

# 生物质废弃物 再燃降低 $\text{NO}_x$ 排放的试验研究

李 戈, 池作和, 斯东坡, 潘 维, 蒋 啸, 周 昊, 岑可法

(浙江大学, 浙江 杭州 310027)

**[摘要]** 再燃技术降低锅炉  $\text{NO}_x$  排放是当前炉内脱硝的重要技术。在小型滴管炉内进行了采用生物质废弃物作为再燃燃料还原模拟烟气中  $\text{NO}$  的热态试验。通过改变生物质种类、再燃区反应温度、再燃燃料量等试验条件, 获得再燃区  $\text{NO}$  被还原的试验结果, 并对结果进行了简要分析。

**[关键词]** 生物质; 再燃燃料;  $\text{NO}$  还原; 炉内脱硝; 锅炉

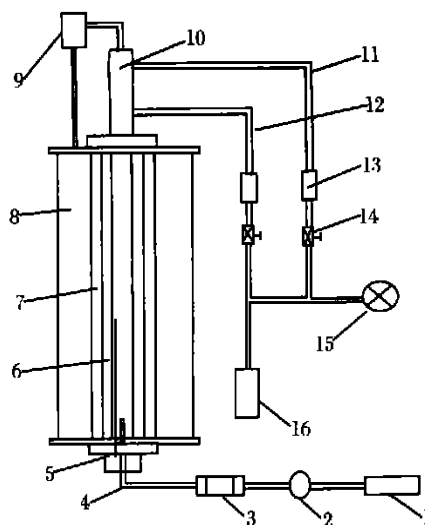
**[中图分类号]** X511 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1002 - 3364(2004)02 - 0041 - 04

生物质类再生资源包括农产品废弃物、城市垃圾、林业废弃物及畜业废弃物等。我国是一个农林业大国, 每年的生物质类废弃物高达 7 亿  $\text{t}^{[1]}$ , 如何有效利用这一巨大资源, 已经成为科研工作者的重大课题。我国是燃煤大国, 燃煤生成各种污染物, 其中氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ ) 是一种危害性很大的气体。它不但刺激人的呼吸系统、破坏臭氧层, 而且还是造成光化学烟雾的主要物质之一。降低燃煤锅炉  $\text{NO}_x$  排放有很多方法, 利用燃料再燃降低  $\text{NO}_x$  排放是近来发展起来的有效方法, 并广泛应用于工业生产中。再燃燃料的物质种类繁多, 如天然气、细煤粉, 各种生物质等。生物质燃料挥发分高, 含氮少, 是一种理想的再燃燃料。本文结合我国的能源特点, 对利用生物质废弃物作为再燃燃料降低  $\text{NO}_x$  排放的机理进行了试验研究。

## 1 试验装置和试验方法

图 1 是本次试验所使用的煤粉燃烧、结渣积灰和污染物生成综合试验台架, 由主炉、送引风机、给粉器、气固相取样装置、CCD 监测系统、加热控制系统等组成。

主炉是试验装置的核心部件, 它由内径为 45 mm、总长为 1 m、有效加热段为 0.8 m 的刚玉管、发热元件硅碳管、保护层及炉外壁等组成。主炉的升温速度和



1—分析仪 2—抽气泵 3—固体取样盒 4—取样管  
5—热电偶 6—刚玉管 7—硅碳管 8—保护层和炉壁  
9—给粉器 10—混和段 11—一次风管 12—二次风管  
13—流量计 14—调节阀 15—空气压缩机 16—混合气瓶  
图 1 实验炉示意

温度水平由控制系统控制。主炉下部装有 1 支水冷取样管以收集固体和气体样。与水冷取样管平行装有 1 支热电偶用以测量炉内的燃烧温度。

给粉系统采用专门加工制作的螺杆微量给料系统, 给粉量在 (0~ 50)  $\text{g}/\text{min}$  之间可调, 给粉均匀度在 2% 以内。

收稿日期: 2003 - 03 - 21

试验开始时先对炉体进行加热,然后通入由 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、NO、空气等按照比例混合的模拟烟气,该模拟烟气成分近似。工况稳定后再送入符合试验要求的生物质再燃燃料,使再燃燃料在再燃区内进行 NO 的还原反应,最后在出口处利用烟气分析仪测量排气中的 NO 浓度,整个反应过程大约(0.4~0.6) s。

实验采用木屑、橘皮、稻壳 3 种生物质废弃物,将其烘干、制粉、筛分后获得所需要的再燃燃料。

各种物料的工业分析和元素分析见表 1。

表 1 工业分析和元素分析

物料	工业分析					元素分析				
	M <sub>ad</sub> 1%	A <sub>ad</sub> 1%	V <sub>ad</sub> 1%	F <sub>ad</sub> 1%	Q <sub>b,ad</sub> J/g	C <sub>ad</sub> 1%	H <sub>ad</sub> 1%	N <sub>ad</sub> 1%	S <sub>ad</sub> 1%	O <sub>ad</sub> 1%
稻壳	8.41	12.66	66.75	12.68	15918.7	40.09	5.44	0.52	0.14	33.24
木屑	4.38	2.28	78.27	15.07	18022.9	45.15	5.76	0.39	0.03	42.01
橘皮	11.34	2.45	73.16	13.45	23323.5	45.64	6.40	1.2	0.05	32.92

## 2 试验结果和分析

### 2.1 生物质燃料种类对降低 NO 排放的影响

各种不同生物质由于其组分的差异还原 NO 的效果是不同的。图 2 是 3 种不同生物质燃料在相同的反应条件下还原 NO 的比较。由图可见,在一定的反应条件下,生物质燃料再燃均可以显著地降低 NO 排放浓度。就本试验而言,木屑还原 NO 的能力最强,可以达到 60% 以上。稻壳次之,橘皮最弱。

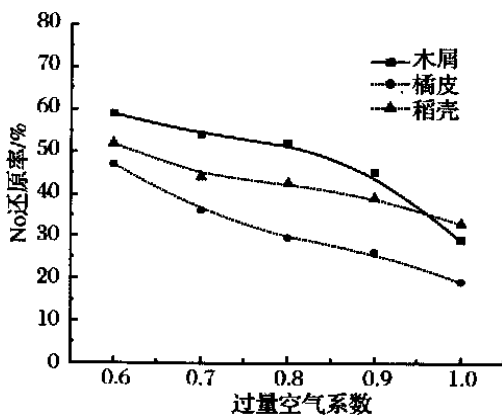


图 2 燃料种类对 NO 还原率的影响  
(温度 1 000 ℃、再燃燃料量 20%)

有关研究表明, CH<sub>4</sub> 是还原 NO 的主要成分, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 对 NO 的还原能力则较差<sup>[2]</sup>。不同燃料的挥发分含量大小和气体成分组成有很大的差异,对还原 NO 的效果影响较大。木屑和稻谷挥发分成分中还原性气体 CH<sub>4</sub> 所占比例大致相同,且值较高,但木屑

的挥发分含量高于稻壳,所以再燃效果要好于稻壳。橘皮的挥发分中 CH<sub>4</sub> 含量较低,且含 N 量较高,故再燃效果较差。上述 3 种生物质快速热解的热解气体组分见表 2,热解终温为 850 ℃。

表 2 生物质热解气体组分 %

物料	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO <sub>2</sub>
木屑	11.75	37.4	18.35	4.14	1.12	27.23
稻壳	8.93	30.31	15.25	2.52	1.82	41.17
橘皮	10.86	36.21	9.85	3.80	1.06	38.22

### 2.2 过量空气系数变化对 NO 还原反应的影响

还原 NO 的反应要在还原性气氛中完成。较低的过量空气系数可以较大幅度地降低 NO 的排放。

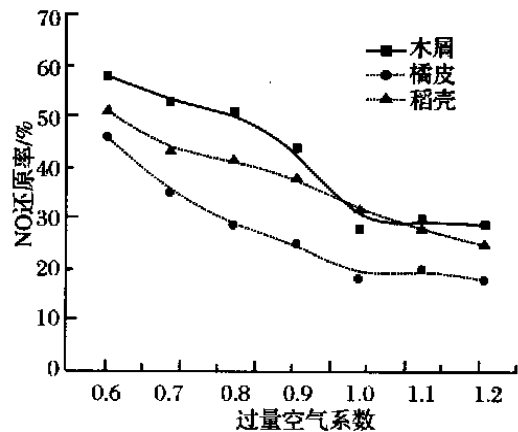
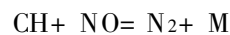


图 3 过量空气系数对 NO 还原率的影响(温度 1 273 K)

图 3 是当过量空气系数变化时对燃料再燃还原 NO 效率的影响,从图中可以看出,对不同的生物质燃料,其随过量空气系数的变化趋势是一致的。当过量空气系数小于 0.8 时,随着过量空气系数的增大,还原 NO 的效果增加得更为显著。但当过量空气系数大于 1.0 时,还原率的变化趋于平缓。这主要是由于生物质再燃还原 NO 的作用主要是挥发分中的 CH 基团与 NO 通过以下反应进行:



在过量空气系数增大时,烟气中氧浓度增加,CH 基团将会先和 O 进行氧化反应,这样,再燃区内 CH 基团的浓度降低,对 NO 的还原反应就受到了影响。因此分析认为,生物质燃料作为再燃燃料时,再燃区的过量空气系数最好不要小于 0.8。

### 2.3 再燃区温度对生物质再燃效果的影响

图 4 是再燃区温度对木屑再燃还原 NO 效率的影响,在 900 ℃~1 300 ℃时,随着温度的增加,NO 还原

效率随之升高,但在温度升高到 1 400 ℃时,NO 的还原效率有所下降,其原因是由于生物质燃料再燃还原 NO 主要是挥发分中的 CH 与 NO 反应生成氮气,在温度提高时(大于 1 450 ℃),CH 基团与 O 反应的速度大大加快<sup>[3]</sup>,因此 NO 的还原率将有所下降。

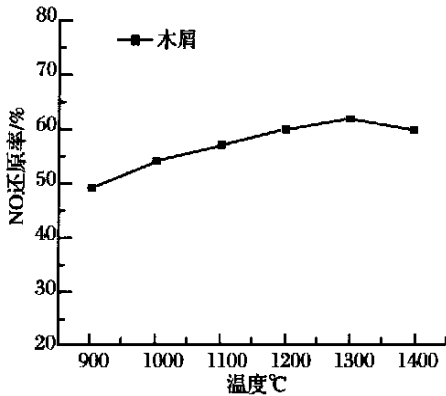


图4 温度对 NO 还原率的影响  
(过量空气系数 0.7、再燃燃料量 20%)

## 2.4 燃料粒径的变化对 NO 还原反应的影响

燃料粒径的大小影响还原 NO 的效果。小粒径生物质燃料挥发分析出的速度快,与模拟烟气的混合性好,反应比表面积大,反应充分。图 5 是粒径对 NO 还原效率的影响,可以看出,粒径越小,再燃还原的能力越强。

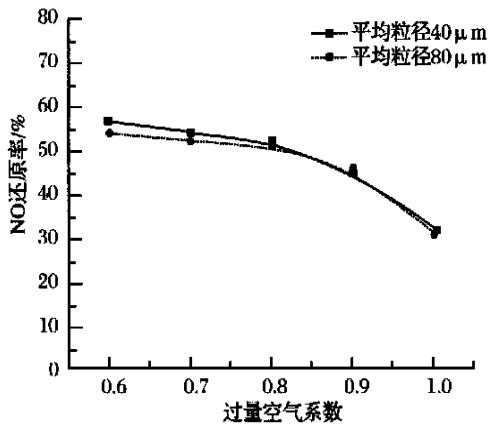


图5 粒径对 NO 还原率的影响  
(温度 1 000 ℃、再燃燃料量 20%、NO 初始浓度 600 μg/g)

## 2.5 再燃燃料量的变化对 NO 还原反应的影响

再燃燃料量越多,析出的挥发分越多,CH 基团的浓度越大,NO 还原反应的效果越好,具体影响如图 6 所示。在工程应用中,由于再燃区是在主燃烧区的上方,燃烧的空间和时间都要比主燃烧区小,如果投入过多的再燃燃料,很容易燃烧不完全,造成不完全燃烧热

损失的增加,降低锅炉效率。在过量空气系数较小时,再燃燃料量 20% 和 30% 时 NO 的还原效率的差别比再燃燃料 10% 和 20% 的差别要小,因此,在使用木屑作为再燃燃料时,最佳再燃燃料量应该介于 20% ~ 30% 之间。

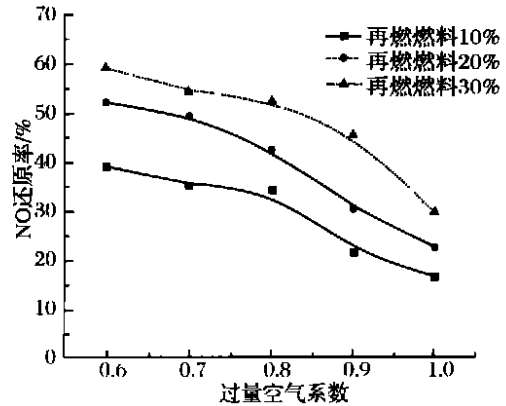


图6 再燃燃料量对 NO 还原率的影响  
(木屑、温度 1 273 K)

## 2.6 烟气中 NO 初始浓度变化对 NO 还原效率的影响

图 7 是 NO 初始浓度对 NO 还原效率的影响,NO 初始浓度越高,NO 的还原效率也越高,这主要与 CH 基团和 NO 反应方程的化学动力学特性有关,当 NO 初始浓度高时,反应进行的速率就快。由此,对于较高的 NO 浓度,木屑等生物质燃料再燃将会有非常好的还原效果。

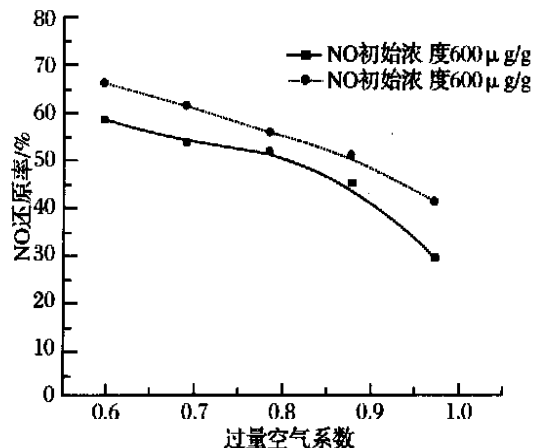


图7 NO 初始浓度对还原率的影响  
(木屑、温度 1 273 K、再燃燃料量 20%)

## 2.7 还原反应的沿程特性

图 8 是木屑在炉膛内还原 NO 的沿程分布,从图中可以看出,在木屑刚喷入炉膛时,挥发分析出的速度

很快,挥发分中大量的 CH 基团与 NO 进行了还原反应,NO 的浓度急剧下降。随着反应时间的进行,CH 基团的浓度下降,反应又朝着 NO 生成的途径进行,在炉膛的出口逐渐达到平衡。因此,选择再燃燃料在炉内的停留时间也非常重要。

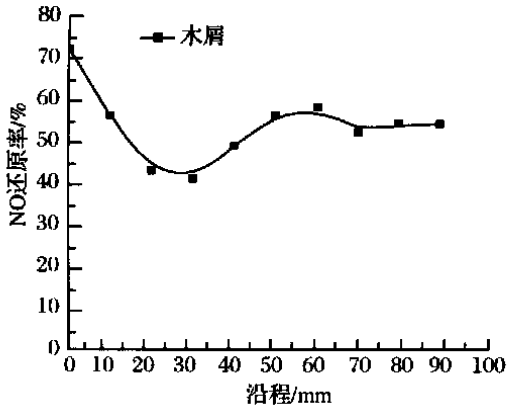


图 8 NO 还原反应的沿程特性

(NO 初始浓度 900 μg/g、温度 1 273 K、再燃燃料量 20%)

### 3 结论

(1) 生物质燃料再燃还原 NO 可以取得非常好的

效果,在一定的条件下可以达到 50% ~ 70%,不同种类的燃料再燃还原 NO 的效果不同,其中木屑效果最好。

(2) 生物质燃料再燃还原 NO 的途径主要是通过挥发分析出的 CH 基团和 NO 进行反应,反应效果的好坏不但和挥发分的含量有关,还和挥发分析出的组分有关。

(3) 再燃区的温度、过量空气系数、再燃燃料量、NO 初始浓度和反应时间对 NO 还原反应的效果都有非常直接的影响,温度较高、过量空气系数较小、再燃燃料量大、反应时间长则 NO 的还原效率高。根据实验结果,认为在再燃区温度为 1300 ℃、过量空气系数小于 0.8、再燃燃料量大于 20% 的情况下,生物质燃料再燃还原 NO 的效果将更加明显。

#### [参 考 文 献]

- [1] 李水清,等. 生物质废弃物在回转窑内的热解研究[J]. 太阳能学报. 2000,(10): 333 - 340.
- [2] 钟北京,等. 气体燃料再燃对 NO<sub>x</sub> 还原的影响[J]. 热能动力工程,1999,(11): 419 - 423.
- [3] Yin.H. Song, et al. Reduction of Nitric Oxide by Coal char at Temperature of 1250 ~ 1750K [J]. Combustion Science and Technology, 1981,(25): 237 - 240.

(上接第 18 页)

$$\begin{bmatrix} q_2 & & & & \\ \gamma_2 & & q_3 & & \\ \gamma_2 & & \gamma_3 & & q_4 \\ \tau_2(1-d_G) & \tau_3-d_G \Delta \tau_{en} & \tau_4 & 1 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_2 \\ \mu_3 \\ \mu_4 \\ d_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

计算结果:  $d_G = 0.916833$ ,与常规热平衡法计算结果一致。

### 3 结论

本文构建了循环函数法中单元进水系数的矩阵计算模型,并以 BΠT-50-2 机组中 2 种典型单元为例,探讨了该模型的通用性。模型具有以下特点:

- (1) 数学推导严密,没有任何假设或简化,计算结果与常规热平衡一致,精确度高。
- (2) 将矩阵方法引入单元进水系数的计算中,矩

阵填写规则简单、明确,规律性极强,适合采用计算机语言表达。

(3) 降低了对系统概念的理解程度,只要按照确定规则填写矩阵,单元进水系数数值自动通过矩阵计算体现在特定的矩阵元素上,有利于广大工程技术人员和计算机人员应用。

模型求解推荐采用 MATLAB 矩阵语言编制计算模块,通过其 API 接口与其它应用软件衔接计算。

#### [参 考 文 献]

- [1] 马芳礼. 电厂热力系统节能分析原理[M]. 北京: 水利电力出版社,1992.
- [2] 王加璇. 热力发电厂[M]. 北京: 中国电力出版社,1997.
- [3] 林万超. 火电厂热系统节能理论 [M]. 西安: 西安交通大学出版社,1994.
- [4] 程卫国,等. MATLAB 5.3 应用指南[M]. 北京: 人民邮电出版社,2000.

of one dimensional flow, and calculation models for entire performance and for critical conditions being established on the said basic element level basis. After completing the establishment of entire model, comparison and analysis of the performance under given geometric dimensions and initial conditions, as well as under situation of un - changing backpressure and differently increasing humidity, have been carried out.

**DIAGNOSIS AND ANALYSIS FOR CAUSE LEADING TO OUTFIRE OF A 410t/h BOILER ..... SHANG Yong et al(23)**

In view of outfire phenomena have occurred many times in a 410t/h boiler, cause analysis through diagnosis test has been carried out. It is considered that the main causes are as follows: the opening degree of inlet baffle plate for some pulverized coal feeders was unduly small, resulting in unstable output of the said feeders under certain revolution speed, and in somewhat lower temperature of air - fuel mixture as the output of pulverized coal feeders to be great. After adjustment, the combustion in furnace of the said boiler to be stable, and a load of 220 t/h can be maintained successfully in operation of four hours without oil injection in duration of burning low grade coal. In a whole year after the test, the outfire resulting from similar causes has never occurred again.

**MEASUREMENT OF PULVERIZED COAL CONCENTRATION DISTRIBUTION AFTER A 90° ELBOW BY USING OPTICAL WAVE METHOD ..... ZHENG LI - gang et al(27)**

The principle of measuring particles concentration by using optical wave method has been expounded, and a measurement study on the distribution of pulverized coal concentration in a pipeline being performed by using the said method on a test stand, obtaining the regularity of concentration distribution. At the same time, the influence of elbow upon the concentration distribution measurement in the pipeline has been analysed, having guide significance for measuring the concentration of pulverized coal in pipelines of utility boilers.

**TEST AND STUDY ON SELF - DESULFURATION BEHAVIOR OF COAL SORTS IN A 1MW<sub>th</sub> CFB COMBUSTION TEST STAND ..... XIAO Ping et al(30)**

When difficult firing coal sorts with lower sulfur content are burnt in a circulating fluidized bed (CFB) boiler, the SO<sub>2</sub> emission can often reach the required value of national standard, without the need to install a lime - stone preparing and supplying system. Here, the self - desulfuration behavior is very important for reducing the SO<sub>2</sub> emission. Each influence factor upon the self - desulfuration behavior of coal sort has been analysed. Through trial combustion of coal sorts in a 1MW<sub>th</sub> CFB combustion test stand, the variation of relationship between the self - desulfuration efficiency of coal and the bed temperature has been obtained, and analysis being carried out. The result has very important significance for thorough understanding the self - desulfuration behavior of coal sorts.

**TEST AND STUDY ON NO<sub>x</sub> REDUCTION WITH MICRONIZED COAL - DUST REBURNING ..... XU Zhang et al(34)**

Fuel reburning is one of the most effective and prospective technologies for NO<sub>x</sub> reduction in the furnace. A vast amount of test and study on NO<sub>x</sub> reduction with micronized coal - dust reburning have been carried out in a unidimensional hot - state test facility with 5 sorts of coal, obtaining regularity of some influencing factors, such as coal - dust fineness, reburning quantity, reburning temperature, and residence time in the reburning zone etc., upon NO<sub>x</sub> emission from the boiler, providing test and theoretical basis for reducing NO<sub>x</sub> emission with micronized coal - dust reburning.

**EXPERIMENTAL STUDY ON MEASURING CONCENTRATION OF PULVERIZED COAL IN PRIMARY AIR FOR BOILERS USING EXHAUST GAS TO CONVEY THE SAID COAL ..... YANG Xing - sen et al(38)**

In operational parameters of the pulverized coal burner, the measurement of pulverized coal concentration in primary air is very difficult, having no effective monitoring method. Especially for measuring pulverized coal concentration in primary air for boilers using exhaust gas to convey the pulverized coal, there is no feasible method up to now. Hence, it has certain influence upon thorough study on operational behavior of burners, on operation optimization of them, on equipment retrofitting and improving combustion performance etc.. Through establishment of test stand for measuring concentration of pulverized coal, the experimental study on measuring concentration of pulverized coal using exhaust gas to convey has been carried out, obtaining linear correlation between static pressure difference before and after mixing pulverized coal with primary air under conditions of constant temperature and fixed gas flow velocity, and the concentration of pulverized coal, providing new thinking and method for measuring concentration of pulverized coal using exhaust gas to convey.

**TEST AND STUDY ON REBURNING OF BIOLOGICAL WASTES TO REDUCE NO<sub>x</sub> EMISSION ..... LI Ge et al(41)**

To reduce NO<sub>x</sub> emission from boilers by reburning technology is an important technique for denitrification in the furnace at present time. Adopting biological wastes as reburning fuel to reduce NO in simulated gas, hot test has been carried out in a small dropper tube furnace. Through changing test conditions, such as sort of biological wastes, reaction temperature in the reburning zone, and quantity of reburning fuel etc., the test results of reducing NO in reburning zone have been obtained, and the said results being briefly analysed.

**STUDY ON THE INFLUENCE OF ELECTROHYDRAULIC CONTROL SYSTEM UPON THE STABILITY OF OPEN - LOOP REVOLUTION SPEED FOR HYDRAULIC VISCOUS DRIVING FACILITY ..... CHENG Ning et al(45)**

The working principle of hydraulic system for hydraulic viscous driving (HVD) facility has been described, the causes leading to nonstability of revolution speed for traditional HVD facilities under open - loop operation mode being analysed. Test study on new hydraulic control system for HVD facilities based on low - pressure electro - hydraulic converter has been carried out. The test results show that the sta-