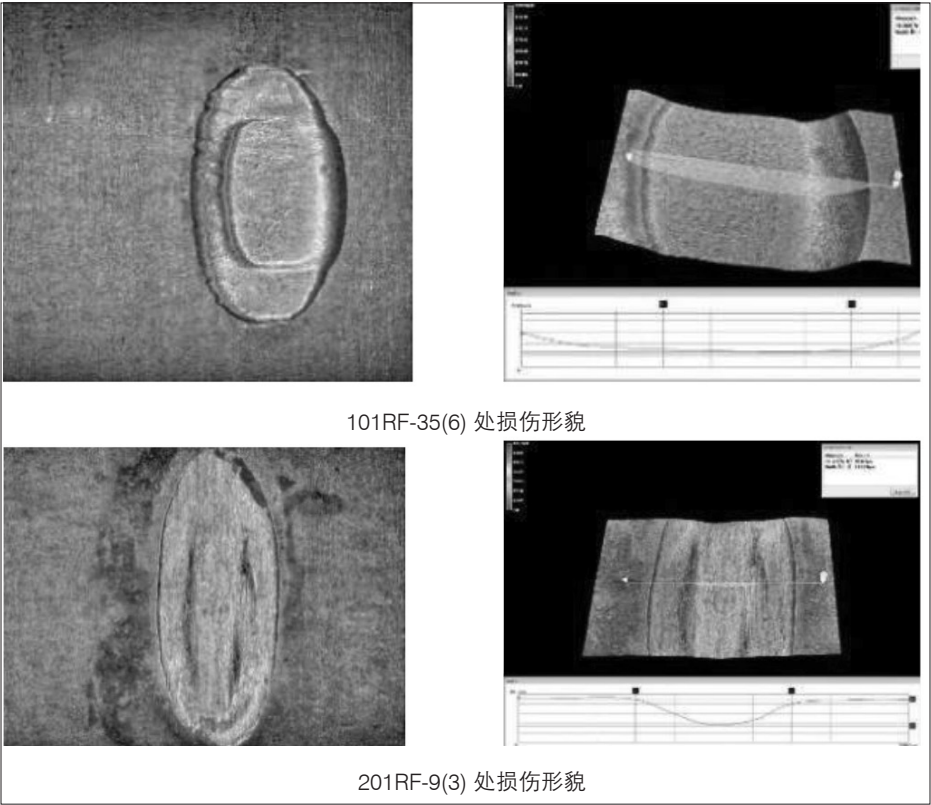


图 10 钛管损伤处体镜检查图像

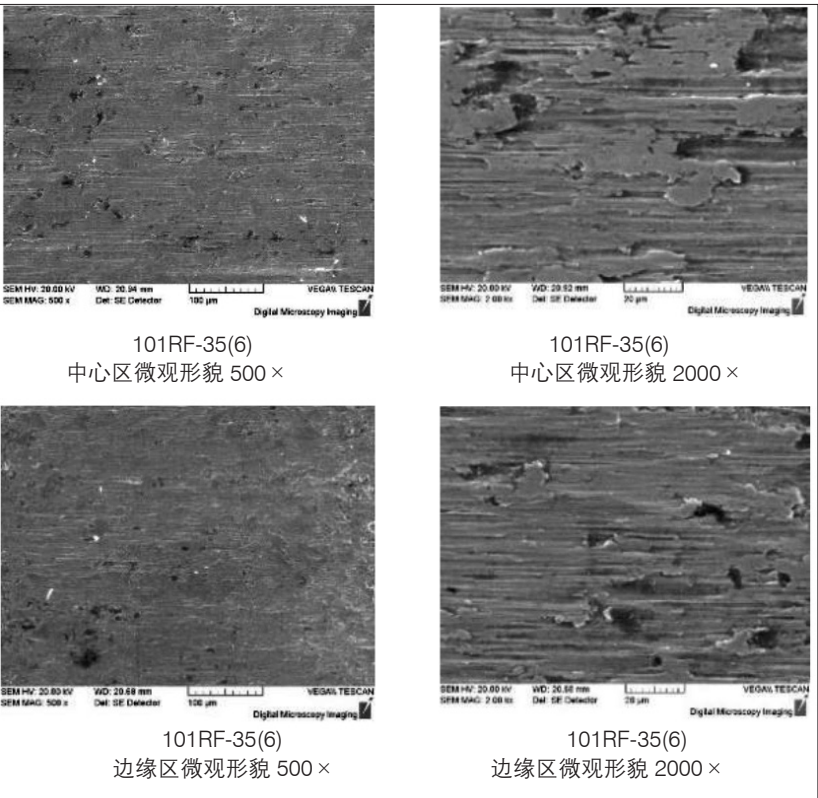


图 11 钛管 101RF 损伤部位扫描电镜结果

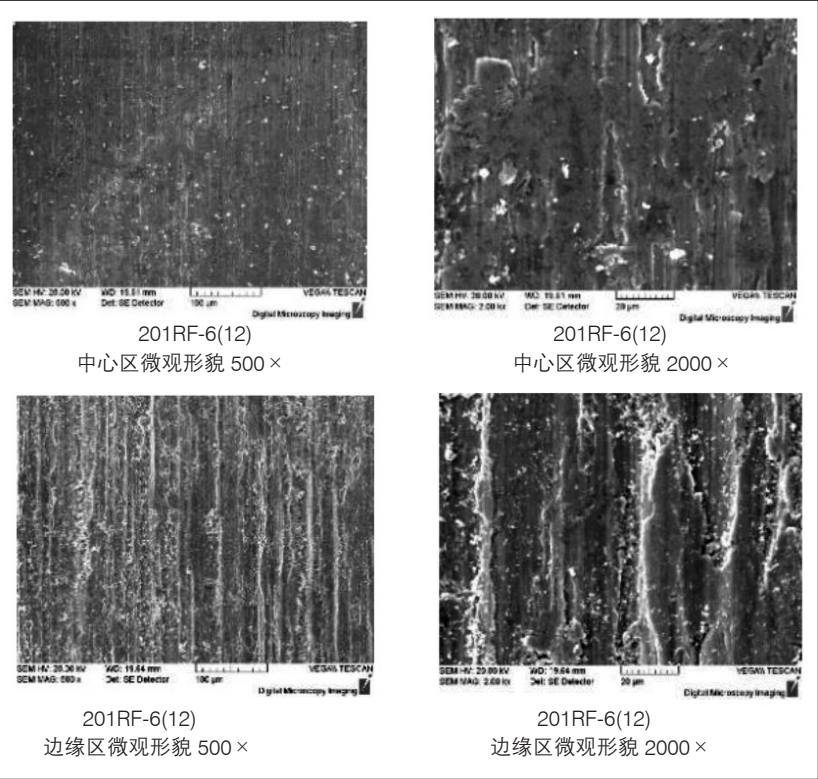


图 12 钛管 201RF 损伤部位扫描电镜结果

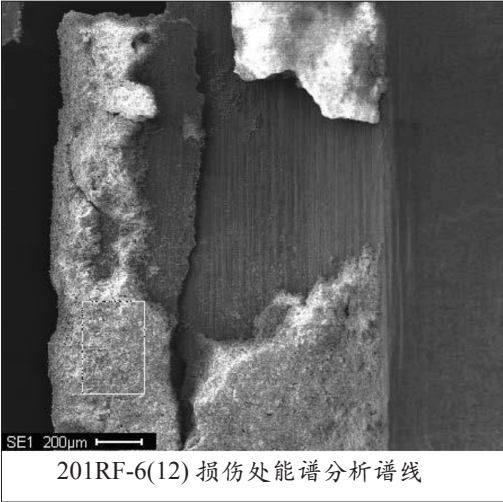


图 13 201RF-6(12) 处损伤垢区能谱分析

已经穿孔。

(2) 损伤部位在钛管上的分布具有较为明显的规律性：相邻损伤的间距基本上是 167mm 或 167mm 的倍数，个别数据存在偏差。

(3) 损伤处垢的主要成分是铁的氧化物。

(4) 钛管表面损伤属于磨损缺陷，是钛管与对应位置部件间相互摩擦造成的。

参考文献：

[1] 周洋, 孔琼, 王敏, 华学明, 牟刚. 钛及钛合金焊接接头腐蚀性能研究现状 [J]. 电焊机, 2018, 48(07): 46-50+75.

[2] 旷仲和. 电厂闭式冷却水系统板式换热器与管式换热器比较及选型优化 [J]. 电力建设, 2008, 4(08): 77-80.

[3] 林文珠, 曹嘉豪, 方晓明, 张正国. 管壳式换热器强化传热研究进展 [J]. 化工进展, 2018, 37(04): 1276-1286.

[4] 王战辉, 马向荣, 范晓勇, 高勇. 折流板对管壳式换热器内部流场影响的分析 [J]. 能源化工, 2018, 39(05): 77-81.

[5] 刘桂荣. 钛管折流杆换热器的设计与制造 [J]. 电站辅机, 2014, 35(01): 6-9+14.