循环流化床锅炉高效炉内脱硫理论和关键技术

谭 波^{1,2},王传志^{1,2},司 硕^{1,2},刘忠攀^{1,2},蓝 天^{1,2}

(1. 究矿集团 洁净煤技术工程研究中心,山东 济宁 273516;2. 究矿科技有限公司,山东 济南 250100)

摘 要:低成本、无废水、系统简单的炉内脱硫技术是循环流化床锅炉实现洁净燃烧有效和优选途径 之一。由于影响因素众多及试验数据分散,目前仍缺少具有普遍适用的脱硫效率预测手段,对于实际 应用过程中脱硫效率随 Ca/S 比增加出现下降现象的原因还未给出合理解释,单纯 Ca/S 比也无法反 映实际参与脱硫的石灰石量,因而难以描述炉内石灰石的脱硫规律。为了探索决定炉内石灰石脱硫 效率的本质,以锅炉炉内物料运动、分布规律为基础,通过探讨入炉石灰石随炉内物料运动及反应变 化情况,对循环流化床炉内脱硫进行深入分析,提出"石灰石有效存有量"的概念,并根据灰平衡原理 建立数学模型。通过与不同规模的燃烧颗粒煤和煤泥的工业循环流化床锅炉试验数据进行比较,验 证了该模型的有效性。研究结果表明,实际决定炉内脱硫效率的最重要因素是"石灰石有效存有 量",该理论的建立为有效提高炉内脱硫效率提供了依据,由此得出实现炉内高效脱硫的关键在于: ① 优化石灰石粒度分布以有效提高外循环石灰石量和石灰石炉内的停留时间;② 合理排渣以减少 石灰石有效存有量的损失;③ 提高气-固接触效率以充分利用有效石灰石的活性。

关键词:循环流化床锅炉;高效炉内脱硫;石灰石有效存有量;气-固接触效率

中图分类号:X705;TK229.6 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2020)04-0168-07

Theory and key technologies of high efficiency desulfurization in circulating fluidized bed boilers

TAN Bo^{1,2}, WANG Chuanzhi^{1,2}, SI Shuo^{1,2}, LIU Zhongpan^{1,2}, LAN Tian^{1,2}

(1. The Engineering and Research Center for Clean Coal Technology, Yankuang Group Co., Ltd., Jining 273599, China; 2. Yankuang

Technology Company Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract: Desulfurization technology is one of the most effective and optimal way to achieve clean coal combustion in circulating fluidized bed boilers, which is low-cost, no wastewater produced and simple to operate. In addition, there are many influencing factors and the reported data is significantly scattered, which make it too difficult to derive a generalized approach to predict the desulfurization performance, and there is not a reasonable explanation for this seemly abnormal declination in desulfurization efficiency with increasing Ca/S ratio in the process of practical application, and the simple Ca/S ratio cannot be fully represent the amount of limestone actually involved in desulfurization, it is difficult to fully describe the desulfurization law of limestone in the furnace. Based on the movement and distribution law of materials in the boiler, the new concept of "effective limestone inventory" was proposed in order to explore the essence of determining the desulfurization efficiency of limestone in the furnace, and through comprehensive analysis on desulfurization in circulating fluidized bed boilers. A mathematical model was established according to the principle of ash mass balance. The validity of model was validated by comparing with the experimental results of industrial circulating fluidized bed boilers with different scale burning coal particles and coal slime. The results reveal that the key factor that actually determines the desulfurization efficiency in CFB boilers is "the effective limestone inventory". This theory and model provide significantly useful guideline for effectively improving the desulfurization efficiency in the furnace. Based on the theory, it concludes that the key technologies to achieve efficient desulfurization in the furnace include: (1) optimizing the limestone particle size distribution to effectively increase the limestone quantity in the external circulation and the residence time in the limestone furnace; (2) smoothing the way to discharge the bottom ash so the

收稿日期:2019-04-23;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19042301

基金项目: 兖矿集团有限公司重大科技专项资助项目(YK2017ZD04)

作者简介:译 波(1973—),男,山东莱芜人,工程师,主要研究方向煤炭高效清洁利用和 CFB 锅炉清洁燃烧技术。E-mail: 1030742862@qq.com

引用格式:谭波,王传志,司硕,等.循环流化床锅炉高效炉内脱硫理论和关键技术[J].洁净煤技术,2020,26(4):168-174. TAN Bo,WANG Chuanzhi,SI Shuo, et al. Theory and key technologies of high efficiency desulfurization in circulating fluidized bed boilers[J].Clean Coal Technology,2020,26(4):168-174.



168

ving the gas-solid contact efficiency so the activity of the effective limestone can be fully utilized. **Key words**:circulating fluidized bed boiler(CFB); high efficiency desulfurization in furnace; effective limestone inventory; gas-solid contact efficiency

0 引 言

低成本、无废水、系统简单的炉内脱硫技术是循 环流化床锅炉实现洁净燃烧有效和优选途径之 一[1-3],由于其廉价易得,石灰石作为脱硫剂广泛应 用于循环流化床燃煤锅炉炉内脱硫,其中石灰石的 加入量对脱硫效率、灰渣的二次利用^[2]有直接影 响。关于循环流化床炉内石灰石脱硫已有大量文献 报道^[4-8],一般认为影响炉内脱硫效率的因素众多, 包括石灰石质量、尺寸、床层温度、气氛、氧气含量、 加料位置、SO,浓度,Ca/S比等。由于影响因素众 多,各研究报道的锅炉、燃料、试验条件不同,数据分 散,造成循环流化床炉内脱硫本质的不一致。作为 衡量石灰石加入量的主要参数——Ca/S比,在炉内 脱硫技术研究中受到广泛关注。邹峥等^[9]在一台 35 t/h CFB 锅炉上进行的炉内脱硫工业试验中发 现,Ca/S=2.17时,石灰石在炉内停留100min后, 转化率基本不再发生变化,脱硫效率随 Ca/S 的增 加明显增大,但总体脱硫效率偏低;Ca/S=3.15时, 脱硫效率仅为 53.5%,这与许多 CFB 锅炉炉内脱硫 研究的理论和试验结果均有较大差距。何宏舟 等^[10]的工业热态炉内脱硫试验结果显示,脱硫效率 随 Ca/S 的增加而增高, Ca/S 大于 4.1 后, 脱硫效率 的提高幅度变缓,并趋于一稳定值。其他一些学者 的炉内脱硫试验也得出类似结果,即脱硫效率随 Ca/S的增加而增大,当大于某一值时,脱硫效率几 乎不变[11-13]。对于不同试验设备、试验材料及试验 方法,脱硫效率开始趋缓对应的 Ca/S 值不同,但试 验结果均表明,炉内脱硫存在有一个最佳 Ca/S 比, Ca/S 比大于该值时,脱硫效率的增加速率减缓且逐 渐趋于稳定^[14],甚至下降^[15]。脱硫效率与 Ca/S 比 的负指数关系^[15]可解释脱硫效率的增加速率减缓 现象,但脱硫效率的下降原因还未有合理解释。同 时,Ca/S比计算公式中不包含循环流化床大量循环 物料^[16]中存在的未反应石灰石,因此单纯的 Ca/S 比不能完全反映石灰石量与脱硫效率的关系。

通过对循环流化床炉内脱硫的深入分析,本文 提出"石灰石有效存有量"概念,即将循环流化床锅 炉内、外循环中大量未反应的石灰石定义为"石灰 石有效存有量",从新角度论述了决定炉内脱硫效 率的本质,由此指出在实际操作中能够提高炉内有 效脱硫的关键技术和方法。

1 模型建立

循环流化床锅炉物料平衡关系如图 1 所示,其 中, M_a 、 M_f 、 M_a 、 M_d 分别为锅炉入炉灰量、飞灰量、循 环灰量及排渣灰量,t/h;M为内循环灰量,t; G'_a 、 G'_a 分别为新入炉石灰石中加入内循环、外循环的石灰 石量,t/h; G_c 为外循环石灰石量,t; M_A 、 M_F 、 M_D 分别 为锅炉折算入炉灰量($M_A = M_a + G_a$)、锅炉折算飞灰 量($M_F = M_f + G_f$)及锅炉折算排渣量($M_D = M_d + G_d$)。 根据物料平衡关系,"石灰石有效存有量"随时间 t的变化量可表示为

$$\frac{\mathrm{d}G_{\mathrm{in}}}{\mathrm{d}t} = G_{\mathrm{a}} - G_{\mathrm{f}} - G_{\mathrm{d}} - G_{\mathrm{s}}, \qquad (1)$$

式中, G_{in} 为石灰石有效存有量, $t;G_a$ 为石灰石加入量, $t/h;G_f$ 为石灰石随飞灰飞出量, $t/h;G_d$ 为石灰石随排渣排出量, $t/h;G_s$ 为炉内硫酸钙对应的石灰石量, t/h_o



图1 物料循环平衡示意

Fig.1 Schematic diagram of the CFB material balance

循环流化床锅炉中的物料量为炉膛存料量、分 离器存料量、立管存料量及返料器存料量之和^[16]。 炉膛存料量为内循环量 *M*,后 3 者构成了外循环 量 *M*₂,本文将循环灰量与外循环量的比值称为单位 时间内循环次数 *K*。对于输入的石灰石量,*G*_r随飞 灰飞出、*G*_c参加外循环、*G*_n参加内循环,内循环石灰 石量 *G*₁,外循环石灰石量 *G*₂,则"石灰石有效存有 量"定义为

$$G_{\rm in} = G_1 + KG_{2\,\circ} \tag{2}$$

锅炉采用炉膛底部排渣方式,锅炉排渣量为 M_D

时,则石灰石排出量为

$$G_{\rm d} = M_{\rm D} \frac{G_{\rm in}}{M} = G_1 + M_{\rm D} \frac{G_1 + KG_2}{M},$$
 (3)

式(1)可写为

$$\frac{\mathrm{d}G_{\rm in}}{\mathrm{d}t} = G_{\rm a} - G_{\rm f} - M_{\rm D} \frac{G_{\rm 1} + KG_{\rm 2}}{M} - G_{\rm s\,\circ} \qquad (4)$$

图 2 为石灰石有效存有量计算模型,其中, $\eta(SO_2)$ 为脱硫效率,%; B_j 为入炉燃料燃料量, $t/h;S_{ar},A_{ar}$ 分别为燃料收到基的硫含量和灰分; α_1 、 α_2 、 α_3 为内循环、外循环、飞灰在灰中的占比; β_1 、 β_2 、 β_3 为内循环、外循环、随飞灰带出石灰石在灰总量中 的占比,则

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1, \qquad (5)$$

$$\boldsymbol{\beta}_1 + \boldsymbol{\beta}_2 + \boldsymbol{\beta}_3 = \boldsymbol{1}_{\circ} \tag{6}$$

 $1.75\beta_3(1-\eta(SO_2))B_iS_{ar}$





Fig.2 Computational model of the "effective limestone inventory mass"

为计算方便,假设入炉石灰石中 CaO 含量为 100%,根据钙硫比 m 计算公式

$$m = \frac{G_{\rm a}/56}{B_{\rm j}S_{\rm ar}/32},$$
 (7)

推出石灰石入炉量为

$$G_{\rm a} = 1.75 m B_{\rm j} S_{\rm ar\,\circ} \tag{8}$$

将图 2 中参数代入式(1)~(4),可得出石灰石 有效存有量的计算公式为

$$G_{in(n)} = G_{in(n-1)} + \left[G_i - \frac{M_{\rm D}}{M} (G'_i + G_{in(n-1)}) \right], \quad (9)$$

其中,G_i为新入炉石灰石在参与脱硫反应后的炉内 石灰石量;G'_i为由于外循环的存在,对G_i的折算量, 计算公式分别为

$$G_{i} = 1.75 \left(m - \frac{\eta(SO_{2})}{100} \right) B_{j} S_{ar} (\beta_{1} + \beta_{2}), \quad (10)$$

$$G'_{i} = 1.75 \left(m - \frac{\eta(SO_{2})}{100} \right) B_{j} S_{ar} (\beta_{1} + K\beta_{2}), \quad (11)$$

由此推出

$$G_{in(n)} = \frac{\left(1 - \frac{M_{\rm D}}{M}\right) \left[1 - \left(1 - \frac{M_{\rm D}}{M}\right)^n\right]}{1 - \left(1 - \frac{M_{\rm D}}{M}\right)} G_1 + \frac{K\left(1 - K\frac{M_{\rm D}}{M}\right) \left[1 - \left(1 - K\frac{M_{\rm D}}{M}\right)^n\right]}{1 - \left(1 - K\frac{M_{\rm D}}{M}\right)} G_2 = \frac{\left(1 - \frac{M_{\rm D}}{M}\right) \left[1 - \left(1 - \frac{M_{\rm D}}{M}\right)^n\right]}{1 - \left(1 - \frac{M_{\rm D}}{M}\right)} 1.75 \left(m - \frac{\eta(SO_2)}{100}\right) \beta_1 B_{\rm j} S_{\rm ar} + \frac{K\left(1 - K\frac{M_{\rm D}}{M}\right) \left[1 - \left(1 - K\frac{M_{\rm D}}{M}\right)^n\right]}{1 - \left(1 - K\frac{M_{\rm D}}{M}\right)} 1.75 \left(m - \frac{\eta(SO_2)}{100}\right) \beta_2 B_{\rm j} S_{\rm ar} \circ \frac{12}{100}$$

当 *n*→∞,可得石灰石有效存有量的计算公 式为

$$G_{in(n)} = \frac{\left(1 - \frac{M_{\rm D}}{M}\right)}{\frac{M_{\rm D}}{M}} 1.75 \left(m - \frac{\eta(\rm SO_2)}{100}\right) \beta_1 B_j S_{\rm ar} + \frac{\left(1 - K\frac{M_{\rm D}}{M}\right)}{\frac{M_{\rm D}}{M}} 1.75 \left(m - \frac{\eta(\rm SO_2)}{100}\right) \beta_2 B_j S_{\rm ar^{\circ}} \quad (13)$$

根据灰平衡关系建立钙硫比 m 与锅炉排渣 量 $M_{\rm D}$ 间的函数关系 $M_{\rm D} = g(m)$,引入修正系数 ξ 调 整,则有

$$G_{in(n)} = \frac{(M - \xi g(m))}{\xi g(m)} 1.75 \left(m - \frac{\eta(SO_2)}{100}\right) \beta_1 B_j S_{ar} + \frac{(M - K\xi g(m))}{\xi g(m)} 1.75 \left(m - \frac{\eta(SO_2)}{100}\right) \beta_2 B_j S_{ar} \circ$$
(14)

$$\eta(SO_2)$$
达到最大时, $\frac{\partial G_{in(n)}}{\partial m} = 0$,因此对式(14)

求一阶微分并令其为 0, 可求得石灰石有效存有量 的最大值。

内循环量 M 由炉膛内存料量与炉膛内床压降

的关系^[16]计算获得,利用文献[16]中分离器、立管 及返料器的灰量计算公式可获得对应的灰量值,3 者之和即为外循环量 M_2 ,文献[17]给出了循环灰 量 M_c 的计算公式,单位时间内循环次数 K 为循环灰 量 M_c 与外循环量 M_2 的比值。灰份额($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$)的 计算公式来自于文献[17]中相应的飞灰份额计算 公式,同时飞灰份额计算公式中含碳量由相应的 CaO含量代替,可获得相应石灰石份额($\beta_1, \beta_2, \beta_3$)。 飞灰、循环灰、底渣的 CaO含量与飞灰量 M_f 、外循环 量 M_2 、内循环量 M的积为飞灰石灰石量 G_f 、内循环 石灰石量 G_1 、外循环石灰石量 G_2 。由此,可建立石 灰石有效存有量计算模型,具体计算公式可参见文 献[16-17]。

2 模型计算与分析

2.1 模型计算

利用式(14) 对一台 75 t/h 全煤泥循环流化床 锅炉进行脱硫效率计算,并与实际脱硫效率进行比 较。石灰石的加入量由 Ca/S 比表示,其值由式(7) 计算,锅炉相关参数为:燃料量 18.5 t/h,硫含量 0.58%,灰分 25.08%。

由式(14)计算得到石灰石有效存有量的最大 值为2.52t,为简化计算,令理想脱硫效率与石灰石 存有量成正比,对于理论石灰石有效存有量 G_{in(theo)} 和石灰石最大有效存有量 G_{in(max})有

$$\eta(\mathrm{SO}_2) = \frac{G_{\mathrm{in(theo)}}}{G_{\mathrm{in(max)}}} \times 100\%_{\circ}$$
(15)

式(15)假设所有石灰石在炉内均与 SO₂气体有效接触,但实际锅炉运行中,由于锅炉入料方式、排渣方式等因素的影响,SO₂气体和炉内石灰石可能存在接触不理想的情况,因此引入"气固接触效率"概念,即 SO₂气体和炉内 CaO 反应时实际有效接触的石灰石存有量和与理论石灰石存有量的比值,因此,石灰石有效存有量为气固接触效率 η_{g-s} 与理论石灰石有效存有量的积。因此式(15)修正为

$$\eta(\mathrm{SO}_2) = \eta_{\mathrm{g-s}} \frac{G_{\mathrm{in(theo)}}}{G_{\mathrm{in(max)}}} \times 100\%_{\circ} \qquad (16)$$

由式(16)可预测得到脱硫效率与石灰石入炉 量的关系。图3为不同气固接触效率下脱硫效率与 钙硫比关系,脱硫效率的计算基础为燃料硫析出量, 脱硫效率的计算公式采用式(16)。从图3可以看 出,脱硫效率理论计算值和实际脱硫效率值随石灰 石加入量的变化趋势相同,并与文献[9-14]相似, 即脱硫效率随石灰石加入量的增加而增大,当大于 一定值后,脱硫效率随石灰石的加入量增加而减小。 理论计算 Ca/S=1.97(石灰石加入量为 0.37 t/h)时 脱硫效率最大,为 100%;实际 Ca/S=1.85(石灰石 加入量为 0.35 t/h)时脱硫效率最大,为 86%。Ca/S 比在 1.5~2.5 时的理论脱硫效率在 90%以上。



图 3 钙硫比与不同气固接触效率的脱硫效率关系

Fig.3 Variation of the desulfurization efficiency with the calciumsulfur ratio for different gas-solid contact efficiencies

由图3可知,由于气固接触效率不同,石灰石加 入量相同的条件下,实际脱硫效率不同。对于 75 t/h全烧煤泥锅炉,由于其顶部加料方式,煤泥团 在从炉膛顶部下落过程中,伴随复杂的加热干燥、热 爆破碎、凝聚结团、燃烧等过程, SO, 在炉膛上部开 始析出,在炉膛出口由于煤粉持续燃烧而不断析出, 一定程度上降低了其与炉内循环石灰石的有效接 触。因此,相比底部加料方式,SO,气体与石灰石接 触效率降低,此时炉内气固接触效率约为85%左 右。在低 Ca/S(或低石灰石加入量)的情况下,由于 炉内石灰石有效存有量小,气固接触机率降低,因而 气固接触效率仅 60% 左右。在高 Ca/S(或高石灰石 加入量)的情况下,由于排渣量过大,造成炉内有效 石灰石存有量降低,气固接触效率为80%~85%。 结合预测的气固接触效率,脱硫效率的模型计算和 实测值比较如图4所示,可见两者吻合良好,说明脱 硫效率与石灰石有效存有量存在良好的相关关系, 与石灰石加入量(钙硫比)不直接相关。由此推断, 实际决定脱硫效率是"石灰石有效存有量",而非石 灰石加入量(Ca/S比)。



对于实际运行的循环流化床锅炉,石灰石有效 存有量与循环灰量和循环灰中的 CaO 含量有关。 因此为便于模型,对试验数据进行拟合处理,可得到 循环灰中 CaO 含量 X(CaO)与石灰石存有量的关 系,并进一步得到试验锅炉脱硫效率与循环灰中 CaO 含量的关系式,即

$$\eta(\text{SO}_2) = 34.28 \ln(1.315X(\text{CaO}) - 0.14) + 167 e^{[-0.604(1.315X(\text{CaO}) - 0.14)]}$$
(17)

根据式(17)得到脱硫效率与循环灰中 CaO 含 量的关系如图 5 所示。为进一步验证其有效性,图 5 同时给出 40~440 t/h 蒸汽容量循环流化床锅炉 实际运行循环灰 CaO 含量及其对应的脱硫效率(石 灰石为同一厂家供应,具有相同品质)。其中,锅炉 1为75 t/h 全煤泥循环流化床锅炉,锅炉2为 440 t/h掺烧煤泥循环流化床锅炉,锅炉 3~5 为以混 煤为燃料的循环流化床锅炉,分别为160、75、40 t/h。 由图 5 可知,计算数据与锅炉 2 现场测试结果吻合 度较高,且锅炉3~5的计算值与现场测试值相近, 最大偏差小于3%。对比结果表明,在缺乏确定炉 内石灰石有效存有量的情况下,通过分析循环灰样 品中的 CaO 含量,可预测脱硫效率,为判断炉内石 灰石脱硫有效性、脱硫石灰石活性、尺寸分布以及操 作是否合理等提供简单易行的方法,对现场实际应 用具有一定的指导意义。



上述脱硫效率与循环灰中 CaO 含量的关系受 分离器捕捉能力等因素的影响。因此虽然式(17) 对现场实际应用具有一定指导意义,但这些影响因 素与本文的研究条件变化较大时,可能需要进一步 修正。

2.2 脱硫效率关键技术

由于决定循环流化床炉内脱硫效率的主要因素 是"石灰石有效存有量",则在锅炉实际运行中有效 提高炉内"石灰石有效存有量"成为提高炉内脱硫 效率的关键。基于建立的模型,对不同粒径分布的 172 石灰石脱硫效率进行分析,计算条件见表1、2,计算 结果如图6、7所示。

表 1 脱硫效率 85%时不同粒径分布的计算条件 Table 1 Calculation conditions for different particle

size distributions at 85% desulfurization efficiency

参数	条件 1	条件 2	条件 3	条件 4	条件 5	条件6
飞灰粒径范围 内份额/%	60	50	40	30	20	10
循环灰粒径范围 内份额/%	40	50	60	70	80	90

表 2 内、外循环石灰石量配比

 Table 2
 Ratio of limestone mass in inner and outer circulation

	欠併	友供						
参数	宋什							
	Α	В	С	D	Е	F	G	Н
$\beta_1/\%$	0	10	20	30	40	50	60	70
$\beta_2/\%$	70	60	50	40	30	20	10	0



图 6 脱硫效率为 85%时不同粒度石灰石加入量

Fig.6 Adding amount of limestone with different particle size at 85% desulfurization efficiency



Fig.7 Desulfurization efficiency under different internal and external circulation limestone quantity

从图 6 可以看出,脱硫效率一定时,石灰石中细粉(即处于飞灰粒径范围内份额)含量越多,需加入的石灰石量越大,主要原因为细粉含量越高,随飞灰带出的石灰石量越大,石灰石有效存有量越小,石灰石加入量越大。细粉含量大于 60%时,理论计算值已远偏离工程实际工况,说明此时无法达到 85%的

脱硫工况。图 7 为细粉固定份额为 30%,参与外循 环石灰石量不同条件下的脱硫效率变化。可以看 出,随参与循环的石灰石量越多,石灰石有效存有量 越大,脱硫效率越高,即在循环倍率一定的条件下, 参与外循环的石灰石量越多,脱硫效率越高。

为提高炉内脱硫效率,本文建议采取以下方法: 1)合理选择石灰石粒径,使其最大程度处于循 环灰粒径范围内,即在循环时能被分离器捕捉范围 内,有效提高石灰石有效存有量,提高脱硫效率。在 实际应用时,建议对锅炉飞灰、循环灰、底渣采样并 分析其粒度分布,进而调整石灰石粒度分布。在飞 灰和循环灰粒度分布交叉很小时(如燃烧颗粒煤 时),石灰石粒径分布应与循环灰粒径分布相同或 相似;循环灰粒度分布覆盖飞灰粒度时(如燃烧煤 泥时),石灰石最小粒径应大于飞灰最大粒径,石灰 石最大粒径应小于底渣最小粒径。

2)减少有效石灰石损失。根据 dG_{in}/dt = 0 是石 灰石有效存有量达到极值的充要条件,排渣量为石 灰石有效存有量的主要影响因素之一,少排、勤排、 从炉膛下部排渣是减少有效石灰石量损失的关键。

3)改善气固接触。由于燃煤进料方式、位置的 不同以及其他设计或操作因素的影响,炉内 SO₂释 放、流动影响其与循环石灰石的接触,因此实际锅 炉实际运行中需提高 SO₂与石灰石的接触几率,从 而提高石灰石的有效性。

"脱硫效率由石灰石有效存有量决定"的脱硫 理论,使根据锅炉运行特性预测炉内脱硫最佳效果 成为可能,并由此确定最佳石灰石加入量。石灰石 有效存有量在实际操作过程中难以定量测量,但可 通过循环灰中的活性 CaO 含量表征,脱硫效率和循 环灰中的活性 CaO 含量的关系有待进一步完善。

3 结 论

1)对循环流化床炉内石灰石脱硫进行深入分 析,提出了"石灰石有效存有量"的概念,并基于灰 循环平衡原理,建立了定量的数学模型。

2)模型计算及实测数据表明,实际决定循环流 化床炉内脱硫效率的因素是"石灰石有效存有量"。

3)实现炉内高效脱硫的关键在于:① 优化石灰 石粒度分布以有效提高外循环石灰石量和石灰石炉 内停留时间;② 合理排渣以减少石灰石有效存有量 的损失;③ 提高气-固接触效率以充分利用有效石 灰石的活性。

参考文献(References):

[1] 李竞芨,杨欣华,张思海,等.循环流化床锅炉多粒度多流态炉

内喷钙脱硫技术 [J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2014,10(2):113-117.

LI Jingji, YANG Xinhua, ZHANG Sihai, et al. The in-Situ desulphurization with multi-particle-size and multi-flow-state for circulating fluidized bed boilers [J].Journal of Shenyang Institute of Engineering(Natural Science), 2014, 10(2):113-117.

- [2] 蔡润夏,柯希玮,葛荣存,等.循环流化床超细石灰石炉内脱硫研究 [J].中国电机工程学报,2018,38(10):3042-3048.
 CAI Runxia,KE Xiwei,GE Rongcun, et al. The in-situ desulfurization with ultra-fine limestone for circulating fluidized bed boilers
 [J].Proceedings of the CSEE,2018,38(10):3042-3048.
- [3] ZHANG Wenguang, ZHANG Yue, SUN Yazhou, et al. Condition monitoring of limestone and soft sensing model of SO₂ emissions in a circulating fluidized bed boiler [J]. Energy & Fuels, 2016, 30(4):3519-3528.
- [4] 杨威,杨励丹,陆慧林,等.炉内喷钙脱硫过程的试验研究[J].
 电站系统工程,2002,18(3):16-18.
 YANG Wei,YANG Lidan,LU Huilin, et al. Experimental study on limestone desulfuration process [J]. Power System Engineering, 2002,18(3):16-18.
- [5] SAASTAMOINEN J J . Particle-size optimization for SO₂ capture by limestone in a circulating fluidized bed [J].Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(22):7308-7316.
- [6] RAHIALA S, MYÖHÄNEN K, HYPPÄNEN T. Modeling the behavior of limestone particles in oxy-fuel CFB processes [J].Fuel, 2014,127(7):141-150.
- [7] 杨振森,刘彬,陈宁武,等.提高 CFB 锅炉炉内脱硫效率的试验 研究[J].洁净煤技术,2012,18(6):72-75.
 YANG Zhensen, LIU Bin, CHEN Ningwu, et al. Experimental research on desulfuration efficiency improvement of CFB boiler [J]. Clean Coal Technology,2012,18(6):72-75.
- [8] 王卫良,吕俊复,张建胜,等.循环流化床的石灰石脱硫实验研究[J].锅炉技术,2006,37(4):24-28.
 WANG Weiliang,LYU Junfu,ZHANG Jiansheng, et al.Desulphurization of limestone in a bench scale circulating fluidized bed [J].
 Boiler Technology,2006,37(4):24-28.
- [9] 邹峥, 俞建洪,何宏舟,等.钙硫比对循环流化床锅炉炉内脱硫 影响的工业实验[J].工业锅炉,2003,19(5):20-22. ZOU Zheng, YU Jianghong, HE Hongzhou, etal. The effects of Ca/S ratio on desulfurization in CFB boiler firing fujian anthracit[J]. Industrial Boiler, 2003, 19(5):20-21.

HE Hongzhou, ZOU Zheng, YU Jinshu, et al. An industrial experiment research on the desulfurization of circulating fluidized bed boiler burning fujian anthracite [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(35):7-12.

- [11] ZENG Tinghua, ZHAI Ming, CHEN Lei, et al. Experimental study on desulfurization of compound sulfur sorbents of CaCO₃ and fly ash [C] // World Automation Congress, 2012:1-4.
- [12] 马林转, 宁平, 卿春.循环流化床锅炉脱硫的试验研究[J]. 环 境工程, 2005, 23(5): 47-50.

Ma Linzhuan, Ning Ping, Qing Chun. Experimental study on circulating fluidized bed boiler Ddesulfuration [J]. Environmental Engineering, 2005, 23(5):47-50.

- [13] 赵佳佳, 商俊, 曹喜锋, 等. 炉内喷钙脱硫技术在 75 t/h CFB 锅 炉上的工程应用[J].电站系统工程,2008,24(3):25-27.
 ZHAO Jiajia, SHANG Jun, CAO Xifeng, et al. Application of FGD technology by limestone injection at 75 t/h CFB [J].
 Power System Engineering, 2008,24(3):25-27.
- [14] 张勇.300 MW 循环流化床锅炉炉内脱硫探讨[J].锅炉制造, 2014(6):25-28.
 ZHANG Yong.Probe of desulfurization in furnace of 300 MW CFB boiler[J].Boiler Manufacturing,2014(6):25-28.
- [15] 刘远超.循环流化床锅炉脱硫运行特性及工业性试验研究 [D].大连:大连理工大学,2006.

LIU Yuanchao. Desulfurization operational characteristics and industrial trials of the circulating fluidized bed boiler [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.

- [16] 李鑫晶,李燕,吕俊复,等.循环流化床锅炉热惯性分析[J].热能动力工程,2009,24(5):609-613.
 LI Xinjing, LI Yan, LYU Junfu, et al. An analysis of thermal of a circulating fluidized bed boiler [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2009,24(5):609-613.
- [17] 朱国桢,徐洋.循环流化床锅炉设计与计算[M].北京:清华 大学出版社,2004.
 ZHU Guaozhen, XU Yang. Design and calculation of circulating fluidized bed boiler [M]. Beijing: Tsinghua University Press,2004.