

燃烧器配风方式对低热值煤层气燃烧影响数值模拟

陈艳容¹, 李浩杰¹, 杨仲卿¹, 樊湖²

(1. 重庆大学 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030; 2. 重庆酉水水电开发有限公司, 重庆 409809)

摘要: 对一种燃气旋流的低热值煤层气燃烧器的不同配风方式进行数值模拟, 研究单级旋流配风、内直流外旋流双级配风、单级直流配风 3 种配风方式对燃烧区域的温度场、速度场、浓度分布特性的影响, 并获得最优的配风方式。研究结果表明: 单级旋流配风方式混合效果好, 着火快, 但温度衰减快且射流后期速度衰减快, 射流刚性不足; 内直流外旋流双级配风方式的混合效果较单级直流配风方式好, 温度衰减慢, 高温区域分布广; 两种配风方式射流速度衰减都比较慢且无明显差别; 对于燃气管内加装导流叶片的燃气旋流燃烧器, 采用两个空气环腔, 配风方式为内直流外旋流的双级配风方式时, 既可提高空气和燃气的混合效果, 又保持了很好的射流刚性, 更适合于低热值煤层气的燃烧。

关键词: 低热值煤层气; 燃烧器; 配风方式; 燃烧特性; 数值模拟

中图分类号: TK229.1 文献标识码: A
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.05.020

引言

直流燃烧器射流刚性好, 可改善射流尾部的燃烧状况, 但空气和燃气的混合效果不佳; 旋流燃烧器转动动量强, 空气和燃气的混合效果好, 但导流叶片削弱了气流的射流刚性, 燃烧效果不理想^[1-3]。杨浩林等人对带旋流的管状火焰燃烧器燃烧多种低热值燃气进行实验研究^[4], 发现旋流管状火焰燃烧器可以实现多种低热值燃气的稳定高效燃烧。B. Yan 等人在锥形燃烧器中对几种低热值燃气燃烧特性及火焰稳定性进行研究^[5], 发现锥形燃烧器有利于低热值燃烧器的稳定燃烧, 在较高的湍流强度下, 未发现脱火现象。闫云飞等人研究旋流片旋流角度对低热值煤层气燃烧特性的影响^[6], 发现燃烧器旋流角度 45° 时, 燃烧室内流速和温度分布最均匀, 火焰充

满度最好, 燃烧效率最高。上述研究表明, 优化燃烧器内部结构可以提高低热值煤层气综合燃烧性能。

本研究结合常规直流燃烧器和旋流燃烧器的技术特点, 在燃气进气管内分别加装导流叶片和空气环腔, 实现单级旋流配风、内直流外旋流双级配风和单级直流配风 3 种配风方式, 并对 3 种配风方式分别进行数值模拟, 分析不同配风方式下低热值煤层气燃烧温度场、速度场和浓度场的分布规律。

1 物理模型和数学模型

1.1 物理模型

不同配风方式的燃烧器分别记为 R1 (单级旋流配风)、R2 (内直流外旋流双级配风)、R3 (单级直流配风)。3 种燃烧器的结构形式是扩散形燃烧器, 其中在喷口前端加装导流叶片提高气流的旋度。R1 燃烧器进气处加装了蜗壳结构, 空气经过蜗壳生成旋流后再进入空气环腔, R2 燃烧器设置两个空气环腔, 内空气环腔为直流风, 外空气环腔为旋流风, 风量分别占总风量的 20% 和 80%。R3 燃烧器进气为直流风。3 种燃烧器结构如图 1 所示。

1.2 数学模型

在柱坐标下, 动量方程、连续性方程、能量方程和组份方程可简写为^[7]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \varphi) + \frac{\partial}{r \partial r}(r \rho v \varphi) + \frac{\partial}{r \partial \theta}(\rho w \varphi) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{r \partial r} \left[r \Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{r^2 \partial \theta} \left[\Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right] + S_{\varphi} \quad (1)$$

式中: φ —流量; S_{φ} —源项; Γ_{φ} —扩散系数; r, x 和 θ —径向、轴向和周向坐标; u, v, w —轴向、径向和周向的速度; ρ —进气的密度。

收稿日期: 2014-06-04; 修订日期: 2014-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51206200); 中央高校基本科研业务经费项目(CDJZR12140034)

作者简介: 陈艳容(1976-), 女, 福建晋江人, 重庆大学副教授。

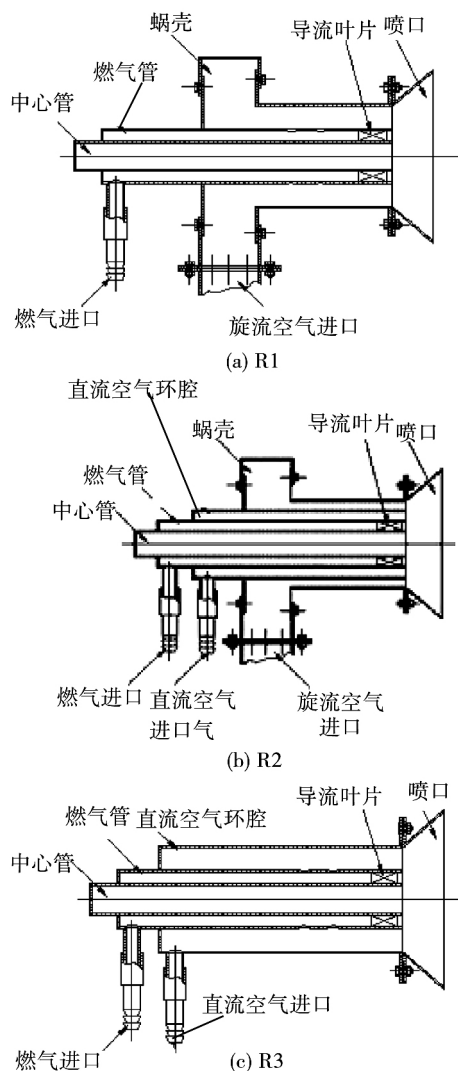


图1 燃烧器结构简图

Fig. 1 The schematic diagram of the burner

当 $\varphi = 1, \Gamma_\varphi = 0$ 时, 式(1) 表示连续方程。当 $\varphi = h, u, v, w$ 和 ε 时, 式(1) 分别表示轴向、径向和周向的湍流动能方程、动量方程、能量方程、气相方程和动能耗散方程^[8]。

1.3 边界条件和求解方法

煤层气、空气入口设为速度入口, 计算区域出口设为压力出口。壁面设为绝热壁面, 边界条件为无

滑移静态边界条件。100% - 20% 负荷下流速参数如表1 所示。

燃烧模型采用物质输运和通用有限速率化学反应模型, 辐射换热模型采用 P - 1 辐射模型^[9]。由于燃烧器结构的复杂性造成燃烧器内部转弯处有漩涡生成, 燃烧器出口处有回流区产生, 因此湍流模型采用带旋流修正的 Realizable $k - \varepsilon$ 模型, 该模型对旋转、弯曲、漩涡和复杂的二次流有较好的适应性, 并对漩涡粘度进行了改进, 能够较好模拟大尺度旋转射流^[10]。采用 SIMPLE 算法耦合压力项和速度项, 控制方程离散采用有限容积法, 动量方程离散用 QUICK 格式, 其它方程离散采用中心差分格式^[11]。

2 模拟结果及分析

2.1 温度场分布规律

图2 为3 种燃烧器在 100% - 20% 热负荷(Pd) 下, 燃烧区域温度沿中心轴线的变化情况。

由图2 可知, 100% 热负荷时, R1、R2、R3 燃烧器温度峰值分别在距渐扩出口 0.24、0.4 和 0.48 m 处, 温度峰值分别为 1 616、1 660 和 1 642 K, 即 R1 燃烧器出现温度峰值时间最短, R3 最长, R2 介于二者之间。这是因为3 个燃烧器的燃烧方式均为扩散式燃烧, 燃烧反应速率主要取决于燃料和空气的混合程度, R1 燃烧器的进口空气为旋流风, 空气和燃气的混合度较高, 所以着火时间提前, 达到温度峰值的时间最短。R3 燃烧器的入口空气为直流风, 直流风气流射流刚度强, 空气层和燃气层的动量扩散强度较弱, 燃气和空气的混合时间延长, 因此着火时间和温度峰值出现的时间推迟。R2 燃烧器内空气环腔为直流风, 外空气环腔为旋流风, 直流风量减少降低了气流刚性, 有利于燃气、空气的混合, 外围旋流风的卷吸作用增强了燃气和空气的混合, 因此 R2 燃烧器比 R3 着火时间提前。

表1 空气和煤层气流速度(m/s)

Tab. 1 The flow velocity of the air and fuel gas(m/s)

燃烧器	100% Pd			80% Pd			60% Pd			20% Pd		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
直流空气流速	0	21	22.6	0	16.8	18.1	0	12.6	13.6	0	4.2	4.5
旋流空气流速	20.6	7.6	0	16.5	6.0	10	4.5	0	4.1	1.5	0	4.5
燃气进口速度	9.5	4.1	9.5	7.6	7.6	7.6	5.7	5.7	5.7	1.9	1.9	1.9

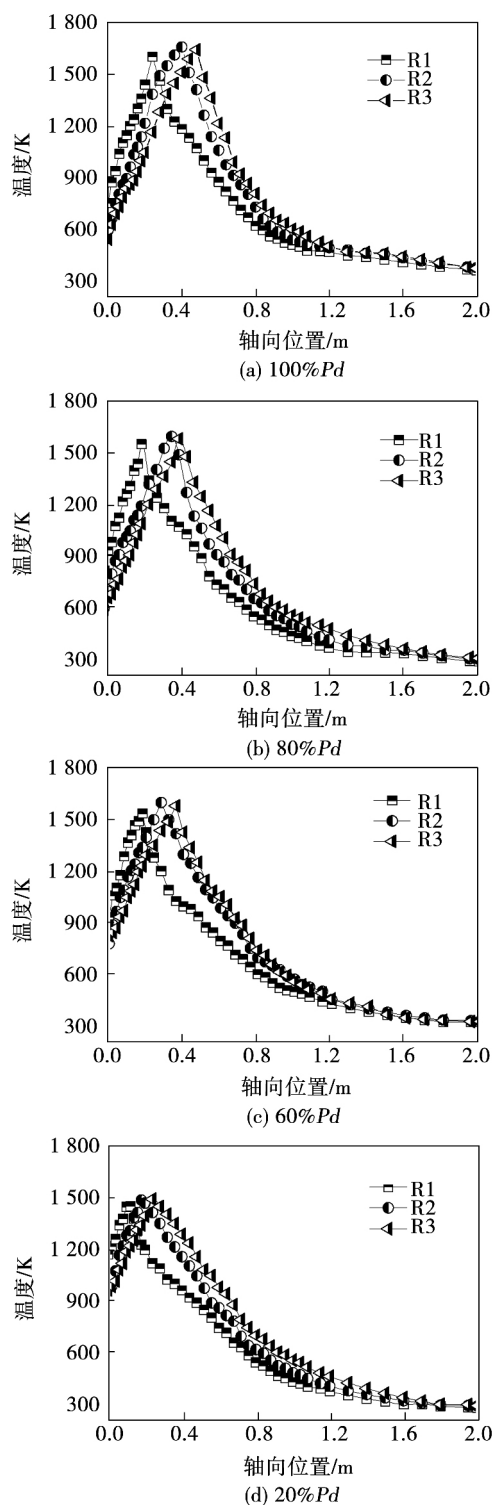


图2 100% - 20% 热负荷时不同燃烧器中心轴线的温度分布

Fig.2 The temperature distribution of the central axis in different burners under 100% - 20% heat load

当负荷降低时, R3 燃烧器温度衰减较快, 不利于燃气稳定燃烧。20% 热负荷时, R1 燃烧器在渐扩

段出口处温度过高 ($\geq 1200\text{ K}$), 这说明燃气在燃烧器渐扩段内已经开始燃烧, 因为负荷较低时气流速度较小, 空气和燃气在渐扩段内的混合时间延长, 导致燃气在渐扩段内燃烧。R2 燃烧器由于自身结构原因, 燃气和空气容易混合且能保持一定的射流刚性, 尽管负荷降低, 燃烧器燃烧仍然能保持一定稳定性, 因此 R2 燃烧器具有较好的负荷适应性。

图3 为 100% 热负荷时, 3 种燃烧器燃烧区域纵截面温度分布等势图。定义温度高于 1000 K 的区域为燃烧核心区域。

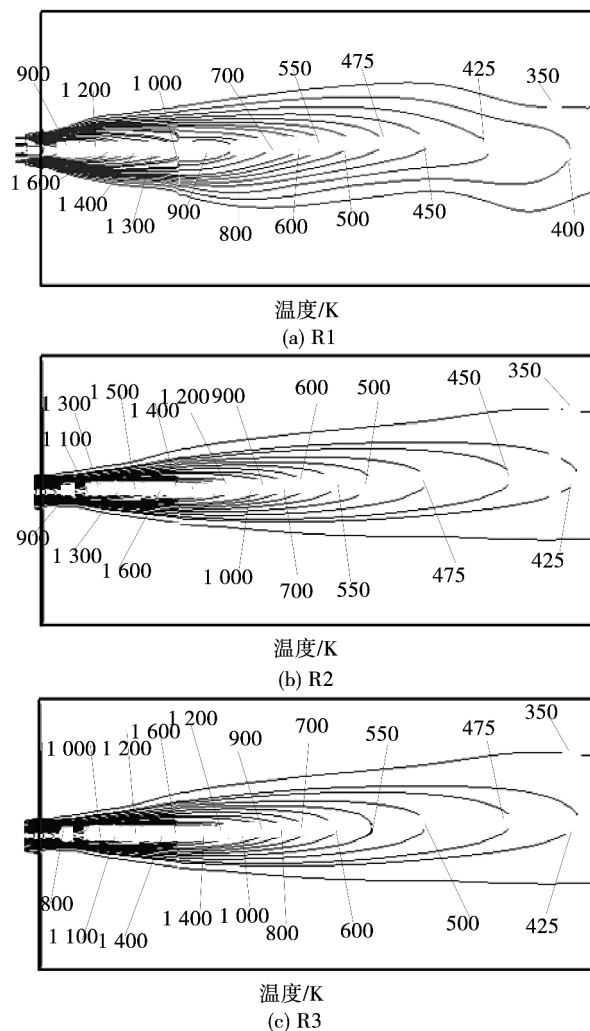


图3 100% 热负荷 3 种燃烧器燃烧区域纵截面的温度分布等势图

Fig.3 The temperature distribution potentiometric map of the combustion area longitudinal section in the three burners under 100% heat load

100% 热负荷时, R1、R2、R3 燃烧器高温区距渐扩出口分别为 0.06 – 0.48 m, 0.14 – 0.6 m, 0.2 – 0.64 m 处。因此 R2 燃烧器高温区域分布最广, 燃烧核心区面积大, 有利于低热值燃气的完全燃烧。

2.2 速度场分布规律

100% – 20% 热负荷下 3 种燃烧器中心轴线上轴向速度变化如图 4 所示。3 个燃烧器中心线上轴向速度呈现先增加后降低趋势, R1 燃烧器速度峰值最小, 到后期射流速度衰减明显加快, 射流的刚性较差。R2 燃烧器的速度峰值略小于 R3 燃烧器, 但 2 种燃烧器的速度减少速率大体相当且都比较慢, 表明 R2 燃烧器直流风的速度虽有降低, 但仍保持了较好的射流刚性。受射流扩散作用的影响, 燃烧核心区的面积在轴向方向上变大, 有利于提高燃烧器火焰的充满度。较强的燃气射流刚性, 有利于保持较高的热强度并促进燃气向燃烧中心富集, 进而能够获得较高的火焰稳定性。因此, R2 和 R3 燃烧器的性能优于 R1 燃烧器。

图 5 为 100% 热负荷下 3 种燃烧器不同轴向截面上轴向速度径向分布曲线。3 个燃烧器在渐扩段出口附近区域均有逆向轴向速度分布, 说明 3 个燃烧器均有中心回流区形成。中心回流区可促使外围的部分高温烟气回流形成高温区, 加快空气和燃气混合和燃烧速度, 有利于对低热值煤层气燃烧稳定性和燃烧效率的改善。由图 5(a) 可知, R1 燃烧器在渐扩段出口处逆向轴向速度梯度较小, 而 R2 和 R3 逆向轴向速度梯度较大, 逆向轴向速度梯度较大的中心回流区更有利于燃料向中心富集。

2.3 浓度场分布规律

图 6 为 100% – 20% 热负荷时, 3 种燃烧器燃烧区域中心轴线上的 CH_4 质量分数分布曲线。 CH_4 的质量分数沿轴向方向上快速降低。在靠近渐扩段出口附近区域, R1 燃烧器因着火提前, CH_4 的质量分数较低, R2 和 R3 相对较高。随着燃烧反应的进行, R1 燃烧器的 CH_4 质量分数降低趋势变缓, 而 R2 和 R3 燃烧器 CH_4 质量分数迅速下降。3 个燃烧器出口处 CH_4 质量分数均处于很低的水平, 负荷变化对燃烧效率的影响不明显。

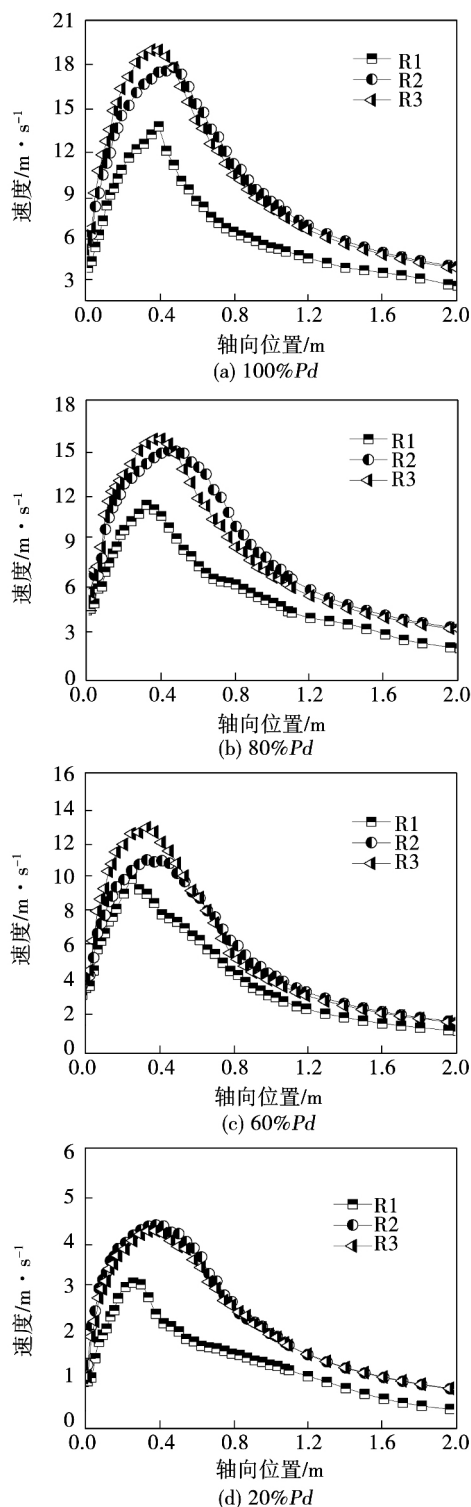


图 4 100% – 20% 热负荷时不同燃烧器的中心轴向速度分布

Fig.4 The velocity distribution of the center of the axial section in the different burners under 100% – 20% heat load

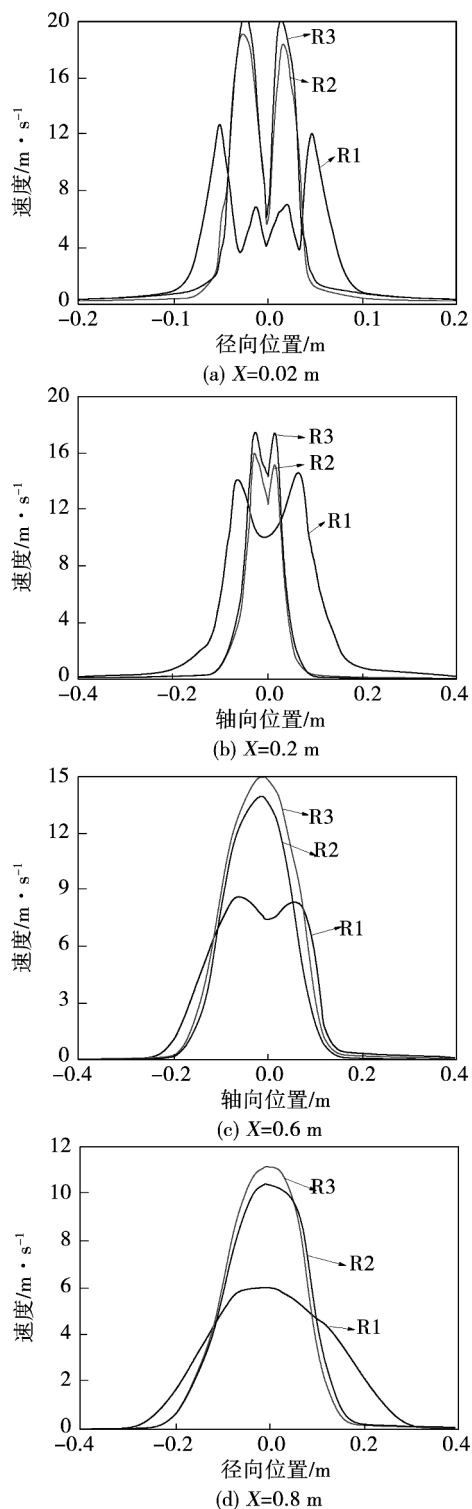


图5 100%热负荷下不同轴向截面速度的径向分布

Fig. 5 The radial speed distribution of the different axial sections under 100% heat load

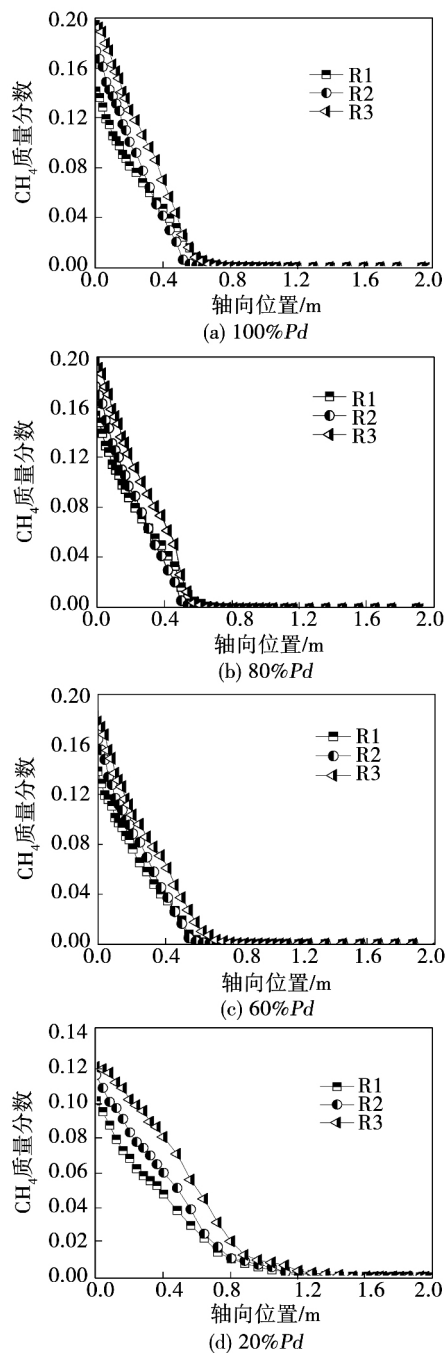


图6 100% - 20%热负荷时,燃烧器中心轴线上的CH₄质量分数分布

Fig. 6 The CH₄ mass fraction distributions of the central axis in the burner under 100% - 20% heat load

3 结 论

(1) 单级旋流配风方式混合效果最好,着火最快,但射流刚性不足,温度衰减最快;内直流外旋流

双级配风方式混合效果较单级直流配风方式好,且温度衰减慢,高温区域分布最广,变负荷适应性好。

(2) 单级旋流配风方式燃烧器速度峰值最小,后期射流速度降低较快,刚性变差。内直流外旋流双级配风方式速度的最大值略小于单级直流配风方式的速度最大值,两种燃烧器速度减小的速率相当。

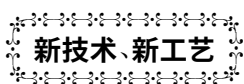
(3) 内直流外旋流双级配风方式燃烧器射流刚性较好,燃料倾向于向燃烧中心富集,不仅能提高燃烧器燃烧的热强度,还能够增强低热值煤层气的燃尽度和燃烧稳定性。

(4) 内直流外旋流双级配风方式燃烧器计算区域出口处的 CH_4 质量分数最小,燃尽程度好,负荷变化对燃烧效率的影响不明显。

参考文献:

- [1] Jing Jianping, Li Zhengqi. Influence of the outer secondary air vane angle on the gas / particle flow characteristics near the double swirl flow burner region [J]. Energy, 2011, 36: 258 – 267.
- [2] Jianping Jing a, Zhengqi Li, Lin Wang, et al. Influence of secondary air mass flow rates on gas/particle flow characteristics near the swirl burner region [J]. Energy 36 (2011) 3599 – 3605.
- [3] 高 娜, 杨浩林, 汪小愁, 等. 低热值 $\text{CH}_4/\text{N}_2/\text{Air}$ 预混气在管状燃烧器中的燃烧特性 [J]. 工程热物理学报, 2012, 33(9): 1643 – 1645.
- GAO Na, YANG Hao-lin, WANG Xiao-han, et al. Combustion characteristics of low calorific premixed gas in tubular flame burner [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(9): 1643 – 1645.
- [4] Yang Haolin, Gao Na. Combustion of Low Calorific Value Gases in Tubular Flame Burner [J], Journal of Combustion Science and Technology, 2013, 19(2): 109 – 114.
- [5] B. Yan, B. Li, E. Baudoin, et al. Structures and stabilization of low calorific value gas turbulent partially premixed flames in a conical burner [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 34(2010): 412 – 419.
- [6] 闫云飞, 张 力, 张代生, 等. 旋流片旋流角度对低热值煤层气燃烧特性的影响 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(9): 1490 – 1494.
- YAN Yun-fei, ZHANG Li, ZHANG Dai-sheng, et al. Influence of swirl angle of swirling slice on combustion characteristics of low heat value coal-bed methane [J]. Journal of China coal society. 2011, 36(9): 1490 – 1494.
- [7] Xiaojia Wang, Baosheng Jin, Wenqi Zhong. Three-dimensional simulation of a coal gas fueled chemical looping combustion process [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 5(2011): 1498 – 1506.
- [8] 杨仲卿, 郭名女, 耿豪杰, 等. 页岩气燃烧器燃烧特性的数值模拟 [J]. 天然气工业, 2013, 33(7): 113 – 117.
- YANG Zhong-qing, GUO Ming-nv, GENG Hao-jie, et al. Numerical simulation of combustion characteristics of shale-gas burner [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(7): 113 – 117.
- [9] WANG Q, CHAO B H. Kinetic and radiative extinctions of spherical burner-stabilized diffusion flames [J]. Combustion and Flame, 2011, 158(8): 1532 – 1541.
- [10] WONGWATCHARAPHON K, TONGTEM P; JUGJAIS. Numerical and experimental study of late mixing porous burner [J]. Journal of the Energy Institute, 2013, 86(1): 15 – 23.
- [11] 岑可发, 姚 强, 骆仲泱, 等. 高等燃烧学 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.
- CHEN Ke-fa, YAO Qiang, LUO Zhong-yang, et al. Higher combustion studies [M]. Hangzhou: Zhejiang University press, 2000.

(姜雪梅 编辑)



DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.05.021

煤和煤泥高温气化的前景

据《Теплоэнергетика》2013 年 2 月刊报道俄罗斯科学院西伯利亚工程技术分院专家研究分析了煤和泥煤高温气化的前景,介绍了焦化煤和泥煤在高温水蒸汽介质内气化试验研究的结果,给出所得到气相的组成成分和碳转化速度的计算结果。

在不大的试验台装置上,在大于 1 073 K 温度下和没有进入空气和氧气的情况下研究了煤和煤泥在水蒸气介质内的气化。

所得到的合成气的特点是具有高含量的 H_2 和 CO ,并且可被用作成各种化学物质的原始产品。

在合成气内,氮和不可燃物质的含量不大,燃烧热达到 11.6 MJ/m^3 ,因此可以把它作为用于动力工程的清洁的燃料。

(吉桂明 摘译)

tion

当量比对掺氢天然气预混燃烧特性的影响 = Influence of the Equivalent Ratio on the Premixed Combustion Characteristics of Natural Gas Mixed and Diluted With Hydrogen 卮,汉 JIA Liang, HE Feng, LI Hui-lin, FAN Xing-guang (College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang, China, Post Code: 550025) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(5) . - 725 - 729

In order to improve the combustion quality of natural gas mixed and diluted with hydrogen in an internal combustion engine and enhance the power and emission performance of a vehicle, by making use of the spheric flame schlieren images obtained from a constant volume combustion bomb high speed schlieren system in combination with the spheric flame propagation theory, analyzed was the law governing the influence of the fuel/air equivalent ratio on the premixed combustion characteristics of natural gas mixed and diluted with hydrogen at various proportions of hydrogen mixed and diluted. It has been found that at a high proportion of hydrogen mixed and diluted, a high equivalent ratio can force the unstretched laminar flow combustion rate to emerge a peak value and can heighten the combustion rate while a high proportion of hydrogen mixed and diluted can make the instability of the flame to be enhanced. A high equivalent ratio can contain the instability of the flame and enhance the stability of the flame and there exists a critical value of the equivalent ratio $\varphi = 1.0$ at which the combustion pressure is biggest and the time duration required for attaining the maximum combustion pressure is shortest. In addition, at a high proportion of hydrogen mixed and diluted, the maximum combustion pressure is comparatively big. **Key words:** natural gas, hydrogen, equivalent ratio, stability, constant volume combustion bomb

燃烧器配风方式对低热值煤层气燃烧影响数值模拟 = Numerical Study of the Influence of the Air Distribution Mode of a Burner on the Combustion of Coalbed Gas With a Low Heating Value 卮,汉 CHEN Yan-rong, LI Hao-jie, YANG Zhong-qing (Education Ministry Key Laboratory on Low Grade Energy Utilization Technologies, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400030) , FAN Hu (Chongqing Youshui Hydropower Development Co. Ltd. , Chongqing, China, Post Code: 409809) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(5) . - 730 - 735

Numerically simulated were various air distribution modes of a low heating value coalbed gas burner with a gas swirl-

ling flow and studied was the influence of three air distribution modes on the temperature field, speed field and concentration distribution characteristics in the combustion zone, namely, single stage swirling air distribution, inner once-through and outer swirling dual stage air distribution and single stage once-through air distribution. It has been found that the single stage swirling air distribution mode can achieve a good mixing result and quick ignition, however, have a quick temperature attenuation and a speed attenuation after the jet flow, thus leading to an insufficient rigidity of the jet flow. The mixing effectiveness of the inner once-through and outer swirling dual stage air distribution mode is better than that of the single stage once-through air distribution mode, having a slow temperature attenuation and a wide-ranging distribution of high temperature zones. Both have a relatively slow speed attenuation of the jet flow and no conspicuous difference. For a gas swirling burner additionally installed with guide blades inside the gas pipe, when two air annular chambers are adopted and the air distribution mode is the inner once-through and outer swirling dual stage one, both air and gas mixing effectiveness can be enhanced and a very good jet flow rigidity can be kept, more suitable for the combustion of low heating value coal bed gases. **Key words:** low heating value coalbed gas, burner, air distribution mode, combustion characteristics, numerical simulation

摆动循环流化床装置颗粒相分析 = Analysis of the Particle Phase Inside a Rolling Circulating Fluidized Bed Device 刊, 汉 CHEN Jie, ZHAO Tong, LIU Kai (College of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, China, Post Code: 710048) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(5) . - 736 - 741

As the exhaust gas treatment devices for marine engines, the circulating fluidized beds enjoy a comparatively high exhaust gas absorption capacity and heat recovery efficiency. According to the test model and by conducting a numerical simulation and a contrast with the test results by using the software CFD, the particle phase concentration distribution and particle circulating flow rate when the rising portion of the circulating fluidized bed is rolling with the vessel and in the vertical state were compared and analyzed. The authors have arrived at the following conclusion that compared with a circulating fluidized bed in the vertical state, the rolling can lead to a relatively serious particle phase deposition on the rising portion of the bed, such deposition mainly emerges at the bottom of the bed and at places close to the wall surfaces and the concentration distribution will change regularly with the rolling function. In the rolling state, any change in the rolling angle is regarded as the main cause for changes in the particle phase concentration distribution while changes in the rolling periods exercise no big influence on the particle phase