

基于数值模拟的制粉系统乏气转移装置防爆研究

郎志强¹, 郭伟伟¹, 袁 博¹, 叶康军¹, 顾冬峰¹, 张韵琴², 赵伶玲^{2*}

(1. 国能神皖马鞍山发电有限责任公司, 安徽 马鞍山 243051; 2. 东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 211102)

摘要:【目的】燃煤机组制粉系统乏气转移时, 高挥发分的煤粉在乏气的高速带动下, 容易在氧的参与下形成粉尘云而产生爆炸风险。为降低贫煤改烧烟煤后中间储仓式制粉系统乏气转移装置的爆燃风险, 提升制粉系统安全性能, 需要合理设置一次风箱的流速和底部倾角。【方法】本文以某电厂 330 MW 机组乏气转移系统为研究对象, 基于数值模拟分析了其一次风箱内部的流场、温度场; 研究了一次风流速由 7 m/s 减小至 1 m/s 对挥发分析出和富集的影响; 同时设计 11 种不同底部倾角 α 的风箱型线, 对比其对积粉风险区域的流场优化效果。【结果】研究表明, 乏气转移至一次风箱后, 底部存在低速区易导致煤粉积存, 且热风沿壁面下行形成局部高温区, 最高温度达 329 °C, 超过煤粉热解温度 282 °C, 为爆燃提供了条件; 一次风流速对挥发分富集影响显著, 风速降至 2 m/s 时风箱内 CO 浓度达到峰值, 保持 3~7 m/s 风速可平衡挥发分析出与带出, 有利于系统安全; 风箱底部倾角 α 影响低速区体积, 随 α 增大, 低速区体积先减小后增大, 当 $\alpha=8.5^\circ$ 时体积达到最小值 0.132 m³。【结论】研究结果为制粉系统乏气转移装置的运行参数调整与结构优化提供量化依据, 对类似制粉系统的流场研究及安全隐患治理具有借鉴意义。

关键词: 制粉系统; 数值模拟; 乏气转移; 一次风箱; 流场优化

中图分类号: TK01; TM621

文章编号: 1674 - 8069(2026)02 - 0266 - 09

文献标志码: A

DOI 编号: 10.19944/j.eptep.1674 - 8069.2026.02.009

【引用本文格式】郎志强, 郭伟伟, 袁博, 等. 基于数值模拟的制粉系统乏气转移装置防爆研究[J]. 电力科技与环保, 2026, 42(2): 266-274.

LANG Zhiqiang, GUO Weiwei, YUAN Bo, et al. Research on explosion-proof of exhaust gas transfer device in pulverizing system based on numerical simulation[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2026, 42(2): 266-274.

Research on explosion-proof of exhaust gas transfer device in pulverizing system based on numerical simulation

LANG Zhiqiang¹, GUO Weiwei¹, YUAN Bo¹, YE Kangjun¹, GU Dongfeng¹, ZHANG Yunqin², ZHAO Lingling^{2*}

(1. Guoneng Shenwan Ma'anshan Power Generation Co., Ltd., Ma'anshan 243051, Anhui China; 2. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 211102, Jiangsu China)

Abstract: [Objective] When the exhaust gas of the coal-fired unit pulverizing system is transferred, the high-volatile pulverized coal is driven by the exhaust steam at a high speed, and it is easy to form a dust cloud with the participation of oxygen and cause an explosion risk. In order to reduce the deflagration risk of the exhaust gas transfer device of the intermediate storage bunker pulverizing system after the lean coal is changed to bituminous coal, and improve the safety performance of the pulverizing system, it is necessary to set the flow rate and bottom inclination angle of the primary air box reasonably. **[Methods]** Taking the exhaust gas transfer system of a 330 MW unit in a power plant as the research object, numerical simulation was used to analyze the flow field and temperature field inside the primary air box. The influence of reducing the primary air velocity from 7 m/s to 1 m/s on the devolatilization and enrichment of volatile matter was studied. Meanwhile, 11 types of air box profiles with different bottom inclination angles (α) were designed to

收稿日期: 2025-10-23 录用日期: 2026-02-12

Received: 2025-10-23 Accepted: 2026-02-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(52376098); 国能安徽公司科技创新项目(SWMAS-FW4-[2024]14)

compare their flow field optimization effects on the pulverized coal accumulation risk areas. **[Results]** The research shows that after the exhaust gas is transferred to the primary air box, a low-velocity zone exists at the bottom, which is prone to pulverized coal accumulation. Moreover, the hot air flows downward along the wall to form a local high-temperature zone with a maximum temperature of 329 °C, exceeding the pyrolysis temperature of pulverized coal (282 °C), which provides conditions for deflagration. The primary air velocity has a significant impact on the enrichment of volatile matter: when the wind speed decreases to 2 m/s, the CO concentration in the air box reaches its peak. Maintaining a wind speed of 3-7 m/s can balance the devolatilization and carry-over of volatile matter, which is beneficial to system safety. The bottom inclination angle (α) of the air box affects the volume of the low-velocity zone: as α increases, the volume of the low-velocity zone first decreases and then increases, reaching a minimum of 0.132 m³ when $\alpha = 8.5^\circ$. **[Conclusion]** The research results provide a quantitative basis for the adjustment of operating parameters and structural optimization of the exhaust gas transfer device in the pulverizing system, and have reference significance for the flow field research and potential safety hazard control of similar pulverizing systems.

Key words: pulverizing system; numerical simulation; exhaust air transfer; primary air box; flow field optimization

0 引言

为了适应我国新型电力系统的发展,现役燃煤发电机组必须提高灵活性以实现安全可靠、高效调节和智能运行^[1],其中运行及燃料灵活性则是其重要的基础之一^[2]。在此形势下,相当多的设计燃烧贫煤的机组通过改造而掺烧烟煤甚至全烧烟煤^[3-5]。相较于贫煤,烟煤一般廉价易得,燃烧特性好,燃用烟煤可降低发电的燃料成本、扩大机组的燃料适应范围而增强燃料灵活性,且燃用烟煤可强化锅炉的低负荷稳燃能力而增加机组运行灵活性^[6]。贫煤机组锅炉较多地配钢球磨煤机中间储仓热风送粉的制粉系统。为了燃用烟煤,制粉系统可替换成直吹式,但实际应用一般是对原制粉系统进行低成本的改造。考虑烟煤水分一般比贫煤高得多,制粉干燥出力要求高;烟煤挥发分高,制粉系统中煤粉爆燃风险高^[7-8]。因此,为适应掺烧或改烧烟煤时制粉系统及锅炉安全经济运行的要求,在保留原有中间储仓系统的基础上,制粉系统改造为炉烟干燥、乏气热风复合送粉的系^[9-11]统,在中国电厂有较广泛的应用^[3-5,12-15]。乏气热风复合送粉是将制粉乏气热风混合后携带煤粉进入锅炉,并适应煤粉燃烧对一次风温、氧浓度的需要,为此系统设置了乏气转移系统(见图1),不同煤种或在不同制粉系统之间可以进行乏气的灵活切换。

中间储仓式制粉系统处理烟煤,发生煤粉爆燃

的风险高。制粉系统的煤粉爆燃取决于煤的特性和系统中煤粉及可燃物浓度、温度、氧浓度^[16-17]、点火源^[18]、气固接触面积^[19-20]、空间密闭性^[21]等,十分复杂。上述的乏气转移系统中,乏气所含的细煤粉易氧化,乏气和热风混合后其中的氧浓度高且热风温度高,在混合不佳时局部温度高,因而发生煤粉爆燃的风险高。某电厂330 MW机组的中间储仓式制粉系统改造后曾发生了多次爆燃事故,其中乏气转移系统是几次事故的风险点,严重影响制粉系统和机组的安全经济运行。因而需要对乏气转移系统的设计和运行进行研究和优化,以降低其爆燃风险。

国内外学者对制粉系统的煤粉爆燃问题进行了长期、大量的研究。近年来有相当数量的学者基于实验对制粉系统中煤粉沉积^[22-25]、堆积氧化自燃^[27]及其作为爆燃着火源的条件^[28]进行深入的系统的研究,基于数值模拟对制粉系统中气固两相流动、挥发分析出、煤粉氧化等过程和设备及系统运行的影响^[29]进行了深入分析。尽管如此,对于上述的贫煤改烧烟煤的乏气热风复合送粉中间储仓式制粉系统的爆燃风险及其防范,未见专门的针对性研究。因此,本文以某电厂330 MW燃煤机组的中间储仓式制粉系统为对象,对乏气热风复合送粉系统进行研究,主要应用数值模拟研究的方法,对重点风险区域乏气转移系统的一次风箱及其连接管道中的流场、温度场等进行分析,并研究乏气、热风

混合和风箱结构的影响,为降低制粉系统的安全隐患提供指导,同时为类似的制粉系统内部流场研究及改造提供借鉴。

1 研究方法

1.1 研究对象

本文研究对象为某燃煤电厂330 MW机组燃用贫煤的中间储仓式热风送粉制粉系统,其设备主要包括埋刮板给煤机、离心式排粉机、筒式钢球磨煤机、齿索式输粉机、煤粉仓、原煤仓、粗粉分离器、子母式细粉分离器等。现运行煤种已由原来的贫煤转换为掺烧或全烧烟煤,相应地,原制粉系统已改造为热炉烟/热风干燥、乏气热风复合送粉,而磨煤机和制粉系统的样式保持不变,其特点是具有乏气转移系统,两股乏气共用一个一次风箱,运行时仅一股乏气转移至一次风箱内部,与热风混合进行送粉,而未通入一次风箱的一股乏气作为三次风进入炉膛内辅助燃烧。

对制粉系统历史爆燃事故的分析发现乏气转移系统为主要的风险区域之一。因此,本文研究着重于乏气转移系统,对该区域的爆燃风险及其防控进行数值模拟研究,其物理模型如图1所示。图1所示工况下A排粉风机出口的乏气一部分通过再循环风阀门去磨煤机,另一部分进入三次风管内入炉参与燃烧;B排粉风机出口的乏气一部分进入磨煤机再循环,另一部分转移至一次风箱内部与一次风箱输入的热风混合后,从一次风箱下方的八根出口管道进入炉燃烧。

1.2 燃料性质

通过现场勘测,取细粉分离器后的煤粉进行检测和热重分析,得到的煤粉的特性列于表1,其热重分析结果如图2所示。

由表1可知,该机组运行所用煤种具有高挥发分,根据《DL/T 466—2017》计算得到其煤粉爆炸指数为2.1,属于较易爆煤种,且乏气中所含煤粉为细煤粉,粒径 $5\sim 30\ \mu\text{m}$,含氧量 $8\%\sim 12\%$,乏气转移系统有较高的煤粉爆炸风险。而且一次风箱的煤粉是高挥发分、低水分类型,其自燃温度低^[26],因此一次风箱等中若存在积粉(如启停时)极易诱发爆炸。

由图2热重分析结果可知,282℃时开始脱氧、热分解,398℃时着火燃烧,519℃时燃尽,最大燃烧速率出现在461℃时,为5.9%/min。对热重分析

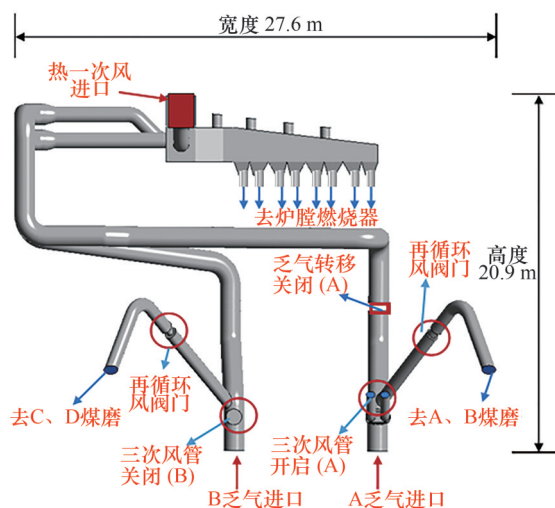


图1 乏气转移系统及模拟流线总览图

Figure 1 Overview of exhaust air transfer system and flow line simulation

数据进行动力学分析,可得出煤粉在热解、燃烧时的活化能分别为79.54 kJ/mol和116.31 kJ/mol,指前因子分别为 $155\ \text{s}^{-1}$ 和 $1.16\times 10^5\ \text{s}^{-1}$,用于后续数值模拟计算。

1.3 数值模拟方法及计算工况

本文应用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的方法,对制粉系统的乏气转移装置内的流动、传热传质及反应等进行数值研究。CFD模型中,采用Navier-Stokes方程描述流动的动量和质量传输^[30],Realizable $k-\varepsilon$ 模型描述气相湍流,气固耦合基于欧拉-拉格朗日方法^[31],视气相为连续相,颗粒为离散相,颗粒运动采用随机轨道模型描述^[32],煤粉的挥发分析出采用双步竞争反应速率模型,热解开始温度设定282℃,挥发分氧化采用有限速率/涡耗散模型,并根据实际情况考虑了主要的化学反应,动力学参数^[33-34]列于表2,辐射换热模拟采用DO模型描述,模型计算采用有限体积法求解。

根据实际结构和尺寸,建立了1:1的乏气转移系统三维几何模型,其网格划分如图3所示,在乏气管道、一次风箱等区域采用六面体结构化网格,而管道连接使用的方圆接头等少部分区域四面体的非结构化网格,考虑到一次风箱入口处有多股流体涌入汇合,对此处网格进行了一定程度的加密。

根据系统的实际运行数据对计算工况的主要运行参数进行设置:两乏气入口流速为25 m/s,温度为91℃,热风入口流速为7 m/s,温度为337℃。A、

表 1 煤粉的特性
Table 1 Properties of pulverized coal

材料	工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net,d}}/(\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	煤粉粒径 $D_{50}/\mu\text{m}$	
	M_{ad}	A_{d}	V_{daf}	FC_{d}	O_{daf}	C_{daf}	H_{daf}	N_{daf}	S_{daf}		一次风	乏气
煤粉	3.87	25.76	37.51	46.4	14.54	78.32	4.93	1.43	0.78	22.16	30.8	13.5

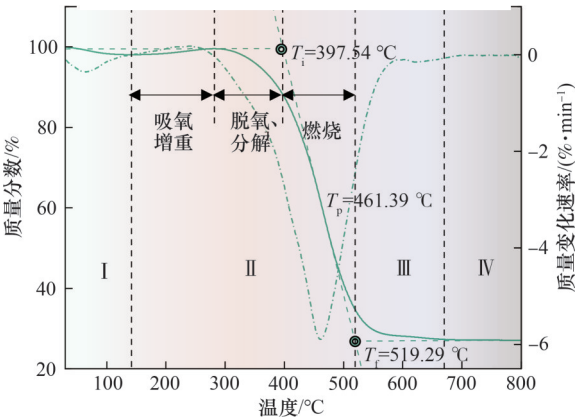


图 2 煤粉的 TG-DTG 曲线图
Figure 2 TG-DTG curves of pulverized coal

表 2 气化反应动力学参数
Table 2 Gasification reaction kinetics parameters

化学反应	$A/(\text{s}^{-1})$	$E/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$
$\text{mv_vol} + 1.706 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 1.543\text{H}_2\text{O}$	2.1×10^{11}	2.01×10^8
$\text{C}(\text{s}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	3.0×10^2	1.30×10^8
$\text{C}(\text{s}) + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$	2.2×10^3	2.20×10^8
$\text{C}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$	1.1×10^3	1.82×10^8
$\text{CO} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	3.2×10^{12}	1.67×10^8
$\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	2.5×10^{16}	1.67×10^8

注:mv_vol 定义为煤种的挥发分。

B 再循环风的阀门开度有一定差异,分别为 48.4%、29.1%。

1.4 网格无关性和模型可靠性验证

网格数量对 CFD 计算速度和精度有重要影响,本文设计了 4 种网格方案进行网格无关性验证,网格数量分别约为 33 万、43 万、53 万和 63 万,主要区别在于一次风箱以及一些方圆接口处的网格疏密不同。计算后,在一次风箱内部某处取直线,其上分布 100 个样本点,对这些样本点上的速度进行取值,结果如图 4 所示。由图 4 可知,53 万与 63 万网格的计算结果(取样线上的速度分布)基本一致,而它

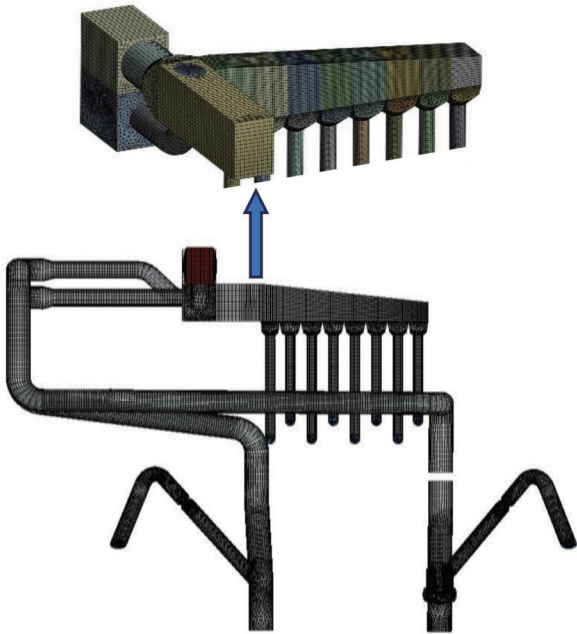


图 3 乏气转移系统网格划分
Figure 3 Grid division of exhaust air transfer system

们与 43 万、33 万网格数的计算结果则有一定差异,为了兼顾计算的准确性与计算速度,最终采用 53 万网格数进行后续计算。

现场运行数据显示,一次风箱出口平均温度为 145 ℃,风箱内部靠近上壁面温度为 136 ℃,数值模拟计算得到的对应温度为 174 ℃和 152 ℃,与实际值相差仅分别为 7%、4%。这些比较表明,本文所建立的数值模型和计算方法是准确和可靠的。

2 结果与讨论

本节对乏气转移系统的流动状态进行了数值模拟研究,分析其内部流场、温度场对煤粉沉积、热量传递等爆燃诱因的影响,为运行调整和结构优化提供依据^[35]。

2.1 一次风箱内部速度场

一次风箱内部整体的速度场分布如图 5 所示,风箱内部不同垂直截面速度场分布如图 6 所示。由

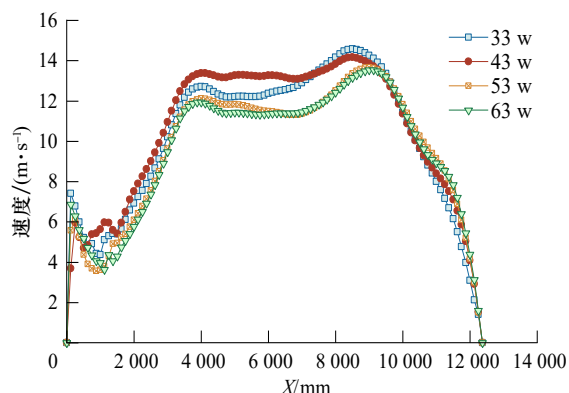


图4 网格无关性验证

Figure 4 Grid independence verification

图5和6综合可知,不同垂直截面的流速分布有一定差异。 $Y = -0.5$ m平面B乏气管道内部流体速度相对较高;进入一次风箱后,高速气流向 $Y = 0$ m平面偏移,而由于风箱内部区域的体积迅速扩大,流速降低;在 $Y = 0.5$ m平面,由于无A乏气通入,整体流速较低。同时,在乏气管道与一次风箱接口的下方区域附近可观察到一个低速区,根据细小颗粒的流动特性,判断该低速区可能是煤粉沉积聚热从而诱发爆燃的重点区域。

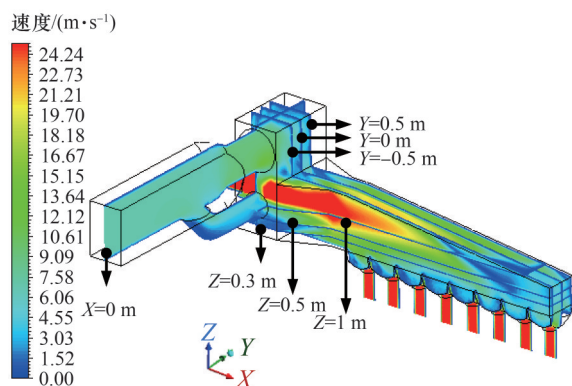


图5 一次风箱内整体速度场分布

Figure 5 Overall velocity field distribution in primary air box

2.2 一次风箱内部温度场

图7为一次风箱内部温度云图。由图7(a)可知,一次风箱内部热风入口处为高温区,这主要是因为热风温度高。

然而,在一次风箱底部也存在一定的高温区,范围大致在距离一次风箱底部0.2~0.7 m处,温度最高323 ℃位于0.3 m处,最高温度显著超过一次风箱

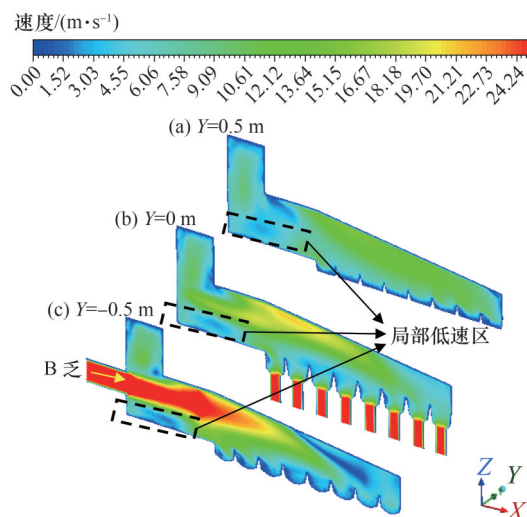


图6 风箱内不同垂直截面速度场分布

Figure 6 Velocity field distribution in different sections of primary air box

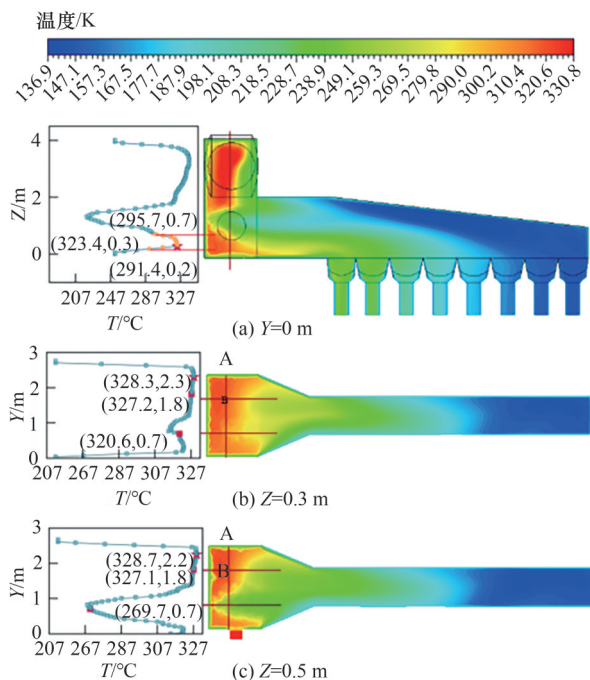


图7 一次风箱内部温度场分布

Figure 7 Temperature field distribution in the primary air box

平均温度的运行控制值(220 ℃)。 $Z = 0.3$ m平面最高温度达328 ℃, A、B乏气入口所对应的位置温度分别为327 ℃、321 ℃(图7(b)); $Z = 0.5$ m平面最高温度达329 ℃, A、B乏气入口所对应的位置温度分别为323 ℃、270 ℃,可见A乏气入口附近的高温区域范围更大。这是因为在A侧乏气转移管关闭的情

况下,温度较高的热风涌入后,首先冲击壁面,然后顺壁面向下流动至A乏气管道与一次风箱接口附近,且无冷乏气与其混合,使该处温度升高。

结合速度场的模拟结果及煤粉自身性质可知,在一次风箱中乏气、热风混合区域的底部,存在颗粒较易沉积的低速区,温度也相对较高,最高处温度超过煤粉热解温度。如果煤粉在此处沉积积聚,则易于热解析出挥发分,而挥发分的存在会影响煤粉的爆炸极限范围,更容易发生爆燃^[36-38]。

2.3 运行参数调整和结构优化

本节在风箱内流场、温度场模拟结果的基础上,进一步分析了一次风流速对煤粉沉积、挥发分析出和富集的影响,探索适合于一次风箱的安全风速范围,并探索通过风箱结构的优化措施,避免煤粉沉积和降低爆燃风险^[39]。

2.3.1 一次风流速对CO生成和富集的影响

计算模拟了一次风箱内部的流动以及挥发分(CO)的富集状况随一次风流速的变化,其结果如图8所示。由图8可知,随着一次风流速的降低,风箱内的平均流速和平均温度均显著降低;而平均CO质量分数在一次风流速从7 m/s降低到3 m/s时略有上升,当速度降低至2 m/s时风箱内的CO质量分数明显升高。这是因为热风是风箱内部的主要热量、氧量来源,当一次风流速降低时热风携带的热量和风箱内部气流量减少,温度和流速降低,而温度和流速分别对风箱内部的挥发分的产生和富集具有一定的作用:当温度升高时挥发分析出增多,而流速升高时挥发分更容易被气流带出风箱而不富集。因此,当一次风流速为3~7 m/s时挥发分的产生和富集处于相对平衡状态,即挥发分析出后能及时被带出风箱;而当一次风流速降低至2 m/s以下时,虽然

挥发分析出减少,但风箱内气体流速较低,更有利于挥发分富集,CO体积分数显著上升。

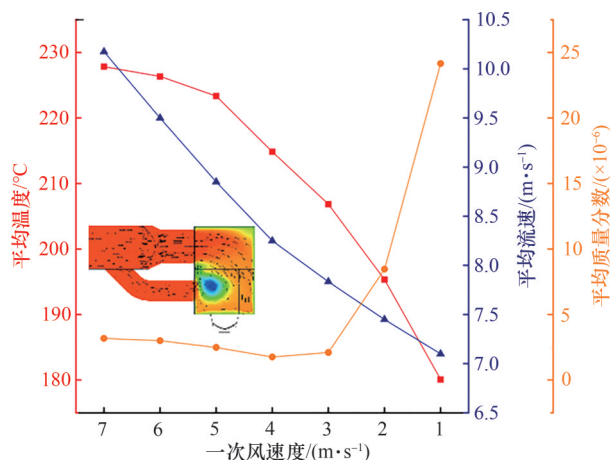


图8 不同一次风流速下一次风箱区域平均温度、平均流速和平均CO质量分数

Figure 8 Average temperature, average velocity, and average CO mass fraction in the primary air box area at varying primary air speeds

2.3.2 一次风箱结构和流场的优化

对流场的分析表明,一次风箱入口端底部存在煤粉可能沉积的区域。如果通过改进和优化风箱底部的结构以减小和消除这里的低速区,则可降低煤粉的沉积诱导爆燃的风险。如图9所示,针对该区域的流场的优化,本文尝试在风箱底部填充结构,形成了具有11种不同倾角和长度的底面,应用CFD模型对这些填充了结构的风箱的流场进行了数值模拟,所考察的底部结构和模拟得到的低速区易沉积体积结果如表3所示。

由表3可知,当Z方向填充高度增加,风箱底部低速区的易沉积体积不断减小;而当X方向填充宽

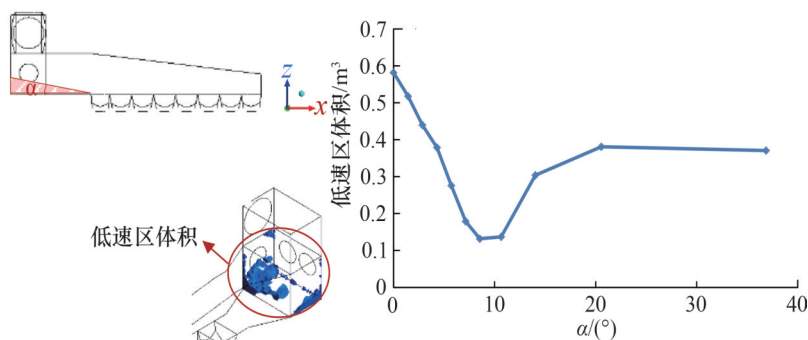


图9 风箱低速区体积随 α 角度变化曲线

Figure 9 Variation curve of the volume of low velocity zone at the bottom of primary air box with α

表3 一次风箱结构优化工况及低速区易沉积体积计算结果

Table 3 Flow field optimization condition and calculation result of primary air box

序号	Z方向高度/ mm	X方向宽度/ mm	底部倾角 α / (°)	低速区易沉积体积/ m^3
Case 0	0	4 000	0.000	0.582
Case 1	100	4 000	1.4	0.518
Case 2	200	4 000	2.9	0.440
Case 3	300	4 000	4.3	0.379
Case 4	400	4 000	5.7	0.276
Case 5	500	4 000	7.1	0.179
Case 6	600	4 000	8.5	0.132
Case 7	600	3 200	10.6	0.137
Case 8	600	2 400	14.0	0.304
Case 9	600	1 600	20.6	0.381
Case 10	600	800	36.9	0.371

度不断减小,风箱底部低速区的体积则会增大。两方向上填充的几何尺寸,可使用填充后的底部倾角 α 综合表示, α 对低速区体积的影响如图10所示。显然,随着 α 的增加,低速区的易沉积体积呈现先减小后增大的趋势,因而存在一个最小低速区体积的结构,对应于 α 约为 8.5° ,易沉积体积约为 0.132 m^3 。这是因为当Z方向高度较小时,填充物形成的底部坡度难以对一次风箱底部的低速区产生很好的消除作用,因而依旧存在低速区;而当X方向宽度较小时,最靠近左壁面的低速区虽然不易形成,但 α 的补角相对较小,与气流进入风箱的主方向依旧存在夹角,使得低速区向X轴正方向偏移,但并未完全消除消除。

3 结论

1)一次风箱底部存在低速区,相应风箱内区域煤粉沉积的可能性较大,且由于混合过程中热风沿壁面下行无阻形成局部高温区域,风箱底部温度最高可达 329°C ,超过煤粉热解温度,存在煤粉在此处积聚、热解氧化而引起爆燃的风险。

2)风箱内平均CO体积分数在一次风流速从 7 m/s 降低到 3 m/s 时略有上升,一次风流速降低至 2 m/s 时,风箱内部CO的浓度显著升高,因此,保持一次风流速在 $3\sim 7 \text{ m/s}$ 有利于制粉系统的安全运行。

3)针对一次风箱底部的流场进行优化,改变底部角度 α ,随着 α 的增加,低速区体积呈现先减小后增大的趋势,存在一个低速区体积的最低点,该点 α 为 8.5° ,对应的低速区易沉积体积为 0.132 m^3 。

参考文献:

- [1] 叶勇健. 2030年高效、绿色、灵活、经济的燃煤发电技术路线[J]. 电力科技与环保, 2019, 35(2): 28-33.
YE Yongjian. Technological roadmap of coal-fired power featuring in high efficiency, green, flexibility and economical competition up to 2030[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2019, 35(2): 28-33.
- [2] 王志轩, 张晶杰, 董博, 等. “双碳”目标下燃煤电厂灵活性改造及政策建议[J]. 电力科技与环保, 2024, 40(3): 213-220.
WANG Zhixuan, ZHANG Jingjie, DONG Bo, et al. Research on technology and policy of flexibility renovation for coal-fired power plants under carbon peaking and carbon neutrality goal[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2024, 40(3): 213-220.
- [3] 张云, 黄俊, 田科峰. 贫煤煤粉锅炉烟煤适应性改造技术优化及应用[J]. 锅炉制造, 2023(4): 15-17.
ZHANG Yun, HUANG Jun, TIAN Kefeng. Optimization and application of adaptability renovation technology of bituminous coal for pulverized coal boiler[J]. Boiler Manufacturing, 2023(4): 15-17.
- [4] 雷平武. 300 MW锅炉贫改烟改造技术优化及应用[J]. 自动化应用, 2024, 65(16): 51-53+63.
LEI Pingwu. Optimization and application of 300 MW boiler lean to smoke transformation technology[J]. Automation Application, 2024, 65(16): 51-53+63.
- [5] 曹嘉乐, 欧妙, 高振, 等. 360 MW机组贫煤锅炉燃用高挥发分煤种的研究与工程应用[J]. 热能动力工程, 2024, 39(12): 95-103.
CAO Jiale, OU Miao, GAO Zhen, et al. Research and engineering application of burning bituminous coals with high volatile content in a 360 MW lean coal-fired boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(12): 95-103.
- [6] 李广伟. 燃煤机组制粉系统灵活性改造技术综述[J]. 锅炉制造, 2019(1): 1-4+10.
LI Guangwei. Summarization on the technology of flexibility reform of the pulverizing system in coal-fired power units[J]. Boiler Manufacturing, 2019(1): 1-4+10.
- [7] 焦伟航. 660 MW超超临界机组锅炉印尼煤掺烧运行特性与优化[J]. 浙江电力, 2018, 37(10): 91-95.
JIAO Weihang. Operation characteristics and optimization of 660 MW ultra-supercritical blended Indonesian coal-fired units[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(10): 91-95.
- [8] AJRASH M J, ZANGANEH J, MOGHTADERI B. The flame deflagration of hybrid methane coal dusts in a large-scale detonation tube (LSDT)[J]. Fuel, 2017, 194: 491-502.

- [9] 王双童, 杨希刚. 基于燃煤机组安全环保的科学配煤掺烧[J]. 电力科技与环保, 2018, 34(5): 51–54.
WANG Shuangdong, YANG Xigang. Scientific blending of coal based on safety and environmental protection of coal-fired units[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2018, 34(5): 51–54.
- [10] 王顶磊. 1 025 t/h 贫煤锅炉改烧烟煤可行性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
WANG Dinglei. Feasibility study for converting to burn bituminous: Coals in 1 025 t/h lean coal-fired boiler[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [11] 赵勇. 西电 3 号炉改烧烟煤项目方案选择与效益评价[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
ZHAO Yong. Scheme selection and benefit evaluation of the project of NO. 3 furnace converting to burn bituminous coal in xibaipo power factory[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [12] 欧妙, 高振, 彭炯兰, 等. 1 069 t/h 贫煤锅炉燃用高挥发分煤种的应用实践[J]. 能源研究与管理, 2024(3): 112–116.
OU Miao, GAO Zhen, PENG Jionglan, et al. Application of burning high volatile coal in a 1 069 t/h lean coal boiler[J]. Energy Research and Management, 2024(3): 112–116.
- [13] 蒋蓬勃. 中储式制粉系统掺炉烟改造对比试验研究[J]. 电站系统工程, 2017, 33(6): 20–22.
JIANG Pengbo. Contrast test research on transformation of intermediate storage type pulverizing system with flue gas mixing[J]. Power System Engineering, 2017, 33(6): 20–22.
- [14] 王元雷. 中储式制粉系统掺混低温炉烟技术改造[J]. 电力安全技术, 2019, 21(1): 50–52.
WANG Yuanlei. Technical reform of medium storage pulverizing system mixed with low temperature furnace flue gas[J]. Electric Safety Technology, 2019, 21(1): 50–52.
- [15] 张勇, 汪华剑, 王洋, 等. 闭式中储制粉系统 W 型火焰锅炉掺烧烟煤技术研究[J]. 热力发电, 2025, 54(3): 99–107.
ZHANG Yong, WANG Huajian, WANG Yang, et al. Co-firing bituminous coal in a W-shaped flame boiler with closed intermediate storage pulverization system[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(3): 99–107.
- [16] 李文华, 黄永杰, 翁善勇. 煤粉富氧燃烧热分析试验研究[J]. 浙江电力, 2010, 29(6): 33–36.
LI Wenhua, HUANG Yongjie, WENG Shanyong. Study on pulverized coal combustion in oxygen-enriched atmosphere[J]. Zhejiang Electric Power, 2010, 29(6): 33–36.
- [17] WU D J, NORMAN F, VANIERSCOT M, et al. Self-heating characteristics of coal dust deposits by a hot gas flow in oxy-fuel atmospheres[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 131: 947–957.
- [18] GLUSHKOV D O, KUZNETSOV G V, STRIZHAK P A. Experimental and numerical study of coal dust ignition by a hot particle[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 133: 774–784.
- [19] 李小东, 王晶禹, 刘庆明. 大尺度管道中煤粉爆炸的试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(2): 72–77.
LI Xiaodong, WANG Jingyu, LIU Qingming. Experimental study on coal dust explosions in a large-scale tube[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(2): 72–77.
- [20] 李海涛, 陈晓坤, 邓军, 等. 开放管道内煤粉云形成机制及爆炸过程火焰动态行为数值模拟[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2600–2613.
LI Haitao, CHEN Xiaokun, DENG Jun, et al. Numerical simulation on formation mechanism of pulverized coal cloud and flame dynamic behaviors during the explosion process in an open vessel[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2600–2613.
- [21] 赵宁刚. 锅炉制粉系统煤粉燃爆事故成因分析及防治对策研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
ZHAO Ninggang. Causes analysis and countermeasures study of coal dust fire and explosion accidents of boiler pulverizing system[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013.
- [22] 徐玮. 电厂制粉系统防爆与控制的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
XU Wei. Study on coal pulverizing system explosion and control in power plant[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [23] 王波涛. 钢球磨制粉爆炸事故分析总结[J]. 现代制造技术与装备, 2019, 55(10): 75–77.
WANG Botao. Analysis and summary of explosion accident of steel ball mill powder[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2019, 55(10): 75–77.
- [24] 袁帅, 王庆慧, 王丹枫, 等. 粉尘爆炸防护措施的研究进展[J]. 爆破器材, 2017, 46(4): 13–20.
YUAN Shuai, WANG Qinghui, WANG Danfeng, et al. Research progress of preventive and control measures for dust explosion[J]. Explosive Materials, 2017, 46(4): 13–20.
- [25] 聂百胜, 张豪, 宫婕, 等. 煤粉爆炸宏观四阶段反应机理[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(6): 1129–1145.
NIE Baisheng, ZHANG Hao, GONG Jie, et al. Macro and micro four-stage reaction mechanism of pulverized coal explosion[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(6): 1129–1145.
- [26] 李宗翔, 刘宇, 张明乾, 等. 煤自燃发火潜伏期不同温度下耗氧特性的研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(12): 125–130.
LI Zongxiang, LIU Yu, ZHANG Mingqian, et al. Study on oxygen consumption characteristics of coal under different temperatures in latent period of spontaneous combustion[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(12): 125–130.
- [27] 侯志勇, 李弯弯, 王振平, 等. 不同堆积厚度下煤粉自燃预测研究[J]. 西安科技大学学报, 2020, 40(6): 967–973.
HOU Zhiyong, LI Wanwan, WANG Zhenping, et al. Prediction of high volatile coal powder spontaneous combustion[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2020, 40(6): 967–973.
- [28] 王博, 商宇航, 姚立超, 等. 面向火电厂煤粉浓度的预测评估算法的研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(5): 1768–1777.
WANG Bo, SHANG Yuhang, YAO Lichao, et al. Research on prediction and evaluation algorithm for coal dust concentration in thermal power plants[J]. Journal of Safety and Environment, 2024,

- 24(5): 1768–1777.
- [29] 张建中, 李政, 曹理平. 煤粉爆炸指标在制粉系统防爆及燃煤管理应用中三大基本问题的探索[J]. 电力勘测设计, 2025(2): 85–92.
ZHANG Jianzhong, LI Zheng, CAO Liping. Exploration on three basic problems of pulverized coal explosion index in pulverizing system explosion prevention and coal management[J]. Electric Power Survey & Design, 2025(2): 85–92.
- [30] LI H T, DENG J, CHEN X K, et al. Transient temperature evolution of pulverized coal cloud deflagration in a methane – oxygen atmosphere[J]. Powder Technology, 2020, 366: 294–304.
- [31] 张大明, 马云东. 输煤巷道通风排尘特征参数数值模拟优化研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(1): 178–181.
ZHANG Daming, MA Yundong. New numerical simulation for optimizing the characteristic parameters of ventilation dedusting in the coal conveyer roadway[J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(1): 178–181.
- [32] 刘天奇, 蔡之馨, 曲芳, 等. 角联空间煤尘爆炸传播特性数值模拟[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(12): 1697–1700.
LIU Tianqi, CAI Zhixin, QU Fang, et al. Numerical simulation of coal dust explosion propagation characteristics in diagonal space[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(12): 1697–1700.
- [33] 文芳. 煤焦 CO_2 气化反应动力学研究[J]. 洁净煤技术, 2003, 9(4): 36–39.
WEN Fang. Study on the gasification reaction dynamic of coal coke and CO_2 [J]. Clean Coal Technology, 2003, 9(4): 36–39.
- [34] 文芳. 热重法研究煤焦 H_2O 气化反应动力学[J]. 煤炭学报, 2004, 29(3): 350–353.
WEN Fang. Study on reaction kinetic of steam–coal chars gasification with TGA[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(3): 350–353.
- [35] 李明, 马国伟, 李航. 某电厂煤粉管道积粉堵塞原因分析及改造方案[J]. 电力勘测设计, 2023, (11): 56–60.
LI Ming, MA Guowei, LI Hang. Cause analysis of the blockage of coal powder pipeline in a power plant and the transformation scheme[J]. Electric Power Survey & Design, 2023, (11): 56–60.
- [36] 姜海鹏, 司荣军, 李润之. 高挥发分煤尘对瓦斯爆炸极限的影响[J]. 煤矿安全, 2015, 46(8): 174–177.
JIANG Haipeng, SI Rongjun, LI Runzhi. Influence of high volatile coal dust on gas explosion limits[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(8): 174–177.
- [37] 杨峻峰, 郭洋洲, 刘家利, 等. 高灰分高挥发分煤爆炸倾向性研究及应用[J]. 东北电力技术, 2022, 43(3): 1–4+31.
YANG Junfeng, GUO Yangzhou, LIU Jiali, et al. Study and application of high ash and high volatile coal explosion tendency [J]. Northeast Electric Power Technology, 2022, 43(3): 1–4+31.
- [38] 张松山, 刘贞堂, 高勤琼, 等. 煤尘爆炸性与挥发分关系研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(2): 131–133.

ZHANG Songsan, LIU Zhentang, GAO Qinqiong, et al. Study on relationship between coal dust explosion and volatile[J]. Coal Technology, 2015, 34(2): 131–133.

- [39] 张磊, 陈绍炳, 韦红旗. 基于数值模拟的制粉系统爆炸原因分析及改造[J]. 热力发电, 2007, 36(6): 58–60+79.

ZHANG Lei, CHEN Shaobing, WEI Hongqi. Cause analysis for explosion in coal pulverizing system of a power plant based on numerical simulation and retrofit thereof[J]. Thermal Power Generation, 2007, 36(6): 58–60+79.



第一作者简介:郎志强(1973—),男,助理工程师,主要从事火力发电厂热工生产技术与设备管理等方面的研究,15955542908@126.com;



郭伟伟(1983—),男,工程师,主要从事火力发电厂热工生产技术与设备管理等方面的研究,771561516@qq.com;



袁 博(1985—),男,工程师,主要从事火力发电厂热工生产技术与设备管理等方面的研究,1595542132@126.com;



叶康军(1986—),男,工程师,主要从事火力发电厂热工生产技术与设备管理等方面的研究,17201432@chnenergy.com.cn;



顾冬峰(1983—),男,工程师,主要从事火力发电厂热工生产技术与设备管理等方面的研究,515639@qq.com;



张韵琴(2000—),女,硕士研究生,主要从事流体流动与传热模拟等方面的研究,220220546@seu.edu.cn;



通信作者简介:赵伶玲(1979—),女,教授,主要从事电站锅炉节能与污染物控制,CFD数值模拟与智能监控系统等方面的研究,zhao_lingling@seu.edu.cn。

(编辑 林正根)