

# 燃气热水锅炉振动原因及处理方案

刘建明,吴艳

(江苏双良锅炉有限公司,江苏 江阴 214444)

## Causes and Solutions of Vibration of Gas-fired Hot Water Boiler

LIU Jianming, WU Yan

(Jiangsu Shuangliang Boiler Co., Ltd., Jiangsu 214444, China)

**摘要:**在燃气锅炉调试运行阶段,遇到了锅炉振动问题。通过计算与分析,找出锅炉振动的原因,并且制订相应的处理措施。经过锅炉优化整改,最终锅炉振动问题得到圆满解决,为今后同类型锅炉振动问题的解决和预防提供参考。

**关键词:**燃气热水锅炉;锅炉振动;原因分析;处理方案

**中图分类号:**TK221

**文献标识码:**B



第一作者:刘建明(1978—),男,本科,工程师,主要从事锅炉产品及开发工作。

## 0 前言

随着燃气锅炉向大容量、低排放方向发展,锅炉产生振动的情况越来越多,而且产生振动的原因也越来越复杂。锅炉产生振动的原因包括送风系统中气流的脉动、烟气再循环系统中烟气的脉动、燃气系统内燃气压力的脉动、燃烧器内空气温度与高温炉膛之间由于温差产生的热声振动、燃烧脉动与炉膛形成的声激振、卡门涡街引起的烟气振动、炉膛压力的波动等诸多原因<sup>[1]</sup>。由于这些原因引起的锅炉振动会造成一系列的损害,如产生的应力疲劳造成管子损伤、炉墙损坏、保温脱落、锅炉使用寿命缩短等<sup>[2]</sup>,造成的损害严重威胁着锅炉的安全运行,因此有必要找出其中的原因,并做出相应合理的处理方案。

## 1 锅炉结构概述

某公司型号为SZS 70-1.6/130/70-QT全自动燃气热水锅炉,用于热源增容工程项目。该锅炉为双锅筒、纵置式、微正压室燃方式的燃气热水水管锅炉。锅炉整体布置为“D”形结构,采用自身支撑方式。炉膛深度方向与对流烟道平行,炉膛位于右侧,对流受热面位于左侧。由上锅筒、下锅筒、水冷壁管屏、对流管束等组成的锅炉本体支撑于支座上。第一个支座为固定支座,后面为滑动支座,锅炉本体沿

锅筒长度方向可以自由向后膨胀。为满足低氮排放要求,锅炉采用2台烟气内循环燃烧器,在锅炉前墙上下位置布置。锅炉本体布置见图1。

锅炉采用自支撑方式,锅炉钢架是在锅炉左右侧各布置3个立柱,立柱均由槽钢对扣焊接而成,左侧中间立柱采用槽钢[16b(Q235-A)],其余立柱采用槽钢[20b(Q235-A)],整个钢架是一个空间框架,高度为8.53 m。锅炉炉墙采用由 $\phi 60 \times 5$ 的光管与宽度30 mm、厚度5 mm的扁钢焊接而成的膜式水冷壁,管间节距为90 mm。为了加强炉墙的整体刚性,在左右炉墙周围沿高度方向布置了3道水平刚性梁,炉膛顶部布置了2道刚性梁。刚性梁采用16号工字钢。钢架中间立柱与左右侧炉墙的刚性梁相连接,承受来自两侧刚性梁端部产生的弯矩,刚性梁、钢架立柱布置见图2。

## 2 锅炉振动情况

该锅炉在调试过程中,发现锅炉存在振动现象。为了解锅炉产生振动的原因,对锅炉进行实地测量和观察。振动测点主要设置在前墙及其上下布置的2个燃烧器、后墙、左侧炉墙、右侧炉墙、炉顶、进水集箱、出水集箱、锅筒以及风道。当锅炉负荷从冷态启动后逐步上升至50%,锅炉就开始产生明显的振动,而且锅炉的振动随着负荷的增大而增大。通过振动测量仪检测,发现左侧炉墙的振动最大,右侧炉墙次之,主要集中在左右炉墙的中间立柱,其他部位

收稿日期:2023-02-08

振动不明显。

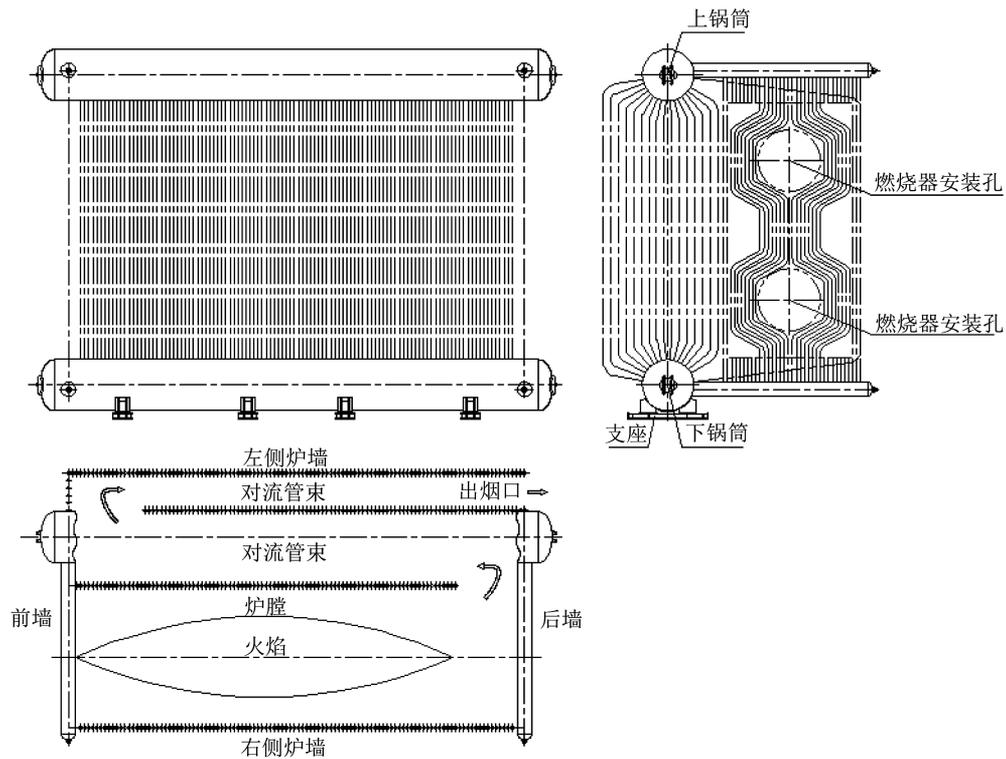


图1 锅炉本体布置示意图

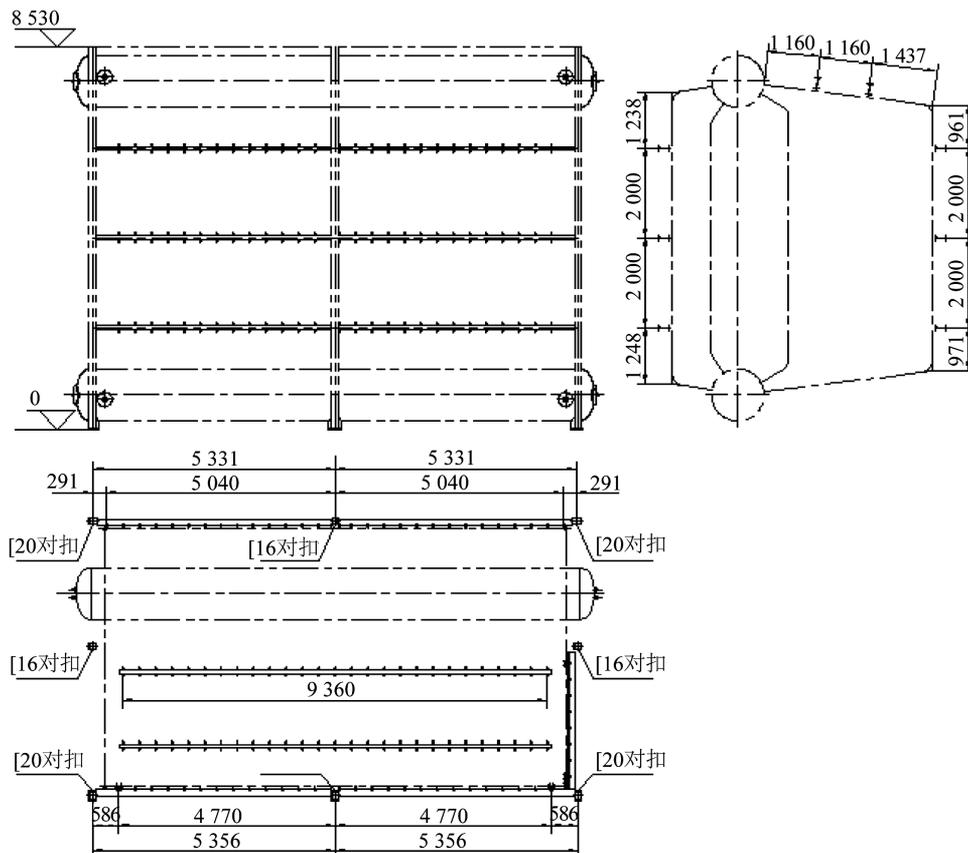


图2 刚性梁、钢架立柱布置简图

### 3 锅炉振动原因分析

对于大部分锅炉的炉墙振动,主要有四种原因引起:①流体流动引起的振动;②热声振动;③燃烧引起的振动;④炉墙刚度不够引起的振动<sup>[3]</sup>。流体流动引起的振动主要是存在卡门涡流频率的原因,当卡门涡流频率与烟道声学驻波频率、管子固有频率耦合时可能会发生,这种振动具有随机性,且发生在一定的烟气流速下,随着烟气流速发生变化而消失<sup>[2]</sup>,现场的振动是连续的,对比之下可排除此项。热声振动通过两个方面原因予以排除,一是热声振动的特征现象较明显,往往伴有停滞声波、巨大的噪音、剧烈的振动,严重时迫使锅炉停机<sup>[3]</sup>,通过现场的振动现象与之对比,不符合热声振动的特征现象;二是热声振动主要与炉膛和燃烧器的结构及温度差有关,该锅炉在设计定型前已经通过炉膛和燃烧器的匹配性验证,可有效防止热声振动的发生。通过现场的观察和分析,首先需要进行刚性梁和钢架强度、刚度的校核分析,然后再进行燃烧器运行参数调整,从而找出引起锅炉振动的原因。

#### 3.1 刚性梁校核分析

作用在刚性梁上的荷载包括炉膛设计压力、风荷载、地震荷载、刚性梁的自重和作用在刚性梁上的垂直荷载。该锅炉布置在室内,不考虑风荷载。对于工业锅炉不要求进行防震设计,不考虑地震荷载<sup>[4]</sup>。该锅炉的刚性梁主要承受来自炉内烟压产生的水平力,因此刚性梁以炉膛设计压力为4 kPa进行强度校核,以炉膛压力为2 kPa进行刚度校核。

刚性梁按照受均布荷载的简支梁校核,分别计算最大应力和最大挠度。通过受力分析及相应力学计算公式<sup>[5-6]</sup>,计算出刚性梁受力最大部位的最大应力和最大挠度,计算结果表明,右侧炉墙的刚性梁最大应力为198.61 N/mm<sup>2</sup>,大于许用应力122 N/

mm<sup>2</sup>(16号工字钢,Q235-A,计算温度130℃);最大挠度为19.39 mm,大于允许挠度14.87 mm(L/360)。从锅炉钢结构设计的角度来说,刚性梁的强度和刚度存在不足。但锅炉在50%负荷运行时,现场实测炉膛压力约为1 kPa,通过受力分析及相应力学计算公式<sup>[5-6]</sup>,计算出右侧炉墙的刚性梁最大应力为49.65 N/mm<sup>2</sup>,最大挠度为9.7 mm,分别小于上述的许用应力122 N/mm<sup>2</sup>和允许挠度14.87 mm,因此锅炉的炉墙不会因刚性梁的强度和刚度不足而产生振动。

为保证刚性梁有足够的强度和刚度来提高炉膛、烟道的刚性,减少炉墙的振动,保护炉内的管子,可通过增加刚性梁截面或增加刚性梁数量的方法来解决。通过增加刚性梁截面,可增加抗弯截面模量和惯性矩;通过增加刚性梁数量,可减小刚性梁受力。

#### 3.2 钢架校核分析

由于刚性梁承受炉内烟压产生的水平力,钢架中间立柱与左右侧炉墙的刚性梁相连接,因此钢架中间立柱承受两侧刚性梁端部产生的弯矩,会因炉内烟压的变化而变化。为分析钢架在锅炉运行时各构件的受力状况,通过采用SAP2000钢结构分析软件进行建模分析。锅炉在50%负荷运行时,钢架及刚性梁应力分析结果见图3(仅施加现场实测炉膛压力1 kPa时产生的荷载)。结果显示,左侧中间立柱应力比为1.055,右侧中间立柱应力比为0.922。左侧中间立柱应力比大于允许应力比1(弯曲应力与构件所能承受最大应力的比值),强度不足,右侧中间立柱应力比接近1,接近于限值。由此判断,锅炉在50%负荷时,炉内烟压产生出来的力会使锅炉钢架的中间立柱因其强度的不足而发生振动。

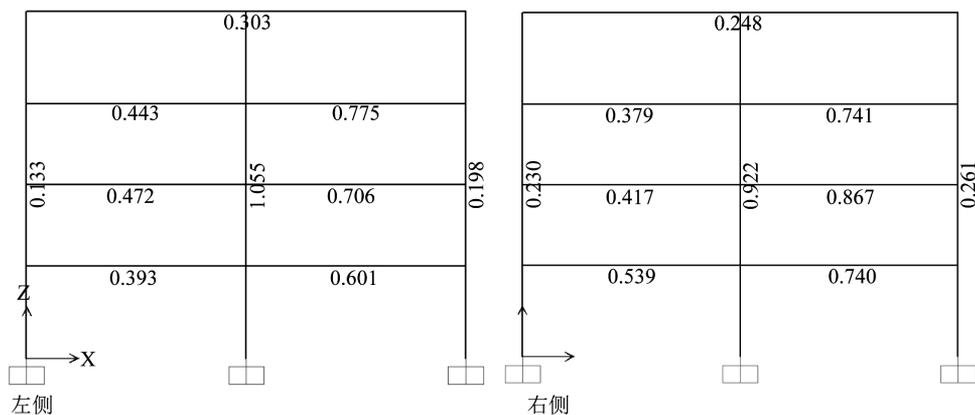


图3 钢架及刚性梁应力分析图(炉膛压力约为1 kPa)

为保证锅炉钢架立柱有足够的强度和刚度来减小因炉内烟压变化而带来的振动,可通过增加立柱和横梁的方法来解决。通过增加立柱,可使分配到各立柱的力变小,通过增加横梁,可使钢架立柱更稳定。

### 3.3 燃烧器运行参数调整分析

通过对刚性梁和钢架立柱整改后再次检测左侧炉墙振动烈度,检测结果见图4。结果表明,锅炉在50%负荷后左侧炉墙的振动烈度处于20 mm/s以上(振动烈度处于20 mm/s以下能保证锅炉安全稳定运行<sup>[7]</sup>),锅炉处于振动状态。为验证锅炉振动与烟气流速是否有关,测试期间在总燃气量维持不变的情况下,将2台燃烧器的燃气量调成一大一小,振动烈度基本维持原状,由此判断,锅炉振动与烟气流速无关,与燃烧产生的烟气脉动有关。

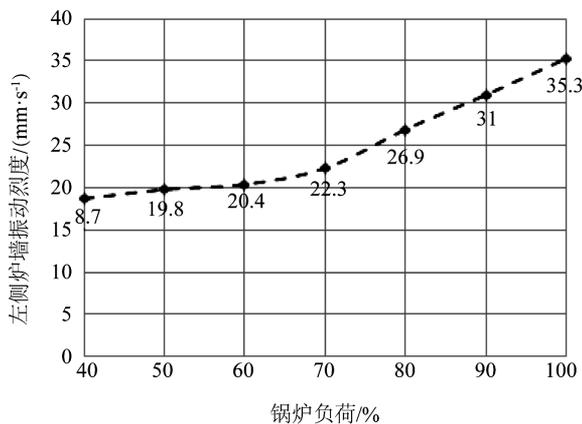


图4 炉墙刚性梁和钢架立柱整改后左侧炉墙振动烈度检测结果

通过与燃烧器设计人员交流,分析是由于燃烧器根部火焰不稳定导致燃烧不连续产生的烟气脉动。燃烧器的中心喷嘴的作用是稳定火焰,通过调整燃烧器中心火焰的气阀开度,即通过加大中心火的燃气量,可以稳定火焰,避免燃烧产生的烟气脉动,从而改善锅炉的振动情况。燃烧器中心气阀开度参数调整见表1。

表1 燃烧器中心气阀开度参数调整表 %

锅炉负荷	40	50	60	70	80	90	100
中心气阀开度参数1	25	26	29	31	33	34	35
中心气阀开度参数2	38	41	44	46	49	52	55

通过对燃烧器中心火焰的气阀开度初步调整后,左侧炉墙振动烈度检测结果见图5。结果表明,调小中心气阀开度(参数1),振动烈度变大;调大中心气阀开度(参数2),振动烈度变小。通过两次初调后左侧炉墙振动烈度均处于20 mm/s以下,可以保证锅炉安全稳定运行,同时验证了上述的判断。

### 3.4 振动原因分析

综合上述分析,发现了刚性梁和钢架立柱存在强度和刚度的不足,但并不是引起该锅炉炉墙振动的内在原因,它只是外在的表现。引起该锅炉炉墙振动的主要原因是燃烧器运行参数调整不到位,中心火在较小燃气量的情况下会导致根部火焰不稳定、燃烧不连续,从而产生了烟气脉动,使锅炉炉墙受到的烟压变化而振动。

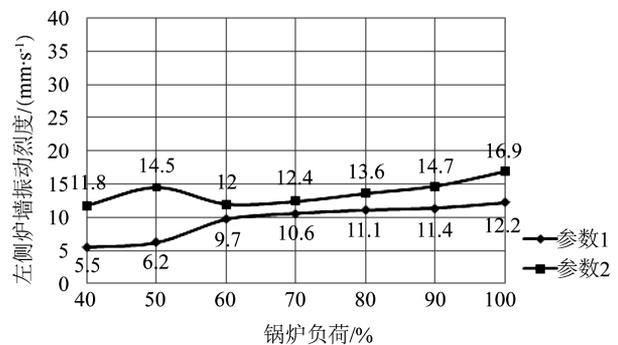


图5 燃烧器中心火焰气阀开度调整后左侧炉墙振动烈度检测结果

虽然本案例通过钢结构加固和燃烧器运行参数调整即解决了振动问题,但是对于很多情况,火焰和烟气脉动无法仅通过燃烧器运行参数调整就可解决,需要从燃烧器的结构设计和调节功能上来考虑,比如燃气喷口的口径、燃气喷口的角度、稳燃器等结构设计、空气燃料分级可调、火焰形状可调等调节功能<sup>[7]</sup>。通过燃烧器合理的结构设计和配备相应的调节功能,来预防和消除锅炉振动。

## 4 处理方案

根据上述分析结果及现场情况,制订处理方案:

(1)为保证刚性梁有足够的强度和刚度,可通过增加刚性梁数量,减小刚性梁的受力。采用在原间距为2 m刚性梁之间增加一道与原规格材料相同的刚性梁。通过受力分析及相应力学计算公式<sup>[5-6]</sup>,计算出刚性梁受力最大部位的最大应力99.31 N/mm<sup>2</sup>,小于许用应力122 N/mm<sup>2</sup>;最大挠度为9.7 mm,小于允许挠度14.87 mm,满足要求。

(2)为保证锅炉钢架立柱有足够的强度和刚度,可通过增加立柱和横梁,减小立柱受力变形,增强钢架整体稳定性。在锅炉左右两侧各增加2个立柱,使两侧各设置5个立柱,立柱之间通过横梁焊接连接。刚性梁与增加的立柱之间焊接连接,提高刚性梁的强度和刚度。增加的立柱采用H型钢(HW300×350×12×19, Q235-A),横梁采用工字钢(I20b, Q235-A)。通过采用SAP2000钢结构分析

软件进行模拟应力分析,在炉膛压力为 4 kPa 时,锅炉钢架各构件的应力比均小于 1,满足要求。钢架

及刚性梁应力分析结果见图 6(仅施加炉膛压力 4kPa 时产生的荷载)。

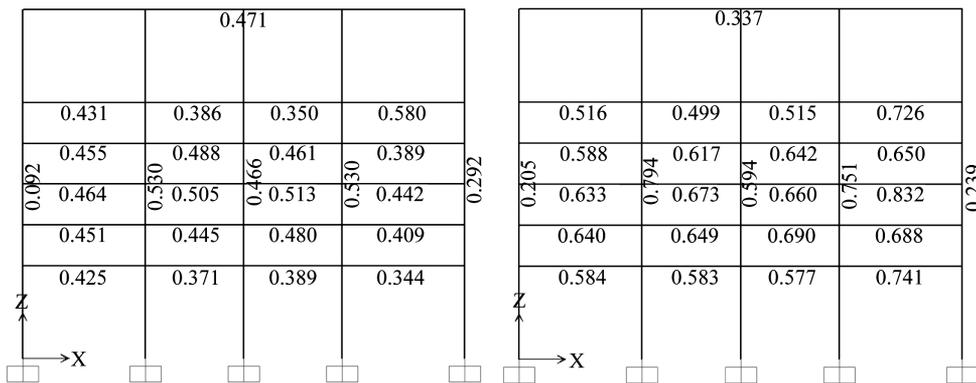


图 6 钢架及刚性梁应力分析图(炉膛压力为 4 kPa)

(3)为使锅炉的运行状态更好,降低锅炉的振动烈度,NO<sub>x</sub> 排放小于 30 mg/m<sup>3</sup>,要求燃烧器厂家对燃烧器的运行参数进一步优化调整,以保证燃烧

器调试到最佳状态。通过运行参数调整(见表 2),锅炉的振动烈度、NO<sub>x</sub> 排放均达标,满足了锅炉使用要求。

表 2 燃烧器运行参数

锅炉负荷/ %	燃烧器 1			燃烧器 2			风机 1	风机 2
	外环气阀/%	中心气阀/%	风门开度/%	外环气阀/%	中心气阀/%	风门开度/%	频率/Hz	频率/Hz
0.1	13	12	9	14	6	3	19	19
10	18	12	11	22	12	5	19	19
20	23	17	15	26	18	9	20.5	20.5
30	28	22	19	30	24	13	22.5	23
40	32	38	24	32	38	18	28	27
50	34	39	27	34	39	25	29.5	29
60	37	41	30	37	42	29	31.5	32
70	39	45	33	40	47	35	34	33
80	42	48	43	43	48	37	36	35
90	45	48	48	46	48	39	38	37
100	49	48	50	49	48	45	40	39
101	58	58	65	58	55	65	44	50

### 5 结束语

经过与用户、燃烧器公司、安装公司之间的通力协作,采用了上述处理方案,锅炉振动基本消除,并顺利通过锅炉调试验收,取得了用户的认可。

锅炉产生振动是一个复杂的问题,与燃烧、锅炉结构等密切相关。由于振动对于锅炉安全运行影响较大,必须引起高度重视,需要针对引起锅炉振动的各种原因制订相应合理的处理方案,以消除安全隐患。另外,随着锅炉容量不断增大,设计人员在锅炉设计时应该充分考虑可能影响锅炉安全运行的各方面因素,不断进行结构优化设计,避免出现不安全因素。

### 参考文献

[1]姚元旭,李风华,张玉雷.锅炉振动分析及解决方案[C].

全国第八届电站锅炉专业技术交流年会论文集,2013:126-132.

[2]宋永富.某余热锅炉振动原因分析及处理措施[J].锅炉制造,2016(1):34-35.  
 [3]胡景超,关风一.锅炉炉墙振动现象分析[J].锅炉制造,2022(5):12-13.  
 [4]李之光,梁耀东,徐甫.工业锅炉结构创新与计算分析[M].北京:中国质检出版社,中国标准出版社,2016.  
 [5]娄德奎,冯丽珠.大型电站锅炉绕带式水平刚性梁的计算方法[J].电站系统工程,1997(6):32-35.  
 [6]JB/T 6736—1993《锅炉钢构架设计导则》[S].  
 [7]姬海民,李文锋,杨冬,等.基于超低氮燃气锅炉振动控制试验研究[J].中国电力,2021,54(3):185-190.