

# 西门子SGT5-4000F(4)型燃气轮机排气温度偏差大原因分析及新的解决方案探索

Analysis And New Governance Measures for Over Temperature of Exhaust Diffuse of Siemens SGT5-4000F(4) Class Gas Turbine

★ 北京京能高安屯燃气热电有限责任公司 刘磊, 牛兴伟, 柳泓羽

**摘要:** 本文介绍了西门子SGT5-4000F(4)型燃气轮机排气温度跳机条件、冷热点特性分析、某电厂实际燃烧器堵塞及清洗历史, 介绍新的燃机燃烧器堵塞解决方案, 并对物理(掏孔)与化学(酸洗)数据进行对比分析。

**关键词:** 燃机; 冷热点特性; 燃烧器; 堵塞; 清理

**Abstract:** This paper introduces the tripping conditions of Siemens SGT5-4000F (4) gas turbine exhaust temperature, the analysis of cold and hot spot characteristics, the actual burner clogging and cleaning history of a power plant, introduces a new solution for burner clogging of gas turbine. The data of physical cleaning and chemical pickling were compared and analyzed.

**Key words:** Gas turbine; Cold and hot spot characteristics; Burners; Clogging; Clean

## 1 引言

西门子SGT5-4000F(4)型燃气轮机存在冷热点偏差大问题已久, 国内同类型电厂因冷热点偏差大, 跳机情况时有发生, 为了解决冷热点偏差, 西门子提出了柠檬酸酸洗工艺解决方案, 但多次柠檬酸酸洗会使旋流孔被洗大, 从而导致通流量变大、燃烧室加速度频繁波动、限负荷、 $\text{NO}_x$ 恶化等影响机组安全稳定运行现象, 严重时燃烧器报废。本文以西门子SGT5-4000F(4)型燃气轮机在某电厂实际运行及检修经验为例, 介绍了排气温度冷热点跳机条件、冷热点分析及特性, 对燃烧器堵塞提出了新的解决方案。预混燃烧器结构图如图1所示。

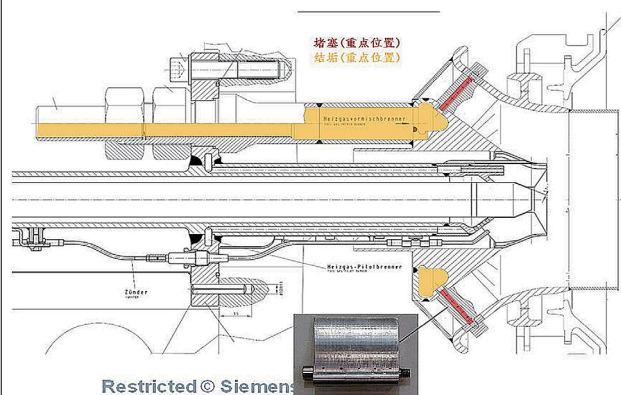


图1 预混燃烧器结构图

## 2 燃气轮机排气温度保护

### 2.1 排气温度保护作用

在燃气轮机正常运行时, 燃烧室及透平温度必须控制在一定范围内, 且保持均匀性, 但因燃烧器堵塞, 燃气在环形燃烧室燃烧会产生不均匀的温度场, 造成局部超温出现冷点, 叶片或陶瓷瓦块热应力不均匀。为了保护陶瓷瓦块及叶片不发生损坏, 延长陶瓷瓦块及叶片寿命, 设置排气温度冷热点保护。排气温度冷热点也是反映24只预混燃烧器堵塞程度的重要监测手段。燃机排气温度分散度玫瑰图如图2所示。

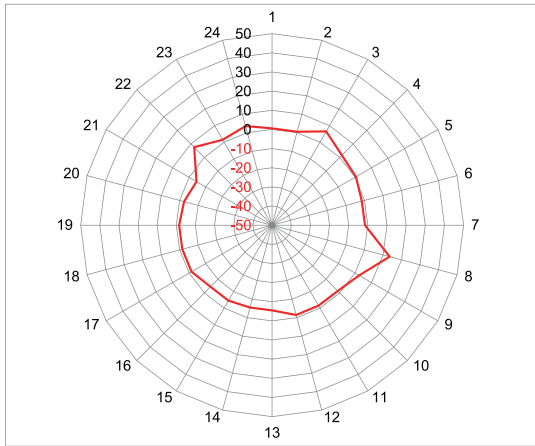


图2 燃机排气温度分散度玫瑰图

## 2.2 冷热点保护

- (1) 任意一只排气温度低于平均温度30℃，触发报警；
- (2) 任意连续三只排气温度低于平均温度50℃，触发停机顺控；
- (3) 任意四只连续冷点超过50℃，跳燃机；
- (4) 任意三只连续+相隔一只冷点超过50℃，跳燃机；
- (5) 任意一只排气温度高于平均温度30℃，触发报警；
- (6) 任意一只排气温度高于平均温度70℃（原始跳机值为50℃，后经西门子同意提高为70℃），跳燃机。

## 3 冷热点跳机情况及数据分析

某电厂在装两套西门子SGT5-4000(4)型燃气轮机，以实际运行经验为例。自2014年12月投入商业运行至2018年12月四年期间经历了两次排气温度热点超平均温度50℃跳机，跳机时间分别为2015年11月、2018年10月。就2015年11月跳机时数据进行分析，2015年11月7日，负荷120MW时排气热电偶“9”超平均温度50℃，触发跳机条件。因燃烧器堵塞，堵塞的局部区域会出现天然气减少，其中排气热电偶“17”出现冷点最低值-38℃，跳机时排气温度分布玫瑰图如图3所示。

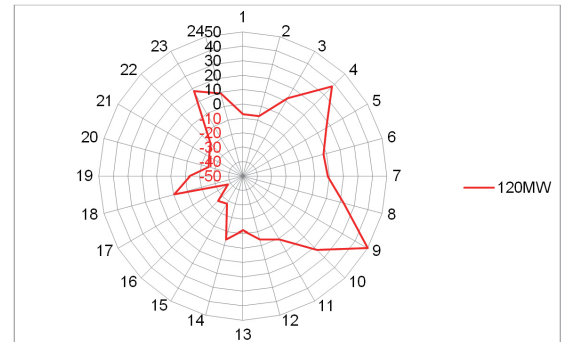


图3 跳机时排气温度分布玫瑰图

图4为跳机时冷热点分布数据，根据启机升负荷过程中不同负荷段24只排气温度冷热点数据情况，从80MW时开始出现冷热点报警，“3”、“8”出现热点，最高35.2℃。“15”出现冷点-30℃。从80MW一直持续到120MW负荷，120MW负荷时达到热点跳机值跳燃机。出现报警时间2015年11月7日07:03，跳燃机时间2015年11月7日07:53，此过程持续时间50min。

|    | 20MW  |        | 50MW  |        | 80MW  |        | 100MW |        | 120MW |        |
|----|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| 1  | 348.4 | 1.60   | 418.2 | -6.00  | 499.9 | -1.00  | 546.6 | -4.30  | 550.3 | -7.00  |
| 2  | 348.7 | 1.90   | 416   | -8.20  | 493.8 | -7.10  | 545   | -5.90  | 550.3 | -7.00  |
| 3  | 359.6 | 22.80  | 451.8 | 27.60  | 532.2 | 31.30  | 577.4 | 26.50  | 569.5 | 12.20  |
| 4  | 361   | 14.20  | 448.8 | 24.60  | 522.4 | 21.50  | 581.6 | 38.70  | 595   | 27.70  |
| 5  | 350   | 3.20   | 430.9 | 6.70   | 509.5 | 8.60   | 561.1 | 10.20  | 574.1 | 16.80  |
| 6  | 344.6 | -2.20  | 424.3 | 0.10   | 502.9 | 2.00   | 555.9 | 5.00   | 565.1 | 7.80   |
| 7  | 347.5 | 0.70   | 422.2 | -2.00  | 500.8 | -0.10  | 554.6 | 3.70   | 566.1 | 8.80   |
| 8  | 364.2 | 17.40  | 448.6 | 24.40  | 536.1 | 35.20  | 585.4 | 34.50  | 579.8 | 22.50  |
| 9  | 356.6 | 9.80   | 440   | 15.80  | 526.9 | 26.00  | 592.3 | 41.40  | 607.3 | 50.00  |
| 10 | 346.9 | 0.10   | 425.9 | 1.70   | 503.8 | 2.90   | 558.4 | 7.50   | 579.8 | 22.50  |
| 11 | 348.6 | 1.80   | 421.9 | -2.30  | 493.7 | -7.20  | 541.9 | -9.00  | 558.3 | 1.00   |
| 12 | 349.2 | 2.40   | 420.4 | -3.80  | 490.5 | -10.40 | 537.8 | -13.10 | 552.8 | -4.50  |
| 13 | 327.6 | -19.20 | 413.1 | -11.10 | 511   | 10.10  | 561.4 | 10.50  | 545   | -12.30 |
| 14 | 331   | -15.80 | 401.2 | -23.00 | 472.2 | -28.70 | 531.7 | -19.20 | 552.9 | -4.40  |
| 15 | 333   | -13.80 | 399.9 | -24.30 | 470.9 | -30.00 | 512.9 | -38.00 | 529.6 | -27.70 |
| 16 | 334.1 | -12.70 | 399.4 | -24.80 | 474   | -26.90 | 516.9 | -34.00 | 531.7 | -25.60 |
| 17 | 335.2 | -11.60 | 405.1 | -19.10 | 474.2 | -26.70 | 514.4 | -36.50 | 519.1 | -38.20 |
| 18 | 350.2 | 3.40   | 421.4 | -2.80  | 488.9 | -12.00 | 545.4 | -5.50  | 556.7 | -0.60  |
| 19 | 341.3 | -5.50  | 424.3 | 0.10   | 497.3 | -3.60  | 541.1 | -9.80  | 544.3 | -13.00 |
| 20 | 336.9 | -9.90  | 425.7 | 1.50   | 490.1 | -10.80 | 529.5 | -21.40 | 532   | -25.30 |
| 21 | 332.1 | -14.70 | 416.6 | -7.60  | 482.8 | -18.10 | 526.3 | -24.60 | 534.2 | -23.10 |
| 22 | 361.3 | 14.50  | 440.5 | 16.30  | 520.1 | 19.20  | 570.4 | 19.50  | 539.3 | -18.00 |
| 23 | 351.5 | 4.70   | 436.9 | 12.70  | 518.3 | 17.40  | 572.4 | 21.50  | 575.2 | 17.90  |
| 24 | 354.4 | 7.60   | 427.4 | 3.20   | 508.9 | 8.00   | 560   | 9.10   | 566.7 | 9.40   |
| 平均 | 346.8 |        | 424.2 |        | 500.9 |        | 550.9 |        | 557.3 |        |

图4 跳机时冷热点分布数据

## 4 燃气轮机冷热点特性

为了分析燃机排气温度冷热点，判断燃烧器堵塞情况，首先需要了解燃机排气温度热电偶布置情况及燃烧器未发生堵塞时的排气温度分布情况。

图5为排气温度热电偶与排气扩散器支撑布置情况，燃气轮机顺时针旋转（面向燃机方向），24只热电偶均匀分布在排气扩散器支撑的后部，不难看出，1、2、6、7、11、12、15、16、17、20、21处于旋转方向的“背风区域”，而3、4、5、8、9、10、13、14、

18、19、22、23、24处于旋转方向的“迎风区域”。排气扩散器支撑类似五角星形，将“背风面”排气温度热电偶冷点区域分割为五个背风区域。低负荷段冷点易出现在背风区域，而热点易出现在迎风区域。

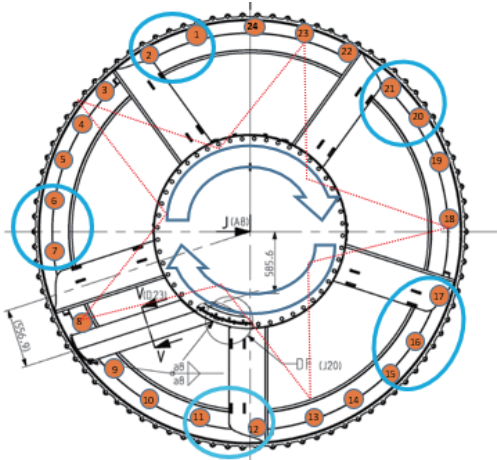


图5 燃机排气温度热电偶布置图（面向燃机方向）

燃机燃烧器在未发生堵塞情况下，燃机负荷在80MW~170MW负荷段，排气温度冷热点分布受排气扩散器支撑影响呈现五角星形状。随着负荷的增长五角星冷热点逐渐缩小且顺时针旋转一小角度，如图6所示。

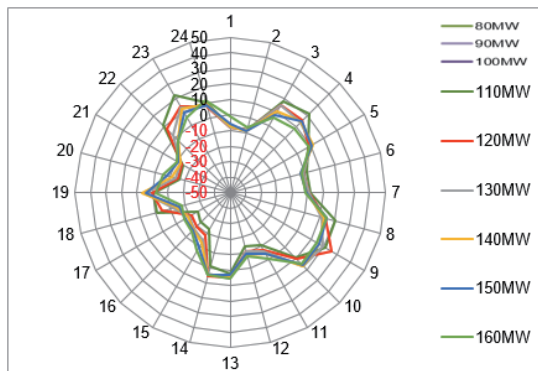


图6 燃机排气温度玫瑰图（燃烧器未发生堵塞，负荷80MW~170MW）

燃机负荷180MW时，排气温度分散度变为有一个冷点区域缺口的不规则圆形。180MW~293MW涨负荷过程中，冷点缺口从17点逐渐转移至21点，反映了温度场存在顺时针旋转现象（面向排气方向），转移顺序为17→18→19→20→21。如图7所示。

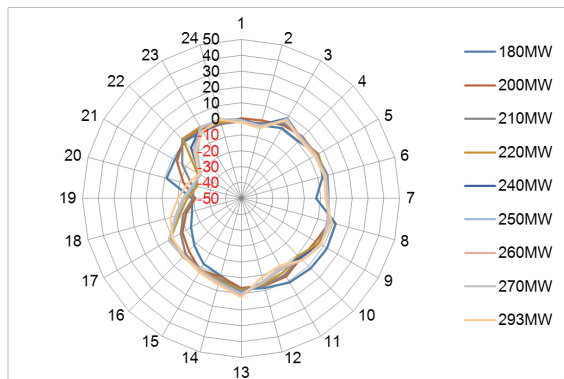


图7 燃机排气温度玫瑰图（燃烧器未发生堵塞，负荷180MW~293MW）

因热点跳机值已从50℃调整为70℃，定值调整后随着燃烧器堵塞越来越严重，未出现跳机情况（最高超温点从未达到70℃），结合冷热点数据分析经验及冷热点特性，总结出以下结论：受排气扩散器支撑影响，起初冷热点报警易出现在80MW~120MW冷热点五角星形较为明显负荷段，此负荷段易发生在机组启动及停机阶段，冷热点报警持续时间较短，一般为几秒至几分钟，负荷高于120MW冷热点报警消失。随着燃烧器堵塞愈加严重，冷热点报警逐渐出现在120MW~180MW负荷段（冷热点特性显示此负荷段仍为五角星形且逐渐缩小），报警持续时间持续数小时。以上经验可以分析判断燃烧器堵塞严重程度。

## 5 燃烧器堵塞前数据、酸洗前后数据介绍

以西门子SGT5-4000F(4)型燃机为例，某电厂2号燃机2016年3月累计运行9910EOH，因燃烧器堵塞进行了首次柠檬酸酸洗。2019年4月1日，2号燃机累计运行31930EOH，与首次燃烧器清洗间隔22020EOH。下文对第二次燃烧器堵塞前冷热点数据、酸洗前后流量测试、孔探检查进行介绍。

### 5.1 冷热点数据分析

图8为某电厂2019年4月1日，2号燃机累计运行EOH为31930，与2号燃机燃烧器首次燃烧器清洗间隔22020EOH的燃烧器冷热点报警数据。此数据反映了堵塞严重时，冷热点报警跨度从100MW~180MW持续报

警，且冷点为7、11、12，此三只排气热电偶布置在排气扩散器支撑背风区；热点为9、18、19、22、23，此五只热电偶布置在排气扩散器支撑迎风区域，符和以上分析和判断。

|    | 20MW | 60MW | 90MW | 90MW | 100MW | 110MW | 120MW | 125MW | 130MW | 140MW | 150MW | 160MW | 170MW | 180MW | 190MW | 210MW | 230MW | 240MW |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1  | 3813 | 240  | 4825 | 135  | 5811  | 438   | 337   | 332   | 3821  | 1625  | 5518  | 1454  | 5542  | 1529  | 5824  | 527   | 369   | 3847  | 439  | 5111 | 411  | 3753 | 130  | 3843 | 1132 | 5811 | 1732 | 5827 | 1625 | 3824 | 1530 | 3878 | 1629 | 5811 | 1638 |      |      |      |      |
| 2  | 3845 | 122  | 4815 | 535  | 5818  | 838   | 332   | 332   | 3821  | 1625  | 5518  | 1454  | 5542  | 1529  | 5824  | 527   | 369   | 3847  | 439  | 5111 | 411  | 3753 | 130  | 3843 | 1132 | 5811 | 1732 | 5827 | 1625 | 3824 | 1530 | 3878 | 1629 | 5811 | 1638 |      |      |      |      |
| 3  | 3574 | 187  | 4815 | 535  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 4  | 3945 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 5  | 3223 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 6  | 3487 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 7  | 3487 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 8  | 3487 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 9  | 359  | 127  | 4854 | 485  | 5814  | 321   | 5483  | 788   | 5925  | 217   | 5887  | 4237  | 6127  | 6231  | 6163  | 6259  | 6469  | 6271  | 5721 | 341  | 3574 | 1149 | 5724 | 119  | 5724 | 730  | 5813 | 332  | 5912 | 112  | 5716 | 185  | 5814 | 340  | 5888 | 419  | 5828 | 335  |      |
| 10 | 3485 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 11 | 3484 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 12 | 3484 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 13 | 374  | 194  | 4813 | 465  | 5815  | 416   | 5715  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 14 | 3823 | 335  | 4724 | 425  | 5714  | 1132  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 15 | 3544 | 427  | 4814 | 435  | 5814  | 438   | 5817  | 438   | 5817  | 438   | 5817  | 438   | 5817  | 438   | 5817  | 438   | 5817  | 438   | 5817 | 438  | 5817 | 438  | 5817 | 438  | 5817 | 438  | 5817 | 438  | 5817 | 438  | 5817 | 438  | 5817 | 438  | 5817 | 438  | 5817 | 438  | 5817 |
| 16 | 359  | 127  | 4854 | 485  | 5814  | 321   | 5483  | 788   | 5925  | 217   | 5887  | 4237  | 6127  | 6231  | 6163  | 6259  | 6469  | 6271  | 5721 | 341  | 3574 | 1149 | 5724 | 119  | 5724 | 730  | 5813 | 332  | 5912 | 112  | 5716 | 185  | 5814 | 340  | 5888 | 419  | 5828 | 335  |      |
| 17 | 3554 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 18 | 3484 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 19 | 3484 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 20 | 3484 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 21 | 3484 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 22 | 3484 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 23 | 3484 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 24 | 3484 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 25 | 3484 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 26 | 3484 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 27 | 3484 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 28 | 3484 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 29 | 3484 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |
| 30 | 3484 | 437  | 4815 | 435  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822  | 1632  | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 | 5822 | 1632 |      |

图8 燃烧器堵塞严重时冷热点报警数据

5.2 流量测试分析

5.2.1 燃烧器堵塞流量测试分析

预混燃烧器原始通流量测试为 $\alpha A=2.39\text{cm}^2$ ，图9为2019年4月20日2号燃机预混燃烧器流量测试偏差分布柱形图，根据数据分析，堵塞严重的分别为9、12、16号燃烧器，其中燃烧器通流量 $\alpha A_9=1.414\text{cm}^2$ ， $\alpha A_{12}=1.314\text{cm}^2$ ， $\alpha A_{16}=1.7$



此时2号燃机进行第二次柠檬酸酸洗，与首次酸洗间隔22020EOH，酸洗后平均通流量进一步扩大为2.567cm<sup>2</sup>，冷热点消除。

与2号燃机有所区分，2019年4月利用春季检修，1号燃机首先通过冷热点分析对冷点区域的11、12、13号燃烧器单独进行柠檬酸酸洗，酸洗后6月机组启动冷热点消失，但7月后又出现冷热点报警，效果不理想。通过数据分析，利用9月秋季检修时间对24只燃烧器采用物理掏孔清理，物体掏孔代替西门子柠檬酸酸洗为国内首次尝试与探索，后经证实物理掏孔清理后效果明显，长期未发生冷热点报警，且通流量未发生变化仍为2.427cm<sup>2</sup>。如表1所示。

表1 预混燃烧器堵塞及处理历史数据表

| 2号燃机    |                          |                                     |   |   |
|---------|--------------------------|-------------------------------------|---|---|
| 时间      | EOH间隔                    | 处理情况                                | 当时状态  | 堵塞流量测试  |
| 2014.12 | 投产                       |                                     | 良好  | 初始通流量2.39cm <sup>2</sup>  |
| 2016.03 | 9910                     | 西门子负责，采用柠檬酸酸洗全部                     | 冷热点跳机   | 堵塞平均2.18cm <sup>2</sup><br>最小1.952cm <sup>2</sup><br>洗后2.433cm <sup>2</sup> |
| 2018.07 | 累计26325<br>清洗间隔<br>16415 |                                     | 80-120MW<br>9/23热点<br>持续2分33秒                 |   |
| 2019.04 | 累计31930<br>清洗间隔<br>22020 | 西门子负责，采用柠檬酸酸洗全部24只                  | 100-180MW<br>7/11/12冷点<br>9/18/19/22/23<br>热点 | 堵塞2.08cm <sup>2</sup><br>最小1.314cm <sup>2</sup><br>洗后2.567cm <sup>2</sup>   |
| 1号燃机    |                          |                                     |   |   |
| 时间      | EOH间隔                    | 处理情况                                | 当时状态  | 堵塞流量测试  |
| 2014.12 | 投产                       |                                     | 良好  | 初始通流量2.39cm <sup>2</sup>  |
| 2016.03 | 10149                    | 西门子负责，采用柠檬酸酸洗全部                     | 无冷热点，内窥镜检查轻微堵塞                                | 洗前2.289cm <sup>2</sup><br>洗后2.427cm <sup>2</sup>                            |
| 2018.10 | 累计25663<br>清洗间隔<br>16234 |                                     | 热点：9/18/22<br>持续2分                            |   |
| 2019.04 | 累计29044<br>清洗间隔<br>19615 | 清洗3只<br>11、12、13号<br>燃烧器对应的<br>冷点区域 | 冷点：11/12<br>热点：18/22                          |   |
| 2019.09 | 累计31918<br>掏孔间隔<br>22489 | 掏孔<br>全部24只<br>掏孔后冷热点<br>消失         | 冷点：12<br>热点：4/18/19                           | 掏孔后通流量<br>2.427cm <sup>2</sup><br>(未发生变化)                                   |

## 7 针对燃烧器堵塞采用物理掏孔与柠檬酸酸洗后运行数据对比

### 7.1 通流量对比

2号燃机先后进行了两次柠檬酸酸洗，首次及第二

次酸洗后通流量2.39cm<sup>2</sup>—2.432cm<sup>2</sup>—2.567cm<sup>2</sup>，旋流孔孔径不断扩大。与柠檬酸酸洗相比，采用物理掏孔清理的方式1号燃机第二次物理清理通流量未发生改变，仍保持首次酸洗后通流量2.427cm<sup>2</sup>，物理掏孔可以保证旋流叶片孔径不发生改变，因此采用物理掏孔方式优于柠檬酸酸洗。

### 7.2 冷热点对比

2019年9月1号燃机物理掏孔后，2020年8月间隔4008EOH首次出现120MW时热点瞬时报警，2019年4月2号燃机二次柠檬酸酸洗后，2020年8月间隔9400EOH首次出现90MW时热点瞬时报警。与柠檬酸酸洗，物理掏孔不能完全将内部结构清除，冷热点出现EOH间隔相对较短。

### 7.3 运行加速度对比

2号燃机二次柠檬酸酸洗后加速度曲线图如图11所示。

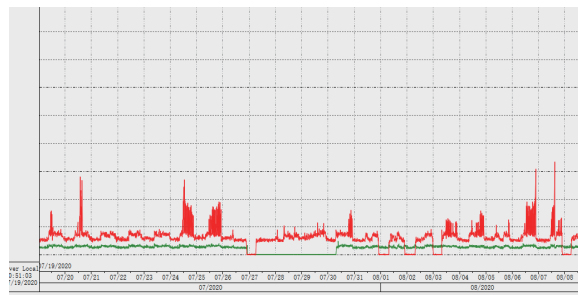


图11 2号燃机二次柠檬酸酸洗后加速度曲线图  
加速度对比数据表如表2所示。

表2 加速度对比数据表

| 日期         | GT11加速度 | GT12加速度      |
|------------|---------|--------------|
| 2020年1月17日 | 1.432   | 3.40 (加值班气量) |
| 2020年3月4日  | 1.304   | 2.86 (加值班气量) |
| 2020年7月20日 | 0.828   | 3.35         |
| 2020年7月24日 | 0.869   | 3.20         |
| 2020年8月6日  | 0.954   | 3.66         |
| 2020年8月7日  | 0.908   | 4.28 (加值班气量) |
| 加速度情况优劣    | ✓       | ×            |

加速度保护逻辑为：

(1) 加速度>2g，转速>47Hz，IGV开度>95%时，每隔4s甩6MW负荷，延时19s跳机；

(2) 加速度>2.5g，转速>47Hz时，每隔4s甩6MW负荷，延时19s跳机；

(3) 加速度 $>3g$ , 转速 $>47\text{Hz}$ 时, 1s后每次甩15MW负荷直至故障消失, 否则延时13s跳机;

(4) 加速度 $>8g$ , 转速 $>4\text{Hz}$ 时, ESV阀开启状态时跳机。

由加速度曲线图及数据表分析, 1号燃机掏孔后加速度相对稳定, 2号燃机二次柠檬酸酸洗后因旋流孔被洗大, 加速度频繁波动出现甩负荷现象, 为保证燃烧稳定, 多次加值班气量稳定燃烧。

#### 7.4 NO<sub>x</sub>排放对比

掏孔与酸洗后NO<sub>x</sub>排放量如表3所示。

表3 掏孔与酸洗后NO<sub>x</sub>排放对比

| GT11 (掏孔后平均通流量<br>2.427cm <sup>2</sup> ) |          |                 |   | GT12 (酸洗后平均通流量2.567cm <sup>2</sup> ) |          |            |   |
|--|----------|-----------------|---|--------------------------------------|----------|------------|---|
| IGV%                                     | 负荷<br>MW | 值班<br>气量<br>g/s | 燃机出口<br>NO <sub>x</sub> mg/m <sup>3</sup> | IGV%                                 | 负荷<br>MW | 值班气量g/s    | 燃机出口<br>NO <sub>x</sub> mg/m <sup>3</sup> |
| 10                                       | 116      | 1000            | 24  | 10                                   | 115      | 1020 (+20) | 32 ↑ 8                                    |
| 20                                       | 136      | 920             | 13  | 20                                   | 137      | 850 (-70)  | 15 ↑ 2                                    |
| 30                                       | 157      | 920             | 10  | 30                                   | 159      | 850 (-70)  | 33 ↑ 23                                   |
| 40                                       | 177      | 970             | 21  | 40                                   | 177      | 970 (-)    | 41 ↑ 20                                   |
| 50                                       | 188      | 970             | 26  | 50                                   | 192      | 1050 (+80) | 48 ↑ 22                                   |
| 60                                       | 202      | 1000            | 33  | 60                                   | 204      | 1050 (+50) | 54 ↑ 21                                   |
| 70                                       | 212      | 1000            | 40  | 70                                   | 212      | 1060 (+60) | 59 ↑ 19                                   |
| 80                                       | 223      | 970             | 44  | 80                                   | 219      | 1030 (+60) | 60 ↑ 16                                   |
| 90                                       | 231      | 960             | 48  | 90                                   | 227      | 1030 (+70) | 62 ↑ 14                                   |
| 100                                      | 235      | 960             | 51  | 100                                  | 232      | 1030 (+70) | 63 ↑ 12                                   |

1号燃机物理掏孔通流量未变化, 加速度未出现不稳定, 值班气量未增加, NO<sub>x</sub>排放各负荷段相对较低。2号燃机两次酸洗后加速度频繁波动, 为了稳定燃烧, 增加各个负荷段值班气量, 因此各个负荷段NO<sub>x</sub>排

放恶化。

## 8 结语

燃机燃烧器腐蚀结垢, 造成冷热点跳机现象影响机组安全稳定运行, 为解决这一问题, 国内同类型机组均按照西门子柠檬酸酸洗工艺进行清洗, 但多次清洗后出现了因旋流叶片孔径扩大导致的加速度频繁波动甩负荷、机组限负荷问题, 燃烧器报废情况严重。本文提出了一种新的解决燃烧器堵塞工艺, 与西门子传统柠檬酸酸洗工艺相比, 采用物理掏孔清理工艺不仅节省检修维护成本, 缩短检修工期, 同时不会扩大旋流叶片孔径, 避免加速度频繁波动甩负荷问题, 以及为稳定燃烧增加值班气量导致的NO<sub>x</sub>恶化问题, 燃烧器不会多次酸洗报废。为行业同类型机组解决燃烧器堵塞问题提供新的解决方案。AP

#### 作者简介:

刘磊 (1988-), 男, 北京人, 工程师, 现就职于北京京能高安屯燃气热电有限责任公司, 主要从事发电厂燃机设备管理工作。

牛兴伟 (1987-), 男, 河北定州人, 工程师, 现就职于北京京能高安屯燃气热电有限责任公司, 主要从事发电厂热控设备管理工作。

柳泓羽 (1989-), 山西运城人, 工程师, 现就职于北京京能高安屯燃气热电有限责任公司, 主要从事发电厂热控设备管理工作。

#### 参考文献:

- [1] 清华大学热能工程系动力机械与工程研究所, 深圳南山热电股份有限公司. 燃气轮机与燃气-蒸汽联合循环装置[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [2] 卢广法. 西门子F级燃气-蒸汽联合循环发电机组培训教材[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2014.
- [3] 李永刚. 西门子SGT5-4000F(+)型燃气轮机排气偏差大处理分析及对策[J]. 内燃机与配件, 2018, (6): 44 - 46.
- [4] 北京能源投资(集团)有限公司, 西门子电站自动化有限公司, 西门子(中国)有限公司. 西门子燃气轮机控制系统解析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [5] 上海电气电站设备有限公司上海汽轮机厂. SGT5-4000F燃气轮机安装调试手册[Z].