

磁场对强旋流燃烧过程中 NO 生成特性的影响

陈伟鹏, 赵增武, 李保卫, 常胜良, 武文斐

(内蒙古科技大学, 内蒙古自治区 包头市 014010)

Effect of Magnetic Field on Generation Characteristics of NO in Strong Whirl Combustion

CHEN Weipeng, ZHAO Zengwu, LI Baowei, CHANG Shengliang, WU Wenfei

(Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

ABSTRACT: The fixed magnetic field was placed around the strongly swirling flame. Magnetic intensity, flame temperature and NO concentration in strongly swirling combustion under various magnetic fields were measured accurately by CST-24 digital magnetometer, WRNK armored chromium-nickel thermocouple and KM 9106 gas analysis instrument. The combustion characteristics and the generation characteristics of NO in strongly swirling combustion under various magnetic fields were analyzed. The results show that the effect of the magnetic field makes temperature of flame center increase obviously, makes temperature of flame fringe decrease and makes the concentration of NO in the flame fringe lower remarkably. The magnetic field affects the concentration of NO in the flame by changing the temperature distribution of the strongly swirling flame. Moreover, the magnetic field reduces the collision of the charged ions (or ion clusters) producing NO, which results in the decrease of the generation of NO in the flame.

KEY WORDS: fixed magnetic field; strong whirl combustion; NO; temperature field; clean combustion

摘要: 在强旋流火焰周围安放固定磁场, 采用 CST-24 型数字式磁强计测定磁场强度, 采用 WRNK 的铠装镍铬热电偶和 KM9106 综合烟气分析仪检测不同磁场下强旋流燃烧火焰温度和 NO 浓度, 分析了不同磁场下强旋流燃烧特性和 NO 生成特性。结果表明: 在磁场作用下火焰中心温度明显

提高, 外缘温度有所降低, 火焰外缘 NO 浓度显著降低。磁场通过改变强旋流火焰温度分布进而影响火焰中 NO 的浓度; 磁场的作用使生成 NO 的带电离子或离子团彼此碰撞的机会减少, 进而减少了火焰中 NO 生成。

关键词: 固定磁场; 强旋流燃烧; NO; 温度场; 洁净燃烧

0 引言

我国工业炉窑高温燃烧排放的大气污染物主要是二氧化碳与氮氧化物, 其中氮氧化物生成与排放的有效控制是工业洁净燃烧过程的重点研究课题之一, 也是难点之一^[1]。强旋流燃烧是一种普遍存在的工业燃烧现象, 由于空气和燃气混合较好, 燃烧火焰温度较高, 烟气中 NO_x 浓度较大。因此如何减少 NO_x 排放具有较强的现实意义。燃烧过程中影响 NO_x 形成的因素很多, 如温度、空气过剩系数、湍流流动状态等。许多学者针对旋流数、烧嘴结构、预热温度、压力、氧气浓度及空气过量系数等因素对燃烧过程中 NO_x 的影响进行了大量的研究, 并取得了一定的成果^[2-9]。

燃烧过程中 NO_x 的生成与火焰内部的流场和温度场分布等火焰的特性有较大的关系, 同时火焰中的离子和离子团的分布和运动状态对 NO_x 的生成也存在较大影响。通过在火焰周围安放固定的磁性材料的方法, 在火焰区产生固定磁场来影响燃烧过程中产生的带有电荷的离子和离子团的运动轨迹, 进而影响带电离子和离子团的浓度分布和燃烧过程中各种化学反应速度。化学反应速度的改变必然会导致火焰温度场的变化, 并最终影响 NO_x 的生成特性。通过改变火焰外部磁场的大小和位置, 就会找到一种能够减小 NO_x 生成量的磁场布置方式。开展磁场对燃烧过程中 NO_x 的生成机制的研究, 能

基金项目: 重大基础研究前期研究专项(2005CCA00600); 国家自然科学基金(50464004); 内蒙古自然科学基金(200508010701); 内蒙古科技大学创新基金(2009NC053)。

Project Supported by the Special Program for Key Basic Research of the Ministry of Science and Technology, China (2005CCA00600); Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (50464004); Project supported by the National Natural Science Foundation of Inner Mongolia (200508010701); The Innovation Fund of Inner Mongolia University of Science and Technology (2009NC053).

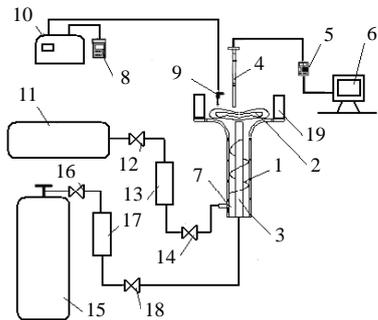
够为燃烧过程中减小 NO_x 排放提供一种新的控制方法。

近年来,一些科研工作者对磁场中的火焰的燃烧特性进行了研究^[10-16],如夏云春、王清安针对固定磁场对扩散火焰和旋转火焰特性影响进行了研究;李静、徐健针对磁场对瓦斯爆炸过程中火焰传播的作用进行了研究;丘纪华针对磁场对煤粉着火温度影响进行了研究;V.Mizutani 等针对磁场对扩散火焰燃烧特性进行了研究。以上主要是针对磁场对火焰的外观和部分燃烧特性的影响开展了相关研究工作,并取得一定的成果。但是有关磁场对燃烧过程中 NO_x 等污染物生成的影响涉及较少,针对磁场对强旋流燃烧过程中 NO_x 生成机制影响的研究更是鲜见报导。

本文在强旋流火焰周围安放固定磁场,通过实验研究的方法,采用高精度测试设备进行强旋流燃烧温度场、磁场和 NO_x 浓度的测定。燃烧过程中 NO_x 生成成为热力型机制,由于实验过程中仅检测到 NO ,因此,本文只针对不同磁场下强旋流燃烧特性和 NO 生成特性进行讨论。

1 实验模型的建立

实验模型主要由气体燃烧装置及检测系统组成,如图1所示。燃烧设备采用自制的强旋流烧嘴,液化气和空气通道由同轴套管组成,内管直径为10 mm,外管内径20 mm;内管为液化气通道,内管和外管之间为助燃空气通道;采用3道螺旋叶片作为旋流装置,烧嘴喇叭口半径为18 mm。

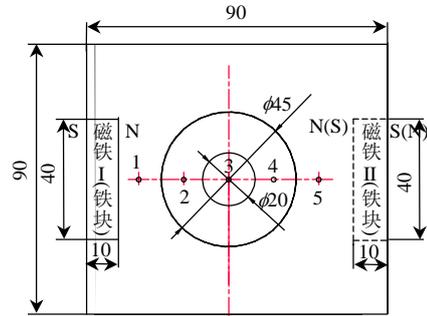


1—旋流叶片; 2—平火焰; 3—煤气喷管; 4—热电偶; 5—巡检仪;
6—计算机; 7—空气管道; 8—显示屏; 9—探针; 10—综合烟气分析仪;
11—空压机; 12—减压阀; 13—空气流量计; 14—空气调节阀;
15—液化气罐; 16—减压阀; 17—液化气流量计; 18—液化气调节阀;
19—永磁材料(或同尺寸铁块)。

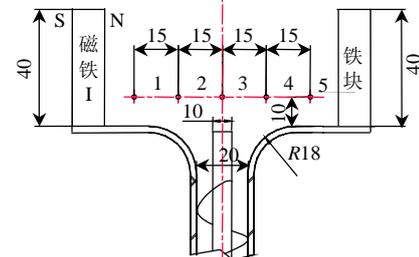
图1 燃烧装置及检测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of combustion devices and measure system

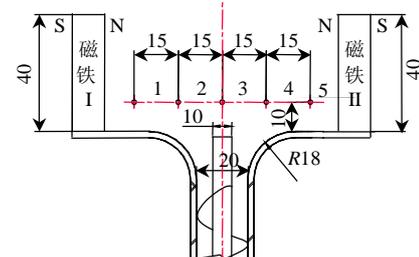
图2为烧嘴磁场摆放位置和各检查点示意图。火焰面温度采用WRNK的铠装镍铬热电偶检测;火焰面 NO_x 浓度检测采用英国KANE公司生产的



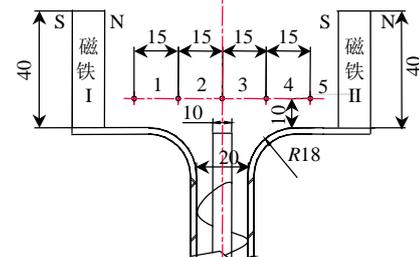
(a) 烧嘴俯视图



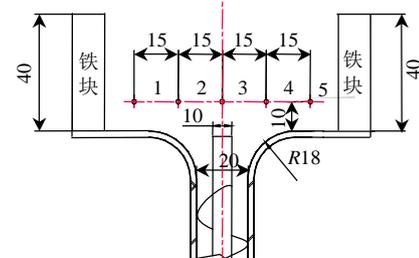
(b) 实验工况1剖面图



(c) 实验工况2剖面图



(d) 实验工况3剖面图



(e) 实验工况4剖面图

单位: mm

图2 磁体摆放位置和各检查点示意图

Fig. 2 Position of magnetic body and checkpoints

KM9106 综合烟气分析仪，分辨率 1×10^{-6} ，分析范围 $0 \sim 5000 \times 10^{-6}$ ；磁场强度监测采用 CST-24 型数字式磁强计测量。

液化气由液化气罐减压后送入燃料管，其成分为： C_4H_{10} 占 90%， C_3H_8 和 C_5H_{12} 各占 5%，液化气压力为 0.9~1.0 MPa，流量为 48 L/h；空气由空压机送入，流量为 1700 L/h；磁体采用钕铁硼永磁材料，尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ，做无磁场对比实验采用相同尺寸的铁块替代磁体。通过磁场分布下燃烧实验，对比磁场对烧嘴各监测点温度分布和 NO 浓度的影响。由于钕铁硼永磁材料在高温下会发生退磁现象，因此燃烧时间不能过长。每次试验都从室温开始燃烧时间为 60s，所有数据都为 60s 时采集的数据。每种工况实验 5 次，实验数据为 5 次平均值。

图 2(a) 为烧嘴俯视图，图中 1、2、3、4、5 为监测点位置，实验工况 1 时仅安放磁铁 I；实验工况 2 和 3 时同时安放磁铁 I 和磁铁 II。图 2(b) 为实验工况 1 的剖面图，磁铁 I 的 N 极朝向烧嘴中心，另一侧安放尺寸相同的铁块；图 2(c) 为实验工况 2 的剖面图，磁体 I 和 II 的 N 极都朝向烧嘴中心；图 2(d) 为实验工况 3 的剖面图，磁铁 I 的 N 极朝向烧嘴中心，磁铁 II 的 S 极朝向烧嘴中心；图 2(e) 为实验工况 4 的剖面图，以相同尺寸铁块替代磁铁 I 和磁铁 II，作为以上 3 种工况的对比工况。

2 结果与讨论

2.1 各燃烧工况的磁场分布情况

图 3 为各实验工况监测点磁场强度分布图。实验工况 1 中磁场强度最大位置在监测点 1 处为 1.19 T，从监测点 1 到 5 磁场强度逐渐降低，磁场强度最小处是监测点 5 为 0.09 T；实验工况 2 中磁场强度最大位置在监测点 1 处为 1.21 T，从监测点 1 到 3 磁场强度逐渐降低，磁场强度最小处是监测点 3 为 0.23 T，从监测点 3 到 5 磁场强度逐渐降升高，监测点 5 磁场强度为 0.9 T；实验工况 3 中磁场强度最大位置在监测点 1 处为 1.4 T，从监测点 1 到 3 磁场强度逐渐降低，磁场强度最小处是监测点 3 为 0.31 T，从监测点 3 到 5 磁场强度逐渐降升高，监测点 5 磁场强度为 0.95 T；实验工况 4 没有磁场不需要监测。需要说明，磁场强度测量过程中只能测量磁场强度，不能测量磁场方向。图 3 三种实验

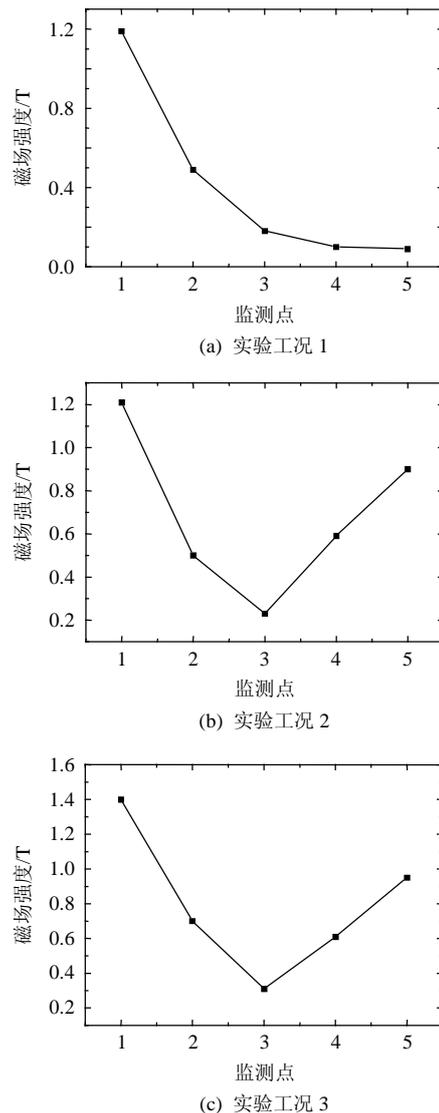


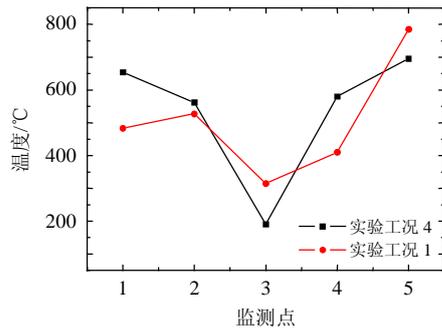
图 3 各试验工况磁场强度分布图

Fig. 3 Intensity of magnetic field in different type of behaviour

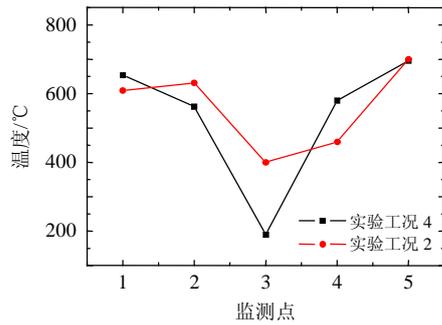
工况的各监测点磁场方向是不一样的。

2.2 磁场分布对燃烧温度的影响

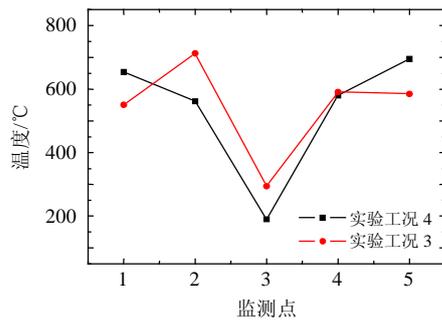
图 4 为 3 种实验工况下有无磁场火焰温度分布图。可以看出：不加磁场时火焰温度分布符合强旋流烧嘴特征，中心温度低，周边温度高。从各工况添加磁场后的温度分布可以看出，添加磁场后烧嘴中心温度有提高的趋势。特别是第 2 和第 3 种工况，在烧嘴两侧都添加了磁场后烧嘴中心温度明显提高，而且外缘温度有所降低。从以上现象可以分析出，合理的磁场布置使燃料由煤气喷口喷出后燃烧速度加快，相比没有磁场条件下燃烧更多的集中到烧嘴中心位置，降低外缘局部高温，使火焰面温度分布相对均匀。



(a) 实验工况 1 和 4 对比



(b) 实验工况 2 和 4 对比



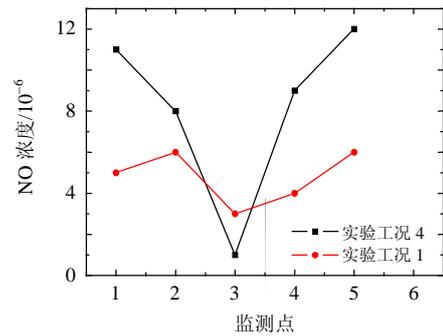
(c) 实验工况 3 和 4 对比

图4 各试验工况下有无磁场温度分布对比
Fig. 4 Comparison of temperature profile in different type of behaviour

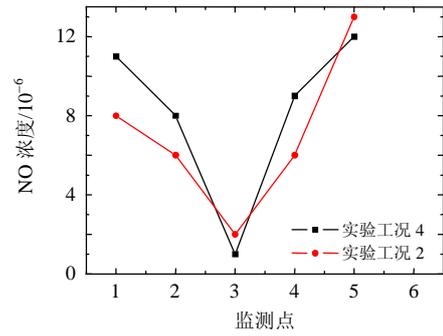
2.3 磁场分布对 NO 生成的影响

图 5 为各实验工况下有无磁场 NO 浓度分布图。可以看出：实验工况 1 下，除烧嘴中心监测点 3 和 5 处加磁场后 NO 略高于不加磁场，其他监测点处加磁场后 NO 浓度明显低于不加磁场时浓度。

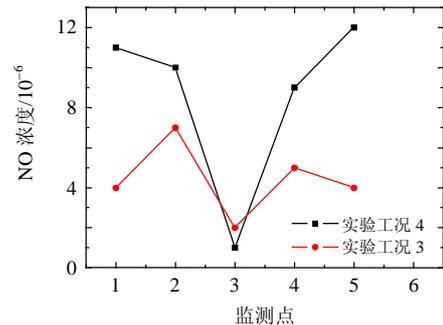
实验工况 2 和 3 下，除烧嘴监测点 3 处加磁场后 NO 略高于不加磁场，其他监测点处加磁场后 NO 浓度明显低于不加磁场时浓度。从图中分析可知，添加磁场后火焰中心 NO 浓度升高仅 1×10^{-6} ，而烧嘴外缘 NO 降低显著，实验工况 1 最大降低幅度为 3×10^{-6} ，实验工况 2 最大降低幅度为 7×10^{-6} ，实验工况 3 最大降低幅度为 8×10^{-6} 。还可以看出强旋流烧嘴燃烧过程中 NO 大量产生于火焰外缘的



(a) 实验工况 1 和 4 对比



(b) 实验工况 2 和 4 对比



(c) 实验工况 3 和 4 对比

图5 各试验工况下有无磁场 NO 浓度分布对比

Fig. 5 Comparison of NO in different type of behaviour
高温区，大幅降低外缘 NO 的浓度可以有效降低整个火焰 NO 排放。

根据以上 3 种工况分析，燃烧过程中 NO 的生成主要受到温度和磁场两方面因素同时影响。根据图 4 和图 5 可以把监测点数据分为几种情况分别讨论：第 1 种情况是实验工况 1 的第 3 和第 5 监测点、实验工况 2 和 3 的第 3 监测点，其特点是加磁场后该点温度高于加磁场前，同时 NO 浓度略高于加磁场前。其原因是以上各点磁场较弱对 NO 产生影响较小，NO 产生主要受温度改变影响。

第 2 种情况是实验工况 2 和 3 的第 2 监测点，其特点是加磁场后该点温度高于加磁场前温度，但 NO 浓度远低于加磁场前；另外实验工况 3 的第 4 监测点加磁场后该点温度等于加磁场前温度，但

NO 浓度远低于加磁场前。分析其原因是以上各点磁场较强, 磁场 NO 产生起了较大的影响作用。可以这么认为, 由于较强的固定磁场存在, 参加生成 NO 反应的带电离子或离子团受到洛伦兹力的作用, 在微观尺寸的运动有了一定的规律, 进而减少了反应带电离子或离子团彼此的碰撞机会, 从而使 NO 生成减少。

第 3 种情况是实验工况 1 的第 1、第 2 和第 4 监测点, 实验工况 2 的第 1 和第 4 监测点, 实验工况 3 的第 1 和第 5 监测点, 其特点是加磁场后该点温度低于加磁场前, 同时 NO 浓度低于加磁场前。其原因是以上各点受到温度改变和磁场同时作用使加磁场后 NO 浓度有较大减少。

3 结论

建立了安装钕铁硼永磁体的强旋流烧嘴实验模型, 采用高精度测试设备(数字式磁强计、热电偶、综合烟气分析仪等)对烧嘴中心线监测点磁场强度、温度和 NO 浓度进行测定, 重点分析了磁场分布对燃烧过程中 NO 生成特性的影响, 得到以下结论:

1) 磁场对于强旋流烧嘴火焰面温度影响较大, 合理的磁场布置可以降低外缘局部高温, 使火焰面温度分布相对均匀, 进而减少 NO 产生。

2) 固定磁场使生成 NO 反应的带电离子或离子团受到洛伦兹力的作用, 增加了运动的规律性, 进而减少了反应带电离子或离子团彼此的碰撞机会, 从而使 NO 生成减少。

参考文献

- [1] Tsuji H, Gupta A K, Hasegawa T, et al. High temperature air combustion: from energy conservation to pollution reduction[M]. New York: CRC Press, 2003: 56.
- [2] 陈伟鹏, 赵增武, 邢守正, 等. 燃气炉内燃烧工况对 NO_x 生成特性的影响[J]. 冶金能源, 2007, 26(4): 37-40. Chen Weipeng, Zhao Zengwu, Xing Shouzheng, et al. Effect of work condition on generating characteristic of NO_x in gas stove[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2007, 26(4): 37-40(in Chinese).
- [3] 陈伟鹏, 赵增武, 邢守正, 等. 燃气炉内旋流强度对 NO_x 生成特性的影响[J]. 钢铁研究学报, 2008, 20(1): 6-9. Chen Weipeng, Zhao Zengwu, Xing Shouzheng, et al. Effect of swirl intensity on formation characteristics of NO_x in gas stove[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2008, 20(1): 6-9(in Chinese).
- [4] 陈伟鹏, 武文斐, 赵增武, 等. 平焰炉内燃气管位置对 NO_x 生成特性的影响[J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(4): 9-11. Chen Weipeng, Wu Wenfei, Zhao Zengwu, et al. Effect of position of burning nozzle on generating characteristics of NO_x in flat flame stove[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2010, 22(4): 9-11(in Chinese).
- [5] Kim H S, Baek S W, Yu M J. Formation characteristics of nitric oxide in a three-staged air/LPG flame [J]. Inter-national Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(16): 2993-3008.
- [6] 赵然, 刘豪, 胡翰, 等. O₂/CO₂ 气氛下甲烷火焰中 NO 均相反应机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(20): 52-59. Zhao Ran, Liu Hao, Hu Han, et al. Homogeneous reaction mechanism research on NO in CH₄ flame under O₂/CO₂ atmosphere[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(20): 52-59(in Chinese).
- [7] 周志军, 周丛丛, 许建华, 等. 低 NO_x 旋流燃烧器一、二次风混合特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(11): 9-13. Zhou Zhijun, Zhou Congcong, Xu Jianhua, et al. Analysis of the mixing between primary air and secondary air in a low NO_x swirl burner[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(11): 9-13(in Chinese).
- [8] 张晓辉, 孙锐, 孙绍增, 等. 燃尽风与水平浓淡燃烧联用对 NO_x 生成的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(29): 56-61. Zhang Xiaohui, Sun Rui, Sun Shaozeng, et al. Effects of combined application of OFA and horizontal bias burner on NO_x emission characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(29): 56-61(in Chinese).
- [9] 吕清刚, 牛天钊, 朱建国, 等. 高温煤基燃料的燃烧特性及 NO_x 排放试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(23): 81-86. Lü Qinggang, Niu Tianyu, Zhu Jianguo, et al. Experimental study on combustion and NO_x emissions of high temperature preheated coal-based fuel [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(23): 81-86(in Chinese).
- [10] 周力行, 陈兴隆, 张健. 旋流数对湍流燃烧中 NO 生成影响的研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(5): 637-640. Zhou Lixing, Chen Xinglong, Zhang Jian. Studies on the effect of swirl on NO formation in turbulent combustion [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(5): 637-640(in Chinese).

- [11] 夏云春, 王清安. 固定磁场对旋转火焰旋转特性影响的研究[J]. 热科学与技术, 2004, 3(1): 71-80.
Xia Yunchun, Wang Qingan. Study of effects of fixed magnetic field on rotating characteristics of fire whirl [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2004, 3(1): 71-80(in Chinese).
- [12] 夏云春, 王清安, 廖光焯. 磁场对油池旋转火焰温度影响的研究[J]. 热科学与技术, 2004, 3(2): 71-80.
Xia Yunchun, Wang Qingan, Liao Guangxuan. Study of effects of magnetic field on temperature of pond fire whirl[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2004, 3(2): 71-80(in Chinese).
- [13] 李静, 徐健. 磁场对瓦斯爆炸过程中火焰传播的作用[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(11): 85-87.
Li Jing, Xu Jian. Magnetic field function to flame running during mine gas explosion[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(11): 85-87(in Chinese).
- [14] 丘纪华. 磁场对煤粉着火温度影响的研究[J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8(5): 461-463.
Qiu Jihua. Effected by magnetic field at ignition temperature of the pulverized coal[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2002, 8(5): 461-463(in Chinese).
- [15] 夏云春, 王清安. 磁场对旋转火焰涡量的影响(I)[J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(3): 257-260.
Xia Yunchun, Wang Qingan. Study on the vorticity of fire whirl affected by a magnetic field(I)[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005, 11(3): 257-260(in Chinese).
- [16] Mizutani Y. Pre-mixed laminar flames in a uniform magnetic field[J]. Combustion and Flame, 2001, 125(1-2): 1071-1073.



陈伟鹏

收稿日期: 2010-11-17。

作者简介:

陈伟鹏(1974), 男, 工学硕士, 研究方向为高效洁净燃烧, chenweipeng225@163.com;

武文斐(1964), 男, 工学博士, 研究方向为洁净燃烧, 本文通讯作者, wwf@imust.cn。

(责任编辑 车德竞)