

# 直流燃烧器参数对氧煤燃烧特性的影响

刘若晨, 安恩科

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 以  $\Phi 200\text{ mm} \times 2\text{ m}$  的火焰炉为对象, 借助软件 FLUENT 研究了在  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  气氛下燃烧器射流动量比和射流间距的改变对炉内流场特性和燃烧特性的影响。结果表明: 当射流动量比由 28 增至 66 时, 烟气内循环率峰值呈现先增大后减小的趋势, 混合区烟气内循环率的整体水平是在射流动量比为 48 时最大; 随着射流间距的增大,  $\text{O}_{xx}$  轴面回流区向下游偏移, 且氧气质量分数高于 10% 的区域逐渐缩小, 燃烧峰值有所降低, 当射流间距增至 75 mm 时,  $\text{O}_{xx}$  轴面回流区的范围明显缩小, 反应区氧气体积分数回升, 使得燃烧峰值升高。同轴射流方式下的燃烧峰值最高, 约 2 200 K, 仅当射流间距为 60 mm 工况下的炉膛燃烧最大温升小于煤粉的着火温度 (790 K), 即可实现氧煤 MILD (moderate or intensive low oxygen dilution, 温和) 燃烧。

**关键词:** 氧煤燃烧; MILD 燃烧; 大速差同向射流; 烟气内循环; 气相预热混合区

**中图分类号:** TK224

**文献标志码:** A

## Effect of Parameters of Direct-Flow Burner on Combustion Characteristics of Oxy-Coal

LIU Ruochen, AN Enke

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The software FLUENT was applied on a  $\Phi 200\text{ mm} \times 2\text{ m}$  furnace to study the influence of jet momentum ratio and jet spacing on the flow field and combustion characteristics at  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  atmosphere. The results show that when the jet momentum ratio varies from 28 to 66, the peak of flue gas inner recirculation rate increases and then decreases, and the overall level of inner recirculation rate in the mixing zone is the largest when the jet momentum ratio is 48. When the jet spacing gradually increases, the recirculation zone on  $x$ - $z$  plane shifts downstream. Besides, the region where the concentration of oxygen volume is higher than 10% narrows, the temperature peak decreases slightly.

However, the jet spacing must maintain a proper value. When the jet spacing is 75 mm, the recirculation zone on the  $x$ - $z$  plane narrows significantly, and the oxygen concentration in the reaction zone rises again, and, as a result, the temperature peak increases. The temperature peak is the highest (about 2 200 K) under coaxial jet condition, the max temperature increase is lower than the ignition temperature (790 K) only when the jet spacing is 60 mm, indicating that the oxy-MILD combustion state can be established.

**Key words:** oxy-coal combustion; MILD (moderate or intensive low oxygen dilution) combustion; great difference of jet velocity; inner recirculation rate; mixing and preheating zone

面对能源的巨量消耗以及  $\text{CO}_2$  温室效应所造成环境灾害, 提高能源利用率、减少污染物  $\text{NO}_x$  排放、电站锅炉  $\text{CO}_2$  捕捉和封存技术 (CCS) 成为目前热能领域的三大研究热点。氧燃烧技术是最具明显潜力的 CCS 技术, 而 MILD (moderate or intensive low oxygen dilution, 温和) 燃烧是一种正在快速发展的可实现高效燃烧和低污染物排放的方式。

实现 MILD 燃烧的方式主要有三种: 高温空气燃烧、常温空气旋流燃烧和 MILD 氧燃。MILD 氧燃即结合氧燃烧技术和 MILD 燃烧技术, 通过纯氧高速射流卷吸, 带动大量的燃料分子扩散到炉膛大空间中与氧分子相遇发生燃烧, 使得火焰特性发生了根本性的变化。M Weidmann 等<sup>[1]</sup> 基于德国斯图加特大学的 500 kW 试验台研究煤粉 MILD 燃烧的化学反应和流动特性, 通过 OH 基团浓度的化学荧光图像, 指出在 MILD 燃烧模式下, 烟气内循环倍率增大, 化学反应速率减小, 整体呈现一种容积式燃烧。国际火焰基金组织在 0.58 MW 的中试试验炉 (6.25

收稿日期: 2015-10-19

基金项目: 上海市科委资助项目 (13DZ2260900)

第一作者: 刘若晨 (1989—), 女, 博士生, 主要研究方向为氧煤 MILD 燃烧技术。E-mail: 2013lrchen@tongji.edu.cn

通讯作者: 安恩科 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为锅炉燃烧污染物控制及热力设备系统优化。

E-mail: axa@tongji.edu.cn

m×2 m×2 m)上完成了煤粉 MILD 燃烧试验, N. Schaffel 等<sup>[2]</sup>根据该试验工况,建立了合理的数值模型,发现在 MILD 燃烧模式下,温度分布和组分分布都趋于均匀化,相比传统煤粉燃烧,燃料型 NO 减少,且存在更强的 NO 再燃机理. MI Jianchun 等<sup>[3]</sup>研究了空气初始射流动量、空气和燃料预混程度对 MILD 燃烧的影响,发现存在一个临界空气初始射流动量,当初始射流动量小于该临界值,则不会发生 MILD 燃烧,而当初始射流动量大于该临界值,反应物的预混程度和初始射流动量对 MILD 燃烧的稳定性及污染物排放几乎不产生任何大的影响. 同时,以国际火焰基金组织的 0.58 MW 火焰炉为对象,通过数值模拟研究了反应物射流速度对煤粉 MILD 燃烧的影响<sup>[4]</sup>,发现氧化剂射流速度对火焰温度和 NO 排放的影响大于携带煤粉射流速度,当氧化剂射流速度从  $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  增加至  $67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,火焰峰值温度可降低 180 K,每立方米干烟气 NO 减少  $2 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ . S Verissimo 等<sup>[5]</sup>基于 10 kW 的试验规模燃烧器验证了空气入射速度在 MILD 燃烧形成过程中的重要性,发现随着空气入射速度的增加,OH 基团的密集程度降低,即火焰不明亮, Krishnamurthy 等<sup>[6]</sup>发现即使采用纯氧作为氧化剂, MILD 燃烧的实现仍然需满足高烟气内循环率的条件. 涂珪杰<sup>[7-8]</sup>在 0.3 MW 试验台上实现了煤粉在空气和  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  气氛下的 MILD 燃烧,发现二次风仅预热至 373 K 时,提高其射流速度可使煤粉稳定地 MILD 燃烧,炉膛整体氧浓度维持在较低的水平,燃烧峰值降低,均匀性提高.

本文借鉴国际火焰基金组织的 0.58 MW 火焰炉的燃烧器形式,基于大速差同向射流原理,试图在  $\Phi 200 \text{ mm} \times 2 \text{ m}$  火焰炉上实现氧煤 MILD 燃烧模式,并针对一二次风不同射流动量比和射流间距下的流场特性和燃烧特性进行分析和对比,为之后的进一步试验验证提供理论依据.

## 1 数值模拟

### 1.1 物理模型

本文研究对象是上海锅炉厂用以测试煤粉燃尽率和结渣特性的火焰炉,其结构尺寸如图 1 所示,炉

膛横截面直径为 200 mm,炉长 2 m,一次风入口为低速  $\text{CO}_2$  携带煤粉射流,二次风入口为高速纯氧射流,由中心喷入. 由于燃烧室结构具有很好的对称性,可以取模型四分之一进行模拟,以便节省计算时间. 在对模型进行网格划分中,由于喷口截面处参数变化率较大,需要加密划分,如图 2 所示.

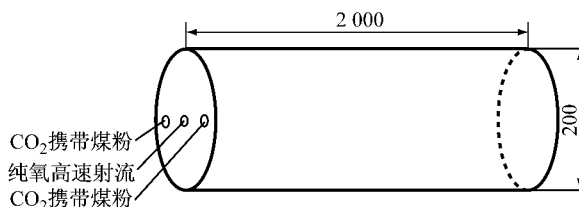


图 1 燃烧室结构简图 (单位:mm)

Fig.1 Schematic of combustion furnace (unit:mm)

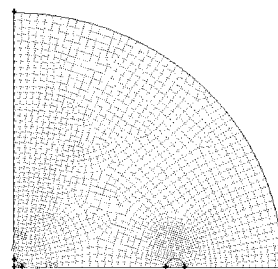


图 2 入口截面处的网格划分

Fig.2 Mesh on inlet surface

### 1.2 计算工况

本文主要通过改变燃烧器一二次风的射流间距 ( $L=30 \sim 75 \text{ mm}$ ) 和射流动量比 ( $r=28 \sim 66$ ), 分析煤粉在不同工况下的流场特性和燃烧特性. 当一二次风不存在所谓的间距时, 即为同轴射流. 各工况下的一次风射流速度为  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 一二次风预热温度均为 573 K, 给煤量为  $30 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ , 过氧系数为 1.2, 煤粉和  $\text{CO}_2$  的质量流率比为 0.35. 煤质分析如表 1 所示, 图 3 为同向射流和同轴射流两种燃烧器示意图.

### 1.3 计算方法

本文数值模拟中主要模型设置<sup>[8]</sup>为: 湍流模型选用带旋流修正的  $k-\epsilon$  模型, 湍流-化学反应机制模型选用涡耗散 (eddy-dissipation) 模型, 选用离散坐标辐射模型 (discrete ordinate, DO) 求解辐射方程, 挥发分析出选用双平行竞争速率模型, 焦炭燃烧选

表 1 大同煤质分析表

Tab.1 Proximate and ultimate analysis of tested coal samples

工业分析(质量分数, 空气干燥基)/%				低位发热量/	元素分析(质量分数, 干燥无灰基)/%				
水分	灰分	固定碳	挥发分	(MJ · kg <sup>-1</sup> )	C	H	O	N	S
3.27	13.74	57.26	25.73	26.59	68.68	4.21	7.41	0.68	2.01

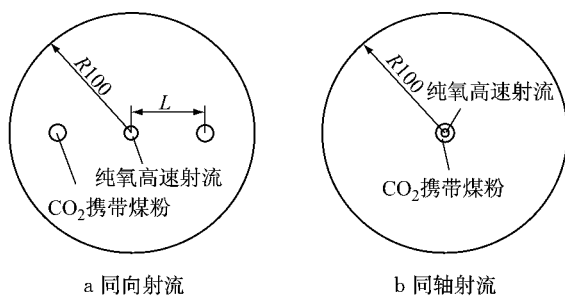
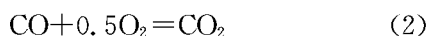
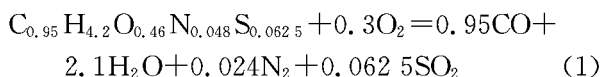


图3 燃烧器截面示意图

Fig.3 Burner configurations

用内部控制反应速率(Intrinsic)模型.此外,煤粉颗粒粒径按 Rosin-Rammler 函数分布,颗粒运动采用随机轨道模型,煤粉和二次风进口为速度进口,炉膛出口为自由出流,炉膛壁面按标准壁面函数处理,壁面温度设为 1 273 K,内部发射率取为 1,对流项采用一阶迎风差分格式,速度和压力的耦合采用 SIMPLE 算法.

根据大同煤质分析,挥发分燃烧采用如下两步反应:



#### 1.4 模型验证

通过对比国际火焰基金组织 0.58 MW 火焰炉的试验值<sup>[2]</sup>和本文模拟值,发现本文选取的计算模型和方法适用于煤粉 MILD 燃烧,具有一定的准确性.以炉膛前 4 个截面的速度场和温度场为例,IFRF 煤粉 MILD 燃烧模拟验证如图 4 所示.

## 2 结果与分析

### 2.1 流场特性

烟气内循环率  $K_v$  定义为被燃烧射流卷吸的内部循环烟气( $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ )与入射燃料和氧化剂的质量流量之比<sup>[9]</sup>,即

$$K_v = M_e / (M_1 + M_2) \quad (3)$$

式中: $M_e$ ,  $M_1$ ,  $M_2$  分别为内循环烟气、进口一次风和二次风的质量流量,  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ .文献[10]中提到,在着火延期内,氧化剂与回流烟气混合区域的  $K_v$  大小是表征氧化剂被预热和稀释的程度,对于 MILD 燃烧的建立是至关重要的,因此确定不同工况下的混合区域是关键所在.

本文采取的数学思路为:以二次风入口为起始点,选择性地作部分空间射线(即  $I_1, I_2, I_3, \dots$ ),对沿每条射线的气相速度矢量在着火延期内积分,可

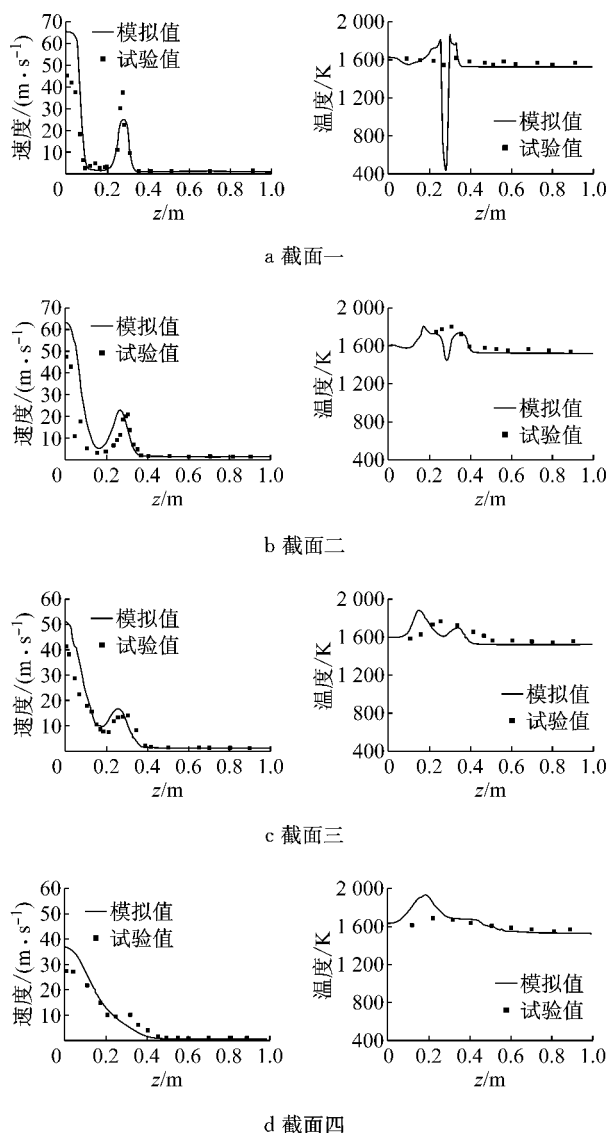


图4 IFRF 煤粉 MILD 燃烧模拟验证

Fig.4 Simulation of IFRF coal MILD combustion

得气相运动路径,将每条射线上的运动末点(即  $A_1, A_2, A_3, \dots$ )相连可大致作出空间上的混合区域.

如图 5 所示,以  $z$  轴为例,其方向向量为  $\mathbf{z}$ ,模为  $|\mathbf{z}|$ ,则沿  $z$  轴的气相运动路径可表示为

$$dS_z = V_z dt \quad (4)$$

$$t_{\text{ign}} = \int dt = \int \frac{dS_z}{V_z} \quad (5)$$

式中: $S_z$  为气相沿  $z$  轴的运动路径; $V_z$  为沿  $z$  轴的气相速度; $t_{\text{ign}}$  为着火延时.根据式(5),可得气相沿该射线方向的运动末点,将所有空间射线的运动末点相连形成大致的空间体,即图中封闭包围区域.式(5)中的着火延时  $t_{\text{ign}}$  可通过煤颗粒温度  $T_p$  随时间的变化趋势推断,如图 6 所示.

以某一粒径颗粒为例,其温度在 0.01 s 左右发生跃迁,即发生着火,数学上则认为在该时刻,煤颗

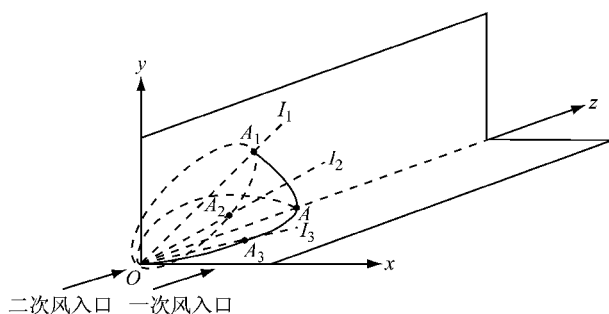


图 5 混合区数学概念示意图

Fig.5 Mathematical schematic of preheating and mixing zone

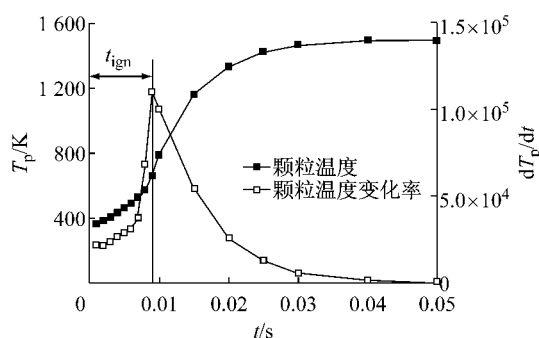


图 6 煤颗粒温度随时间变化图

Fig.6 Particle temperature versus time dependence

粒温度对时间的一阶导数为极值,二阶导数为零,而此时煤颗粒所对应的温度可近似认为是着火温度。如此,可在空间上大致作出二次风的预热混合区域,混合区的特征参数,如气相平均温度、平均氧浓度等,对于 MILD 燃烧模式的建立具有同等的重要性。

### 2.1.1 射流动量比对烟气内循环率的影响

图 7 为射流间距  $L=60\text{ mm}$  时,不同一二次风射流动量比下  $K_v$  沿炉长方向的变化曲线,表 2,3 为不同射流动量比的设计工况和内循环参数汇总。由图 7 和表 3 可见,在同向射流中,不论一二次射流动量比如何变化,烟气内循环率  $K_v$  的峰值均出现在  $z=0.3\text{ m}$  处,衰减于  $z=1\text{ m}$  处。随着一二次射流动量比的增大,  $K_v \geq 4$  的轴向范围加长,意味着内循环高倍率的区域扩大。混合区  $K_v$  的整体水平是在  $r=48$  条件下最大,该值越大,说明混合处的氧化剂被回流烟气稀释和预热得越充分,更有利于 MILD 燃烧模式的建立。此外,  $K_v$  峰值代表着炉膛径向回流效果,当一二次风射流动量比逐渐增大时,  $K_v$  峰值先逐渐增大后又有所减小,这是因为二次风射流速度太大时,流体的剪切效应对流场的影响会减弱。实际上,对于 MILD 燃烧而言,当射流速度超过一定值后,即回流烟气量能够满足预热未燃反应物至着火温度之上,可不必一味增加射流速度而带来不必要

的压力损失。下文研究的工况均是针对在  $r=48$  的条件下。

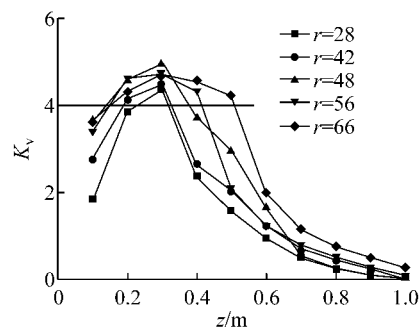
图 7 不同射流动量比下  $K_v$  的变化曲线Fig.7 Variation of  $K_v$  along with furnace height at different jet momentum

表 2 不同射流动量比的设计工况

二次风内径/mm	二次风射流速度/度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	二次风射流动量/( $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	射流动量比 $r$
7.0	64	0.4	28
6.0	87	0.6	42
5.6	100	0.7	48
5.0	125	0.8	56
4.7	142	0.9	66

表 3 不同射流动量比下的内循环参数

$r$	$K_v$ 峰值	混合区 $K_v$	沿 $z$ 轴 $K_v \geq 4$ 的范围/m
28	4.34	$\leq 3.84$	0.23~0.32
42	4.49	$\leq 4.25$	0.19~0.33
48	4.93	$\leq 4.78$	0.15~0.37
56	4.71	$\leq 4.66$	0.15~0.41
66	4.69	$\leq 4.62$	0.15~0.51

### 2.1.2 射流间距对烟气内循环率的影响

图 8 为一二次风射流速度比为  $r=48$  时,不同射流间距下  $K_v$  沿炉长方向的变化曲线,表 4,5 为不同射流间距的设计尺寸和内循环参数汇总。

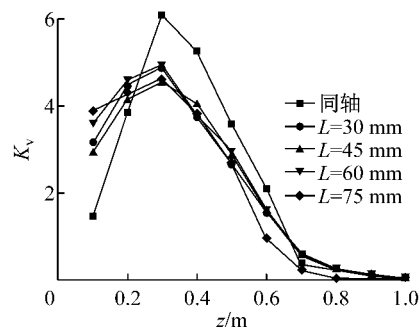
图 8 不同射流间距下  $K_v$  的变化曲线Fig.8 Variation of  $K_v$  along with furnace height at different jet spacings

表 4 不同射流间距的设计尺寸

Tab.4 Parameters at different jet spacings

射流方向	一次风口内径	二次风口内径	一二次风间距 $L$
同向射流	7	5.6	30, 45, 60, 75
同轴射流	12	5.6	

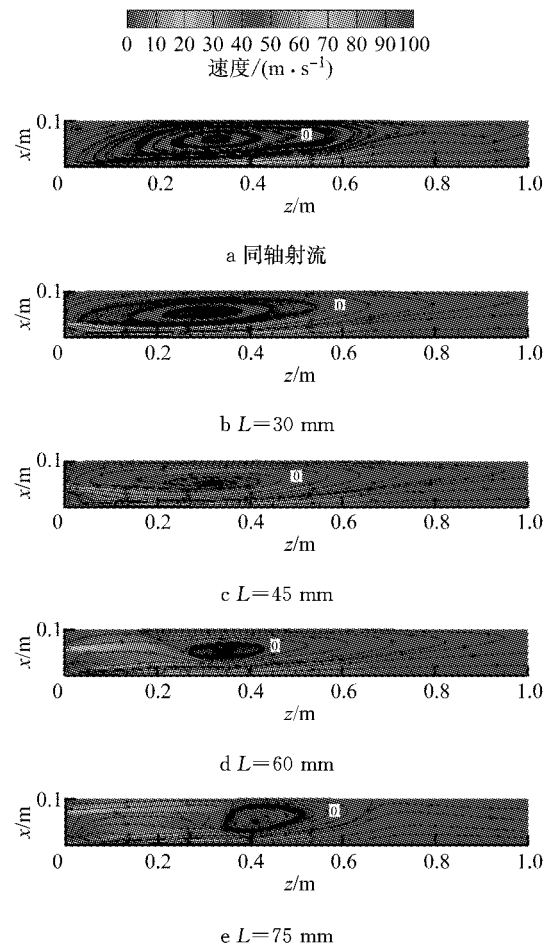
表 5 不同射流间距下的内循环参数

Tab.5 Summary of  $K_v$  at different jet spacings

射流间距 $L/\text{mm}$	$K_v$ 峰值	混合区 $K_v$	$K_v$ 峰值的轴向位置/m	$K_v$ 衰减距离/m
同轴	6.07	$\leq 2.01$	0.3	1.0
30	4.58	$\leq 3.43$	0.3	1.0
45	4.87	$\leq 4.36$	0.3	1.0
60	4.93	$\leq 4.75$	0.3	1.0
75	4.64	$\leq 4.51$	0.3	0.8

由图 8 和表 5 可见,各工况下  $K_v$  峰值均出现在  $z=0.3\text{ m}$  处,随着一二次风间距的增大,  $K_v$  峰值和混合区的  $K_v$  水平都逐渐增大,当间距增至  $75\text{ mm}$  时,  $K_v$  峰值和混合区的  $K_v$  水平又开始有所下降,且衰减距离由  $1\text{ m}$  缩短为  $0.8\text{ m}$ . 在同等的一二次风射流动量比下,虽然同轴射流的  $K_v$  峰值最大,但  $L=60\text{ mm}$  工况下的混合区  $K_v$  整体水平最大,即炉膛径向空间回流效果较优,该值大小对于 MILD 燃烧的建立至关重要,且衰减距离也较长,即炉膛轴向空间的回流效果较优. 为了更直观地显示大速差射流对炉膛烟气内部循环的作用,不同射流间距下  $Oxz$  轴面的流场迹线如图 9 所示.

由于中心为高速纯氧射流占主导地位,因此与周围流体之间存在较大的剪切力,具有强烈的引射卷吸作用. 图 9 中以粗线标记包围区域为回流区,区内的气相速度小于 0,它的存在可以吸引更多的高温烟气进入,不仅能预热二次风和小部分进入回流区的新鲜煤粉,而且能延长烟气中 NO 在炉内的停留时间,促进其与碳氢基团发生再燃反应.  $Oxz$  轴面的回流区形成是因为:一次低速煤粉气流受中心高速射流的卷吸,大部分会偏移自身的运动方向而进入中心高速射流的运动区域,与其进行质量和动量的交换,使得中心轴线附近的压力升高,而在一次煤粉射流的偏离方向与壁面之间形成负压区. 当一二次风间距增至  $45\text{ mm}$  的过程中,回流区的变化并不十分明显,有径向被压缩的趋势,而继续增至  $60\text{ mm}$  时,  $Oxz$  轴面回流区开始整体向下游偏移. 这说明射流间距的增大可使二次风先与高温回流烟气充分掺混,与煤粉流的混合有所延迟,因此煤粉挥发份析出更为充分,燃料区范围更大. 但是,射流间距并不是越大越好,如  $L=75\text{ mm}$ ,一次低速煤粉气流受中心高速射流的卷吸作用延后,而随着轴向距离的增加,

图 9 不同射流间距下  $Oxz$  轴面的流场迹线图Fig.9 Streamline of flow fields on  $Oxz$  section at different jet spacing

中心射流的速度迅速衰减,卷吸能力也就大大减弱,使得  $Oxz$  轴面回流区的范围明显缩小.

## 2.2 温度分布特性

图 10 为不同射流间距下  $Oxz$  轴面的温度分布. 很明显同轴射流方式的燃烧峰值最高,约为  $2\ 200\text{ K}$ ,且峰值出现位置离入口最近,这是因为一二次风射流太靠近,混合快,着火提前,温度变化梯度大. 过高的燃烧温度势必会导致热力型和快速型 NO 的排放升高. 对于同向射流,由于一二次风存在一定的射流间距,使得煤粉流、氧化剂在彼此混合之前都先与高温回流烟气进行预热和交换,着火延后. 当一二次风间距从  $30\text{ mm}$  增至  $60\text{ mm}$  时,燃烧峰值有所降低,相差  $90\text{ K}$  左右,然而,当一二次风间距继续增至  $75\text{ mm}$  时,高温区开始向壁面偏移,由于一二次风的径向混合较差,使得燃烧峰值升高,意味着一二次风间距并不是越大越好. 过大的间距还会使燃烧区易于接触壁面,为壁面冷却带来困难,因此需要在保证内循环倍率的情况下选择合适的间距.

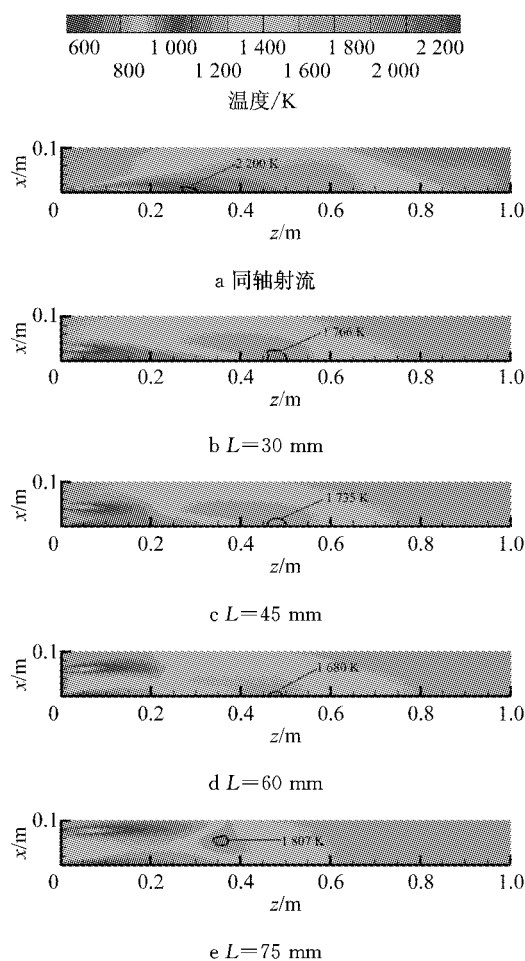


图10 不同射流间距下  $Oxz$  轴面的温度分布  
Fig.10 Temperature fields of  $Oxz$  central section at different jet spacings

### 2.3 氧浓度分布特性

图11为不同射流间距下  $Oxz$  轴面的氧浓度分布,当一二次风间距从30 mm增至60 mm时,氧气质量分数高于10%的区域在逐渐缩小.当  $L=60$  mm时,中心纯氧射流被回流烟气稀释较快,其质量分数在  $z=0.3$  m位置处已降为10%左右,且分布更为均匀和弥散.当一二次风间距继续增至75 mm时,由于一二次风径向混合较差,使得反应区氧浓度又有所升高,燃烧温度也将随之升高.相较而言,  $L=60$  mm是最为合适的间距,保证了高温回流烟气对氧化剂射流的充分稀释和预热.低氧气氛可以降低燃烧反应速率,而氧浓度的均匀分布可以提高燃烧温度的均匀性,是MILD燃烧模式的重要特征.

### 2.4 MILD燃烧模式的判定

根据文献[11]中对MILD燃烧的定义,氧化剂的初始温度高于未燃反应物的着火温度,且燃烧反应最大温升低于着火温度,公式如下:

$$T_{in} > T_{ign} \quad (6)$$

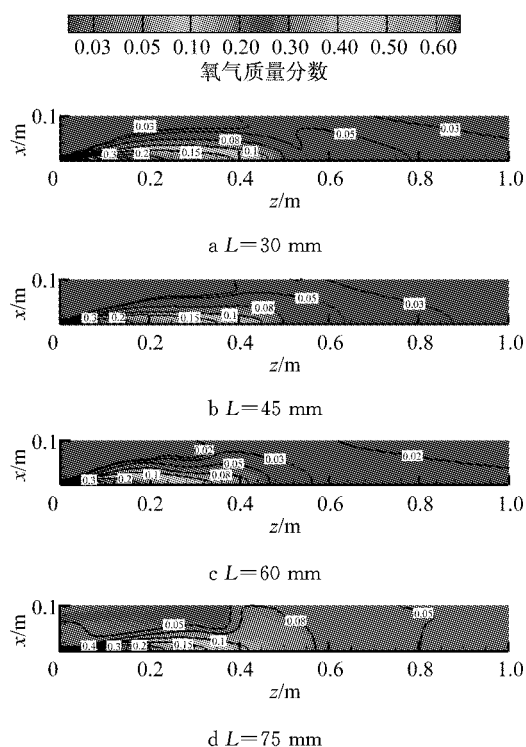


图11 不同射流间距下  $Oxz$  轴面的氧浓度分布  
Fig.11 Oxygen distribution on  $Oxz$  central section at different jet spacings

$$\max(\Delta T) = T_{max} - T_{in} > T_{ign} \quad (7)$$

式中:  $T_{in}$  是氧化剂初始温度;  $T_{max}$  是燃烧峰值温度.为满足MILD的燃烧要求,通常采用外部高温预热氧化剂的方式,但本文希望通过高速纯氧射流,增强炉膛的内循环倍率,在煤粉着火延期内卷吸大量的高温烟气,从而起到内部预热氧化剂的作用.

根据上文2.1.1所提出的方法,首先可得大同煤的着火温度约为517℃,与笔者先前通过热重实验所测的着火温度基本一致[12].同时,着火温度点所对应的时间为着火延时,同轴射流的着火延时相对最短约为0.004 s,其余同向射流工况中,  $L=30$  mm工况的着火延时约为0.01 s,随着射流间距的增大,着火延时有增加.由于高速射流的氧化剂进入炉膛后,会与周围的介质进行强烈的热质交换,包括与高温烟气的轴向混合和与一次燃料流的径向混合.表6为各工况的二次风预热混合区的特征参数,包括平均温度、平均氧气质量分数等,选取混合区的平均温度为氧化剂初始温度  $T_{in}$ .

由表6可见,五种工况下,由于一二次风为大速差射流,使得高温回流烟气均能将二次风在着火延期内预热至1000 K以上,氧气被稀释至25%以下.首先,当一二次风间距从30 mm增大至60 mm时,混合区的氧浓度逐渐降低,温度逐渐升高,说明二次

风被高温烟气更为充分地稀释和预热。其次,过大或过小的间距都不利于二次风与周围介质的混合,对于同轴射流方式,一二次风径向混合快,二次风未有充足的时间被稀释,因此混合区的平均氧浓度较高;对于  $L=75\text{ mm}$  工况,由于一二次风径向混合较差,图 9e 显示其  $Oxz$  轴面回流区范围明显缩小,且燃烧峰值有所回升。模拟工况仅  $L=60\text{ mm}$  时炉膛燃烧最高温升小于煤粉的着火温度,该工况属氧煤 MILD 燃烧,其余工况均为氧煤有焰燃烧。

表 6 各工况的二次风预热混合区特征参数

Tab.6 Combustion characteristics of mixing and preheating zone in furnace

射流间距 $L/\text{mm}$	平均氧气质量分 数/%	平均温度/ K	燃烧峰值/ K	燃烧温升/ $^{\circ}\text{C}$
同轴	25	1 320	2 200	880
30	21	1 080	1 766	686
45	17	1 160	1 735	575
60	15	1 270	1 680	410
75	18	1 280	1 807	527

### 3 结论

(1) 随着一二次射流动量比的增大,  $K_v$  峰值呈现先增大后减小的趋势,说明过大的二次风射流速度会减弱流体剪切效应对流场的影响;混合区  $K_v$  的整体水平是在  $r=48$  条件下最大,该水平大小对 MILD 燃烧的建立至关重要。

(2) 随着一二次风间距的增大,回流区开始变化并不明显,有径向被压缩的趋势,当增至  $60\text{ mm}$  时,  $Oxz$  轴面回流区明显向下游偏移,但射流间距并不是越大越好;当  $L=75\text{ mm}$  时,  $Oxz$  轴面回流区的范围明显缩小。

(3) 同轴射流方式下的燃烧峰值最高,约  $2\,200\text{ K}$ ;当间距从  $30\text{ mm}$  增至  $60\text{ mm}$  时,氧气质量分数高于  $10\%$  的区域逐渐缩小,分布逐渐趋于均匀,燃烧峰值有所降低,相差约  $90\text{ K}$ ;若继续增至  $75\text{ mm}$ ,反应区氧浓度回升,使得燃烧峰值升高,且高温区开始向壁面偏移。

(4) 由于一二次风为大速差射流,使得高温回流烟气均能将二次风在着火延迟内预热至  $1\,000\text{ K}$  以上,仅当  $L=60\text{ mm}$  工况下的炉膛燃烧最高温升小于煤粉的着火温度( $517\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),即该工况可以实现氧煤 MILD 燃烧。

### 参考文献:

- [1] Weidmann M, Verbaere V, Boutin G, *et al.* Detailed investigation of flameless oxidation of pulverized coal at pilot-scale ( $230\text{ kWth}$ ) [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 74: 96.
- [2] Schaffel N, Mancini M, Szle K A, *et al.* Mathematical modeling of MILD combustion of pulverized coal [J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(9): 1771.
- [3] MI Jianchun, LI Pengfei, Dally B B, *et al.* Importance of initial momentum rate and air-fuel premixing on moderate or intense low oxygen dilution (MILD) combustion in a recuperative furnace [J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(11): 5349.
- [4] MEI Zhenfeng, LI Pengfei, WANG Feifei, *et al.* Influences of reactant injection velocities on moderate or intense low-oxygen dilution coal combustion [J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28(1): 369.
- [5] Verissimo A S, Rocha A M A, Costa M. Importance of the inlet air velocity on the establishment of flameless combustion in a laboratory combustor [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, 44: 75.
- [6] Krishnamurthy N, Paul P J, Blasiak W. Studies on low-intensity oxy-fuel burner [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 3139.
- [7] TU Yaojie, LIU Hao, CHEN Sheng, *et al.* Numerical study of combustion characteristics for pulverized coal under oxy-MILD operation [J]. *Fuel Processing Technology*, 2015, 135: 80.
- [8] 涂焱杰. 煤粉 MILD 燃烧的数值计算以及实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.  
TU Yaojie. Numerical and experimental study of MILD combustion for pulverized coal [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [9] LI Pengfei, MI Jianchun, Dally B B, *et al.* Progress and recent trend in MILD combustion [J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(2): 255.
- [10] 吕焱. 适用于微小型燃气轮机富氢燃料的无焰燃烧技术 [D]. 北京: 中国科学院, 2010.  
LÜ Xuan. Investigation of flameless combustion technology for hydrogen-rich fuels in micro gas turbine [D]. Beijing: Chinese Academy of Science, 2010.
- [11] Cavaliere A, Joannon M. MILD Combustion [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30(4): 329.
- [12] 刘若晨, 安恩科, 刘泽庆. 全氧煤粉低氧浓度燃烧动力学参数的热重实验 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2014, 42(9): 1415.  
LIU Ruochen, AN Enke, LIU Zeqing. Kinetic parameters of oxy-coal combustion in low oxygen concentration with thermogravimetry [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2014, 42(9): 1415.