

环形逆向射流流场结构特性的模拟研究

罗 伟^{1,2,3}

(1. 煤科院节能技术有限公司,北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013;
3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室,北京 100013)

摘要:逆向射流是火焰稳定的重要技术手段,为探究环形逆向射流结构对煤粉逆喷式旋流燃烧器稳燃特性的影响,构建了不同尺寸圆形与环形射流管的逆向射流模型,以 Fluent 软件为计算平台,采用“可实现”的 $k-\varepsilon$ 模型对流场结构进行模拟研究。通过计算不同流速比下各射流管的无量纲贯入深度变化,发现环形射流的贯入深度大于圆形射流,且随内径的增大而增大,其射流在环境流中的渗透能力增强,这有利于增加煤粉的逆向传播距离,增加停留时间,提高燃烧稳定性。与圆形射流不同,环形射流的贯入深度与流速比并不是单调的线性关系,在流速比 7.5~12.5 存在一个平缓的过渡段,表明在一定区间内,流速比的减少不会引起贯入深度的明显减小,对现有燃烧器的设计具有指导意义。通过计算不同流速比下各射流管的最大零流速半宽,发现环形射流在逆流中的最大零流速半宽大于圆形射流,并随射流管内径增大而增大,表明环形逆向射流在径向上的扩展宽度更大,卷吸能力更强。环形逆向射流的最大零流速半宽随流速比呈线性增大,斜率随内径增大而增加,高流速比的环形逆向射流径向扩展能力强于低流速比的环形逆向射流。根据计算结果绘制分界流线,发现在较低速度比时,射流的分界流线与圆形射流相似;在较高速度比时,虽然射流的轴线速度在滞点减少为零,但轴线附近的一定区域,流体依然向下游传播渗透,经过一段距离后速度才降至零并转向,分界流线也变得不规则。环境逆流在轴向上对环形射流有一定程度的压缩和阻碍作用,使得射流在径向上的扩展宽度增大,增强了射流的卷吸能力,有助于促进燃烧器内煤粉与助燃风的混合。通过研究不同射流管逆向射流轴线上轴向流速的沿程变化,发现环形射流轴线上的流速衰减较圆形射流更为平缓,表明其与环境流的掺混不如圆形射流强烈。随着内径不断减小,环形射流轴向速度峰值增大且位置提前,衰减速度增强,逐渐接近圆形射流中轴线上的衰减情况。

关键词:逆向射流;环形;流场结构;稳燃;数值模拟

中图分类号:TK16 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2019)05-0080-06

Numerical simulation study on the structural characteristics of annular counterflow jets flow field

LUO Wei^{1,2,3}

(1. China Coal Research Institute Company of Energy Conservation, Beijing 100013, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China;

3. National Energy Technology & Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

Abstract: The counterflow jet is an important technical means for flame stability. In order to explore the effect of counterflow jet on steady burning of the reversed injection burner of coal particle combustor, the flow field structure of different annular and round jets into a counterflow were computationally investigated using the Realizable $k-\varepsilon$ Model in Fluent platform. By computing the penetration length in variational velocity ratios of each jets, the results show that the penetration length of annular jet is larger than that of round jet, and it increases when the annular grows, The permeability of annular jet in ambient flow increases which is conducive to increase the backward propagation distance of pulverized coal and residence time and improve combustion stability. Unlike round jet, the penetration length of annular jet does

收稿日期:2018-12-11;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18121103

基金项目:天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项资助项目(2018-TD-MS007)

作者简介:罗 伟(1982—),男,湖北武汉人,副研究员,从事煤粉工业锅炉研究工作。E-mail:luoxiwei2008@163.com

引用格式:罗伟.环形逆向射流流场结构特性的模拟研究[J].洁净煤技术,2019,25(5):80-85.

LUO Wei. Numerical simulation study on the structural characteristics of annular counterflow jets flow field [J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(5): 80-85.



移动阅读

not have a monotonic linear relationship with velocity ratio. There exists a smooth transition when velocity ratio between 7.5–12.5, which indicates that the decrease of velocity ratio does not cause significant decrease of penetration length within a certain interval and has guiding significance for the design of existing burners. By calculating the maximum zero velocity half-width of each jet tube at different velocity ratios, it is found that the half width of zero velocity of annular jet is wider than that of round jet, and increases with the increase of the inner diameter, which indicates larger radial expansion width and stronger suction capacity. The half width of zero velocity of annular jet increases linearly with the velocity ratio, and the slope increases with the increase of the inner diameter. The radial expansion capacity of annular jets in counterflow with high velocity ratio is stronger than that of annular reverse efflux with low velocity ratio. By plotting streamline according to the calculation result, it is found that the streamline of annular jet is similar with round jet at lower velocity ratio. At higher velocity ratio, although the axis velocity decreases to zero at the stagnation point, the fluid still propagates downstream in a certain area near the axis, and it takes some distance before the velocity drops to zero and return, the dividing streamline also becomes irregular. The circumferential flow has a certain degree of compression and obstruction effect on the annular jet in the axial direction, so that the radial expansion width of the jet increases and the suction capacity of the jet increases, which is helpful to promote the mixing of pulverized coal and combustion air in the burner. By studying the change of axial velocity along the reverse jet axis of different jet tubes, it is found that the velocity attenuation on the annular jet axis is more gentle than that on the circular jet axis, which indicates that the mixing with the environmental flow is not as strong as that of the round jet. As the inner diameter decreases, the peak value of the axial velocity of the annular jet increases and its position advances, and the attenuation velocity increases, which gradually approaches the attenuation on the central axis of the circular jet

Key words: jet into counterflow; annular jet; flow field structure; steady burning; numerical studies

0 引言

逆向射流火焰是高速气流火焰稳定的主要技术手段,常用于解决航空发动机加力燃烧器中高速气流火焰稳定、低阶煤及水煤浆稳燃等问题。20世纪50年代中期首次提出逆向射流具有稳定火焰和污染低等优点^[1-3]。国外学者最初在航空领域开展加力燃烧室中稳定火焰的研究^[4-5],但射流气源需由发动机前段压气机提供,导致推重比减小,后续相关研究减少。中国科学院工程热物理研究所开发的多环形逆向分布射流稳燃技术实现了水煤浆和贫煤在冷风条件下的稳定燃烧^[6-7]。近年来,逆向射流稳定火焰拓展到煤粉燃烧领域,煤科院节能技术有限公司开发的逆喷式旋流燃烧器一次风采用环形逆向射流结构,有效解决了煤粉的点火和稳燃问题,以此燃烧器为核心的煤粉工业锅炉已成功在全国范围内推广^[8-10]。

射流出口动量方向与环境主流方向相反的射流称为逆向射流^[11]。由于逆向流动的气流使得射流流动的非稳定性增加,能够增强逆向射流的掺混和稀释能力,所以逆向射流具备稳定高速气流火焰功能。众多学者主要研究贯入深度、分界面边界及轴向速度分布对火焰稳定燃烧的影响。贯入深度是检测逆向射流混合特性的重要指标,已有众多学者就圆形出口的逆向空气射流的贯入深度进行深入研究。Arendit等^[12]运用量纲分析法发现贯入深度与流速比成正比($L_p/\alpha = kR$, L_p 为贯入深度, α 为射流

管水力直径, R 为射流速度 U_j 与环境流速 U_0 的比值,即速度比, k 为比例系数); Beltaos等^[13]根据试验数据求得贯入深度与流速比的关系为 $L_p/\alpha = 2.7R$; König等^[14]运用可视化方法,测得比例系数为2.8; Li等^[15]定义流场中轴向流速为0的点的连线为分界流线,分界流线的半宽称为零流速半宽 b_0 。对于圆形喷嘴,其逆向射流的零流速半宽 b_0 沿轴向逐渐增大,达到最大半宽 b_{0max} 后逐渐减小,整体边界成“灯泡体”形状。轴向速度变化能反映逆向射流与环境流渗透的强烈程度,研究发现逆向射流轴线上速度衰减快于静止空气中的自由射流,且衰减速度随流速比的减小而增大。Yoda等^[16]认为轴线速度与轴向距离成反比,即 $u/U_j = 5.8\alpha/x$ (u 为轴线上的轴向速度, x 为到射流管出口的轴向距离),而 Beltaos等^[13]采用附加流速进行分析,并将贯入深度考虑在内,得到

$$\frac{U_0+u}{U_j} \frac{L_p}{\alpha} = 5.0 \frac{x}{L_p} \quad (1)$$

式(1)与 Lam等^[17]试验数据在 $x < 0.5L_p$ 范围内吻合较好。

众多学者针对逆向射流开展了大量研究,但主要集中在航天发动机领域,鲜见煤粉燃烧领域的相关研究。因此,本文从贯入深度、分界面边界及轴向速度分布3方面入手探究环形逆向射流的流场结构对火焰稳定性的影响,对煤粉逆喷式旋流燃烧器的设计提供依据。

1 数值模拟

1.1 模型建立

逆向射流的流场结构如图1所示。外径为 D 的射流管水平放置于流场左侧中心位置,射流方向自左向右流动,环境来流自右向左流动。计算流场区域为圆柱体结构,轴向计算范围 $80D$,径向计算范围 $40D$,以减少流场边界对射流的影响。射流管管出口深入到流场区域的长度为 $15D$,目的是减小射流管对出口边界的影响。设置5种不同尺寸的射流管(分别命名为 Ja、Jb、Jc、Jd、Je)进行计算,其中 Ja 的流通截面为圆形,其他均为环形。为达到流量与流速相同,在保持截面积不变情况下依次增大内外径尺寸,具体尺寸与编号见表1。

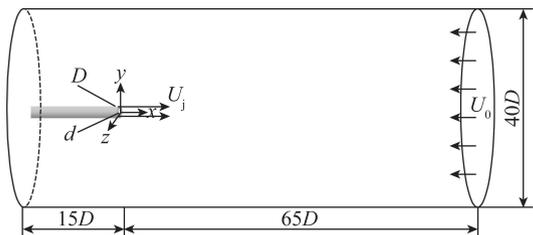


图1 环形逆向射流模型示意

Fig. 1 Schematic of annular counterflow jet model

表1 射流管尺寸及编号

Table 1 Size and serial number of the jet pipes

射流管尺寸/mm	Ja	Jb	Jc	Jd	Je
内径 d	—	20	40	60	80
外径 D	66.45	69.40	77.56	89.53	104.00
水力直径 α	66.45	49.40	37.56	29.53	24.00

射流及环境流进口处均采用速度进口边界,其中射流速度保持定值,通过给定不同的环境流进口速度改变射流-环境流速度比。流场四周边界及射流管壁均采用零应力无滑移壁面条件,流场出口处采用第二类边界条件(各变量梯度为0)。通过设置湍流强度和水力直径给出湍流流动情况,不同工况的湍流强度均取10%,各入口的水力直径计算得到,每个射流管的数值均有差异。

1.2 计算方法

本文以 Fluent 软件作为计算平台,采用有限体积法(finite volume method, FVM)离散控制方程,压力速度耦合采用 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation)算法,求解对流扩散方程采用二阶迎风格式。湍流模型采用“可实现”(Realizable)的 $k-\varepsilon$ 模型对逆向射流的流动过程进行数值模拟。 $k-\varepsilon$ 模型包括标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型和“可实现”的 $k-\varepsilon$ 模型^[18-19]。其中,“可实现”的

$k-\varepsilon$ 模型中耗散率 ε 方程由旋涡脉动的均方差导出,能够满足数学模型对正应力的要求,从而表达出湍流的物理特性,可精确预测圆柱射流的传播,并对含有旋转、分离、回流等现象的流动有更好的预测结果^[20-22]。

2 结果与分析

2.1 贯入深度

逆向射流中,射流以初始速度 U_j 自射流管射出后,与环境流产生强烈相互作用,将周围环境中的流体卷吸到射流中,使射流的流量沿程增大,流速沿程减小直至为0。轴线上流速为0的点称为滞点,滞点与射流管出口的水平距离称为贯入深度 L_p ^[8]。

采用本文数值模拟方法得到的圆形喷嘴射流(喷嘴 Ja)贯入深度 L_p 随流速比 R 的变化如图2所示。与 Bernero 等^[13]和 König 等^[14]得到的试验结果对比回归分析后得到贯入深度与流速成正比关系 $L_p/\alpha = 2.66R$,模拟得到的贯入深度与流速比例系数与 Bernero 和 König 等得到的试验数据相差很小,表明本文计算模型能准确反映逆喷射流的流动特性。

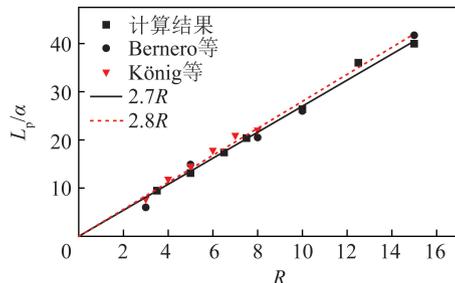


图2 圆形逆向射流贯入深度与流速比的关系

Fig.2 Relation between penetration length and velocity ratios of circular reverse jet

不同射流管尺寸条件下,贯入深度 L_p 随流速比 R 的变化如图3所示。由图3可知,相同流速比条件下,环形射流管产生的无量纲贯入深度大于圆形射流管,且随着管内径的增大贯入深度显著增加,其射流在环境流中的渗透能力增强。较长的贯入深度有利于增加煤粉的逆向传播距离,增加停留时间,提高燃烧稳定性。环形射流的贯入深度同样随着流速比的增加而增大。与圆形射流不同,环形射流的贯入深度与流速比并不是单调的线性关系: $R < 7.5$ 、 $R > 14$ 时成线性,且斜率值随环内径的增大而增大;流速比由 7.5 增加到 14 时,各环形射流贯入深度的增长有一段比较平缓,且位置随内径的增大而提前。

计算不同射流管贯入深度随 R 变化的线性相关系数,得到 Ja 到 Je 的系数值分别为 0.998、0.985、0.979、0.958、0.953。发现随着环形喷嘴直径的增

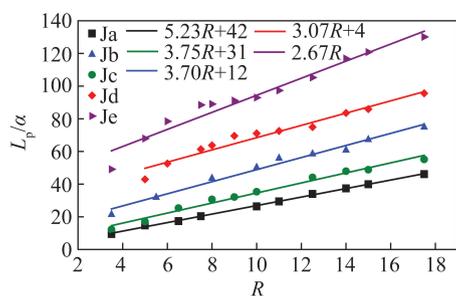


图 3 不同射流管逆向射流的贯入深度与流速比的关系

Fig.3 Relationship between penetration length and velocity ratios of different jets

加,在一定区间内,流速比的减少不会引起贯入深度的明显减小,对现有燃烧器的设计具有指导意义。

2.2 分界流线

在实际工程应用中,射流的边界是重要参数,其大小直接影响射流与环境流体的掺混强度。由于流动方向相反,射流与环境来流之间有一定的速度梯度,导致射流与周围环境流体之间发生强烈卷吸掺混,且射流断面沿程扩展。

不同射流管逆向射流最大零流速半宽与流速比的关系如图 4 所示。发现相同流速比工况下,环形射流在逆流中的最大零流速半宽大于圆形射流,且随环内径的增大而增大。表明环形逆向射流的径向扩展能力强于圆形逆向射流,掺混面积更大。相同射流管的最大零流速半宽随速度比的增大线性增加,且斜率随内径增加而增大。说明高流速比的逆向射流的径向扩展能力要强于低流速比的逆向射流。回归分析得到,随着内径增大,最大半宽与速度的关系由 $b_{0max}/\alpha=0.42R$ (射流管 Ja) 逐步变为 $b_{0max}/\alpha=1.36R$ (射流管 Je)。

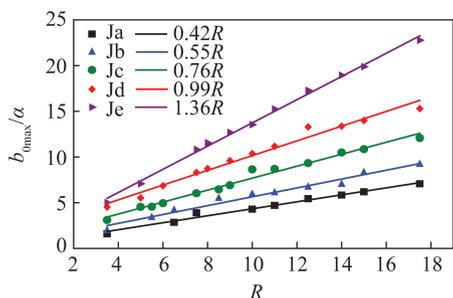


图 4 不同射流管逆向射流最大零流速半宽与流速比的关系

Fig. 4 Relationship between maximum zero velocity half width and velocity ratio of counterflow jets with different jet tubes

不同流速比工况下射流管 Je 的流场与分界流线如图 5 所示。可知,在较低速度比时,射流的分界流线与圆形射流相似:流体由射流管射出后向下游传播,于滞点处流速减小至 0,然后在环境逆流的带动下发生转向,反向流速又逐渐增大,最后等于环

境逆流的流速,整体形状比较圆滑。然而在较高速度比时,虽然射流的轴线速度在滞点减少为 0,但轴线附近的一定区域,流体依然在向下游传播渗透,经过一段距离后速度才降至 0 并转向,分界流线也变得不规则。 $R=7.5\sim 10$ 时,流场处于 2 种射流形态的过渡阶段,这也解释了图 3 中部分区域贯入深度随流速比的非线性变化。

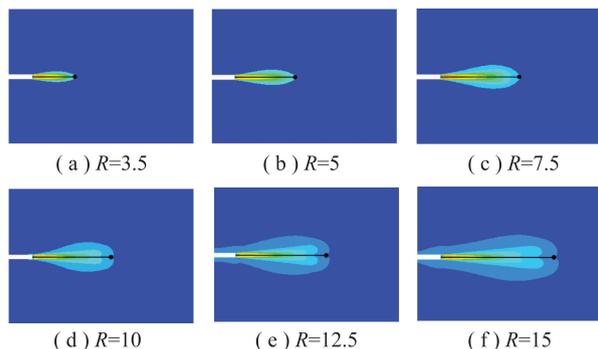


图 5 环形逆向射流分界流线随流速比的变化(射流管 Je)

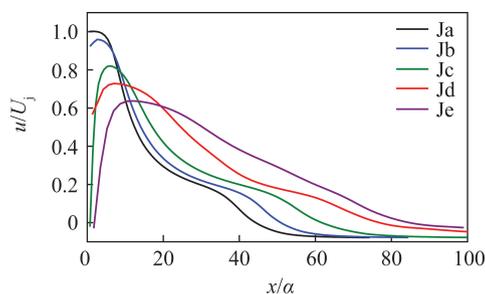
Fig.5 Change of boundary line of annular counterflow jet with different velocity ratios(jet Je)

环境逆流在轴向上对环形射流有一定程度的压缩和阻碍作用,使得射流在径向上的扩展宽度增大,增强了射流的卷吸能力,这有助于促进燃烧器内煤粉与助燃风的混合。

2.3 轴向速度

逆向射流自出口处,卷吸周围环境气体,与环境逆向来流发生强烈的掺混与能量交换,其宽度沿程逐渐增大,而射流轴线上的流速沿程减小。

把计算得到的不同射流管轴向速度 u 用射流出口速度 U_j 无量纲化,并绘制其沿程 (x/α) 变化情况,如图 6 所示。

图 6 不同射流管逆向射流轴线上轴向流速沿程 (x/α) 变化 ($R=12.5$)Fig.6 Centerline velocity decay (x/α) of different annular jets ($R=12.5$)

与圆形逆向射流不同,环形逆向射流轴线上的初始轴向速度为 0,经过一段距离发展到峰值,峰值低于射流管的出口速度。在峰值前,射流主要受到初始速度的影响,与环境流体的掺混较弱。速度到

达峰值后,轴向速度受环境流的影响迅速衰减,直至减少为0并反向。这是由于环境逆流压缩了射流的轴向发展空间,使其在径向拓展较快,从而使轴线上的流速衰减较快。环形射流轴线上的流速衰减与圆形射流相比更为缓慢,表明其与环境流的掺混不如圆形射流强烈。随着内径不断减小,环形射流轴向速度峰值增大且位置提前,衰减速度增强,逐渐接近圆形射流中轴线上的衰减情况。

不同流速比时喷嘴 Je 的无量纲径向轴向速度的沿程(x/α)变化如图7所示。发现环形逆向射流轴线上的轴向流速的衰减速度随着流速比的减小而增大。表明环形逆向射流中,环境逆流强度越大,射流与环境流的掺混程度越弱。

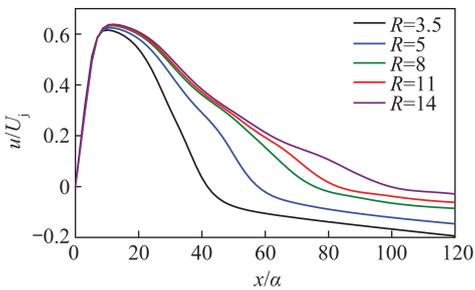


图7 不同流速比环形逆向射流轴线上轴向流速沿程(x/α)变化(射流管 Je)

Fig.7 Centerline velocity decay(x/α) of different velocity ratios(jet Je)

3 结 论

1) 环形逆向射流的贯入深度大于圆形逆向射流,且其随着内径增大而增大,射流渗透能力增强。随着流速比增大,环形逆向射流的贯入深度增大;环形逆向射流的贯入深度与流速比不再是单调的线性关系,在流速比7.5~12.5存在一个平缓的过渡段。

2) 环形逆向射流的最大零流速半宽大于圆形逆向射流,并随射流管内径增大而增大,表明环形逆向射流在径向的扩展宽度更大,卷吸能力更强。环形逆向射流的最大零流速半宽随流速比呈线性增大,斜率随内径增大而增加,高流速比的环形逆向射流径向扩展能力强于低流速比的环形逆向射流。

3) 环形逆向射流轴线上的轴向速度衰减小于圆形逆向射流,并随内径的增大而减小,表明轴向上的掺混能力弱于圆形逆向射流。环形逆向射流衰减速度随射流比的增大而减小。

4) 环形分布的逆向射流能够增大一次风的折返距离,从而增加煤粉在燃烧器内的停留时间;增大射流与助燃风的掺混面积,对周围流体的卷吸作用更强烈,有助于煤粉的稳定燃烧。

参考文献(References):

- [1] SCHAFFER A, CAMEL A B. Theeffect of an opposing jet on flame stability[J]. *Jet Propulsion*, 1955, 25(6):284-287.
- [2] MCDANNEL M D, PETERSON P R, SAMUELSEN G S. Species concentration and temperature measurements in a lean, premixed flow stabilized by a reverse jet[J]. *Combustion Science and Technology*, 1982, 28(5):211-224.
- [3] GOPALAKRISHNAN P, BOBBA M K, SEITZMAN J M. Controlling mechanisms for low NO_x emissions in a non-premixed stagnation point reverse flow combustor[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2):3401-3408.
- [4] AGOSTON G A, NOON A W, WITHERLY T D. Experimentalstudy of a reversed jet flameholder[J]. *Combustion and Flame*, 1958, 2(4):333-347.
- [5] EL-MAHALLAWY F M, MAHDI ALI E, EL-ASFOURI A S, et al. Combustion and heat transfer characteristics in boilers with asymmetrical reversed flow flame tube[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2003, 27(4):417-430.
- [6] 赵惠富,张培元,王一贞,等. 多环形逆向分布射流稳定和强化煤粉及水煤浆燃烧[J]. *工程热物理学报*, 1988, 9(3):282-284.
ZHAO Huifu, ZHANG Peiyuan, WANG Yizhen. Combustion stabilization and intensification of low rank pulverized coal and coal water slurry by utilizing multi-annular opposing distributing jets[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 1988, 9(3):282-284.
- [7] 李劲,赵惠富. 逆向射流火焰稳定特性的实验研究[J]. *燃烧科学与技术*, 1996(1):58-64.
LI Jin, ZHAO Huifu. An experiment study of opposed jet flame stabilization[J]. *Combustion Science and Technology*, 1996(1):58-64.
- [8] 尚庆雨. 我国煤粉工业锅炉技术现状及发展趋势[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(1):201-206.
SHANG Qingyu. Current status and development trend of pulverized coal industrial boiler in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(1):201-206.
- [9] 何海军,纪任山,王乃继. 高效煤粉工业锅炉系统的研发与应用[J]. *煤炭科学技术*, 2009, 37(11):1-4.
HE Haijun, JI Renshan, WANG Naiji. Development and application of high efficient pulverized coal fired industrial boiler system[J]. *Coal Science and Technology*, 2009, 37(11):1-4.
- [10] 姜思源,王永英,周建明,等. 中等挥发分烟煤回燃逆喷式燃烧数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(6):1147-1153.
JIANG Siyuan, WANG Yongying, ZHOU Jianming, et al. Numerical simulation on middle volatile coal combustion in reversed injection burner[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(6):1147-1153.
- [11] 董志勇. 射流力学[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [12] ARENDT J, BABCOCK H, SCHUSTER J. Penetration of a jet into counterflow[J]. *Journal of Hydraulic Division Proceeding of ASCE*, 1956, 82:1038-1041.
- [13] BELTAOS S, RAJARATNAM N. Circular turbulent jet in an opposing infinite stream[C]//*Proceedings of the 1st Canadian Hy-*

- draulics Conference. Edmonton, Canada; Alberta University Water Resources Center Publication, 1973; 220-237.
- [14] KÖNIG O, FIEDLER H E. The structure of round turbulent jets in counterflow; A flow visualization study[J]. Advances in Turbulence, 1991; 61-66.
- [15] LI Z W, HUAI W X, YANG Z H. Interaction between wall jet and offset with different velocity and offset ratio[J]. Procedia Engineering, 2012, 28; 49-54.
- [16] YODA M, FIEDLER H. The round jet in a uniform counter flow; Flow visualization and mean concentration measurements[J]. Experiments in Fluids, 1996, 21(6); 427-436.
- [17] LAM K M, CHAN H C. Investigation of turbulent jets issuing into a counter-flowing stream using digital image processing[J]. Experiments in Fluids, 1995, 18(3); 210-212.
- [18] ORSZAG S A, STAROSSELSKY I, FLANNERY W S, et al. Introduction to renormalization group modeling and turbulence simulations [J]. Simulation and Modeling of Turbulent Flows, 1996; 155-184.
- [19] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al. A new $k-\varepsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows[J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3); 227-238.
- [20] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001.
- [21] SPEZIALE C G. On nonlinear $k-l$ and $k-\varepsilon$ models of turbulence [J]. Fluid Mech, 1987, 178; 450-475.
- [22] LESCHZINER M A, RODI W. Computation of strongly swirling axisymmetric free jets [J]. AIAA Journal, 1984, 22(12); 1742-1749.