
大型CFB锅炉安装防磨梁后防磨效果 及锅炉运行性能影响研究

肖 平

中国华能集团清洁能源技术研究院

一、前言

二、安装防磨梁后防磨效果分析

三、安装防磨梁后运行参数统计分析

四、结论

一、前言

- 大型CFB锅炉磨损现状
- 多阶式防磨梁专利技术原理
- 防磨梁的应用情况

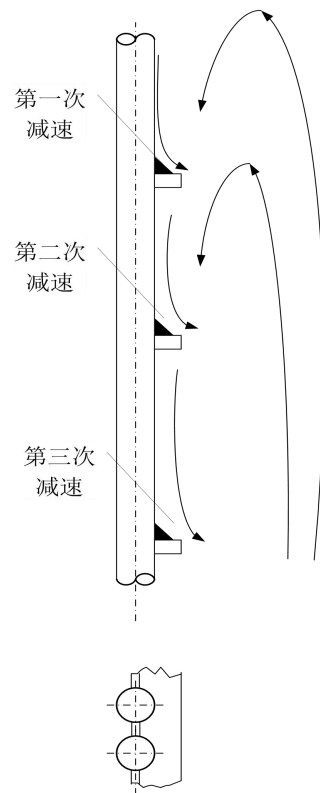
大型CFB锅炉磨损现状

- CFB锅炉水冷壁磨损问题一直是影响锅炉稳定运行的最突出问题，据统计，水冷壁磨损造成停炉的事故率约是45~50%。传统上，很多电厂CFB锅炉在投运初期采用了喷涂防磨技术，但使用后磨损问题依然突出。
- 大型CFB锅炉水冷壁磨损实拍照片见下图。



多阶式防磨梁专利技术原理

- 多阶式防磨梁技术原理是通过在水冷壁上布置多阶防磨梁，主动降低贴壁流的速度，从而达到降低磨损的目的。
- CFB锅炉炉内颗粒呈环—核状流动。已有的试验研究表明，当锅炉正常运行时，炉内灰颗粒上升到一定高度（ H_d ）后沿壁面以自由落体速度向下运动，至密相区位置其末端速度约达 -8m/s ，经过防磨梁多阶降速，最终到达密相区速度可降至 -2m/s 左右。按此进行理论计算，则受热面管壁的磨损速率可降低至原来的 $1/64$ 左右。



原理示意图

防磨梁的应用情况

至2011年9月，全国约投运了42台300MW CFB锅炉机组，其中约有34台锅炉安装了多阶式防磨梁，还有一批50-200MW CFB锅炉也安装了多阶式防磨梁，且相当部分锅炉已经有了较长的运行时间检验（最长时间接近4.5年）。



序号	电厂名称	锅炉型号	台 数	燃用煤质
1	秦皇岛热电厂	DG-1025/17.4	2	烟煤
2	北方电力蒙西电厂	SG-1057/17.4-M803	2	烟煤
3	广东宝丽华电力有限公司	DG1025/17.45-II16	2	无烟煤
4	云南红河电厂	HG-1025/17.4-L.HM	2	褐煤
5	临涣中利发电有限公司	HG-1025/17.4	2	烟煤+煤泥
6	云南国电开远电厂	SG-1025/17.4	2	褐煤
7	徐矿综合利用发电厂	DG-1025/17.4	2	烟煤
8	内蒙古京泰煤矸石电厂	DG-1025/17.4	2	烟煤
9	神东电力郭家湾电厂	HG-1025/17.4	2	烟煤
10	神东电力米东电厂	DG-1025/17.4	2	烟煤
11	内蒙京海电厂	DG-1025/17.4	2	烟煤
12	广东坪石电厂	DG-1025/17.4	2	烟煤
13	国华宁东发电厂	DG-1066/17.4	2	烟煤
14	辽宁调兵山煤矸石法电厂	SG-1025/17.4	2	烟煤
15	华电漳平发电有限公司	DG-1025/17.4	2	烟煤
16	华电永安发电有限公司	DG-1057/17.4	2	烟煤
17	神东电力萨拉齐电厂	DG-1025/17.45-II16	2	无烟煤

序号	电厂名称	机组容量/锅炉厂家	安装日期
1	河南省平顶山市瑞平煤有限公司	2×480t/h/东方锅炉厂	2006.12 (#1) 2007.02 (#2)
2	山西晋能集团大同热电有限公司	2×480t/h/哈尔滨锅炉厂	2007.5
3	天津陈塘热电有限公司	1×440t/h/哈尔滨锅炉厂	2007.7
4	河南中孚电力有限公司二分公司	1×440t/h/上海锅炉厂	2007.12
5	鄂尔多斯双欣发电有限公司	2×440t/h/济南锅炉厂	2008.03
6	乌海市君正能源化工有限责任公司	1×470 t/h/东方锅炉厂	2008.05
7	河南洛阳阳光热电厂	1×440 t/h/东方锅炉厂	2008.09
8	宁波中石化镇海炼化分公司	1×450 t/h/FOSTER WHEELER	2008.11
9	华电乌达发电有限公司	2×480 t/h/东方锅炉厂	2008.05 (#1) 2008.10 (#2)
10	华宇铝电有限公司	1×460t/h/东方锅炉厂	2009.04
11	中国水电华亭发电厂	1×480t/h/东方锅炉厂	2009.05
12	国华西来峰电厂	2×690t/h/东方锅炉厂	2009.12
13	滕州低热值热电有限公司	2×240t/h/济南锅炉厂	2010.4
14	枣庄南郊热电有限公司	2×240t/h/哈尔滨锅炉厂	2010.7
15	贵州华电毕节热电有限公司	2×490t/h/东方锅炉厂	2010.7
16	神华煤制油有限公司	2×410t/h/无锡锅炉厂	2010.4
17	华能芒热热电有限公司	2×240t/h/上海锅炉厂	2010.3

二、大型CFB锅炉安装防磨梁后防磨效果分析

从原理上讲，多阶式防磨梁技术充分利用了炉内气固两相流的流场特点，降低贴壁流的灰速度和浓度从而主动降低磨损速率。本文统计分析了17个不同电厂共30台机组安装防磨梁后的应用情况，如下表所示。

防磨效果统计表

电厂名称	机组容量	机组投运时间	安装防磨梁时间	安装前水冷壁磨损情况	安装后受热面磨损情况	安装后对锅炉主要影响	运行调整后锅炉运行情况
瑞平煤电	135MW	2007.01 (#1) 2007.04 (#2)	2006.12 (#1) 2007.02 (#2)	基建期安装	#1、#2炉已投运4.5年， 水冷壁基本无磨损减薄	无影响，优于设计参数	未进行燃烧调整
华电乌达	135MW	2007.03 (#1) 2006.11 (#2)	2008.05 (#1) 2008.10 (#2)	水冷壁磨损严重，炉顶及 烟窗两侧出现了较为严重 的侧磨，多次磨损爆管	水冷壁磨损减薄量很低， 有效减轻了侧磨，未再发 生磨损爆管	炉膛平均温度升高	炉膛平均温度约增高10℃ 炉膛出口温度和分离器出 口温度降低，从而排烟温
内蒙古君正	135MW	2006.06 (#1)	2008.05 (#1)	炉膛四角及下部管子侧面 磨损严重，爆管频繁	#1炉磨损显著减轻 #2炉随后也安装了防磨梁	由于煤种变化，炉膛平均 温度大幅降低，主、再热 汽温低	炉膛平均温度正常 主、再热汽温可达设计值
徐矿煤矸石	300MW	2009.05 (#1) 2009.07 (#2)	2009.04 (#1) 2010.10 (#2)	#1炉基建期安装 #2炉出现了较为严重的磨 损，爆管1次	#1、#2炉磨损显著减轻	无影响，先安装的#1炉运 行参数优于#2炉	未进行燃烧调整
广东宝丽华	300MW	2008.03 (#1)	2008.09 (#1)	水冷壁磨损严重	#1炉磨损得到有效控制， 然后#2炉也安装了防磨梁	同比安装前运行参数几乎 无变化，环比#2炉也未见	未进行燃烧调整
辽宁调兵山	300MW	2009.12 (#1) 2010.02 (#2)	2009.08 (#1) 2009.11 (#2)	基建期安装	#1、#2炉磨损轻微，从未 对水冷壁进行检修	与设计值相比未见明显变 化	燃烧调整后运行参数更加 合理
国华宁东	300MW	2010.03 (#1) 2010.05 (#2)	2009.09 (#1) 2009.11 (#2)	基建期安装	#1、#2炉水冷壁基本无磨 损	与设计值相比，炉膛平均 温度、炉膛出口温度、排 烟温度低于设计值	燃烧调整后运行参数更加 合理
广东坪石	300MW	2009.07 (#4) 2009.09 (#5)	2009.03 (#4) 2009.07 (#5)	基建期安装	#1、#2炉磨损轻微，从未 对水冷壁进行检修	未见明显影响	未进行燃烧调整

神东萨拉齐	300MW	2010.04（#1）	2009.12（#1）	基建期安装	#1炉水冷壁基本无磨损	同比#2炉和设计值，基本无影响	未进行燃烧调整
内蒙古京海	300MW	2009.12（#1）	2009.09（#1）	基建期安装	#1、#2炉水冷壁基本无磨损	炉膛出口温度分离器出口温度及减温水量低于设计值	燃烧调整后运行参数更加合理，排烟温度高主要与空预器受热面偏少和吹灰效果不佳有关
		2009.12（#2）	2009.09（#2）				
神东米东	300MW	2010.04（#1）	2009.12（#1）	基建期安装	#1、#2炉水冷壁基本无磨损	同比#2炉，除炉膛平均温度约升高5℃外，减温水量、排烟温度均未见变化	燃烧调整后运行参数更加合理
		2010.05（#2）	2011.09（#2）				
华电苏家屯	200MW	2010.11（#1）	2011.03（#1）	#1炉在供暖期间爆管停炉1次，#2炉爆管停炉1次	投运后防磨效果显著	炉膛平均温度基本无变化，投运初期，排烟温度也无变化，夏季运行出现了排烟温度高的现象	未进行燃烧调整，因排烟温度前的烟温测点突然升高，分析排烟温度高主要与空预器运行状况有关
		2010.12（#2）	2011.09（#2）				
北方蒙西	300MW	2008.01（#2）	2011.04（#2）	#2炉密相区磨损严重	投运后防磨效果显著	各项参数未见变化	未进行燃烧调整
淮北临涣	300MW	2008.05（#1）	2008.04（#1）	基建期安装	#1、#2炉水冷壁基本无磨损	炉膛出口温度、分离器出口温度高于设计值	投运初期，排烟温度不高。燃烧调整后各项参数趋于合理，排烟温度高，主要与采用脉冲吹灰器吹灰效果不佳有关
		2008.07（#2）	2008.06（#2）				
秦皇岛热电	300MW	2006.12（#5）	2008.05（#5）	水冷壁及扩展水冷壁磨损严重，两台炉累计爆管5次	投运后防磨效果显著，投运后即安全运行了283天	炉膛平均温度降低约10℃	由于锅炉带外置床，加大过热器外置床进灰量降低床温，势必增加过热器减温水量，燃烧调整后运行参数趋于合理
		2007.01（#6）	2008.10（#6）				
国电小龙潭	300MW	2006.12（#8）	2008.06（#8）	水冷壁及扩展水冷壁磨损严重，8号炉爆管3次	投运后防磨效果显著，各项性能指标显著提高	炉膛平均温度降低约10℃	由于锅炉带外置床，加大再热器外置床进灰量降低床温，势必增加再热器减温水量，燃烧调整后运行参数趋于合理
		2007.02（#7）	2009.08（#7）				
云南开远	300MW	2006.07（#1）	2009.09（#1）	#1、#2炉均进行了让管改造，#1水冷壁爆管了3次；#2炉曾在两个月内连续爆管3次，累计5次	投运后防磨效果显著，#1、#2炉均未再发生爆管事故	对外置床运行方式进行了小幅调整后，未见影响	未进行燃烧调整 各项性能指标优良
		2006.12（#2）	2010.09（#2）				

-
- 从表中可以看出，安装多阶式防磨梁的CFB锅炉防磨效果显著，大大延长了水冷壁不爆管周期，提高了锅炉可用率。不仅如此，水冷壁壁厚减薄量非常小，远低于未安装防磨梁前的减薄水平。
 - 所有应用该技术的CFB锅炉，包括表中所列的电厂机组，在安装了防磨梁后，均取得了良好的防磨效果。除了极少量因局部原因偶然爆管外（如炉膛烟窗附近等气流特别复杂的区域。如安装防磨梁后仍有局部磨损发生，根据气流情况采取一次针对性的完善措施后，即可解决），无一发生因水冷壁磨损的爆管事故，电厂对该技术的应用效果普遍予以了高度评价。

-
- 从防磨效果情况角度出发，安装防磨梁是非常理想的选择。即使部分目前磨损情况并不十分严重的锅炉，由于磨损情况是逐步恶化的，减轻磨损对锅炉的长期寿命无疑是有利的，因此也有安装防磨梁的必要。

三、大型CFB锅炉安装防磨梁后运行参数统计分析研究

- 安装防磨梁改变了炉内物料的循环流动状况，并覆盖了部分受热面，因此有些电厂担心安装多阶式防磨梁后，锅炉出现了炉膛温度升高、排烟温度升高、减温水量增大等问题。事实上，把这些问题全部归结于安装防磨梁的影响也是不科学、不客观的。
- 在运行中，影响炉膛温度、排烟温度和减温水量的因素有很多，如煤种变化的影响，床压、氧量、一二次风风率、上下二次风比例以及返料运行状况等运行参数的调整不同而带来的影响。
- 为了全面综合地分析安装防磨梁对锅炉运行性能的影响，对安装防磨梁的大型 CFB锅炉运行参数进行了统计和分析。

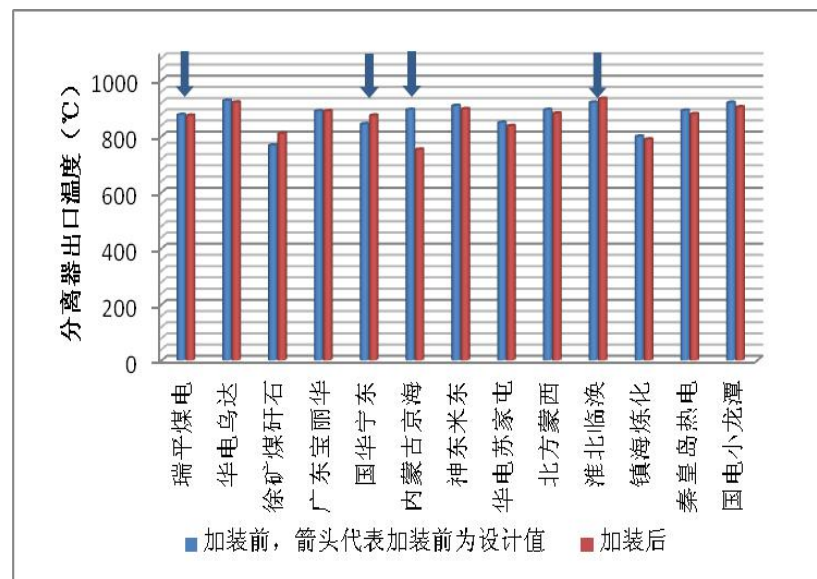
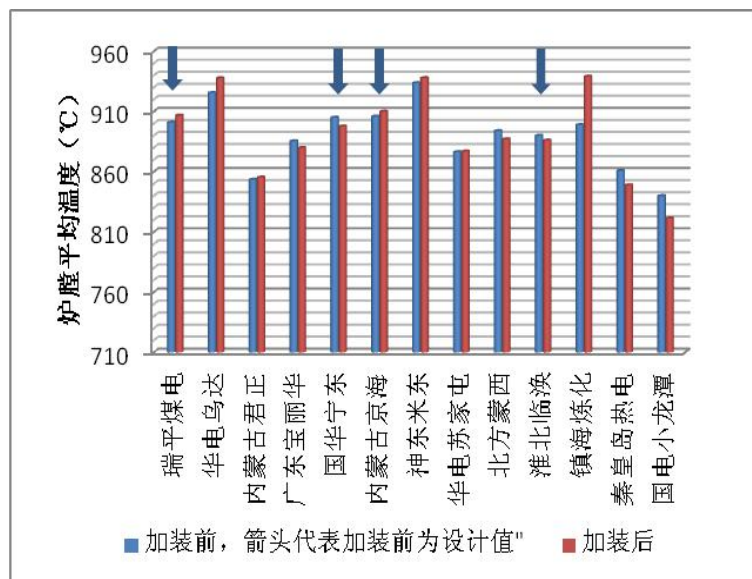
运行参数统计表

项目	单位	多阶式防磨梁安装前后运行数据对比（前一列数据为安装前或设计值，后一列为安装后，设计值以“*”为标记）																	
		瑞平煤电*		华电乌达		内蒙古君正		徐矿煤矸石		广东宝丽华		辽宁调兵山*		国华宁东*		广东坪石*		神东萨拉齐*	
锅炉型号	/	DG480/13.7		WG480/13.7		DG460/13.7		DG1065/17.5		DG1065/17.4		SG1065/17.5		DG1177/17.5		DG1025/17.4		HG1065/17.5	
负荷	MW	150	140.8	149.9	150.9	140.1	146.4	302.1	302.9	299.7	302.1	300	296.1	300	280.9	/	310.8	/	300.7
炉膛平均温度	℃	901	906.8	925.5	937.8	853.5	855.4	892.2	841	885.5	879.9	/	808.9	905	897.7	/	904.7	/	958.8
炉膛出口温度	℃	887	870.1	910	907.5	783.7	823.3	869.6	803.3	847.8	846.6	/	761	893	856	/	867	/	942.7
分离器出口温度	℃	876	873.3	926.5	920.5	/	/	767.2	809.4	889	889.3	/	885	843	873.6	/	875.1	/	936.4
烟道进口温度	℃	/	777.5	762	769	/	/	738.6	740.35	785.7	788.5	/	/	/	705.5	/	785.5	/	843
排烟温度	℃	145	139.5	169	166.5	159.3	148	162.35	157.8	150.9	152	145	146.98	134	131	/	157	/	146.7
环境温度	℃	20	9	20	20	22	10.5	26	22	23.7	20.6	20	15	35	18	/	23	/	9
氧量	%	3.5	3.95	/	/	0.7	1.9	4.65	4	3.2	3	3.5	3.51	3.5	3.2	/	2.73	/	6.24
过热器减温水量	t/h	/	2	4.9	0	0	0	70	0	/	/	/	/	63	38.03	/	56.3	/	109
再热器减温水量	t/h	/	0	18	16.4	0	0	0	0	/	/	/	/	0	0	/	0	/	25.7
主蒸汽温度	℃	538	526.5	535	533	542.4	533.5	541.1	532.5	524	535.7	541	539.6	541	527.8	540	535.8	/	521.7
主蒸汽压力	MPa	13.7	12.84	13.4	13.4	13.51	13.67	15.2	16.82	16.2	16.3	17.33	15.38	17.5	15.99	17.4	16.76	/	16.2
再热蒸汽温度	℃	538	505.5	536	536	535.5	534.2	540.5	529	525.7	536	541	533.39	3.74	3.26	540	537.9	/	534.2
再热蒸汽压力	MPa	2.82	2.7	2.82	2.81	2.36	2.49	2.61	3.26	/	/	3.36	3.16	541	501.2	3.48	3.18	/	3.42
给水温度	℃	234.6	227.2	245	246	242.6	245.6	263.3	276.2	/	/	272	242.38	276.4	271.8	282	272.5	/	273.7

项目	单位	多阶式防磨梁实施前后运行数据对比（前一列数据为安装前或设计值，后一列为安装后，设计值以“*”为标记）																	
		内蒙古京海*		神东米东		华电苏家屯		北方蒙西		淮北临涣*		大唐红河		镇海炼化		秦皇岛热电		国电小龙潭	
锅炉型号	/	DG1177/17.4		DG1065/17.5		WG745/13.7		SG1025/17.4		HG1025/17.5		HG1025/17.4		FW410/13.7		DG1025/17.4		SG1025/17.4	
负荷	MW	330	330.1	293.5	257.2	220	187.5	297	301.5	300	304.8	/	289.1	102	100	250.2	249.4	297.2	296.5
炉膛平均温度	℃	906	910	933.7	937.9	876.4	877	894	887.1	890	886.1	/	828.7	899	939.1	860.8	848.9	839.9	821.4
炉膛出口温度	℃	906	875.5	767	897.8	869.5	847.6	/	772	890	927.5	/	802.9	849	822.5	826.4	825.2	751.7	732
分离器出口温度	℃	894	752	908.5	897	848.3	836.3	894	881.1	920	933.3	/	825.3	798.7	788.5	891.1	878.6	919.5	903.2
烟道进口温度	℃	/	827	827.2	795	680.8	670	729.1	710.7	898	754.3	/	/	/	/	/	/	/	/
排烟温度	℃	145	170	147.5	139.7	144.1	163.5	141.1	151.6	136	168.7	/	134.8	139	135.2	129.2	139.6	155.3	147.1
环境温度	℃	20	23	18.5	10.2	8	27	-5	18.9	20	19	/	22	10	3	/	/	16	18
氧量	%	3.5	2.7	3.5	4.55	2.25	2.98	3.01	2.99	3.5	3.6	/	2.7	3.82	4.5	3.46	3.67	1.4	2.05
过热器减温水量	t/h	59.6	30.5	67.5	51.8	39.8	39.81	42.5	2	70.56	169	/	68	38.15	/	16.1	78.1	131.96	110.1
再热器减温水量	t/h	0	0	30.5	13.5	25.2	14.8	0	0	0	44.8	/	0	/	/	0	0	10	23.1
主蒸汽温度	℃	540	531.1	535.6	539.4	537.1	534.5	540	535.2	540	538.5	/	540.8	541.1	543	536.8	538.4	537.3	538.1
主蒸汽压力	MPa	17.4	17.49	15.5	15.7	12.71	12.72	16.24	16.9	17.4	15.85	/	16.36	10.57	10.58	16.2	16.61	16.87	16.75
再热蒸汽温度	℃	540	526.6	531.2	536.9	536.7	540	542.1	536.6	540	520.5	/	539.7	/	/	531	530	542.5	540.5
再热蒸汽压力	MPa	3.84	3.7	3.57	3.2	2.36	2.03	3.38	3.53	3.53	3.23	/	3.56	/	/	/	/	3.56	3.53
给水温度	℃	282.8	279.4	279.4	278.5	252.2	245.6	268.5	277.6	275	279	/	247.8	/	/	264.9	265.7	284	283.8

-
- 如表所示，统计分析表包括4台135MW CFB锅炉机组（其中，瑞平煤电安装前对比参数为设计值），1台200MW CFB锅炉机组，13台300MW CFB锅炉机组（其中，辽宁调兵山、国华宁东、广东坪石、神东萨拉齐、内蒙古京海、淮北临涣等6台锅炉安装前对比参数为设计值）。从表中数据可以看出，安装防磨梁后锅炉出力及汽温、汽压等参数能够达到额定值，对比安装前也没有明显变化。一些电厂的炉膛温度、排烟温度和减温水量甚至比安装防磨梁前还要低，当然，这应当归因于煤种变化和运行参数变化等的影响。
 - 由表还可见，进行安装防磨梁后有针对性的燃烧调整试验对于改善和优化锅炉各部运行参数，消除或减小防磨梁的影响也是很有必要的。

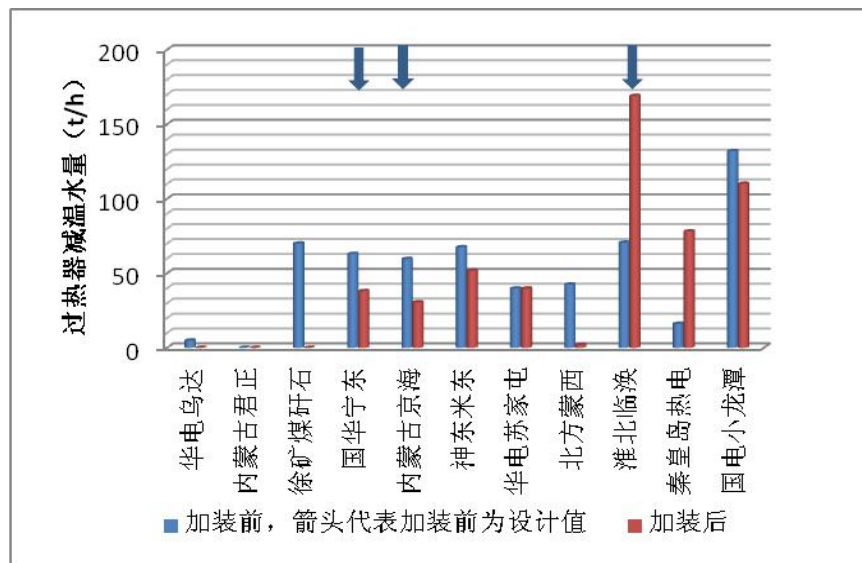
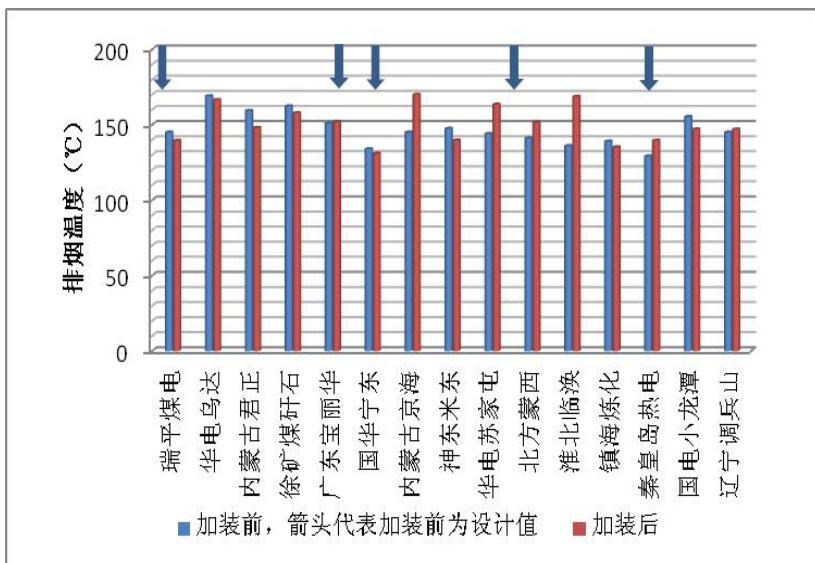
早期多阶式防磨梁约占水冷壁受热面的4%，技术改进后，防磨梁约占据2.5%左右的水冷壁受热面。表中6个电厂10台锅炉使用了早期防磨梁技术，其它12个电厂22台锅炉使用了技术改进后的防磨梁技术。



-
- 如表中数据，早期防磨梁有4个电厂炉膛平均温度提高了约 15°C ，2个电厂（秦皇岛热电、国电小龙潭）炉膛平均温度降低了约 15°C ，这与进行了外置床回灰调整有关。早期防磨梁6个电厂分离器出口温度基本无变化。技术改进后的防磨梁有3个电厂炉膛平均温度提高约 3°C ，4个电厂炉膛平均温度降低了约 6°C 。
 - 技术改进后的防磨梁有4个电厂锅炉分离器出口温度提高了约 21°C （其中淮北临涣和国华宁东为与设计值进行比较）。有5个电厂锅炉分离器出口温度降低了约 37.7°C （其中内蒙古京海与设计值进行比较降低了约 142°C ），不计内蒙古京海，则4个电厂锅炉分离器出口温度降低了约 11.6°C 。

-
- 总体上，图中所统计的13台锅炉中，6台锅炉安装后炉膛平均温度平均提高了约 11.3°C ，含箭头的代表与设计值进行比较。7台锅炉安装后炉膛平均温度平均降低了约 7.6°C 。3台锅炉安装后分离器出口温度平均提高了约 28.7°C ，10台锅炉安装后分离器出口温度平均降低了约 22.58°C 。平均而言，进行燃烧调整后炉膛平均温度升高了不足 2°C ，分离器出口温度降低了近 10°C 。
 - 事实上，炉膛平均温度、分离器出口温度除了受防磨梁的影响外，还与燃用煤种及燃烧调整方式有关，也即其影响可以通过燃烧调整技术进行补偿消除。因此，辅之以必要的燃烧优化调整技术，安装防磨梁对炉膛平均温度的影响较为有限且可控。

■ 安装防磨梁可能会减少了炉内稀相区的换热份额，普遍担心会进而使得烟气侧，即炉膛平均温度或分离器出口温度升高，尾部受热面进口烟温也会升高，从而导致两种不利影响，一是排烟温度高，二是减温水量增大。但分析表明，上述影响并不显著。



-
- 如图所示，所统计的15台锅炉中，6台锅炉安装后排烟温度升高，9台锅炉安装后排烟温度降低。其中，3台锅炉排烟温度升高，是与设计相比较（指基建期间安装防磨梁）。事实上即使不安装防磨梁，由于锅炉设计及煤种匹配问题，锅炉排烟温度也已高于设计值。而运行后通过技术改造安装防磨梁的，9台锅炉排烟温度较安装前平均降低了约5℃。
 - 当然，不能据此认为安装防磨梁后排烟温度会降低，考察排烟温度的变化，还应综合考虑空预器漏风率、环境温度及燃用煤种的变化，上述因素任何之一都可能使得排烟温度降低。

-
- 减温水量的变化情况也类似。如图中所统计的11台锅炉中，2台锅炉过热器减温水与设计值相比增大（其中1台为与设计值进行比较），9台锅炉过热器减温水减少。当然，过热器减温水量的变化还与受热面积灰、给水温度等相关，过热器减温水量的增大与减少也应综合考量。

四、结 论

■ 多阶式水冷壁防磨梁在水冷壁防磨、提高锅炉可用率方面效果显著。安装防磨梁后炉膛平均温度、排烟温度、过热器减温水量等参数会有一定影响，但影响程度有限。

-
- 为了进一步消除多阶式防磨梁安装对锅炉运行的影响，应根据炉型、煤种、锅炉运行现状及实炉磨损状况的不同等，对防磨梁的布置数量和型式进行不定型合理设计。
 - 为更好发挥防磨梁的防磨作用，安装防磨梁后，应进行必要的燃烧优化调整，使锅炉主要运行参数，如风量、一二次风率、内外循环流率、床料厚度等运行在合理的范围内，既可避免如炉膛烟气速度过大等引起的磨损，缓解CFB锅炉炉内固有的磨损，也可消除安装防磨梁对锅炉运行的影响。



谢谢！