

# 余热锅炉低温过热器 E3514 出口弯头开裂分析

张健<sup>1</sup> 王云<sup>2</sup>

(1.中国石化兰州石化榆林化工有限公司;2.兰州理工大学材料科学与工程学院)

**摘要** 尾气余热锅炉低温过热器 E3514 出口弯头发生开裂,检查发现弯头内侧发生开裂,出现了多处裂纹。通过对弯头开裂处进行检验检测,分析了弯头开裂的主要原因。结果表明:弯头处材料发生高温蠕变,生成的蠕变孔洞连接后形成裂纹,导致弯头最终发生开裂。

**关键词** 弯头 低温过热器 尾气余热锅炉 开裂 蠕变孔洞

**中图分类号** TQ055.8+1 **文献标识码** B **文章编号** 0254-6094(2021)01-0135-05

过热器出口管段钢类属于碳素钢,其弯头处极易发生开裂出现裂纹<sup>[1,2]</sup>。笔者通过对某石油化工厂尾气余热锅炉低温过热器出口开裂弯头内外壁取样,进行宏观检查、化学成分分析、力学性能分析、金相组织分析、断口分析和能谱分析,分析开裂原因,提出改进措施,保障尾气余热锅炉低温过热器的安全稳定运行。

## 1 基本情况

硫磺回收装置尾气余热锅炉低温过热器 E3514 出口弯头的主要参数如下:

设计温度 420℃  
操作温度 小于 420℃  
设计压力 4.5MPa  
操作压力 3.0MPa  
弯头材料 20G  
规格 DN200mm

工作介质 蒸汽

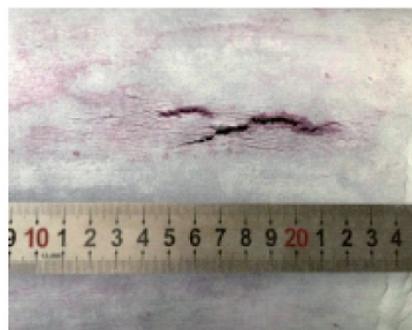
## 2 检验检测

### 2.1 宏观检查

弯头表面无金属光泽,覆盖有大量黑褐色的腐蚀产物,如图 1a 所示;将表面腐蚀产物去除后,进行 PT 检查,如图 1b 所示,可见内弯部位存在多条沿轴向扩展的裂纹,其中两条为穿透型裂纹,长度分别为 70mm 和 20mm;将弯头沿裂纹长度的 1/2 处径向剖开,可见内壁表面覆盖有褐色腐蚀产物,根据裂纹开口宽度可知,穿透裂纹由外壁向内壁扩展,如图 1c 所示,同时外壁存在大量的未穿透轴向微裂纹,如图 1d 所示;弯头背弯处内外表面 PT 检测均未见裂纹。宏观检查结果表明,弯头内弯部位存在多条沿轴向扩展的裂纹,通过贯穿裂纹的开口宽度判断,裂纹由外壁向内壁扩展。



a. 样品宏观形貌



b. 内弯外壁裂纹形貌

**作者简介:**张健(1976-),工程师,从事设备管理工作,zhangjian5@petrochina.com.cn。



c. 横向裂纹位置

d. 裂纹宏观形貌

图 1 裂纹位置及形貌

## 2.2 化学成分分析

对弯头进行光谱分析,结果见表 1,可以看出

弯头材料的化学成分符合 GB/T 5310—2017 对 20G 材料的要求。

表 1 弯头材料的化学成分

%

元素	C	Si	Mn	P	S
检测均值	0.170	0.289	0.54	0.025	0.010
标准值	0.170~0.230	0.170~0.370	0.35~0.65	≤0.025	≤0.015

## 2.3 力学性能分析

从弯头内弯处取样进行室温拉伸试验,结果见表 2,可以看出,弯头的抗拉强度、屈服强度均不符合 GB/T 5310—2017 对 20G 材料的要求,强

度降低,抵抗压力的能力减弱;样品内弯近外壁区、心部和近内壁区 3 个部位的维氏硬度实测值低于 GB/T 5310—2017 对 20G 材料的要求,尤其近外壁区、心部的硬度,降低得更为严重。

表 2 弯头材料的力学性能

项目	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%	维氏硬度 HV
检测值	350	242	30	68,58,94
标准值	410~550	≥245	≥24	120~160

## 2.4 金相组织分析

从弯头开裂部位截取金相试样进行显微组织观察。位置 1 处(图 2a)的裂纹长度约为 7mm,实际金属厚度明显小于 1/2 壁厚。弯头外壁存在灰色氧化层,且存在多条由外壁向内壁扩展的裂纹,20G 正火态正常组织为铁素体+珠光体,弯头金相组织为铁素体,整个截面铁素体晶界处存在大量黑色孔洞,材质发生严重劣化,如图 2b 所示。

轴向截面显微组织形貌如图 3 所示,可见该截面组织为铁素体,整个截面存在大量微裂纹和黑色孔洞,其中近外壁区和心部较近内壁区严重。

## 2.5 断口分析及能谱分析

### 2.5.1 断口形貌分析

将裂纹尖端样品打开,得到如图 4a 所示的断口,裂纹断裂面呈黑色,灰色区域具有金属光泽,为人工打断区域。金相样品裂纹显微组织抛

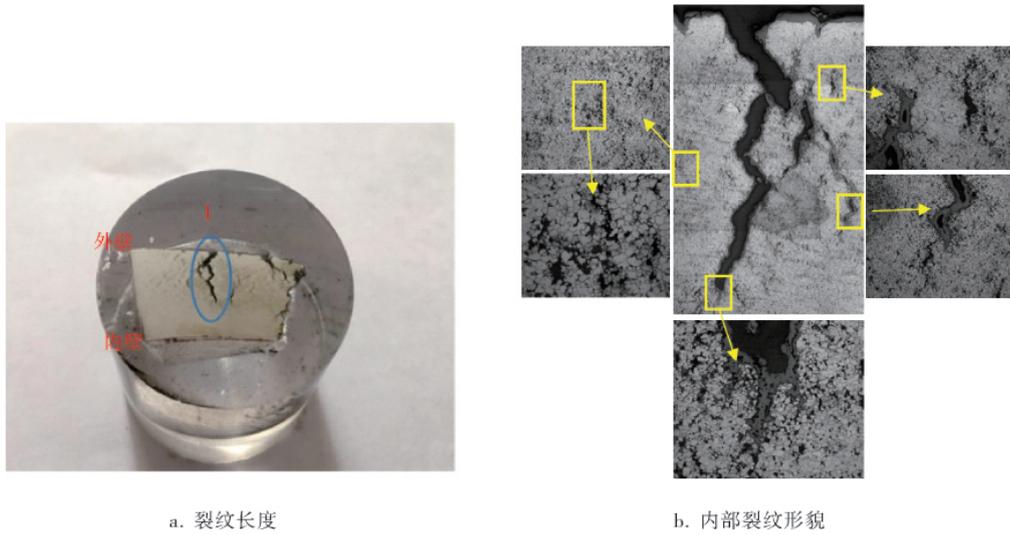


图 2 金相样品裂纹显微组织

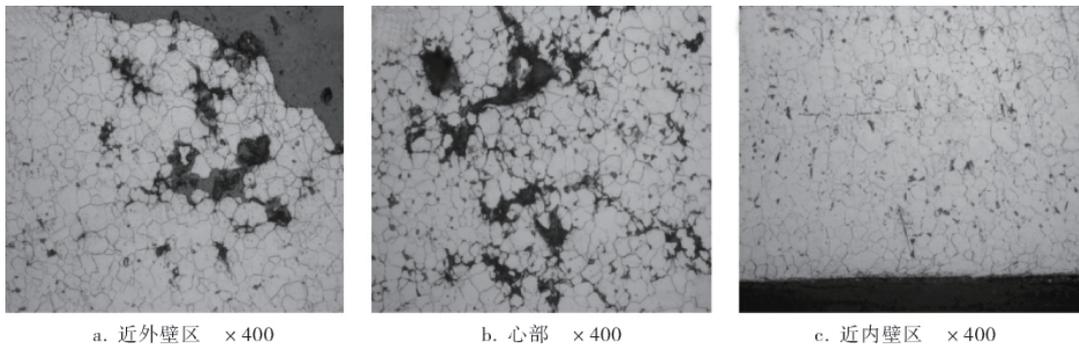


图 3 金相样品轴向截面显微组织

光态下进行扫描电镜形貌分析,可见整个截面存在大量黑色孔洞,与金相分析结果吻合(图 4b)。

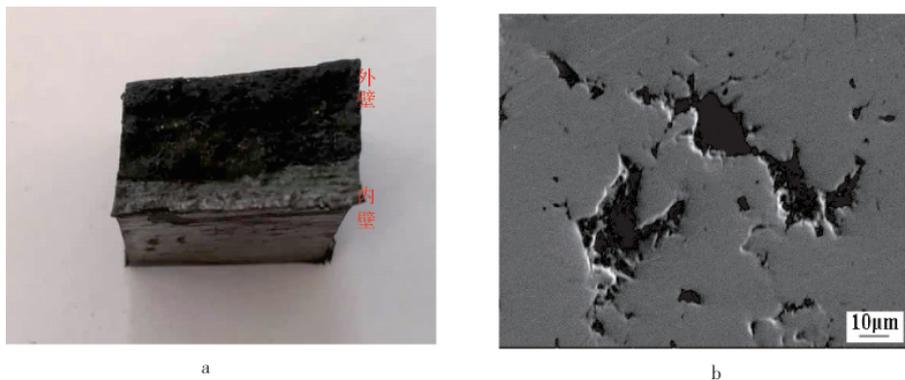
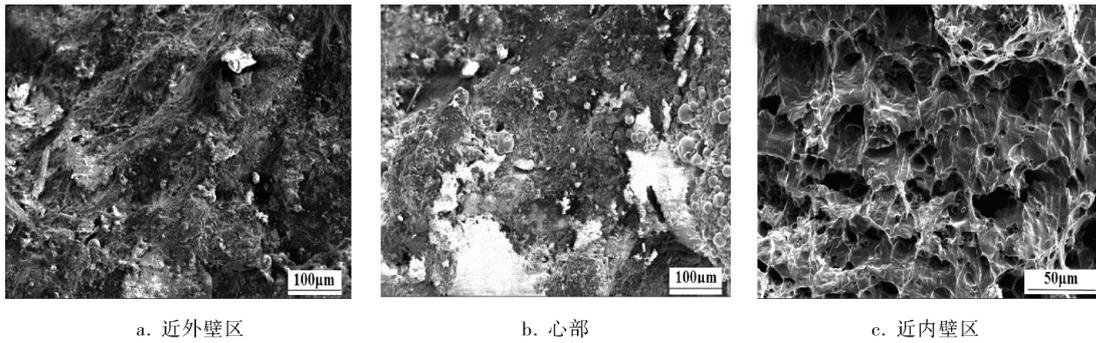


图 4 断口形貌及抛光态 SEM 形貌

图 5 为样品清洗前的断口形貌,近外壁区可见裂纹断裂面覆盖有大量的白色腐蚀产物,心部伴有球状氧化物,近内壁区的打断面呈现韧窝状

形貌,为塑性开裂的特点。清洗后的断口形貌如图 6 所示,可见整个晶界存在大量孔洞,并且断口中存在层状的珠光体断裂形貌。

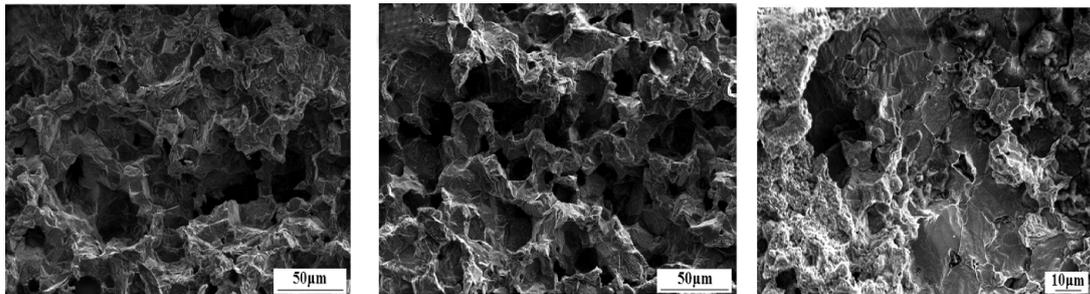


a. 近外壁区

b. 心部

c. 近内壁区

图 5 样品清洗前的断口形貌



a. 近外壁区

b. 心部

c. 近内壁区

图 6 样品清洗后的断口形貌

### 2.5.2 能谱分析

用 X 射线能谱仪对断口表面的腐蚀产物进行能谱分析,结果见表 3、图 7。由表 3 可以看出,

断口表面的腐蚀产物中伴有少量具有腐蚀性的 S、Cl 元素;由图 7 可以看出,腐蚀产物以氧化物为主。

表 3 元素含量表

wt%

元素	C K	O K	Na K	Al K	Si K	P K	S K	Cl K	K K	Ca K	Ti K	Mn K	Fe K
数值	2.63	31.08	1.31	0.46	0.72	0.40	0.19	0.08	2.83	0.44	0.84	0.62	58.40

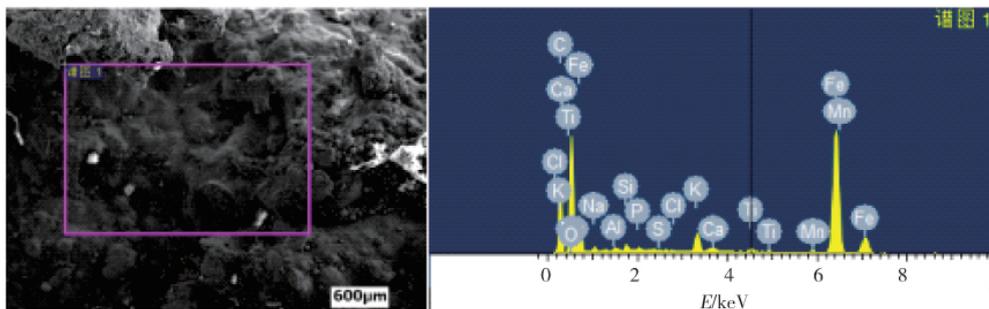


图 7 断口表面能谱分析

### 3 讨论与分析

从裂纹处断面扫描电镜分析可见,断口晶界处存在大量的孔洞,具有高温蠕变开裂的特征。根据 API 571—2011,20G 发生蠕变的阈值温度为 371℃,开裂弯头为余热锅炉出口第 1 个弯头,

在生产过程中,弯头在高于 371℃下长时间运行,材料发生高温蠕变,组织发生劣化,产生大量的蠕变孔洞,珠光体已经完全消失<sup>[3]</sup>。

抗拉强度不符合标准要求,已降至标准要求  
(下转第 142 页)

汽量为 7.56t, 附属配套设备总耗电功率为 165kW, 单釜运行平均用时为每批 2.5h。

单釜钛液降温结晶总耗费:

$$7.56 \times 150 + 165 \times 2.5 \times 0.75 = 1443.4 \text{ 元}$$

每吨钛白降温结晶耗费:

$$1443.4 \div 4.2 = 343.7 \text{ 元}$$

每吨钛白消耗标煤量:

$$(7.56 \times 1000 \times 0.1286 + 165 \times 2.5 \times 0.1229) \div 4.2 = 243.6 \text{ kg}$$

蒸汽冷凝新增二次污水量:

$$7.56 \div 4.2 = 1.8 \text{ m}^3/\text{t}$$

### 3.3.2 节能改造后

经测试, 节能改造后机械闪蒸降温结晶系统的单釜运行时间约 2h, 附属配套设备总功率为 125kW, 压缩机运行的平均耗电功率为 150kW, 压缩机运行时间约 1.5h。

单釜钛液降温结晶总耗费:

$$(150 \times 1.5 + 125 \times 2) \times 0.75 = 356.3 \text{ 元}$$

每吨钛白降温结晶耗费:

$$356.3 \div 4.2 = 84.8 \text{ 元}$$

每吨钛白消耗标煤量:

$$(150 \times 1.5 + 125 \times 2) \times 0.1229 \div 4.2 = 13.9 \text{ kg}$$

节能改造后, 每吨钛白降温结晶运行费用降低了 259.2 元, 运行费用节省了 75.3%; 每吨钛白降温结晶的标煤耗量减少了 229.7kg, 标煤节省率达 94.3%。单套系统年产能按 1 万吨钛白计, 节能改造后单套系统每年节省运行费用 259.2 万元, 每年减少二次污水 18 000m<sup>3</sup>。

## 4 结束语

近年来我国钛白粉产业发展迅猛, 但传统生

产工艺存在能耗高、污染大等问题, 随着环保问题的日益严峻, 探索节能环保型钛白生产工艺已成为钛白粉行业的重要课题。机械闪蒸式降温结晶技术为钛白粉行业提供了一种节能环保的钛液降温结晶新途径, 该技术以电力作为系统驱动能源, 这在环保压力逐步增大、蒸汽能源供应日趋紧张的环境下, 可使钛白粉生产企业摆脱蒸汽供应、蒸汽价格等问题的困扰。工程实践结果表明, 钛液机械闪蒸降温结晶技术具有运行能耗低、降温速率快、生产效率高及无二次水污染等优势, 在以钛白粉为代表的无机盐行业具有广阔的市场应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] 毕胜. 2018年中国钛白粉行业状况及发展[J]. 钢铁钒钛, 2018, 39(6): 1~4.
- [2] 宋志刚, 陈燕, 倪俊. 硫酸法钛白粉生产能耗分析与降耗对策[J]. 能源研究与利用, 2014, (2): 50~52.
- [3] 陈朝华, 刘长河. 钛白粉生产及应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [4] 王和庆, 乐清华, 徐菊美, 等. 溶析结晶法脱除钛白废酸中硫酸亚铁盐的研究[J]. 高校化学工程学报, 2015, 29(3): 697~702.
- [5] 张益都. 硫酸法钛白粉生产技术创新[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [6] 王岩, 陈建立. 硫酸法钛白粉真空结晶工序余热资源分析与利用[J]. 无机盐工业, 2014, 46(12): 47~49.
- [7] GB 32051—2015, 钛白粉单位产品能源消耗限额[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

(收稿日期: 2020-04-09, 修回日期: 2021-01-08)

(上接第138页)

下限的 80%; 材料硬度严重降低, 机械性能整体下降, 已无法满足现场工况的使用要求; 弯头内弯处存在加工应力, 运行过程中存在工作应力, 造成内弯部位是整个弯头的最薄弱区域。受介质压力的作用, 材料产生蠕变孔洞连接后形成裂纹, 导致弯头最终发生开裂。

## 4 结束语

余热锅炉低温过热器 E3514 出口弯头由于使用温度过高, 组织发生劣化, 产生大量蠕变孔洞, 最终导致开裂。后续相关人员可根据材料失

效原因, 制定针对性的解决措施, 以保证设备的长周期安全稳定运行。

### 参 考 文 献

- [1] 潘柏定, 高正良, 崔华松, 等. 印染机筒体接管部位开裂失效分析[J]. 化工机械, 2010, 37(3): 378~380.
- [2] 陈凯敏, 文超, 梁会雷. 轴承座开裂分析及预防措施[J]. 金属热处理, 2020, 45(4): 221~223.
- [3] 王强. 制氢装置转化炉炉管短节开裂原因分析[J]. 石油化工设备, 2016, 45(z1): 48~53.

(收稿日期: 2020-07-27, 修回日期: 2021-01-19)