煤粉气流着火机理及最佳煤粉浓度的分析

魏小林 1,2

(1. 中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室,北京 100190;2. 中国科学院大学工程科学学院,北京 100049)

摘 要: 煤粉气流着火机理是煤粉燃烧的基础,最佳煤粉浓度是煤粉稳燃技术及燃烧器设计的重要参数.本文借鉴气体层流预混燃烧的分区着火机理,从层流煤粉燃烧火焰着火机制入手,阐明煤粉气流的着火机理.将煤粉气流燃烧过程分为一次、二次预热区和着火反应区、燃尽区等不同区域,认为煤粉着火主要受制于预热区和着火反应区;同时将不同区域的传热方式进行解耦,辨明了一次与二次预热区加热热量的不同来源.通过分区热量衡算,获得煤粉浓度对于煤粉气流着火影响的基本特性.提出以挥发分和少量焦炭燃烧热量作为着火供给热来评估煤粉气流着火状况的新思路,从而得到煤粉气流分区着火机理,并预测得到合理的最佳煤粉浓度.研究结果在氧燃料燃烧、高温空气燃烧和燃煤电站灵活性改造时的煤粉稳燃等方面,可提供高浓度煤粉燃烧技术的基础支撑.

关键词:煤粉气流;着火机理;最佳煤粉浓度;理论分析
 中图分类号:TK16
 文献标志码:A
 文章编号:1006-8740(2022)06-0639-13

Ignition Mechanism of Pulverized Coal Flow and Analysis of Optimal Pulverized Coal Concentration

Wei Xiaolin^{1, 2}

 (1. State Key Laboratory of High-Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. College of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The ignition mechanism of pulverized coal flow is the fundamental of pulverized coal combustion, and the optimal pulverized coal concentration is an important parameter for pulverized coal combustion stabilization technology and burner design. Based on the zonal ignition mechanism of gas laminar premixed combustion, this research initially investigated the ignition mechanism of laminar pulverized coal combustion flame, and then explored the ignition mechanism of pulverized coal flow. The process of pulverized coal combustion is divided into primary and secondary preheating zone, ignition reaction zone and burnout zone, and it is assumed that the ignition of pulverized coal is mainly controlled by the preheating zones and ignition reaction zone. At the same time, the heat transfer modes in different zones were decoupled, and different kinds of preheated sources in the primary and secondary preheating zones were identified. The influence of pulverized coal concentration on the ignition characteristics of pulverized coal flow was obtained through zonal heat balance. The new idea was proposed that the combustion heat of volatiles and a small amount of char was used as ignition supplying heat to evaluate the ignition

收稿日期: 2022-06-22.

作者简介:魏小林(1967—),男,博士,研究员.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51736010).

通信作者:魏小林, xlwei@imech.ac.cn.

status of pulverized coal flow, and then the zonal ignition mechanism of pulverized coal flow was obtained. The reasonable optimal pulverized coal concentration was predicted. The research results can provide the basic support for high concentration pulverized coal combustion technology in the aspects of oxygen fuel combustion, high temperature air combustion, and the stable combustion of pulverized coal during the flexible modification of coal-fired power plants.

Keywords: pulverized coal flow; ignition mechanism; optimal pulverized coal concentration; theoretical analysis

煤炭一直是我国最重要的一次能源,是工业用能的压舱石,预计未来几十年也会占能源消耗的 50% 以上,因此煤炭高效清洁利用得到国家的高度重视.我国大部分煤炭通过煤粉燃烧所消耗,但燃烧用煤的煤质与国外有较大差别,经常燃用灰分高、挥发分较低的煤,着火稳定性差(特别是对于小容量锅炉),而发达国家多燃用烟煤、褐煤等高挥发分煤.虽然国外从 20 世纪 60 年代起就在煤粉燃烧基础研究方面做出了系统性的开创成果^[1-2],但是我国从 70 年代起在煤粉稳燃技术方面也做出了自己独特性的系列成果^[3-4].在目前"双碳"背景下,火电机组深度调峰运行是消除电源侧与电网侧双随机扰动、提高可再生能源消纳率的有效措施,煤粉稳燃技术是火电机组深度调峰的重要支撑.

周怀春等^[5]总结了国内主要大学和中科院等在 煤粉稳燃技术方面的研发历程,分析了国内大量的专 利技术,认为我国从 80 年代开始的煤粉稳燃技术可 以归为两类:一类是借鉴国外旋流燃烧器^[6],以烟气 回流为主要技术特征,体现在 1985 年 4 月 1 日开始 申请的徐旭常等国内很多学者的专利内容上^[7],包括 预热室和各种钝体燃烧器,其原理是通过强化高温烟 气回流,实现煤粉气流的快速加热和着火;另一类借 鉴国外的 WR、PM 燃烧器和 W 型火焰锅炉旋风分离 式燃烧器等^[8],以煤粉浓淡分离为主要技术特征,体 现在 1989 年 1 月 14 日开始申请的徐通模等国内很 多学者专利内容上^[9],包括应用于直流或旋流燃烧器 上的多种煤粉分离方式,其原理是将一次风分离为浓 淡两股煤粉气流,首先实现浓煤粉气流的着火;并在 四角切圆煤粉锅炉上采用水平浓淡燃烧技术时,强调 充分发挥向火侧高浓度煤粉气流的着火优势^[10].国 内学者多年的研究与实践表明[11-13],烟气回流强化了 煤粉的预加热过程,而浓煤粉气流也有自身的着火优 势,两者的有机结合才是煤粉稳定着火的关键.

徐旭常等^[14]在总结煤粉预燃室及火焰稳定船的 作用时,强调在煤粉燃烧过程中,合理组织气流,形 成局部的高煤粉浓度、高温和合适氧浓度的区域,成 为稳定的着火有利区,是保证煤粉稳定燃烧的关 键.可见,上述两类煤粉稳燃技术的基本原理均与此 理论观点相符.由于在浓煤粉气流中,空气质量流率 相对下降,因此在有利于煤粉着火的局部高温区,煤 粉与空气的质量比是很重要的参数,因其直接代表了 高温区的煤氧比,从而寻找所谓的"最佳煤粉浓度" 变得重要起来.虽然煤粉浓淡燃烧的研究与应用已 经较多,但是在氧燃料燃烧、高温空气燃烧和燃煤电 站灵活性改造时的煤粉稳燃等领域,仍然需要高浓度 煤粉燃烧研究的基础支撑.

煤粉挥发分含量越高,着火所需的空气量也越 多,因此高挥发分煤的最佳煤粉浓度较低.国外最早 开展了煤粉气流的层流火焰传播速度研究^[15],并实 际测量得到了最佳煤粉浓度^[16-17].国内阎维平和徐 明厚等较早开展了高浓度煤粉的燃烧研究^[18-19],许多 学者得到了不同挥发分煤粉的最佳浓度^[18-23].一般 在实验测量中认为煤粉气流燃烧过程中对应于炉内 最高火焰温度^[18]或者最短着火距离^[19]的煤粉浓度为 最佳煤粉浓度.

由于在常温条件下煤粉很难着火,因此煤粉气流 着火的关键是一次风射流通过高温热烟气的热对流 和辐射加热(实际锅炉中后者的影响较小),使得煤粉 气流温度升高到煤粉的着火温度,这时煤粉所需的着 火热等于着火区域供给的热量.传统认为煤粉气流 的着火温度和着火热不但与煤粉气流本身的特性(煤 粉挥发分与水分、灰分含量、浓度与细度、粒径分布 以及煤粉气流初始温度、一次风率、风速等)相关^[16], 同时其着火的供给热也受到炉内加热方式与条件的 影响.此外,由于煤粉燃烧时间较长,因此一般认为 煤粉气流的火焰锋面十分厚,其内的温度梯度相当 小,火焰锋面向新鲜煤粉与一次风混合物的导热及辐 射很弱.由于气体预混燃料着火时,火焰锋面很薄, 其内温度梯度相当大,燃料气流的预热主要来自于火 焰区的导热^[24],因此传统认为煤粉气流着火机理与

-640 -

气体燃料预混着火燃烧机理完全不同.

另一方面,在气体燃料预混燃烧时存在一个在当量比附近的燃料浓度,这时对应最大的层流火焰传播速度.由于气体预混燃料通过火焰锋面的导热即可加热至着火状态^[24],因此气体预混燃料在常温下即可点燃.如果燃料的初始温度提高,虽然层流火焰传播速度增加,但是对应最大速度的燃料浓度几乎不会发生变化,因此层流火焰传播速度作为燃料的着火与燃烧基本特性受到广泛重视.在模拟煤粉气流燃烧时,Smoot等^[15]建立的一维分区模型,较早通过分区考虑了煤粉气流燃烧时预热区、火焰区和后燃区的不同辐射传热方式.由于气体-颗粒混合物存在爆炸的风险,因此近年来仍有不少工作研究了粉料气流的层流火焰传播问题^[25-26],基于分区模型建立了计算预混粉料气流火焰传播速度的方法.

本文在深入分析煤粉气流着火过程时,发现煤粉 气流着火机理本质上与气体燃料有着类似之处.煤 粉气流着火过程仍存在着明显的火焰面,着火前释放 的挥发分相当于为着火准备足够的预混可燃物,这些 可燃物着火燃烧后也会通过导热进一步预热煤粉(除 炉内高温火焰外在加热外),使得煤粉气流快速升 温,并达到着火条件.

本文在以上研究与理论分析基础上,借鉴气体层 流预混燃烧的分区着火机理,从层流煤粉燃烧火焰分 析入手,提出以挥发分和少量焦炭燃烧热量作为着火 供给热来评估煤粉气流着火状况的新思路,同时将不 同区域的热量衡算进行解耦,探究煤粉浓度对于煤粉 气流着火影响的基本特性,从而得到煤粉着火的分区 机理.将煤粉气流的着火规律主要看作由其自身特 性(浓度、温度、细度、速度、挥发分含量等)所决定, 较大地简化了前人对于煤粉气流复杂着火过程的描 述.在此基础上,还预测得到了煤粉最佳浓度,并提 出着火供给热参量概念,可以用来对比分析不同浓度 煤粉气流的着火特性.

1 煤粉燃烧的过程

为了研究煤粉气流的着火机理,先从实际锅炉的 煤粉燃烧模拟结果了解煤粉气流的基本着火过程. 图 1 和图 2 为国内一台 300 MW 四角布置煤粉锅炉 的数值模拟结果(B 层一次风截面),燃烧器采用了水 平浓淡燃烧器,煤种为神华烟煤.从这些炉内速度 场、温度场和浓度场的结果看,煤粉气流进入炉内 0.5 m 左右的距离后(对应实际锅炉煤粉气流刚进入 炉内存在 0.3~0.5 m 的"黑龙"),很快就在一次风射 流外围实现稳定着火,当射流进入炉内 3 m 左右后, 煤粉射流基本实现了内外完全着火.从这些煤粉气 流根部着火段的模拟结果来看,围绕煤粉射流,存在 明显的温度和 CO、CO2浓度快速上升,以及 O2突然 下降的局部区域,这就是煤粉气流着火的核心区,即 煤粉着火火焰.

在实际锅炉煤粉气流的着火过程中,煤粉进入炉 内后,受到气流外围的对流和辐射加热,开始升温并 释放挥发分,达到煤粉气流着火温度后,即发生已释 放挥发分和少量焦炭的着火燃烧反应.由于存在这 种高速反应、快速升温的放热过程,因此形成了稳定 的煤粉燃烧火焰面.Horton 等^[27]在测量层流预混煤 粉火焰时,发现煤粉气流存在厚度只有 10 mm 左右 的火焰面.虽然煤粉燃烧属于典型的湍流燃烧,但是 当讨论局部区域的微小火焰时,煤粉颗粒燃烧可以形 成明显的火焰^[28],因此层流燃烧的火焰面模型仍可 以在此适用^[29].

由于分析实际锅炉的煤粉加热过程是比较复杂 的,因此下文先从层流预混煤粉的预热和着火过程进 行分析.



— 641 —





2 煤粉气流着火理论分析

2.1 理论基础

-642 -

许多研究者对于粉料气流着火进行过稳态或非

稳态的理论分析^[15, 25-26]. 一般可以将煤粉气流的着 火过程分为预热区、火焰区和燃尽区^[15],图 3 描述了 一种典型的煤粉气流着火过程.





综合分析这些模型,结合已有实验研究和数值模 拟的结果,本文提出以下主要观点:

(1) 一般煤粉气流预热区的长度较长(~m 量级),虽然煤粉燃尽的时间比气体燃料长很多,但是根据实验研究和数值模拟^[15, 28]以及以上大型锅炉的数值模拟结果,煤粉气流着火和主要燃烧过程却很短,可以认为存在很薄的 1~10 mm 量级厚度的着火火焰区(气体燃料的火焰面厚度更薄,一般为 0.1~1 mm),因此在分析煤粉着火过程时,照样可以借鉴气体预混燃料着火过程火焰的分析理论.虽然此假设对于煤粉燃尽过程的研究是不够的,但是对于煤粉 气流的着火过程分析是基本可靠的.

(2) 煤粉气流的预热可以分为两个过程(见图 4),在一次预热区内煤粉气流依靠炉内对流和辐射加 热,达到通常讲的煤粉气流着火温度;对于实际煤粉 锅炉,此时的加热方式主要来自于煤粉射流外围的对 流加热^[30],因此可以称此着火热量为"外在供给着火 热".离开一次预热区后,煤粉气流进入火焰区,为了 与煤粉气流一次预热区加以区分,这里称火焰预热区 为煤粉气流着火的二次预热区,即火焰区可以分为两 个子过程:二次预热区和着火反应区^[24].在二次预热 区内不发生反应,只接受来自后面相邻反应区的热传 导加热,此热量由于直接来自煤粉气流着火后的自身 热量,可以称该着火热量为"内在供给着火热"(前人 在煤粉气流着火机理分析中,很少有人关注此热 量). 内在供给着火热使得煤粉气流在二次预热区进 一步加热,达到煤粉颗粒的着火温度,此温度与通常 讲的煤粉单颗粒着火温度非常接近,这时在反应区内 将发生已释放挥发分和少量焦炭的快速着火燃烧过 程,从而与二次预热区共同形成煤粉气流着火过程的 火焰锋面.



图 4 煤粉气流着火过程的分区模型 Fig.4 Zonal model of ignition of pulverized coal flow

(3) 在实际煤粉燃烧过程中,煤粉气流被加热的 方式主要为对流和辐射,从理论上进行煤粉加热过程 的定量化分析是比较困难的,因此可以主要关注煤粉 气流本身被加热的程度,其主要参数为煤粉加热过程 的时间和终温,因为这两者才是影响挥发分释放和煤 粉着火的核心要素. 煤粉加热的时间和终温(其实就 相当于升温速率)决定了煤粉气流在加热过程中挥发 分的释放量,同时也决定了是否达到了煤粉气流的着 火温度. 由于单颗粒煤粉着火时,煤粉释放的挥发分 热量很少,无法形成像煤粉气流着火过程的火焰锋 面,继而向前传导热量,进一步加热煤粉,因此单颗 粒着火的热量基本来自于外在热. 研究表明, 单颗粒 煤粉的着火温度通常比煤粉气流的着火温度大 300℃左右^[16],因此以上分析中一次预热温度和二次 预热温度的差别正好解释了此问题. 可见,已有文献 中得到的大量单颗粒煤粉着火温度和非均相着火数 据,可以在实际锅炉煤粉气流着火机理的研究中被采 用,因为该温度相当于煤粉气流二次预热区的出口 温度.

(4)以上理论简单认为煤粉气流经过二次预热后,达到单颗粒煤粉着火条件即实现了煤粉气流的着火,将煤粉气流的着火机理只作为煤粉气流的"本身特征"进行分析,从而实现了煤粉气流着火机理与气体预混燃料着火机理的基本统一.该理论放弃了前人认为的煤粉气流着火与各种燃烧设备运行工况和燃烧器等具体因素的复杂关联性,将煤粉气流着火机理简单化地类同于气体预混燃料着火机理.显然这种认识还只是初步的尝试,需要不断深入探究.

2.2 煤粉气流着火过程的理论模型

在以上理论分析基础上,建立煤粉气流预热与反 应区的着火模型,并假设如下:

(1)在进行理论分析时,先避免分析实际复杂的 煤粉加热着火过程,认为煤粉气流着火燃烧前,首先 在一次预热区通过传热进行升温,并逐渐释放出挥发 分,为着火准备充足的易燃物质;然后进入着火反应 区,火焰区与一般的气体火焰有所类似,可分为二次 预热区和反应区,在二次预热区内通过导热达到最终的着火温度.当煤粉气流达到一定温度时在反应区内开始着火燃烧,煤粉气流火焰特性主要由升温速率以及当地的已释放挥发分和可燃焦炭量等决定.

(2) 借鉴 Spalding 的气体层流预混燃烧理 论^[24],假设在一次预热区释放的挥发分与空气已经 充分混合,在火焰的二次预热区几乎不存在燃烧反 应,没有热量释放,主要靠反应区的热量通过热传 导,进一步加热煤粉气流中的可燃(主要是已释放的 挥发分)混合物,而在反应区发生快速的气体反应(也 可能有少量焦炭氧化反应发生,即发生非均相着 火),释放出大量的热量,使得煤粉气流快速升温,从 而维持煤粉气流的持续燃烧和焦炭燃尽.

(3) 煤粉气流中的焦炭燃尽时间(空间量级~ 10m;时间量级~1s)较长,虽然反应区也比通常的 气体火焰长得多,但是本文主要探讨煤粉气流的着火 机理,对于焦炭燃尽过程不做分析,从而主要考虑着 火区附近的燃烧反应.同时,为获得主要的煤粉气流 着火特性,将过程分析进行简化,不考虑颗粒和气流 的温差以及它们之间的传热问题.

(4) 煤粉气流的热平衡方程可以写为

$$\Delta Q_{\rm a,p} = Q_{\rm con} + Q_{\rm rad} + Q_{\rm com} + Q_{\rm ex} \tag{1}$$

式中: ΔQ_{ap} 为煤粉颗粒和空气流被加热的总热量,方 程右侧 4 项分别为煤粉气流由于对流、辐射、燃烧和 外在(如电热等)加热获得的热量.由于与一次预热 区的加热长度(实际煤粉气流着火前距喷口 300~ 500 mm)相比,二次预热区的火焰厚度很薄(1~ 10 mm),因此假设一次预热区加热量主要来自对流 和辐射,而二次预热区的加热量主要来自对流 和辐射,而二次预热区的加热量主要来自水焰本身反 应区的导热.反应区的热量主要来自释放的挥发分 和少量焦炭的燃烧放热,同时考虑其对于二次预热区 的向前热传导热量,但暂不考虑火焰反应区的辐射换 热.从而将不同区域的加热方式分别考虑,实现了热 量衡算的解耦.

3 层流预混煤粉气流的着火分析

3.1 层流预混煤粉火焰

通常的气体火焰是一个以亚音速、自维持传播的 局部燃烧区域^[24]. 假定火焰是一维的而且未燃气体 以垂直于火焰面的方向流向火焰,这个流动速度就是 火焰传播速度 S_L. 在分析煤粉气流的着火问题时,为 了简化问题并探讨着火的本质特征,如前所述,本文 将层流预混煤粉气流的着火问题类比为气体层流火 焰. 由于煤粉火焰着火段的快速反应区同样很薄,因

— 643 —

此该区域的温度梯度和组分浓度梯度仍然很大,从而可以将自由基组分通过热扩散,将热量通过热传导, 快速传递到预热区,为火焰的持续发生提供物质和能量源.

以下为煤粉气流火焰的分区能量平衡方程: 3.1.1 一次预热区

在进行理论分析时并不去求解火焰微元控制体的组分和能量微分方程,而只是将控制体作为一个整体来考虑其物质和能量平衡.在一次预热区内,将煤粉气流的进出口和扩张边界作为控制体的边界(见图4),假设扩张边界不与煤粉气流有物质和能量的交换,可以得到简单的质量和能量平衡方程(推导过程见附录1).

$$\dot{q}_{\rm R} = u_{\rm u} \rho_{\rm u} A_{\rm u} (c_{p,\rm a} + \mu_0 c_{p,\rm c}) T_{\rm u} - u_0 \rho_0 a_0 (c_{p,\rm a} + \mu_0 c_{p,\rm c}) T_0$$
(2)

下文的算例中将介绍 *q*_R 的算式,同时暂不需要 考虑对流加热量,即主要考虑通过辐射造成了煤粉气 流焓值的增加,使其温升达到通常所谓的煤粉气流着 火温度 *T*_u(即一次预热区出口温度).

一次预热区内煤粉随着温度的升高,逐渐释放出 挥发分,是煤粉着火的关键因素.将挥发分的释放方 程进行积分,即可得到一次预热区内煤粉挥发分的释 放量(具体见附录 2).

$$m_{\rm v} = \frac{V}{V_{\infty}} = 1 - \exp(-kt) \tag{3}$$

3.1.2 着火反应区

在二次预热区内,进入控制体的物质流与上面一次预热区的相同. 在能量平衡分析时,将煤粉分为已 经释放的挥发分和残余的焦炭,离开一次预热区的能 量即为进入二次预热区控制体的能量,该能量加上反 应区通过热传导进入二次预热区的能量 *q*_e,即为离 开二次预热区的能量. 由于反应区的热传导计算需 要已知反应区厚度等数据,准确计算有一定困难,因 此本文假设二次预热区的煤粉气流终温为单颗粒煤 粉的着火温度 *T*_{ip} (作为已知值),这样可以给出二次 预热区的能量平衡方程:

$$\dot{q}_{c} = u_{i}\rho_{i}A_{i}[c_{p,a} + m_{v}\mu_{0}c_{p,g} + (1 - m_{v}))$$
$$\mu_{0}c_{p,c}]T_{i,p} - u_{u}\rho_{u}A_{u}(c_{p,a} + \mu_{0}c_{p,c})T_{u}$$
(4)

式中:方程右侧中方括号各项分别代表空气、挥发分 和焦炭的影响.一般在层流预混火焰反应区内,离开 二次预热区的温度可以视为预混气初温和反应后气 体温度的平均值^[24],本文借鉴此假设来确定一次预 热区出口温度(即上式中的*T*_u)和反应区出口温度(即 *T*_b)的关系,因此并不直接求解公式(4). 计算反应区出口温度时,将二次预热区与反应区 作为一个控制体考虑,反应区释热量只考虑已经析出 挥发分的燃烧放热量(此处针对下文方法验证中烟煤 的计算,暂不考虑少量焦炭燃烧释放的能量),从而 整个控制体的能量平衡方程为

 $\dot{q}_{v} = u_{b}\rho_{b}A_{b}[c_{p,a} + m_{v}\mu_{0}c_{p,g} + (1 - m_{v})\cdot$

$$\mu_{0}c_{p,c}]T_{b} - u_{u}\rho_{u}A_{u}(c_{p,a} + \mu_{0}c_{p,c})T_{u}$$
(5)

式(5)与二次预热区能量方程的差别在于右侧第 一项的温度为着火反应区出口温度*T*_b.挥发分燃烧 释放热量*q*_v采用式(6)计算:

$$\dot{q}_{\rm v} = m_{\rm v} V_{\infty} Q_{\rm v} \dot{m}_{\rm c} \tag{6}$$

式中: \dot{m}_{e} 为煤粉质量流率; Q_{v} 为挥发分发热量,可采 用式(7)进行估算^[30]:

$$V_{\rm ar}Q_{\rm v} = Q_{\rm net,ar} - 32\,800\,F_{\rm C,ar} \tag{7}$$

式中: V_{ar} 为煤粉工业分析的挥发分质量份额; $F_{C,ar}$ 为 煤粉工业分析的焦炭质量份额; $Q_{net,ar}$ 为煤粉的低位 发热量; 每 kg 碳的热值为 32 800 kJ.

3.2 层流预混煤粉火焰的计算

具体计算过程如下:

(1) 在计算时,假设煤粉火焰二次预热区的出口 温度等于煤粉单颗粒的着火温度,因此可以采用文献 中不同煤种大量单颗粒测量的着火温度作为"真正" 的煤粉气流着火温度.在计算挥发分释放量时,将煤 粒的终温作为已知值,认为是一次预热区出口温度 (先采用预估值),预热区的加热时间先根据煤粉气流 的速度进行预估.

(2) 将经过一次预热区后挥发分的释放量确定 好后,即可计算挥发分燃烧的热量,先假设已经释放 挥发分发生快速燃烧,形成类似于气体燃料的层流预 混火焰,按照其放热量得到火焰反应区出口的温度预 估值. 然后借鉴 Spalding 的气体层流预混火焰,假设 二次预热区出口的温度(即单颗粒煤粉的着火温度 *T*_{i,p})等于火焰反应区出口和二次预热区进口温度的 平均值,这样就可以计算得到二次预热区进口温度, 也就是一次预热区出口温度.

(3) 采用新的预热区出口温度,重新计算挥发分释放量,不断迭代,直到计算的一次预热温度、煤粉 气流加热时间等与预估值一致,即可得到符合着火条 件的工况参数(包括煤粉浓度、不同区域温度等),从 而可以预测出最佳煤粉浓度等.

3.3 层流预混煤粉火焰计算结果的验证

在具体应用以上理论分析方法时,本文选择了 Csaba 测量层流煤粉火焰传播速度时的经典实验装 置作为研究对象^[1,19],建立能量与热量平衡方程,研

— 644 —

究煤粉气流着火机理及最佳煤粉浓度. Csaba 采用的 燃烧室上部是一个高 0.84 m、半角 3°、进口直径 0.05 m 的隔热圆锥体,下部是一个相连的耐火砖砌成 的燃烧室.实验时调节煤粉气流速度和浓度,使得火 焰前沿保持在距圆锥体进口 0.6 m 处,在此位置,布 置有火焰观察孔,对应的直径为 0.1 m. 在此位置之 上,布置有 4 个测量壁面温度的热电偶,在此之下, 布置有 7 个火焰温度测点.火焰传播速度换算为直 径 0.1 m 处(即距圆锥体进口 0.6 m 高度处位置)时煤 粉气流所对应的速度.实验用煤的收到基挥发分 33%、水分 3%、灰分 13%,理论空气量为 6.9 m³/kg, 低位热值为 6 300 × 4.186 8 kJ/kg,按比表面积平均的 粒径为 56 μm.

Csaba 的实验装置不存在热气流的回流区,因此 煤粉着火前的主要加热源为火焰区的辐射热,实际燃 烧过程的煤粉气流加热方式当然也可以来源于热对 流和热气流的混合等,但本文暂不涉及其计算.将该 辐射热假设为煤粉气流直接吸收的火焰辐射热加上 穿过煤粉气流到达隔热圆锥体后发射进入煤粉气流 的辐射热,与 Csaba^[1,19]采用的辐射计算方法有所不 同.从火焰进入煤粉一次预热区的辐射热表达为

 $\dot{q}_{R} = \varepsilon_{f} \sigma T_{f}^{4} \{ [(1 - \exp(-kL)] + \varepsilon_{b} \exp(-kL) \}$ (8) 式中: ε_{f} 为火焰黑度, 取为 0.9; ε_{b} 为隔热圆锥体的壁 面黑度, 取为 0.8; *k* 为煤粉的辐射吸收减弱系数, 用 式(9)计算^[31]:

$$k = \frac{3G_{\rm p}}{2d_{\rm p}\rho_{\rm p}} \tag{9}$$

式中: G_p 为煤粉颗粒的质量浓度, kg/m³; d_p 为颗粒 直径; ρ_p 为颗粒密度.

煤粉气流着火前的区域(从燃烧室顶部到 0.6 m 处)围成了一个圆台(上下圆面直径为 0.05 m 和 0.1 m),可以计算得到其整个包壁辐射的平均射线行 程(*L* = 3.6 *V/S*)仅为 0.006 95 m.

计算时预热区和火焰区需要相互迭代计算,通过 火焰区热平衡方程(5)预测得到进口温度(T_u),针对 一次预热区,即可通过公式(2)算得煤粉气流的层流 火焰传播速度(u_u).

图 5 给出了煤粉燃烧的层流火焰传播速度理论 计算值与实验值的对比,两者的基本趋势基本一致, 特别是对于高煤粉浓度的工况.在较低煤粉浓度时 虽然火焰传播速度有较大的实验结果,但是数据也存 在较大的波动性.可以看出,在煤粉质量浓度为 0.32 kg(煤)/kg(空气)(这时对应燃烧室进口单位体 积的煤粉质量浓度为 0.4 kg/m³)时,计算得到的层流 火焰传播速度最大(1.02 m/s). 燃烧科学与技术





图 6 给出了煤粉火焰的温度实验值(图中表示为 黑色圆点)以及理论预测得到的着火反应区温度,其 中*T*_u为一次预热区煤粉气流出口温度,*T*_b为反应区 气流出口温度.随着煤粉浓度的提高,预热区的煤粉 气流温度有所减小,但最大减小幅度不超过 100 K; 同样,挥发分燃烧后,反应区的出口温度有所上升, 但最大上升幅度也不超过 100 K.实验结果(参见图 6)表明,火焰在煤粉质量浓度为 0.48 kg(煤)/kg(空 气)(对应燃烧室进口的煤粉质量浓度为 0.6 kg/m³) 时,火焰温度达到最大值(1785 K).从图 5 的计算结 果看,这时火焰的传播速度(0.99 m/s)也接近于最 大.可以看出,煤粉气流的层流火焰传播速度与火焰 温度有很好的相关性,最大的火焰速度基本对应着最 高的火焰温度.





Fig.6 Flame temperature of pulverized coal combustion

4 实际煤粉气流的着火分析

4.1 已有分析

国内外已有不少研究结果关于煤粉气流着火的 最佳煤粉浓度研究.一般认为,一次风中的氧是煤中 挥发分着火和燃烧所需要的,根据此假设,作者推导 出煤粉气流的最佳煤粉浓度与煤的挥发分含量和挥 发分热值的乘积呈反比^[22]:

$$\mu_{\rm opt} = \frac{3\,750}{1.295\,V_{\rm ar}Q_{\rm v}} \tag{10}$$

— 645 —

式(10)反映了最佳煤粉浓度与挥发分燃烧释放的热量有着密切的关系.王学斌等^[23]总结了西安交大的 实验结果,表明最佳煤粉浓度随着煤质发热量与挥发 分乘积的增大而降低,并拟合出一经验公式,与式 (10)结果定性上是一致的.

表 1 给出了根据公式(10)计算得到的最佳煤粉 浓度,并与文献实验结果^[18]进行了对照(一次风温分 别为 20 ℃和 300 ℃).可以看出理论公式(10) 仅考虑 了煤粉气流中挥发分的着火需求,得到的最佳煤粉浓 度随煤的挥发分减少而增加,其基本趋势是正确 的.但是对于高挥发分烟煤,理论值比实验值小;对 于低挥发分无烟煤,理论值又明显偏大.可见,采用 煤粉气流中的氧气主要用于煤粉挥发分燃烧需求的 假设,得到的最佳煤粉浓度与实际燃烧过程是不完全 相符的.

表1 最佳煤粉浓度计算值与实验值(kg(煤)/kg(空气))

Tab.1 Calculated and experimental data of optimal pulverized coal concentrations

煤种	计算值	实验值(20℃)	实验值(300℃)
神木烟煤	0.31	0.40	0.66
石圪台烟煤	0.38	0.47	0.54
邹县烟煤	0.63	0.60	0.66
铜川贫煤	0.69	0.57	0.76
龙岩无烟煤	2.00	—	1.00

这是由于现有的理论在解释最佳煤粉浓度的存 在机理时,仅考虑了全部挥发分用于煤着火热的假 设,没有考虑对于高挥发分煤,可能仅需要部分挥发 分燃烧即可实现煤粉气流稳定着火.另一方面,在实 际煤粉燃烧的高加热速率(10⁴~10⁵K/s)过程中,煤 粉着火的机理往往是两者结合的联合着火模式^[16], 因此在分析低挥发分煤的着火问题时,除考虑挥发分 的均相着火外,还需要考虑焦炭的非均相着火.

4.2 实际煤粉气流着火的最佳煤粉浓度

阎维平等^[21]采用煤粉气流着火热量供需平衡的 原理,对存在最佳煤粉浓度的机理进行了分析,认为 煤粉气流着火所需热量与着火区供热量相等、火焰温 度水平最高时对应的煤粉浓度为最佳浓度,同时认为 空气所提供的氧气需要足够满足挥发分着火及焦炭 初期燃烧的需要.

盛昌栋等^[32]在管式炉上研究了煤粉气流着火方 式与煤粉浓度的关系,结果表明,当煤粉浓度由高向 低变化时,煤粉气流的着火方式由均相着火向多相着 火过渡,少量焦炭也参与着火燃烧;煤的挥发分含量 越高,发生着火机理过渡的煤粉浓度越大.可见煤粉 浓度变化时会影响焦炭的燃烧份额,从而影响煤粉气 流的着火机制. 这里将前文的理论推广至实际煤粉气流的着火 火焰,仍然假设煤粉气流着火存在一次预热区和火焰 区,其中二次预热区出口的温度(即单颗粒煤粉的着 火温度 *T*_{i,p})等于火焰反应区出口和二次预热区进口 温度的平均值. 当煤种确定后,着火温度 *T*_{i,p}即为确定 值,从而可以认为煤粉着火难易主要由挥发分和少量 焦炭的燃烧放热量决定.

根据以上理论计算和文献中的研究,对于烟煤煤粉,本文假设煤粉气流着火时大约 40%的挥发分和约 1%的焦炭已经发生反应,可以作为着火的判断条件;对于低挥发分煤,由于着火温度更高,假设大部分释放的挥发分和大约 5%的焦炭发生氧化.以下计算根据不同煤种设定了不同的挥发分和焦炭燃烧份额.

若煤粉气流中每千克空气的煤粉质量浓度为 μ, 假设煤粉气流中空气刚好满足煤粉已释放挥发分和 少量焦炭的燃烧所需,则有

 $\mu(m_{\rm v}V_{\rm ar}V_{0,\rm v} + \mathcal{E}_{\rm ch}F_{\rm C,ar}V_{0,\rm ch}) = 1$ (11)

式中:挥发分燃烧所需的理论空气量 $V_{0,v}$ 采用可燃基的煤粉理论空气量进行估算; ε_{ch} 为着火燃烧的少量 焦炭质量份额; $V_{0,ch}$ 为煤粉中固定碳燃烧所需的理论 空气量,按纯碳计算:

$$V_{0,ch} = \frac{\frac{52}{12}}{0.233} = 11.445 \tag{12}$$

这样最佳煤粉浓度即为

$$\mu_{\rm opt} = \frac{1}{m_{\rm v} V_{\rm ar} V_{0,\rm v} + \varepsilon_{\rm ch} F_{\rm C,ar} V_{0,\rm ch}}$$
(13)

对于高挥发分煤,可以忽略焦炭燃烧对于着火的 影响,显然最佳煤粉浓度与挥发分燃烧所需的理论空 气量呈反比.由于燃料的发热量大体与理论空气量 成正比(处于 3.63~3.95 MJ/m³范围)^[30],这时式(13) 仍反映了最佳煤粉浓度与挥发分燃烧释放热量呈反 比,只是对应的不是全部挥发分.而对于低挥发分 煤,少量焦炭着火提供的热量就与挥发分相当了,这 时着火热量将来自于几乎全部的挥发分和 5% 左右的 焦炭燃烧热.

图 7 给出采用式(13)预测的最佳煤粉浓度值,并 与国内外文献中的实验值进行了比较.可以看出大 多数的数据误差在 15% 以内,少数在 30% 以内,该方 法比较广泛地适用于不同的煤种,基本是可靠的.

4.3 煤粉浓度变化的影响和着火热

(1) 最小煤粉浓度

由于一次风中的空气量一般不会大于煤粉燃烧 当量比下的空气量(因为还需要有二次风、三次风

— 646 —



图 7 最佳煤粉浓度预测值与实验值的比较 Fig.7 Comparison of calculated and experimental data of optimal pulverized coal concentrations

等),因此当煤粉气流中每千克空气的煤粉质量浓度 为μ时,可以假设煤粉气流中空气刚好满足全部煤粉 的燃烧所需(因为这时刚好符合煤粉-空气的当量比 条件),则有

$$\mu V_{0,\mathrm{ar}} = 1 \tag{14}$$

其中燃烧所需的理论空气量为*V*_{0,ar},从而可以定义煤粉气流着火的最小煤粉浓度为

$$\mu_{\min} = 1/V_{0,\mathrm{ar}} \tag{15}$$

(2)着火供给热

一般煤粉气流着火热量被定义为将 1 kg 空气和 μkg 煤粉加热到着火温度所需吸收的热量^[21],采用 该方法得到的着火热将随煤粉浓度 μ线性增加,因此 需要精确计算供给热量然后才能获得最佳煤粉浓度, 这对于实际锅炉燃烧过程是比较困难的.

考虑到煤粉气流的内在着火供给热主要来源于 火焰反应区,本文提出将煤粉气流的着火热重新定义 为特定煤种单位质量煤粉气流可以供给的内在着火 燃烧热,即

$$q_{\rm ign} = \frac{\mu}{2(1+\mu)} (m_{\rm v} V_{\rm ar} Q_{\rm v} + \varepsilon_{\rm ch} F_{\rm C,ar} Q_{\rm ch})$$
(16)

式(16)右侧括号中两项分别为煤粉气流着火时 挥发分和少量焦炭燃烧所提供的着火热(其中右侧分 母中除以 2 代表只有一半燃烧热供给了煤粉气流的 预热热量).可以看出,当煤粉浓度 µ 增加时,µ/(1+ µ)虽然也有所增加,但是不会线性增加.式(16)分母 中若考虑了煤粉气流的比热,显然该式表示的含义即 为着火燃烧热释放后所能够提供的煤粉气流升温程 度(即火焰区进出口温差),显然该值越大,则煤粉气 流越容易着火,因为这时煤粉气流的燃烧温度将处于 更高水平,从而对应最佳煤粉浓度.所以,当煤种确 定后,上述内在着火供给热是判断煤粉气流着火状况 的核心因素.

(3) 着火供给热参量

在分析最佳煤粉浓度的存在原因时,为了比较不

同煤粉浓度下的着火供给热大小,理想化地认为煤粉 气流的挥发分析出量 (m_v) 和焦炭着火燃烧质量份额 (ϵ_{ch}) 均为定值(假设其都对应最佳煤粉浓度时的 值),从而煤粉浓度变化对于着火的影响特性就可以 简单地由式(17)决定

$$\overline{T}_{c} = \frac{\mu}{1+\mu} \tag{17}$$

无量纲量 \bar{r}_{c} 可以称为着火供给热参量. 当煤粉 浓度小于 μ_{opt} 时,式(17)表明随 μ 增加, \bar{r}_{c} 也不断增 加,但不会线性增加;当煤粉浓度达到最佳煤粉浓度 (μ_{opt})时,式(17)成为

$$\overline{T}_{c,opt} = \frac{\mu_{opt}}{1 + \mu_{opt}}$$
(18)

这时着火供给热参量达到最大. 在最佳煤粉浓 度下着火时,由于空气已经被挥发分和少量焦炭的着 火燃烧完全耗尽,再继续增加煤粉浓度,将不会提供 更多的燃烧热,因此当煤粉浓度大于 μ_{opt} 时,式(17) 就成为

$$\overline{T}_{c} = \frac{\mu_{opt}}{1+\mu}$$
(19)

由于这时分子 μ_{opt} 不变,显然随着煤粉浓度的增加, \bar{T}_{o} 将不断下降,从而使得 \bar{T}_{o} 在最佳煤粉浓度下处于最大值.

(4) 最大煤粉浓度

为了讨论煤粉浓度变化对于着火机制的影响,采 用以下方法估计煤粉气流的最大煤粉浓度,从而确定 煤粉浓度潜在的最大变化范围.

最小煤粉浓度由式(15)确定后,可以假设存在一 个最大煤粉浓度,这时煤粉气流的着火供给热参量与 最小煤粉浓度下的值相等,这是因为煤粉浓度大于最 佳浓度后再继续增加煤粉浓度,着火供给热将不断减 少,在最大煤粉浓度时,与最小煤粉浓度时相比,两 者均对应相同的最低着火热,因此最大煤粉浓度将 满足:

$$\frac{\mu_{\rm opt}}{1+\mu_{\rm max}} = \frac{\mu_{\rm min}}{1+\mu_{\rm min}}$$
(20)

因此最大煤粉浓度可以采用式(21)确定:

$$\mu_{\rm max} = \frac{\mu_{\rm opt}(1 + \mu_{\rm min})}{\mu_{\rm min}} - 1$$
(21)

(5) 算例

针对 Csaba 实验所用烟煤,根据式(15)和式(21) 可以计算得到最小、最大煤粉浓度为 0.112 kg(煤)/ kg(空气)和 4.20 kg(煤)/kg(空气).图 8 给出了着火 供给热参量随煤粉浓度的变化规律,可以看出该曲线

— 647 —

描述了最佳煤粉浓度的存在原因. 在实际煤粉火焰 中,锅炉还要送二次风和三次风,即实际一次风气流 的最小煤粉浓度要比理论值大得多;另外,考虑到煤 粉气流的输送,一般最大的煤粉浓度最多为 3~ 5kg(煤)/kg(空气),因此图中的最小、最大煤粉浓度 数据只是理论上的,实际的煤粉浓度变化范围比图中 要窄些.

值得注意的是,虽然图8在理论上解释了煤粉气 流存在最佳煤粉浓度的原因,但是在针对 Csaba 实验 所用烟煤的着火燃烧研究中,发现当煤粉浓度为µ_{out} 时,挥发分释放率约 40%;但当煤粉浓度为 μ_{min} 时, 挥发分实际释放率将增加至 90% 以上;而当煤粉浓 度为µ_{max}时,挥发分释放率将小于 10%. 可见,在实 际的煤粉气流着火中,当煤粉浓度降低时,为了实现 稳定着火,煤粉气流将"自适应"地使得煤粉预热的 时间适当延长,并使对应的一次预热区出口温度上 升,从而煤粉释放挥发分的份额将增加;直到对应最 小煤粉浓度(µ_{min})时,煤粉气流中几乎所有的挥发分 均释放出来用于煤粉着火,这时煤粉气流的着火将被 推迟. 当煤粉浓度增加时,将出现相反的情况,挥发 分释放份额将不断减小. 有趣的是, 对于确定的煤 种,虽然这时煤粉浓度发生大幅变化,但是 $\mu/(1+\mu)$ 值几乎保持为一个常量,这也间接说明对于确定的煤 种,其着火供给热参量(\bar{r}_{i})是不变的,从而对于浓淡 煤粉燃烧器设计带来方便. 当然, 着火供给热参量对 于不同煤种,特别是低挥发分煤,由于这时少量焦炭 着火燃烧增加的着火热变得重要,其适用性还需要深 入分析.



图 8 煤粉气流着火供给热参量随煤粉浓度的变化特性 Fig.8 Various heat supply parameters of pulverized coal flow ignition with pulverized coal concentrations

5 结 论

本文借鉴气体层流预混燃烧的分区着火机理,从 层流煤粉燃烧火焰分析入手,将煤粉气流着火过程分 为一次、二次预热区和着火反应区,对于不同区域的 热量衡算进行了解耦计算.煤粉气流在一次预热区 主要受到来自炉内的对流和辐射(外在着火供给热), 二次预热区主要接受后面着火反应区的导热(内在着 火供给热),反应区的热量主要来自于已经释放挥发 分和少量焦炭的燃烧热.本文认为二次预热区的出 口温度为煤粉气流的真实着火温度,其接近于煤粉单 颗粒的着火温度(该温度根据文献数据很容易确定); 并提出将煤粉气流单位质量获得的着火反应热作为 核心参数分析不同煤粉浓度时的着火转性,从而阐明 了煤粉气流分区着火机理,获得了不同浓度影响煤粉 气流着火的基本特性,并比较准确地预测出最佳煤粉 浓度.最后,提出描述煤粉浓度变化时的着火供给热 参量概念,将煤粉浓度影响着火特性的规律表达为

$$\overline{T}_{c} = \begin{cases} \frac{\mu}{1+\mu} & (\mu < \mu_{opt}) \\ \frac{\mu_{opt}}{1+\mu} & (\mu \ge \mu_{opt}) \end{cases}$$
(22)

这对于实际高浓度煤粉燃烧器的设计,带来较大的方便.

致 谢

作者感谢德国 RECOM 公司韩晓海博士提供了 300 MW 锅炉燃烧的数值模拟结果. 感谢研究生张乐 字、黄俊钦和孙岑等在模拟结果分析和制图、排版和 修订等方面的协助,以及与徐通模教授和李森研究员 的有益讨论.

符号表:

- A_b—反应区气流出口面积,m²;
- A_0 ——次预热区煤粉气流进口面积, m²;
- A.—二次预热区煤粉气流出口面积,m²;
- A_u——次预热区煤粉气流出口面积,m²;
- A_v —挥发分释放时阿累尼乌斯反应速率常数中的频率因子, s^{-1} ;
- $c_{p,a}$ —煤粉气流中空气定压比热,kJ/(kg・K);
- $c_{p,c}$ —煤粉气流中煤粉定压比热,kJ/(kg·K);
- $c_{p,g}$ —挥发分燃烧后热烟气定压比热,kJ/(kg・K);
- d_p---颗粒直径,m;
- E_v —挥发分释放的活化能, kJ/kmol;
- F_{C,ar}—煤粉工业分析的收到基焦炭质量份额;
- G_p —煤粉颗粒单位体积的质量浓度, kg/m³;
- k—煤粉的辐射吸收减弱系数;
- L—煤粉气流吸收辐射的平均射线行程,m;
- *m*—煤粉气流的质量流率,kg/s;
- \dot{m}_a —煤粉气流中空气的质量流率, kg/s;
- \dot{m}_{c} —煤粉气流中煤粉的质量流率, kg/s;
- m、—煤粉挥发分释放的质量份额;
- q。一反应区通过热传导进入二次预热区的热功率,kJ/s;

- \dot{q}_{con} —进入煤粉气流的对流加热功率, kJ/s;
- $\dot{q}_{\rm R}$ —进入煤粉气流的辐射加热功率, kJ/s;
- \dot{q}_{v} —煤粉已析出挥发分燃烧释放的热功率,kJ/s;
- q_{ign} —单位质量煤粉气流可以供给的着火燃烧热,kJ/kg;
- Q—实际快速加热条件下煤粉挥发分释放量与工业分析挥发 分量间的质量关系常数;
- $Q_{\rm com}$ —煤粉气流中挥发分和少量焦炭的燃烧放热量,kJ/kg;
- Q_{con} —进入煤粉气流的对流加热量, kJ/kg;
- $Q_{\rm ex}$ —进入煤粉气流的其它外在加热量, kJ/kg;
- $Q_{\text{net,ar}}$ —煤粉的收到基低位发热量,kJ/kg;
- $Q_{\rm rad}$ —进入煤粉气流的辐射加热量,kJ/kg;
- Q_v —挥发分发热量,kJ/kg;
- R—通用气体常数, 8.314 kJ/(kmol・K);
- t—从过程开始的时间,s;
- T—绝对温度,K;
- T_b—反应区气流出口温度,K;
- T_0 —一次预热区煤粉气流进口温度,K;
- T_{i,p}—单颗粒煤粉的着火温度,K;
- T_u—一次预热区煤粉气流出口温度,K;
- \bar{T}_{c} —无量纲着火供给热参量;
- u_b—反应区气流出口速度,m/s;
- u_0 ——次预热区煤粉气流进口速度,m/s;
- u, —二次预热区煤粉气流出口速度, m/s;
- u,—一次预热区煤粉气流出口速度,m/s;
- V一在时间 t 内煤粉颗粒失重释放出的挥发分的质量百分数 (占煤粉的质量分数,下同),%;
- *V*。—挥发分在实际反应器内可以释放挥发分的最大质量百分数,%;
- Var —煤粉工业分析的收到基挥发分质量百分数,%;
- V。—在实际反应器内,由工业分析得出的焦炭仍能释放(残留 在焦炭中)的挥发分质量份额;
- V。——工业分析的煤释放挥发分的质量百分数,%;
- $V_{0,ar}$ —煤粉燃烧所需的理论空气量, kg/kg;
- $V_{0,ch}$ —煤粉中固定碳燃烧所需的理论空气量, kg/kg;
- $V_{0,v}$ —挥发分燃烧所需的理论空气量, kg/kg;
- $\varepsilon_{\rm b}$ —隔热圆锥体的壁面黑度,文中取 0.8;
- $\varepsilon_{\rm f}$ —火焰黑度,文中取 0.9;
- ε_{ch} —参与煤粉气流着火燃烧的少量焦炭质量份额;
- μ 一煤粉气流中每千克空气中煤粉的质量浓度,kg(煤)/kg(空 气);
- μ_{opt} 一最佳煤粉浓度,kg(煤)/kg(空气);
- $\rho_{\rm b}$ 一反应区出口热气流的密度, kg/m³;
- ρ_0 ——次预热区煤粉气流中空气的进口密度, kg/m³;
- $\rho_{\rm p}$ 一颗粒密度,kg/m³;
- $\rho_{\rm u}$ 一二次预热区煤粉气流中气体的出口密度, kg/m³;
- σ —黑体辐射常数(斯蒂芬-玻尔兹曼常数), 5.67 × 10 W/(m²·K⁴).

参考文献:

[1] 菲尔德,古 尔,摩 根,等.煤粉燃烧[M].章明

川, 许方洁, 许传凯等译. 北京: 水利电力出版社, 1983: 63-163.

Field M A, Gill D W, Morgan B B, et al. *Combustion* of *Pulverised Coal* [M]. Translated by Zhang Mingchuan, Xu Fangjie, Xu Chuankai, et al. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1983: 63-163 (in Chinese).

- [2] 斯穆特,普拉特. 粉煤燃烧与气化[M]. 傅维镳,卫 景彬译. 北京:清华大学出版社, 1983: 168-358.
 Smoot L D, Pratt D T. *Pulverized Coal Combustion and Gasification*[M]. Translated by Fu Weibiao, Wei Jingbin. Beijing: Tsinghua University Press, 1983: 168-358 (in Chinese).
- [3] 徐旭常,王云山,林浩,等.煤粉予燃室锅炉的试验研究[J].清华北大理工学报,1974(12):53-70. Xu Xuchang, Wang Yunshan, Lin Hao, et al. Experiments and research on pulverized-coal-fired precombustion chamber [J]. *Journal of Technology of Tsinghua University and Beijing University*, 1974(12):53-70(in Chinese).
- [4] Xu Xuchang, Zhou Lixing. Proceedings of the 3 rd International Symposium on Coal Combustion: Science and Technology[M]. Beijing, China: Science Press, 1995.
- [5] 周怀春,孙丹萍,方庆艳,等. 煤粉稳燃技术的发展 历程和展望[J]. 动力工程,2008(5):657-663,681.
 Zhou Huaichun, Sun Danping, Fang Qingyan, et al. Development and prospect of combustion stabilizing technologies of pulverized coal[J]. *Journal of Power Engineering*, 2008(5): 657-663, 681 (in Chinese).
- [6] Syred N, Beer J M. Combustion in swirling flows: A review[J]. Combustion and Flame, 1974, 23(2): 143-201.
- [7] 曾瑞良,徐旭常. CN 85100045 带根部二次风的煤粉 预燃室燃烧器[P]. 1985-04-01.
 Zeng Ruiliang, Xu Xuchang. CN 85100045 Pulverized Coal Precombustion Chamber Burner with Root Secondary Air[P]. 1985-04-01 (in Chinese).
- [8] 何佩鏊,赵仲琥,秦裕琨.煤粉燃烧器设计及运行
 [M].北京:机械工业出版社,1987:198-321,536-539.

He Pei'ao, Zhao Zhonghu, Qin Yukun. *Design and Operation of Pulverized Coal Burner*[M]. Beiing: China Machine Press, 1987: 198-321, 536-539 (in Chinese).

[9] 周小天,徐通模,惠世恩.变异煤粉浓度燃烧器 CN 2046975[P].1989-01-14.

— 649 —

燃烧科学与技术

Zhou Xiaotian, Xu Tongmo, Hui Shi'en. Distorted Pulverized Coal Concentration Burner CN 2046975[P]. 1989-01-14 (in Chinese).

- [10] Xu Tongmo, Hui Shi'en, Liu Zhongjun, et al. Study on the burners with distorted PC concentration [C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Coal Combustion: Science and Technology. Beijing: China Machine Press, 1991: 578-583.
- [11] 秦裕琨,孙绍增,吴少华.浓缩煤粉燃烧技术的发展
 [J]. 燃烧科学与技术, 1995, 1(1): 43-48.
 Qin Yukun, Sun Shaozeng, Wu Shaohua. Evolution of combustion techniques with fuel-rich coal-air stream[J].
 Journal of Combustion Science and Technology, 1995, 1(1): 43-48 (in Chinese).
- [12]张海,吕俊复,岳光溪,等.若干煤粉燃烧的设计 思想分析[J].锅炉技术,2007,38(6):36-41.
 Zhang Hai,Lü Junfu,Yue Guangxi, et al. On design analysis for pulverized coal burners[J]. *Boiler Technol*ogy, 2007, 38(6): 36-41 (in Chinese).
- [13] 刘鹏中,周建明,牛 芳,等. 我国预燃室旋流煤粉 燃烧器研究进展[J]. 煤质技术, 2021, 36(1): 20-26. Liu Pengzhong, Zhou Jianming, Niu Fang, et al. Research progress of swirl pulverized coal burner with precombustion chamber in China[J]. *Coal Quality Technol*ogy, 2021, 36(1): 20-26(in Chinese).
- [14] 徐旭常,王云山,金茂庐,等.关于煤粉火焰稳定性 和煤粉预燃室及火焰稳定船的作用[J].工程热物理学 报,1988(4):384-389.
 Xu Xuchang, Wang Yunshan, Jin Maolu, et al. On

pulverized coal flames stabilization and functions of PC precombustion chamber[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 1988(4): 384-389(in Chinese).

- [15] Smoot L D, Horton M D. Propagation of laminar pulverized coal-air flames[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 1977, 3: 235-258.
- [16] 徐通模,惠世恩. 燃烧学[M]. 北京:机械工业出版 社,2011: 200-274.
 Xu Tongmo, Hui Shi'en. *Combustion*[M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 200-274 (in Chinese).
- [17] Sakai M, Tokuda K, Ide Y, et al. Tangential corner fired boiler with low volatile matter content coals[J]. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 1986, 23 (2): 122-131.
- [18] 阎维平,徐通模,许晋源.煤粉气流着火存在最佳煤 粉浓度的试验研究[J].动力工程,1994,14(4):28-32.

Yan Weiping, Xu Tongmo, Xu Jinyuan. Experimental

study on the existence of an optimum pulverized coal concentration in an air flow at ignition[J]. *Journal of Power Engineering*, 1994, 14(4): 28-32 (in Chinese).

- [19] 韩才元,徐明厚,周怀春,等.煤粉燃烧[M].北京:科学出版社,2001:221-336.
 Han Caiyuan, Xu Minghou, Zhou Huaichun, et al. *Combustion of Pulverized Coal*[M]. Beijing: Science Press, 2001: 221-336(in Chinese).
- [20] 宋国良. 高浓度煤粉着火低 NO_x 排放特性的机理及试验研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006: 39-52.
 Song Guoliang. Experimental Study and Mechanism of Characteristics of Low NO_x Emission During the Dense Phase Pulverized Coal Ignition[D]. Hangzhou : Zhejiang University, 2006: 39-52 (in Chinese).
- [21] 阎维平,徐通模,许晋源. 煤粉气流着火存在最佳煤粉浓度的机理分析[J]. 华北电力学院学报, 1995, 22(2): 28-32.
 Yan Weiping, Xu Tongmo, Xu Jinyuan. Mechanism

analysis for optimal pulverized-coal concentration ignition of primary air stream [J]. *Journal of North China Institute of Electric Power*, 1995, 22(2): 28-32 (in Chinese).

- [22] Wei X L, Xu T M, Hui S E. Burning low volatile fuel in tangentially fired furnaces with fuel rich/lean burners[J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(5): 725-735.
- [23] 王学斌,张利孟,谭厚章,等.高浓度煤粉火焰中煤 质对最佳煤粉浓度的影响[J].工程热物理学报, 2014,35(2):392-395.
 Wang Xuebin, Zhang Limeng, Tan Houzhang, et al. Effect of coal quality on the optimal fuel concentration in high-concentration pulverized coal flame[J]. Journal of

Engineering Thermophysics, 2014, 35(2): 392-395 (in Chinese).
[24] 特纳斯. 燃烧学导论: 概念与应用(第 3 版)[M]. 姚

- 强,李水清,王 宇等译.北京:清华大学出版社, 2015: 216-253.
 Turns S R. An Introduction to Combustion: Concepts and Applications (3rd Edition) [M]. Translated by Yao Qiang, Li Shuiqing, Wang Yu, et al. Beijing: Tsinghua University Press, 2015: 216-253 (in Chinese).
- [25] Rockwell S R, Rangwala A S. Modeling of dust air flames[J]. *Fire Safety Journal*, 2013, 59: 22-29.
- [26] Vázquez-Espí C. Laminar flame propagation in a premixed particle cloud: Effect of vaporization rate[J]. Combustion Science and Technology, 2020, 192(5):

804-831.

- [27] Horton M D, Goodson F P, Smoot L D. Characteristics of flat, laminar coal-dust flames[J]. Combustion & Flame, 1977, 28: 187-195.
- [28] Goshayeshi B, Sutherland J C. A comparison of various models in predicting ignition delay in single-particle coal combustion[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161: 1900-1910.
- [29] Vascellari M, Tufano G L, Stein O T, et al. A flamelet/progress variable approach for modeling coal particle ignition[J]. *Fuel*, 2017, 201: 29-38.
- [30] 许晋源,徐通模. 燃烧学[M]. 北京: 机械工业出版 社, 1980: 160-198.
 Xu Jinyuan, Xu Tongmo. *Combustion*[M]. Beijing: China Machine Press, 1980: 160-198 (in Chinese).
- [31] 杨世铭. 传热学(第二版)[M]. 北京:高等教育出版 社,1987: 307-339.
 Yang Shiming. *Heat Transfer*(2nd Edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 1987: 307-339(in Chinese).
- [32] 盛昌栋,齐 宏,徐明厚,等.煤粉气流着火方式与 煤粉浓度的关系[J].电站系统工程,1995,11(3): 31-37.

Sheng Changdong, Qi Hong, Xu Minghou, et al. Relationship between the ignition modes and the coal concentrations in coal clouds[J]. *Power System Engineering*, 1995, 11(3): 31-37 (in Chinese).

附录 A

煤粉气流一次预热区的质量平衡与 能量平衡计算

文中图 4 给出煤粉气流着火过程的分区模型. 对于质量平衡,进入控制体的质量流率为

$$\dot{m} = \dot{m}_{a} + \dot{m}_{c} = u_{0}\rho_{0}A_{0}(1+\mu_{0})$$
 (A1)

式中: u₀为煤粉质量浓度,表示煤粉气流中单位质量 空气所携带的煤粉质量; A₀为煤粉气流进口面积.

离开一次预热区控制体的质量流率为

 $\dot{m} = u_u \rho_u A_u (1 + \mu_0)$ (A2) 式中: A_u 为煤粉气流出口面积. 虽然这时挥发分释放 会造成气体质量份额增加和颗粒物质量份额减少, 但 是为了能量方程的计算简便, 仍然认为离开控制体时 煤粉气流中的煤粉质量浓度为 μ_0 .

对于能量平衡,考虑到进出口温度和气流比热的

变化,进入控制体的能量流:

$$\dot{q}_{\rm con} = u_0 \rho_0 A_0 (c_{p,a} + \mu_0 c_{p,c}) T_0$$

式中: c_{p,a}和 c_{p,c}分别为空气和煤粉的比热, 计算时空 气比热随温度升高, 而煤粉比热可作为已释放挥发分 和焦炭的混合物比热, 也随温度有所增加.

离开一次预热区控制体的能量流:

$$\begin{split} \dot{q}_{R} &= u_{u}\rho_{u}A_{u}(c_{p,a} + \mu_{0}c_{p,c})T_{u} \\ 这样可以给出以下能量平衡方程 \\ \dot{q}_{R} + \dot{q}_{con} &= u_{u}\rho_{u}A_{u}(c_{p,a} + \mu_{0}c_{p,c})T_{u} - \\ & u_{0}\rho_{0}A_{0}(c_{p,a} + \mu_{0}c_{p,c})T_{0} \end{split}$$
(A3)

正文中能量平衡方程(2)左侧只给出辐射加热项 表达式,没有考虑对流加热项.

附录 B

煤粉气流预热区内挥发分的释放计算

将预热区内煤粉的热解考虑为一步简单反应^[2], 挥发分的释放方程为

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = (V_{\infty} - V)A_{\mathrm{v}}\exp\left(-\frac{E_{\mathrm{v}}}{RT}\right) \tag{B1}$$

式中: *V* 为在热解时间 *t* 内煤粉颗粒因失重释放出的 挥发分的质量百分数(占煤粉的质量百分数); *T* 为煤 粉颗粒的终温; *V*。为煤中挥发分在反应器内快速升 温时可以释放出的最大挥发分质量百分数,用式 (B2)表示^[1-2]

$$V_{\infty} = Q(1 - V_{\rm c})V_{\rm p} \tag{B2}$$

式中: *V*_p为工业分析的煤释放挥发分的质量百分数, 考虑到在实际反应器内由工业分析得出的挥发分无 法全部释放,有一小部分仍将残留在焦炭中; *V*_c为这 部分焦炭仍能释放的挥发分的质量分数(占挥发分的 质量),对于非膨胀性煤*V*_c可取为 0.15^[1-2];考虑到在 实际反应器的快速加热条件下,*Q*为煤粉挥发分释 放量与工业分析挥发分量的质量比关系,对于一般的 烟煤,*Q*取值为 1.26~1.44^[1],而对于无烟煤或贫煤, 此值要小一些.

将挥发分的释放方程进行积分,即可得到一次预 热区内煤粉挥发分的释放量:

$$m_{\rm v} = \frac{V}{V_{\infty}} = 1 - \exp(-kt) \tag{B3}$$

其中挥发分释放速率为

$$k = A_{\rm v} \exp\left(-\frac{E_{\rm v}}{RT}\right) \tag{B4}$$

(责任编辑:梁 霞)