

# 锅炉尾部烟道振动原因分析及处理

楼 杰 蒋建伟

(广东粤电靖海发电有限公司, 广东 揭阳 515223)

**摘要:** 广东惠来电厂 2 号 DG1900/25.4-Π2 型超临界锅炉出现了尾部烟道振动问题。经试验、分析、计算,认为主要原因是由卡门涡流脱落频率接近设备的声学驻波频率而使设备产生高频共振所致。通过采取加装防振隔板措施,振动问题得以解决,取得了满意的效果。

**关键词:** 600 MW 超临界锅炉; 尾部烟道振动; 卡门涡流(涡街); 防振隔板

**Abstract:** The phenomenon about the vibration of convection flue gas pass in No. 2 DG1900/25.4-Π2 supercritical boiler of Guangdong Huilai Power Plant are introduced. After the tests, analyses and calculations, the main causes of the vibration are obtained that is caused by high-frequency resonance due to Karman vortex shedding frequency being close to the acoustic standing-wave frequency of the equipment. Some measures such as installing the antivibration baffle are proposed to solve the vibration problem, which meets with satisfactory results.

**Key words:** 600 MW supercritical boiler; vibration of convection flue gas pass; Karman vortex (Karman vortex street); antivibration baffle

中图分类号: TK227 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2012)03-0091-04

## 0 引言

某电厂 600 MW 机组, 锅炉为东方锅炉厂生产的 DG1900/25.4-Π2 型超临界参数变压直流炉, 一次再热、单炉膛、双尾部烟道、平衡通风、露天布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构 Π 型锅炉。锅炉主要技术参数如表 1 所示。

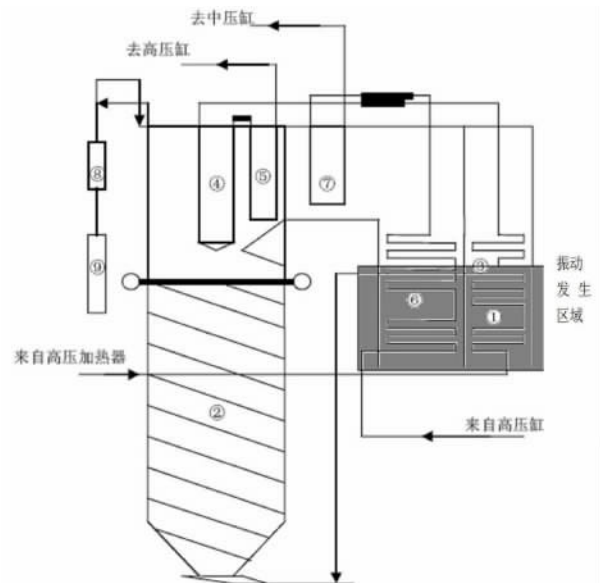
表 1 锅炉主要技术参数

名称	B-MCR	BRL
过热蒸汽流量 / (t · h <sup>-1</sup> )	1 950.2	1 857.3
过热器出口蒸汽压力 / MPa (g)	25.4	25.3
过热器出口蒸汽温度 / °C	571	571
再热蒸汽流量 / (t · h <sup>-1</sup> )	1 590.4	1 510.5
再热器进口蒸汽压力 / MPa (g)	4.82	4.57
再热器出口蒸汽压力 / MPa (g)	4.63	4.40
再热器进口蒸汽温度 / °C	327	322
再热器出口蒸汽温度 / °C	569	569
省煤器进口给水温度 / °C	290	287

## 1 尾部烟道振动情况

2 号锅炉从 2009 年 6 月大修后, 开始发生尾部烟道振动情况。振动主要发生在尾部后烟道省煤器

和低温再热器区域, 标高 44 ~ 58 m (如图 1 灰色区域所示), 发生振动时, 尾部烟道可听到类似拖拉机马达低沉的轰鸣声。经现场试验, 发现振动情况跟负荷有关, 振动主要发生在 600 MW 负荷下, 其余负荷未见明显振动。在 600 MW 负荷下, 振动又与烟



①省煤器; ②炉膛; ③低温过热器; ④屏式过热器; ⑤末级过热器; ⑥低温再热器; ⑦高温再热器; ⑧汽水分离器; ⑨储水罐

图 1 2 号锅炉尾部烟道振动发生区域示意图

气挡板的开度有关,再热器烟气挡板开度 30% ~ 35%,以及 45% ~ 70% 的区间范围内,尾部烟道都会发生振动,其中,当再热器烟气挡板开度在 32% 和 55% 两个位置时,振动最为剧烈。

为了确认振源,保持 600 MW 负荷,手动改变过热器、再热器烟气挡板门的开度,利用动平衡仪的测振功能,对尾部烟道的振动频率进行了测量。经试验和测量,发现振动发生在省煤器区域,而且主要发生在再热器烟气挡板门开度为 30% ~ 35% 以及 45% ~ 70% 两个区间,其中以 32% 和 55% 两个开度振幅最大,分别为 342.5 μm 和 368.8 μm。发生振动的同一个区间内,振动频率一致,分别为 31.25 Hz 和 25.25 Hz。而再热挡板开度在这两个区间之外,不会发生明显的振动。测量结果如表 2。

表 2 尾部烟道振动测量结果

再热器烟气挡板开度/%	振幅/μm	频率/Hz
<30	8.6	-
30	264.7	31.25
32	342.5	31.25
35	220.2	31.25
35~45	14.2	-
50	268.7	25.25
55	368.8	25.25
60	246.2	25.25
65	136.6	25.25
>70	18.7	-

挡板门开度的改变,主要是引起了烟气流速的改变,由此推断振动与烟气流速有关。

## 2 振动原因分析

经过查阅相关资料和计算,可以确定该锅炉尾部烟道振动的是由声学共振引起。

### 2.1 烟道声学共振机理

(1) 卡门涡流(见图 2): 烟气流经一个圆柱型管子的前缘时,烟气受到阻滞,按伯努力定理,其动能转变为压力能,在前缘附近形成了高压区,促使紧贴圆柱体表面的附面层向后侧延伸。在管子最宽截面处的附近,气流附面层从管子表面的两侧脱开,并形成两个在流动中向尾部拖拽的剪切层。因为自由剪切层的最内层比最外层行移动要慢得多,于是在尾流中就形成了一个规则的旋涡流动。当旋涡交替产生脱落时,其两侧的流体流速和静压是不同的。旋涡形成与长大的一侧流速慢,静压高,而另一侧由于流速快,静压较低,因此在静压较高的一侧产生了

一个垂直于流向的推力。由于旋涡交替从两侧脱落,在管子上就激发起周期性的力,使管子在与烟气流动方向相垂直的方向上产生激振。上面所说的旋涡脱落频率就是卡门涡流频率。

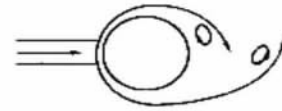


图 2 卡门涡流示意图

(2) 烟道驻波: 周期和振幅相同的波相对进行,互相干涉,形成所谓驻波。当低密度的流体稳定地横向流过管束时,可能产生一个既垂直于管子又垂直于流动方向的声学驻波,尾部烟道满足驻波发生条件。驻波是一种纵波,波的传递速度与驻波所在介质的声速相同。由于烟道内的声波可以与反射回来的声波叠加,因此,烟道的驻波有  $N$  阶,  $N = 1, 2, 3, \dots$ , 也称  $N$  次谐波。

(3) 声学共振的判定: 当卡门涡流频率与烟道某阶谐波频率之比为  $0.8 \leq K \leq 1.2$ , 也就是频率相差不超过 20% 时,就可以引发声学共振。

### 2.2 频率计算和验证

根据卡门涡流频率公式、驻波公式、锅炉热力计算书、锅炉说明书,对上述频率进行了计算。

#### (1) 卡门涡流频率计算

管排横向绕流旋涡的脱落频率(卡门涡流频率)的计算公式为  $f_s = SU/D$

式中,  $S$  为斯特劳哈数,可以顺列管子的纵向横向节距比,从图 3 中查得;  $U$  为气流速度,  $\mu/s$ ;  $D$  为管子外径,  $\mu m$ 。

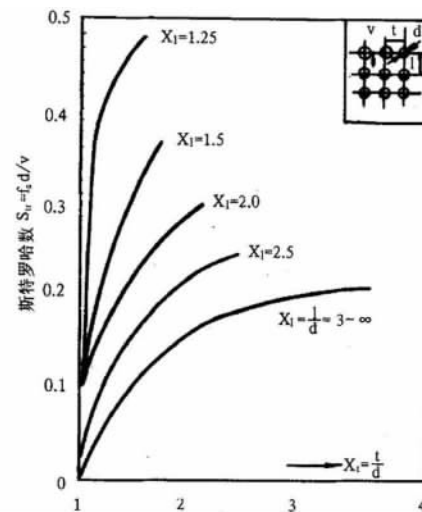


图 3 顺列管排中管子纵向横向节距比与斯特劳哈数的关系曲线

(2) 烟道驻波频率计算

烟道驻波频率通用计算公式中,假如存在驻波,则其波长和烟道净宽  $W$  之间必然有一定的关系,基本波(1阶谐波)波长是烟道净宽的两倍;2阶谐波中,波长等于烟道净宽;3阶谐波的波长为净宽的  $2/3$ ……。

驻波频率计算公式为  $f = nC/2W$

式中,  $C$  为某一温度下烟气介质中的声速;  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;  $W$  为烟道宽。

声速可由下式求出:  $C = \sqrt{KRT}$ , 式中  $K$  为绝热指数;  $R$  为气体常数;  $T$  为气体绝对温度。计算结果如表3所示。

表3 惠来电厂2号锅炉省煤器烟道驻波计算数据

数据项目	数值		
机组负荷 /MW	600	480	300
省煤器进口烟温 / $^{\circ}\text{C}$	577	507	467
省煤器出口烟温 / $^{\circ}\text{C}$	357	305	271
省煤器进口烟速 $U_1 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	9.2	4.9	3.1
省煤器出口烟速 $U_2 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	8	4.02	2.7
卡门涡流计算			
省煤器管子外径 $D / \text{m}$	0.050 8	0.050 8	0.050 8
烟速			
管排的横向节距 $S_1 / \text{m}$	0.114 3	0.114 3	0.114 3
管排的纵向节距 $S_2 / \text{m}$	0.152	0.152	0.152
斯特劳哈数 $S_r$ (顺列管束)	0.176 9	0.176 9	0.176 9
纵排			
省煤器入口旋涡脱流 频率 $f_s / \text{Hz}$	32.04	17	10.8
省煤器出口旋涡脱流 频率 $f_s / \text{Hz}$	27.86	13.9	9.4
烟道宽度 $W / \text{m}$	22.16	22.16	22.16
绝热指数(烟气) $K$	1.33	1.33	1.33
气体常数(烟气) $R / (\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K})$	283	283	283
省煤器进口气体 绝对温度 $T / \text{K}$	850	780	840
省煤器出口气体 绝对温度 $T / \text{K}$	630	578	554
烟道驻波频率计算			
省煤器入口驻波 $f$ (1阶) /Hz	12.92	12.38	12.06
省煤器入口驻波 $f$ (2阶) /Hz	25.85	24.76	24.12
省煤器入口驻波 $f$ (3阶) /Hz	38.77	37.14	36.18
省煤器出口驻波 $f$ (1阶) /Hz	11.13	10.66	10.34
省煤器出口驻波 $f$ (2阶) /Hz	22.25	21.32	20.68
省煤器出口驻波 $f$ (3阶) /Hz	33.38	31.97	31.02

从表3计算结果可以看出:600 MW 负荷时,省煤器入口卡门涡流频率与省煤器出口3阶驻波频率之比为0.96;省煤器出口卡门涡流频率与省煤器进口2阶驻波频率之比为1.08,两个比值均在0.8~1.2范围内,且很接近1,因此从理论上可以判断,振动是由于声学共振引起。而现场实测的烟道振动频率25.25 Hz、31.25 Hz 分别与计算出来的出口3阶和入口2阶驻波频率非常接近,又进一步证明了前面计算结果是正确的,由此断定2号炉尾部烟道的振动是由于声学共振引起。

3 振动处理

解决该类声学振动常用的方法是在烟道内装设消除共振的隔板。根据机械工程手册,烟道内加装隔板的依据如表4。

表4 烟道加装隔板依据

谐波阶数	隔板数
$N < 3$	$N = n$
$N = 3 - 6$	$N = n + 1$
$N > 6$	$N = 2n - 5$

另外,考虑到:①三次谐波的频率为烟道宽度的  $2/3$ ;②根据东方锅炉厂的经验,在宽度小于6.7 m 的烟道中几乎未发生过振动案例。基于以上两点,最后决定采取比机械工程手册多一列隔板,即5列防振隔板的方案,防振隔板由东方锅炉厂设计制造。

由于尾部烟道分为前后两个烟道,每个烟道受热面又分为上、中、下三层。因此采取了加装  $5 \times 3 \times 2$  共30块隔板的方案。图4是防振隔板和安装位置的示意图。隔板的位置避开烟道宽度  $2/3$  节距位置,左右隔板呈不对称布置。

2011年2—3月,利用2号炉B级检修机会,该电厂将防振隔板进行了安装。

4 防振效果检验

该锅炉B级检修后开机运行至今,锅炉尾部烟道未再发生振动现象。为了检验防振效果,再次到现场进行了振动测量。测量结果如表5。

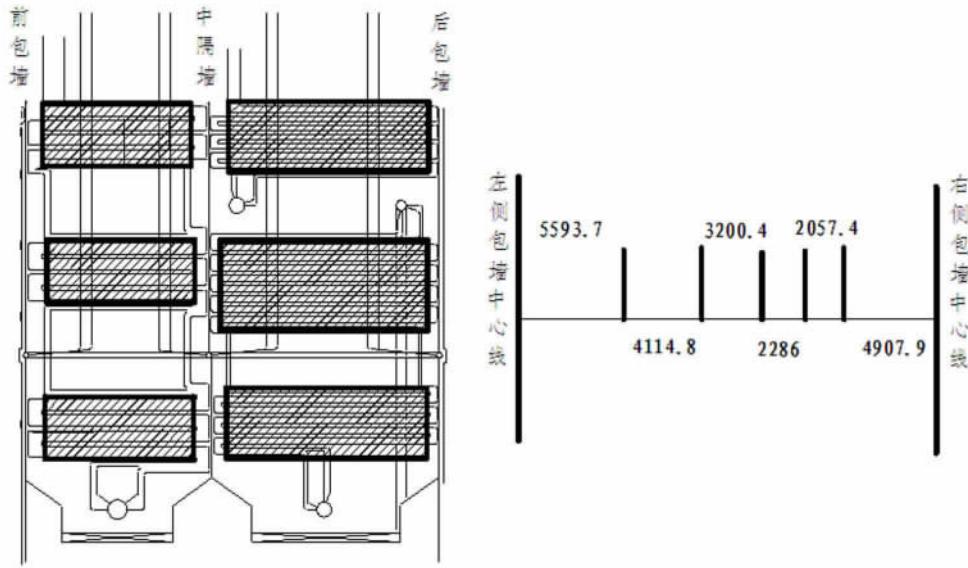


图4 防振隔板安装位置示意图

表5 尾部烟道振动测量结果

再热器烟气挡板开度 /%	振幅 / $\mu\text{m}$	频率 /Hz
30	2.60	22.5
40	1.40	22.5
50	3.20	22.5
55	5.75	22.5
60	3.20	22.5
65	4.30	22.5

结果表明,防振隔板加装后,尾部烟道已不再有振动现象。

## 5 结论

关于锅炉尾部烟道振动问题,可以得出以下结论。

(1) 该锅炉尾部烟道的振动频率在 22.25 Hz 和 31.25 Hz, 振动的原因为省煤器管排的卡门涡流脱硫频率与尾部烟道的 2 阶、3 阶谐波频率非常接近从而引发了声学共振。

(2) 实践证明,消除振动的有效方法之一是在尾部烟道加装防震隔板。加装隔板后,烟道被分隔为若干个小区域,每个区域越小时,其驻波频率越大,当其最小的驻波频率都比卡门涡流的脱落频率

大得多时,就可以完全避免共振的发生。

(3) 该锅炉安装的防振隔板共 30 块,总重约 10 t, 耗材并不多。在检修期间安装,由于零件较多,检修空间受限,安装相对比较困难。建议类似型号参数的锅炉在出厂时设计好防振隔板,受热面安装时直接装上。

## 参考文献

- [1] 魏新华. 大型电站锅炉尾部烟道的声学振动[J]. 锅炉技术, 1993(1): 1-10.
- [2] 柴锡强, 熊建国, 朱云水. 锅炉尾部烟道振动原因分析及对策[J]. 浙江电力, 2004(6): 6-9.
- [3] 赵建新. 电厂锅炉尾部烟道振动分析[J]. 现代电力, 2009, 26(5): 49-51.
- [4] 董琨. 卡门涡流对电站锅炉安全性的影响及治理措施[J]. 热力发电, 2008, 37(10): 31-34.

作者简介:

楼杰(1982),男,工程师,技师,工程硕士,从事锅炉、脱硫专业检修及技术管理工作;

蒋建伟(1982),男,助理工程师,从事锅炉、脱硫专业检修及技术管理工作。

(收稿日期:2012-03-20)

# 欢迎订阅《四川电力技术》