

余热锅炉炉管焊接接头裂纹成因分析

潘贤魁

福建福海创石油化工有限公司

摘要：余热锅炉炉管在服役过程中于焊接接头部位发生开裂，通过宏观检查、无损检测（PT）、断口宏观形貌与微观形貌观察、腐蚀产物成分能谱分析（EDS）、金相组织检验、化学成分分析等方法分析了炉管焊接接头裂纹的形成原因。结果表明：炉管的失效机理为连多硫酸应力腐蚀开裂。焊接过程中热影响区部分区域的晶界存在 $Cr_{23}C_6$ 碳化物析出现象，该炉管外部为含硫烟气，易在管外壁形成硫化物结垢，炉管经历多次开关机，温度降低时硫化物与湿润空气接触反应生成硫酸，引起敏化的高应力区形成晶间型应力腐蚀裂纹。

关键词：奥氏体不锈钢；炉管；敏化；连多硫酸应力腐蚀开裂

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.14.037

引言

石油化工设备运行中的主要失效因素包括介质和工艺因素、设备部件原材料的质量问题、加工制造质量问题等。对设备失效的原因进行准确的分析可以指导设备制造方或使用方做出相应的改进，对减少事故发生和停产损失具有重要意义^[1]。奥氏体不锈钢材料因其良好的耐腐蚀性能和力学性能在石油化工设备中得到广泛应用，但其在应用过程中也面临易发生应力腐蚀开裂、点腐蚀、晶间腐蚀等失效风险^[2-6]。

硫磺回收装置余热锅炉炉管对接接头熔合线附近出现裂纹并引起炉管内介质泄漏。炉管材质为347SS，服役温度450℃，炉管外介质为高温烟气，炉管内为蒸汽。从炉管上泄漏部位截取试样，研究了该不锈钢换热管中存在缺陷的种类和原因，并提出了相应建议。

表1 主要工艺参数

	炉管内部	炉管外部
介质	蒸气	烟气
温度/℃	259	450
炉管材质	347SS	

一、理化检验及结果

（一）宏观分析

如图1所示，裂纹分布于焊缝附近并与焊缝平行，呈直线形，裂纹外壁侧长度为21mm，内壁侧长度为19mm，管外壁局部附着有黄色垢物，管壁各部位厚度均匀，开裂部位及其余表面未见腐蚀坑等其他损伤。



图1 裂纹周围的宏观形貌：（1）外壁侧（2）内壁侧

（二）无损检测

依据NB/T 47013.5《承压设备无损检测 第5部分：渗透检测》标准，对图1所示裂纹区域之外的焊接接头外壁表面进行渗透检测。如图2所示，焊缝熔合线附近多处存在裂纹，裂纹沿熔合线方向分布，其他未见超标显示。PT结果表明裂纹沿焊缝两侧热影响分布，且在环向各个方位上均形成裂纹，但裂纹的扩展深度各异。

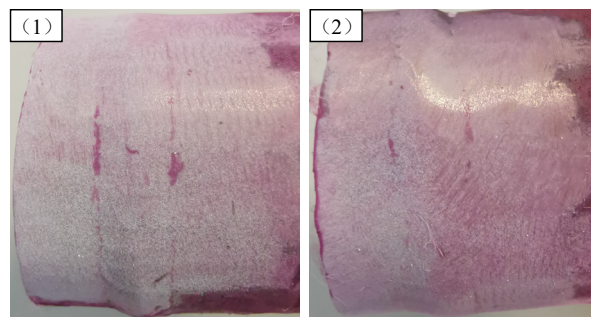


图2 渗透检测结果：（1）一侧（2）另一侧

表2 炉管化学成分分析结果（质量分数%）

元素	C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Nb
测试值	0.046	<0.005	0.022	0.41	1.50	17.46	9.59	0.54
标准值	0.04-0.08	0.030	0.035	1.00	2.00	17.00-19.00	9.00-12.00	8C-1.10

(三) 化学成分分析

从母材上取化学成分检测试样，依据GB/T 11170-2008《不锈钢 多元素含量的测定 火花放电原子发射光谱法（常规法）》对其进行化学成分分析，检测结果见表2，结果表明该炉管的化学成分满足标准GB 13296-2013对S34779材料的规定。

(四) 金相组织分析

由图3可见，裂纹位于焊接热影响区，且裂纹附近可见明显的晶间腐蚀和晶粒剥落，外壁侧裂纹附近的晶间腐蚀范围更大、晶粒剥落的数量更多，所以裂纹自外壁侧启裂。由图4可见炉管热影响区组织为奥氏体+晶内NbC析出相+晶界Cr₂₃C₆析出相，母材金相组织为奥氏体+晶内NbC析出相，由此可见焊接热影响区组织存在敏化现象，远离焊缝的母材区无明显敏化，裂纹和晶间腐蚀区位于敏化区内。

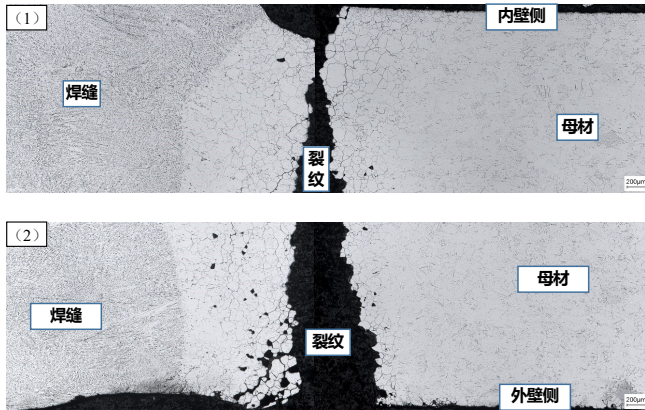


图3 焊缝（横截面）试样中裂纹附近的组织形貌（1）内壁侧（2）外壁侧

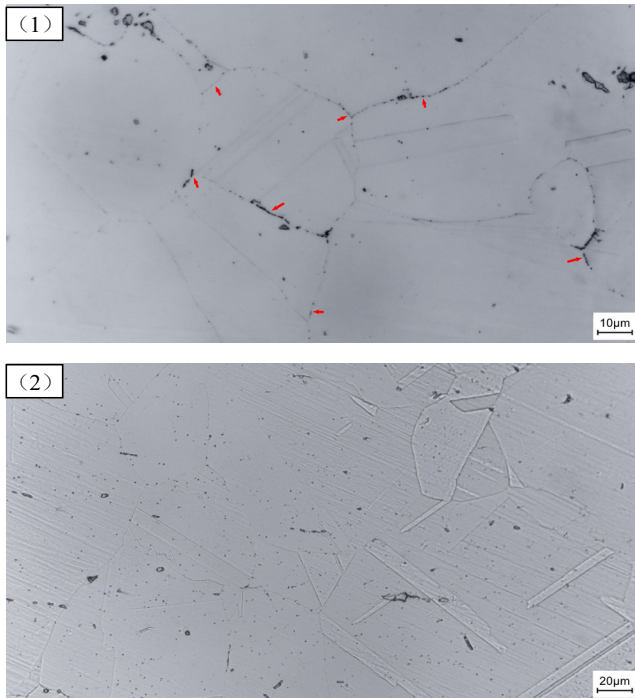


图4 金相组织形貌：（1）母材（2）热影响区

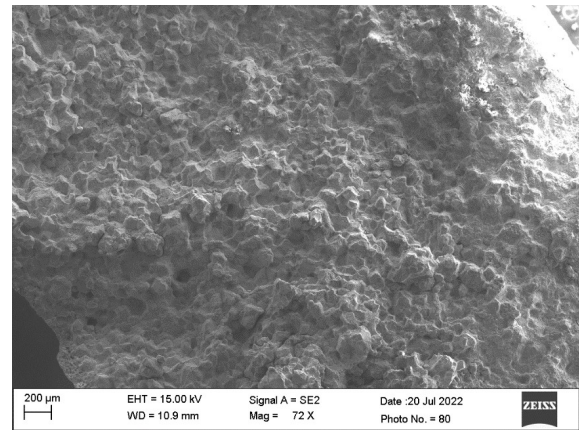
(五) 断口形貌分析

将裂纹打开，如图5所示，断口表面平齐，无明显的塑性变形，呈黑色或红褐色，具有脆性断裂断口特点。

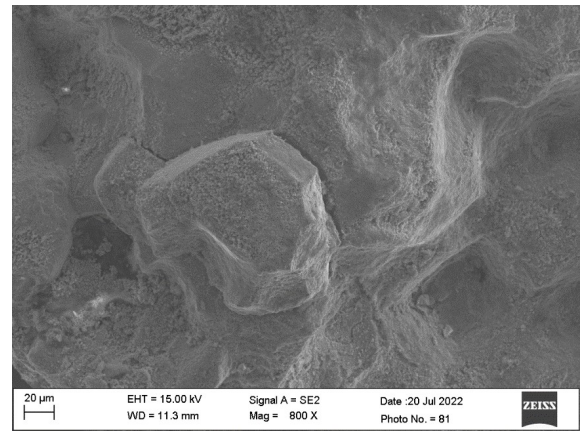


图5 断口表面宏观形貌

采用扫描电子显微镜（SEM）对裂纹断口的微观形貌进行了观察。由图9可见，断口表面呈“石状花样”，具有沿晶开裂断口特征，晶粒表面有大量附着物，且近外壁表面的附着物更多。



(1) 厚度方向的整体形貌



(2) 图（1）局部放大

图9 断口表面微观形貌

(六) 腐蚀产物EDS成分分析

通过X射线能谱仪（EDS）对断口表面的腐蚀产物进行微区成分分析，分析部位见图10，分析结果见表3，结果表明腐蚀产物主要由Fe、O、Cr、C、Ni、S、Si、Nb元素组成，其中的腐蚀性元素为S、O。

表3 EDS分析结果 (质量分数%)

位置	Fe	O	Ni	Cr	C	Si	S	Nb
断口表面的腐蚀产物	41.1	27.1	2.3	23.2	2.4	0.5	2.8	0.6

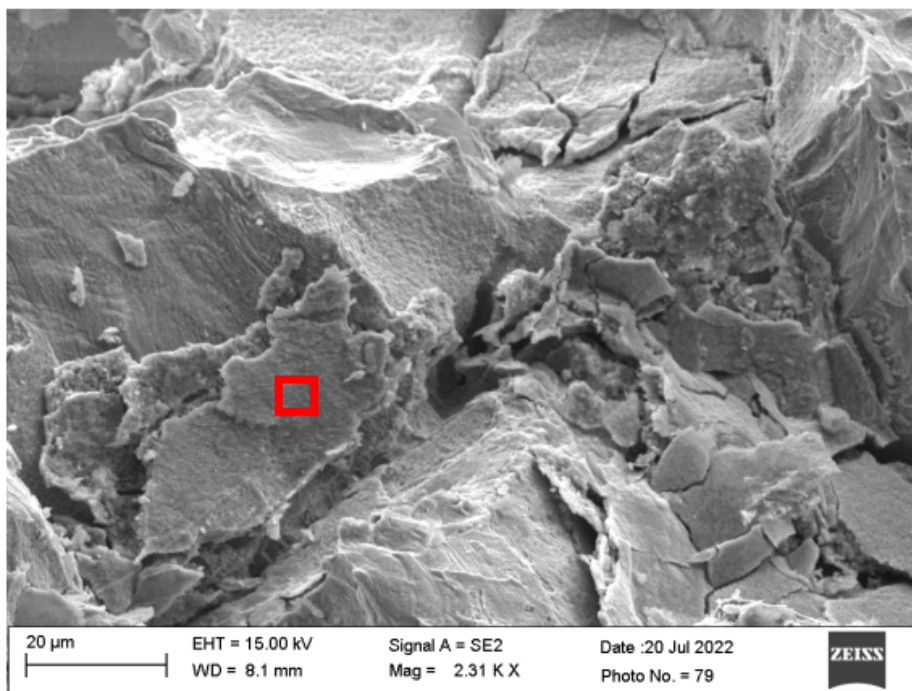


图10 EDS分析部位

二、失效原因分析

由上述理化检验结果可知：材料化学成分满足标准要求；母材金相组织为奥氏体+晶内NbC析出相，热影响区组织为奥氏体+晶内NbC析出相+晶界Cr₂₃C₆析出相，焊接热影响区组织存在敏化现象；裂纹位于焊接热影响区，自管外壁启裂，沿晶界扩展；裂纹较为平直，断口表面呈“石状花样”，具有沿晶开裂断口特征，晶粒表面有大量腐蚀产物；腐蚀产物中的腐蚀性元素为S、O。

失效炉管为奥氏体不锈钢，裂纹位于焊接热影响区，沿晶界扩展，开裂区域金相组织轻度敏化，裂纹内部充满腐蚀产物且腐蚀产物中的腐蚀性元素为S、O，以上现象具有连多硫酸应力腐蚀开裂的特征^[7]。裂纹自管外壁启裂，工况下该炉管外部为含硫烟气，易在管外壁形成硫化物结垢，炉管经历多次开关机，温度降低时硫化物与湿润空气接触反应生成硫酸^[8]，引起敏化的高应力区发生连多硫酸应力腐蚀开裂。

焊缝附近的热影响区存在明显的敏化区，热影响区的“敏化区”是指在焊接热循环作用下，金属被加热到易引起晶间腐蚀的敏化温度（理论上为450-850℃）并持续一定时间，导致铬碳化物于晶界析出的区域^[9]。敏化区的存在说明焊接过程中近缝母材在敏化温度区间内停留时间较长。

三、结论与建议

(1) 炉管的失效机理为连多硫酸应力腐蚀开裂。

(2) 焊接过程中应控制线能量，提高焊接熔池的冷却速度，降低敏化温度持续时间；

(3) 停工期间应采取保护措施，避免水冷凝和保持炉内干燥；或者停机后用碱性或纯碱溶液冲洗，中和形成的酸。

参考文献

- [1] 孙培洲. TP347厚壁不锈钢管道热处理及裂纹分析[J]. 化学工程与装备, 2016 (09): 175-177.
- [2] 罗志军, 董侠, 侯韶剑, 李采临. 加氢装置厚壁不锈钢管道选材及分析[J]. 炼油技术与工程, 2014, 44 (12): 37-41.
- [3] 戴真全. 347H奥氏体不锈钢的焊接热裂纹和再热裂纹[J]. 化工设备与管道, 2010, 47 (03): 54-58.
- [4] 李胜亭. 煤化工中TP347不锈钢厚壁临氢管道的焊接[J]. 内蒙古石油化工, 2011, 37 (14): 61-63.
- [5] 李雪梅. TP347不锈钢管道稳定化热处理再热裂纹初步研究[J]. 石油化工设备技术, 2022, 43 (01): 28-33+5.
- [6] 张骏, 郑准备, 杨占君, 孙兴新, 李梦阳, 张建伟. TP347H锅炉钢管失效机理研究进展[J]. 机械材料, 2021, 45 (02): 7-14.
- [7] 于成, 毕文军. 奥氏体不锈钢应力腐蚀与防护[J]. 化工设计通讯, 2018, 44 (02): 50.
- [8] 赵俊伟. 加氢装置大修期间避免连多硫酸腐蚀的措施[J]. 化工技术与开发, 2013, (9).
- [9] 张慧云, 孟宪明, 郑留伟, 梁伟. 敏化处理对不同状态304奥氏体不锈钢氢脆敏感性的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46 (08): 164-169.