

博士文库

燃煤锅炉积灰结渣 试验研究与工程应用

Ranmei Guolu Jihui Jiezha Shiyān Yánjiū Yú Gōngchéng Yīngyòng

李彦林 著

石油工业出版社

内 容 提 要

燃煤锅炉积灰结渣是国内外火力发电行业、企业自备热电厂常见的现象,作者借助企业生产实践环境优势,历时三年多,进行了锅炉积灰结渣的实炉试烧研究,从制粉、着火、燃烬等方面系统了解了积灰结渣特性,得出了锅炉积灰结渣的本质原因,并提出了治理锅炉积灰结渣的实质性指导理论,应用于工程实践取得了良好的效果。

本书对治理燃煤锅炉积灰结渣有很强的实用性,可作为火力发电厂、各行业自备热电厂及其他行业从事锅炉运行、管理、检验、科研、设计人员阅读,也可供高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

燃煤锅炉积灰结渣试验研究与工程应用/李彦林著.

北京:石油工业出版社,2001.5

(博士文库)

ISBN 7-5021-3370-4

I. 燃…

II. 李…

III. ①燃煤锅炉-煤灰-实验-研究

②燃煤锅炉-炉渣-实验-研究

IV. TK229.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 24894 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京密云红光印刷厂排版

北京华都印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×960 毫米 16 开本 15 印张 256 千字 印 1—6000

2001 年 5 月北京第 1 版 2001 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3370-4/TE·2527

定价: 28.00 元

目 录

1 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 低灰熔点煤与锅炉积灰结渣	(2)
1.3 积灰结渣对锅炉传热和运行的影响	(7)
1.4 积灰结渣研究现状	(9)
1.5 研究意义及主要内容	(22)
2 锅炉积灰结渣的实炉试验	(26)
2.1 引言	(26)
2.2 试验锅炉特性简介	(26)
2.3 试验设计	(28)
2.4 试验运行主要参数技术分析	(36)
2.5 变负荷试验研究	(47)
2.6 小结	(51)
3 积灰结渣造成锅炉构件失效分析研究	(53)
3.1 引言	(53)
3.2 过热器梳形定位板失效分析	(53)
3.3 锅炉水冷壁爆管技术研究	(63)
3.4 锅炉水循环故障的技术研究	(73)
3.5 吹灰器喷嘴失效分析	(88)
3.6 锅炉渣口水冷壁管泄漏及梳形板失效研究	(91)
3.7 小结	(101)
4 锅炉积灰结渣的主导因素	(103)
4.1 引言	(103)
4.2 低灰熔点煤燃烧结渣特性评价	(103)
4.3 锅炉特性参数与结焦	(118)
4.4 锅炉燃烧空气动力场组织	(131)
4.5 运行中影响结渣的因素	(136)

4.6 小结	(137)
5 锅炉积灰结渣过程机理研究	(139)
5.1 引言	(139)
5.2 锅炉受热面积灰结渣状貌	(139)
5.3 锅炉受热面积灰结渣状貌	(143)
5.4 灰渣沉积物的微观结构	(145)
5.5 锅炉积灰结渣的过程机理	(153)
5.6 小结	(160)
6 锅炉积灰结渣治理研究与实践	(161)
6.1 引言	(161)
6.2 影响锅炉积灰结渣的主要因素研究	(161)
6.3 锅炉改造技术方案研究	(162)
6.4 技术改造项目设计与校核	(183)
6.5 改造后的鉴定试验与运行实践	(214)
6.6 小结	(224)
7 总结与展望	(226)
7.1 总结	(226)
7.2 展望	(227)
参考文献	(228)
后记	(234)

1 绪 论

1.1 概 述

我国煤炭资源丰富,可供开采的储量为 1090 亿 t 以上,煤炭是我国的主要能源,煤炭的构成占一次能源总消耗量的 75% 以上。我国以发展燃煤发电为主,建国以来,火力发电量占全国总发电量的比重约为 77%~85% (何佩璠, 1990)。目前,我国电力工业已步入“大电网、大机组、高电压、高自动化”的发展新阶段,至 1997 年底,全国运行及其在建的 300MW 以上火力发电机组已有 200 多台 (林江, 1999), 50MW 以上的火力发电机组数量更是庞大,由此可以看出煤粉锅炉在发电厂中占的比例之巨大。然而无论是大机组或小机组的运行中,许多燃煤锅炉不同程度地存在积灰结渣问题,严重时会造成锅炉损坏、经济效益滑坡,有些甚至引发重大设备及人身伤亡事故。新疆红雁池电厂 (杨崇靖, 1989; 徐少怀, 1989; 程光坤, 1989; 高国良, 1989; 李宗铎, 1989) 因锅炉炉膛屏式过热器结渣,尾部受热面各段烟温高出设计温度 70~80℃,排烟温度高达 210℃,被迫停炉清渣 8 次;八〇三电厂^①波兰造的 130t/h 锅炉水冷壁、前墙、1#、2#角斜坡上结渣,造成排烟温度、低温过热器超温,结大渣堵死冷灰斗,被迫停炉处理;宝鸡发电厂^②锅炉水冷壁、过热器结渣,造成过热器爆管 9 次,被迫停煤投油;沙角发电厂^③670t/h 锅炉炉膛水冷壁、燃烧器区域、折焰角底部、屏式过热器下部结渣,导致炉膛出口温度超出 50~100℃,过热器超温,掉大渣灭火 9 次,炉膛水冷壁转角连接处爆管 4 次;洛阳热电厂^④220t/h 锅炉炉膛、燃烧器喷口结渣烧坏燃烧器,空气动力场恶化;洛阳热电厂 170t/h

① 贾照云. OP-130/110 锅炉防止结渣对策. 锅炉结渣及防治对策. 西北电管局电力试验所. 1990

② 洪海涛. 消除锅炉结渣途径之一使用除渣剂. 锅炉结渣及防治对策. 西北电管局电力试验所, 1990

③ 方江涛. 沙角电厂 HC-670/14-13 型锅炉结焦问题的分析和解决办法的探讨. 1986

④ 李冠华. 燃烧易结焦煤锅炉的运行与改进. 1986



锅炉炉膛、燃烧器喷口结焦，过热器超温，冷灰斗被焦渣堵死，被迫停炉；洛阳热电厂 220t/h 锅炉燃烧器区域、炉膛结渣，带负荷能力只能达到 160t/h；蒙达公司（何亚强，1999）1025t/h 锅炉炉膛、屏式过热器、高温过热器、高温再热过热器结渣，致使锅炉被迫停炉；金竹发电厂（邹自敏，1991）锅炉结渣积灰，导致停炉 36 次；新乡电厂（刘诗词，1993）670t/h 锅炉炉膛、燃烧带结渣，造成炉膛压力波动大，减负荷投油助燃仍不能解决问题，被迫停炉清渣；四川万源发电厂（陈刚，1997）锅炉水冷壁、燃烧器结渣，炉膛燃烧不稳、灭火放炮，投油助燃；连云港发电厂锅炉炉膛水冷壁、燃烧器周围结渣，造成燃烧不稳，灭火放炮；株江电厂（李其忠等，1997）420t/h 锅炉炉膛结渣，被迫多次停炉，经济效益下降；菏泽电厂（苗长信等，1997）锅炉炉膛结渣，大渣砸坏水冷壁管，炉膛灭火，冷灰斗堵塞，蒸汽温度偏高；合肥发电厂（高风岭，1994）锅炉水冷壁、过热器结渣，水冷壁爆管 28 次，停炉 1964h，少发电 4416 万 kW，火嘴变形，炉后墙烧红，停炉 6 次，在多次因结渣发生的事故中，死亡 4 人，重伤 3 人，轻伤 7 人；滦河电厂、高井电厂锅炉水冷壁结渣，影响正常运行，停炉打渣；北仑发电厂锅炉（美国 CE 公司进口）结渣，发生掉大渣造成锅炉严重损坏，死亡 20 多人（马湘能，1998）；新疆克拉玛依石化厂热电厂 2 台 130t/h 锅炉因炉膛、燃烧器严重结渣，自投产以来从未满负荷运行，曾造成多次停炉事故，企业每年直接经济损失超过千万元。综上所述，锅炉结渣严重威胁着发电厂的安全平稳运行，甚至造成重大伤亡事故，导致企业经济效益严重下降，积灰结渣几乎是发电企业一大公害，治理锅炉结渣是刻不容缓的任务。

1.2 低灰熔点煤与锅炉积灰结渣

1.2.1 低灰熔点煤的分布

用灰熔点结渣指数 R_T 判断煤的结渣与否时，当 R_T 小于 1343℃ 则称为低灰熔点煤。美国、澳大利亚等国存在大量的低灰熔点煤，我国低灰熔点煤占煤炭总量的三分之一（李河名，1987）。典型煤种煤灰特性见表 1-1^①、表 1-2^② 和表 1-3。

① 熊友辉．电站锅炉灰沉积及结渣过程和机理研究．华中理工大学博士论文，1998

② 西安热工研究院．130t/h 炉用煤特性报告．1999.9



表 1-1 我国南方不同地质时代和地理位置低灰熔点煤的分布及煤灰特性

时 代	矿 区	煤 灰 成 分 (%)					煤灰熔点 T ₂ (℃)	备 注
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO		
石炭纪	河南坳头山	37.06	20.72	27.65	4.86	1.35	1100	高硫无 烟煤
	贵州惠水祥摆	40.36	32.69	18.68	3.26	1.09	<1250	
	云南彝良小法路	32.53	17.37	36.87	4.39	0.81	<1100	
	云南大关石灰煤	30.43	21.16	38.57	2.98	0.18	<1100	
二叠纪	云南织纳煤田	无烟煤，灰熔点为 1171~1291℃						
	江西乐残植煤	39.06	28.40	15.32	3.25	1.65	<1200	挥发分高
第三纪	云南小龙潭褐煤	18.79	10.10	10.31	29.9	2.20	1290	SO ₃ =25.5%
	云南可保矿褐煤	39.34	24.14	14.33	8.76	4.62	1330	发热量低

表 1-2 我国北方部分地区不同地质时代和地理位置低灰熔点煤分布及煤灰特性

时 代	矿 区	煤 灰 成 分 (%)					煤灰熔点 T_2 (°C)	备 注
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO		
石炭纪	江苏矸山 B1	52.98	8.94	24.57	4.58	0.56	1230	大部分为烟煤
	新庄孜 G3	52.88	29.68	11.84	1.09	0.38	1270	
	临涣 G3	46.00	34.31	8.57	2.84	0.89	1300	
	河南焦作	55.63		35.32			<1200	
	郛城 10-2	50.01		39.87			<1200	
	大屯 17	53.69		36.06			<1200	
	茌巩一	55.63		35.64			<1200	
侏罗纪	神府矿区 *	42.57	15.62	12.23	16.51	1.52	1250	大多为低煤化程度的烟煤, 低灰低硫高发热量
	东胜矿区 *	37.52	24.59	9.04	21.19	2.11	1170	
	榆横矿区 *	45.84	12.94	15.10	13.75	1.45	1265	
	彬长矿区 *	55.58	23.68	7.81	5.78	1.39	1320	
	店头矿区 *	53.83	21.89	5.47	10.34	1.23	1275	
	焦平矿区 *	47.40	21.59	8.69	12.45	1.15	1205	
	碎石井矿区 *	42.99	17.78	8.80	11.96	4.55	1197	
	大同同家梁矿	57.18	14.29	14.15	3.55	0.97	1100	
	河南义马煤	55.26	14.53	12.56	4.02	1.21	1125	
	三道岭矿区	43.22	14.15	10.54	12.62	1.90	1170	
	桃树园矿区 *	46.18	21.44	18.88	5.62	2.05	1260	



续表

时 代	煤 灰 成 分 (%)						煤灰熔点 T_2 (°C)	备 注
	矿 区	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO		
石炭纪	伊敏露天矿	59.91	13.18	5.62	13.93	2.45	1120	为褐煤 低变质烟 煤, 水分 高
	元宝山矿	59.83	17.12	11.50	2.80	1.69	1140	
	大雁矿	63.22	18.6	4.10	4.46	1.12	1140	
	胜利矿	49.70	16.50	7.30	8.50	4.69	1120	
	吉林营城煤田集贤矿区	低硫富灰, 水分含量高, 煤灰熔点 T_2 为 1200°C						
第三纪	吉林舒兰煤田, 山东黄县, 五图煤田	低灰高发热量, 高挥发分, 煤灰熔点 T_2 为 1165°C 高灰高水分含量, 煤灰熔点为 1100~1250°C						

注: 带 * 的为矿区煤样统计值。

表 1-3 新疆部分矿区低灰熔点煤的分布及煤的煤灰特性

序号	矿 区	煤 灰 成 分 (%)					T_2 (°C)	备 注
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO		
1	伊犁地区 1 号	12.85	12.86	14.51	25.30	3.58	1230	低灰 低硫高 挥发分 烟煤
2	伊犁地区 2 号	32.60	17.60	14.80	16.10	4.54	1170	
3	哈密地区 1 号	9.79	6.34	14.40	31.10	10.80	>1400	
4	哈密地区 2 号	15.90	13.40	4.98	29.80	12.30	1400	
5	吐鲁番地区 1 号	34.23	14.72	13.95	19.23	3.38	1140	
6	吐鲁番地区 2 号	49.74	24.21	8.33	6.52	2.53	1260	
7	黑山露天矿	15.99	13.00	6.58	29.78	3.01	1300	
8	玛纳斯地区 1 号	49.83	20.54	10.42	4.85	2.30	1140	
9	玛纳斯地区 2 号	47.11	18.81	12.01	7.38	2.71	1140	
10	呼图壁地区 1 号	50.04	21.32	8.69	9.63	2.27	1190	
11	呼图壁地区 2 号	36.88	16.96	15.43	12.34	3.88	1120	
12	米泉地区 1 号	51.74	23.46	6.83	3.45	2.78	1350	
13	米泉地区 2 号	49.76	21.81	6.95	5.88	3.58	1200	
14	米泉地区 3 号	50.15	22.73	6.30	5.65	3.83	1200	
15	昌吉地区 1 号	58.56	24.21	5.13	1.72	1.38	1210	
16	昌吉地区 2 号	45.89	17.78	11.82	8.15	1.84	1300	
17	和丰县一矿	36.36	38.83	5.56	8.95	4.70	1200	
18	二矿新井	32.16	25.81	8.13	14.52	4.76	1190	



续表

序号	矿 区	煤 灰 成 分 (%)					T_2 (°C)	备 注
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO		
19	和丰县三矿	40.60	27.44	6.51	9.03	3.35	1160	低灰 低硫高 挥发分 烟煤
20	252 矿	18.93	16.15	12.69	20.84	7.43	1160	
21	农十师一队	40.35	30.36	5.30	11.20	2.89	1290	
22	农十师二队	41.11	27.84	3.05	9.87	1.94	1150	
23	玛电苇矿 1998 年综合样	51.02	20.07	8.41	6.50	3.75	1150	
24	玛电碱沟 1998 年综合样	51.89	20.00	8.80	5.72	3.11	1200	
25	露天矿 1998 年综合样	56.71	21.67	8.42	4.24	1.90	1190	
26	红雁池六矿 1998 年年综合样	52.00	20.44	9.41	5.61	3.40	1280	
27	玛电苇矿四季度综合样	53.91	21.74	6.68	5.18	3.31	1180	
28	玛电碱沟四季度综合样	52.58	21.38	8.34	4.49	2.81	1160	
29	玛电露天矿四季度综合样	56.82	22.42	8.43	2.00	1.88	1250	

从表 1-1、表 1-2 和表 1-3 可以看出,我国低灰熔点煤分布广泛,资源量巨大,但主要分布在我国北部,位于陕西、内蒙古交界的神府东胜煤田,内蒙古东部和北部白垩纪的褐煤,以及义马、大同煤,此外还有云贵地区的褐煤,尤其是新疆境内的聚煤区,该聚煤区是我国第二个重要煤田分布区,其范围为贺兰山、六盘山以西,昆仑山、西秦岭以北的广大西北地区,包括新疆、甘肃、青海大部分,宁夏和内蒙古一部分。区内煤炭资源丰富,且煤田的时空分布较为集中。石炭-二叠纪、晚三叠世及早、中侏罗世煤田均有分布,但以早、中侏罗世聚煤作用最强。尤其新疆境内早中侏罗世煤田之大,含煤性之好,仅次于鄂尔多斯煤田,见图 1.1。该聚煤区煤炭储量约占全国的 1/3,在目前预测深度以内约 1 万亿 t 以上,仅次于华北煤区,其中新疆的煤炭储量达 1.6 万亿 t,占全聚煤区的 90% 以上。全聚煤区探明储量 240 亿 t 左右,大部分在新疆境内以及祁连地区。

根据勘探资料,按发电用煤国家分类标准 VAMST (GB7562—87) 确定新疆煤的分类牌号为: $V_{4\sim5}A_{1\sim4}M_{2\sim3}S_{1\sim2}T_2$ 。新疆煤属挥发分极高的、易结渣的烟煤。其挥发分 V_{daf} 最高可达 55% 左右;水分和灰分波动则较大, M_t 为 8%~80% 左右 (伊犁), A_d 伊犁最低的可达 2%,最高在巴里坤可至 48.80%,一般低于 25%;硫分 S_x 多小于 1%;灰熔点 (ST) 在 1200°C 左

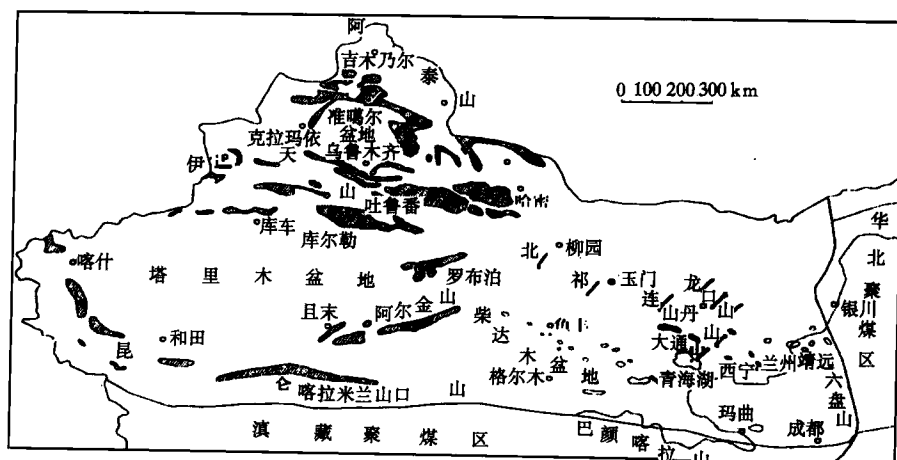


图 1.1 西北早、中侏罗世聚煤区煤田分布示意图

右，为易结渣煤种。

1.2.2 低灰熔点煤与积灰结渣

国外如美国、澳大利亚等国分布有较多的低灰熔点煤，在燃煤电站的使用过程中，发现煤的各种矿物质所造成的积灰结渣经常使锅炉被迫停炉或采取低负荷降渣或低负荷运行。我国低灰熔点煤的利用也有较长历史，在我国“九五”期间重点开发的动力煤基地中，有一半以上属于低灰熔点煤种^①。我国燃煤机组 50MW，100MW，200MW，300MW 到 600MW 都不同程度的存在积灰结渣的问题，其中绝大多数是因为利用低灰熔点煤的缘故。低灰熔点煤引起的积灰结渣在国际上是公认的，低灰熔点煤的利用技术是美国能源与环境研究中心（EERC）、澳大利亚的低阶煤利用研究中心（CRC For Black Coal Utilization）的研究重点。我国低灰熔点煤引起的灰沉积和结渣问题，也引起了燃煤电站和低灰熔点煤生产单位及有关研究单位的广泛关注。因此加强低灰熔点煤合理高效利用，开展积灰结渣的研究具有极其重要的现实意义。

① 哈尔滨普华煤燃烧工程技术开发中心，中国动力用煤—锅炉设计型谱，1995



1.3 积灰结渣对锅炉传热和运行的影响

1.3.1 积灰结渣的含义

积灰指温度低于灰熔点的灰粒在受热面上沉积,可分为高温灰沉积和低温灰沉积两种类型,前者的形成温度处于灰粒的变形温度下的某一范围内,这类沉积多发生于屏式过热器、对流过热器等对流受热面上;后者则主要出现在温度可能低于酸点的管壁上,如低温省煤器和空气预热器,它是由酸液与飞灰凝聚而成。

结渣是指在锅炉内烟气侧受热面出现的严重影响锅炉正常运行的故障现象。结渣主要由烟气中夹带的熔化或部分熔化的颗粒碰撞在炉墙、水冷壁管子上被冷却凝固而形成。结渣的形态主要是以粘稠或熔融的沉淀物形式出现,结渣主要出现在辐射受热面上,如水冷壁、水排管、防渣管、过热器管排等。

1.3.2 积灰结渣的危害性

1) 积灰结渣会降低炉内受热面的传热能力。灰污在受热面沉积后,由于其导热系数很低,热阻很大,一般玷污数小时后水冷壁的传热能力会降低30%~60%,使得炉内火焰中心后移,炉膛出口烟温相应提高,会使省煤器和空气预热器堵塞、传热恶化,从而提高排烟温度,降低锅炉运行经济性。

2) 在传热作用减弱的情况下,为了维持同样的蒸发量,就需要消耗更多的燃料,以提高燃烧室内和各部位的烟气温度,这时必须相应增加通风量,使送、引风机负荷增高,厂用电增大。由于通风设备容量有限,加之结渣情况下容易发生烟气通道的局部堵塞,可能因引风量不足,燃烧室内产生正压,甚至限制锅炉出力。

3) 由于炉膛出口烟温提高,导致过热蒸汽温度过高,这不仅危害过热器,还会引发汽轮机的事故。另外,还能使飞灰易粘结在对流和屏式过热器上,引起过热器的玷污和腐蚀。

4) 由于总的传热阻力增大,会使锅炉可能无法维持在满负荷下运行,只好增加投煤量,引起炉膛出口烟温进一步提高,使灰渣更容易粘在受热面上,形成恶性循环,导致发生一系列锅炉恶性事故,如过热器、省煤器管束堵灰、爆裂,空气预热器大量漏风,出渣系统堵死。烟温升高还会导致蒸汽过热汽温偏高,使金属管子处于超温运行状态。



5) 在高温烟气作用下, 粘结在水冷壁或高温过热器上的灰渣会与管壁发生复杂的化学反应, 形成高温腐蚀。发生高温腐蚀时水冷壁管平均腐蚀量可达 $0.8 \sim 2.6 \text{ mm/a}$ 。如燃用高硫煤时, 腐蚀区受火焰的直接冲刷, 其腐蚀速度可达 5 mm/a 以上, 运行不当时, 经常会发生爆管停炉。因此, 锅炉结渣灰污可看作是高温腐蚀的前兆。

6) 燃烧室上部结渣掉落时, 可能砸坏冷灰斗水冷壁管。结渣严重时, 下部冷灰斗处因上部渣块掉下和壁面直接结渣而堆积大量硬质焦渣, 阻碍了落灰的排除, 会使冷灰斗出口逐渐堵塞, 以致不能维持运行。

7) 喷燃器出口处, 可能因结渣而影响煤粉气流的正常喷射, 甚至喷口被焦渣堵住; 或因焦渣影响引起气流偏移, 形成局部高温, 烧坏喷燃器。

8) 结渣以后, 为了维持锅炉出力, 增加入炉燃料量而通风不足时, 燃烧不易完全, 一些可燃物可能被带到对流受热面, 在烟道角落堆积起来继续燃烧, 发生“烟道再燃烧”现象, 这时在燃烧部位的受热面表面温度急剧升高, 会造成破坏性的后果。

9) 由于积灰、结渣、腐蚀及磨损而造成经济损失这可归纳如下:

①经国内外资料统计, 由于炉膛及排烟温度的提高, 致使锅炉平均效率降低 $3\% \sim 5\%$, 并增加了煤耗;

②只能低负荷运行。如某台 200 MW 锅炉燃用灰熔点低的煤 ($T_1 = 1140^\circ\text{C}$), 结渣严重时只能在 40% 负荷下运行, 还经常被迫停炉;

③要经常停炉检修, 因少发电带来了很大的经济损失;

④要增加大量的检修费用, 如清渣、更换炉管等所需费用。据国外估计, 美国每年因锅炉受热面玷污、结渣而带来的各种经济损失总和达 $20 \sim 100$ 亿美元。

我国是产煤大国, 煤炭资源非常丰富。煤种品位高低不等, 变化范围很宽。根据我国能源政策, 火力发电厂应以煤作为主要燃料, 且动力用煤应尽量使用低品位劣质煤, 加之现有供煤和配煤系统有许多不完善之处, 电站锅炉燃用煤质难以得到保证, 锅炉燃煤多变且有灰分不断升高、热值不断降低的趋势, 加之低灰熔点煤的大量开发应用, 燃煤总体品位下降使锅炉受热面产生积灰、结渣等一系列问题, 受热面使用寿命降低, 锅炉管子爆漏现象频繁。根据 1992 年我国火电设备事故的统计表明, 当年锅炉事故占全部发电事故的 56% , 而锅炉四管爆破事故却占到全部锅炉事故的 64.2% , 与 1985 前比较呈明显上升趋势, 这其中省煤器占 35.3% , 过热器占 29.8% , 水冷



壁占 27.8%，再热器占 7.1%。产生事故的原因除管材和焊接质量问题外，主要是由于锅炉积灰结渣等原因所引起。由此可见，积灰结渣已成为妨碍提高机组利用率和安全性的重要因素。这个问题在国际上也显得十分严重。

1.4 积灰结渣研究现状

炉内受热面的积灰结渣主要由夹带在烟气中熔化或部分熔化的颗粒，碰撞在直接接受火焰辐射的水冷壁和悬吊式过热器管表面，冷却凝固所形成。沉积在受热面上的灰渣起着绝热层阻碍传热的作用，从而破坏着炉内总的热平衡过程。国内多数燃煤电厂锅炉的结渣经历，从严重限制出力到反而要保留一定的覆盖渣以维持正常汽温水平。部分电厂因锅炉严重结渣而降低出力和热效率的幅度分别在 10%~20% 和 1%~2.5% 左右，非计划停炉次数亦显著增加。因此，结渣无论是对普遍提高锅炉运行水平，改进机组和吹灰器系统设计，或是进行炉内传热等基础研究，均是必需考虑的最重要因素之一。

炉内结渣是一种非常复杂的现象，美、英、前西德和澳大利亚等国在 60 年代初期曾对其形成机理做了大量研究工作，但至今尚无定论。近年来国外着重发展和总结出许多结渣经验判别指标，直接提供工程上应用。美国伯太尔·哥伦布 (Battelle Columbus) 实验室曾对这些指标进行过验证 (R.E.Barrett, et al., 1984)，国内在这方面也有不少研究。以下是综合分析国内外关于炉内积灰结渣的研究工作。

1.4.1 积灰结渣的研究方法和手段

(1) 实验室分析方法

实验室分析方法主要包括两大部分，一是对煤中矿物质的组成种类、化学成分、尺寸和分布的研究，一是对灰渣高温特性的分析。

煤中矿物质的种类早已被地质学家和矿物学家证实，其主要包括碳酸盐、硫化物、硫酸盐、磷酸盐、氧化物等。典型矿物质有钾云母 ($K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$)、铁白云石 ($CaCO_3 \cdot FeCO_3 \cdot MgCO_3$)、胶黄铁矿 [$K_2S + (AlS \cdot FeS \cdot H_2O)$]、毛帆石 [$Al_2(SO_4)_3 \cdot (16H_2O)$]、黄钾铁矾 [$K_2SO_4 \cdot xFe_2(SO_4)_3$]、核磷铝石 ($3Al_2O_3 \cdot P_2O_5 \cdot 18H_2O$)、岩盐 (NaCl)、钾盐 (KCl)、水氯镁石 ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) 等。在这些矿物质中，有的与煤中有机质混杂在一起，也有的单独分布在煤中。不同的矿物质组成和分布直接影响



到煤中矿物质的转化以及后续的积灰结渣过程。因此对煤中矿物质分布、组成等的研究是研究积灰结渣特性和机理的基础。传统对矿物质种类、分布的研究主要是进行光学显微镜等微观分析,借助 X 射线衍射 (XRD)、差热分析 (DTA)、傅立叶红外变换光谱分析 (FTIR) 等现代物质分析仪器设备进行研究。煤中矿物质的化学成分主要通过湿法化学分析或是 X 射线荧光光谱分析。

煤灰中的化学成分分析显然是整个煤中矿物质成分和数量的平均,不能反映矿物质分布的非均匀性。对于 XRD, DTA 和 FTIR 等分析方法,也都需要与标准的矿物质图谱进行比较,此外以上方法都需要将矿物质从煤中分离出来,而且不能破坏其结构,如通过低温灰化仪进行备样 (H.J. Luskoter, 1965; R.N. Miller, 1979)。为了克服这些缺陷,国外近年来开始用计算机控制扫描电镜 CCSEM (配备有自动图象分析系统) 来研究煤中的矿物质种类、数量、尺寸,与有机质的关系。在美国、英国、澳大利亚、加拿大、荷兰等国,CCSEM 已经广泛地用于煤中矿物质相关的飞灰和灰渣沉积过程。国外一些积灰结渣的模型就是建立在 CCSEM 分析的基础上。

灰渣的高温特性分析主要包括灰熔点分析、灰粘度分析、表面张力分析等 (John, 1989; Hough, 1986; Huffman, 1998)。煤中矿物质燃烧后形成的灰渣,其熔融温度多数处于 $1000 \sim 1800^{\circ}\text{C}$ 。在这样的温度范围锅炉炉内的灰渣大部分呈熔融状态,如果在炉膛内得不到足够的冷却固化,则必然导致积灰结渣。因此灰渣的熔融特性分析对于评价积灰结渣特性十分必要。

灰熔点的分析各国都有不同的规范,但是大体上还是一致的。即一定形状的灰渣样,在一定的气氛条件下,观察其形态变化所对应的温度。因此灰熔点的测定方法是一种规范的试验方法,有一定的准确度和实用参考价值。积灰结渣过程实际上是一个灰渣粒子界面与锅炉受热面界面相互作用的过程,因此研究灰渣的表面张力特性十分必要。国内外对于玻璃、钢渣等物质的表面张力进行了深入研究,国外也有单位研究了灰渣的表面张力特性,在我国对灰渣表面张力对灰沉积的影响也有一定的认识,但是很少在这方面进行分析和研究。近年来,国外有一些单位开展了一些间接的方法来分析灰渣的高温特性。如烧结抗压强度测试、高温电阻变化测试等 (Johan, 1993; Mills, 1989),也建立了一些对应的灰渣沉积的评价指标。

(2) 热态模拟试验研究方法

锅炉积灰结渣是煤粉燃烧后的矿物质在特定燃烧环境中的一种行为,为



了正确评价灰渣沉积特性, 热态模拟试验或实际锅炉试验是一种必要的研究方法 (Erickson, 1993; Hutchings, 1995; Barnes, 1993; Murray, 1993; Barnes, 1995)。对于灰渣沉积的模拟研究, 滴管炉试验是国内外利用最为普遍的方法。此外在美国的 EERC 还开发了一个加压滴管炉系统用来分析在加压层流煤气化炉内灰渣沉积特性。英国煤炭公司的煤炭研究机构 CRE 为了研究英国电站用煤的灰渣沉积特性也建立了一个灰沉积小型实验台, 其实质也是一个类似于本实验室的滴管炉, 但其体积较大, 每小时耗煤约 20kg, 其独到之处为设计的易于操作的灰渣沉积取样管。近几年来, 由于日本大量进口澳大利亚、南非、中国等地的优质动力煤, 这些煤种很大一部分为易结渣煤, 因此, 灰渣沉积在日本也受到了重视。日本煤炭利用中心也曾利用滴管炉来研究灰渣的沉积速度、灰渣热物理特性、强度的形成等灰渣沉积现象。

美国洁净煤计划的第三阶段, 其中有一个项目用于建立煤质专家系统, 为了分析煤中矿物质造成的灰渣沉积对锅炉运行的影响, 开发单位 CONSOL 公司建立了一个 0.4MW 的小型试验炉 (Murray, 1993), 用来测定不同煤种的灰渣沉积特性。在炉体煤燃烧的部位安装有两个结渣实验探针, 在实验台的尾部有积灰试验装置。

西安热工研究院也曾经利用一维沉降炉来模拟研究灰渣的沉积特性, 利用结渣探针深入模拟的炉膛中, 在一定的时间和条件下观察灰渣沉积物的沉积速度和强度、形状等特性, 通过渣型对比法确定灰渣沉积趋势的强弱, 在中国应用较广^①。

(3) 实际锅炉试烧方法

实际锅炉试烧方法 (Higb, 1993), 可以说是最为直接判别煤的燃烧特性和积灰结渣的方法。对于需要研究的煤种, 选择与设计或运行条件相似的锅炉或结合积灰结渣严重的锅炉的改造同时进行, 这样可以全面了解包括制粉、着火燃尽、积灰结渣、磨损腐蚀等全面的煤燃烧特性。虽然这种方法在人力、物力、财力上有很高代价, 但是结果可靠, 得到的信息全面, 对认识积灰结渣的实质有很高的价值。

热态模拟和实际锅炉燃烧方法除了需要较长的周期及大量物力和财力外, 热态模拟的实验结果利用也仍要辅以其他来源的科学判据。基于以上原

① 电力工业部西安热工研究所, 炉膛选型 10 年汇报 (煤性-炉性耦合系统工程), 1993



因,许多国家多年来一直致力于建立一套以实验室手段为依据并辅以现场经验相印证的间接判别体系。这些判据包括利用煤的常规分析、非常规分析,如灰熔融性、粘温特性、灰成分、物相分析等参数,以得出不同的综合判别指标,也包括考虑到煤粉悬浮燃烧特点的特殊理化分析,以及模拟实验评价方法。

1.4.2 积灰结渣的判别

(1) 根据煤灰物理特性判别

煤灰的物理特性包括煤灰的熔点温度、灰渣粘度、烧结温度、渣形特征等。国内外在这方面的研究比较充分。

A. 根据灰熔点温度 (T_1 , T_2) 预测煤的结渣特性

a. 用煤灰变形温度 T_1 、软化温度 T_2 进行预测

还原性气氛中的初始变形温度是预测炉内结渣倾向的一种常用指标。

用 T_1 温度判断煤种结渣性界限为 (孙亦禄等, 1986):

$T_1 > 1289$ (°C) 不结渣

$T_1 = 1108 \sim 1288$ (°C) 中等结渣

$T_1 < 1107$ (°C) 严重结渣

美国 CE 公司用还原性气氛初始变形温度 DT (相当于我国标准中 T_1) 来预测煤种结渣性, 判断界限为:

$DT > 1371$ (°C) 不结渣

$DT = 1093 \sim 1204$ (°C) 易结渣

T_2 为我国灰熔点标准测定方法中弱还原性气氛软化温度。哈尔滨成套设备研究所 (何佩璠等, 1987) 曾对我国 250 个动力用煤的灰渣特性进行分析, 并用三段最优分割法确定经验判据。用最优分割法获得的判据为:

$T_2 > 1390$ (°C) 不结渣

$T_2 = 1260 \sim 1390$ (°C) 中等结渣

$T_2 < 1260$ (°C) 严重结渣

该判据具有约 65% 的分辨率。

日本 (中岛文也等, 1985) 用 T_2 来判断煤结渣性的判据为:

$T_2 > 1230$ (°C) 结渣性低

$T_2 < 1230$ (°C) 结渣性高

运行锅炉实际结渣状况与炉内温度水平有关。煤软化温度 T_2 只表示了



煤本身的结渣倾向,并不能反映炉内环境温度水平的影响。燃煤低位发热值 Q_{dw}^y 大体上能反映出炉内温度水平。西安热工研究院对 67 个电厂各类炉型结渣状况进行调查,并凭经验确定 T_2 , Q_{dw}^y 的划分界限见图 1.2。从图中炉内结渣与不结渣区 $Q_{dw}^y-T_2$ 界限曲线可以看出,随燃煤 Q_{dw}^y 增加,形成结渣 T_2 界限也相应增加。相反,如 Q_{dw}^y 较低,则炉内温度水平较低,故即使 T_2 较低,也不会引起严重结渣。为此,归纳整理了以 T_2 作为煤灰玷污、结渣特征指标,并以 Q_{dw}^y 作为辅助分类指标的判据,分类判据为:

$T_2 > 1230$ ($^{\circ}\text{C}$), $Q_{dw}^y = 8.5 \sim 27$ (MJ/kg) 不结渣区

$T_2 < 1230$ ($^{\circ}\text{C}$), $Q_{dw}^y > 12.6$ (MJ/kg) 结渣区

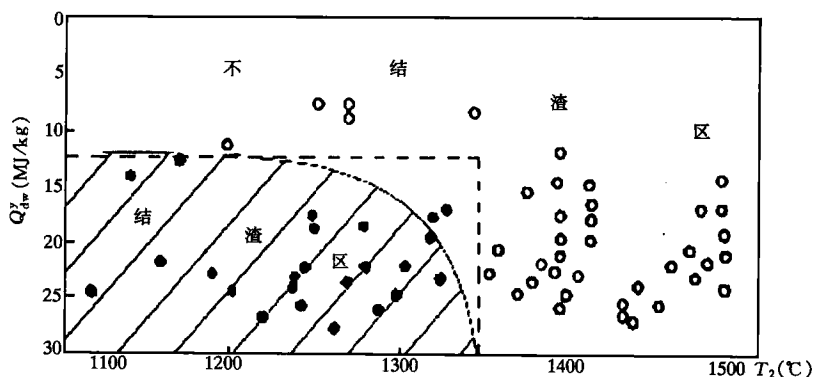


图 1.2 燃煤结渣特性划分范围

b. 熔点结渣指数对结渣判别

熔点结渣指数(Johns, 1990)是按美国 ASME 标准,用高温热显微镜在不同气氛下测得的灰熔点值,并用下列公式计算得出:

$$R_T = \frac{STH(\text{最大值}) + 4DT(\text{最小值})}{5} \quad (1.1)$$

式中, DT (最小值) ——分别为在氧化和还原性气氛下测得较低的初始变形温度;

STH (最大值) ——分别为在氧化和还原性气氛下测得的较高的半球温度,半球温度按 ASTM 标准,灰样品半球高 = 半球底宽 $1/2$ 时的温度。