

烟草设备

陈振国, 孙光伟, 陈祥, 等. 燃煤型密集烤房污染物排放及脱硫除尘研究[J]. 中国烟草学报, 2021, 27(4). CHEN Zhenguo, SUN Guangwei, CHEN Xiang, et al. Study on pollutant emission and desulphurization and dust removal of coal-burning bulk curing barn [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2021, 27(4). doi: 10.16472/j.chinatobacco.2020.187

燃煤型密集烤房污染物排放及脱硫除尘研究

陈振国¹, 孙光伟¹, 陈祥², 谭本奎³, 杨杨⁴, 乔瑜^{5*}, 王博⁵, 黄经春⁵

1 湖北省烟草科学研究院, 武汉市硚口区宝丰路6号 430030;

2 中国烟叶公司, 北京市西城区广安门外大街9号 100055;

3 湖北省烟草公司宜昌市公司, 湖北省宜昌市沿江大道42号 443000;

4 湖北省烟草公司恩施州公司, 湖北恩施市施州大道119号 445000;

5 华中科技大学, 武汉市洪山区珞喻路1037号 430074

摘要: 【目的】为解决燃煤型密集烤房烘烤过程中 SO_2 、烟尘排放不达标等问题。【方法】在福建、贵州、云南、河南以及湖北五个省设置试验点开展了燃煤密集烤房主要污染物减排技术研究。【结果】普通燃煤密集烤房加煤类型及方式对污染物排放影响较大, SO_2 、烟尘、CO 平均排放浓度分别为 658.96 mg/m^3 、 65.52 mg/m^3 、 3243.12 mg/m^3 ; 烤房烟囱安装湿法脱硫设备 SO_2 排放降低 72%~92%, 烟尘排放降低 75%~92%; 安装加煤机自动进煤污染物排放降低 40% 以上, 热效率提高 24.91%, 煤耗降低 16.75%, 烘烤成本降低 28.85%; 湿法脱硫设备及自动加煤机联合使用脱硫效率稳定在 85% 左右, 除尘效率稳定在 95% 左右。【结论】燃煤密集烤房安装湿法脱硫设备及自动加煤机可实现高效脱硫除尘, SO_2 排放浓度低于 30 mg/m^3 , 烟尘排放浓度低于 15 mg/m^3 。

关键词: 密集烤房; 脱硫除尘; 热效率; 自动加煤

燃煤型密集烤房是我国烤烟生产的主要调制设备, 煤燃烧后通过散热设备加热烤房内空气, 使烟叶脱水干燥, 此过程需要消耗大量的热量, 每烤 1 kg 干烟约需要 1.5 kg 煤炭^[1-2], 我国是世界烤烟生产第一大国, 烤烟年产量维持在 $1.5 \times 10^6 \text{ t}$ 左右, 每年烤烟需消耗煤炭约 $2.25 \times 10^6 \text{ t}$, 由于缺少相应的减排设备及措施, 烤房燃煤产生的 SO_2 、烟尘等污染物直接排放到大气中, 环境危害较重。随着绿色发展理念的贯彻, 实现烘烤环节低碳环保是亟待解决的问题^[3], 各地均加大了生物质能、太阳能、热泵等清洁能源烤房的研发, 太阳能由于单位面积能量密度低及昼夜交替现象难以作为单一热源满足烘烤需求, 多作为辅助能源用于烟叶烘烤^[4-5]; 以醇基燃料^[6-7]、生物质颗粒^[8-9]为代表的生物质能烤房, 使用成本较

低、控温性能较好得到迅速推广, 但受醇基燃料运输、存储的安全性, 生物质颗粒原料来源等问题制约, 短期内还不能完成对燃煤烤房的大面积替代; 热泵烤房由于其显著的环保和节能优势具有广泛的应用前景^[10-13], 但目前其较高的造价及维护成本、电路改造等问题限制了其进一步推广应用。因此燃煤密集烤房一段时间内仍将是我国主要的烤烟设备, 降低燃煤密集烤房污染物排放和煤耗是目前急需解决的问题。烟气湿法脱硫除尘技术^[14-15]在大型锅炉供热及火力发电等领域已十分成熟, 但在密集烤房上的使用鲜有报道^[16]。本文分析了燃煤密集烤房烘烤各阶段污染物排放和热损失规律, 探讨了脱硫除尘设备及自动加煤对烘烤减排及能耗的影响, 期为燃煤密集烤房节能减排提供借鉴。

基金项目: 湖北省烟草公司重点科技项目“密集烤房节能减排技术优化集成研究”(027Y2017-007)

作者简介: 陈振国(1975—), 博士, 高级农艺师, 研究方向为烟草栽培与调制, Email: hbskys1@163.com

通讯作者: 乔瑜, 教授, 研究方向为热能工程, Email: yuqiao@hust.edu.cn

收稿日期: 2020-06-28; **网络出版日期:** 2021-05-31

1 材料与方法

1.1 试验设计

污染物排放监测及脱硫除尘试验于 2017 年在福建建宁 (A)、贵州平坝 (B)、河南禹州 (C)、云南泸西 (D)、湖北利川 (E) 等五地开展, 选取当地常规燃煤密集烤房 10 座, 其中 5 座安装脱硫除尘设备, 剩余 5 座为对照烤房进行污染物排放监测, 各烤房依据当地加煤习惯人工加煤, 每 3 h 左右加煤 1 次, 每次加煤 10 kg 左右; 自动加煤试验于 2018 年在湖北利川试点开展, 设置三个处理: 人工加煤、

加煤机加煤、加煤机与脱硫除尘设备连用, 各处理分别选取 5 座烤房进行监测, 自动加煤与人工加煤用煤相同, 需砸碎控制煤块直径在 5 cm 左右, 自动加煤机购自安徽中科自动化股份有限公司, 型号为 ZKE5LBZ, 试验配置及控制原理: 自动加煤装置的漏斗内装煤量确定为 60 kg, 每当自控仪在控制鼓风机开启时, 螺旋推进器往燃烧室内进煤加煤 1 次, 加煤时间设为 3 min, 每分钟加煤量约 1 kg。

各试点烤房均采用三段五步式烘烤工艺。各试验点用煤均为当地煤炭, 参考 GB/T 213 煤的发热量测定方法^[17]对各试验点煤样进行基础分析, 结果见表 1。

表 1 各试验点煤样基础分析

Tab. 1 Basic analysis of coal samples at each test site

试验点	工业分析 / (wt%)			元素分析 / (wt%)					低位热值 / (MJ/kg)
	V _d	A _d	FC _d	C _d	H _d	O _d *	N _d	S _d	
福建建宁	34.67	3.19	62.14	80.27	5.30	10.03	0.88	0.32	29.37
贵州平坝	7.41	19.36	73.22	72.12	2.86	1.29	0.87	3.49	26.91
河南禹州	37.03	15.10	47.87	62.26	4.25	14.91	0.64	2.84	23.78
云南泸西	15.80	23.18	61.03	70.04	4.04	1.35	1.14	0.25	27.20
湖北利川	39.48	2.36	58.15	75.33	5.47	15.46	1.03	0.35	29.64
平均值 ± 标准差	26.87±14.36	12.63±9.45	60.48±9.08	72.00±6.67	4.38±1.06	8.61±6.98	0.91±0.19	1.45±1.58	27.38±2.36

脱硫除尘处理: 各试点常规燃煤密集烤房为对照, 处理烤房加装脱硫除尘设备, 五连体烤房共用一套空压机、蠕动泵、浆液池, 具体结构见图 1。其原理是石灰石 - 石膏湿法脱硫^[18], 在密集型烤房的烟囱出口处加装一个雾化喷嘴, 利用烟道作为反应器, 通过向

烟囱管道中喷 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浆液 (浓度质量分数 10%) 来实现脱硫除尘, 烟气中的 SO_2 与雾状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 液滴发生化学反应从而被吸收掉, 烟尘则通过与雾状水滴的惯性碰撞、拦截捕获、核凝等机理除去^[19-20]。

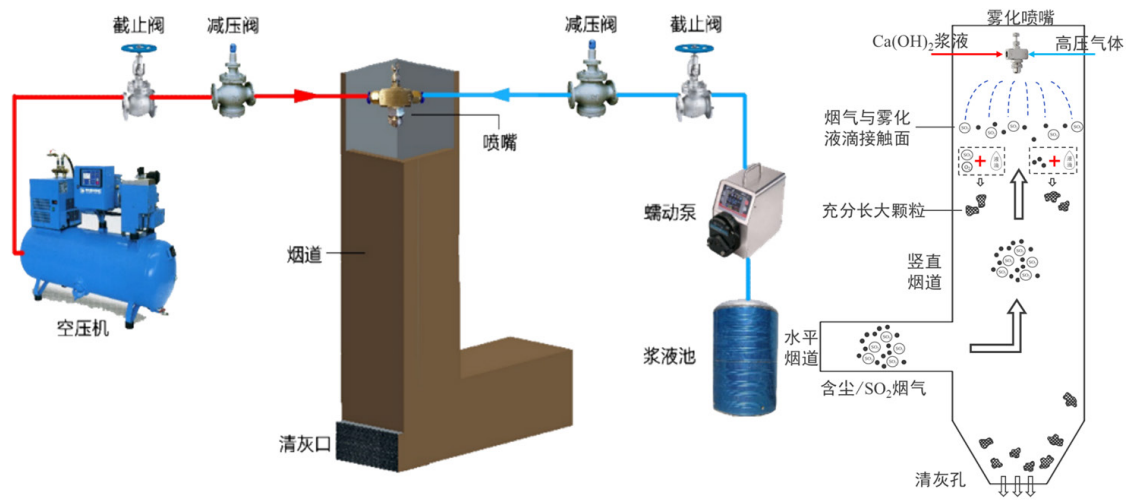


图 1 烤房脱硫除尘设备原理

Fig. 1 Principle of desulfurization and dust removal equipment

1.2 测定项目及方法

烟气成分 (CO、SO₂) 和流场参数 (烟气流速、烟气温度) 测试采用手持式烟气分析仪 (OPTIMA 7, 德国 MRU 烟气分析仪) 进行连续在线监测, 烟气成分和流场参数的测量按照 HJ/T 75—2001《火电厂烟气排放连续监测技术规范》等规范与标准对烟气进行直接抽取式连续监测, 监测位置位于换热器或尾部烟道出口处, 烟气分析仪 10 s 记录 1 次烟气成分, 测量时间 2 min, 烟气成分和流场参数取 2 min 内的平均值。烟尘浓度采用武汉市天虹仪表有限责任公司生产的 TH-880F 微电脑烟尘平行采样仪进行采样, 采样位置位于尾部烟道出口处, 每组采样时间为 10 min, 抽气流量为 30~60 L/min, 烟尘浓度为该段时间内的平均浓度。测定时间为工艺各转火点稳温末期, 取连续测量三次的平均值为该阶段的排放量。

污染物排放浓度计算以《工业炉窑大气污染物排放标准》^[21] 为参考, 实测的污染物排放浓度按照以下公式折算为基准氧含量排放浓度, 基准含氧量为 9%。

$$C=C' \times (21-O_2)/(21-O_2') \dots \dots \dots (1)$$

其中:

C——污染物基准氧含量排放浓度, mg/m³;

C'——实测的污染物排放浓度, mg/m³;

O₂——基准氧含量, %;

O₂'——实测的氧含量, %。

烤房热效率通过反平衡法计算得出 (由于本研究主要关注炉膛及烟道部分的热损失, 排湿损失和烤房散热损失未进行测试, 因此该热效率为估算值), 其计算公式如下^[7]。计算中烤房排湿损失 $q_{排}$ 取 30%, 烤房散热损失 $q_{散}$ 取 12.5%, 其他损失 (如房体、烟叶升温以及炉门向外辐射散发的热量) q_{7-9} 取 5%^[22-23], 以上均为参考值。

$$\eta = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_{散} + q_{排} + q_6), \% \dots \dots \dots (2)$$

q_2 ——排烟热损失百分比, %;

q_3 ——化学不完全燃烧热损失百分比, %;

q_4 ——机械不完全燃烧热损失百分比, %;

q_5 ——炉门漏风散热损失百分比, %;

$q_{散}$ ——烤房散热损失百分比 (取 12.5%), %;

$q_{排}$ ——烤房排湿损失百分比 (取 30%), %;

q_6 ——灰渣物理热损失百分比, %;

q_{7-9} ——其他损失 (取 5%), %。

1.3 数据处理

试验数据使用 Excel 2016 分析、处理。

2 结果与分析

2.1 各试验点燃煤烤房排放现状

图 2 为各试验点烤房随烘烤工艺流程烟囱 SO₂、烟尘和 CO 排放浓度情况。福建建宁试验点、云南泸西试验点、湖北利川三个试验点用煤属于低硫煤, 煤中硫含量分别为 0.32%、0.25%、0.35%, SO₂ 平均排放浓度分别为 114.00 mg/m³、188.40 mg/m³、135.20 mg/m³。贵州平坝、河南禹州试验点煤中硫含量较高, 分别为 3.49%、2.84%, 贵州平坝试验点 SO₂ 平均排放浓度为 2404.40 mg/m³, 而河南禹州试验点 SO₂ 平均排放浓度为 252.80 mg/m³, 贵州平坝单次加煤约为 15 kg 是河南禹州的 3 倍, 导致炉内煤层堆积较厚, 相同时间内释放的 SO₂ 浓度较大, 可见除燃煤含硫量外, 加煤习惯对 SO₂ 排放浓度有较大影响。不同烘烤阶段 SO₂ 排放浓度不同, 除贵州平坝试验点外, 各地随烤房温度的升高, SO₂ 排放浓度升高。

各试点每烤次烟尘排放浓度平均为 65.52 mg/m³, 湖北利川试点排放浓度较高, 平均为 139.80 mg/m³, 与该试点用煤挥发分含量较高有关。不同烘烤阶段烟尘浓度也存在一定差异, 在中火期和大火期烟尘浓度明显大于小火期, 这主要是由于中火期、大火期助燃风机运行时间长, 加速煤块燃烧, 需提高加煤频次或单次加煤量以保证烤房内热量供应, 导致烟尘释放浓度提高。CO 污染物的产生主要是燃烧不充分导致的, 整个烘烤过程排放浓度平均为 3243.12 mg/m³, 烤房温度处于 38℃~42℃小火期时 CO 排放浓度为整个周期最高值, 当烤房温度达到 48℃烟叶进入大火期后, 助燃风机运行时间加长, CO 充分燃烧转化为 CO₂。

2.2 各试点脱硫除尘设备运行效果分析

表 2 为各试点烤房脱硫除尘设备运行效果, 从表中可以看出与对照烤房相比, 安装脱硫除尘设备

表 2 脱硫除尘设备运行效果分析

Tab. 2 Operation effect analysis of desulfurization and dust removal equipment

试验点	脱硫后 SO ₂ 浓度 / (mg/m ³)	脱硫效率 / %	除尘后烟尘浓度 / (mg/m ³)	除尘效率 / %
福建建宁	5~33	73~86	2~6	76~85
贵州平坝	443~827	72~90	8~29	77~92
河南禹州	4~76	70~87	3~27	80~91
云南泸西	9~94	76~88	6~23	76~90
湖北利川	10~63	77~92	9~37	78~92

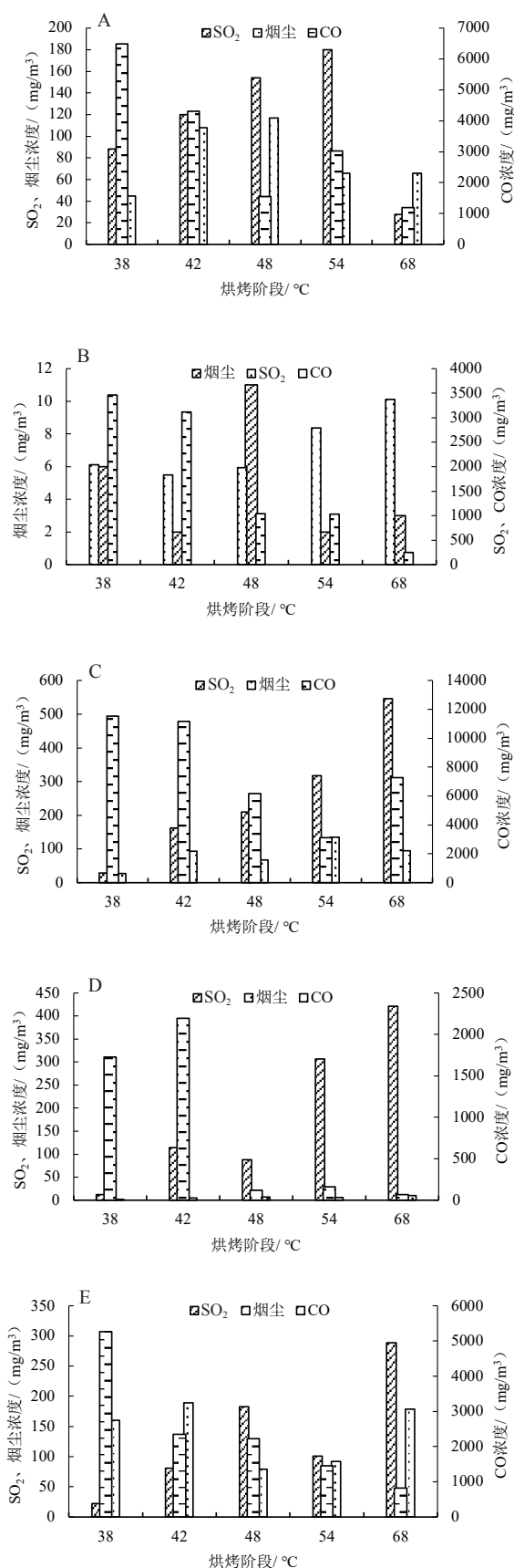


图2 各试验点烘烤各阶段污染物平均排放浓度

Fig. 2 The average emission concentration of pollutants at each stage of curing at each test site

烤房 SO₂、烟尘排放浓度大幅度降低, 脱硫效率为 72%~92%, 除尘效率为 75%~92%。福建建宁、河南禹州、云南泸西、湖北利川等试点设备运行变黄期、定色期、干筋期各阶段石灰水喷施流量分别设置为 50、100、150 mL/min, 贵州平坝试点由于煤中硫含量较高, SO₂ 排放浓度较大, 石灰水喷施量各阶段为其他试验点的两倍。

2.3 自动加煤机对烤房污染物排放及热效率的影响

图 3 为湖北利川试点人工加煤和自动加煤机单次加煤后 1 h 内污染物浓度变化情况, 从图中可以看出人工加煤污染物浓度成单峰分布, 且峰值较大,

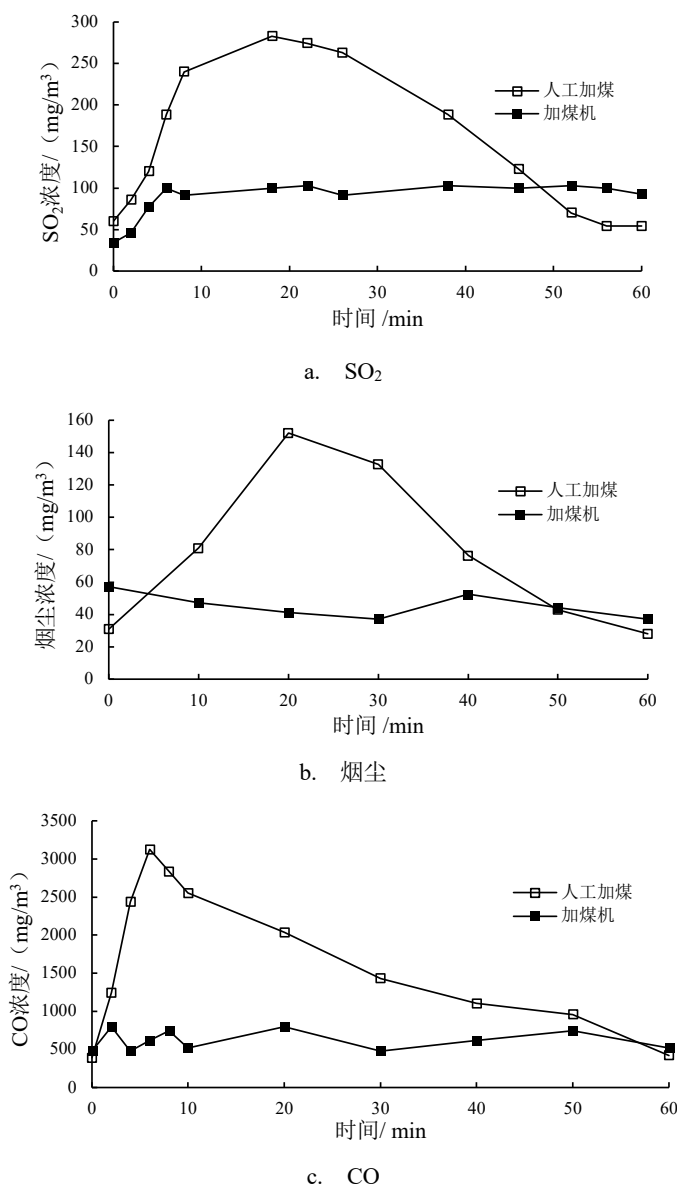


图3 湖北利川试点人工加煤和自动加煤机单次加煤后污染物浓度变化趋势

Fig. 3 Change trend of pollutant concentration after single feeding of manual and automatic stoker at Lichuan test site of Hubei

加煤后 20 min 内污染物排放达到最高值, SO_2 浓度为 280 mg/m^3 , 烟尘浓度为 160 mg/m^3 , CO 浓度为 3300 mg/m^3 ; 加煤机自动进煤方式污染物排放较为稳定, SO_2 、烟尘、CO 排放浓度分别在 $90\sim 110 \text{ mg/m}^3$ 、 $40\sim 60 \text{ mg/m}^3$ 、 $500\sim 1000 \text{ mg/m}^3$ 范围内波动, 与人工加煤相比, SO_2 、烟尘、CO 平均排放浓度分别降低了 43.05%、41.90%、63.38%, 采用加煤机自动进煤方式可有效降低污染物排放波动, 同时煤燃烧更加充分。

表 3 为湖北利川试验点加煤机与人工加煤各项热损失和热效率对比, 从表中可以看出, 采用自动加煤机加煤变黄期、干筋期 q_2 排烟热损失明显降低, 同时煤的燃尽率提高, 降低了各阶段 q_3 、 q_4 不完全燃烧热损失; 自动加煤机与人工加煤相比整个烘烤过程平均热效率提高了 24.92%。

表 3 湖北利川试验点不同加煤方式烤房热损失对比

Tab. 3 Comparison of heat loss at curing barn under coal feeding modes at Lichuan test site of Hubei

加煤方式	阶段	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	η
加煤机	变黄期	1.48	2.81	1.72	-	0.02	46.47
	定色期	13.28	0.28	-	-	0.04	37.18
	干筋期	13.37	0.28	-	-	0.04	37.09
人工	变黄期	9.7	4.63	2.26	-	0.02	35.89
	定色期	15.39	1.07	-	-	0.04	33.74
	干筋期	21.35	0.35	-	1.46	0.05	27.03

2.4 燃煤烤房不同减排措施污染物排放对比

图 4 为湖北利川试点不同减排措施烤房整个烘烤过程中污染物排放浓度变化的箱线对比图, 可以看出与人工加煤相比, 加煤机自动进煤 SO_2 排放浓度控制在 132 mg/m^3 以内, 平均降低 36.09%, 加煤机和脱硫除尘设备联合使用可使 SO_2 排放浓度控制在 30 mg/m^3 以内, 平均降低 84.08%; 加煤机自动进煤烟尘排放控制在 87 mg/m^3 以内, 平均降低 63.90%, 加煤机和脱硫除尘设备共同使用可使烟尘排放浓度控制在 15 mg/m^3 以内, 平均降低 94.37%。

2.5 燃煤烤房不同减排措施成本分析

表 4 为不同减排措施烤房成本分析, 投入设备以使用年限 5 年, 每年每烤房烘烤 5 次烟叶计算, 可以看出脱硫除尘设备每烤次增加成本 81.55 元; 安装自动加煤机后, 与普通燃煤烤房相比, 每烤次设备成本增加 120 元, 煤耗成本降低 16.75%, 用工成本降低

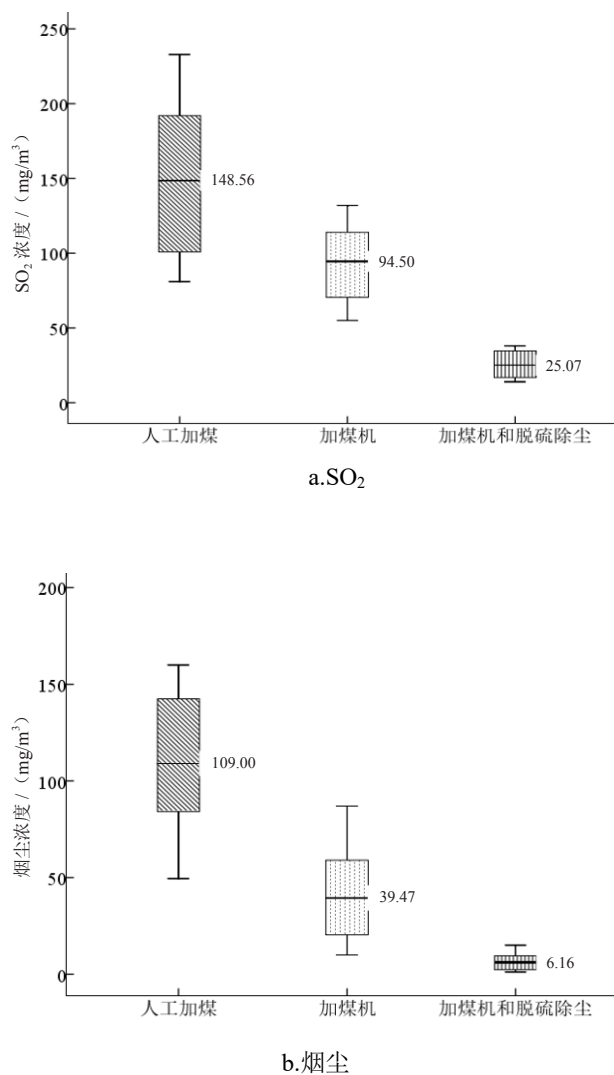


图 4 利川试点不同减排措施烤房污染物排放浓度对比

Fig. 4 Comparison of pollutant emission under different emission reduction measures at Lichuan test site of Hubei

83.33%, 总成本降低 28.85%; 加煤机和脱硫除尘设备联合使用成本为 1000.75 元, 与普通燃煤烤房相比降低 22.54%。

3 讨论

煤炭是我国的第一大能源, 也是我国烟叶烘干的主要燃料, 未来几年仍将占主体地位。通过分析福建建宁、贵州平坝、河南禹州、云南泸西、湖北利川等五地密集烤房污染物排放情况, 结果显示燃煤密集烤房 SO_2 平均排放浓度为 658.96 mg/m^3 、烟尘平均排放浓度为 65.52 mg/m^3 、CO 平均排放浓度为 3243.12 mg/m^3 , 不同试点污染物排放存在较大差异, 煤中硫、挥发分含量高是导致 SO_2 、烟尘浓度增大的根本原因,

表 4 不同减排措施烘烤成本分析
Tab. 4 Analysis of curing cost under different emission reduction measures

烤房类型	煤耗 / (yuan/ 炕)	10% 石灰水 / (yuan/ 炕)	额外电耗 / (kW·h/ 炕)	设备成本 / (yuan/ 炕)	人工成本 / (yuan/ 炕)	总成本 / (yuan/ 炕)
普通烤房	812.00				480.00	1292.00
加煤机	676.00		43.2	120.00	80.00	919.20
脱硫除尘		15.99	5.56	60.00		81.55

注：煤 800 元 /t，电价 0.6 元 /kW·h，10% 石灰水 23.2 元 /m³；工价 80 元 / 个，加煤机 3000 元 / 座，脱硫除尘设备 1500 元 / 座，以使用 5 年每年烤 5 炕烟计。

Note: Coal 800 yuan /t, Electricity price 0.6 yuan/ kW·h, 10% lime water price 23.2 yuan/ m³; labour cost 80 yuan/ day, automatic stoker: 3000 yuan / barn, desulfurization and dedusting equipment: 1500 yuan /barn, which is assumed to be in service for 5 years, curing 5 pits of tobaccos every year.

同时污染排放受用户加煤习惯的影响较大，单次加煤量过大，煤层较厚许多挥发的有机物不能充分燃烧会增大烟尘和 CO 含量，导致污染物排放浓度波动幅度较大。安装自动加煤机可控制进料速度^[24]，避免了煤层过厚，可有效降低污染物的排放浓度，同时通过自控仪控制加煤与烤房温度需求的适配度，提高了煤的燃烧率，烤房热效率提高；污染物排放波动性较低，有利于提高脱硫除尘设备运行效率。

石灰石 - 石膏湿法烟气脱硫是目前最有效的脱硫技术^[25]，具有吸收剂来源广、成本低、脱硫效率高等优点，燃煤烟气在喷淋浆液的洗涤作用下不仅能高效脱除 SO₂ 而且可以协同去除细颗粒物^[26]。本试验使用高品位石灰石溶于水制成 10% Ca(OH)₂ 浆液，根据烘烤工艺变黄期、定色期、干筋期划分各阶段浆液喷施流量为 50、100、150 mL/min，下一步研究利用低品位石灰石的湿法烟气脱硫系统建模^[27]，同时强化学习烟气脱硫除尘预测调度^[28]，进一步提高脱硫除尘效率，降低使用成本。

“十四五”发展规划对非重点行业炉窑减排提出了新目标，建立了淘汰小型燃煤炉窑、清洁能源替代、提高末端治理设施去除率等减排方案^[29]，烟草行业实施燃煤烤房升级改造是推动行业高质量发展、推进供给侧结构性改革的重要抓手。采用湿法脱硫除尘配合自动加煤技术可大幅降低污染物排放，但仍无法完全杜绝燃煤污染，开展清洁能源替代燃煤研究是今后的重点方向。

4 结论

普通燃煤密集烤房燃煤类型及加煤方式对污染物排放影响较大，在当前密集烤房燃烧设备技术条件下，选择低硫、低挥发分煤，安装自动加煤装置可有效降低污染物排放。但还不能完全杜绝 SO₂ 排放，适应绿色发展需要，加强密集烤房燃煤替代与应用研究对烟

叶烘烤发展具有重要意义。

普通燃煤密集烤房采用湿法脱硫除尘技术脱硫效率可达到 72%~92%，除尘效率可达到 75%~92%，配合加煤机自动进煤脱硫效率稳定在 85% 左右，除尘效率稳定在 95% 左右，SO₂ 排放浓度低于 30 mg/m³，烟尘排放浓度低于 15 mg/m³，普通燃煤密集烤房可采用湿法脱硫除尘技术配合加煤机自动进煤实现高效脱硫除尘，减少污染物排放。

参考文献

[1] 宫长荣, 潘建斌, 宋朝鹏. 我国烟叶烘烤设备的演变与研究进展 [J]. 烟草科技, 2005, 11: 34-36.
GONG Changrong, PAN Jianbin, SONG Zhaopeng, et al. Evolution of Tobacco Leaf Flue-curing Equipment in China[J]. Tobacco Science & Technology, 2005, (11): 34-36.

[2] 宋朝鹏, 陈江华, 许自成, 等. 我国烤房的建设现状与发展方向 [J]. 中国烟草学报, 2009, 15(3): 83-86.
SONG Zhaopeng, CHEN Jianghua, XU Zicheng, et al. Current situation and development trend of flue-cured tobacco curing barn in China[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2009, 15(3): 83-86.

[3] 孙光伟, 陈振国, 孙敬国. 密集烤房能源利用现状及发展方向 [J]. 安徽农业科学, 2013, (20): 8691-8693.
SUN Guangwei, CHEN Zhenguo, SUN Jingguo. Utilization Status and Development Direction of Bulk Curing Barn Energy[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, (20): 8691-8693.

[4] 陈永安, 徐增汉, 罗红香, 等. 我国利用太阳能辅助烘烤烟叶研究现状 [J]. 中国农业科技导报, 2012, 14(06): 122-127.
CHEN Yongan, XU Zenghan, LUO Hongxiang, et al. Research Status of Solar Energy Assisted Curing Tobacco Leaves in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2012, 14(06): 122-127.

[5] 沈燕金, 许龙, 冯坤, 等. 太阳能辅助热源烟叶的烘烤特性及含水率变化模型 [J]. 太阳能学报, 2017, 38(10): 2737-2742.
SHEN Yanjin, XU Long, FENG Kun, et al. Curing Characteristics And Moisture Content Change Model Of Tobacco Using Solar Energy Auxiliary Heat Source[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017, 38(10): 2737-2742.

[6] 王建安, 段卫东, 申洪涛, 等. 醇基燃料密集烘烤加热设备及其烘烤效果研究 [J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(09): 70-76.
WANG Jianan, DUAN Weidong, SHEN Hongtao, et al. Conjoined Furnace Using Alcohol-based Liquid Fuels as Energy for Tobacco

- Curing[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(09): 70-76.
- [7] 陈妍洁, 赵正雄, 朱立春, 等. 醇基与生物质颗粒两种燃料烘烤烟叶效果差异研究[J]. 西南农业学报, 2019, 32(07): 1560-1565.
- CHEN Yanjie, ZHAO Zhengxiong, ZHU Lichun, et al. Study on Effects of Tobacco Leaves Flue-Cured by Alcohol-based Fuel and Biomass Pellets[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(07): 1560-1565.
- [8] Bortolini, Gamberi, Mora, et al. Greening the tobacco flue-curing process using biomass energy: a feasibility study for the flue-cured Virginia type in Italy[J]. International Journal of Green Energy, 2019, 16(14).
- [9] 王建安, 刘国顺. 生物质燃烧锅炉热水集中供热烤烟设备的研制及效果分析[J]. 中国烟草学报, 2012, 18(6): 32-37.
- WANG Jianan, LIU Guoshun. Development of tobacco-curing system centrally heated by biomass-fueled hot water boiler[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2012, 18(6): 32-37.
- [10] 孙晓军, 杜传印, 王兆群, 等. 热泵型烟叶烤房的设计探究[J]. 中国烟草学报, 2010, 16(01): 31-35.
- SUN Xiaojun, DU Chuanyin, WANG Zhaoqun, et al. Investigation into the design and development of heat pump equipped tobacco leaf bulk curing-barn[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2010, 16(01): 31-35.
- [11] 吕君, 魏娟, 张振涛, 等. 热泵烤烟系统性能的试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(S1): 63-67.
- LV Jun, WEI Juan, ZHANG Zhentao, et al. Experimental study on performance of heat pump system for tobacco leaf flue-curing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(S1): 63-67.
- [12] 任杰, 曹亚凡, 卢晓华, 等. 可调节气流方向的闭式循环热泵烤房的设计应用[J]. 烟草科技, 2019, 52(08): 82-88.
- REN Jie, CAO Yafan, LU Xiaohua, et al. Design and application of closed-loop heat pump curing barn with variable airflow direction[J]. Tobacco Science & Technology, 2019, 52(08): 82-88.
- [13] 许锡祥, 陈承亮, 吕作新, 等. 几种新型密集烤房烘烤效果比较[J]. 中国烟草科学, 2017, 38(05): 82-86.
- XU Xixiang, CHEN Chengliang, LV Zuoxin, et al. Study on Several New Type Bulk Curing Barns and Their Curing Effects[J]. Chinese Tobacco Science, 2017, 38(05): 82-86.
- [14] 李立清, 曾光明. 锅炉烟气脱硫除尘一体化装置的开发与应用[J]. 环境污染治理技术与设备, 2000, (02): 39-43.
- LI Liqing, ZENG Guangming. Development Of The Integrated Equipment Of Dust Removal And Desulfurization Of Flue Gas For Coal-Burning Boiler[J]. Techniques And Equipments For Environmental Pollution Control, 2000, (02): 39-43.
- [15] 岳焕玲, 原永涛, 宏哲. 石灰石-石膏湿法烟气脱硫喷淋塔除尘机理分析[J]. 电力环境保护, 2006, (06): 13-15.
- YUE Huanling, YUAN Yongtao, HONG zhe. Analysis of dust removal mechanism in sprayer of limestone/gypsum wet flue gas desulfurization system[J]. Electric Power Environmental Protection, 2006, (06): 13-15.
- [16] 赵光明, 罗鸣, 邹敏杰, 等. 密集烤房群应用烟气处理系统的研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(14): 6480-6482.
- ZHAO Guangming, LUO Ming, ZOU Minjie, et al. Application of Flue Gas Treatment System in Intensive Bulk-curing Barn Group[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(14): 6480-6482.
- [17] 煤炭科学研究总院煤炭分析实验室. 煤的发热量测定方法, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局; 中国国家标准化管理委员会, 2008, p. 28.
- China Coal Research Institute. Determination of calorific value of coal.General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2008.
- [18] Wenxiao Shi, Chen Lin, Wei Chen, et al. Environmental effect of current desulfurization technology on fly dust emission in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 72(MAY): 1-9.
- [19] 任爱玲, 郭斌, 韦玉堂, 等. 中小窑(锅)炉消烟除尘脱硫一体化装置的研究[J]. 河北工业科技, 2000, 17(2): 23-26.
- REN Ailing, GUO Bin, WEI Yutang, et al. Study on an integrative device for smoke dispersal, dust removal and desulphurization of the middle and small pit stove[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2000, 17(2): 23-26.
- [20] 余达蔚. 石灰石-石膏湿法脱硫系统降耗与排放指标多因素关联分析[D]. 华北电力大学(北京), 2011.
- YU Dawei. WFGD associated energy-saving and emission targets with multivariate correlation analysis[D]. North China Electric Power University, 2011.
- [21] 中国环境科学院环境标准所. 工业炉窑大气污染物排放标准, 国家环境保护局, 1996.
- Chinese Research Academy of Environmental Sciences. Emission standard of air pollutants for industrial furnaces and kilns, State Environmental Protection Administration, 1996.
- [22] 宋朝鹏, 艾绥龙, 王胜雷, 等. 烟叶烘烤能耗与节能途径分析[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(2): 647-649.
- SONG Zhaopeng, AI Suilong, WANG Shenglei, et al. Analysis on the Energy Consumption and Energy Saving Measures[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(2): 647-649.
- [23] 和智君, 罗会龙, 钟浩, 等. 烟叶烘烤密集型烤房节能技术途径分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(08): 337-340.
- HE Zhijun, LUO Huilong, ZHONG Hao, et al. The energy saving technology analysis of bulk curing barn[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(8):337-340.
- [24] 高荣, 徐立猛, 于志军, 等. 自动加煤设备在烤烟密集烘烤中的应用[J]. 黑龙江农业科学, 2019, (09): 108-110.
- GAO Rong, XU Limeng, YU Zhijun, et al. Application of Automatic Coal-adding Equipment in Intensive Baking of Flue-cured Tobacco[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2019, (09): 108-110.
- [25] Cui Lin, Lu Jingwen, Song Xiangda, et al. Energy conservation and efficiency improvement by coupling wet flue gas desulfurization with condensation desulfurization[J]. Fuel, 2021, 285.
- [26] 王军锋, 李金, 徐惠斌, 等. 湿法脱硫协同去除细颗粒物的研究进展[J]. 化工进展, 2019, 38(07): 3402-3411.
- WANG Junfeng, LI Jin, XU Huibin, et al. Advances in research on wet desulfurization and synergistic removal of fine particles[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(07): 3402-3411.
- [27] Lim Jonghun, Choi Yeongryeol, Kim Geonyeol, et al. Modeling of the wet flue gas desulfurization system to utilize low-grade limestone[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2020, 37(12): 2085-2093.
- [28] Zhuang Shao, Fengqi Si, Daniel Kudenko, et al. Predictive scheduling of wet flue gas desulfurization system based on reinforcement learning[J]. Computers and Chemical Engineering, 2020, 141.
- [29] 王赫婧, 吴琼, 白璐, 等. 非重点行业炉窑典型大气污染物“十四五”减排潜力研究[J]. 环境科学研究, 2020, 33(12): 2647-2656.
- WANG Hejing, WU Qiong, BAI Lu, et al. Analysis of the Typical Air Pollutants Emission Reduction Potential of Non-key Industries Furnaces in the '14th Five-Year Plan'[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(12): 2647-2656.

Study on pollutant emission and desulphurization and dust removal of coal-burning bulk curing barn

CHEN Zhenguo¹, SUN Guangwei¹, CHEN Xiang², TAN Benkui³,
YANG Yang⁴, QIAO Yu^{5*}, WANG Bo⁵, HUANG Jingchun⁵

¹ Hubei Provincial Tobacco Research Institute, Wuhan 430030, China;

² China National Leaf Tobacco Corporation, Beijing 100055, China;

³ Yichang Branch of Hubei Provincial Tobacco Company, Yichang 443000, Hubei, China;

⁴ Enshi Branch of Hubei Provincial Tobacco Company, Enshi, Hubei 443000, China;

⁵ Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: In order to solve the pollution problem of SO₂ and particulate matter (PM) derived from fuels combustion in bulk curing barn, experimental sites were set up in Fujian, Guizhou, Yunnan, Henan and Hubei provinces to study the pollutant emission problems of bulk curing barn and formulate relevant emission reduction measures. The type and way of adding coal have a great influence on pollutant emission, the average emission concentration of SO₂ was 658.96 mg/m³, that of particulate matter was 65.52 mg/m³, and that CO was 3243.12 mg/m³. Installed wet desulphurization equipment could reduce SO₂ emissions by 72%-92% and reduce particulate matter emissions by 75%-92%, with the cost increased by 81.55 yuan. Installed automatic coal feeder could reduce coal consumption by 16.75%, reduce the baking cost by 28.85%, reduce pollutant emission by more than 40%, and increase the thermal efficiency by 24.91%. The combined use of wet desulfurization equipment and automatic stoker could stabilize the desulfurization efficiency at about 85% and control dust removal efficiency at about 95%. The installation of wet desulphurization equipment and automatic stoker could realize efficient desulphurization and dust removal, ensuring SO₂ emission concentration from tobacco bulk curing barn below 30 mg/m³ and the particulate matter emissions concentration below 15 mg/m³.

Keywords: bulk curing barn; desulphurization and dust removal; thermal efficiency; automatic stoker

*Corresponding author. Email: yuqiao@hust.edu.cn

《烟草科技》2021 年第 7 期目次

· 烟草农学

烤烟种质资源物理特性的遗传多样性分析	吴兴富, 焦芳婵, 冯智宇, 等
烟草赤星病菌实时荧光定量 PCR 检测方法的建立	谢中玉, 王晓强, 沈 宏, 等
烟草根结线虫病生防菌株 TB-68 的鉴定及室内防效测定	付 博, 张 洁, 张蒙蒙, 等
基于叶片光谱分析的烟草马铃薯 Y 病毒病严重度诊断	刘勇昌, 耿 丽, 高 强, 等
烟草甲初孵幼虫耐饥饿能力及其对包装材料的钻透率	郭亚飞, 吕建华, 郭建华, 等
烟蚜茧蜂对麦田蚜虫的防治效果	邱 睿, 张 昭, 李成军, 等
陕西烤烟气候适宜性时空变化特征及风险分析	胡颖梅, 徐 磊, 袁 帅, 等

· 烟草化学

GC-MS 法在线检测加热卷烟烟气	邓 婷, 虞苏行, 杨华武, 等
-------------------	------------------

不同香型烤烟中 Amadori 化合物测定及多元统计分析	马立超, 李登科, 张春涛, 等
两种电子烟气溶胶中 1,2- 丙二醇、丙三醇、烟碱及甲醛的逐口释放行为	黄 平, 黄建国, 文雅萍, 等

· 烟草工艺

温湿度调节过程中样品放置方式对卷烟主要物理指标的影响	董 浩, 周明珠, 余蓓欣, 等
贮存期间盒装卷烟含水率的影响因素	刘民昌, 温若愚, 刘 洋, 等
卷烟滤嘴设计对主流烟气温度的影响及其降温效应	孔浩辉, 李宏伟, 卢志菁, 等

· 设备与仪器

打叶复烤烤后片烟微量喷淋加料系统的设计与应用	任建新, 符再德, 罗 嘉, 等
PROTOS M5 卷接机组 MAX 接装机上胶系统的改进	王启兵, 蒋景强, 王己锋, 等
ZL29 型滤棒成型机组滤棒加速器的改进	孙冬阳, 叶长毅, 周 凯, 等