DOI: 10.19666/j.rlfd.202605112

四角切圆锅炉掺烧易结渣煤的数值模拟研究

沈艳梅[1]，闫顺奕[2]，王太[2]，张海丹[3]，侯赞[2]，杨孜祥[2]，李鄂甬[2]，王睿坤[2]

（1.国电电力发展股份有限公司，北京 100101；
2.华北电力大学动力工程系，河北 保定 071003；
3.浙江浙能技术研究院有限公司，浙江 杭州 311121）

［摘 要］【目的】新疆煤储量巨大、开采成本低，已成为很多电厂的掺烧煤种，但新疆煤碱金属含量高，易导致炉膛结渣，引发安全问题，亟需明确掺烧比例对大型锅炉燃烧、排放及结渣的影响，确定最优掺烧方案。【方法】以某 660 MW 超临界四角切圆锅炉为研究对象，采用气固两相燃烧与灰颗粒沉积耦合方法展开数值模拟研究，分析新疆红一煤、红二煤与蒙混煤不同掺烧比例下温度场、组分浓度、NO_x 生成及壁面结渣的分布特性。【结果】研究结果表明：随新疆煤掺比增加，火焰中心上移，出口烟温升高 17~21K，氧量单调递减；CO 在主燃区升高但燃尽区衰减加快，燃烧份额后移。NO_x 排放显著降低，燃烧器区峰值降幅 24%~35%，出口降幅 19%~26%；红一煤因燃料氮仅 0.58%，各掺比下 NO_x 均低于红二煤。红一煤结渣随掺比单调加剧；红二煤因 Fe_2O_3 高达 36.75%，40%~60%掺比时结渣最重，80%掺比时反而缓和，呈非单调变化。【结论】综合考虑燃尽率、NO_x 排放与结渣风险，推荐蒙混煤与红一煤以 6：4 质量比掺烧，该方案结渣可控、NO_x 较低且燃尽良好，可在保障安全前提下兼顾经济性，为电厂高碱煤掺烧优化提供理论依据。

［关 键 词］易结渣煤；数值模拟；燃烧特性；NO_x 排放；结渣特性

［引用本文格式］（本段作者勿动）作者姓名. 中文标题[J]. 热力发电, **错误!未找到引用源。**, **错误!未找到引用源。(错误!未找到引用源。)**: 起始页码-终止页码. 作者姓名. 英文标题[J]. Thermal Power Generation, **错误!未找到引用源。**, **错误!未找到引用源。(错误!未找到引用源。)**: 起始页码-终止页码.

Research on Numerical Simulation of Co-firing Easily-Slagging Coal under Different Combustion Modes in a Tangentially Fired Boiler

SHEN Yanmei[1], YAN Shunyi[2], WANG Tai[2], ZHANG Haidan[2], HOU Zan[2], YANG Zixiang[2], LI Eyong[2], WANG Ruikun[2]

(1.GD Power Development Co., Ltd. , Beijing 100101, China;
2.School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
3.Zhejiang Zheneng Technology Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 311121, China)

Abstract: [Objective] Xinjiang high-alkali coal offers low mining costs and stable supply, making it an attractive option for cost reduction in coal-fired power plants through co-firing. However, its high alkali content and low ash fusion temperature lead to severe slagging, limiting the engineering application of high-proportion co-firing schemes. To clarify the influence of blending ratio on combustion characteristics, NO_x emissions and slagging behavior in a large-scale tangentially fired boiler, this study conducts numerical simulations. [Methods] A 660 MW supercritical tangentially fired boiler is taken as the object. A coupled gas-solid combustion and ash particle

收 稿 日 期：XXXX-XX-XX 修 回 日 期：XXXX-XX-XX 接 受 日 期：XXXX-XX-XX 网络首发日期：XXXX-XX-XX
基 金 项 目：国家自然科学基金项目（52176105）
Supported by：National Natural Science Foundation of China (52176105)
第一作者简介：沈艳梅（1987），女，博士研究生，高级工程师，高效清洁煤燃烧技术，16810110@ceic.com
通信作者简介：王太（1986），男，博士研究生，高级实验师，电站锅炉燃烧与运行特性研究，wangtai_1986@163.com

deposition numerical simulation method is employed, integrating the Standard k-ε turbulence model, P1 radiation model, PDF gas-phase combustion model, and DPM discrete phase model with the stochastic trajectory model for particle tracking to establish a three-dimensional steady-state furnace model. Ash deposition probability is evaluated using the critical viscosity criterion with a threshold of 10^5 Pa s. Grid independence is verified using four grid systems from 1.0 to 2.5 million cells, and the model accuracy is validated against field test data, with relative errors within 5% for furnace outlet gas temperature, oxygen concentration and NO_x emissions. Two Xinjiang coals, Hongyi and Honger, are blended with Menghun reference coal at mass ratios of 20%, 40%, 60% and 80%, respectively. The temperature field, species concentration field, NO_x formation and wall slagging distribution under each condition are systematically analyzed. [Results] As the Xinjiang coal blending ratio increases, the flame center shifts upward, the furnace outlet flue gas temperature rises by 17~21 K, and the outlet oxygen concentration decreases monotonically. The CO concentration increases in the primary combustion zone but decays faster in the burnout zone, indicating a pronounced backward shift of combustion share. NO_x emissions decrease significantly with increasing blending ratio, with the peak concentration in the burner zone dropping by 24%~35% and the furnace outlet reduction ranging from 19% to 26%. Hongyi coal, with a fuel nitrogen content of only 0.58%, exhibits lower NO_x emissions than Honger coal under all blending ratios. Regarding slagging behavior, the alkaline components in Hongyi coal ash continuously react with the silica-alumina components of Menghun coal as the blending ratio increases, monotonically aggravating slagging. In contrast, Honger coal, containing 36.75% Fe_2O_3, forms an optimal low-temperature eutectic composition at 40%~60% blending ratio, resulting in the most severe slagging; however, at 80% blending ratio, the high-iron ash dilutes this composition and weakens the eutectic reaction, thereby alleviating slagging and exhibiting a non-monotonic trend. [Conclusion] Considering the trade-off among burnout efficiency, NO_x emissions and slagging risk, the blending scheme with 60% Menghun coal and 40% Hongyi coal is recommended as optimal. This scheme ensures controllable slagging, low NO_x emissions and satisfactory burnout, providing a theoretical basis for safe and economical high-alkali coal co-firing in existing power plants.

Key words: Easily-slagging coal; Numerical simulation; Combustion characteristics; NO_x emissions; Slagging behavior

我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国，煤炭在能源结构中长期占据主体地位，是保障电力供应安全稳定的“压舱石”[1][2][3][4]。新疆维吾尔自治区作为我国重要的能源战略基地，煤炭预测储量占全国总量的 40%以上[5]，具有开采成本低、供应稳定性好等显著优势。近年来，随着煤价波动和优质煤源趋紧，中东部电厂纷纷开展新疆煤掺烧以降本增效，部分电厂掺烧比例达 30%~60%，年节约燃料成本超千万元。然而，新疆煤普遍具有水分高、碱金属含量高、灰熔点低等特性[6]，与锅炉设计煤种差异显著，掺烧后易引发炉膛结渣、受热面沾污、高温腐蚀等技术难题[7]，严重制约锅炉的安全、经济和清洁运行。在保证锅炉安全运行的前提下确定新疆煤的最佳掺烧比例，实现经济效益最大化，已成为当前电站锅炉领域亟待解决的核心课题。

针对厂用煤与高碱新疆煤掺烧的工程需求，国内学者围绕沾污结渣机理、掺烧比例优化及运行调控等方面开展了大量研究工作。低比例时入炉煤质与设计煤种差异较小，锅炉燃烧稳定性与受热面安全通常可维持在可控范围，如马仑等[8]在沉降炉上研究了贫煤掺烧烟煤的燃烧特性，发现炉外掺烧方式下烟煤比例≤25%时有利于混煤燃尽；Kim 等[9]研究了 Elga 粘结煤的掺烧比例，发现掺比从 25%增至 50%后，飞灰未燃尽碳含量从约 5%升至 8%以上，堵塞风险显著增加，推荐安全掺比不超过 25%。受限于新疆煤高碱、低灰熔点的煤质特性，提高掺烧比例会显著加剧炉膛沾污结渣情况[10][11]，因此，现有混煤安全掺烧比例多控制在 50%以下[12][13][14]。但考虑到高掺烧比具有明显的成本优势，由此诱发的经济效益潜能驱动着高比例掺烧技术的开发[15][16]。目前高比例掺烧高碱新疆煤多通过降低炉膛关键热负荷参数[17]、优化燃烧与吹灰系统来提供更大的换热及缓冲空间[18]，减少熔融灰粒的黏附[19]；以及掺入高岭土作为添加剂，提高灰熔点以缓解结渣倾向[20][21]。若想实现超高比例掺烧，现役电厂需要进行大规模炉膛改造[21][22][23]，成本过高。探索新疆煤在现有锅炉结构下的不同比例掺烧方案，具有明确的工程价值。

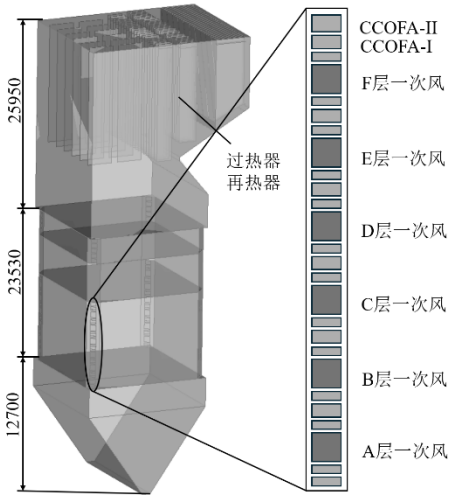
挥发分含量决定着火稳定性与燃烧进程。高挥发分煤着火早、火焰温度高，但集中析出会加剧主燃区还原性气氛，影响 NO_x 生成路径与燃尽速率；水分高则吸热降温、推迟着火，两者共同改变火焰中心位置及热释放分布。灰中碱性氧化物与酸性氧化物在高温下发生共熔反应，生成低熔点共晶体，

降低灰熔融温度，不同比例下共熔配比存在极值。红沙泉煤田储量大，热值高灰分低，用于电厂掺烧可显著降低燃料成本。已有研究多侧重于描述单一指标变化，对燃烧特性、NO_x排放与结渣三者随掺比连续变化时的协同演变规律缺乏系统认识。基于此，本文以某电厂常用煤种蒙混煤为基准煤，分别与新疆红一煤、红二煤按 20%、40%、60%和 80%四种比例掺混，采用数值模拟的方法系统研究不同掺烧比例下混煤的燃烧特性和结渣特性，对比分析红一煤与红二煤的掺烧效果差异，确定适宜的掺烧比例，以期为电厂安全经济掺烧新疆煤提供理论依据和技术指导。

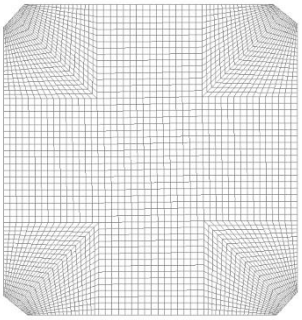
1 研究对象与模型建立

1.1 研究对象

本文选取 660MW 超临界参数直流炉作为研究对象，如图 1a 所示。该锅炉采用 Π 型布置方式，四角切圆燃烧技术，固态排渣。炉膛断面尺寸为 18.8 m×17.7 m，炉膛高度 72.6 m。锅炉配置 6 台 HP1003 中速磨煤机，正常运行工况下 5 台运行、1 台备用，每台磨煤机对应一层四角布置的燃烧器。



(a)锅炉整体结构



(b)炉膛截面网格划分

图 1 锅炉模型与炉膛网格划分示意图

Fig.1 Schematic diagram of boiler model and furnace mesh division

每层燃烧器布置 4 个一次风喷口及上下 8 个二次风喷口，共有 6 层一次风喷口、14 层二次风喷口、4 层油二次风喷口、2 层 COFA 风喷口，并在燃烧器上部设置 5 层 OFA 风喷口，通过分级配风实现煤粉高效燃烧，有效控制 NOx 排放。

1.2 网格划分

网格划分采用六面体结构化网格，并依据炉内流动与燃烧特性，对燃烧器区域等关键部位进行局部加密处理。为优化网格质量并控制网格数量，将炉膛沿高度方向划分为冷灰斗区、主燃烧区、分离燃尽风(SOFA)区、燃尽区及过热器与再热器区等多个子区域，分别进行网格生成，以实现网格疏密分布的合理配置。

1.3 燃烧模型

炉内掺煤燃烧的数值模拟涉及能量守恒方程、动量守恒方程及湍流模型、辐射换热模型、气相化学反应模型、颗粒运动模型等。采用 Standard k-ε 模型，模拟湍流流动；采用 P1 辐射模型，进行辐射换热过程模拟；采用预混燃烧 PDF 模型，避免直接求解组分输运方程；采用离散相 DPM 模型与随机轨道模型，用于追踪煤粉颗粒轨迹；采用双方程竞争模型，模拟煤粉挥发分析出过程；采用动力/扩散控制模型，同时考虑化学反应速率和扩散速率。NO_x生成采用后处理方法计算，仅考虑燃料型与热力型 NO_x，其中燃料型 NO_x 占 80%～90%，由煤中氮元素转化而成；热力型 NO_x 由空气中氮气在 1800 K 以上高温下氧化生成。

1.4 结渣模型

采用颗粒输运模型追踪灰颗粒运动轨迹并计算其与壁面的碰撞概率，结合颗粒黏附模型判断黏附行为[24]。黏附判断以临界黏度为阈值：当灰颗粒黏度低于或等于临界黏度时，黏附概率取 1；否则，黏附概率按临界黏度与实际黏度的比值计算。临界黏度范围通常在 10^5 至 10^7 Pa s 之间，具体取值随煤种、灰成分及温度变化[25]。

黏附概率可通过临界黏度与实际黏度的比值进行估算。具体表达式[26][26]如下所示：

$$p_i\left(T_{ps}\right)=1,\mu\le\mu_{ref} \tag{1}$$

$$p_{\mathrm{i}}\left(T_{\mathrm{ps}}\right)=\frac{\mu_{\mathrm{ref}}}{\mu},\mu>\mu_{\mathrm{ref}} \quad (2)$$

式中：μ 为颗粒黏度[27]，Pa s；μ_{ref} 为颗粒临界黏度，Pa s。依据推荐的常用临界黏度常数值，本研究中临界黏度 μ_{ref} 取 10^5 Pa s。结渣模型与燃烧模型采用单向耦合：先算出炉内温度场和流场，再追踪颗粒运动，将颗粒温度带入临界黏度判据判断其是否黏附，最后统计各壁面的沉积量。

2 计算条件与工况

2.1 煤种数据

厂用煤选择北方煤#蒙混，易结渣新疆煤选取红沙泉煤田的新疆煤#红一煤(HY)与新疆煤#红二煤(HE)。各煤种的元素分析与工业分析见表 1，灰成分见表 2。

表 1 不同煤种的工业分析与元素分析

Tab.1 Proximate and ultimate analysis of different coals

煤种	工业分析				元素分析				特征温度			$Q_{\mathrm{net.v}}$/
	M_{ar}/%	FC_{ar}/%	A_{ar}/%	V_{ar}/%	C_{ar}/%	H_{ar}/%	N_{ar}/%	S_{ar}/%	DT/K	ST/K	FT/K	（MJ/kg）
蒙混	12.8	48.11	9.99	29.10	61.45	3.8	0.86	0.26	1230	1290	1390	23.55
红一	21.8	49.01	6.27	22.93	57.24	2.97	0.58	0.29	1060	1080	1130	20.97
红二	19.8	51.70	5.26	23.24	59.81	3.03	0.62	0.67	1230	1280	1340	22.13

表 2 不同煤种的灰成分

Tab.2 Ash composition of different coals

煤种	Na_2O/%	MgO/%	Al_2O_3/%	SiO_2/%	P_2O_5/%	SO_3/%	K_2O/%	CaO/%	TiO_2/%	Fe_2O_3/%
蒙混	1.03	1.18	11.69	69.15	0.03	3.95	0.26	10.56	0.45	3.04
红一	3.82	5.13	12.72	33.08	0.28	11.54	0.86	11.50	0.73	20.13
红二	4.36	4.41	6.41	9.78	2.13	22.77	0.27	13.17	0.56	36.75

2.2 工况设置

按照 20%至 80%的质量比（以 20%为梯度）将新疆煤掺入蒙混煤中，设置掺烧工况。混煤样品采用“M-JMx”规则进行命名，其中 M 代表蒙混煤；JM 代表新疆煤(HY，HE)；x 代表新疆煤的质量掺混比，%。

2.3 边界条件设置

表 3 边界条件设置

Tab.3 Boundary condition settings

参数名称	数值设定
一次风温度	343K
一次风率	32.9%
二次风温度	583K
二次风率	41.3%
燃尽风温度	583K
给煤量	263t/h
煤粉最小直径	0.01mm
煤粉最大直径	0.25mm
煤粉平均直径	0.056mm
出口压力	-20Pa

燃料颗粒的粒径分布遵循 Rosin-Rammler 分布规律，设置煤粉颗粒入口条件为质量流量入口，一次风、二次风及燃尽风入口均设置为速度流量入口边界条件，保持过量空气系数为 1.2。

3 数值模拟结果分析

3.1 网格无关性验证与模型验证

为验证网格无关性，分别对网格数量为 100 万、150 万、200 万和 250 万的模型进行模拟计算，比较 BMCR 工况下炉膛截面平均温度沿高度方向的变化情况。如图 2 所示，当网格数增至 200 万后，温度分布趋于稳定，进一步增加网格数对计算结果影响不大。综合考虑计算精度与资源消耗，最终选用 200 万网格进行后续数值模拟。

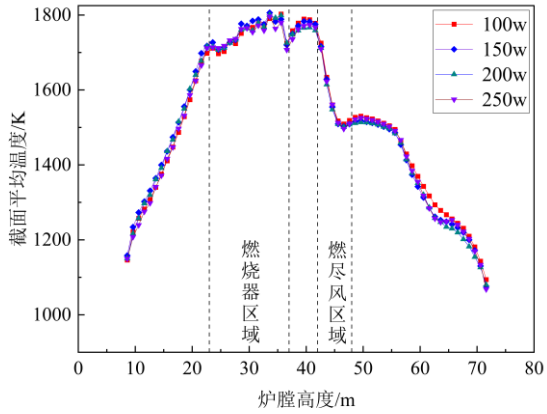


图 2 网格无关性验证

Fig.2 Grid independence verification

为验证模型准确性，于 BMCR 工况开展设计煤种燃烧模拟，比对模拟结果与运行试验报告，校验模型准确性，具体数据见表 4。模拟结果与实际运行数据结果误差均在 5%以内，满足精度要求。

表 4 数值模拟与实际运行结果

Tab.4 Comparison between numerical simulation and field test results

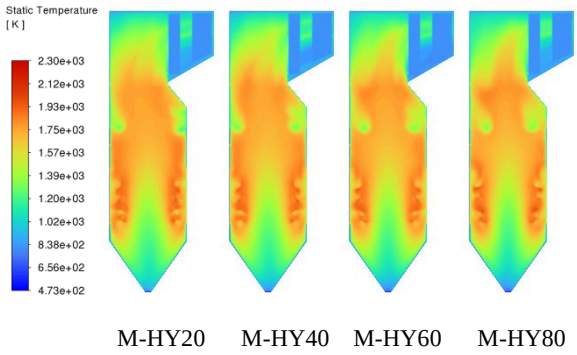
项目	模拟值	实测值
炉膛出口烟温/K	1057.73	1088
炉膛出口氧量/%	3.52	3.55
炉膛出口 NO_x 质量浓度/(mg·Nm^{-3})	199.01	193.11

本文所用临界黏度模型基于灰颗粒黏度与温度的关系判断黏附概率，由 Walsh 等[25]提出，该模型已在多种炉型的结渣数值模拟中得到应用且效果良好[26][27][28][29][30]。本研究中临界黏度取 10^5 Pa s，该取值在文献中被广泛采用。

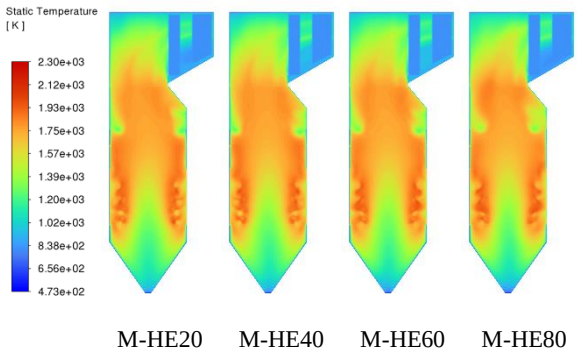
3.2 炉内燃烧分析

图 3 为不同工况下炉内温度云图与沿锅炉高度不同截面上平均温度的分布图。从图中可以看出，各工况下炉膛截面平均温度沿炉高分布形态一致，呈现先缓升、后陡升、再下降的趋势。冷灰斗上方至燃烧器入口段区域截面温度介于 979～1302 K。燃烧器区自挥发分大量析出位置延伸至燃尽区末端，是煤粉集中燃烧放热的核心区间，其中燃烧器区域温度维持在 1530～1730 K，火焰燃烧稳定；进入燃尽区后炉内热力峰值出现，40.6 m 处各工况截面温度均达到 1705～1763 K，为炉膛温度最高点。燃尽风喷口以上的过、再热器区域，烟气经各对流受热面持续换热，截面温度由 42.6 m 处约 1700 K 递减至炉膛出口 988～993 K。

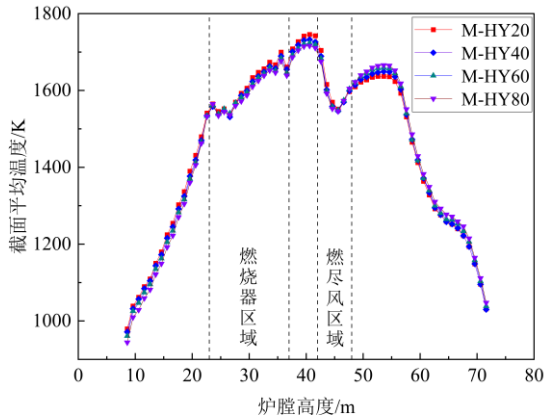
蒙混与红一掺烧的温度变化见图 3(c)，蒙混与红二掺烧的温度变化见图 3(d)。掺烧新疆煤对各温度区间的影响呈现规律性差异。在冷灰斗区域，截面温度随掺比增大单调降低，红一煤工况降幅更为显著，15.6 m 处由 1224 K 降至 1192 K，这与其水分高达 21.8%、蒸发吸热抑制初期温升直接相关。在高温燃烧区，两种煤响应模式截然不同：红一煤工况燃烧温度随掺比增大而递减，40.6 m 截面峰值温度由 1746 K 降至 1716 K，源于其低发热量与高水分蒸发热损的叠加；红二煤工况则呈现先升后降的变化趋势，各掺比峰值温度集中于 1746～1763 K 的窄幅区间，红二煤与蒙混煤热值接近，各掺比下混煤热值变化有限,温度差异较小。经过燃尽风区后温度排序发生反转，湍流减弱，高掺比下未燃尽碳集中氧化放热，使该区域烟温偏高。过、再热器截面红一煤高掺比工况温度较低掺比高出约 17 K，红二煤高出约 21 K，表明高比例掺烧使火焰中心上移，对过热器与再热器换热特性将产生影响。



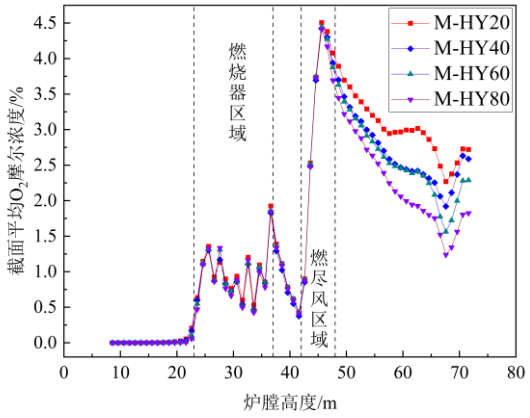
(a) 蒙混与红一掺烧的 Y=0 截面温度分布云图



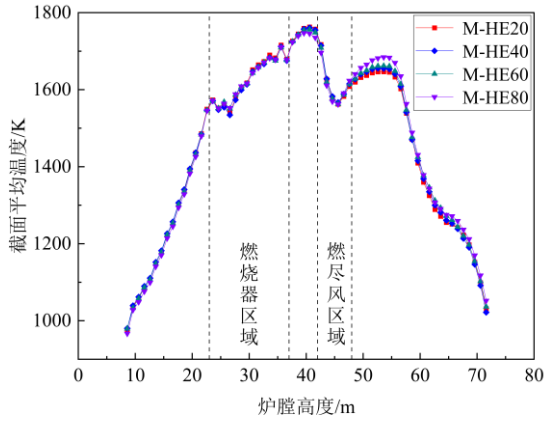
(b) 蒙混与红二掺烧的 Y=0 截面温度分布云图



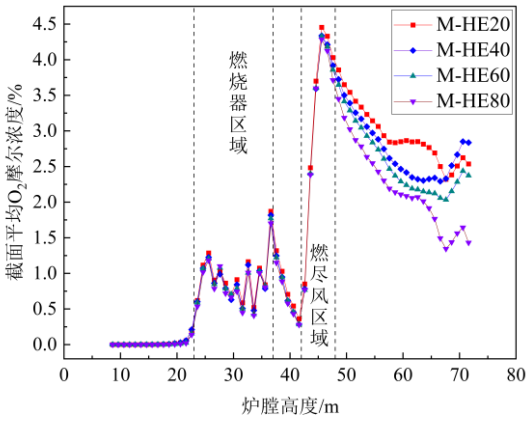
(c) 蒙混与红一掺烧的温度变化



(a) 蒙混与红一掺烧的 0_2 变化



(d) 蒙混与红二掺烧的温度变化



(b) 蒙混与红二掺烧的 0_2 变化

图 3 不同工况下的截面温度云图与沿程平均温度分布图

Fig.3 Cross-sectional temperature contours and mean temperature distribution along the flow path under different operating conditions

图 4 不同工况下的沿程 0_2 摩尔浓度图

Fig.4 O_2 mole fraction along the path under different working conditions

3.3 不同工况对气体排放的影响

3.3.1 氧气浓度分布特征

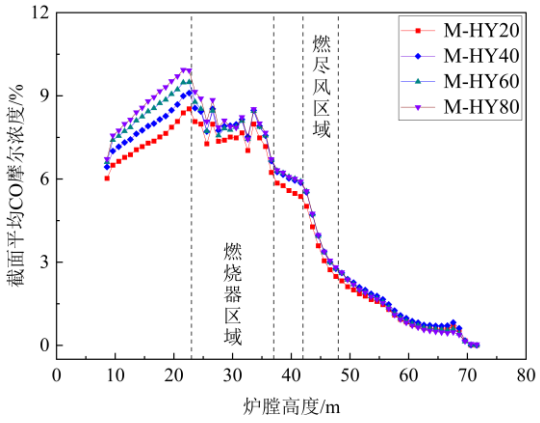
图 4 是各工况下沿程平均 O_2 摩尔浓度图，清晰地反映了分级配风策略下气氛含氧量的演变。冷灰斗至燃烧器入口段无风口送风，氧气浓度维持在极低水平。整个燃烧器区域随一二次风分级喷入，氧气浓度呈现波动特征，部分截面氧浓度略高(1.1%～1.9%)，反映了煤粉射流与配风的分层混合特性。燃尽风喷口附近 O_2 浓度跃升，大量燃尽风的送入使氧气浓度由不足 0.8%快速跃升至 3.6%～3.7%，是炉内氧量变化最为剧烈的区域。自燃尽风喷口后段延伸至炉膛出口处，残余可燃物持续耗氧，氧气浓度沿程递减至炉膛出口的 1.4%～2.8%。

对比图 4(a)和图 4(b)，煤种间差异在炉膛后段被显著放大。在主燃烧区，随掺比增大燃烧器中段氧气浓度系统性降低，中段截面氧量降幅约 25%，表明新疆煤高挥发分集中析出消耗了大量氧气。在燃尽风喷口段氧气峰值各工况均集中于 3.6%～3.7%的窄幅区间，说明燃尽更充分，耗氧量更大。过、再热器区域工况间差距在显著拉大：红一煤出口氧量由掺比 20%时的 2.72%降至 80%时的 1.82%，降幅达 33%，如图 4(a)所示；红二煤则从 2.54%降至 1.43%，降幅达 44%，如图 4(b)所示。出口氧量随掺比而递减，从氧量消耗角度证实了高比例掺烧使火焰中心上移、炉膛上部燃尽份额增大。新疆煤可燃比例高，掺入后燃烧反应性更强，主燃区耗氧加快；高掺比工况上游耗氧更多，燃尽区继续耗氧，导致出口 O_2 浓度明显降低。红二煤出口氧量在各

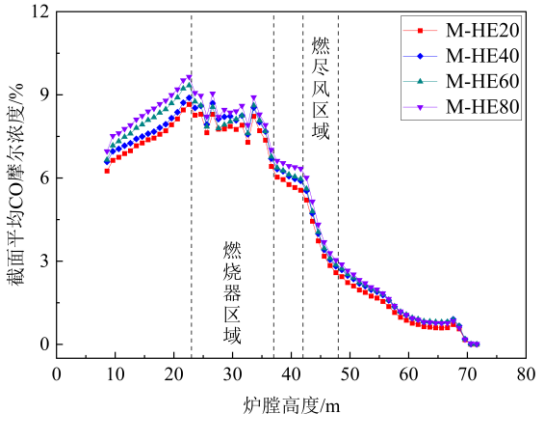
掺比下均略低于红一煤，与其发热量较高有关。

3.3.2 一氧化碳浓度分布特征

图 5 为各工况下沿程 CO 摩尔浓度图。在主燃烧区，煤粉受热后挥发分大量析出，在缺氧条件下生成高浓 CO 并扩散至冷灰斗区，达到炉内最高水平。燃烧器区内 CO 浓度整体处于 7.0%～9.0%的高位，虽已有氧气分级送入，但高强度的挥发分析出使局部仍维持强还原性气氛。进入燃尽风区后，CO 浓度由 36.6 m 处的 6.2%～6.8%持续降至燃尽区末端的 5.0%～5.9%。过、再热器区位于燃尽风喷口之上，充足氧量使 CO 加速氧化，至炉膛出口已降至 0.003%～0.04%的极低水平，说明燃烧趋于彻底。



(a) 蒙混与红一掺烧的 CO 变化



(b) 蒙混与红二掺烧的 CO 变化

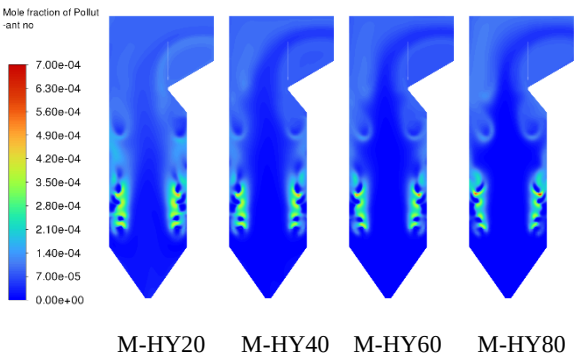
图 5 不同工况下的沿程 CO 摩尔浓度图

Fig.5 CO mole fraction along the path under different working conditions

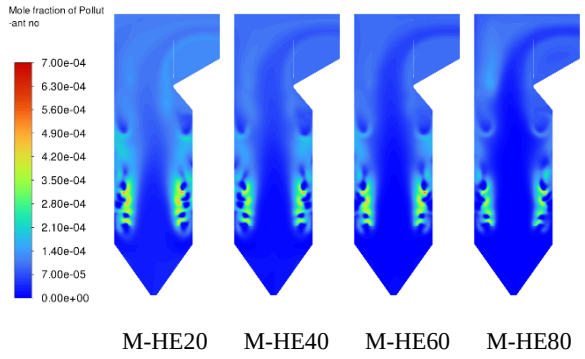
蒙混与红一掺烧的 CO 变化见图 5(a)，蒙混与红二掺烧的 CO 变化见图 5(b)。在冷灰斗区和燃烧器区，CO 浓度随掺比增大而升高，峰值截面红一煤由 8.39%升至 9.94%，红二煤由 8.46%升至 9.53%，源于新疆煤更高挥发分为缺氧区提供了更充沛的不完全燃烧产物。两种煤的差异体现在燃烧器维持区：随红一煤掺比增大，CO 生成量持续增大，体现其高挥发分持续析出特征；红二煤在中高掺比时局部 CO 出现回落，与其热值较高、局部燃烧温度提升促进 CO 氧化有关。进入燃尽风区和过、再热器区后排序反转，高掺比工况 CO 衰减速率明显加快，炉膛出口红一煤 CO 降至约 0.04%，红二煤降至约 0.022%。造成这一前后期反转的原因在于，高比例掺烧虽在炉膛下部产生更多 CO，但也使火焰中心上移、高温区停留时间延长，加速了后期 CO 氧化。

3.3.3 氮氧化物浓度分布特征

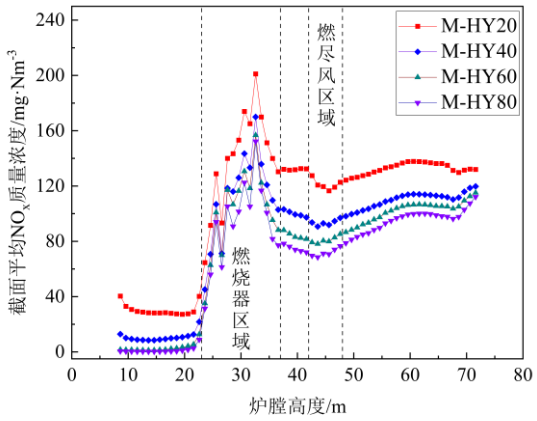
图 6 是各工况下炉内 NO_x 分布云图与沿程 NO_x 质量浓度图。在冷灰斗至燃烧器入口段，热力型 NO_x 生成被完全抑制，质量浓度维持在 40 mg/Nm^3 以下。进入燃烧器区域后，NO_x 浓度快速攀升，于 30.6～32.6 m 高度区间形成首个显著生成峰，峰值浓度因工况不同介于 124～230 mg/Nm^3。NO_x 浓度趋于平稳并略有回落，表明缺氧的强还原性气氛有效抑制了 NO_x 的持续生成。燃尽风注入后，充足的氧量和逐渐下降的烟气温度使 NO_x 浓度保持稳定，不同工况于炉膛出口段维持在 72～168 mg/Nm^3 区间内小幅波动，未出现明显的二次生成峰。



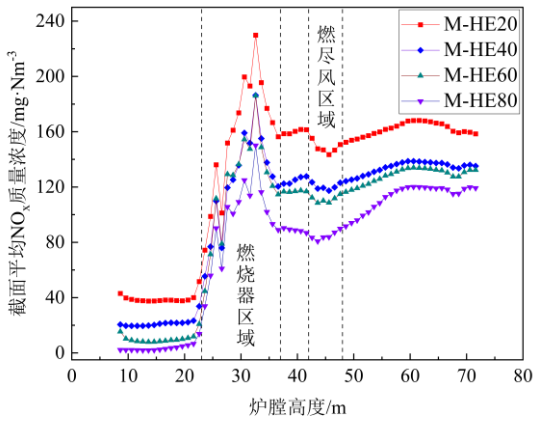
(a) 蒙混与红一掺烧的 Y=0 截面 NO_x 分布云图



(b) 蒙混与红二掺烧的 Y=0 截面 NO_x 分布云图



(c) 蒙混与红一掺烧的 NO_x 变化



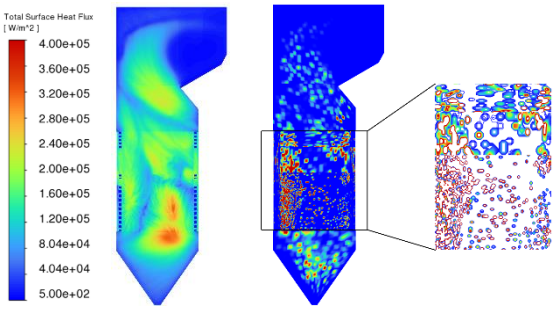
(d) 蒙混与红二掺烧的 NO_x 变化

图 6 不同工况下的沿程 NO_x 质量浓度图

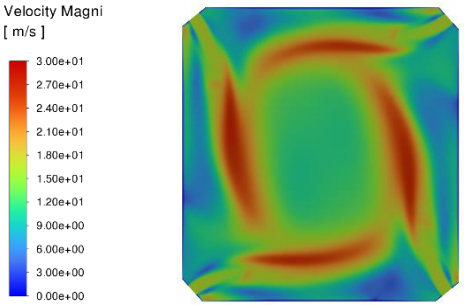
Fig.6 Distribution of cross-section average NO_x mass concentration along furnace height under different working conditions

蒙混与红一掺烧的 NO_x 变化见图 6(c)，蒙混与红二掺烧的 NO_x 变化见图 6(d)。在燃烧器区域，生成峰浓度随掺比增大显著降低，红一煤峰值由 201 mg/Nm^3 降至 152 mg/Nm^3，降幅约 24%；红二煤由 230 mg/Nm^3 降至 150 mg/Nm^3，降幅达 35%。这一降低源于新疆煤燃料氮含量较低减少了前驱物总量，同时高挥发分集中析出强化了还原性气氛，使中间产物更倾向于向 N_2 转化。红二煤降幅更大是因为低掺比时燃烧温度更高、热力型生成贡献较大，随掺比增大温度回落使削减更突出。在炉膛出口截面，降幅较生成峰区显著收窄，红一煤出口 NO_x 由 132.4 mg/Nm^3 降至 107.5 mg/Nm^3，红二煤由 161.5 mg/Nm^3 降至 119.9 mg/Nm^3。红一煤在各掺比下出口 NO_x 均低于红二煤，归因于其燃料氮含量更低、高水分抑制了燃烧峰值温度，以及更强还原性气氛对 NO_x 的整体削减。

3.4 炉内结渣特性



(a) 壁面热流密度云图与燃烧器区域结渣线图



(b) 水平截面速度分布云图

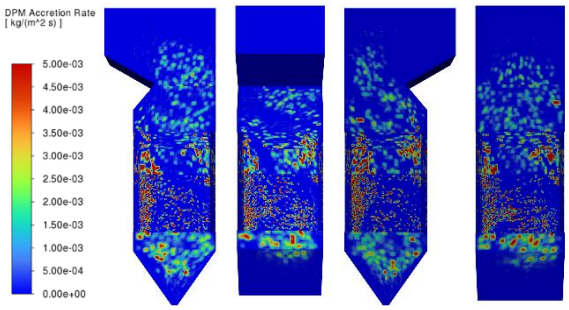
图 7 壁面热流密度、燃烧器区域结渣与水平截面速度分布

Fig.7 Wall heat flux distribution, slagging in the burner zone, and velocity distribution on the horizontal cross-section

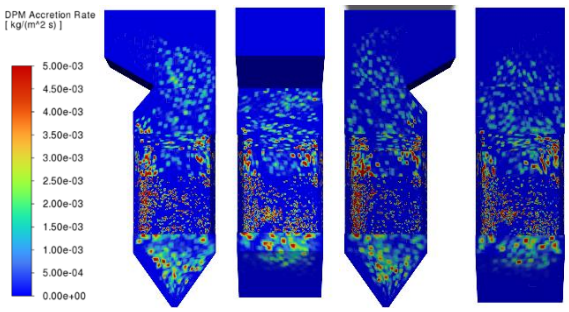
图 7 展示了壁面热流密度分布、燃烧器区域结渣线以及水平截面速度分布，据此可进一步分析壁面沉积的空间分布特征。从壁面热流密度云图可见，燃烧器区域壁面热流密度较高，且沿炉膛高度呈现非均匀分布。各面墙体结渣分布存在

规律性差异，墙壁左侧沉积程度略重于墙壁中间与右侧，这与炉内切圆旋转方向导致的颗粒惯性撞击特征密切相关。各工况炉膛壁面结渣分布如图 8 所示，均呈现显著的空间集中性，按沉积位置可归为三类特征区域。第一类位于燃烧器喷口下游侧壁面，该区域处于四角切圆气流旋转的下游方向，飞灰颗粒在离心力驱动下向水冷壁面迁移富集，与壁面碰撞后黏附形成初始沉积层并快速累积增厚。第二类位于冷灰斗区域，部分高温颗粒在重力与气流卷吸作用下沉降于此，虽壁面温度相对较低，但颗粒自身温度仍高于临界黏度阈值，撞击后迅速凝固成渣。第三类位于燃尽风喷口附近壁面，燃尽风补入后残余焦炭集中燃尽形成局部高温区，同时射流对旋转气流的扰动增加了颗粒与壁面的碰撞概率。

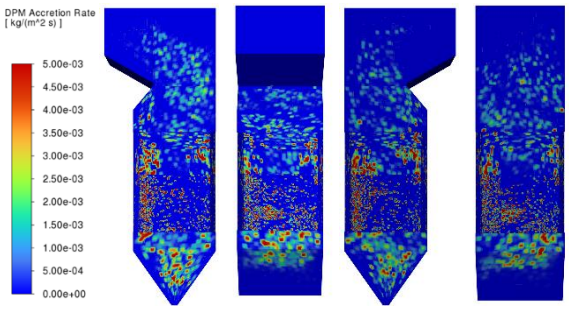
各掺烧工况下的结渣分布见图 8(a)至(g)。掺烧两种新疆煤时，结渣行为的演变规律呈现显著差异，其本质均源于灰成分在高温下发生共熔反应，改变灰熔融特性，进而影响熔融颗粒数量与黏附概率。红一煤灰中 Fe_2O_3、CaO、Na_2O 等碱性组分含量高，而 SiO_2 和 Al_2O_3 等酸性组分相对较低。随掺比增加，红一煤带入的碱性组分与蒙混煤中丰富的 SiO_2 反应，持续生成霞石、钙长石等低熔点共晶体，使混煤灰熔融温度不断降低，熔融颗粒数量随掺比增加，结渣持续加剧。红二煤灰熔点虽与蒙混煤接近，但 Fe_2O_3 含量高达 36.75%，CaO 达 13.17%，而 SiO_2 仅 9.78%、Al_2O_3 仅 6.41%。掺比 40%至 60%时，红二煤带入的高铁组分与蒙混煤的硅铝组分形成低共熔配比，在还原性气氛下 Fe_2O_3 被还原为 FeO，与 SiO_2 反应生成低熔点的铁橄榄石，共熔反应强烈，结渣最严重；掺比升至 80%时，高铁灰分稀释了该低共熔配比，且过量 FeO 在强还原气氛下被进一步还原为固态金属铁，共熔反应减弱，结渣反而缓和。两种煤结渣差异的本质在于共熔反应随掺比变化的模式不同：红一煤因碱性组分持续供给，共熔反应强度随掺比单调递增；红二煤则在特定掺比区间形成最优共熔配比，共熔反应呈先增强后减弱的非单调变化。



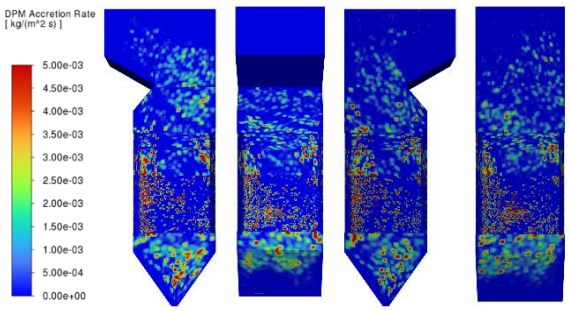
(a) M-HY20 由温度引起的结渣分布



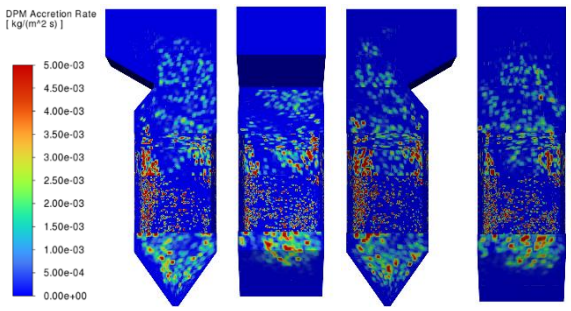
(b) M-HY40 由温度引起的结渣分布



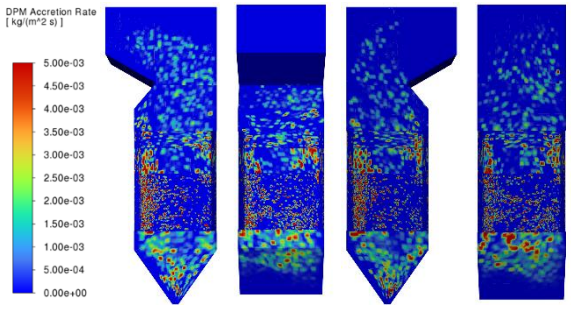
(c) M-HY60 由温度引起的结渣分布



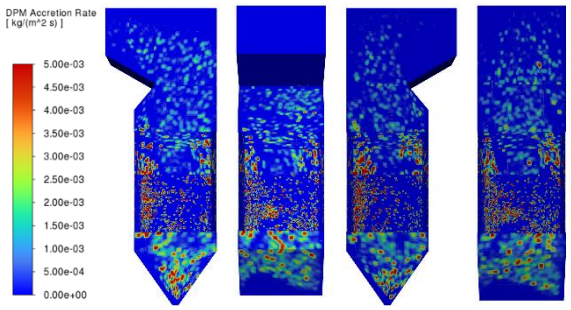
(d) M-HY80 由温度引起的结渣分布



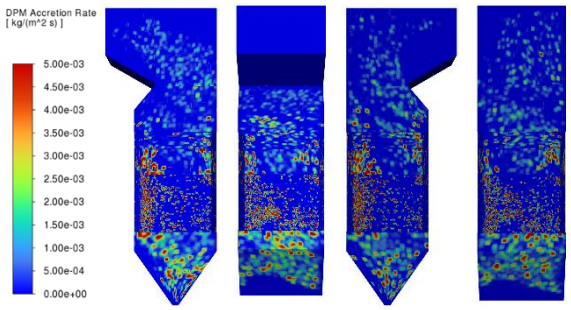
(e)M-HE20 由温度引起的结渣分布



(f)M-HE40 由温度引起的结渣分布



(g)M-HE60 由温度引起的结渣分布



(h)M-HE80 由温度引起的结渣分布

图 8 炉膛壁面由温度引起的结渣情况

Fig.8 Slagging distribution on furnace wall caused by temperature under different working conditions

4 结论

本文数值模拟研究了 660 MW 四角切圆燃煤锅炉在预混掺烧方式下，掺烧两种典型易结渣新疆煤时的燃烧特性、污染物排放及结渣行为，主要结论如下：

1）随新疆煤掺比增加，火焰中心上移，出口烟温升高 17～21 K，出口氧量单调递减，CO 呈主燃区升高、燃尽区加速衰减的特征，燃烧份额后移明显。NO_x 排放随掺比增大显著降低，燃烧器区生成峰浓度降幅达 24%～35%，炉膛出口降幅收窄至 19%～26%。红一煤在各掺比下出口 NO_x 均低于红二煤。

2）红一煤结渣随掺比增加而增强，红二煤结渣呈非单调变化，在 40%与 60%掺比工况下结渣最严重，过高掺比时反而有所缓和。两种煤结渣差异的本质在于共熔反应随掺比变化的模式不同。

3）综合燃烧、NO_x 排放与结渣特性，推荐 M-HY40 为优化掺烧工况，该比例下结渣风险可控、NO_x 排放较低且燃尽良好，可在确保安全的前提下兼顾经济性。

[参 考 文 献]

[1] 董洁，乔建强. “双碳”目标下先进煤炭清洁利用发电技术研究综述[J]. 中国电力，2022，55(8): 202-212.
DONG Jie, QIAO Jianqiang. A Review on Advanced Clean Coal Power Generation Technology Under "Carbon Peaking and Carbon Neutrality" Goal[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 202-212.

[2] 张宏. 以煤炭行业高质量发展筑牢能源压舱石[J]. 中国煤炭工业, 2023, 43(1):1.
ZHANG Hong. Building a solid energy ballast through high-quality development of coal industry[J]. China Coal Industry, 2023, 43(1): 1.

[3] 于伟静，杨鹏威，王放放，等. 双碳战略背景下中国煤电技术发展与挑战[J]. 煤炭学报，2023，48(7): 2641-2656.
YU Weijing, YANG Pengwei, WANG Fangfang, et al. Research and challenges of coal power technology development in China under the background of dual carbon strategy[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2641-2656.

[4] 王双明，申艳军，宋世杰，等. “双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发[J]. 煤炭学报，2023，48(7): 2599-2612.
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SONG Shijie, et al. Change of coal energy status and green and low-carbon development under the “dual carbon” goal[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2599-2612.

[5] 卞正富，张益东，王猛,等.新疆煤炭资源开发潜力与开发策略[J]. 煤炭学报,2024,49(2):967-977.
BIAN Zhengfu, ZHANG Yidong, WANG Meng, et al. Research on the potential and strategy for coal

resources exploitation in Xinjiang[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 967-977.

[6] 王越，杨骞，张锐．新疆主要煤田关键煤质特征及利用途径分析研究[J]．中国煤炭，2024，50(4)：97-104.
WANG Yue, YANG Qian, ZHANG Rui. Analysis and research on key coal quality characteristics and coal utilization ways of major coalfields in Xinjiang[J]. China Coal, 2024, 50(4): 97-104.

[7] Tang C, Pan W, Zhang J, et al. A comprehensive review on efficient utilization methods of High-alkali coals combustion in boilers[J]. Fuel, 2022, 316: 123269.

[8] 马仑，汪涂维，方庆艳,等.混煤燃烧过程中的交互作用:掺混方式对混煤燃烧特性的影响[J]．煤炭学报, 2016,41(09): 2340-2346.
MA Lun, WANG Tuwei, FANG Qingyan, et al. Interaction of blended-coal combustion process: influence of coal blending methods on combustion characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2340-2346.

[9] Kim D W, Park K, Lee G H, et al. Optimal blending ratio of Elga caking coal in Samcheok circulating fluidized bed boilers: Experimental and practical insights[J]. Fuel, 2025, 386: 134235.

[10] 杨益，陈晨，陈珣，等．掺烧哈密地区高碱煤沾污特性的试验研究[J]．煤炭科学技术，2019，47(5)：214-219.
YANG Yi, CHEN Chen, CHEN Xun, et al. Experimental study on fouling characteristics for blending ratio of high-alkali coal in Hami region[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(5): 214-219.

[11] 李林宣，任强强，杨少波,等.高碱煤纯烧的灰化学问题及高效燃烧研究进展[J]．煤炭学报,2024,49(10):4088-4116.
LI Linxuan, REN Qiangqiang, YANG Shaobo, et al. Ash chemistry issues and efficient combustion research progress in pure coal combustion of high-alkali coal[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(10): 4088-4116.

[12] 向家涛，桂其林，杨奕彬，等．高碱煤掺烧低钠煤的混煤结渣特性试验研究[J]．锅炉技术，2024，55(6):42-50.
XIANG Jiatao, GUI Qilin, YANG Yibin, et al. Experimental study on slagging characteristics of high-alkali coal blended with low sodium coal[J]. Boiler Technology, 2024, 55(6): 42-50.

[13] 陈辉，于洁，赖金平，等．烟煤掺配高碱煤燃烧特性及结渣特性试验研究[J]．电力学报，2025，40(1)：1-10.
CHEN Hui, YU Jie, LAI Jinping, et al. Experimental study on blended coal combustion characteristics and slagging characteristics of bituminous coal mixed with high-alkali coal[J]. Journal of Electric Power, 2025, 40(1): 1-10.

[14] Liu Y Q, Cheng L M, Ji J Q, et al. Ash deposition behavior in co-combusting high-alkali coal and bituminous coal in a circulating fluidized bed[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 149: 520-527.

[15] 张大兴，屠竞毅，杨忠灿，等．锅炉经济性煤种掺烧技术研究[J]．热力发电, 2023, 52(10): 79-85.
ZHANG Daxing, TU Jingyi, YANG Zhongcan, et al. Study on economical coal blending technology for boiler[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(10): 79-85.

[16] 杨益，王敦敦，陈珣,等.哈密地区高碱煤掺烧结渣特性综合评价研究[J]．煤炭科学技术,2020,48(6):207-213.
YANG Yi, WANG Dundun, CHEN Xun, et al. Study on comprehensive evaluation of slagging characteristics of high-alkali coal blending combustion from Hami Area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(6): 207-213.

[17] 赵勇纲，王志超，张喜来，等．纯燃高碱煤 660 MW 机组防结渣沾污一体化设计[J]．热力发电，2018，47(3):
104-108.
ZHAO Yonggang, WANG Zhichao, ZHANG Xilai, et al. Integrated design of anti-slagging and fouling for a 660 MW unit burning pure high alkali coal[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(3): 104-108.

[18] Zhang Q C, Ye N, Xu J Y, et al. Real-time fouling monitoring and soot-blowing parameters optimization in boilers burning high-alkali coal[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2025, 66: 104008.

[19] 白雪，王振东.燃用新疆高碱煤锅炉防结渣和沾污措施[J]．锅炉技术,2016,47(6):49-53.
BAI Xue, WANG Zhendong. Preventing measures of fouling and slagging for boilers burning high-alkaline coal in Xinjiang[J]. Boiler Technology, 2016, 47(6): 49-53.

[20] 贺文昊，韩志刚，蔡晋，等．循环流化床锅炉大比例燃用准东煤研究与应用现状[J]．洁净煤技术，2025, 31(S1): 405-415.
HE Wenhao, HAN Zhigang, CAI Jin, et al. Research and application status of combustion of Zhundong coal with a large proportion in circulating fluidized bed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(S1): 405-415.

[21] 张喜来，王志超，周广钦，等．电站锅炉高碱煤燃用技术发展现状及展望[J]．热力发电，2023，52(7)：133-141.
ZHANG Xilai, WANG Zhichao, ZHOU Guangqin, et al. Present situation and prospect of high alkali coal combustion technology in power plant boilers[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 133-141.

[22] 刘威，张忠孝，乌晓江,等.高碱煤燃烧特性试验研究[J].电站系统工程,2014,30(2):20-22+27.
LIU Wei, ZHANG Zhongxiao, WU Xiaojiang, et al. Experimental study of high-alkali coal on combustion characteristic[J]. Power System Engineering, 2014, 30(2): 20-22+27.

[23] 王礼鹏，赵永椿，张军营,等.准东煤沾污结渣特性研究[J].工程热物理学报,2015,36(6):1381-1385.
WANG Lipeng, ZHAO Yongchun, ZHANG Junying, et al. Research on the slagging and fouling characteristics of Zhundong coal[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(6): 1381-1385.

[24] 郭前鑫，李建波，王虎,等.准东煤灰的动态沉积与脱落特性数值模拟研究[J]．发电技术,2025,46(4):829-838.
GUO Qianxin, LI Jianbo, WANG Hu, et al. Study on numerical simulation of dynamic deposition and shedding characteristics of Zhundong coal ash[J]. Power Generation Technology, 2025, 46(4): 829-838.

[25] WALSH P M, SAYRE A N, LOEHDEN D O, et al. Deposition of bituminous coal ash on an isolated heat exchanger tube: effects of coal properties on deposit growth[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1990, 16(4): 327-345.

[26] 董磊，陈曦，马启磊,等.超超临界双切圆燃烧锅炉多煤种掺烧下水冷壁结渣特性的数值模拟[J]. 动力工程学报,2024, 44(2): 241-250.
DONG Lei, CHEN Xi, MA Qilei, et al. Numerical simulation of slagging characteristics of ultra supercritical double-tangential circular fired boiler water wall under the combustion of multiple coals' blending[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(2): 241-250.

[27] 袁天霖，马国伟，王长安,等.燃用高碱煤锅炉积灰结渣模型与数值模拟研究现状及进展[J]. 煤炭学报，2026，51(5)：3229−3250.
YUAN Tianlin, MA Guowei, WANG Chang'an, et al. Overview of research status and progress of fouling and slagging model and numerical simulation in high alkali coal-fired boilers[J]. Journal of China Coal Society, 2026，51(5)：3229−3250.

[28] FANG Q Y, WANG H J, WEI Y, et al. Numerical simulations of the slagging characteristics in a down-fired, pulverized-coal boiler furnace[J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91(1): 88-96.

[29] ZBOGAR A, FRANDSEN F J, JENSEN P A, et al. Shedding of ash deposits[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2009, 35(1): 31-56.

[30] KLEINHANS U, WIELAND C, FRANDSEN F J, et al. Ash formation and deposition in coal and biomass fired combustion systems: Progress and c hallenges in the field of ash particle sticking and rebound behavior[J]. Progress in Energy and Com bustion Science, 2018, 68: 65-168.

（责任编辑 XXX）