

# 生物质混燃与空气分级对 NO<sub>x</sub> 排放的影响

魏 刚<sup>1</sup>, 樊孝华<sup>1</sup>, 王毅斌<sup>2</sup>, 王学斌<sup>2</sup>, 李 艳<sup>2</sup>, 谭厚章<sup>2</sup>

(1. 国网河北省电力公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021;  
2. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)

**[摘 要]** 在一维沉降炉中进行了生物质(麦秆、木屑)与煤粉的纯烧、混烧实验,并研究了燃料种类、混燃比例、空气分级等不同因素对燃烧产生的 NO 和 CO 含量沿烟气流动方向的分布规律以及飞灰含碳量的影响。结果表明:纯烧生物质和煤粉时,NO 含量沿烟气流动方向先增大后减小,煤粉燃烧产生的 NO 含量大约是麦秆和木屑燃烧产生的 2~3 倍;煤粉燃烧产生的 CO 含量随烟气流动先增加后减少,而生物质燃烧产生的 CO 含量则逐渐减小;分级风量的增加并不能改变沿烟气流动方向上 NO 和 CO 含量的变化趋势,但能对燃煤产生的 NO 具有较强的减排能力。当生物质与煤粉混燃时,NO 排放量随麦秆混合比例的增加而逐渐减小,但当混合比例增至 40% 以后,继续增大生物质比例对 NO 减排作用影响很小;当麦秆比例达到 40% 以上、分级风量达到 20% 时,空气分级对 NO 减排的影响较小。

**[关 键 词]** 生物质;煤粉;混燃;空气分级;NO<sub>x</sub> 排放

**[中图分类号]** TK16 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1002-3364(2015)05-0007-05

**[DOI 编号]** 10.3969/j.issn.1002-3364.2015.05.007

## Effect of biomass co-firing and air staging on NO<sub>x</sub> emissions

WEI Gang<sup>1</sup>, FAN Xiaohua<sup>1</sup>, WANG Yibin<sup>2</sup>, WANG Xuebin<sup>2</sup>, LI Yan<sup>2</sup>, TAN Houzhang<sup>2</sup>

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;  
2. Key Laboratory of Thermal-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Combustion of biomass (straw and wood) and coal was investigated in a drop tube furnace. Moreover, factors like mixing ratio and air staging on emissions of NO and CO along the flue gas flow direction was analyzed. Also, the unburned carbon content in fly ash was investigated. The results show that, along the flue gas flow direction, the NO concentration increased first and then decreased slowly for pure combustion of both biomass and coal, and the NO emission from straw or wood combustion only accounted for about 1/3 or 1/2 of that from coal combustion. The CO content during coal combustion increased first and then decreased, while that during the biomass combustion reduced gradually. Increasing the staging air quantity had little influence on variations of the NO and CO concentration but can reduce the NO emission dramatically for coal combustion. For co-combustion of the biomass and coal, the NO emission reduced gradually with the increasing mixing ratio, but when the mixing ratio increased to over 40%, increasing the biomass proportion had little effect on NO reduction. When the straw's proportion and the staging air volume reached over 40% and 20% respectively, staging air had little influence on NO emission.

**Key words:** biomass, coal, co-firing, air-staging, NO<sub>x</sub>

生物质的挥发分较高,一般为 50%~90%,与煤粉混燃时会发生抢氧现象,在局部燃烧区域形成还原气氛,有利于 CO、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 以及焦炭等组分对 NO 的

还原。另外,生物质焦炭具有高孔隙率的特点,其对 NO<sub>x</sub> 也具有高效的还原性能。因此,生物质燃料被普遍认为是控制 NO<sub>x</sub> 排放的混燃或再燃燃料。

收稿日期: 2014-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51306142;51376147)

作者简介: 魏刚(1973—),男,高级工程师,主要研究方向为电站污染物控制。

E-mail: 771734367@qq.com

许多学者致力于研究生物质混燃比例对煤粉燃烧过程中  $\text{NO}_x$  排放的影响。刘豪等<sup>[1]</sup>在一维炉中进行了生物质与煤粉混烧实验,发现当生物质掺混比例为 50% 时,  $\text{NO}_x$  转变率可降低约 30%, 并且  $\text{NO}_x$  的降低程度与生物质种类密切相关。杜欣<sup>[2]</sup>对 400 t/h 锅炉内生物质与煤的混燃进行了数值模拟, 结果发现随麦秆混燃比例增加,  $\text{NO}$  排放量下降; 当麦秆混燃比例为 40% 时,  $\text{NO}$  排放量比煤单独燃烧降低了 45%, 而且添加玉米秆对  $\text{NO}$  的还原率较添加麦秆高。Munir 等人<sup>[3]</sup>研究发现在空气分级与未分级的情况下, 添加生物质均能降低燃煤过程中  $\text{NO}_x$  排放量, 同时还能促进煤粉燃尽, 在分级风量和生物质混燃比例均为 10% 时,  $\text{NO}_x$  可减排约 50%。

由于生物质混燃与空气分级均能不同程度地减少燃煤过程中  $\text{NO}_x$  的排放量, 并且具有较低的成本

优势, 因此本文在一维沉降炉内研究了燃料种类、混燃比例、分级风量对生物质与煤混燃过程中  $\text{NO}$  和  $\text{CO}$  的排放特性以及飞灰含碳量的影响, 以对实际工程提供借鉴。

## 1 试验方法

### 1.1 燃料特性

本文所采用的燃料组成为: 纯煤以及生物质与煤的混合物, 煤种为华庭烟煤,  $R_{90} = 23\%$ ; 生物质为陕西宝鸡的小麦秸秆和木屑。试验前, 先将生物质破碎、研磨成  $300 \mu\text{m}$  以下的碎屑, 在  $105^\circ\text{C}$  干燥 24 h 后备用。将生物质燃料与煤分别制粉并按照试验所需比例机械混合后保存待用, 试验前需对样品再进行干燥。试验用燃料的工业分析及元素分析见表 1。

表 1 燃料的元素分析与工业分析

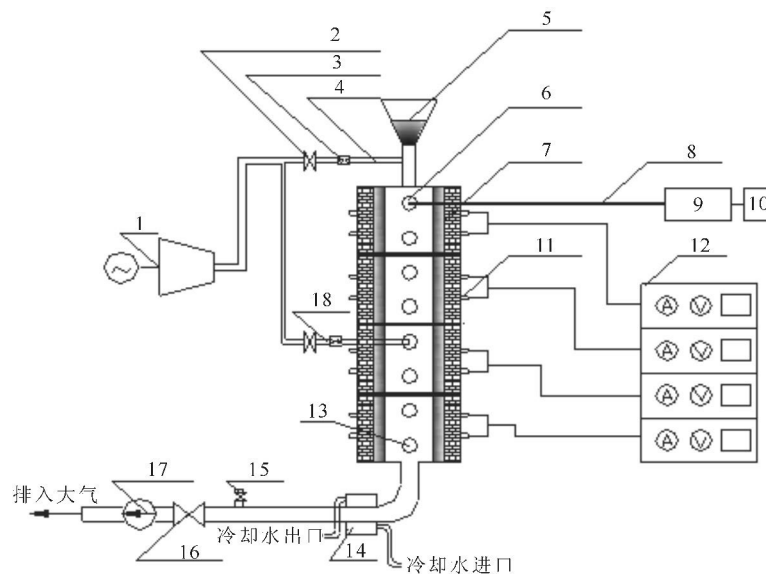
Table 1 Proximate and ultimate analysis of biomass and bituminous coal

燃料	工业分析/%				元素分析/%						发热量 $Q_{\text{net},d}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
	$M_{\text{ad}}$	$A_d$	$V_{\text{daf}}$	$FC_{\text{ad}}$	$C_d$	$H_d$	$N_d$	$O_d$	$S_d$	$Cl_d$	
麦秆	10.09	6.50	79.33	17.38	44.70	3.43	0.81	44.22	0.30	0.218	18.09
木屑	11.43	0.70	82.63	15.51	50.65	4.46	0.26	43.80	0.14	0.054	19.31
烟煤	7.88	20.65	38.13	45.23	66.06	3.12	0.69	8.98	0.51	0.013	23.03

### 1.2 试验系统

试验系统如图 1 所示, 主要由送风系统、给粉系统、燃烧系统、引风系统以及测量系统等组成。其中, 一维沉降炉为硅钼电加热炉, 炉膛刚玉管管径为

$D100 \text{ mm}$ , 从上往下分为 4 个区段, 4 个区段分别独立控温, 燃烧试验过程中 4 个区段的温度均稳定在  $1150^\circ\text{C}$ 。每区段均开设 2 段取样孔, 取样管布置在取样孔内, 且与炉管机械连接。



1—压气机 2—流量控制阀 3—流量计 4—一次风管 5—给粉机 6—取样管 7—刚玉管 8—烟气取样管 9—烟气分析仪  
10—计算机 11—硅钼棒 12—炉温控制箱 13—取灰口 14—冷却室 15—风温调节阀 16—风机入口阀 17—引风机

图 1 试验系统

Fig. 1 The drop tube furnace experimental system

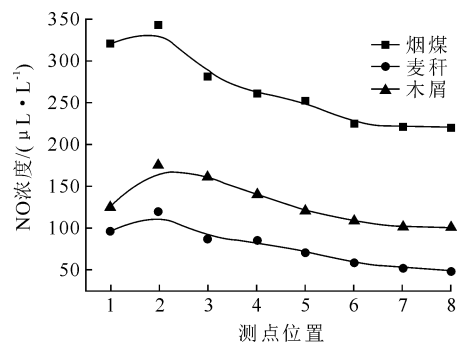
### 1.3 试验方法

分别进行了烟煤、麦秆、木屑纯烧及烟煤与2种生物质混烧的试验,研究生物质种类、掺混比例、主次风比例等不同因素对NO和CO排放以及燃烧效率的影响。试验选取麦秆的掺混比例为0%,20%,40%,80%,100%;空气分级风量选取为0%,10%,20%,30%,分级位置选取第4取样口。待燃烧稳定后,利用烟气分析仪沿炉膛方向在8个取样口内对烟气成分进行测量分析,并在每个取样口停留5 min以上。灰渣取样位置在第8取样口。为保证变工况下测量数据的可比性,所有工况均维持过量空气系数为1.2。

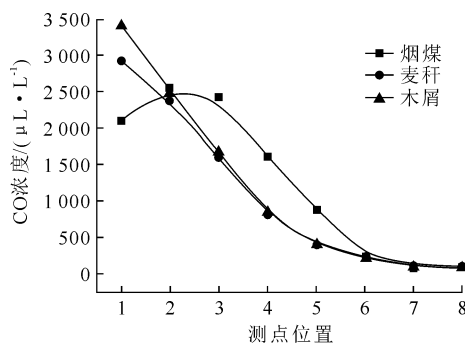
## 2 试验结果分析

### 2.1 燃料种类对沉降炉中NO和CO排放的影响

纯烧麦秆、木屑和煤沿沉降炉高度NO及CO的浓度变化如图2所示。



a) NO 浓度



b) CO 浓度

图2 纯烧麦秆、木屑和煤沿沉降炉高度NO和CO浓度变化  
Fig. 2 NO and CO concentration along the furnace height direction during coal/straw/wood combustion

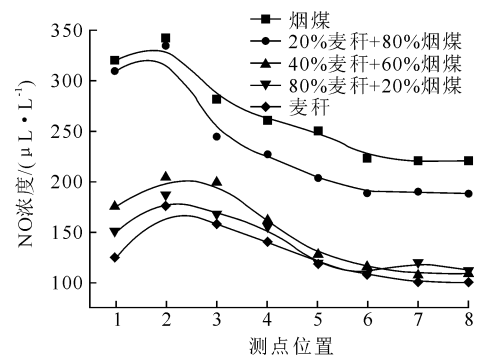
由图2可见,在一维炉燃烧过程中,纯烧烟煤产生的NO含量在整个燃烧段约为麦秆和木屑的2~3倍,该结论与文献[1]中所述的生物质燃烧产生低NO浓度是由于自身N含量较低的观点不太相符;

麦秆和木屑在燃烧初期产生的CO含量均远大于烟煤,而烟煤的挥发分在第2测孔处才得到最大释放。

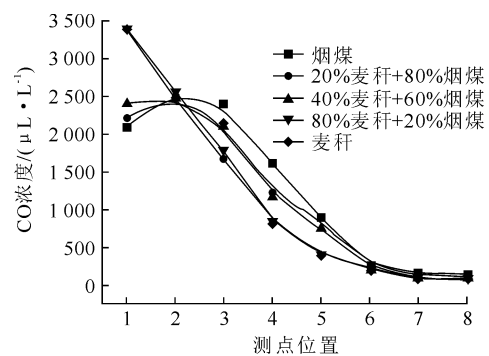
综上所述:生物质燃烧过程中产生低NO浓度的主要原因是由于其在燃烧过程中释放大量的还原性物质(如CO,CH<sub>4</sub>,H<sub>2</sub>等)会与燃料产生局部抢氧作用,在燃料周围形成还原气氛而导致NO较难形成,或者已生成的NO会被CO等气体还原成N<sub>2</sub>;另一方面是由于生物质在燃烧初期释放大量挥发分,导致燃料孔隙面积明显增大,增加焦炭与NO接触机会,使更多的NO得到还原。虽然烟煤在后期释放的CO多于生物质,由于CO量较少,对NO的影响并不很大。

### 2.2 生物质/煤粉混烧比例对沉降炉中NO和CO排放的影响

生物质与煤粉混烧比例对NO与CO排放浓度的影响如图3所示。



a) NO 浓度



b) CO 浓度

图3 生物质与煤粉混烧比例对NO和CO排放浓度的影响

Fig. 3 Effect of co-firing of biomass and coal on NO and CO emission

由图3 a)可见,测点1为NO的初始析出阶段,在此阶段NO的释放规律与麦秆的掺混比例有很大关系,即麦秆含量越高,NO释放量越少,麦秆含量越低,NO释放量越高。这也与麦秆的挥发分含量以及自身含有的金属化合物有关,燃烧初期阶段麦

秆释放的大量挥发分,对 NO 的形成有一定抑制作用,并且燃料中含有的大量 K,Na,Ca 等金属元素形成的化合物对焦炭还原 NO 有一定的催化作用<sup>[4-6]</sup>。

测点 1 与测点 2 之间仍存在 NO 释放,在测点 2 处释放量达到最大。随后 NO 得到还原,排放量迅速降低。但是,在测点 7 处 NO 的含量基本不变。在掺混 40%,80%,100% 麦秆情况下,NO 排放趋势基本相同,即麦秆含量达到 40% 以上,NO 排放基本不变。这主要是因为挥发分以及焦炭基本燃烧完全,NO 未能得到有效的还原。这与李展<sup>[7]</sup>在循环流化床上进行稻壳与贫煤混烧时,得出的掺混比例在 40% 以上 NO 的还原效果基本不再变化的结果一致。

由图 3 b) 可见,初始阶段 CO 浓度与麦秆比例也存在直接关系,这是因为 NO 排放量与麦秆添加量有很大关系,麦秆添加量达到 80% 时的 CO 排放量曲线与纯麦秆 CO 排放量曲线几乎重合。

### 2.3 空气分级对沉降炉中 NO 和 CO 排放的影响

空气分级对纯烧煤粉和麦秆时 NO 和 CO 浓度以及燃烧尾部灰渣中含碳量的影响分别如图 4、图 5 所示。

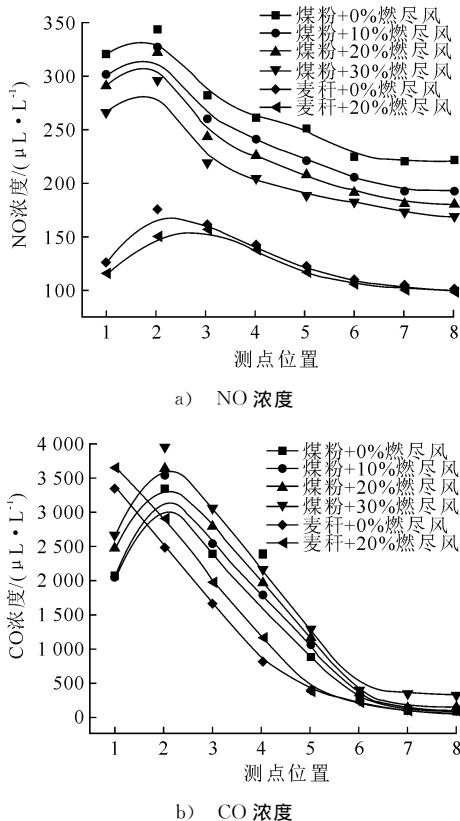


图 4 空气分级对煤粉与麦秆 NO/CO 浓度的影响  
Fig. 4 Effect of air staging on NO and CO formation

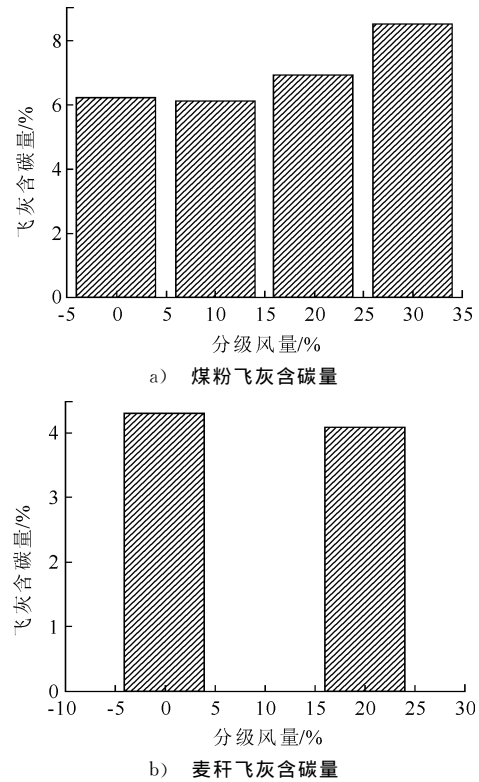


图 5 空气分级对煤粉和麦秆燃烧尾部灰渣中含碳量的影响  
Fig. 5 Effect of air staging on unburned carbon content in slag

由图 4 可见,分级风量越大,NO 释放量越小,但 CO 随着分级风量的增加而增加,这也说明了 NO 的还原率随着还原气氛的增强而升高。对于煤粉燃烧,各工况最终对应的  $\text{NO}_0$ ,  $\text{NO}_1$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$  含量分别为 220, 172, 164, 152  $\mu\text{L}/\text{L}$ , 即燃尽风量越大,最终 NO 排放越小。此过程中延长了还原气体的停留时间,提高了 NO 的还原率。

从图 5 可见,对于煤粉燃烧,分级风量从 0% 升高到 10% 时,飞灰含碳量变化并不是很明显。但当分级风量升到 20% 时,飞灰含碳量略有升高,即从 6.2% 升高到 6.9%。当分级风量升高到 30% 时,飞灰含碳量有了较大程度的升高,达到了 8.5%。可见,空气分级燃烧一方面对  $\text{NO}_x$  的减排有积极的促进作用,另一方面也会增加飞灰含碳量。而对于麦秆燃烧进行空气分级时,当分级风量从 0 升高到 20%,飞灰含碳量并无明显变化。

## 3 结论

1) 对于麦秆、木屑和煤粉 3 种燃料,单独燃烧产生的 NO 沿烟气流动方向先增加后减少,而且烟煤燃烧产生的 NO 含量是相同工况下生物质燃烧产生的 2~3 倍,生物质燃烧产生的 CO 沿烟气流动方向逐渐减少。

2) 麦秆与煤粉混燃时, 随麦秆混合比例的增加, NO 排放量逐渐减少, 但当混合比例增加至 40% 以上, NO 排放量基本不变。

3) 对于生物质和煤粉单独燃烧, 增加燃尽风风量虽不能改变沿烟气流动方向上的 NO 排放趋势, 但可以明显地实现 NO 的减排。

### [参 考 文 献]

- [1] 刘豪, 邱建荣, 吴昊, 等. 生物质和煤混合燃烧污染物排放特性研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(4): 484-488.  
LIU Hao, QIU Jianrong, WU Hao, et al. Study on the pollutant emission characteristics of co-firing biomass and coal[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, 22(4): 484-488.
- [2] 杜欣. 生物质能与煤共燃对污染物排放影响的数值模拟[D]. 保定: 华北电力大学, 2007.  
DU Xin. Numerical Simulation of the effects on the pollutant Emission of Biomass co-fired coal combustion[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2007.
- [3] Munir S, Nimmo W, Gibbs B. The effect of air staged, co-combustion of pulverised coal and biomass blends on NO<sub>x</sub> emissions and combustion efficiency [J]. Fuel, 2011, 90 (1): 126-135.
- [4] 温正城, 王智化, 周俊虎, 等. 金属钙对煤焦异相还原 NO 催化机理的量子化学研究[J]. 燃烧科学与技术, 2009, 15(6): 505-510.  
WEN Zhengcheng, WANG Zhihua, ZHOU Junhu, et al. Quantum chemistry study on catalytic mechanism of Ca on NO-char heterogeneous reaction[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2009, 15(6): 505-510.
- [5] Zhong B, Shi W, Fu W. Effect of catalysts on the NO reduction during the returning with coal chars as the fuel[J]. Combustion Science and Technology, 2001, 164(1): 239-251.
- [6] 潘升全, 谭厚章, 刘潇, 等. 大型电厂煤粉炉掺烧成型生物质试验[J]. 中国电力, 2010(12): 51-55.  
PAN Shengquan, TAN Houzhang, LIU Xiao, et al. Experimental investigation on biomass co-firing in large coal-firing utility furnace[J]. Electric Power, 2010(12): 52-55.
- [7] 李展. 循环流化床生物质混煤燃烧及污染物排放特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.  
LI Zhan. Study on the combustion and Pollutant emission characteristics of biomass and coal blends in a circulating fluidized bed[D]. Jinan: Shandong University, 2009.
- (责任编辑 马昕红)
- 
- (上接第 6 页)
- [9] 乌云娜, 林平, 陈文君. 改进的 TOPSIS 模型在代建人信用评价中的运用[J]. 中南大学学报(社会科学版), 2010, 16(6): 75-82.  
WU Yunna, LIN Ping, CHEN Wenjun. Evaluation of construction-agency credit based on the improved TOPSIS model[J]. Journal of Central South University (Social Science), 2010, 16(6): 75-82.
- [10] 李娜娜, 何正友. 主客观权重相结合的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2009(6): 55-61.  
LI Nana, HE Zhengyou. Power quality comprehensive evaluation combining subjective weight with objective weight[J]. Power System Technology, 2009(6): 55-61.
- [11] 王娟, 周好文. 基于 Kullback 散度的主客观权重相结合的投资决策方法[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2010, 16(6): 75-82.  
WANG Juan, ZHOU Haowen. Subjective and objective weight combined decision-making method based on Kullback divergence[J]. Journal of Jinan University (Science & Technology), 2010, 16(6): 75-82.
- [12] DL/T 793-2001, 发电设备可靠性评价规程[S].  
DL/T 793-2001, Evaluation procedures of power equipment reliability[S].
- [13] 黄德才, 郑河荣. AHP 方法中判断矩阵的标度扩展构造法[J]. 系统工程, 2003, 21(1): 105-109.  
HUANG Decai, ZHENG Herong. Scale-extending method for constructing judgment matrix in the Analytic Hierarchy Process [J]. Systems Engineering, 2003, 21(1): 105-109.
- [14] 朱雪龙. 应用信息论基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.  
ZHU Xuelong. Fundamentals of applied information theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [15] 岳超源. 决策理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
YUE Chaoyuan. Decision theory and methods[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [16] Lin Y H, Lee P C, Chang T P, et al. Multi-attributes group decision making model under the condition of uncertain information[J]. Automation in Construction, 2008, 17: 792-797.
- [17] Lin Y H, Lee P C, Ting H I. Dynamic multi-attributes decision making model with grey number evaluations[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 35: 1638-1644.
- (责任编辑 崔利)