

# 高效低应力卧式内燃锅炉结构与性能

李之光 梁耀东 刘 峰 张仲敏 何立娅 徐 甫

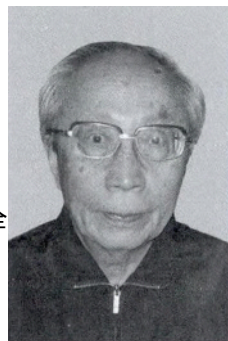
(辽宁盛昌绿能锅炉公司 北京盛昌之光锅炉研发中心 北京 102600)

**摘 要:** 详细介绍了一种排烟温度约 100 ℃, 结构简单、钢耗低、工艺简单而热效率与安全可靠性却明显提高的新型内燃锅炉; 同时介绍内燃锅炉的拱形管板有限元计算分析结果。

**关键词:** 内燃锅炉; 高效率; 低应力; 拱形管板; 有限元分析

中图分类号: TK229

文献标识码: A



## Structure and Performance of Horizontal Inner Combustion Boiler with High Efficiency and Low Stress

LI Zhi-guang, LIANG Yao-dong, LIU Feng,

ZHANG Zhong-min, HE Li-ya, XU Fu

(Zhi-guang Boiler Research Center, Liaoning Shengchang Boiler Co., Ltd., Beijing 102600, China)

**Abstract:** Discusses a new type inner combustion boiler with exhaust gas temperature about 100 ℃, and introduces in detail its advantages such as simple structure, low steel consumption, high efficiency and safety reliability, also focus on the low stress arched tube plate developed in China and gives finite element calculated results of arched tube plate related to the inner combustion boiler.

**Key words:** inner combustion boiler; high efficiency; low stress; arched tube plate; finite element analysis

第一作者: 李之光 (1931 -), 教授, 长期从事锅炉强度、相似与模化教学、科研、锅炉创新工作, 主持新型水火管锅壳锅炉、组合螺纹烟管锅炉、中度冷凝式内燃油—气锅炉等的研究与开发。发表专著 10 部, 论文 50 余篇。

### 0 引言

目前, 我国工业锅炉炉型不管是水管锅炉还是卧式锅壳内燃锅炉, 其基本型式与国际上流行的型式大同小异。但在具体应用时还需全面考虑技术、经济与安全等方面的综合性能对锅炉结构细节进行创新, 使其性能大幅度提升。

我们在认真剖析排烟温度 60 ℃、20 ℃ 的“冷凝锅炉”之后<sup>[1]</sup>, 并充分考虑技术与经济综合性能, 提出一种排烟温度 100 ℃ 的内燃锅炉, 不但效率高, 而且结构简单、钢耗也较少, 并在有限元计算分析基础上, 首次将无拉撑低应力拱形管板应用于内燃锅炉。现已开发采用拱形管板的 1 ~ 15 t/h 内燃锅炉系列化产品。

此种高效低应力内燃锅炉已经成功运行三载并经过严格能效测试与传热、流阻验证<sup>[1]</sup>。

### 1 传统型卧式内燃气/油锅炉特点分析

卧式内燃油/气锅炉历史悠久, 至今各国大量生

产使用。

有逾百年历史的卧式内燃三回程锅炉(见图 1)的突出优点是紧凑、快装, 一般用于燃气、燃油, 目前我国许多锅炉公司大量生产此型 1 ~ 20 t/h 锅炉。

此型锅炉的主要缺点:

(1) 热效率不高

目前, 此型锅炉的排烟温度一般为 200 ℃ 上下, 热效率约 90%, 这对于燃气/油锅炉明显偏低。

(2) 平管板拉撑件负面作用颇多

此型锅炉不受火的锅壳通过平管板上的拉撑件(斜拉杆、直拉杆等)与受火变形较大的内部元件(炉胆、烟管等)相连接, 形成刚性较大的整体。锅炉启动时, 炉胆、烟管等受火元件的膨胀因存在拉撑件而受到明显限制, 导致炉胆、烟管以及拉撑件的端部焊缝产生较大热应力, 对焊缝低周疲劳强度<sup>[3]</sup>产生明显不利影响作用。采用角撑板式拉撑件时, 刚性更大。另外, 直拉杆较粗, 如较长且中间支撑不当, 运输时颤动, 可能引起端部疲劳开裂。采用波形炉胆因柔性较大, 上述现象有所缓解, 但仍有呼吸空位要求。

收稿日期: 2015-08-28

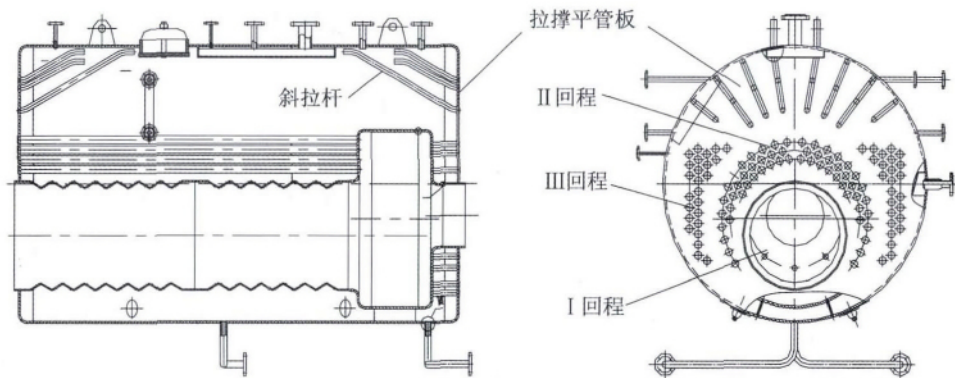


图1 传统卧式内燃三回程锅炉本体结构

(蒸汽型一般尚需附加外置省煤器)

平管板拉撑件端部焊缝应力较大且较复杂,还存在上述较大热应力;拉撑件在锅壳内部施焊,有时焊接质量欠佳与检验不到位,给锅炉安全带来较大隐患。况且,拉撑件占据一定空间,给锅壳内的检修工作带来不便。

锅壳强度爆破试验表明,如某一拉撑件焊缝破裂,相邻拉撑件的承载即刻成倍增大,可能导致管板破裂。锅炉受压元件中锅壳的水容积比其他元件大许多倍,破裂的后果十分严重。

由于以上诸原因,我国水火管锅壳锅炉的拉撑平管板已逐渐被无拉撑拱形管板所取代<sup>[2]</sup>。

### (3) 锅内过程处理不周

蒸汽型锅炉需要有效降低蒸汽湿度,热水型锅炉需要确保高温管板安全,但上述传统型内燃锅炉未做细致考虑与有效处理。随着技术发展,此种三

回程、拉撑平管板内燃锅炉需要变革创新。

## 2 新型卧式内燃锅炉的结构特点

1 ~ 15 t/h 与 0.7 ~ 10.5 MW 系列高效低应力卧式内燃燃气/油蒸汽与热水锅炉采用同一结构型式(见图2~图4)。此型锅炉特点:

- (1) 皆按排烟温度 100 °C 设计;
- (2) 用无拉撑低应力拱形管板(包括拱形后平板)取代国内外传统的拉撑平管板;
- (3) 锅炉本体采用双回程(炉胆与螺纹烟管束)<sup>[2,4]</sup>,外加尺寸不大的外置螺纹烟管筒式节能器。

### 2.1 蒸汽锅炉

高效低应力卧式内燃天然气蒸汽锅炉总体布置见图2,本体见图3。

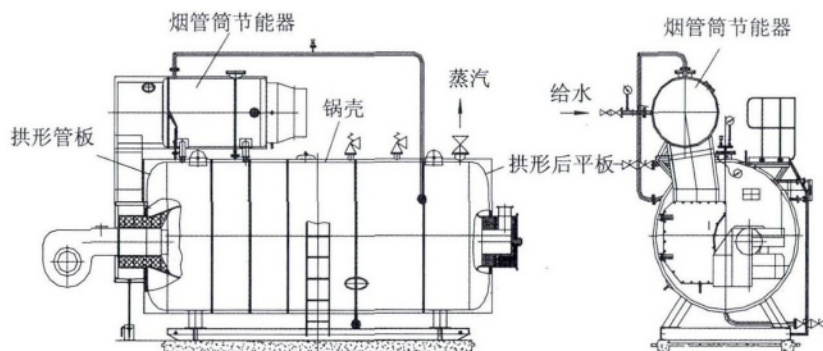


图2 高效低应力蒸汽锅炉总图

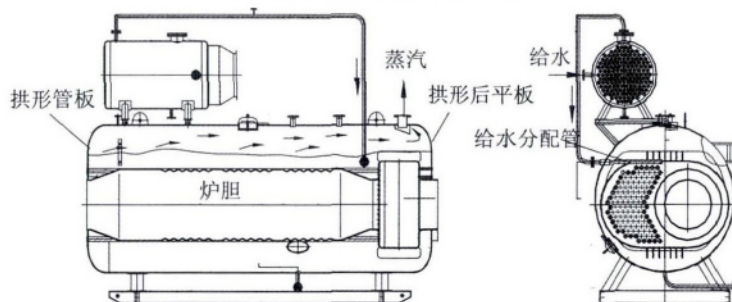


图3 高效低应力蒸汽锅炉本体与汽水流动示意图

烟气流程: 高温烟气由炉胆向后, 至跑道形回燃室 180°转弯, 经螺纹烟管束向前, 在连接烟道向上, 由螺纹烟管筒式节能器向后排出。全程烟气阻力由燃烧器背压克服。

汽水流程( 包含“水平流动高效汽水重力分离”): 给水经节能器加热( 提高约 50 ℃), 进入锅壳水位以下并引至烟管束入口附近变为多孔管向下流出以降低该部位水位, 有利于汽水分离( 见图 3)。锅壳水位以下, 靠水温差与汽水重度差形成锅水自然对流运动。锅壳水位以上, 蒸汽向后流动过程中进行高效汽水重力分离。蒸汽由锅壳后部引出。理

论分析与试验证实, 这种“水平流动汽水重力分离”方式可获得湿度颇低( 小于 0.5%) 的干蒸汽<sup>[2,4]</sup>。

2.2 热水锅炉

烟气流程: 与上述蒸汽锅炉相同。

水流程( 包含“回水冲刷保护高温管板”): 回水经节能器加热( 水温仅提高几度), 进入锅壳下部回水分配管。一部分回水经二根支管( 紧贴回燃室前管板与烟管束两侧) 的开孔与回水分配管的向上开孔喷向管束内部, 可降低高温管板壁温并起扰动作用, 以防止产生过冷沸腾现象<sup>[2]</sup>; 另一部分回水经回水分配管向前开孔, 流向炉胆下部。见图 4。

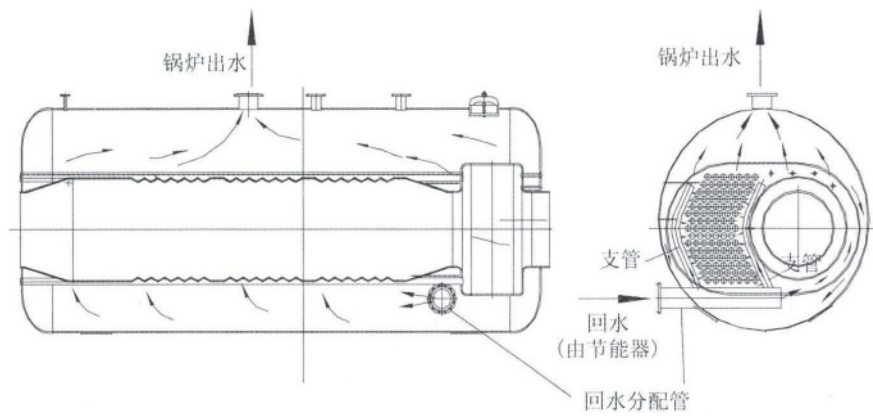


图 4 高效低应力热水锅炉本体与水流动示意图( 节能器同图 2 略)

3 新型卧式内燃锅炉的热效率与钢耗

与传统三回程锅炉相比, 此种排烟温度约为 100 ℃的内燃锅炉在结构并不复杂、钢耗较少的前提下, 使热效率提高约 5 个百分点, 可达 95%。对于天然气锅炉, 非额定工况下( 属于常态), 节能器一般在壁面冷凝状态下工作, 耗气量还会下降约 1 个百分点<sup>[1]</sup>。可见, 此种内燃锅炉在满负荷与低负荷工况下均处于高效运行, 其技术经济综合性能颇佳, 便于推广应用。

10 t/h、1.25 MPa 新型锅炉主要参数见表 1, 热

力计算数据见表 2, 全部钢耗见表 3、表 4。

表 1 主要参数

项目	单位	数值
排烟温度	℃	100
设计热效率	%	95.13
辐射受热面积	m <sup>2</sup>	23.8
对流受热面积	m <sup>2</sup>	121
烟管筒节能器受热面积	m <sup>2</sup>	43
锅炉折算蒸发率	( kg · h <sup>-1</sup> ) / m <sup>2</sup>	53.2

表 2 热力计算数据

序号	名称	符号	单位	炉胆	螺纹烟管	烟管筒节能器
1	入口烟温	$\theta'$	℃	—	1 286	298
2	出口烟温	$\theta''$	℃	1 286	298	100
3	烟气流速	$w_g$	m/s	—	21.4	14.5
4	平均温压	$\Delta t$	℃	—	422	139
5	传热系数	$K$	kW/( m <sup>2</sup> · ℃)	—	0.077 3	0.115 6

由表 1 可见, 排烟温度 100 ℃时锅炉设计热效率已达 95%。

由表 3、表 4 可见, 10 t/h、1.25 MPa 新型蒸汽锅炉钢耗较低, 全部钢耗不到 19 t; 7 MW 热水型锅炉的全部钢耗更低, 约 18 t。

此外, 与翅片管式节能器不同, 本锅炉节能器螺纹烟管壁厚的强度裕度颇大, 可采用碳钢; 因其钢耗较少, 也可改用 ND 钢。

为了验证此型锅炉在钢耗较低条件下能够达到高效率以及在回水温度低于露点温度情况下燃烧天



然气的冷凝率,我们专门对 1 t/h 试验锅炉进行了严格能效试验,试验结果完全达到设计预期,详见文献 [1]。

表 3 WNS 10-1.25-Q 高效率低应力  
内燃天然气蒸汽锅炉钢耗统计

项 目	内 容	重 量 /kg	合 计 /kg	钢水比/[t· (t·h <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup> ]
受压件 /kg	锅炉本体	14 047		
	烟管筒节能器	2 028	16 132	1.61
	仪表	57		
非受压件 /kg	支座	571.6		
	锅炉钢架	89.44		
	烟箱及烟道	405		
	外包装护板	729	2 460	0.25
	平台扶梯	346.5		
	预焊件	102.3		
	保温件*	215.8		
总计			18 592	1.86

注: \* 未计入保温材料 1 218(kg)。

表 4 WNS 7.0-1.0/95/70-Q 高效低应力  
内燃天然气热水锅炉钢耗统计

项 目	内 容	重 量 /kg	合 计 /kg	钢水比/[t· (t·h <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup> ]
受压件	锅炉本体	13 150		
	冷凝节能器	2 028.3	15 724	1.57
	仪表	545.86		
非受压件	支座	571.6		
	锅炉钢架	89.44		
	烟箱及烟道	405.6		
	外包装护板	728.95	2 460	0.25
	平台扶梯	346.5		
	预焊件	102.3		
	保温件*	215.8		
总计			18 184	1.82

\* 未计入保温材料 1 218 kg。

#### 4 拱形管板有限元强度分析

目前,对于内燃锅炉的管板,世界各国皆采用有拉撑件的结构型式,由于其受力结构复杂,安全可靠需要高度关注。我国在取消拉撑件的拱形管板方面经过认真研究与开发,已经在锅壳锅炉上应用约三十年,积累了丰富成熟经验<sup>[2]</sup>。我们在有限元计算分析基础上,首次提出将无拉撑低应力拱形管板应用于内燃锅炉。

内燃锅炉拱形管板由凸形与平板两部分组成。平板部分开设炉胆孔与大量烟管孔(见图 5),其中平板“边缘区”由于与凸形部分相连接处不存在拉撑,不能按“假想圆”按标准进行强度计算<sup>[3]</sup>,其强

度问题需要专门考虑。

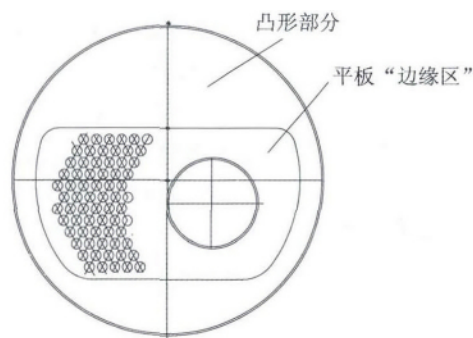


图 5 内燃锅炉拱形管板平板“边缘区”示意图

##### 4.1 平板“边缘区”的强度问题

###### (1) 新型水火管锅壳锅炉平板“边缘区”强度

20 世纪 80 年代,我国水火管锅壳锅炉开始应用性能明显优越的低应力拱形管板<sup>[2]</sup>。当时,国内有关工厂、大学、研究所分工进行研究<sup>[5-7]</sup>,之后基于有限元计算分析,提出简易计算方法<sup>[8]</sup>,得到国家锅炉监察部门认可,并被纳入 GB/T 16508—1996 锅壳锅炉强度计算标准<sup>[9]</sup>,后续标准<sup>[10]</sup>继续应用。至今,拱形管板在我国水火管锅壳锅炉上得到大量应用。

当时新型水火管锅壳锅炉采用的拱形管板,其平板“边缘区”的宽度不大(见图 6),故制订 GB/T 16508—1996 标准(6.4.2.2 条)明示“一般宽度不大,可不进行校核”,而编制说明写明“边缘宽度达 200 mm 或再大一些是可行的”<sup>[3]</sup>,可见,标准规定的宽度很小,而可以放大多少也不够明确。但是,该标准(6.4.2.1 条)规定强度计算时,将边缘区与凸形部分视为一体,按凸形(椭圆形)元件公式计算,即椭圆线长半轴包含平板边缘区与凸形部分两项。这样,就预计可能遇到的不同尺寸平板边缘区的强度一般不会出现。现行标准也这样规定<sup>[10]</sup>。尽管如此,仍需要给出明确定量回答,否则难以实施。

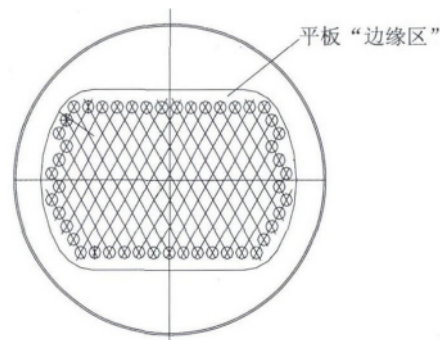


图 6 新型锅壳锅炉拱形管板平板“边缘区”示意图

###### (2) 卧式内燃锅炉平板“边缘区”强度

卧式内燃锅炉平板“边缘区”的宽度(见图 5)明显大于新型锅壳锅炉(见图 6),其强度问题必须

认真对待。我国锅炉强度计算标准明确规定:不能按标准计算的元件可采用应力分析验证法(有限元计算法)与实验验证法解决。有限元计算法由于按已有国际通用程序计算的结果与应力实测相当吻合,又容易实现,故采用此方法解决平板“边缘区”强度问题十分必要,以使拱形管板在卧式内燃锅炉上也能得以推广应用。

#### 4.2 卧式内燃锅炉平板“边缘区”强度有限元计算结果

图7所示为高效低应力卧式内燃锅炉的拱形管板,其边缘区的最大宽度a-b位于炉胆上方。

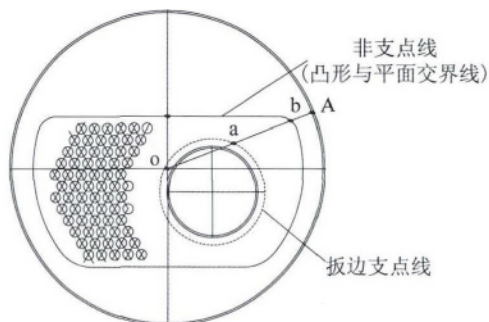


图7 平板“边缘区”最大宽度示意图

##### (1) 有限元计算方法

按国际通用有限元计算程序,建立计算模型,计算模型按实际结构进行简化,但不影响对原结构的应力分析。一般取拱形管板与相连锅壳、炉胆、烟管的较短一段为计算模型。

锅壳、炉胆、螺纹烟管的切割端面可视为“固定”约束。对于圆筒壳,端部约束只影响很短一段距离<sup>[3,11]</sup>,因此,这样处理不会引起较大偏差。

网格划分:自动进行。

炉胆、螺纹烟管外表面施加外压力,管板、锅壳内表面施加内压力。

有限元计算给出a-b剖面的应力强度(当量应力值)分布,包括内外壁的平均膜应力以及内壁与外壁的弯曲应力、二次应力与峰值应力值<sup>[3]</sup>。还应探测其周围的应力值。

##### (2) 有限元计算结果的判定

按应力分类与控制原则的规定(美国ASME规

范、我国现行水管锅炉与锅壳锅炉标准皆一样),对于碳钢拱形管板:

膜应力  $\sigma_{d(m)} \leq [\sigma] = 125 \text{ MPa}$  (200 °C 以下),  
膜应力 + 弯曲应力  $\sigma_{d[m+w]} \leq 1.5 [\sigma] = 188 \text{ MPa}$ ,  
膜应力 + 二次应力  $\sigma_{d[m+e]} \leq 3 [\sigma] = 375 \text{ MPa}$ ,  
膜应力 + 二次应力 + 峰值应力的合成应力的允许应力幅  $\frac{1}{2}$

$\sigma_{d[m+e+f]} \leq [\sigma_a] \approx 350 \text{ MPa}$ 。以上公式中  $\sigma_d$  表示当量应力,  $[\sigma]$  为材料许用应力,按标准<sup>[10]</sup>取;  $[\sigma_a]$  为允许应力幅,按工业锅炉最大可能起停次数  $10^4$  考虑<sup>[3]</sup>。

前述1~15 t/h与0.7~10.5 MW系列高效率低应力卧式内燃燃气/油蒸汽与热水锅炉所设计的拱形管板(拱形后平板)有限元计算结果皆满足上述应力控制原则的要求,经锅炉质检部门审批后,得以应用。

由于拱形管板在我国新型水火管锅壳锅炉上得到大量应用,并有专门厂家生产,因此,内燃锅炉使用拱形管板并不困难。■

#### 参考文献

- [1] 梁耀东,李之光,刘峰,等. 冷凝燃气锅炉评价与热效率计算[J]. 工业锅炉, 2015(4): 36-41.
- [2] 李之光,李柏生. 新型锅壳锅炉原理与设计[M]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [3] 李之光. 锅炉强度标准应用手册(增订版)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [4] 李之光,梁耀东,牛全正,等. 工业锅炉现代设计与开发[M]. 北京: 中国质检出版社, 中国标准出版社, 2011.
- [5] 李之光,王昌明,刘福田,等. 新型水火管锅壳锅炉凸形管板的论述[J]. 工业锅炉, 1997(3): 9-13.
- [6] 董芑,刘曼青,李之光. 烟管锅炉拱形管板强度的研究[J]. 工业锅炉, 1987(2): 1-10.
- [7] 李之光,李志强,刘曼青,等. 凸形管板的强度计算问题[J]. 工业锅炉, 1992(3): 5-14.
- [8] GB/T 16508—1996 锅壳锅炉受压元件强度计算[S].
- [9] GB/T 16508.3—2013 锅壳锅炉设计与强度计算[S].
- [10] 李之光,蒋智翔. 锅炉受压元件强度[M]. 北京: 技术标准出版社, 1980.