

混煤燃烧过程中的交互作用:过量空气系数对混煤燃尽特性的影响

马 仑,汪涂维,方庆艳,郭岸龙,王廷旭,谭 鹏,张 成,陈 刚

(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘 要:在沉降炉上对无烟煤、贫煤、烟煤、褐煤以及不同配比(25%、50%、75%)混煤开展了过量空气系数对混煤燃尽特性影响的实验研究。结果表明,混煤燃烧中挥发分高的煤对挥发分低的煤存在促进和抑制 2 种交互作用。“炉外”掺烧方式下,低挥发分煤与高挥发分煤掺混时,抢风抑制作用表现明显;尤其是掺烧 75% 高挥发分煤时,抢风抑制作用最为显著;提高过量空气系数可以改善贫氧气氛,减弱混煤燃烧中的抢风抑制作用,提高混煤燃尽率。“炉内”掺烧方式下,过量空气系数的增加,交互作用减弱,各单煤的燃烧独立性增强,混煤燃尽率逐渐接近计算线性燃尽率。

关键词:混煤掺烧;过量空气系数;燃尽特性;交互作用

中图分类号:TK16 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)04-0042-05

Interaction of blended-coal combustion process: Influence of excess air coefficient on burnout characteristics

Ma Lun, Wang Tuwei, Fang Qingyan, Guo Anlong, Wang Tingxu, Tan Peng, Zhang Cheng, Chen Gang

(State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The experiment of the influence of excess air coefficient on the burnout characteristics are performed under four coals and their blended coals (0%、25%、50%、75%、100%) The results show that the combustion of blended coal is impacted by two opposite effects: the promote function and the restrain function. Under the out-furnace coal blending method, the interaction of blended coal is obvious when low-volatile coal is blended with high-volatile coals (especially, under the blending ratio of 75%). Enhancing the excess air coefficient can weaken the restrain function. Under the in-furnace coal blending method, when low-volatile coal is blended with high-volatile coals, as increasing the excess air coefficient, the restrain function is also lower, and the combustion independence of individual coals gradually increases, and the burnout of blended coal approaches the linear value.

Key words: blend-coal combustion; excess air coefficient; burnout characteristic; interaction

0 引 言

混煤燃烧广泛应用于火力发电中,但与单煤燃烧相比,混煤燃烧更为复杂,不满足线性可加性。混煤燃烧过程中组分煤之间同时存在着 2 种不同的相互作用:促进和抑制作用,2 种作用共同影响了混煤的着火及燃尽特性。针对混燃过程中的交互作用,

国内外研究者开展了许多研究工作^[1-5]。Lee 等^[6-8]在沉降炉上的研究表明,采用炉外掺烧方式,对于贫煤和高挥发分烟煤的混煤,当烟煤的掺混比例小于 25% 时,促进作用起主导作用,有利于改善混煤的着火和燃尽特性;但当烟煤的掺混比例大于 25% 时,尤其是在 75% 左右时,抑制作用逐渐起主导作用,不利于改善混煤的燃尽特性。方立军^[9]和

收稿日期:2017-06-12;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.04.006

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51676076)

作者简介:马 仑(1990—),男,四川巴中人,博士研究生。E-mail:malun3g@126.com。通讯作者:方庆艳,副教授。E-mail:qyfang@hust.edu.cn

引用格式:马仑,汪涂维,方庆艳,等.混煤燃烧过程中的交互作用:过量空气系数对混煤燃尽特性的影响[J].洁净煤技术,2017,23(4):42-46.

Ma Lun, Wang Tuwei, Fang Qingyan, et al. Interaction of blended-coal combustion process: Influence of excess air coefficient on burnout characteristics[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4): 42-46.

马国伟等^[10]使用热重分析仪不同煤阶混煤的燃烧特性进行了分析研究。Arenillas 等^[11]探究了次烟煤、高挥发分和低挥发分烟煤 3 种单煤及混煤进行了研究,发现掺混比例不同,着火机理也不相同;次烟煤和低挥发分烟煤及其混煤的着火机理为异相着火;而高挥发分烟煤着火机理为同相着火;对于高挥发分烟煤和低挥发分烟煤混煤而言,随着高挥发分烟煤比例增加,混煤着火机理从异相逐渐向同相着火机理改变。本课题组建立了可实现炉内和炉外两种掺烧方式的沉降炉试验系统,开展了混煤燃烧过程中的交互作用机理研究^[8]和掺烧方式对混煤燃烧特性影响的研究^[12]。本文在该实验系统上,对无烟煤、贫煤、高挥发分烟煤和褐煤及其不同比例的混煤,在不同过量空气系数下燃烧特性进行实验研究,以期深化对混燃过程中的交互作用机理的认识,为电站锅炉混煤掺烧优化调控提供理论依据。

1 实验系统和工况

沉降炉试验台主要包含给粉系统、沉降炉炉体、反应管以及由配气系统、温控系统、水冷却系统、取样分析系统等组成的辅助系统,如图 1 所示。反应管内径 70 mm,总长度 1 400 mm,有效加热段 1 000 mm。本实验平台可实现“炉内”和“炉外”2 种掺烧方式,其中“炉内”掺混时,给粉管采用 4 种长度差,以控制高挥发分烟煤与贫煤在炉内的延迟

混合时间,分别为 0、50、100、150 mm。给粉器为 PEF-90AL 型双级振动盘式的常压给粉器(日本 Sanki 公司生产),给粉范围 0~2 g/min,给粉精度 $\pm 5\%$ 。实验所用煤的元素及工业分析见表 1,煤粉粒径为 75~125 μm ,总给粉量为 0.5 g/min;实验一次风为氮气,二次风为氧气氮气混合气体,反应前氧气的体积分数为 15%,混煤中掺烧比例分别为 0%、25%、50%、75%、100%,过量空气系数分别取 1.2 和 2.0,试验温度为 1 100 $^{\circ}\text{C}$ 。

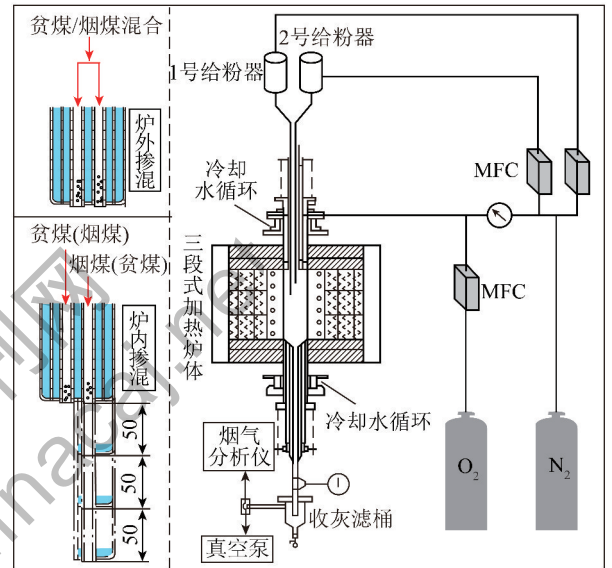


图 1 沉降炉试验台系统

Fig. 1 Schematic diagram of the test bed

表 1 煤种工业分析及元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analyses of coals

煤种	工业分析/%				元素分析/%					LHV/ (MJ·kg ⁻¹)
	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	C_{ad}	H_{ad}	O_{ad}	N_{ad}	S_{ad}	
褐煤	2.58	25.83	45.24	26.34	47.32	3.69	19.23	1.35	0.65	18.26
烟煤	2.05	17.13	29.86	50.96	61.21	3.76	14.37	0.97	0.51	25.60
贫煤	1.14	21.98	14.61	62.27	68.73	3.12	3.27	1.24	0.52	26.89
无烟煤	1.12	29.66	7.76	61.45	62	2.16	4.38	0.68	2.10	22.98

2 结果与讨论

2.1 “炉外”掺烧方式下过量空气系数对混煤燃尽特性的影响

采用“炉外”掺混燃烧方式,对不同过量空气系数($\lambda=1.2$ 、2.0)下的燃烧特性进行实验研究。“炉外”掺烧方式下低挥发分煤与高挥发分煤掺混燃烧特性如图 2 所示。可以看出,低挥发分煤掺混高挥

发分煤时,随着增加高挥发分煤的掺烧比例,混煤的燃尽率呈现出“先增大后减少、然后再增大”的变化趋势。这主要是由于在混煤燃烧中存在 2 种明显的交互作用共同影响混煤燃尽特性:促进作用(高挥发分煤挥发分产率高,着火燃烧快,提高了局部温度,促进了低挥发分煤的着火和燃烧)和抑制作用(高挥发分煤会抢先与氧气反应,消耗大量的氧气,使低挥发分煤燃烧处于欠氧状态,阻碍了低挥发分

煤的着火及燃尽)。

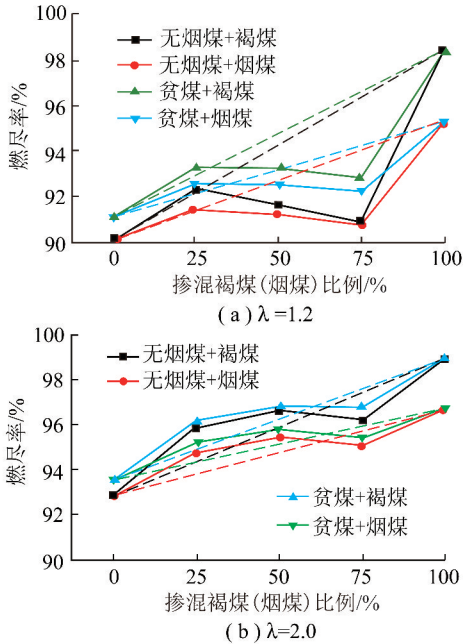


图2 炉外掺混下低挥发分煤掺混高挥发分煤时混煤燃烧特性

Fig. 2 Combustion characteristic of low-volatile coals blending with high-volatile coals under out-furnace blending method

过量空气系数 $\lambda = 1.2$ 时, 25% 掺混高挥发分煤时混煤燃尽率高于线性计算燃尽率, 表明该比例下混煤中促进作用强于抑制作用。随着掺混比例增加, 混煤低于线性计算燃尽率现象显著, 表明该大比例下混煤中抑制作用强于促进作用。而当过量空气系数由 $\lambda = 1.2$ 增加到 $\lambda = 2.0$ 时, 氧气充足, 贫氧气氛对低挥发分煤燃尽的影响逐渐减弱, 而温度对低挥发分煤燃烧的影响逐渐增加。高挥发分煤优先燃烧提高局部温度, 促进低挥发分煤的着火与燃烧, 提高了混煤的燃尽率。由混煤燃尽率的变化曲线可以看出, $\lambda = 1.2$ 时掺混 50% 高挥发分煤的混煤燃尽率低于线性燃尽率, 而 $\lambda = 2.0$ 时掺混 50% 高挥发分煤的混煤燃尽率高于线性燃尽率; 同时, 掺混 75% 高挥发分煤的混煤燃尽率在 $\lambda = 2.0$ 时更加靠近线性值。

图3为“炉外”掺烧方式下高(低)挥发分掺混高(低)挥发分煤时混煤的燃烧特性, 可以看出混煤燃烧的燃尽率变化基本随着挥发分高的煤掺烧比例的增加而逐渐增加。当过量空气系数 $\lambda = 1.2$ 和 $\lambda = 2.0$ 时, 无烟煤掺烧贫煤时, 混煤的燃尽率与计算线性值基本一致, 呈线性增加。这是由于无烟煤和贫煤属于挥发分含量都较低的小差异煤种, 各自都能

保持独立的燃烧特性, 两者的抢风抑制作用表现不明显。在过量空气系数 $\lambda = 1.2$ 下, 烟煤掺烧褐煤时, 混煤的燃尽率随着掺混比例的增加而逐渐增加, 但在掺混 75% 褐煤时混煤的燃尽率低于线性燃尽率。这主要是由于挥发分较高褐煤的煤燃烧消耗氧气的速率高于烟煤, 存在轻微的抢风抑制作用。增加过量空气系数至 $\lambda = 2.0$ 时, 其混煤燃尽率明显高于线性值, 这是因为过量空气系数增加使得贫氧气氛得到改善, 抢风抑制作用减弱。

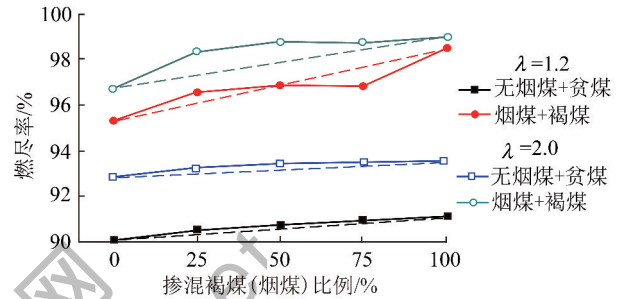


图3 炉外掺混下高(低)挥发分掺混高(低)挥发分煤时混煤燃烧特性

Fig. 3 Combustion characteristic of high (low)-volatile coals blending with high (low)-volatile coals under out-furnace blending method

2.2 “炉内”掺烧方式下过量空气系数对混煤燃尽特性的影响

为探究“炉内”掺烧方式下, 不同过量空气系数下混煤燃尽特性的影响, 笔者选择了易燃煤较长给粉管进入反应管内, 难燃煤经由较短给粉管进入反应管进行探究, 具体解释见文献[12]。低挥发分煤掺混高挥发分煤时混煤的燃尽特性结果如图4所示。对过量空气系数 $\lambda = 1.2$ 而言, 给粉管长差 $\Delta L = 0$ 时, 低挥发分煤和高挥发分煤同时送入炉内, 与“炉外”掺混接近, 混煤燃烧中促进和抑制2种交互作用共同影响燃尽特性, 且在掺混高挥发分煤 50% 时, 混煤燃尽率比 25% 掺混下混煤燃尽率轻微有所增加; 而在掺混高挥发分煤为 75% 时, 由于抢风抑制作用的存在, 大大降低了混煤燃尽率。同时可以看出, 在 75% 掺混时, 煤种差异越大, 且高挥发分煤的挥发分含量越高, 抢风抑制作用越明显; 在该比例下, 无烟煤掺混褐煤燃尽特性恶化最为明显。2种煤延迟混合时 ($\Delta L = 50, 100, 150$ mm), 随着掺烧高挥发分煤比例的增加, 混煤燃尽率逐渐提高。在同一掺混比例下, 延迟混合时间增加 (给粉管长差 ΔL 增加), 混煤燃尽率逐渐接近于计算线性燃尽

率,这表明混合时间延迟有利于增强混煤中各单煤的燃烧独立性。随着过量空气系数从 $\lambda = 1.2$ 增加到 $\lambda = 2$,高挥发分煤掺混比例在 50% 的混煤燃尽率

显著增加,且高于线性燃尽率;在掺混高挥发分煤为 75% 时,混煤燃尽率也有所增加,且与线性燃尽率差异减小,但抢风抑制作用仍然存在。

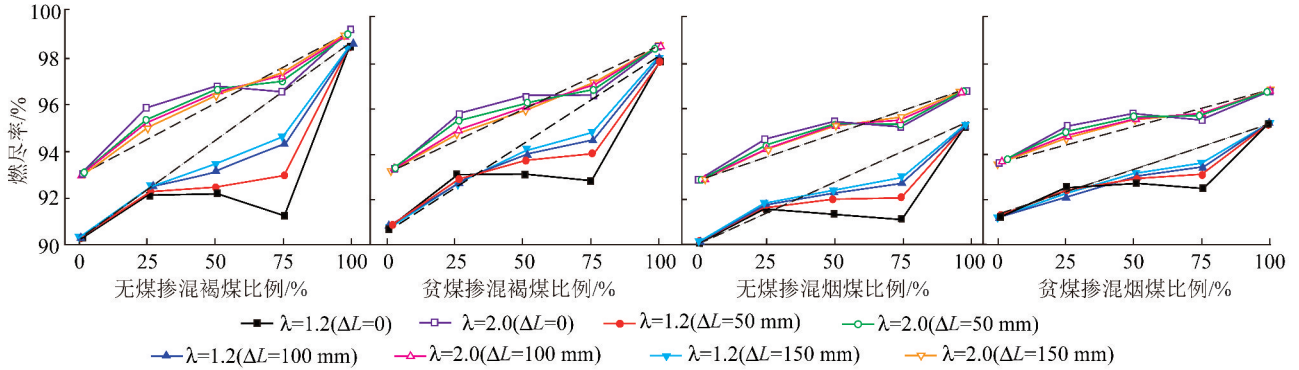


图4 炉内掺混下低挥发分煤掺混高挥发分煤时混煤燃烧特性

Fig. 4 Combustion characteristic of low-volatile coals blending with high-volatile coals under in-furnace blending method

“炉内”掺烧方式下高(低)挥发分掺混高(低)挥发分煤时混煤的燃烧特性结果如图 5 所示。可以看出,对于无烟煤掺混贫煤,随着混合时间的增加(给粉管长差 ΔL 增加),混煤的燃尽率轻微有所降低。表明低挥发煤掺混燃烧时,虽然燃尽率较低,但各单煤燃烧独立性较强,交互作用不明显。对于烟

煤掺混褐煤,在过量空气系数 $\lambda = 1.2$ 条件下,75% 烟煤+25% 褐煤混煤燃尽率随着混合时间的增加而逐渐减小,而 50% 烟煤+50% 褐煤与 25% 烟煤+75% 褐煤混煤燃尽率随着混合时间的增加而逐渐增大。这是因为“炉内”掺烧方式下,75% 烟煤掺混 25% 褐煤时,褐煤先燃烧提高燃烧区域局部温度的促进作用对混煤燃烧起主导作用,随着混煤混合时间的延迟,促进作用逐渐减弱,混煤的燃尽率逐渐降低;而 50% 烟煤+50% 褐煤和 25% 烟煤+75% 褐煤混煤燃烧时,褐煤先燃烧消耗氧气对烟煤燃烧的抑制作用占主导作用,随着混合时间的增加,抑制作用逐渐减弱,混煤的燃尽率逐渐增加。随着过量空气系数从 $\lambda = 1.2$ 增加到 $\lambda = 2$,无烟煤和贫煤掺混燃烧时混煤燃尽率符合线性增加规律;而高挥发分煤烟煤和褐煤掺混时混煤燃尽率高于计算线性燃尽率。

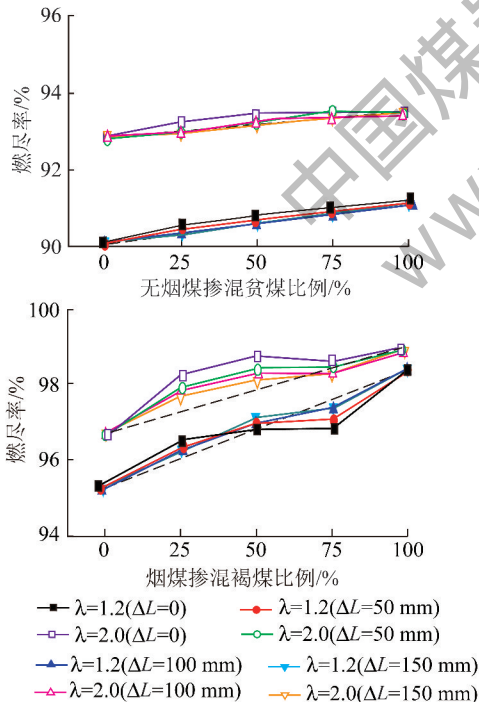


图5 炉内掺混下高(低)挥发分掺混高(低)挥发分煤时混煤燃烧特性

Fig. 5 Combustion characteristic of high (low)-volatile coals blending with high (low)-volatile coals under in-furnace blending method

3 结 论

1) 混煤燃烧中挥发分高的煤对挥发分低的煤存在促进和抑制 2 种交互作用。

2) “炉外”掺烧方式下,低挥发分煤与高挥发分煤掺混时,抢风抑制作用表现明显;尤其是掺烧 75% 高挥发分煤时,抢风抑制作用最为显著;提高过量空气系数可以改善贫氧气氛,减弱混煤燃烧中的抢风抑制作用,提高混煤燃尽率。

3) “炉内”掺烧方式下,过量空气系数的增加,交互作用减弱,各单煤的燃烧独立性增强,混煤燃尽率逐渐接近计算线性燃尽率。

参考文献 (References) :

- [1] 翁安心,周昊,张力,等.不同煤种混煤燃烧时 NO_x 生成和燃尽特性的实验[J].热能动力工程,2004,19(3):242-246.
Weng Anxin,Zhou Hao,Zhang Li, et al. Experimental research of the NO_x generation and burnout characteristics during the combustion of blended coals[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2004,19(3):242-246.
- [2] 陈刚,方庆艳,张成,等.电站锅炉配煤掺烧及经济运行[M].北京:中国电力出版社,2013.
- [3] 邱建荣,马毓义,曾汉才,等.混煤特性的综合性实验研究[J].动力工程,1993,13(2):32-36.
Qiu Jianrong, Ma Yuyi, Zeng Hancai, et al. Coal blend features comprehensive experimental research [J]. Power Engineering, 1993, 13(2):32-36.
- [4] Ikeda M, Makino H, Morinaga H, et al. Emission characteristics of NO_x and unburned carbon in fly ash during combustion of blends of bituminous/sub-bituminous coals [J]. Fuel, 2003, 82(15):1851-1857.
- [5] Wang C, Liu Y, Zhang X, et al. A study on coal properties and combustion characteristics of blended coals in Northwestern China [J]. Energy & Fuels, 2011, 25(8):3634-3645.
- [6] Lee B, Kim S, Song J, et al. Influence of coal blending methods on unburned carbon and NO emissions in a drop-cetube furnace [J]. Energy & Fuels, 2011, 25(11):5055-5062.
- [7] Lee B H, Eddings E G, Jeon C H. Effect of coal blending methods with different excess oxygen on unburned carbon and NO_x emissions in an entrained flow reactor [J]. Energy & Fuels, 2012, 26(11):6803-6814.
- [8] 马仑,汪涂维,方庆艳,等.混煤燃烧过程中的交互作用:机理实验研究与数值模拟[J].煤炭学报,2015,40(11):2647-2653.
Ma Lun, Wang Tuwei, Fang Qingyan, et al. Interaction of blended-coal combustion process: Experimental study and numerical simulation of mechanism [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11):2647-2653.
- [9] 方立军,高正阳,阎维平,等.利用热天平对电厂混煤燃尽特性的试验研究[J].华北电力技术,2001(1):7-9.
Fang Lijun, Gao Zhengyang, Yan Weiping, et al. Experiment study on burn out characteristic of blended Coal in power plant by thermobalance [J]. North China Electric Power, 2001(1):7-9.
- [10] 马国伟,张晓明,刘建华,等.混煤燃烧过程中的交互作用与动力学特性研究[J].电力科学与工程,2013(2):56-62.
Ma Guowei, Zhang Xiaoming, Liu Jianhua, et al. Study on interaction and kinetic characteristics during combustion of blended coals [J]. Electric Power Science and Engineering, 2013(2):56-62.
- [11] Arenillas A, Rubiera F, Arias B, et al. A TG/DTA study on the effect of coal blending on ignition behaviour [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2004, 76(2):603-614.
- [12] 马仑,汪涂维,方庆艳,等.混煤燃烧过程中的交互作用:掺烧方式对混煤燃烧特性的影响[J].煤炭学报,2016,41(9):2340-2346.
Ma Lun, Wang Tuwei, Fang Qingyan, et al. Interaction of blended-coal combustion process: Influence of coal blending methods on combustion characteristics [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9):2340-2346.
- [13] 李毅,杨公训,高松.水煤浆锅炉的发展及现状[J].热能动力工程,2007(6):583-585.
Li Yi, Yang Gongxun, Gao song. Development and status quo of coal-water-mixture (cwm)-fired boilers [J]. Engineering for Thermal Energy and Power, 2007(6):583-585.
- [14] Peters A, Weber R. Mathematical modeling of a 2.4 MW swirling pulverized coal flame [J]. Combustion Science and Technology, 1997, 122(1-6):131-182.
- [15] Tu Y, Liu H, Chen S, et al. Numerical study of combustion characteristics for pulverized coal under oxy-MILD operation [J]. Fuel Processing Technology, 2015, 135:80-90.
- [16] Liu J, Chen S, Liu Z, et al. Mathematical modeling of air and oxy coal confined swirling flames on two extended eddy-dissipation models [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(2):696-708.
- [17] Galletti C, Ferrarotti M, Parente A, et al. Reduced NO formation models for CFD simulations of MILD combustion [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(14):4884-4897.
- [18] 陈力,赵翔,孟德润,等.水煤浆燃烧过程的数值模拟[J].热力发电,2006,35(10):20-23.
Chen Li, Zhao Xiang, Meng Derun, et al. Numerical simulation of CWS combustion process [J]. Thermal Power Generation, 2006, 35(10):20-23.
- [19] 于海龙,赵翔,周志军,等.煤浆浓度对水煤浆气化影响的数值模拟[J].动力工程,2005(2):217-220.
Yu Hailong, Zhao Xiang, Zhou Zhijun, et al. Numerical simulation of the effect of coal-water-slurry's concentration on its gasification [J]. Power Engineering, 2005(2):217-220.
- [20] Vascellari M, Cau G. Influence of turbulence-chemical interaction on CFD pulverized coal MILD combustion modeling [J]. Fuel, 2012, 101:90-101.
- [21] Mao Z, Zhang L, Zhu X, et al. Modeling of an oxy-coal flame under a steam-rich atmosphere [J]. Applied Energy, 2016, 161:112-123.

(上接第41页)