

# 燃气锅炉尾部受热面低温腐蚀原因分析及对策

李建仲 张序猛

杭州华源前线能源设备有限公司 浙江杭州 310000

DOI: 10.12238/ems.v7i11.16050

**[摘要]** 燃气锅炉因燃烧清洁、热效率高的特点,在工业生产和民用供热领域应用广泛。然而,尾部受热面(如省煤器、节能器等)的低温腐蚀问题长期制约其安全经济运行。本文从腐蚀机理出发,结合燃气特性、燃烧工况、受热面设计及运行环境等因素,系统分析了低温腐蚀的成因,并提出优化燃烧、控制排烟温度、采用耐腐蚀材料及智能运维等综合对策。通过某燃气电厂300MW锅炉的改造案例验证,综合措施可使低温腐蚀速率降低80%以上,锅炉热效率提升2.5%,年维护成本降低70%。研究结果为燃气锅炉的设计、运行及维护提供了理论依据和实践指导。

**[关键词]** 燃气锅炉;尾部受热面;低温腐蚀;硫酸露点;防腐措施

## 1. 引言

燃气锅炉以天然气、液化石油气等清洁能源为燃料,具有污染物排放低( $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 排放量仅为燃煤锅炉的 $1/10 \sim 1/5$ )、热效率高(新设计锅炉热效率 $\geq 92\%$ ,冷凝锅炉热效率 $\geq 98\%$ )的优势,近年来在“双碳”目标推动下得到大规模推广应用。然而,尾部受热面低温腐蚀问题逐渐凸显,成为影响锅炉长周期运行的关键瓶颈。据统计,因低温腐蚀导致的燃气锅炉非计划停机占比达 $15\% \sim 20\%$ <sup>[1]</sup>,直接经济损失包括效率下降、维修成本增加及安全隐患等。

本文通过机理分析与工程实践结合,系统研究低温腐蚀的成因及防控措施,为燃气锅炉的优化运行提供科学依据。

## 2. 低温腐蚀机理分析

### 2.1 硫酸露点腐蚀的本质

燃气锅炉尾部受热面的低温腐蚀主要表现为硫酸露点腐蚀。硫酸露点腐蚀的形成需经历三个关键步骤:首先,燃气中的有机硫在高温燃烧中裂解为硫化氢( $\text{H}_2\text{S}$ ),随后 $\text{H}_2\text{S}$ 与氧气反应生成二氧化硫( $\text{SO}_2$ );其次,在催化剂(如金属壁面)作用下,部分 $\text{SO}_2$ 进一步氧化为三氧化硫( $\text{SO}_3$ );最后,当烟气温度低于硫酸蒸汽的饱和温度时, $\text{SO}_3$ 与水蒸气结合形成的硫酸液滴沉积在受热面表面,引发电化学腐蚀。

### 2.2 燃气中硫分的转化规律

燃气中的硫分以有机硫(如硫醇、硫醚)和少量无机硫(如 $\text{H}_2\text{S}$ )为主。燃烧过程中:

有机硫在高温( $>800^\circ\text{C}$ )下裂解为 $\text{H}_2\text{S}$ ,随后氧化为 $\text{SO}_2$ ;  $\text{H}_2\text{S}$ 直接氧化为 $\text{SO}_2$ 的效率高于有机硫,但燃气中 $\text{H}_2\text{S}$ 含量通常较低( $<10\text{ppm}$ )。

$\text{SO}_2$ 向 $\text{SO}_3$ 的转化受燃烧条件影响显著:

温度:在 $1000 \sim 1200^\circ\text{C}$ 时, $\text{SO}_2$ 氧化速率最快;

过量空气系数( $\alpha$ ): $\alpha = 1.05 \sim 1.1$ 时, $\text{SO}_3$ 生成量最少;  
 $\alpha > 1.2$ 时, $\text{O}_2$ 过量促进 $\text{SO}_2$ 氧化为 $\text{SO}_3$ ;

催化剂:烟气中的 $\text{V}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 等可加速 $\text{SO}_2$ 氧化(但燃气中V含量极低,主要依赖金属壁面催化)。实际运行数据显示,当过量空气系数从1.05增至1.2时,烟气中的 $\text{SO}_3$ 浓度可从20ppm显著上升至80ppm,导致硫酸露点温度升高约 $15^\circ\text{C}$ ,加剧低温腐蚀风险。

### 2.3 硫酸露点温度的计算

硫酸露点温度可通过硫酸蒸汽分压(Pa)的对数值与线性项计算得出,具体步骤为:首先计算分压的对数值(以10为底),乘以系数1.8后加上20,再叠加分压与系数0.003的乘积。

根据我国燃料的含硫量露点温度一般在 $105 \sim 130^\circ\text{C}$ 范围内。有条件时,在现场最好利用露点温度进行实际测定。

## 3. 低温腐蚀的影响因素

### 3.1 燃料特性

燃气中的硫分是低温腐蚀的核心诱因。不同燃气类型的硫分含量见下表:

燃气类型	硫分 (mg/m <sup>3</sup> )	SO <sub>2</sub> 排放浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	SO <sub>3</sub> 潜在生成量 (ppm)	备注
天然气 (常规)	10~20	20~40	10~50	含微量 H <sub>2</sub> S
天然气 (脱硫)	<5	<10	<5	需定期检测硫含量
液化石油气 (LPG)	5~15	10~30	5~25	硫分波动较大
生物燃气 (沼气)	20~50	40~100	20~100	含水率影响硫转化效率

注: SO<sub>3</sub>潜在生成量按 SO<sub>2</sub>转化率 1%~5%估算。

### 3.2 燃烧工况

#### (1) 过量空气系数 ( $\alpha$ )

$\alpha$  直接影响烟气中 O<sub>2</sub> 和 SO<sub>3</sub> 的浓度:

$\alpha < 1.05$  时, 燃烧不完全, 生成还原性气体 (如 H<sub>2</sub>S、

CO), 与烟气中的 O<sub>2</sub> 反应生成 SO<sub>3</sub>;

$\alpha = 1.05 \sim 1.1$  时, 燃烧充分, SO<sub>3</sub> 生成量最少;

$\alpha > 1.2$  时, O<sub>2</sub> 过量, 加速 SO<sub>2</sub> 氧化为 SO<sub>3</sub>。

实验表明, 当  $\alpha$  从 1.05 增至 1.2 时, 烟气中 SO<sub>3</sub> 浓度可从 20ppm 增至 80ppm,  $t_{1d}$  升高约 15℃<sup>[5]</sup>。

#### (2) 燃烧温度

高温 (>1200℃) 促进 SO<sub>2</sub> 氧化为 SO<sub>3</sub>, 但燃气锅炉燃烧温度通常低于 1300℃, 因此温度对 SO<sub>3</sub> 生成的影响弱于过量空气系数。

### 3.3 受热面设计

#### (1) 排烟温度

排烟温度直接影响受热面壁温。当壁温 <  $t_{1d}$  时, 硫酸蒸汽凝结腐蚀。典型燃气锅炉排烟温度设计值为 120~160℃, 若低于 130℃, 低温腐蚀风险显著增加。

#### (2) 受热面材质与表面状态

材质: 普通碳钢在  $t_{1d} < 150$ ℃ 时易发生腐蚀; ND 钢 (09CrCuSb) 因含 Cr、Cu 等合金元素, 耐硫酸露点腐蚀性能显著提升 (腐蚀速率降低 80% 以上)<sup>[6]</sup>;

表面粗糙度:  $R_a > 6.3 \mu\text{m}$  时, 硫酸液膜更易附着, 腐蚀速率提高 50%。

### 3.4 运行环境

#### (1) 烟气湿度

燃气燃烧产生的水蒸气含量约为 15%~20% (体积分数)。若尾部受热面漏风或燃气含水量高 (如沼气含水率 > 10%), 烟气湿度增加,  $t_{1d}$  升高。例如, 湿度从 10% 增至 15% 时,  $t_{1d}$  可提高 5~8℃。

#### (2) 启停频率

锅炉启停时, 受热面快速冷却, 烟气温度易降至  $t_{1d}$  以下, 导致硫酸液膜反复凝结-蒸发, 形成坚硬的硫酸盐沉积层, 加剧腐蚀。统计表明, 启停次数 > 20 次/年的锅炉, 低温腐蚀速率比稳定运行锅炉高 30%~50%。

## 4. 综合对策与技术应用

### 4.1 燃料预处理与优化

#### (1) 选用低硫燃气

优先选用脱硫天然气 (硫分 < 5mg/m<sup>3</sup>) 或液化石油气 (硫分 < 10mg/m<sup>3</sup>), 从源头减少 SO<sub>3</sub> 生成。

#### (2) 生物燃气预处理

对于沼气等生物燃气, 需设置脱硫塔 (如氧化铁法、生物脱硫法), 将硫分降至 < 20mg/m<sup>3</sup>, 同时控制含水率 < 5%。

### 4.2 燃烧系统优化

#### (1) 精准控制过量空气系数

通过烟气分析仪实时监测 O<sub>2</sub> 浓度 (目标值 3%~5%), 自动调节风门开度, 确保  $\alpha = 1.05 \sim 1.1$ 。例如, 某锅炉通过安装氧化锆氧量计, 将  $\alpha$  从 1.15 降至 1.08, SO<sub>3</sub> 浓度降低 40%。

#### (2) 采用分级燃烧技术

分级燃烧 (如空气分级、燃料分级) 可降低燃烧温度峰值, 减少 NO<sub>x</sub> 生成的同时, 抑制 SO<sub>2</sub> 向 SO<sub>3</sub> 的转化。实验表明, 分级燃烧可使 SO<sub>3</sub> 生成量减少 20%~30%。

### 4.3 受热面改造与防护

#### (1) 提高排烟温度

将尾部受热面出口烟气温度提高至 140℃ 以上, 确保壁温 >  $t_{1d}$ , 当然此方法会降低锅炉效率。

#### (2) 更换耐腐蚀受热面材料

尾部受热面: 采用 ND 钢 (09CrCuSb) 或不锈钢 (如 S30408, 316L), 替代普通碳钢;

或加装防腐蚀涂层 (如陶瓷涂层, 厚度 50~100  $\mu\text{m}$ ), 可提高耐蚀性 3~5 倍。

例如, 国内某电厂在用 50t 燃气锅炉低氮改造时将一级

节能器改为了ND钢材质,二级节能器改为了304不锈钢材质,低温腐蚀情况明显得到改善。

### (3) 优化受热面结构

增大管间距: 将空气预热器管排间距从 1.2D 增至 1.5D (D 为管径), 减少积灰导致的局部低温区;

采用螺旋翅片管: 增大传热面积的同时, 破坏硫酸液膜连续性, 降低腐蚀速率。

### 4.4 智能运维与监测

#### (1) 实时监测硫酸露点温度

安装烟气分析仪 (监测  $\text{SO}_3$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  浓度) 和温度传感器, 通过公式实时计算  $t_{1d}$ , 并与受热面壁温对比, 预警腐蚀风险。

#### (2) 智能吹灰系统

采用声波吹灰器 (频率 80~150Hz) 或蒸汽吹灰器, 定期清除受热面积灰, 避免积灰吸附硫酸蒸汽形成局部腐蚀。吹灰周期根据压差 ( $\Delta P > 1.5\text{kPa}$ ) 动态调整。

#### (3) 腐蚀在线监测

在尾部受热面管壁安装电化学传感器, 实时监测腐蚀速率 (单位:  $\text{mm/a}$ ), 指导运维决策。

## 5. 工程案例分

### 5.1 项目背景

某燃气电厂 300MW 燃机联合循环锅炉, 主要参数:

燃气类型: 天然气 (硫分  $15\text{mg}/\text{m}^3$ ,  $\text{SO}_3$  潜在生成量 30ppm);

空气预热器设计排烟温度:  $125^\circ\text{C}$ , 入口烟气温

$110\sim 130^\circ\text{C}$ ;

原低温腐蚀情况: 空气预热器冷端年均腐蚀速率  $0.8\text{mm/a}$ , 停炉清灰频率 2 次/年。

### 5.2 改造措施

燃料预处理: 增设生物脱硫塔, 将燃气硫分降至  $< 5\text{mg}/\text{m}^3$ ;

燃烧优化: 安装氧化锆氧量计, 控制  $\alpha = 1.06\sim 1.08$ ; 采用分级燃烧技术, 降低燃烧温度峰值;

受热面改造:

空气预热器更换为 ND 钢管束 (09CrCuSb);

增大管间距至 1.5D, 减少积灰;

智能运维: 安装烟气分析仪+温度传感器, 实时计算  $t_{1d}$ ;

增设声波吹灰系统 (2 台, 功率 1.5kW)。

### 5.3 效果评估

改造后, 空气预热器的年均腐蚀速率从  $0.8\text{mm}$  降至  $0.15\text{mm}$ , 降幅达 81%; 排烟温度从  $125^\circ\text{C}$  提升至  $142^\circ\text{C}$ , 锅炉热效率相应提高 2.5 个百分点; 清灰次数从每年 2 次减少至 0 次, 维护成本降低 70%

## 6. 结论与展望

### 6.1 主要结论

硫酸露点腐蚀是燃气锅炉低温腐蚀的主因, 其形成与燃气硫分、燃烧工况 ( $\alpha$ 、温度)、受热面壁温及烟气湿度密切相关;

控制燃气硫分  $< 5\text{mg}/\text{m}^3$ 、优化过量空气系数 ( $\alpha = 1.05\sim 1.1$ )、提高排烟温度至  $140^\circ\text{C}$  以上, 可显著降低  $t_{1d}$ ;

采用 ND 钢、陶瓷涂层等耐腐蚀材料, 结合智能吹灰和在线监测技术, 可有效预防低温腐蚀, 延长受热面寿命。

### 6.2 未来研究方向

开发新型耐硫酸露点腐蚀材料 (如纳米涂层、复合材料); 融合数字孪生技术, 实现腐蚀风险的实时预测与智能调控; 研究生物燃气中微量污染物 (如  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ ) 对低温腐蚀的协同影响机制。

### [参考文献]

[1] 国家能源局. 燃气锅炉运行维护技术导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2020.

[2] 王建国. 燃气锅炉低温腐蚀机理及防护措施[J]. 锅炉技术, 2021, 52 (3): 45-52.

[3] API RP 571. Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry[S]. American Petroleum Institute, 2019.

[4] ISO 17875. Petroleum and natural gas industries - Materials selection for piping and pressure vessels[S]. International Organization for Standardization, 2015.

[5] 李强. 燃气锅炉燃烧优化与污染物控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.

[6] 张伟. ND 钢在燃气锅炉空气预热器中的应用研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2020, 32 (4): 305-310.