

美国 Nucla 电站 420 t/h 循环流化床锅炉 燃烧、传热及污染物生成的研究

刘皓 黄琳 刘德昌 林志杰
(华中理工大学)

[摘要]美国 Nucla 电站的 420 t/h 循环流化床锅炉是世界是投运最早的大型循环流化床锅炉之一,该电站经长期运行,在实际循环流化床锅炉上系统地进行了燃烧效率、锅炉热损失分配、吸热量分配、传热、脱硫及气体污染物排放等试验,并对试验数据进行整理得出了相关的半经验关系式。

关键词 循环流化床 传热 燃烧 污染 美国

分类号 TK229.66

1 引言

解决能源短缺和与燃烧有关的环境保护是当今世界普遍关注的问题。煤粉燃烧虽然燃烧效率高,但其污染严重,对煤种要求高,负荷调节性差;鼓泡流化床燃烧虽然污染小,煤种适应性广,但存在着效率低,埋管磨损严重,脱硫剂利率低,给煤布置困难等问题。循环流化床燃烧技术兼有这两种燃烧方式的优点,克服了其缺点,不仅燃烧效率高,对煤种适应性好,而且污染小,负荷调节性好,灰渣还可综合利用,因此发展前途很大。

目前美国、芬兰、西德等国的循环流化床技术发展很快,并且有成熟的产品及丰富的运行经验。我国的流化床燃烧技术虽然起步较早,在鼓泡流化床锅炉的研究和运行方面都取得了可观的进展,但在循环流化床锅炉大型化方面与国际先进水平相比还有较大的差距,引进国外的大型循环流化床技术是我

国流化床事业发展的一大趋势,美国 Nucla 电站对 420 t/h 循环流化床锅炉进行了燃烧、传热及污染物生成的大量试验研究,研究结果必将对我国的循环流化床锅炉的设计和运行起到重要的借鉴作用。

2 锅炉简介

该循环流化床锅炉出力为 420 t/h,压力 10.3 MPa,蒸汽温度 540℃,具有两个燃烧室,高 33 米,图 1 为锅炉的结构示意图。两个燃烧室配有单独的煤、空气、石灰石供给系统和灰渣处理系统,共用一个汽包和水循环系统。

煤靠自重从前墙两个点送入炉膛,也可从每个燃烧室后墙的料腿送入;石灰石靠空气送至前、后墙的给煤点附近,每个燃烧室侧墙还有一个石灰石供给点。

收稿日期 1994 12 09

本文联系人 刘皓 男 30 讲师 430074 武汉

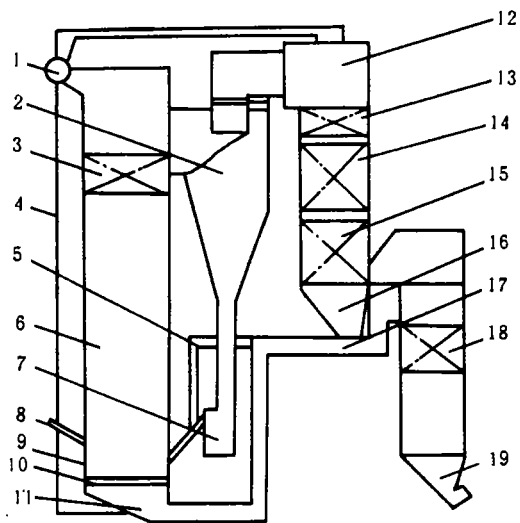


图 1 锅炉结构示意图

- 1. 汽包 2. 除尘器 3. 过热器(I) 4. 下降管 5. 二次风管 6. 燃烧室 7. 送灰器 8. 给煤管 9. 点火枪
- 10. 布风板 11. 风箱 12. 对流段 13. 过热器(II)
- 14. 过热器(I) 15. 省煤器 16. 灰斗 17. 一次风管
- 18. 空气预热器 19. 灰斗

3 燃烧特性试验

在 50% 负荷工况下, 床温为 790—840℃; 100% 负荷工况下, 床温达到 927℃。调整灰渣冷却器内流化空气的速度、总床料量 and 一、二次风率对温度的分布没有很大的影响, 而煤的含灰量对粒子浓度和温度分布

影响很大。

全负荷下, 两个燃烧室温度差超过 38℃, 燃烧室 B 温度高。试验得出, 床温对燃烧和气体排放浓度均有很大影响。

改变负荷等参数, 得到不同工况下的燃烧效率, 结果见表 1。

表 2 为燃烧 Peabody 煤得到的锅炉热损失分配结果, 表 3 为碳的不完全燃烧损失分配情况。

燃用三种不同的烟煤 (Peabody 煤 Salt Creek 煤和 Dorchester 煤) 时, 负荷、过剩空气系数、一次风和二次风配比、给煤方式对燃烧效率没有明显的影响, 燃烧效率为 (96.9—98.9)%, 锅炉效率为 (85.6—88.6)%

4 传热试验

通过对工质流量、压力、温度的测量, 得到表 4 所列的锅炉各部分吸热量分配, 大约 65% 的热量被水冷壁和第二级过热器吸收。

影响床温的最重要因素为负荷、过量空气系数和燃烧室压差。测试表明: 燃烧室 B 运行温度及除尘器入口温度相应地高于燃烧室 A 对应的温度, 燃烧室 B 的循环灰粒粒径大于燃烧室 A 的循环灰粒粒径。煤的含灰量越高, 运行床温越低。

表 5 为燃烧室 B 的传热量。

表 1 燃烧效率

燃烧效率 (%)	负荷 (MW)	过量空气系数 (%)	飞灰床灰比	飞灰含碳量 (%)	床灰含碳量 (%)	烟气 CO 含量 (PPM)
98.1	105	23	4.9	7.5	1.0	99
98.6	82	22	4.5	6.5	0.8	79
97.6	105	21	4.6	10.6	2.5	80
97.6	55	39	1.7	8.3	2.2	93
98.3	82	25	3.7	5.7	1.4	73

表 2 锅炉热损失分配(占输入热量百分比,%)

项 目	平均值	最小值	最大值
碳不完全燃烧损失	2.1	1.6	2.3
排烟	4.7	4.5	4.0
燃料及脱硫剂水分气化热	0.6	0.5	0.7
气体不完全燃烧损失	3.2	2.9	3.3
脱硫剂煨烧	0.3	0.1	0.5
散热	0.5	0.4	0.0
灰渣冷却水热损失	0.6	0.5	0.8
其它	0.2	0.2	0.2

表 3 碳不完全燃烧损失分配(%)

飞灰含碳	床灰含碳	烟气含 CO
93	5	2

表 4 锅炉各部分吸热量分配

锅炉负荷(MW)	100	104	104	82	82	82	55	104
过量空气系数	20.9	19.4	19.8	24.5	25.4	24.4	38.5	19.0
炉内吸热 (%)								
燃烧室	55.2	55.6	55.9	55.5	55.3	55.8	57.0	55.7
过热器(I)	11.4	11.4	11.3	10.8	10.8	10.9	9.9	11.5
总计	66.6	67.0	67.2	66.3	66.1	66.7	66.9	67.2
尾部受热面吸热(%)								
过热器(I)	14.2	14.2	14.3	14.2	14.4	14.3	13.1	14.3
过热器(II)	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5	4.5	3.7	4.7
省煤器	11.0	11.0	10.6	11.2	11.5	10.9	12.3	10.6
壳体	3.3	3.0	3.2	3.7	3.5	3.6	4.0	3.2
总计	33.4	33.0	32.8	33.7	33.9	33.3	33.1	32.8

表 5 燃烧室 B 传热量

负荷 (MW)	离布风板高度 (m)	传热量 (MJ/m ²)	燃烧室温度 (°C)	流化速度 (m/s)	烟气含氧量 (%)
104	6--12	364.46	895.5	4.72	3.48
	12--21	349.78	899.4		
	21--34	360.38	903.3		
82	6--12	318.12	865.0	3.95	4.20
	12--21	309.86	862.2		
	21--34	319.97	859.4		
55	6--12	273.86	778.3	2.64	5.93
	12--21	257.32	760.5		
	21--34	250.14	743.9		

由表 4 可以看出, 锅炉各部分受热面吸热量分配比例比较稳定, 几乎不受负荷的影响, 利用其他煤种试验的结果说明吸热量分配比例也几乎不受煤种的影响。

取某一次试验为参考值, 即 $T_{ref} = 1152.2 \text{ K}$, $Load_{ref} = 104 \text{ MW}$, $O_{2,ref} = 3.32\%$, $\Delta P_{ref} = 0.06 \text{ kPa}$, 对试验测得的床温进行回归, 得到床温与负荷、氧浓度、燃烧室上部压降的关系为:

$$T = T_{ref} \left(\frac{Load}{Load_{ref}} \right)^{0.1697} \left(\frac{O_2}{O_{2,ref}} \right)^{-0.0823} \times \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_{ref}} \right)^{-0.1153}$$

若整理成表观流化速度的形式, 则为:

$$T = T_{ref} \left(\frac{V_s}{V_{s,ref}} \right)^{0.184} \left(\frac{O_2}{O_{2,ref}} \right)^{-0.085} \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_{ref}} \right)^{-0.100}$$

其中 $V_{s,ref}$ 为流化速度参考值 (试验选定)。

$Load$ — 负荷, MW

O_2 — 省煤器出口处含氧量 (%)

ΔP — 燃烧室上部压降, kPa

取某次试验的传热系数 $HF_{ref} = 78.9 \text{ MJ/m}^2$ 为参考值, 对传热系数数据进行整理, 得到如下关系式:

$$HF = HF_{ref} (\Gamma_s)^{0.574} (\rho_s)^{0.062}$$

其中 HF — 传热系数, J/m^2

Γ_s — 表观流化速度, m/s

ρ_s — 流化状态下床层密度, kg/m^3

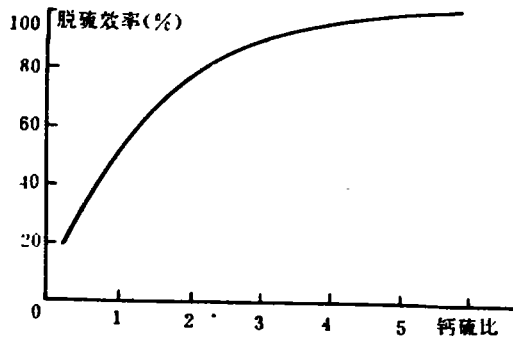


图 2 脱硫效率与钙硫比的关系

5 污染物生成与排放试验

5.1 脱硫

图 2 为脱硫效率与 Ca/S 摩尔比的关系。按曲线得出的数学关系式为:

$$\eta_s = 100(1 - e^{-0.803 \text{ Ca/S}})$$

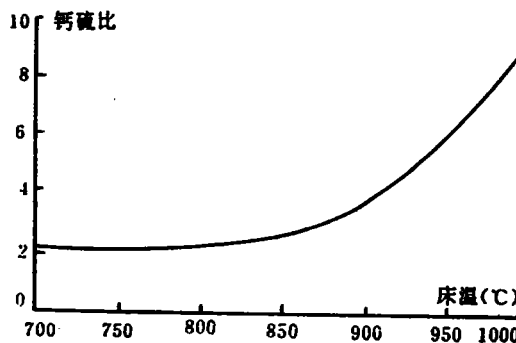


图 3 床温与钙硫比的关系

图 3 为达到 75% 脱硫效率所要求的 Ca/S 比。

定义 Ca/S* 为达到 75% 脱硫效率所要求的钙硫摩尔比, 则 Ca/S* 与床温的关系为:

$$Ca/S^* = 1.8 + e^{(T-1159.1) \times 0.0102}$$

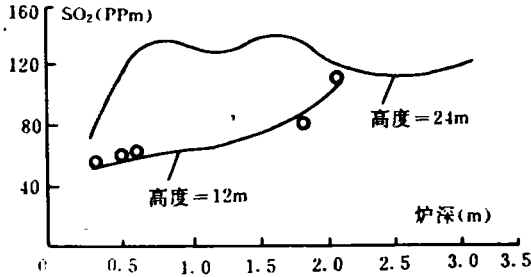


图 4 沿炉膛深度 SO₂ 分布 (55 MW 负荷下)

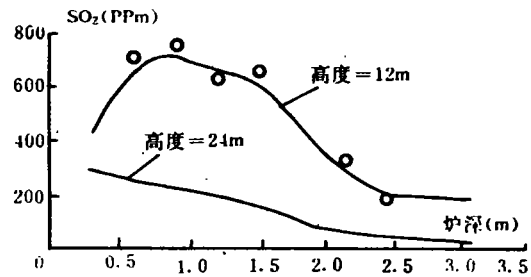


图 5 沿炉膛深度 SO₂ 分布 (105 MW 负荷下)

图 4、图 5 为不同负荷下沿炉膛深度方向上 SO₂ 的浓度分布。图 6 为不同煤种对 Ca/S 比的要求。

由图 6 可知, 对 Peabody 煤和 Salt Creek 煤脱硫效率没有明显的不同, 而对 Dorchester 煤较低的钙硫比即可达到同样的脱硫效率, 因为这种煤含硫量较高。

不同的石灰石供给位置对 Ca/S 比没有明显的影响。当床温低于 916 C 时, 过剩空气系数对 Ca/S 比没有明显的影响。

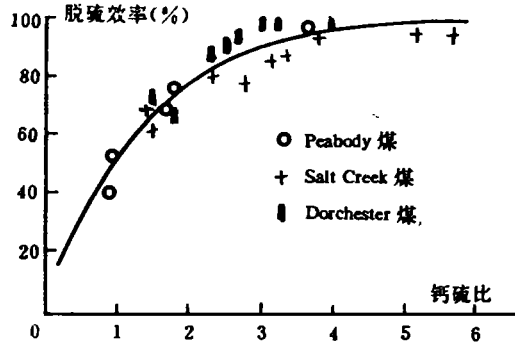


图 6 不同煤种对 Ca/S 比的要求

5.2 NO_x 排放

所有试验得到的 NO_x 排放都小于 146 mg/MJ, 低于规定标准值 215 mg/MJ。试验得出床温是影响 NO_x 排放的最重要因素。图 7 为床温对 NO_x 排放的影响, 图 8 为 Ca/S 比对 NO_x 排放的影响。

NO_x 浓度与床温的关系式为:

$$[NO_x] = 0.34T^2 - 1841.16T + 28994.4$$

(ppm, 干烟气)

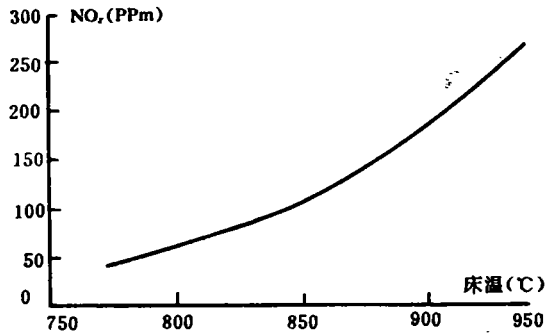


图 7 床温对 NO_x 排放的影响

由图 8 可见, Ca/N 比越大则 NO_x 排放量越大, 说明 CaO 对 NH₃ 生成 NO_x 的反应有催化作用。

前墙给煤时 NO_x 生成量高于其它给煤方式的 NO_x 生成量。

图 9、图 10 为不同负荷下沿炉膛深度方向上 NO_x 的浓度分布。

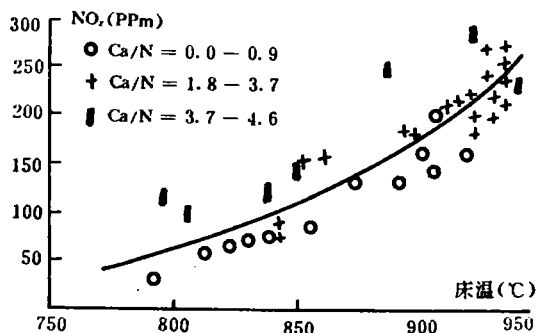


图 8 Ca/N 比对 NO_x 排放的影响

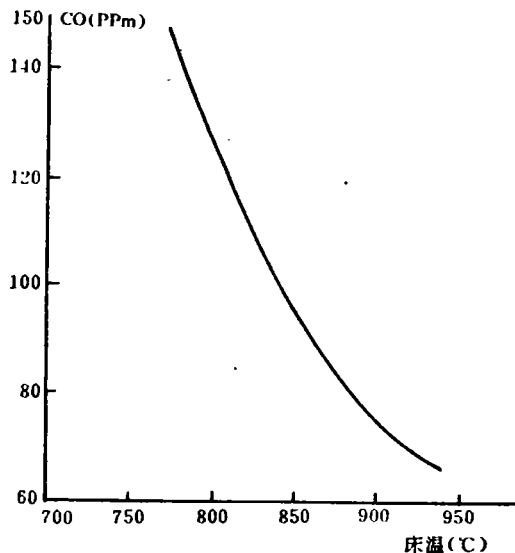


图 11 床温对 CO 排放的影响

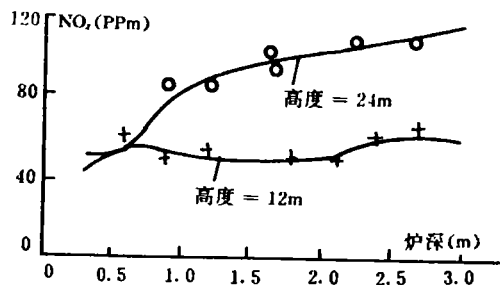


图 9 沿炉膛深度 NO_x 分布 (55 MW 负荷下)

5.3 CO 的排放试验

图 11 为床温对 CO 排放量的影响。可以看出,随着温度的增加 CO 的排放浓度降低。对数据整理,得到如下关系式:

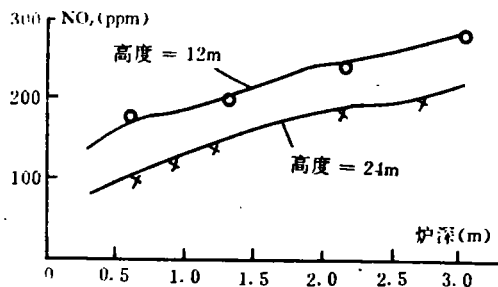


图 10 沿炉膛深度 NO_x 分布 (105 MW 负荷下)

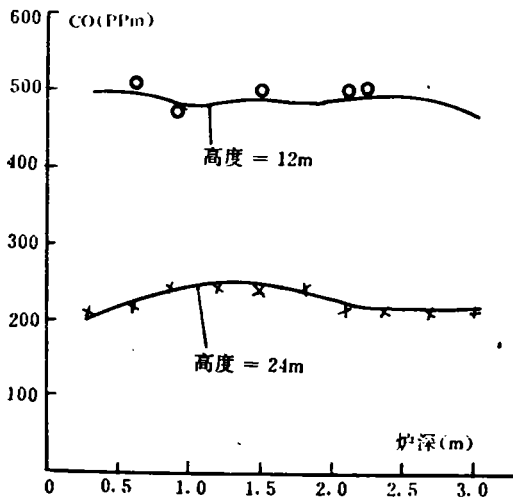


图 12 沿炉膛深度 CO 浓度分布 (55 MW 负荷下)

$$[CO] = 3854.97 - 5.144T + 8.253e^{-4} \times (1.8T - 459.4)^2 \text{ (ppm, 干烟气)}$$

前墙给煤时,CO 排放浓度较低,但在低负荷下影响不明显。

图 12、13 为不同负荷下沿炉膛深度方向的 CO 浓度分布。

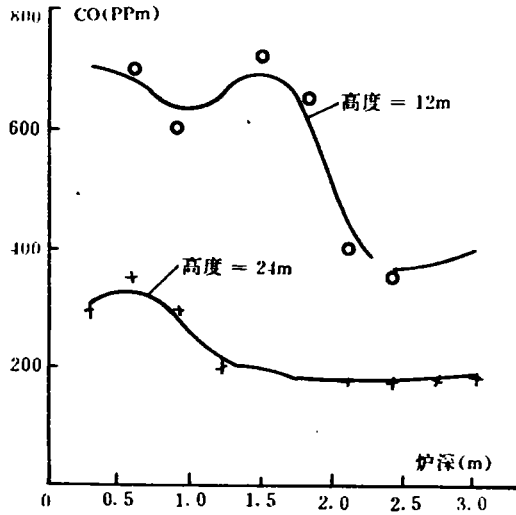


图 13 沿炉膛深度 CO 分布 (105 MW 负荷下)

6 结论及分析

1. 总床料量、一二次风率对温度分布没

有很大的影响,而煤的含灰量对粒子浓度和温度分布影响较大。

2. 燃烧效率、锅炉效率及各部分受热面吸热量比例几乎不受煤种、负荷变化的影响,说明锅炉具有良好的运行调节适应性。

由于低负荷下,干烟气热损失增加,而碳未完全燃烧损失减少;在高负荷下则相反,干烟气热损失少,而碳未完全燃烧损失加大,所以在此锅炉上,锅炉效率与负荷关系不大。

3. 床温是影响 Ca/S 比、NO_x 及 CO 排放量的最主要因素,说明 SO_x、NO_x 及 CO 的生成在该锅炉内受化学反应动力学控制。

4. 由气体在炉内的浓度分布可知,燃烧产物的横向混合较差。

5. 燃料供给方式对气体成分的分布有很大的影响,增加给煤点、改善燃料分布有利于减少有害气体排放。

6. Nucla 电站所有有害气体的排放量都低于新的环保标准规定的排放量,因此不必配备炉外脱硫脱硝装置。可节省大量投资。

参 考 文 献

- 1 Nucla Circulating Atmospheric Fluidized-bed Demonstration Project, Final Report, Oct, 1991. DOE/MC/25137 - 3046 (DE92001122)
- 2 田子平. 沸腾燃烧的理论与实践. 北京:煤炭工业出版社, 1985, 4: 395~456

宣 传 广 告 法

贯 彻 广 告 法 !

solid basis for the design and practical application of the new type bluff body combustion device. Key words; saw-toothed bluff body, return-flow region

开缝钝体燃烧器对四角切向燃烧锅炉的适应性 = Adaptability of Slotted Bluff Body Burners to a Tangentially Fired Boiler [刊, 中]/Ma Xiaoqian, et al. (Central China University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(4). -216~221

With a slotted bluff body being compared with an ordinary bluff body and from the viewpoint of jet expansion angle, jet rigidity, primary air rate and return flow, etc. discussed in this paper is the adaptability of slotted bluff body burners to a tangentially fired boiler. Key words; burner, boiler

美国 Nucla 电站 420t/h 循环流化床锅炉燃烧、传热及污染物生成的研究 = A Study on the Combustion, Heat Transfer and the Generation of Pollutants in a 420t/h Circulating Fluidized Bed Boiler of Nucla Power Station in the USA [刊, 中]/Liu Hao, Huang Lin, et al. (Central China University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(4). -222~228

The 420t/h circulating fluidized bed boiler of Nucla Power Station ranks among the earliest high-capacity circulating fluidized bed boilers in the world. During the long-term operation of the said station the above-mentioned boiler had systematically undergone various tests on such a wide range of aspects as combustion efficiency, boiler heat loss distribution, heat absorption distribution, heat transfer, desulphurization, gas pollutant emissions, etc. Relevant semi-empirical relations have been obtained as a result of the processing of test data. Key words; circulating fluidized bed, heat transfer, combustion, blow-down, USA

DHL29-1.6/150/90 锅炉的炉内改造 = The Modification of a DHL29-1.6/150/90 Hot-water Boiler [刊, 中]/Chen Yixiu, Gao Xiqiang (Boiler Department of Heilongjiang Provincial Labor Bureau) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(4). -229~231, 253

This paper dwells on the comprehensive technical modification of a travelling grate hot-water boiler and the resulting significant improvements. Key words; boiler modification, boiler furnace, stoker, boiler arch

35t/h 抛煤机链条锅炉的消烟除尘 = The Smoke Abatement and Dust Removal for a 35t/h Chain Grate Stoker-fired Boiler [刊, 中]/Wen Zhixin (Changchun Passenger Train Factory) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(4). -232~235

The author gives a description of the modification work aimed at smoke abatement and dust removal and performed on a 35t/h wind-powered chain grate stoker-fired boiler and the positive results of the modification. Key words; boiler modification, smoke abatement and dust removal, energy saving

高频声波炉内的除尘技术的应用研究 = An Applied Study of High-frequency Sound Wave-based In-boiler Dust Removal Techniques [刊, 中]/Huang Qianghua, Li Junrui (A Subdivision of Tianjin University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(4). -236~240

This paper briefly describes the importance of in-boiler dust removal, the construction of a combustion-supporting dust removal device based on the use of high-frequency sound waves, instructions for its use and an analysis of its working principle. A smoke dust dispersion test performed on a SHL20 boiler shows that the in-boiler smoke dust removal by high-frequency sound waves can be regarded as relatively effective for both coarse and fine smoke particles. An extremely important design parameter is the outlet steam range of the high-frequency sound wave-based combustion-supporting dust removal device. A steam range computation has been performed in connection with the modification of a