

# 京津冀地区民用洁净煤燃烧及排放特性

王东升<sup>1,2</sup>,白向飞<sup>1,2</sup>,刘明锐<sup>1,2</sup>,丁华<sup>1,2</sup>,王晨<sup>1,2</sup>

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 煤化工分院,北京 100013;2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013)

**摘要:**针对居民无烟煤、兰炭燃烧存在的难点燃、易断火、不耐烧等问题,通过热重燃烧试验,分析了兰炭、无烟煤、兰炭和无烟煤混合型煤的燃烧特性,利用民用煤燃烧试验装置进行民用洁净煤燃烧烟气污染物检测。结果表明,兰炭着火温度为449℃,无烟煤着火温度为504℃,兰炭的燃烧失重和失重速率均高于无烟煤,表明兰炭比无烟煤易点燃、燃烧持续时间短,混合型煤能够兼顾二者的燃烧特性,建议在型煤加工过程中采用无烟煤与兰炭混合原料成型。3种产品燃烧排放烟气中颗粒物质量浓度均低于30 mg/m<sup>3</sup>,烟气成分中SO<sub>2</sub>质量浓度均低于40 mg/m<sup>3</sup>,NO<sub>x</sub>质量浓度均低于140 mg/m<sup>3</sup>,林格曼黑度为0级,达到国家标准的限值要求。兰炭、无烟煤、兰炭和无烟煤混合型煤是农村居民燃煤的理想清洁燃料。

**关键词:**民用洁净煤;无烟煤;兰炭;混合成型;燃烧特性;排放特性;清洁燃料

中图分类号:TQ536 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2018)03-0081-04

## Civil clean coal combustion and emission characteristics in the Beijing-Tianjin-Hebei region

WANG Dongsheng<sup>1,2</sup>, BAI Xiangfei<sup>1,2</sup>, LIU Mingrui<sup>1,2</sup>, DING Hua<sup>1,2</sup>, WANG Chen<sup>1,2</sup>

(1. Coal Chemistry Branch of China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In view of the problem of difficult to ignite, easy to break fire and less resistance of fire in combustion process of civil anthracite and semi-coke, the combustion and emission characteristics of semi-coke, anthracite and mixing briquette were studied through combustion test device. Results show the ignition temperature of semi-coke and anthracite are 449 °C and 504 °C, respectively. The burning weight loss and mass loss rate of semi-coke are higher than that of anthracite, illustrating that semi-coke presents low ignition temperature and fast combustion rate compared with anthracite, and mixed briquette can take account of the combustion characteristics of semi-coke and anthracite. The mixture of semi-coke and anthracite is suggested to be the raw material for briquette. The particle concentration of three samples are lower than 30 mg/m<sup>3</sup>, content of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> are lower than 40 mg/m<sup>3</sup> and lower than 140 mg/m<sup>3</sup>, and the ringelmann blackness is grade 0. The test result is in conformity with national standards indicating semi-coke, anthracite and briquette would be the ideal civil clean fuel.

**Key words:** civil clean coal; anthracite; semi-coke; mixing briquette; combustion characteristics; emission characteristics; clean fuel

## 0 引 言

我国北方地区农村居民冬季取暖是灰霾天气的主要来源之一<sup>[1-3]</sup>。农村居民冬季炊事和取暖多以

家庭为单位,大部分以烟煤散煤为燃料,采用直燃直排的方式<sup>[5-7]</sup>。散煤质量差、燃烧效率低,民用炉具规模小、数量大,未安装烟气除尘和脱硫装置,散煤燃烧产生的污染物给人类生活带来危害<sup>[8-9]</sup>。推广

收稿日期:2017-11-26;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2018.03.015

基金项目:煤炭科学技术研究院有限公司科技创新基金资助项目(2016JC02)

作者简介:王东升(1981—),男,山东济宁人,副研究员,硕士,主要从事型煤技术开发及煤质技术研究工作。E-mail:wangdsh999@163.com

引用格式:王东升,白向飞,刘明锐,等.京津冀地区民用洁净煤燃烧及排放特性[J].洁净煤技术,2018,24(3):81-84,90.

WANG Dongsheng, BAI Xiangfei, LIU Mingrui, et al. Civil clean coal combustion and emission characteristics in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(3): 81-84, 90.

使用民用洁净煤和洁净型煤是解决农村散煤散烧问题的有效手段之一,京津冀及周边地区鼓励推广使用民用洁净煤和洁净型煤,取得了一定的效果。但在民用洁净煤使用过程中存在无烟煤难点燃、易断火、兰炭不耐烧等问题,这主要是由于无烟煤与兰炭的燃烧特性不同。

国内学者在烟煤燃烧特性、烟气污染物成分研究方面取得了一定成果。刘生玉等<sup>[10]</sup>采用固定床热解反应器、热解-红外联用仪和热重分析仪,考察了高挥发分烟煤的热解、燃烧特性,结果表明,热解段挥发分快速释放是高挥发分烟煤燃烧过程中产生大量黑烟的主要原因。白刚等<sup>[11]</sup>研究了不同变质程度煤的燃烧阶段特性参数,通过热重试验得到不同变质程度煤燃烧阶段温度范围,气煤燃烧阶段温度为279~542℃,贫煤燃烧阶段温度为365~594℃。周志军等<sup>[12]</sup>利用热天平对低挥发分煤的燃烧特性和NO<sub>x</sub>转化率进行研究,表明低挥发分煤的着火温度较高,可燃性较差,低挥发分煤燃烧过程中NO<sub>x</sub>转化率随着氧气浓度的增加而升高。而在无烟煤和兰炭的燃烧特性和排放特性等方面的研究还较少。

本文选取代表性的民用洁净燃料——无烟煤、兰炭,利用热重分析仪和民用煤燃烧试验装置,研究了无烟煤和兰炭的燃烧性能的差异性,并建议采用兰炭与无烟煤混合成型的方式改善民用洁净煤的燃烧特性。

## 1 民用洁净煤推广现状

京津冀地区民用燃煤每年需求量在4 000万t以上<sup>[13]</sup>。经地方政府和型煤生产企业多年努力,民用洁净煤和洁净型煤生产推广取得了一定成效,截至2016年底,河北省改造新建的型煤生产企业达到205家,总产能超过2 500万t,民用洁净煤配送体系建设实现了县—乡—村三级联合配送。2015年,京津冀地区民用洁净煤和洁净型煤供应量近500万t,

2016年由于北京、天津及周边廊坊、保定部分地区划为禁煤区和煤改电、煤改气政策的颁布实施,民用洁净煤和洁净型煤的生产推广受到影响,实际供应量比2015年大幅降低,总量不足300万t。

2016年,山东省济南、德州、淄博、聊城、潍坊等地开始大力推广洁净型煤,配套建设了诸多煤炭加工厂和三级配送体系。另外,河南、内蒙、山西等地区也纷纷出台推广民用洁净煤的政策。

2017年9月颁布的《京津冀及周边地区2017—2018年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动计划》规定,包括北京、天津、唐山等在内的“2+26”城市逐步开展以电代煤、以气代煤工作。该行动计划对于京津冀地区城市周边村镇的民用洁净煤生产和推广工作有较大影响。

从经济性和长期稳定供应等方面综合考虑,民用洁净煤具有一定优势。同时,广大农村地区冬季采暖仍需使用燃煤,民用洁净煤有较大市场。

## 2 民用洁净煤燃烧特性

低硫、低挥发分、高热量的无烟煤和兰炭是优质的民用洁净燃料。无烟煤具有难点火、燃烧持久等特点,兰炭具有易点燃、不耐烧、燃烧时间短等特点。选取代表性的无烟煤、兰炭以及无烟煤与兰炭混合制成的型煤,测试其煤质指标,并通过热重燃烧试验对比3种燃料的燃烧特性差异。

### 2.1 煤质特性

兰炭、无烟煤与混合型煤的工业分析、全硫和发热量结果见表1,微量有害元素含量测试结果见表2。由表1可知,3种样品均具有低灰、低挥发分、特低硫、高热量的特点,挥发分、全硫和发热量指标满足GB 34171—2017《商品煤质量 民用型煤》和京津冀地区洁净煤地方标准的要求。由表2可知,微量有害元素磷、氯、砷、汞、氟含量均较低,符合GB 34171—2017对微量有害元素限值的要求。

表1 样品工业分析、全硫和发热量

Table 1 Proximate analysis, total sulfur and calorific value of samples

样品	工业分析/%				$w(S_{t,d})/\%$	$Q_{gr,ad}/$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )	$Q_{gr,d}/$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )
	$M_{ad}$	$A_d$	$V_{daf}$	$FC_d$			
兰炭	5.32	12.80	7.91	73.97	0.35	27.27	28.91
无烟煤	2.92	15.19	11.03	75.45	0.31	28.09	28.93
混合型煤	2.62	16.64	10.58	74.54	0.30	28.06	28.81

表2 有害元素含量测试结果

Table 2 Results of harmful elements content

样品	As 含量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	F 含量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	Cl 含量/%	P 含量/%	Hg 含量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$
兰炭	1	48	0.039	0.014	0.006
无烟煤	1	116	0.022	0.036	0.047
混合型煤	1	73	0.021	0.012	0.038

注:测定基准为干燥基。

## 2.2 燃烧特性

采用德国耐驰公司的 STA449F3 热重分析仪对 2 种样品进行燃烧试验。燃烧试验初始温度为 30 °C,以 20 °C/min 升温速率升至 1 000 °C,反应气氛为空气,气体流量为 100 mL/min。兰炭、无烟煤和混合型煤热重燃烧 TG 和 DTG 曲线如图 1 所示。热重燃烧试验结果见表 3。

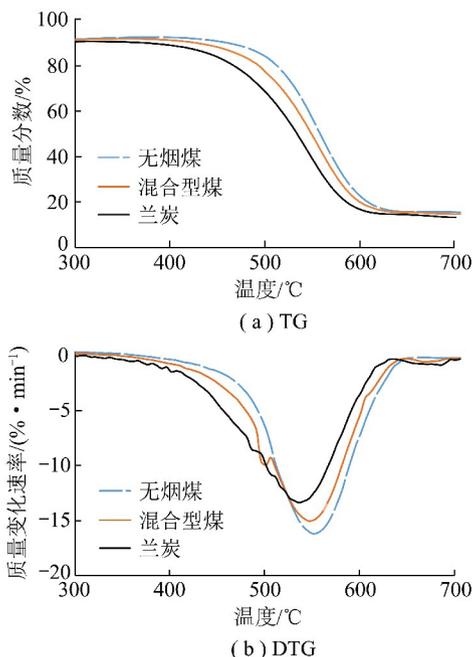


图1 热重燃烧 TG 和 DTG 曲线

Fig.1 TG and DTG curves of thermogravimetric combustion

表3 热重燃烧试验结果

Table 3 Results of thermogravimetric combustion

样品	着火温	最大燃烧速率/	最大燃烧速率	燃尽温	燃烧残
	度/°C	(%·min <sup>-1</sup> )	对应温度/°C	度/°C	余率/%
兰炭	449	12.92	520	573	12.43
无烟煤	504	16.19	552	601	16.73
混合型煤	482	13.70	546	596	15.44

由表 3 可知,兰炭的着火温度为 449 °C,无烟煤的着火温度为 504 °C,兰炭较易点燃;燃烧温度相同

时,兰炭的燃烧失重和质量变化速率均高于无烟煤,最大燃烧速率对应的温度和燃尽温度均低于无烟煤,表明兰炭比无烟煤燃烧快,燃烧持续时间短。掺入兰炭的混合型煤的着火温度、燃尽温度介于兰炭和无烟煤之间。添加兰炭有助于改善无烟煤的燃烧特性。

兰炭和无烟煤的混合型煤能够兼顾兰炭和无烟煤的燃烧特性。因此,洁净型煤加工过程中建议在无烟煤中掺入一定比例的兰炭,低硫、低挥发分的兰炭不仅能解决优质低硫无烟煤需求紧缺的问题,还能改善单一无烟煤和兰炭的缺陷,兼顾着火特性和燃烧持久性。由于兰炭和无烟煤的成型特性不同,在型煤加工过程中需综合考虑燃烧特性和黏结剂成本,进一步优化兰炭与无烟煤的配比。

## 3 民用洁净煤排放特性

### 3.1 试验设备

利用煤炭科学技术研究院有限公司设计搭建的民用煤燃烧评价试验装置进行排放特性测试。民用煤燃烧评价试验装置适用于各类型民用炉具,能测试不同民用煤的燃烧性能并监测烟气污染物浓度,试验装置如图 2 所示。配套的污染物排放监测设备有手持式热电偶、烟尘烟气分析仪 YQ3000C、手持式烟气分析仪 KM-940、测烟望远镜 QT201A。



图2 民用煤燃烧评价试验装置

Fig.2 Civil coal combustion test device

### 3.2 试验方法

在相同引火介质和操作方法下,分别进行兰炭、无烟煤和混合型煤的燃烧试验。单个样品燃烧评价试验周期为24~48 h,每隔10 min测试1组数据,燃烧过程包括引燃、加煤、燃烧、封火等工况。

烟气污染物测试指标包括颗粒物浓度、烟气组分( $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ )和林格曼黑度等。按照GB/T 16157—1996《固体污染源排气颗粒物浓度与气态污染物采样方法》、HJ/T 57—2017《固定污染源废气二氧化硫的测定 定电位电解法》、HJ/T 693—2014《固定污染源废气 氮氧化物的测定 单位电解法》、HJ/T 398—2007《固定污染源排放 烟气黑度的测定 林格曼烟气黑度图法》分别测量各指标。其中,烟气组分 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 测试结果取全部数据的算术平均值,实测浓度应换算成基准氧含量下的浓度(基准氧含量按9.0%计算)。

### 3.3 烟气污染物测试结果

烟气污染物监测结果见表4。兰炭、无烟煤和洁净型煤燃烧排放的烟气颗粒物质量浓度均低于 $30 \text{ mg/m}^3$ ,混合型煤的颗粒物质量浓度略高于兰炭和无烟煤;烟气成分 $\text{SO}_2$ 含量均低于 $40 \text{ mg/m}^3$ , $\text{NO}_x$ 含量均低于 $140 \text{ mg/m}^3$ ,其中,无烟煤的烟气成分含量最低;3个样品的林格曼黑度均为0级。

表4 烟气污染物监测结果

Table 4 Results of flue gas pollutants

样品	颗粒物质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	烟气成分含量/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$		林格曼黑度/级
		$\text{SO}_2$	$\text{NO}_x$	
兰炭	25.86	31.14	130.81	0
无烟煤	22.84	13.21	108.58	0
混合型煤	28.36	22.61	127.21	0

GB 13271—2014《锅炉大气污染物排放标准》中重点区域锅炉大气污染物排放限值要求:颗粒物浓度 $\leq 30 \text{ mg/m}^3$ ;烟气成分中 $\text{SO}_2$ 浓度 $\leq 200 \text{ mg/m}^3$ , $\text{NO}_x$ 浓度 $\leq 200 \text{ mg/m}^3$ ;林格曼黑度 $\leq 1$ 级。

由表4可知,兰炭、无烟煤和混合型煤燃烧排放烟气的颗粒物浓度、 $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 浓度、林格曼黑度等数值均达到国家标准限值要求,是农村居民燃煤的理想清洁能源<sup>[14]</sup>。

## 4 结论

1)民用洁净煤和洁净型煤的生产推广应用取

得了一定成果。虽然受煤改电、煤改气政策影响,但广大农村地区对清洁燃煤仍有巨大需求,需继续加强烟煤散煤的管控和民用洁净煤的供应工作。

2)兰炭的着火温度为 $449 \text{ }^\circ\text{C}$ ,无烟煤的着火温度为 $504 \text{ }^\circ\text{C}$ ,兰炭的燃烧失重和失重速率均高于无烟煤,表明兰炭比无烟煤易点燃,燃烧持续时间短,无烟煤和兰炭混合制成型煤能够兼顾引燃特性和燃烧持续性。

3)兰炭、无烟煤和洁净型煤燃烧排放烟气中颗粒物浓度均低于 $30 \text{ mg/m}^3$ ,烟气成分 $\text{SO}_2$ 含量均低于 $40 \text{ mg/m}^3$ , $\text{NO}_x$ 含量均低于 $140 \text{ mg/m}^3$ ,林格曼黑度为0级,是农村居民燃煤的理想清洁能源。

### 参考文献(References):

- [1] 王卓雅,赵跃民,高淑玲.论燃煤污染及其防治[J].煤炭技术,2004,23(7):4-6.  
WANG Zhuoya,ZHAO Yumin,GAO Shuling. Discussion on coal-smoke pollution and its prevention[J]. Coal Technology,2004,23(7):4-6.
- [2] 缪育聪,郑亦佳,王姝,等.京津冀地区霾成因机制研究进展与展望[J].气候与环境研究,2015,20(3):356-368.  
MIAO Yucong,ZHENG Yijia,WANG Shu,et al. Recent advance in, and future prospects of, research on haze formation over Beijing-Tianjin-Hebei, China[J]. Climatic and Environmental Research,2015,20(3):356-368.
- [3] 麦方代,王东升,刘明锐,等.京津冀地区洁净型煤使用现状及建议[J].环境保护,2016,44(6):25-27.  
MAI Fangdai,WANG Dongsheng,LIU Mingrui,et al. Clean coal using situation and recommendation in Beijing,Tianjin,Hebei area[J]. Environmental Protection,2016,44(6):25-27.
- [4] 魏文强.京津冀各地散煤治理经验探析[J].环境保护,2016,44(6):28-30.  
WEI Wenqiang. Discussion on the control of coal pollution in Beijing,Tianjin,Hebei[J]. Environmental Protection,2016,44(6):28-30.
- [5] 章永洁,蒋建云,叶建东,等.京津冀农村生活能源消费分析及燃煤减量与替代对策建议[J].中国能源,2014,36(7):39-43.
- [6] 王东升,刘明锐,白向飞,等.京津冀地区民用燃煤使用现状分析[J].煤质技术,2016(3):46-49.  
WANG Dongsheng,LIU Mingrui,BAI Xiangfei,et al. The situation analysis of civil coal in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Coal Quality Technology,2016(3):46-49.
- [7] 武建军,郭凡辉,孔少杰,等.中国民用煤净化利用现状及展望[J].洁净煤技术,2017,23(4):1-11.  
WU Jianjun,GUO Fanhui,KONG Shaojie,et al. Status and prospect of cleaning utilization of civil coal in China[J]. Clean Coal Technology,2017,23(4):1-11.

(下转第90页)

- 调整的试验研究[J]. 热力发电, 2012, 41(5): 69-76.
- ZHONG Li, XU Zhengquan, CAO Xingwei, et al. Test study on combustion adjustment of one CFB boiler for 300 MW unit[J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(5): 69-76.
- [9] 高继录, 邹天舒, 冷杰, 等. 1 000 MW 超超临界锅炉燃烧调整的试验研究[J]. 动力工程学报, 2012, 32(10): 741-746.
- GAO Jilu, ZOU Tianshu, LENG Jie, et al. Test study on combustion adjustment for 1 000 MW ultra supercritical boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(10): 741-746.
- [10] 张敏. CFB 锅炉燃烧优化调整试验方法研究与应用[J]. 热力发电, 2009, 38(9): 63-69.
- ZHANG Min. Research and application of tuning test for optimizing CFB boiler combustion[J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(9): 63-69.
- [11] 李克章. 300 MW CFB 锅炉外置式换热器的泄漏治理及运行优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2016: 33-35.
- [12] 杨磊, 解雪涛, 李战国. 330 MW 循环流化床锅炉燃烧初调整试验参数分析[J]. 电站系统工程, 2012, 28(6): 25-28.
- YANG Lei, XIE Xuetao, LI Zhanguo. Analysis of 330 MW CFB unit combustion adjustment test parameter[J]. Power System Engineering, 2012, 28(6): 25-28.
- [13] 孙献斌. 循环流化床锅炉浅床运行技术及大型化分析研究[J]. 洁净煤技术, 2009, 12(2): 57-59.
- SUN Xianbin. Operating technology and analysis research of scaling-up in shallow bed of circulating fluidized bed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2009, 12(2): 57-59.
- [14] 王智微, 陈文跃, 倪蛟, 等. 循环流化床锅炉回料阀风量优化调整试验[J]. 热力发电, 2013, 42(1): 97-99.
- WANG Zhiwei, CHEN Wenyue, NI Jiao, et al. Adjustment of loop seal in CFB boilers[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(1): 97-99.
- [15] 常乐, 李伟, 张拓. 国产 330 MW 循环流化床锅炉分离器立管高料位压力变正值问题分析及处理措施[J]. 锅炉制造, 2010(2): 36-38.
- CHANG Le, LI Wei, ZHANG Tuo. Analysis and treatment measures of domestic 330 MW CFB boiler separator riser high-level pressure positive change[J]. Boiler Manufacturing, 2010(2): 36-38.
- (上接第 84 页)
- [8] 许光清, 董小琦. 基于合作博弈模型的京津冀散煤治理研究[J]. 经济问题, 2017(2): 46-50.
- XU Guangqing, DONG Xiaoqi. The control of scattered coal combustion in Beijing - Tianjin - Hebei region based on a cooperative game model[J]. On Economic Problems, 2017(2): 46-50.
- [9] 何绪文. 民用燃煤大气污染物控排技术对策[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(4): 12-17.
- HE Xuwen. Countermeasure of air pollutant controlled pollution for civilian coal[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4): 12-17.
- [10] 刘生玉, 田亚峻, 尤先锋, 等. 高挥发分烟煤的热解、燃烧特性研究[J]. 燃料化学学报, 2002, 30(1): 41-44.
- LIU Shengyu, TIAN Yajun, YOU Xianfeng, et al. Studies on pyrolysis and combustion of high volatile bituminous coals[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2002, 30(1): 41-44.
- [11] 白刚, 周西华, 孙宝铁, 等. 不同变质程度煤燃烧特性参数试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(9): 56-61.
- BAI Gang, ZHOU Xihua, SUN Baotie, et al. Experimental research on combustion characteristic parameters of coal samples different in metamorphic degree[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(9): 56-61.
- [12] 周志军, 周宁, 陈瑶姬, 等. 低挥发分煤燃烧特性及 NO<sub>x</sub> 生成规律的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(29): 55-61.
- ZHOU Zhijun, ZHOU Ning, CHEN Yaoji, et al. Experimental research on the combustion and NO<sub>x</sub> Generation Characteristics of low volatile coal[J]. Proceeding of the CSEE, 2010, 30(29): 55-61.
- [13] 夏宏. 河北省民用洁净型煤市场现状研究[J]. 煤炭经济研究, 2016, 36(6): 46-49.
- XIA Hong. Study on status of domestic clean coal briquette market[J]. Coal Economic Research, 2016, 36(6): 46-49.
- [14] 李庆, 段雷, 蒋靖坤, 等. 我国民用燃煤一次颗粒物的减排潜力研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(16): 4408-4414.
- LI Qing, DUAN Lei, JIANG Jingkun, et al. Investigation of reducing potential primary particulate emission from residential coal combustion in China[J]. Proceeding of the CSEE, 2016, 36(16): 4408-4414.