

600 MW 燃煤机组超净排放特性及烟尘组分特征分析

赵斌¹,高明非¹,王振²,靳姗姗²,董昌伟¹

(1. 华北理工大学 冶金与能源学院,河北 唐山 063210;2. 河北省电力勘测设计研究院,河北 石家庄 050031)

摘要:针对环境污染问题对现役燃煤机组实施超净排放改造,以某600 MW燃煤机组为例,探讨了燃煤电站的超净排放标准和技术方法,对湿法烟气脱硫系统(WFGD)进、出口烟气中的烟尘颗粒物进行采样,分析其排放特性及组分特征。结果表明:WFGD系统对烟尘中的大颗粒物具有较强的脱除效果,出口烟气中的PM_{2.5}及以下粒径的细颗粒物含量上升;经过脱硫后的烟气颗粒物形态由链状结构变化为团簇结构,且体积更小,主要元素成分没有发生改变,Ca、Mg、S含量有所增加,Si、Al含量略有下降,脱硫后颗粒物增加了由WFGD系统携带出来的石灰石和石膏成分。

关键词:燃煤机组;超净排放;烟气颗粒物;WFGD;组分特性

中图分类号:X773

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2018)01-0148-05

Analysis of flue dust characteristics of 600 MW ultra-low emission coal-fired unit

ZHAO Bin¹, GAO Mingfei¹, WANG Zhen², JIN Shanshan², DONG Changwei¹

(1. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;

2. Hebei Electric Power Design and Research Institute, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: In order to develop ultra-low emission reconstruction for the coal-fired power stations in case of current environmental pollution problem. Based on a 600 MW unit, standards and technical methods of ultra-low emission was discussed. The fine particles were sampled from import and export of wet flue gas desulfurization system (WFGD), in order to analyze the emission and component characteristics. The results show that WFGD system has a great removal effect on the large particles in flue gas and the mass concentration of particle size under PM_{2.5} is increased. After desulphurization, the pattern of fine particles is changed from the chain structure to the cluster structure, which the volume is smaller. The main elements of the particles do not change. The content of Ca, Mg and S increase slightly, while the content of Si and Al decrease. Composition of limestone and gypsum is increased in the particles, which is carried out by WFGD system after desulphurization.

Key words: coal-fired unit; ultra-low emission; flue gas particles; WFGD; component characteristics

0 引言

我国的能源结构决定了煤炭在未来较长一段时间作为主要能源的格局将不会改变^[1],大量的煤粉燃烧后产生细颗粒物排放到大气中,这是导致雾霾形成的重要原因。燃煤电站作为大气污染物排放的重要来源,近年来不断对机组升级改造^[2],利用污染物协同脱除控制技术,使电站污染物排放能够满

足国家严格的大气污染物排放标准^[3]。从发展燃煤发电长远的角度看,实施“超净排放”升级改造是电企面对的必然选择。

国内外学者对通过WFGD系统前后的颗粒物特性开展了相应的研究。Meij等^[4]研究发现通过ESP和WFGD系统协同脱除烟尘颗粒效率高达99.6%,颗粒物质量浓度可降至<10 mg/m³,出口烟气颗粒物主要包含石膏及由脱硫液形成的固态颗粒

收稿日期:2018-01-03;责任编辑:李柏熹 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2018.01.026

基金项目:重庆大学低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室开放基金资助项目(LLEUTS-201702)

作者简介:赵斌(1968—),男,吉林公主岭人,教授,博士,主要从事余热回收及发电技术的研究。E-mail:zhaobin19680507@163.com

引用格式:赵斌,高明非,王振,等.600 MW燃煤机组超净排放特性及烟尘组分特征分析[J].洁净煤技术,2018,24(1):148-152.

ZHAO Bin, GAO Mingfei, WANG Zhen, et al. Analysis of flue dust characteristics of 600 MW ultra-low emission coal-fired unit[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(1): 148-152.

物。王琿等^[5]研究了某 300 MW 机组 WFGD 系统的除尘效率,灰颗粒粒径 $<2.5 \mu\text{m}$ 时除尘效率较低,WFGD 系统进、出口的颗粒物形态和构成上都有区别。张军等^[6]研究了 1 000 MW 燃煤机组常规污染物 SO_2 、 NO_x 的脱除特性,同时对 SO_3 、汞及其化合物等非非常规污染物的研究发现,现有的污染物脱除设备可以有效协同控制 SO_3 、汞及其化合物,WFGD 对两者的脱除效率分别为 76.8%、80%。虽然行业内诸多学者已经提出了实现燃煤电站烟气污染物超低排放相关技术路线及实现方法^[7-11],但每台燃煤机组的颗粒物排放呈现出各自的特性,因此研究不同机组烟气颗粒物的超净排放特性和组分特征十分必要。

由于烟气除尘仅依靠原有的静电除尘器(ESP)不能满足排放要求,目前普遍做法是在除尘装置后加装湿法烟气脱硫(WFGD)系统及烟气调质系统^[12]。WFGD 系统也称为石灰石-石膏湿法脱硫系统,既具备脱除 SO_2 的能力(脱硫浆液自身对烟气进行了洗涤),也具备脱除烟气颗粒物的能力^[13-15]。

国内某电厂 600 MW 机组采用低氮燃烧器、选择性催化还原脱硝(SCR)、ESP、烟气调质及 WFGD 系统的超净排放工艺路线,对大气污染物(烟尘、 NO_x 、 SO_2 、汞及其化合物等)协同脱除。通过现场采样的烟气颗粒物数据,分析燃煤电厂超低排放机组烟气颗粒物的排放特性及组分特征,为进一步研究烟气污染物排放提供理论支撑。

1 试 验

1.1 试验对象

对国内某电厂 600 MW 燃煤发电机组进行研究,机组采用 HG-2030/17.5-YM9 型、亚临界、一次中间再热煤粉锅炉,锅炉最大容量 2 030 t/h,通过海水直流冷却。锅炉配套烟气 SCR 脱硝装置,以尿素为还原剂,尾部烟道配备 2 台双室五电场静电除尘装置,配备 1 套双重烟气调质系统,调质剂采用 SO_3 和 NH_3 ,其后烟气脱硫系统为石灰石-石膏湿法脱硫装置,采用双喷淋塔结构处理烟气中 SO_x 。

入炉煤质特性分析见表 1,飞灰组成见表 2。

表 1 煤质工业分析

Table 1 Proximate analysis of coal

%

M_{ad}	A_{ad}	A_{ar}	A_{d}	V_{ad}	V_{d}	V_{daf}	$w(S_{\text{t,ad}})$	$w(S_{\text{t,ar}})$	$w(S_{\text{t,d}})$
3.20	30.01	27.59	31.01	26.51	27.39	39.70	0.65	0.60	0.67

表 2 飞灰组成

Table 2 Composition of fly ash

成分	SiO_2	Al_2O_3	F_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	MnO	其他
含量/%	51.90	34.55	4.34	1.35	2.95	0.60	1.08	0.38	0.65	0.03	2.17

1.2 试验方法

机组运行工况为 500 ~ 600 MW。试验样本采集点选择在 WFGD 系统脱硫预洗塔入口的水平烟道(采样点 1)和烟囱进口的水平烟道(采样点 2),如图 1 所示。对 WFGD 系统进、出口烟气总颗粒现场采样,采用非稀释法 DGI 颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 分粒径撞击采样器对采样点的颗粒物采样,收集机组脱硫石膏、除尘器飞灰、脱硫剂石灰粉等固体样品。对颗粒物采用称重法分析烟气中的烟尘质量浓度,并依托清华大学分析中心运用电感耦合等离子-质谱法(ICP-MS)分析样品中 Si、Al、S、Ca、Fe、K、Mg、P、Hg 等元素含量,依托北京国家有色金属及电子材料分析测试中心运用 SEM-EDS 和 XRD 对样品颗粒形

貌、成分进行分析,研究脱硫出口颗粒物的主要来源及形貌特征。

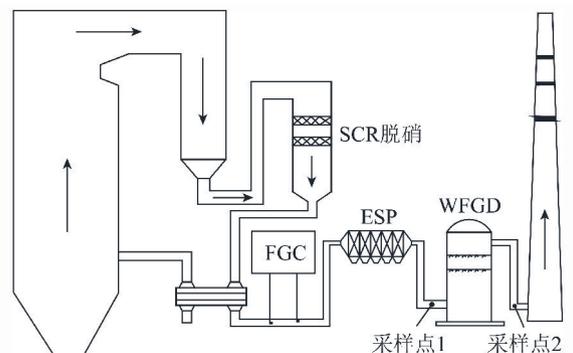


图 1 颗粒物取样示意

Fig. 1 Schematic of particulate matter sampling

2 试验结果与分析

2.1 烟尘质量浓度

利用 ZR-D09A 型低浓度烟尘采样器对不同负荷下 WFGD 系统进、出口颗粒物采样,将采集样品分别标号,其中 1~3 号为采样点 1 处样本,4~6 号为采样点 2 处样本。将样品置于干燥器 48 h 后称重,通过恒重法分析烟气采样标况体积 V 对应的颗粒物质量 m ,通过 m/V 计算出烟气中总颗粒物的质量浓度,见表 3。

表 3 不同负荷下 WFGD 系统进、出口总颗粒物质量浓度

Table 3 Particulate matter concentration of import and export for WFGD system under different loads

样品	负荷/MW	测试值/($\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$)
1	600	16.45
2	550	17.59
3	580	19.81
4	520	4.59
5	560	3.75
6	510	4.22

WFGD 系统进口烟气颗粒物平均质量浓度为 $17.95 \text{ mg}/\text{Nm}^3$,出口为 $4.19 \text{ mg}/\text{Nm}^3$,脱除效率为 76.66%。3 组数据在出口处的颗粒物浓度均低于 $10 \text{ mg}/\text{Nm}^3$,达到排放标准,因此超净排放机组 WFGD 系统对烟气总颗粒物具有良好的脱除效果。

2.2 颗粒物分布特性

对烟气总颗粒物样品(TSP)采样,采用非稀释法 DGI 颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 分粒径撞击采样器对 WFGD 系统进、出口烟气中 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{1.0}$ 、 $\text{PM}_{0.5}$ 、 $\text{PM}_{0.2}$ 及以下细颗粒物分级采样,各采集 3 组样本,分组称重后,计算各粒径颗粒物平均质量浓度,如图 2 所示。

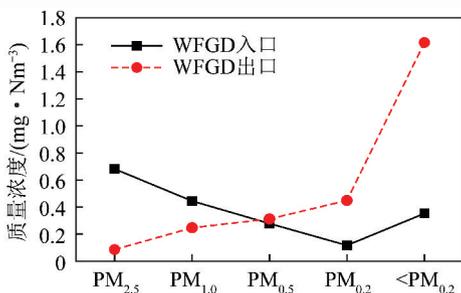


图 2 WFGD 系统进、出口各段细颗粒物质量浓度

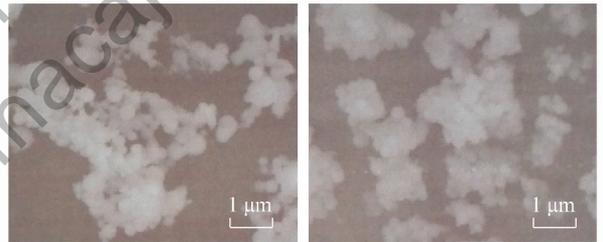
Fig. 2 Mass concentrations of different diameter particles of import and export for WFGD system

WFGD 系统进口总颗粒物平均质量浓度为

$17.95 \text{ mg}/\text{Nm}^3$,其中 $\text{PM}_{2.5}$ 及以下的细颗粒物含量较少,占 TSP 总浓度的 10.44%,表明 WFGD 系统进口主要以大颗粒物为主,且细颗粒物随着粒径变小,其质量浓度占比呈下降趋势。虽然经过 WFGD 系统脱硫之后的出口烟气 TSP 质量浓度降至 $4.19 \text{ mg}/\text{Nm}^3$,但 $\text{PM}_{2.5}$ 及以下的细颗粒物在 TSP 总浓度占比增至 64.68%,表明 WFGD 系统对大颗粒物具有较好的脱除效果,导致出口烟气中细颗粒物浓度上升,且随着颗粒粒径变小,质量浓度占比呈上升趋势。

2.3 颗粒物形貌特性

通过 WFGD 系统进、出口烟气总颗粒物 TSP 在扫描电镜放大 5 000 倍下观测到的颗粒物形貌特征如图 3 所示。可以看出:经过 WFGD 系统前的颗粒物呈不规则球形、链状分布,分散排列,部分区域的颗粒物相互堆叠团聚;而出口处的颗粒物相互堆叠团聚的程度更高,形成致密的不规则团聚体呈团簇状结构,团聚体的体积更小。



(a) WFGD系统进口

(b) WFGD系统出口

图 3 颗粒物扫描电镜检测

Fig. 3 Scanning electron microscopy test of particulate matter

2.4 颗粒物元素

通过 SEM-EDS 分析颗粒物的元素组成,如图 4 所示。结果表明:通过 WFGD 系统的烟气颗粒物主要元素未发生明显变化,均为 Si、Al、S、Ca、Fe、Mg、Na、P、Cl、K、Ti。其中 Si、Al、S、Ca 为主要元素,占 90% 以上;经过 WFGD 系统后的颗粒物中 Si、Al 含量下降,而 S、Ca、Mg 含量增加,Si、Al 是飞灰中的主要元素,而 S、Ca、Mg 是脱硫浆液的主要元素,烟气通过 WFGD 系统后颗粒物将携带部分脱硫浆液蒸发,导致原颗粒物中元素含量占比下降,表明烟气经过 WFGD 系统后,烟气颗粒物携带了部分脱硫浆液物质。

2.5 颗粒物的 XRD 分析

通过 WFGD 系统的细颗粒物的 XRD 分析表明,采集点 1 主要成分为 Al ($\text{Al}_{1.272}\text{Si}_{0.728}\text{O}_{4.864}$)、 SiO_2 、

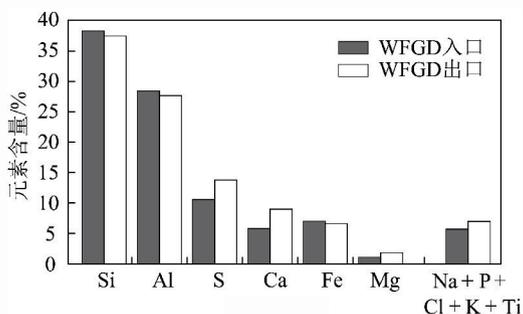
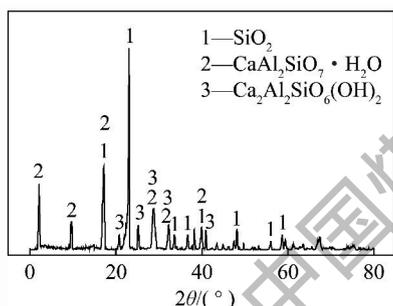


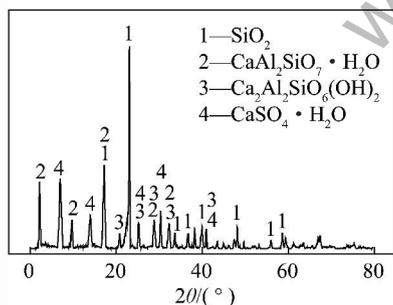
图4 颗粒物能谱EDS元素含量分布

Fig. 4 Element content distribution of EDS in particles

$\text{Ca}_3(\text{Si}_3\text{O}_9)$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 54\text{SiO}_2$ 、 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_6(\text{H}_2\text{O})_6$ ，采集点2脱硫后的颗粒物成分增加了 $\text{Ca}_{11.3}\text{Al}_{14}\text{O}_{32.3}$ 、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ，几种主要成分的衍射图谱如图5所示。通过对比分析石灰石成分 (CaCO_3 、 SiO_2) 和石膏成分 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 SiO_2 、 $\text{Al}(\text{SiO}_4)\text{O}$) 发现，通过 WFGD 系统的细颗粒物中携带了脱硫剂石灰石、脱硫产物石膏，验证了颗粒物元素分析结果。



(a) WFGD系统进口



(b) WFGD系统出口

图5 颗粒物 XRD 分析

Fig. 5 Particle XRD analysis

3 结 论

1) 经过 WFGD 系统的烟尘质量浓度由 $17.95 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 降到 $4.19 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ ，脱除效率为 76.66%， $\text{PM}_{2.5}$ 及以下粒径的细颗粒物占 TSP 总质量浓度比例由 10.44% 提高到 64.68%，表明 WFGD

系统对烟尘中大颗粒物有较好的脱除效果，导致出口烟气中的细颗粒物含量上升。

2) 通过扫描电镜观察到脱硫后的烟气颗粒物形态由链状结构变化为团簇结构，且体积更小。

3) 经过 WFGD 系统的颗粒物元素成分没有发生改变，Ca、Mg、S 含量略有增加，Si、Al 含量有所下降，脱硫后细颗粒物成分中增加了 $\text{Ca}_{11.3}\text{Al}_{14}\text{O}_{32.3}$ 、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ，部分脱硫浆液产物被携带出来。

参考文献 (References):

- [1] 赵永椿, 马斯鸣, 杨建平, 等. 燃煤电厂污染物超净排放的发展及现状[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2629-2640.
ZHAO Yongchun, MA Siming, YANG Jianping, et al. Status of ultra-low emission technology in coal-fired power plant[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2629-2640.
- [2] 周朝阳. 1 000 MW 超超临界机组超低排放改造工程分析[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(6): 118-123.
ZHOU Chaoyang. Analysis on the retrofitting engineering of ultra-low pollutant emissions for a 1 000 MW ultra-supercritical coal-fired power plant[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(6): 118-123.
- [3] 赵磊, 周洪光. 近零排放机组不同湿式电除尘器除尘效果[J]. 动力工程学报, 2016, 36(1): 53-58.
ZHOU Lei, ZHOU Hongguang. Removal efficiency of different WESPs in coal-fired power plants with near-zero emissions[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2016, 36(1): 53-58.
- [4] MEIJ R, WINKEL B T. The emissions and environmental impact of PM_{10} , and trace elements from a modern coal-fired power plant equipped with ESP and wet FGD[J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85(6): 641-656.
- [5] 王琿, 宋蕾, 姚强, 等. 电厂湿法脱硫系统对烟气中细颗粒物脱除作用的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(5): 1-7.
WANG Hui, SONG Qiang, YAO Qiang, et al. Experimental study on removal effect of wet flue gas desulfurization system on fine particles from a coal-fired power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(5): 1-7.
- [6] 张军, 郑成航, 张涌新, 等. 某 1 000 MW 燃煤机组超低排放电厂烟气污染物排放测试及其特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1310-1314.
ZHANG Jun, ZHENG Chenghang, ZHANG Yongxin, et al. Experimental investigation of ultra-low pollutants emission characteristics from a 1 000 MW coal-fired power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1310-1314.
- [7] 张玉华, 束航, 范红梅, 等. 商业 $\text{V}_2\text{O}_5-\text{WO}_3/\text{TiO}_2$ 催化剂 SCR 脱硝过程中 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放特性及影响因素研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 383-389.
ZHANG Yuhua, SHU Hang, FAN Hongmei, et al. Research on emission characteristics and influencing factors of $\text{PM}_{2.5}$ for selective catalytic reduction based on $\text{V}_2\text{O}_5-\text{WO}_3/\text{TiO}_2$ commercial

- cial catalysts[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2):383-389.
- [8] SRIVASTAVA R K, HUTSON N, MARTIN B, et al. Control of mercury emissions from coal-fired electric utility boilers[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(5):1385-1393.
- [9] Córdoba P. Partitioning and speciation of selenium in wet limestone flue gas desulphurization (FGD) systems: A review [J]. Fuel, 2017, 202:184-195.
- [10] 姚明宇, 聂剑平, 张立欣, 等. 燃煤电站锅炉烟气污染物一体化协同治理技术[J]. 热力发电, 2016, 45(3):8-12.
YAO Mingyu, NIE Jianping, ZHANG Lixin, et al. Integrative flue-gas pollutants removal technology for coal-fired utility boilers[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(3):8-12.
- [11] 沈亚林, 赵文. 超低排放烟尘控制集成技术[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(2):191-196.
SHEN Yalin, ZHAO Wen. Flue dust control integration technology of ultra low emission[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(2):191-196.
- [12] 倪吴忠, 徐继先, 王成, 等. 燃煤发电机组超低排放改造及其运行稳定性研究[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(8):73-75.
NI Wuzhong, XU Jixian, WANG Cheng, et al. Transformation of coal-fired power generating unit for ultra-low emission and research on its operational stability [J]. Environment Pollution & Control, 2016, 38(8):73-75.
- [13] 李兵, 王宏亮, 许月阳, 等. 燃煤电厂湿法脱硫设施对烟气中微量元素的减排特性[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10):2479-2483.
LI Bing, WANG Hongliang, XU Yueyang, et al. Reduction of trace elements in flue gas by wet desulphurization facilities in coal-fired power plants [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10):2479-2483.
- [14] 贾海娟, 谢永平, 马学礼, 等. 燃煤电厂烟气污染物超低排放技术路线分析[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(6):111.
JIA Haijuan, XIE Yongping, MA Xueli, et al. Analysis of ultra-low emission technology of flue gas in coal-fired power plants [J]. Environment Pollution & Control, 2016, 38(6):111.
- [15] 赵亚丽, 赵浩宁, 范真真, 等. 烧结机细颗粒物 PM_{2.5} 排放特性[J]. 环境工程学报, 2015, 9(3):1369-1375.
ZHAO Yali, ZHAO Haoning, FAN Zhenzhen, et al. Emission characteristics of PM_{2.5} from sintering machine [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(3):1369-1375.

致谢《洁净煤技术》审稿专家

2017年,各位审稿专家在百忙之中对编辑部送审论文进行了认真审阅,并提出了具体而中肯的修改意见,保证了期刊质量的稳步提升。值此新年来临之际,编辑部全体成员向各位专家致以崇高的敬意和衷心的感谢!希望在新的一年里继续得到各位专家的支持与帮助!

按姓氏笔画排列:

马力强 马文林 马双忱 王利斌 王宝凤 王宝冬 王智化 王燕芳 牛胜利
 方梦祥 卢啸风 申峻 田红 白向飞 白金锋 白磊 冯杰 竹涛
 刘曰武 刘转年 刘建忠 李文博 李书兴 李兰廷 李会泉 李克健 李英杰
 李俊汾 李瑛 李琳 李寒旭 杨卫娟 杨凤玲 杨志远 吴东垠 吴立新
 闵凡飞 初莱 张玉秀 张东晨 张立麟 张华伟 张守玉 张军营 张明旭
 张建文 张春晖 陈宏刚 金晶 周月桂 周托 郑化安 赵永椿 胡满银
 柏静儒 秦志宏 聂毅 徐东耀 高晋生 郭强 黄根 黄镇宇 曹文平
 康志忠 彭万旺 董卫果 董宪妹 韩军 韩奎华 储向峰 解强 熊银伍
 霍卫东