

# LM2500 + G4 型燃气 - 蒸汽联合循环机组余热 加热天然气的技术经济分析

马琴<sup>1,2</sup>, 李伟<sup>1,2</sup>, 常娜娜<sup>1,2</sup>, 王宸曦<sup>1,2</sup>

(1. 中国华电科工集团有限公司, 北京 100160; 2. 国家能源分布式能源技术研发中心, 北京 100160)

**摘 要:** LM2500 + G4 型燃气 - 蒸汽联合循环发电机组利用余热锅炉尾部余热加热天然气进气系统, 天然气进气温度按照常规 20℃ 计, 分别将燃气温度加热到 30 ~ 80℃。通过对比分析, 将天然气加热至 80℃ 时技术经济性能最优, 不仅显著提高了以 LM2500 + G4 燃机为核心的分布式能源系统的综合能源利用率, 还提高了机组运行的经济性、可靠性及安全性, 有效防止了低温腐蚀。

**关键词:** 燃气 - 蒸汽联合循环机组; 天然气; 加热器; 综合能源利用率; 节能

**中图分类号:** TK 11<sup>+</sup>5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674 - 1951(2018)07 - 0059 - 03

## 1 LM2500 + G4 燃气轮机天然气进气要求

中国华电集团与美国 GE 公司合资成立了华电通用轻型燃机有限公司, 生产 LM2500 与 LM6000 两个系列的 4 款燃气轮机。其中 LM2500 系列中的 LM2500 + G4 是主力机型, 发电效率高、排烟温度高, 是最适合燃气分布式能源系统的燃气轮机之一。

LM2500 + G4 型燃气 - 蒸汽联合循环发电机组装机容量为 42 MW 级, 是目前国内外较为先进的燃气 - 蒸汽联合循环发电机组。燃气轮机的燃料以天然气为主, 燃气 - 蒸汽联合循环发电机组对天然气的品质要求如下。

### 1.1 天然气压力

LM2500 + G4 燃气轮机可以燃烧成分不同的天然气, 所供天然气的压力为  $(3.59 \pm 0.13)$  MPa (表压)。

### 1.2 过热度

为确保供给燃气轮机的气体燃料 100% 不含液体, 要求气体燃料供气温度有一定过热度。所谓过热度就是燃料气的温度和其露点之间的温差, 它取决于烃和湿气的体积分数。要求的过热度是当燃料气经过气体燃料控制阀膨胀时, 它所下降的温度应该得到足够裕度的补偿<sup>[1]</sup>。

LM2500 + G4 燃气轮机要求天然气的供气温度高于运行压力下的碳氢化合物的露点 + 28℃, 最高不超过 82℃。

天然气温度低于露点, 天然气中的重烃及水汽会凝结形成天然气凝液。天然气气体中含有液体,

可能导致气体燃料喷嘴工作条件恶化, 而对于干式低排放 (DLE) 燃烧系统, 则会导致预混火焰回火或重燃; 同时, 天然气凝液易造成天然气调压单元阀门卡涩并加快阀门内部密封元器件老化, 还会造成调压阀动力气源管路及调压阀执行机构堵塞, 从而导致天然气压力调节异常, 对机组稳定运行带来一定的安全隐患, 对机组启动时的环保性及经济性造成一定影响。

### 1.3 硫

硫会以化合物  $H_2S$ ,  $COS$  的形式存在于天然气内, 随天然气一起产生。天然气供应商一般通过气体处理系统脱硫, 将  $H_2S$  的体积比限制到低于  $20 \times 10^{-6}$ 。硫还有可能以极低体积比 ( $< 100 \times 10^{-9}$ ) 的单质硫蒸气的形式存在。

如果引擎使用的燃料和使用环境中均不含碱金属 (包括其硫化物) 成分, 则对天然气燃料中硫的含量无具体限值规定。对于供应燃料气中的含硫量, 有几个需要关注的方面, 但多与燃气轮机本体不直接相关, 而是影响其他相关设备和排放要求。

(1) 余热锅炉的腐蚀。如果使用了余热回收设备, 必须确定燃料气中硫的含量, 以便对设备进行有针对性的设计。如果余热锅炉 (HRSG) 内的金属温度低于烟气的酸露点, 冷凝出的硫酸会导致严重腐蚀。

(2) 选择性催化还原 (SCR) 沉积。对于在燃气轮机下游采用注入氨来进行  $NO_x$  排放控制的系统, 在低温蒸发器和省煤器管束上可能会形成硫酸铵和重硫酸盐的沉积物。这种沉积物具有腐蚀性, 会降低 HRSG 的性能, 增加燃气轮机的背压。硫酸铵和重硫酸盐的沉积速度取决于燃料中的硫含量、烟气

排放中的氨含量、管束温度以及锅炉本身的设计。另外,进口空气中如果有微量氯离子存在,也可能导致热通道中 AISI 300 系列不锈钢部件开裂。

(3)废气排放。大部分硫燃烧后成为二氧化硫,但有 5% ~ 10% 会氧化为三氧化硫。三氧化硫会产生硫酸盐,在一些规范下可能被视为颗粒,剩余物质将以二氧化硫的形式排放。为了限制酸性气体的排放,某些地区可能会限制燃料内硫的含量。

(4)单质硫沉积。即使单质硫蒸气的含量极低,无法通过市售的标准气体分析仪器测出,但在低流量运行期间的高压降条件下也会发生气固相变,气体控制阀和所有与气体燃料接触的下游组件内都会发生固态单质硫沉积。如果发生了沉积,需要采用燃料加热措施,使硫保持蒸气状态,从而避免发生沉积。根据硫蒸气的含量,气体控制阀入口处气体温度需要维持在 130 ℉ (54 ℃) 或更高,才能避免发生沉积。

2 天然气加热形式

当天然气的来气温度较低而不能满足燃气轮机要求的时候,需要对天然气进行加热,目前国内燃气-蒸汽联合循环机组天然气加热器主要有水浴炉、电加热器、管壳式换热器等,每种形式的加热器都有各自的优缺点,各燃气轮机发电机组一般根据现场实际情况配置相应的加热形式<sup>[2]</sup>。

(1)水浴炉加热。水浴炉加热主要通过燃烧现有的天然气来加热水,再通过炉内的热水对天然气进行加热,主要优点是可以利用现有气源作为燃料、加热成本低、加热效率高,但系统相对复杂、占地面积较大,且因水浴炉安装在调压站区域,运行时有明火,一旦天然气发生泄漏可能产生严重后果,存在一定的安全隐患。

(2)电加热器加热。电加热器系统结构较为简单,只需在系统管路上增加一套电加热设备,具有占地面积小、无需外界热源、加热速度较快等优点,但也存耗电量较大且故障后易发生爆炸等缺点。

(3)燃气轮机发电机组余热加热。燃气轮机发电机组余热加热通过管壳式换热器换热,一般是利用厂内现有的蒸汽或热水通过换热器对天然气进行加热,其优点是占地面积小、安全性较高,但该换热器需有外界热源,且在实际使用过程中检修维护较为不便。

水浴炉加热天然气的效果好,系统运行稳定,国内外有相关的工程经验,也有成熟的技术支持,一般在长输天然气管道上使用。水浴炉加热燃用天然

气,需消耗不少天然气燃料,且水浴炉燃烧器需要的天然气压力比燃气轮机进口天然气压力低很多,因此还需要配置一套天然气减压单元,以满足水浴炉的要求。

电加热器加热设计简单,加热速度快,能在短时间内将气体加热到需要的温度。但电加热器的热能是通过电能转换而来的,而电能是由天然气的化学能转换而来的,通常燃气-蒸汽联合循环发电机组的发电效率只有 40% ~ 55%,因此电加热器的能源转化效率低,所带来的成本也更高,不适合长久运行。由于燃气轮机发电机组有大量的废热可以利用,因此,电加热器可作为机组启动用设备。

鉴于上述原因,为充分利用电厂余热,本文重点研究通过电厂余热形式对天然气进气系统进行加热。

3 余热加热天然气进气系统介绍

在燃气-蒸汽联合循环中,天然气预热不仅可以改善天然气品质,使其符合燃气轮机进气要求,而且可以减少为达到所需燃烧温度而需要的燃料量,从而提高燃气轮机效率。目前,美国通用、德国西门子等公司生产的燃气轮机主要采用电加热器或中压省煤器的性能加热器来预热天然气,使其温度达到系统对天然气过热度的要求。

LM2500 + G4 燃气轮机可以燃烧成分不同的天然气,若天然气中无 H<sub>2</sub>S 气体,则天然气加热温度需满足过热度要求;若天然气中有 H<sub>2</sub>S 气体,则天然气加热温度需满足过热度 and 露点两者之间较大者。

LM2500 + G4 天然气进气参数:流量, < 8 900 m<sup>3</sup>/h;压力, (3.59 ± 0.13) MPa(表压);温度: > 碳氢化合物露点 + 28 ℃ (燃气不含硫), > 硫露点 + 54 ℃ (燃气含硫);最高燃气温度: ≤ 82 ℃。

3.1 双管式换热器参数

经调研,华电天津北辰风电园分布式能源项目建设 2 套 GE - LM6000PF 燃气-蒸汽联合循环机组,该工程采用德国进口双管式换热器,价格约为 85 万元。双管式换热器使用尾部热源水加热天然气,热水水质为软化水,进口温度为 130 ℃,回水温度为 110 ℃,压力为 1.6 MPa,将天然气从 55 ℃ 加热至 120 ℃。本文参考该项目的具体情况,针对河南某分布式能源项目进行设备选型和计算分析,根据 LM2500 + G4 燃气轮机的进气温度要求,将天然气从 20 ℃ 加热至 80 ℃。表 1 为 LM2500 + G4 型燃气轮机配套的双管式换热器技术参数。

表 1 双管式换热器技术参数

| 项目           | 单位                | 参数          |
|--------------|-------------------|-------------|
| 天然气设计流量/最大流量 | m <sup>3</sup> /h | 8 900/9 790 |
| 工作压力         | MPa               | 3.4 ~ 3.6   |
| 设计压力         | MPa               | 6.0         |
| 进/出口管径       | mm                | DN 80       |
| 入口天然气温度      | ℃                 | 20          |
| 出口天然气温度      | ℃                 | 80          |
| 燃气阻力损失       | kPa               | ≤50         |
| 热效率          | %                 | ≥90         |
| 热水进水温度       | ℃                 | 95          |
| 热功率          | kW                | 345         |
| 热水侧承压        | MPa               | 1.6         |
| 热水水质         |                   | 软化水         |

3.2 技术经济指标分析

天然气进气温度按照常规 20℃计,分别将燃气温度加热到 30 ~ 80℃的技术、经济指标分析见表 2

表 2 技术指标分析

| 项目                                       | 加热前天然气温度/℃ | 加热后天然气温度/℃ |         |         |         |         |         |
|------------------------------------------|------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                          | 20         | 30         | 40      | 55      | 60      | 70      | 80      |
| 燃气轮机出力/kW                                | 31 400     | 31 399     | 31 398  | 31 396  | 31 395  | 31 395  | 31 394  |
| 热耗/[kJ·(kW·h) <sup>-1</sup> ]            | 9 927      | 9 922      | 9 918   | 9 911   | 9 909   | 9 904   | 9 899   |
| 发电效率/%                                   | 36.26      | 36.28      | 36.30   | 36.32   | 36.33   | 36.35   | 36.37   |
| 天然气流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 8 426.1    | 8 422.0    | 8 417.9 | 8 411.4 | 8 409.4 | 8 405.1 | 8 400.7 |
| 排烟热量/kW                                  | 80 946     | 80 942     | 80 939  | 80 933  | 80 933  | 80 930  | 80 925  |
| 排烟温度/℃                                   | 549.91     | 549.90     | 549.90  | 549.89  | 549.89  | 549.89  | 549.88  |
| 余热锅炉高压蒸汽量/(t·h <sup>-1</sup> )           | 43.53      | 43.53      | 43.53   | 43.53   | 43.53   | 43.53   | 43.53   |
| 余热锅炉低压蒸汽量/(t·h <sup>-1</sup> )           | 5.92       | 5.92       | 5.92    | 5.92    | 5.92    | 5.92    | 5.92    |
| 抽凝式汽轮机额定抽汽量/(t·h <sup>-1</sup> )         | 25         | 25         | 25      | 25      | 25      | 25      | 25      |
| 抽凝式汽轮机额定抽汽出力/MW                          | 6.65       | 6.65       | 6.65    | 6.65    | 6.65    | 6.65    | 6.65    |
| 管式换热器换热量/kW                              | 0          | 58         | 115     | 200     | 229     | 286     | 343     |
| 综合能源综合利用率/%                              | 76.45      | 76.56      | 76.66   | 76.83   | 76.88   | 76.99   | 77.10   |

注:管式换热器效率为 90%,天然气低位发热量为 34.54 MJ/m<sup>3</sup>,厂用电率取 3%。

表 3 经济指标分析

| 项目               | 天然气温度/℃ |      |       |       |       |       |
|------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|
|                  | 30      | 40   | 55    | 60    | 70    | 80    |
| 设备投资 + 锅炉改造费用/万元 | 50      | 55   | 63    | 73    | 80    | 85    |
| 年节省耗气费/万元        | 4.85    | 9.70 | 17.38 | 19.75 | 24.83 | 30.04 |
| 泵年耗电费/万元         | 0.96    | 0.96 | 1.16  | 1.16  | 1.35  | 1.35  |
| 每年减少售电费/万元       | 0.39    | 0.77 | 1.54  | 1.93  | 1.93  | 2.31  |
| 年修理费/万元          | 1.00    | 1.10 | 1.26  | 1.46  | 1.60  | 1.70  |
| 年运行利润/万元         | 2.50    | 6.86 | 13.43 | 15.21 | 19.96 | 24.68 |
| 投资回收期/a          | 20.0    | 8.0  | 4.7   | 4.8   | 4.0   | 3.4   |

和表 3。

由表 2 可以看出:投运天然气加热器后,将天然气从 20℃分别加热至 30 ~ 80℃时,随着天然气温度的升高,燃气轮机出力相对变化较少,由 31 400 kW 降至 31 394 kW 左右,天然气耗气量由 8 426.1 m<sup>3</sup>/h 降至 8 400.7 m<sup>3</sup>/h,燃气轮机发电效率由 36.26% 提升至 36.37%,排烟温度和排烟流量变化不大,综合能源利用率由 76.45% 提升至 77.10%。

由表 3 可以看出:在天然气价格为 2.15 元/m<sup>3</sup>、电价为 0.7 元/(kW·h)、年利用小时数为 5 500 的情况下,随着天然气温度的升高,泵耗电费用增加 1.35 万元/a,发电收入减少 2.31 万元/a,维修费用增加 1.70 万元/a,但是可节省天然气费用约 30.00 万元/a,当天然气被加热至 80℃时,运行利润为 24.64 万元/a,投资回收期最短,约为 3.4 a。

因此,综上所述,将天然气加热至 80℃时,联合循环发电机组的技术经济性能最优。

4.2 凝汽器内部水平支撑加固

低压轴封供回汽管路布置方式破坏了低压缸内部水平支撑结构,导致轴瓦刚度偏低,即使在轴振很小的情况下,瓦振也会偏大。

将原缺少支撑的部位通过厚度为 20 mm 的钢板转接,以错开轴封管路,如图 2 所示。

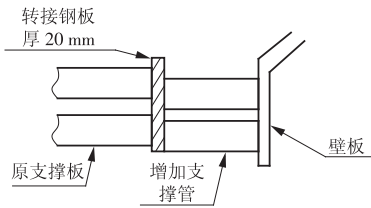


图 2 水平支撑加固示意

经过对低压缸的加固处理,有效控制了低压缸

表 2 检修后后轴系振动数据

| 通道名称       | 峰峰值/ $\mu\text{m}$ | 1×幅值/ $\mu\text{m}$ | 1×相位/ $(^{\circ})$ | 通道名称       | 峰峰值/ $\mu\text{m}$ | 1×幅值/ $\mu\text{m}$ | 1×相位/ $(^{\circ})$ |
|------------|--------------------|---------------------|--------------------|------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| #5 瓦 X 向轴振 | 53                 | 41                  | 328                | #8 瓦 X 向轴振 | 50                 | 35                  | 1                  |
| #5 瓦 Y 向轴振 | 89                 | 83                  | 212                | #8 瓦 Y 向轴振 | 74                 | 64                  | 272                |
| #6 瓦 X 向轴振 | 41                 | 34                  | 230                | #5 瓦瓦振     | 27                 | 26                  | 146                |
| #6 瓦 Y 向轴振 | 84                 | 72                  | 208                | #6 瓦瓦振     | 21                 | 21                  | 162                |
| #7 瓦 X 向轴振 | 66                 | 54                  | 300                | #7 瓦瓦振     | 44                 | 44                  | 227                |
| #7 瓦 Y 向轴振 | 63                 | 52                  | 156                |            |                    |                     |                    |

6 结论

低压缸轴承采用普遍使用的座缸式结构。为布置管路方便,施工时低压轴封进回汽管路水平支撑往往较少,造成该部位刚度较弱。

通过对轴承下方焊缝、水平支撑采用加固方法,有效地解决了 #7 瓦瓦振偏大问题,效果明显,且实施简单费用低,为机组安全长周期运行提供了保障。加固前后其他相关设备均未进行检修,可确定瓦振降低是加固后的效果,供同类型机组相关技术人员参考。

参考文献:

[1]王延博,张伟江. 华能海门电厂 2 号 1 036 MW 机组振动

(上接第 61 页)

4 结束语

通过余热锅炉尾部余热将天然气从 20 ℃加热至 80 ℃时,联合循环机组的技术经济性最优,其综合能源利用率增加 0.65 百分点,运行利润达 24.68 万元/a,投资回收期为 3.4 a。通过分析得知,采用低温余热的回收措施后,LM2500 + G4 型燃气 - 蒸汽联合循环发电机组不仅能源综合利用率显著提高,还提高了机组运行的经济性、可靠性及安全性,

变形量,避免了因此导致的轴封碰磨振动<sup>[2]</sup>。

4.3 轴承箱直接加固增强刚度

也可采用对轴承箱直接加固方式,增强同类机型的轴承箱刚度。但某电厂采用了此方法,也未能从根本上解决<sup>[3]</sup>。

5 处理效果

经过专项检修,机组开机后 #7 瓦瓦振下降明显,达到了应有的处理效果。

机组在满负荷 1 000 MW 运行时,#7 瓦 X 方向轴振为 66  $\mu\text{m}$ ,Y 方向轴振为 63  $\mu\text{m}$ ,瓦振为 44  $\mu\text{m}$ ,比加固前降低了 11  $\mu\text{m}$ 。机组运行至今瓦振稳定(见表 2)。

故障诊断及处理[J]. 热力发电,2011,40(7):62-66.  
[2]陆颂元,童小忠. 汽轮机组现场动静碰磨故障的振动特征及分析诊断方法[J]. 动力工程学报,2002,22(6):2020-2024.  
[3]应光耀,吴文健,童小忠,等. 1 000 MW 汽轮发电机组不稳定振动故障诊断及治理[J]. 浙江电力,2011,30(7):38-40.

(本文责编:陆华)

作者简介:

王辉(1983—),男,河北临城人,汽机高级点检,工程师,从事火力发电厂汽机技术管理工作(E-mail:258560588@qq.com)。

有效防止了低温腐蚀。

参考文献:

[1]陈福湘,朱晨曦. 大型燃气 - 蒸汽联合循环发电技术丛书:设备及系统分册[M]. 北京:中国电力出版社,2009.  
[2]钱颂文. 换热器设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2006.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

马琴(1986—),女,北京人,工程师,工学硕士,从事分布式能源工程的设计工作(E-mail:maq@chec.com.cn)。