

组合螺纹烟管锅炉性能与安全可靠性

李之光 傅友红 梁耀东 徐 甫 刘 峰 王叶福 北京盛昌锅炉公司

摘 要 本文对钢耗颇低——为目前常用水管锅炉的60%~70%，而且制造安装颇简易的“组合螺纹烟管锅炉”的结构与性能作了详细论述，并全面分析了其中“螺纹烟管筒”的工作特点与安全可靠性问题。

关键词 结构 性能 安全可靠性 立式烟管筒 组合螺纹烟管锅炉

Abstract This article discussed the simplest manufacture and assemblies of combined corrugated fire-tubes boiler, of which the steel consumption is very low——only accounting for 60%-70% in the common water tube boiler, also analyzed the technical problems and reliable performance of the unique vertical fire-tubes drum.

Keywords Structure Characteristics Reliable performance Vertical Fire-tubes Drum Combined corrugated fire-tubes boiler

我国数量最多的水管锅炉、水火管锅炉与内燃式火管锅炉三种工业锅炉系列中，“除水火管锅炉具有中国特色外，其它不管是水管锅炉还是内燃式锅炉，其基本型式与国际上流行的型式大同小异。目前仍占相当大比例的水火管锅炉，经过研究改善技术进一步完善，仍将是我国工业锅炉的主要型式之一”^[1]。

完全由国人自行开发的始创1965年的水火管锅炉，经过结构变革、技术完善，现已出现第三代产品——组合螺纹烟管锅炉。

1 组合螺纹烟管锅炉的结构特点

组合螺纹烟管锅炉仅由炉膛辐射受热面与螺纹烟管筒对流受热面两部分组成。它与新型水火管锅壳锅炉的重要区别是用多个小直径烟管筒代替大直径含烟管的锅壳。螺纹烟管筒对流受热面明显区别于目前水管锅炉常用的对流受热面（排管式、蛇形管式、鳍片U形管式等）。

1.1 热水型

29MW组合螺纹烟管热水锅炉（ZLL29-1.0/115/70）总图，如图1所示。

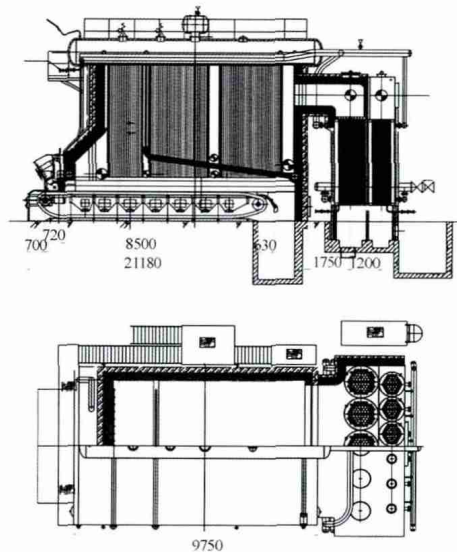


图1 29MW组合螺纹烟管热水锅炉结构

29MW组合螺纹烟管热水锅炉水动力系统（各种容量热水型皆相同），如图2所示。供热系统回水进入各烟管筒下部，向上强制流动并汇集进入锅筒内的进水分管，经喷口与被引射的锅水一并进入炉膛各回路下降管以提高上升管水速。热水由锅筒顶部进入供热系统。

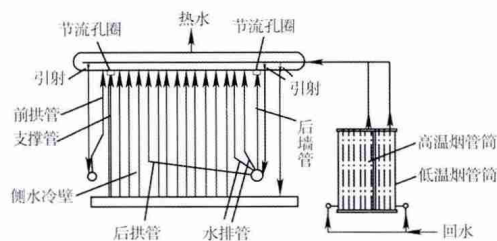


图2 组合螺纹烟管热水锅炉水动力系统示意图

29MW组合螺纹烟管锅炉炉膛内除水冷壁、前拱管、后墙管外，还在炉膛后部设置2排稀疏水排管，使炉膛出口烟温降至约900℃。锅炉折算蒸发率高达 $49(\text{kg}/\text{h})_{\text{折算}}/\text{m}^2$ 。钢耗：受压件43.1t，结构件16.4t，总计59.5t，与参数相同的其它炉型相比，锅炉钢耗最少。锅炉高度（至锅筒出口法兰）明显偏低——仅为7.865m。

炉膛空间较大，也适于燃烧生物质与油-气；生物质燃烧易结渣，烟管便于清理。

高温烟管筒，1300×10mm，高度3500mm，每个重量3.6t，共5个；低温烟管筒，1000×10mm，高度3500mm，每个重量2.13t，共6个。

ZLL29-1.0/115/70-A 型组合螺纹烟管锅炉能效测试结果见表1。

环保测试结果：烟气黑度(林格曼级) < 1，烟尘排放浓度 $49.5\text{mg}/\text{m}^3$ ，二氧化硫排放浓度 $32.4\text{mg}/\text{m}^3$ 。

测试结果，各项性能皆达到或优于有关规范要求。

已设计的70MW组合螺纹烟管热水锅炉结构型式与29MW组合螺纹烟管锅炉基本相同。

高温烟管筒，1700×10mm，高度3600mm，每个重量6.9t，共6个；低温烟管筒，1400×10mm，高度5000mm，每个重量6.56t，共7个。

表1 ZLL29-1.0/115/70-A 组合螺纹烟管锅炉能效测试结果

序号	项目	符号	单位	设计值	测试值	规范标准限定值、推荐值
1	锅炉出力 Q / MW			29	28.24	$\frac{28.24}{29} \times 100\% = 97.4\%$ ，规范要求实际出力为设计值的97% - 105%
2	排烟温度 t_{py} /			163	151.2	规范要求，170
3	排烟处过量空气系数 α_{py}			1.5	1.62	规范要求，< 1.65
4	燃料收到基低位发热量 $Q_{\text{net,v,ar}}$ / (kJ/kg)			17693	17655	规范，二类烟煤的热值范围为17700 ~ 21000
5	锅炉介质循环流量 G / (kg/h)			554000	551000	
6	锅炉进口介质温度 t_{in} /			70	30.75	标准规定 $t_{\text{in}} - t_{\text{in}}$ 测试值与设计值之差不得大于 $\pm 5^\circ\text{C}$ ，对于燃煤锅炉，出水温度与额定温度相差 $\pm 15^\circ\text{C}$ 时，热效率数值下降1%；不足或大于上述温度时，按比例折算。
7	锅炉出口介质温度 t_{out} /			115	74.85	
8	燃料消耗量 B / (kg/h)			7205	6692.42	
9	入炉冷空气温度 t_{lk} /			20	22.4	
10	排烟热损失 q_2 / %			7.8	7.57	
11	气体未完全燃烧热损失 q_3 / %			0.5	0.2	
12	固体未完全燃烧热损失 q_4 / %			8	5.7	
13	散热损失 q_5 / %			1.0	0.8	
14	灰渣物理热损失 q_6 / %			0.822	0.77	
15	反平衡效率 η_z / %			81.9	84.96	$100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) = 100 - (7.57 + 0.2 + 5.7 + 0.8 + 0.77)$
16	考虑水温较低的折算热效率 $\eta_{\text{折}}$ / %			81.9	82.28	$84.96 - 2.68$ （其中2.68为按标准的要求进行的效率折算值 $-\left(\frac{115-74.85}{15}\right)\% = -2.68\%$ 。 规范要求，> 80（限定值）

注：本锅炉由辽宁省安全科学研究院暨辽宁锅炉产品性能质量监督检验中心测试。

受压件115.0t, 结构件38.0t, 总计153.0t, 与参数相同的其它炉型相比, 本型锅炉钢耗最少。

锅炉高度(至锅筒出口法兰)明显偏低——仅约11m, 锅炉长度比同容量一般水管锅炉略短; 锅炉宽度与各种同容量锅炉大致相同。

1.2 蒸汽型

已投运的10t/h组合螺纹烟管蒸汽锅炉,如图3所示。

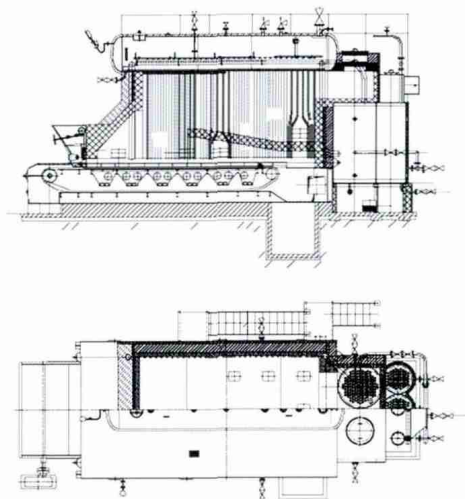


图3 10t/h蒸汽型组合螺纹烟管锅炉结构

10t/h组合螺纹烟管蒸汽锅炉的锅内设备, 如图4所示, 各种容量组合螺纹烟管蒸汽锅炉皆采用这种简易高效汽水分离设备。

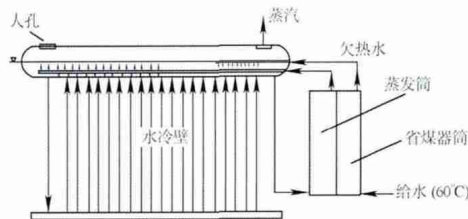


图4 简易高效汽水分离设备示意图

结构特点:

1) 蒸发筒汽水混合物引出管进入锅筒后封头水位以下, 向前延伸至锅筒前部, 变为水下多孔管。锅炉水冷壁前部与蒸发筒的产气量之和约占锅炉总蒸发量的80%, 蒸汽在向后水平运动中进行有效重力分离, 试验证实可获得湿度颇低的蒸汽^[2, 3]。

2) 省煤器筒出口的 水引入锅筒后部水下, 利用给水的欠热使水位有效降低^[2], 增加汽空间高度; 也减少外部管路长度。

3) 蒸汽由水位最低的锅筒后部经蒸汽引出罩引出。

2 组合螺纹烟管锅炉的性能特点

这种新开发的工业锅炉具有以下两大突出优点与其它一些性能特点。

2.1 两大突出优点

2.1.1 钢材消耗明显下降

由于采用高效传热螺纹烟管、自身支撑结构等措施, 并经优化设计, 受热面分配合理、水流程合理, 钢耗显著下降。

钢水比是锅炉的重要性能指标, 一些代表性锅炉的钢耗与钢水比见表2。

2.1.2 制造、运输、安装明显简便

锅炉对流受热面由较小直径较短螺纹烟管筒组成, 结构简单, 易于组合集成, 单件最大重量显著减小, 制造、运输、安装明显优于新型水火管锅壳锅炉, 更优于其它炉型。

2.2 其它性能特点

2.2.1 容量与压力不受限制

采用较小直径组合螺纹烟管筒, 锅炉容量与压力参数可明显增大与提高。

2.2.2 大容量锅炉高度明显低于其它炉型

已设计的58MW组合螺纹烟管锅炉的高度仅10m(至锅筒出口法兰), 比同容量新型水火管锅壳锅炉约低2m, 而大容量新型水火管锅壳锅炉与同容量其它型锅炉相比, 是明显偏低的。

已设计的70MW组合螺纹烟管锅炉的锅炉高度仅11m(至锅筒出口法兰)。

已设计的116MW组合螺纹烟管锅炉的高度仅12m(至锅筒出口法兰), 甚至比29MW单横锅筒水管锅炉还低2.5m。

大容量组合螺纹烟管锅炉高度明显偏低, 给锅炉房建设投资带来相当大的效益。

2.2.3 安全可靠性充分保证

1) 此型锅炉的烟管筒直径明显小于锅壳, 烟管筒又立置, 则高温管板易于可靠绝热, 一般不存在高温

表2 各种锅炉的钢耗与钢水比对比

炉型	锅炉型号	钢耗 (t)			钢水比蒸汽锅炉t/(t/h) 热水锅炉t/(t/h) 折算			受压件+结构件 平均值的对比 (倍数)
		受压件	结构件	受压件+ 结构件	受压件	受压件+ 结构件	受压件+结构件的 受压件+结构件的平均值	
组合螺纹烟管锅炉	ZLL4-1.25	5.44	1.80	7.24	1.36	1.81	1.65	1.00
	ZLL2.8-0.7/95/70	4.97	1.81	6.78	1.24	1.69		
	ZLL10-1.25	12.6	4.40	17.0	1.26	1.7		
	ZLL20-1.25	22.8	9.6	32.4	1.14	1.62		
	ZLL29-1.0/115/70	43.1	16.4	59.5	1.08	1.49		
	ZLL70-1.0/130/70	115.0	38.00	153.00	1.15	1.53		
新型水火管锅壳 锅炉*	DZL4-1.25	7.30	2.70	10.00	1.83	2.52	1.96	1.19
	DZL2.8-0.7/95/70	5.60	2.18	7.78	1.41	1.94		
	DZL10-1.25	15.60	3.90	19.50	1.56	1.95		
	DZL20-1.25	29.70 30.0	9.10 11.6	38.80 41.6	1.49	1.94		
	DZL29-1.0/115/70	54.30	11.80	66.10	1.36	1.65		
	DZL70-1.25/130/70	139.0	35.40	174.40	1.39	1.74		
单锅筒横置 水管锅炉	DHL20-1.25	32.0	30.0	62.0	1.6	3.1	3.00	1.82
	DHL58-1.25/115/70-A	118.9	110	228.9	1.38	2.86		
	DHL70-1.25/130/70-A	161.8	143.2	305	1.62	3.05		
双锅筒横置 水管锅炉	SHL29-1.0/115/70-A	59.2	46.5	105.7	1.48	2.64	2.84	1.72
	SHW46-1.25/115/70-H	136	77	213	2.09	3.28		
	SHW84-1.25/130/70-A	222	90	312	1.85	2.6		
双锅筒纵置 水管锅炉**	SZL20-1.25	33.0	23.0	56.0	1.65	2.8	2.26	1.37
	SZL20-1.25	32.7	16.9	49.6	1.64	2.48		
	SZL14-1.0/115/70-A	24	6	30	1.2	1.5		
角管锅炉	DHL20-1.25	35.0	26.0	61.0	1.75	3.05	2.51	1.52
	DHL29-1.6/115/70-A II	64.34	38.327	102.67	1.609	2.567		
	DHL46-1.6/130/70-A II	98.84	60.51	159.352	1.521	2.452		
	DHL58-1.6/130/70-A II	117.9	70.267	188.229	1.475	2.353		
	DHL70-1.6/130/70-A II	134.0	79.849	213.897	1.34	2.139		

注：* 容量不宜大于100蒸吨，压力不宜高于2.5MPa；** 长短锅筒型，容量不宜大于40蒸吨。

说明：压力为1.0MPa~1.6MPa的总钢耗与压力大小的关系不大；

组合螺纹烟管锅炉大容量仍采用一般水冷壁，如改用膜式水冷壁，对上述总钢耗的影响并不显著。

管板开裂问题。

2) 因螺纹烟管筒直径较小且为立式布置，下部积垢区域较小，有利于排污。螺纹烟管筒的下部烟温不超过350℃，即使下管板内壁积存污物，管板也不可能产生裂纹。

3) 此锅炉采用回水引射技术，不仅保证了正常运

行时的安全水速，也具有停电自身保护功能。

2.2.4 磨损、积灰的可能性减小

1) 炉膛空间较大，烟气中灰尘重力沉降效果显著，从而减小烟管磨损的可能性。

2) 烟管双回程使各回程的烟气出入温度差值不很大，烟气速度的差值也不很大，有利于防止入口磨损

与出口积灰。

2.2.5 锅炉热效率有所提高

螺纹烟管筒的漏风量小于水管锅炉尾部受热面，排烟热损失减小；螺纹烟管筒的筒外壁温较低，散热损失下降，则锅炉热效率有一定提高。

2.2.6 锅炉原始排尘浓度有所降低

锅炉除炉拱上部大空间重力沉降灰尘以外，又增加组合烟管筒下部烟气180°转弯惯性离心分离灰尘，运行表明，效果显著，锅炉原始排尘浓度明显降低。

2.2.7 因螺纹烟管筒数量较多而带来的缺点

- 1) 因烟管筒焊缝总长度增加，探伤工作量增大；
- 2) 排污阀门与排污管路增多。

3 螺纹烟管筒及其安全可靠性能

螺纹烟管筒如图5所示，是组合螺纹烟管锅炉的独特结构，可利用新型水火管锅壳锅炉三十年来所积累的螺纹烟管实践经验并做必要的理论与计算分析来充分发挥其热力特性优点，并确保其安全可靠运行。

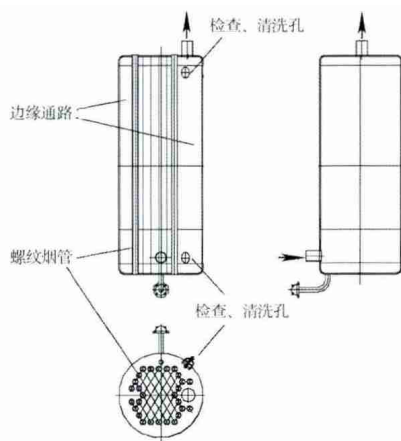


图5 螺纹烟管筒示意图

3.1 高温管板入口管端可靠性

组合螺纹烟管锅炉高温烟管筒入口烟温不超过950℃。而卧式内燃锅炉高温管板入口烟温（回烟室温度）国内外一般为1000~1100℃或更高，尽管管板外壁未铺设耐火隔热层，当管端结构满足锅炉强度标准要求^[4]，而且锅水水质也满足水质标准要求时，管板长期运行安全可靠。但是，由于我国目前一些工厂的工艺与质检欠佳，对于高温烟管筒的入口管端，不得不采取以下补充防范措施（设第二道防线）。

实践证实，高温管板外壁铺设耐火隔热层是保护管板颇为有效的措施。高温烟管筒的上部为水平管板，很易铺设耐火隔热层。计算分析表明，隔热层厚度30~50mm已足够，并利用1~2mm厚，100~150mm长的1000℃耐热钢套管或耐热陶瓷套管，由隔热层入口插入烟管内壁，用以保护烟管入口段，也使隔热层各孔的边缘不可能脱落。

3.2 立式烟管筒上部形成气（汽）垫的可能性

热水型：按相似原理建立的烟管筒模型试验^[5, 6]表明：烟管筒上水时，无论上水速度快慢，筒内空气皆能由上部的出水管顺利排出；试验还表明，水中含有小气泡时，皆能随水排出，因而，不可能在管板之下形成气垫。

蒸汽型：多种模型试验观察表明，低压锅炉汽水混合物的向上冲力与扰动性颇大。只要引出管不伸出管板内壁，烟管各处产生的汽水混合物必然冲向烟管筒上部并由引出管排出，不存在汽水分离条件，不可能形成汽（气）垫。

3.3 各烟管筒流量分配问题

热水型高温烟管筒与低温烟管筒两排之间的流量分配应与吸热量相匹配，以保证两排的出口水温偏差不大；每排烟管筒之间的流量分配亦应尽量均匀，以使每排中各烟管筒之间的出水温度偏差也不大。所有组合螺纹烟管筒的水温偏差不得超过10℃。

3.4 高温烟管筒局部沸腾与过冷沸腾问题

烟管筒内壁与烟管束外圈之间存在“边缘通路”（见图5），如其中旁通的水量（基本不加热）过多，则烟管束的流量必然过小，上部可能产生沸腾。另外，烟管入口区段因其中烟速较高，对流换热较强，且有一定辐射换热，即使总体未沸腾，如水流速过低也可能产生壁面过冷沸腾现象。相似规律的模型试验表明，克服短路及提高水速的有效措施是，在烟管筒边缘通路设置隔板，迫使大部分水流进入烟管束上部并使水流横向冲刷烟管束，上述问题即得以解决。

3.5 低温烟管筒（省煤器）不设置再循环管问题

碳钢受压件壁温的许用值各国有关规程皆规定约为500℃，因为超过500~550℃有可能氧化起皮、

蠕变变形。

不同锅炉省煤器在尾部烟道的位置不同。如省煤器在额定负荷条件下的烟温不超过500℃，锅炉启动点火时的烟温会低于500℃。即使省煤器介质于点火时全部烧干，其壁温也不会超过500℃，不可能烧坏。因此，低温烟管筒（省煤器）无需设置再循环管。

3.6 烟管外壁结垢问题

任何锅炉的补充水皆应按相关规程要求进行水处理（过滤、除硬度、除氧等），以防结垢、氧化、腐蚀现象的发生。

因不除硬度引起水冷壁爆管、管板开裂等事故在我国至今未能完全杜绝。为防止烟管筒的烟管外壁结垢，与其它锅炉受热件一样，也要求保证水质满足标准要求，并对其进行经常性检查。

锅壳锅炉烟管束的内部无法观察与接触到，当烟管为错排布置时尤其如是。一般是通过人孔进入锅壳内部，观察管板附近烟管束的外圈烟管状态，由于其内部情况与此基本相同，则烟管束的内部情况也就间接得知。组合螺纹烟管锅炉的烟管筒不可能设置人孔，仅设置检查、清洗孔（见图5），同样可观察到烟管束的外圈烟管状态。螺纹烟管筒不是锅壳，不必满足锅壳锅炉对锅壳内径大于1000mm应设置人孔的要求。

3.7 烟管外壁氧化腐蚀问题

低温烟管筒（省煤器）为立式布置，如给水不除氧，受热析出的极少量气泡会随水一并流向引出管，因而实践表明烟管氧化现象一般不易发生。当然，有关规程对大容量锅炉除氧的要求，应认真执行。

3.8 烟管内壁积灰与结渣问题

锅炉调试期间，可能遇到很低负荷，锅炉也有可能在低于一半负荷下运行，此时由于烟管筒后部烟速较低（小于5~6m/s），会逐渐积灰。燃烧生物质时，也可能于高温烟管筒的烟气入口处结渣。在上述情况下，可利用正对烟管筒上部的检查孔与进入烟管筒下部的烟气转向室进行清理。如不清除积灰，额定负荷下的排烟温度可能会明显升高。

3.9 烟管入口磨损问题

高温烟管筒的烟气入口处烟速较高，当灰的硬度

偏高，又经常在满负荷条件下运行时，烟管入口处有可能磨损。可更换有磨损迹象的耐热钢套管；如采用耐热陶瓷套管，不可能明显磨损。

3.10 烟管内壁露点腐蚀问题

任何一种受热面的壁温皆趋向于放热系数较大的介质温度。由于锅水放热系数要比烟气放热系数大数十倍，则壁温颇接近水温，计算表明：壁温仅高出水温几度。

大量新型水火管锅壳锅炉运行近三十年，大部分热水锅炉的额定出水/回水温度为95/70℃，而实际运行各偏低10~20℃，则锅壳中烟管束下部运行水温也较低，不超过50~60℃，烟管壁温也基本如此。但一般皆未发现烟管尾部低温烟气露点腐蚀问题。

以上情况与我国锅炉用燃料的含硫量偏低有关——目前，由于环保的限制，烟煤一般皆为低硫煤（大部分含硫量 S_{ar} 约为0.5%~1.5%），天然气、生物质的含硫量更是低得多。烟管壁温为50~60℃，壁面无疑已具备结露条件，但烟气温度在150℃以上，且有一定速度的烟气冲刷壁面，也不会发生结露现象。

组合螺纹烟管热水锅炉，回水一般直接进入高温烟管筒与低温烟管筒的下部，回水温度略低于锅壳锅炉锅壳底部水温（约低10℃）；组合螺纹烟管蒸汽锅炉，低温螺纹烟管筒为省煤器，给水进入底部，如给水温度较低时，烟管壁温也较低。但水温低的上述部位的烟温较高（约350℃）。因此，无必要采取专门措施防止产生烟气露点腐蚀。

参考文献

- 1 王善武.中国工业锅炉节能减排面临的挑战与对策建议.第三届中国工业锅炉节能减排国际论坛会议资料,2013
- 2 李之光等.工业锅炉现代设计与开发.北京:中国质检出版社,中国标准出版社,2011
- 3 李志宏,刘复田,李之光等.新型水火管蒸汽锅炉汽水分离特点与效果.工业锅炉,2010,(6):25~27
- 4 李之光.锅炉强度标准应用手册(增订版).北京:中国标准出版社,2008
- 5 李之光.相似理论与模化(理论及实用).北京:国防工业出版社,1982
- 6 梁耀东,李之光等.组合螺纹烟管锅炉烟管筒水动力模型试验总结,北京盛昌锅炉公司,2012

（收稿日期 2013 - 12 - 23）