

CFB 锅炉回料阀低频喘振的计算颗粒 流体力学模拟

曾胜庭¹, 陈曦², 马璘晨², 赵海波²

(1. 广东粤电云河发电有限公司, 广东 云浮 527328;

2. 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

[摘要] 本文采用计算颗粒流体力学 (CPFD) 方法对 300 MW 机组循环流化床 (CFB) 锅炉进行数值模拟, 主要目的是分析 CFB 锅炉回料阀低频喘振的根源, 并通过优化回料阀的操作参数减小其低频振动的可能性。首先针对 CFB 锅炉在运行时回料阀发生低频喘振的现象, 对 CFB 锅炉整体进行了全床尺度的数值模拟, 对锅炉内部的气固流动进行了分析, 研究锅炉内部系统压力平衡、物料平衡和固相体积分数分布, 模拟结果显示回料阀喘振的根本原因是, 回料阀内部的流化风速过高, 导致其中发生固相输运不畅甚至反吹现象, 引起回料阀进口压力波动, 产生喘振。其次针对回料阀组件进行模拟, 线性调整回料阀的操作风速 (返料风和松动风), 分析不同工况下回料阀的内部气固流体动力学规律和固体循环流量, 提供回料阀在变工况下的基础数据和操作特性, 确定合适的回料阀操作风速区间。最后, 按照优化的回料阀操作参数对整体 CFB 锅炉进行了模拟, 模拟结果表明 CFB 锅炉运行平稳, 回料阀的压力波动明显减小, 低频振动得到很好的控制。

[关键词] CFB 锅炉; 回料阀; CPFD 模拟; 气固流动特性; 喘振; 气体反窜

[中图分类号] TK175 **[文献标识码]** A **[DOI 编号]** 10.19666/j.rlfid.201802061

[引用本文格式] 曾胜庭, 陈曦, 马璘晨, 等. CFB 锅炉回料阀低频喘振的计算颗粒流体力学模拟[J]. 热力发电, 2018, 47(8): 22-30. ZENG Shengting, CHEN Xi, MA Jinchun, et al. CPFD simulation on low-frequency vibration of loop seal in CFB boilers[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(8): 22-30.

CPFD simulation on low-frequency vibration of loop seal in CFB boilers

ZENG Shengting¹, CHEN Xi², MA Jinchun², ZHAO Haibo²

(1. Guangdong Yudean Group Yunhe Power Co., Ltd., Yunfu 527328, China;

2. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A 300 MW circulating fluidized bed (CFB) boiler was simulated by computational particle fluid dynamics (CPFD) to investigate the reason of low frequency vibration of loop seal in the CFB boiler and reduce the possibility of low frequency vibration by optimizing the operating parameters of the loop seal. Firstly, for the low frequency vibration of the loop seal in the CFB boiler during operation, a full-scaled simulation of the CFB boiler was conducted to analyze the gas-solid flow inside the boiler. The pressure balance, material balance and solid volume fraction distribution inside the boiler were studied. The simulation results indicated that the root cause of the vibration of the loop seal was that the fluidized air velocity inside the loop seal was too high. It resulted in the occurrence of poor solid-phase transportation or even back-blowing, which caused the pressure fluctuation at inlet of the loop seal and vibration. Moreover, simulation of the loop seal component was conducted, the operating wind speed (return feed wind and loose wind) of the loop seal was adjusted linearly, the gas-solid fluid dynamics characteristic and solid circulation rate of the loop seal under different operating conditions were investigated, the basic data and operating characteristics of the loop seal under variable conditions were attained, and the appropriate operating wind speed interval of the loop seal was determined. Finally, the whole CFB boiler with optimized operating parameters of loop seal was simulated. The simulation results show that the CFB boiler ran steadily.

收稿日期: 2018-02-01

第一作者简介: 曾胜庭(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电厂运行与调控技术, 1593095963@qq.com.

通讯作者简介: 赵海波(1977—), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为清洁、高效、低碳燃烧技术, hzhao@mail.hust.edu.cn.

Especially, the pressure fluctuation at inlet of the loop seal obviously decreased and the low-frequency vibration of the loop seal was well controlled.

Key words: CFB boiler, loop seal, CPF D simulation, gas-solid flow characteristics, surge, gas back-blowing

循环流化床 (CFB) 锅炉因其高效、能燃用低品质燃料、负荷调节比大、污染低的特点, 在国内外得到了迅速的发展^[1]。运行过程中床料从炉膛吹出, 经过旋风分离器分离流入回料阀, 最终送回炉膛内形成床料的循环。床料循环对于 CFB 锅炉的稳定、安全运行起到了重要的作用。一般 CFB 采用的非机械式回料阀是 CFB 锅炉的关键部件之一, 其特点是工作稳定、回料量大且可灵活调控, 能够在将床料稳定地送入炉膛的密相区内的同时, 防止密相区内的气体反窜到旋风分离器中。

回料阀运行状态的主要影响因素包括回料阀结构、通气方式和通气量、床料特性等, 国内外研究者采用冷模实验和数值模拟等方法对回料阀的原理和运行特性进行了大量研究。Basu 等人^[2]对回料阀的基本原理进行了深入分析, 主要研究通气量和压力等运行参数对固体循环流量的影响。Cheng 等人^[3]研究了回料阀内通气量、压力、颗粒粒径和结构等因素对固体循环流量的影响。Kim 等人^[4]对带有切向侧吹风的 U 型回料阀进行研究, 分析了侧吹风的安放位置和通气量对固体循环流量的影响。之后他们又进一步研究了颗粒粒径和密度等因素对回料阀固体循环流量和 CFB 系统压力平衡的影响^[5]。王祥等^[6]通过实验研究了不同的压差、颗粒物性以及通气方式对回料阀中物料循环的影响, 结果表明与返料风相比, 松动风对于回料阀的循环流量影响更大, 而且调节范围更宽; 随着物料粒径增加, 相应地保持相同固体循环流量所需流化风量增加。曹文亮等^[7]从整个 CFB 系统、回料阀的结构 (孔口面积、充气方式)、锅炉运行 (运行温度、风煤量、排渣、循环物料特性) 等分析了回料阀的工作特性。王擎等^[8]从回料阀的结构以及布风装置设计、充气量和压力等几个方面探讨了回料阀返料装置的设计和运行特性。王庆功等^[9-10]采用 CPF D 数值模拟对 U 型和 N 型回料阀进行分析, 研究了充气量和松动风比例的变化对回料阀流动特性和返料量的影响。

随着计算流体力学 (CFD) 和计算机硬件的发展, CFD 的分支—计算颗粒流体力学 (CPF D) 逐渐发展了起来, CPF D 的概念最早由 Snider 提出^[11-12]。他在 MP-PIC 的基础上结合双流体模型和 CFD-

DEM 模型, 并对计算过程做了较大程度的简化, 采用欧拉-拉格朗日方法分别来处理流动过程中的流体相和颗粒相, 同时对颗粒采用了计算粒子的方式, 将一系列性质相近的颗粒看作一个颗粒团, 从而实现了气固两相体系的快速模拟^[13-14]。

CFB 锅炉中物料循环建立的前提在于回料阀的连续、稳定运行, 一方面输运高温床料进入炉膛内部, 一方面克服炉膛内部和旋风分离器出口的压差。然而针对目前的调峰运行和非设计标准工况运行, CFB 内部的床料循环和流体动力学规律有所改变, 基于经验的风量调整无法满足设备的正常运行需求。广东粤电云河发电有限公司 300 MW 机组 CFB 锅炉在实际运行过程中出现回料阀低频喘振的现象, 造成回料阀内部保温层浇注料出现裂缝, 影响锅炉的正常安全运行。本文采用 CPF D 数值模拟的方法, 对 CFB 锅炉整体的运行状况进行流体动力学分析, 根据压力脉动量分析 CFB 锅炉回料阀低频喘振的原因。在获取相关物理参量的基础上, 对单个回料阀进行不同工况的运行模拟分析, 寻求优化的回料阀运行工况以匹配整体 CFB 锅炉运行。最后, 采用优化的回料阀运行工况, 对整体 CFB 锅炉进行模拟, 检验整体 CFB 锅炉 (特别是回料阀) 的运行稳定性。

1 模拟对象

300 MW 机组锅炉为 SG-1036/17.5-M4506 型亚临界参数中间再热 CFB 锅炉。按照模型尺寸与实际尺寸 1:1 绘制, 模型如图 1 所示。

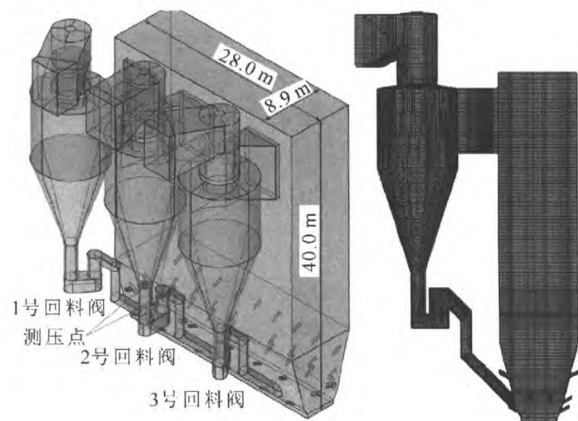


图 1 CFB 锅炉模型和网格

Fig.1 The model and mesh generation of the CFB boiler

炉膛燃烧室高度 40.0 m，宽度和深度分别为 28.0 m 和 8.9 m。该锅炉一共使用 3 个旋风分离器（单侧布置）。为准确模拟炉膛内部的气固两相流体动力学规律，根据实际炉膛配置布置二次进风管。锅炉内部床料颗粒真密度为 2 895.47 kg/m³（真密度仪，Micromeritics, AccuPyc 1330），颗粒粒度分布采用激光粒度仪（Malvern, Master Min）测试，物料粒径分布见表 1。

表 1 物料粒径分布
Table 1 Size distribution of the material

粒径范围/ μm	体积分数/%
56~112	18.17
113~224	51.44
225~447	22.51
448~893	3.38
894~2 000	4.50

模拟过程中 CFB 整体温度为 1 163 K，设置为绝热边界条件。CFB 一次风、二次风和回料阀流化风参数见表 2。初始条件为：CFB 锅炉内压力为 1.0×10^5 Pa，床料填充于炉膛底部，填料高度为 1.09 m，固相体积分数为 0.47。旋风分离器出口表压设置为 0。模拟过程中采用网格数目 1.4×10^6 个，时间步长设置为 0.000 1 s，模型网格如图 1 所示。模拟过程中采用欧拉-拉格朗日模型分别描述流体相和颗粒相，气固曳力模型采用 Gidaspow 模型，颗粒垂直恢复系数 0.89，切向恢复系数 0.68，采用 GPU 加速计算速度。

表 2 基本参数
Table 2 The basic parameters

项目	流量/(kg·s ⁻¹)	压力/Pa
一次风	126.4	16 420
二次风(总量/上层单个/下层单个/侧墙单个)	52.60/1.21/0.89/2.48	5 200
返料风(单个)	1.27~1.44	43 660
松动风(单个)	1.02~1.64	43 660

为了更精确描述回料阀的调控特性，对回料阀进行独立模拟，其模型中包括与其相连的下降管和回料管，回料阀模型和网格划分如图 2 所示。

在模拟中，在回料阀内填充初始床料，形成足够的料封，克服旋风分离器和炉膛之间的负压，同时保证回料阀在启动后快速达到稳定状态。其中，运输室中床料堆积高度为 10 m，高于克服旋风分离器和炉膛之间的负压需要的高度，使返料室的床料能够快速流化起来；返料室中床料堆积高度与水平孔口的高度相当。为减小网格数目和计算成本，在模拟中仅对主要的返料风和松动风进行优化模拟，

忽略壁面和回料管内部的微量流化风。模拟过程中返料风和松动风表压为 43 660 Pa。根据 CFB 锅炉的整体模拟，设置床料颗粒以一定的循环流量（1 065 kg/s）从旋风分离器的锥形段顶部均匀加入，消除颗粒运输室内床料对循环流量的影响。回料管中固体循环流量的测试截面位于返料斜管出口处。模拟条件为：上出口边界（旋风分离器锥形段上截面）表压 0，下出口边界（返料斜管与炉膛连接处）表压 16 000 Pa。有效网格数为 31 890，时间步长为 0.000 1 s。

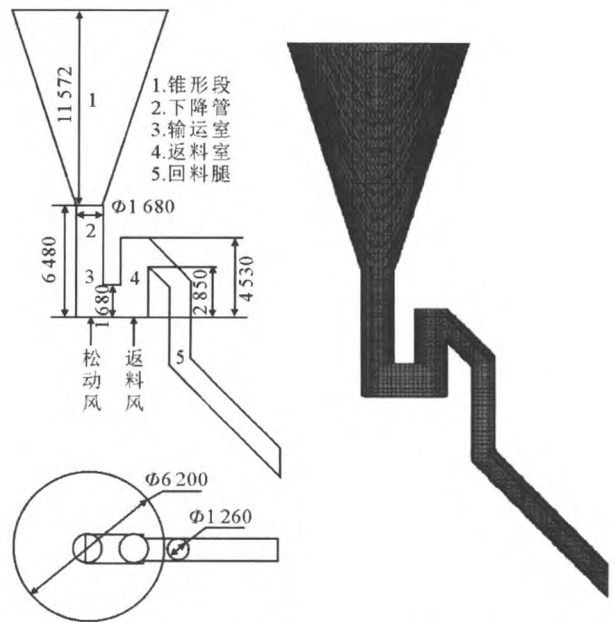


图 2 回料阀模型和网格划分(mm)
Fig.2 The model and mesh generation of the loop seal (mm)

根据 Kunii 和 Levenspiel 流态化经典理论^[15]，床料的最小流化速度 (U_{mf}) 为 0.036 m/s。为研究回料阀的调节循环流量特性，设置运输室中松动风的表观气速 (u_s) 为 $0.5U_{mf} \sim 3.0U_{mf}$ ，设置返料室中返料风的表观气速 (u_r) 为 $5.0U_{mf} \sim 20.0U_{mf}$ ，回料阀模拟工况见表 3。

表 3 回料阀模拟工况
Table 3 Simulation conditions of the loop seal

项目	u/U_{mf}			
返料风(u_r)	5.0	10.0	15.0	20.0
松动风(u_s)	0.5	1.0	2.0	3.0

2 结果与讨论

2.1 CFB 锅炉模拟

2.1.1 固相体积分数

模拟达到 40.0 s 时，CFB 锅炉床料循环建立，内部颗粒的流动和固相体积分数分布如图 3 所示。

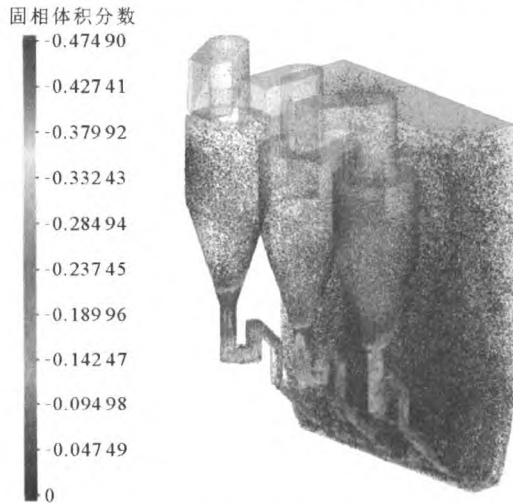


图 3 40.0 s 时物料循环的固相体积分数分布
Fig.3 The solid volume fraction distribution of material circulation at 40.0 s

由图 3 可以看出：在 CFB 炉膛内部下端（主要集中在锥形段）呈现密相区，平均固相体积分数为 0.040；在有回料管的后墙，颗粒固相体积分数高于

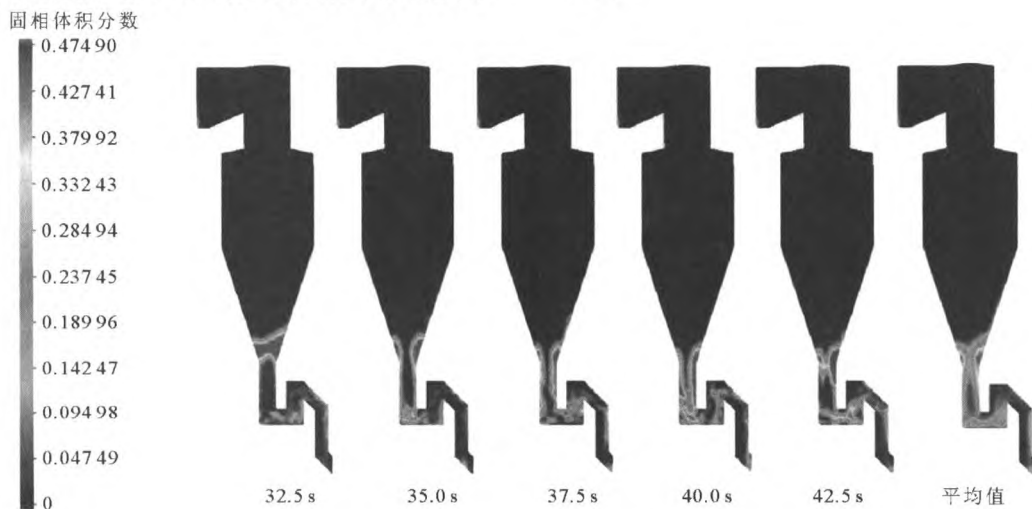


图 4 2 号回料阀中心截面固相体积分数
Fig.4 The solid volume fraction on the center section of No.2 loop seal

由图 4 可以看出，在不同的时间内，回料阀和立管内部的床料颗粒分布状态截然不同。在 32.5 s 时，在立管和旋风分离器锥形出口的接口处出现物料堆积，形成一段气柱一段料柱的非正常运行情况，为节涌现象。这是因为从下降管中进入的床料流动不畅，造成在回料阀运输室中床料固相体积分数低，因此无法形成料封作用。同时，在回料阀中的床料颗粒因为从回料阀运输室中进入的颗粒运输量下降，造成向炉膛返料量大幅下降。所以，在 32.5 s，回料阀处于非稳定运行状态，无床料堆积形成料封，返料不充分。在 35.0~40.0 s 的运行区间，

前墙；在 CFB 炉膛内部的上端为稀相区，平均固相体积分数为 0.003，轴向和纵向颗粒分布较为均匀，回料管对颗粒体积分数的影响明显减弱；进入旋风分离器的颗粒经过气固分离，分离后的床料进入下降管内部向下移动；但是与其连接的回料阀运输室松动风量高于移动床操作风量，且达到鼓泡流化床操作风量。所以，在 2 号和 3 号回料阀的运输室和下降管床料成流化状态，床料没有形成稳定的移动床，更没有形成稳定的料封，部分经旋风分离器分离出的床料颗粒由于松动风的携带作用，进入旋风分离器中心的气流旋涡区，造成部分床料损失。在此运行工况下，经过下降管的固体循环流量为 3 195 kg/s，因此每个回料阀返回的床料流量平均为 1 065 kg/s（20~40 s 的平均值）。

为详细阐明回料阀内部的床料流动状态，每 2.5 s 选取中心截面固相分数进行展示，2 号回料阀中心截面 32.5~42.5 s 时间段固相体积分数如图 4 所示。

在回料阀的运输室和立管联通的区域内，床料呈贴壁流的形态，中间气路上下贯通，判断回料阀无法形成料封克服炉膛和旋风分离器的压差，从而无法起到气体隔绝的作用。在 40.0 s 时，回料阀的运输室中床料固相体积分数虽然增加，但仍然呈明显的流化状态。在 42.5 s 时，旋风分离器锥形段出口固相体积分数增加，说明床料重新堆积，回料阀中床料呈流化状态。

通过模拟发现以下现象：在旋风分离器出口端容易形成床料堆积造成哽塞流现象，同时造成回料阀内床料分布降低；在回料阀的运输室和立管联通

的区域内, 床料形成贴壁流或者形成鼓泡流态化, 无法形成稳定的料柱; 在水平孔口和返料室的区域, 床料也形成流化, 并且由于运输室的颗粒运输不畅, 造成固相颗粒体积分数低的现象。上述现象可能造成如下结果: 回料阀无法克服炉膛和旋风分离器的压差, 造成气体泄漏, 引起旋风分离器工作不正常, 气固分离效率下降; 回料阀返料能力下降, 造成 CFB 锅炉内部床料减少, 床温无法稳定; 旋风分离器出口颗粒体积分数增加, 造成系统内部颗粒数目减小, 提高运行成本; 床料在回料阀内部流化或者不规则运动, 造成回料阀压力失衡, 引发振动。

2.1.2 回料阀压力脉动

选取回料阀运输室与锥形段连接处为进口测压点, 返料室与返料斜管连接处为出口测压点, 对 2 号回料阀进出口压力脉动进行分析, 结果如图 5 所示。

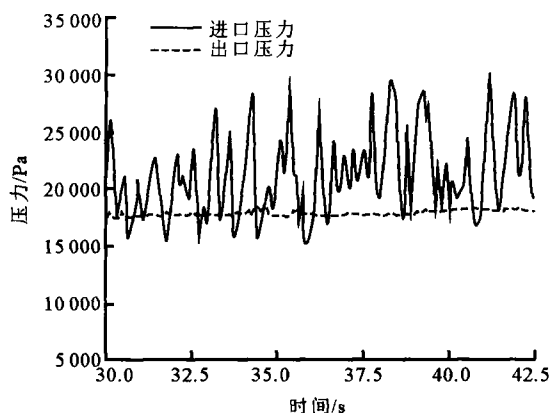


图 5 2 号回料阀进出口压力脉动

Fig.5 The pressure fluctuation at inlet and outlet of No.2 loop seal

由图 5 可以看出, 在 CFB 的整体模拟中, 回料阀的出口压力维持稳定, 大约在 17 500 Pa, 略高于炉膛内部返料斜管连接处的压力 (17 000 Pa), 因此回料阀返料室的压力并未受到炉膛内部压力波动的影响。而在图 4 中 32.5~42.5 s 时间段内, 回料阀运输室的压力在 15 000~30 000 Pa 之间波动, 结合回料阀的固相体积分数分析, 床料在回料阀中呈现鼓泡流化状态, 随着气相的气泡生长和破灭, 造成压力波动, 产生回料阀的低频振动。另外, 结合图 4 对图 5 中 32.5~42.5 s 时间段内回料阀入口的压力脉动曲线进行分析。可以发现, 在下降管和回料阀的运输室连接处, 形成了料柱和气柱交替的非稳态流动, 料柱破灭, 中间气体形成通路, 会造成返料室的压力波动, 进而引起回料阀的低频振动。因此,

回料阀的非稳态运行是回料阀产生低频振动的原因, 而其中床料的不稳定流化则是此原因的根本所在。

2.2 回料阀模拟

在不同松动风和返料风风速的匹配下对回料阀固相体积分数进行分析测试, 以研究回料阀的调控特性, 同时测量回料阀的循环流量范围, 最终确定回料阀的最优工况, 为寻求匹配 CFB 锅炉整体床料循环提供基础数据。

2.2.1 回料阀固相体积分数

根据回料阀的操作经验和最小流化速度的计算结果, 调整回料阀的运行工况。首先对不同返料风 ($5.0U_{mf}$ ~ $20.0U_{mf}$) 和松动风 ($0.5U_{mf}$ ~ $3.0U_{mf}$) 下回料阀的床料流动情况进行分析, 计算稳定运行后一段时间内 (10 s) 床料平均体积分数的分布。不同工况下回料阀床料平均体积分数如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 当松动风为 $0.5U_{mf}$ 时, 此时松动风速小于临界流化风速, 运输室中的床料不能达到流化状态, 以移动床的形式向下移动。由于床料在下降管和回料阀的运输室中形成一定高度的料封, 回料阀依靠料封形成的物料静压差克服旋风分离器与炉膛之间的压差, 压力富裕量将提供固体颗粒向下运动的动力, 使床料通过水平孔口进入返料室中; 而返料风分别设置为 $5.0U_{mf}$ 、 $10.0U_{mf}$ 、 $15.0U_{mf}$ 、 $20.0U_{mf}$, 均大于临界流化速度, 使得返料室中的床料形成鼓泡流态化, 上升的床层表面越过溢流口, 进入返料斜管中; 当返料风速增加, 返料室中床料流化程度逐渐剧烈, 返料室的固相体积分数降低; 但是, 在返料室的右侧, 4 种返料风风速下还是可以看到返料室的右侧壁面存在流化死区, 床料呈高固相体积分数分布。

当松动风增加至 $1.0U_{mf}$ 时, 运输室仍然处于移动床的状态, 在贴壁处出现少量的气泡逆向上升, 此时处于移动床和鼓泡床的临界状态; 随着松动风速不断增加, 风速大于临界流化速度的气体将以气泡形式穿过床层, 产生鼓泡流态化现象, 且随着松动风的提高而逐步剧烈。当松动风为 $2.0U_{mf}$ 时, 随着返料风风速增加, 返料风室内床料的流化程度逐渐加剧, 减少壁面颗粒的高体积分数的分布, 床层高度明显高于溢流口高度, 因此循环流量增加。当松动风达到 $3.0U_{mf}$ 时, 平均体积分数云图上显示出了明显的气泡逃逸路径, 并且随着返料风速的增加, 运输室中下部床料逐渐减少, 甚至在 20 倍返料

风时，相当长一段时间内输运室中床料大部分被吹出；而锥形段内的床料高度又没有达到克服两侧压差的程度，致使锥形段内床料下落受阻，直到气泡

破开锥形段内的床料层为止，立管和输运室内产生非稳定流化的节涌现象，说明 $3.0U_{mf}$ 作为松动风时，操作气速过大。

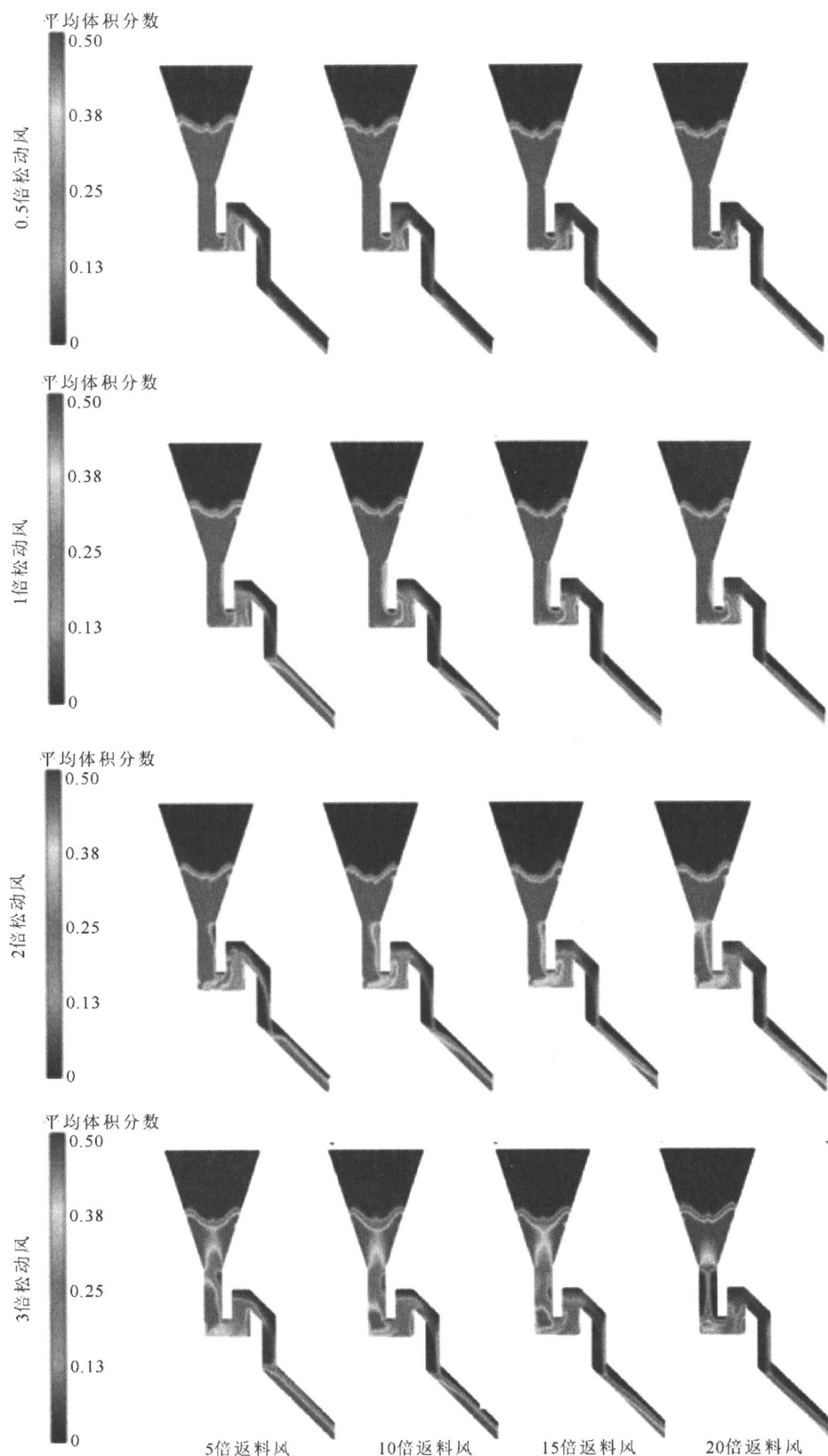


图 6 不同工况下回料阀床料平均体积分数

Fig.6 The average volume fraction of the material of the loop seal under different working conditions

2.2.2 固体循环流量

稳定状态下每个工况的平均返料量如图 7 所示。由图 7 可以看出：当松动风小于 $2.0U_{mf}$ 时，返料量随着返料风的增长而增长，但是返料风对返料量的影响逐渐减弱，这是因为当返料风风速较小时，床层鼓泡流化并不明显，表面床层高度增长不明显，床料越过溢流口的量有限；当松动风倍数大于 $2.0U_{mf}$ 时，返料风速和返料量之间不再呈现正相关的关系，而是会出现一个最大值；当松动风倍数为 $2.0U_{mf}$ 时，随着松动风的增加，返料量也会随之增加；当流化风速从 $5.0U_{mf}$ 增加到 $20.0U_{mf}$ 时，回料阀的循环流量从 870 kg/s 增加到 1040 kg/s ，在此操作工况下，回料阀的运输室和立管处于移动床操作区间，而回料阀的返料室处于鼓泡流化床操作风速区间，符合回料阀的常规操作特性。根据上文整体模拟的循环流量为 1065 kg/s ，接近“ $2.0U_{mf}/3.0U_{mf}$ 松动风+ $20.0U_{mf}$ 返料风”工况下的循环流量。虽然“ $3.0U_{mf}$ 松动风+ $10.0U_{mf}/15.0U_{mf}$ 返料风”这 2 个工况固体循环流量较高，但是超过 $3.0U_{mf}$ 松动风，回料阀的运输室处于非稳定运行状态，床料呈现鼓泡流态化，容易引起回料阀的压力波动，导致其振动。因此选择“ $2.0U_{mf}$ 松动风+ $20.0U_{mf}$ 返料风”作为优化工况。

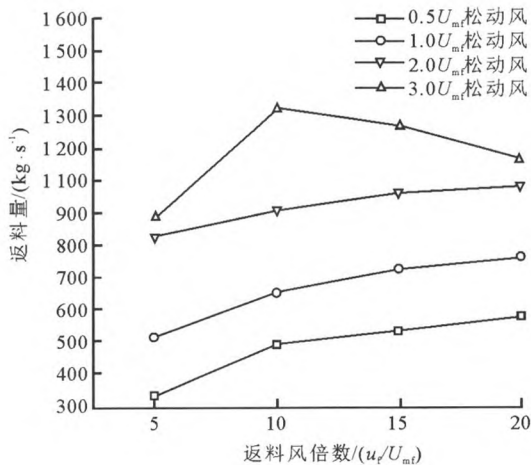


图 7 不同工况下返料量
Fig.7 The amount of recycle materials under different working conditions

2.2.3 优化工况分析

图 8 为“ $2.0U_{mf}$ 松动风+ $20.0U_{mf}$ 返料风”工况中回料阀的连续运行情况。由图 8 可以看出：到 5 s 时，返料室的床料已经完全流化起来并且越过溢流口，进入返料斜管中；随着时间的增加，运输室

中的松动风逐渐形成气泡贴壁逆向向上流动，因此松动风与床料虽然为相对运动，但在此优化工况下，床料向下正常流动；当回料阀运行至 40 s 时，回料阀的运输室中床料处于稳定向下的移动床状态，返料室处于鼓泡流化状态，堆积的料柱高度没有变化，说明回料阀在此优化工况下连续稳定运行。

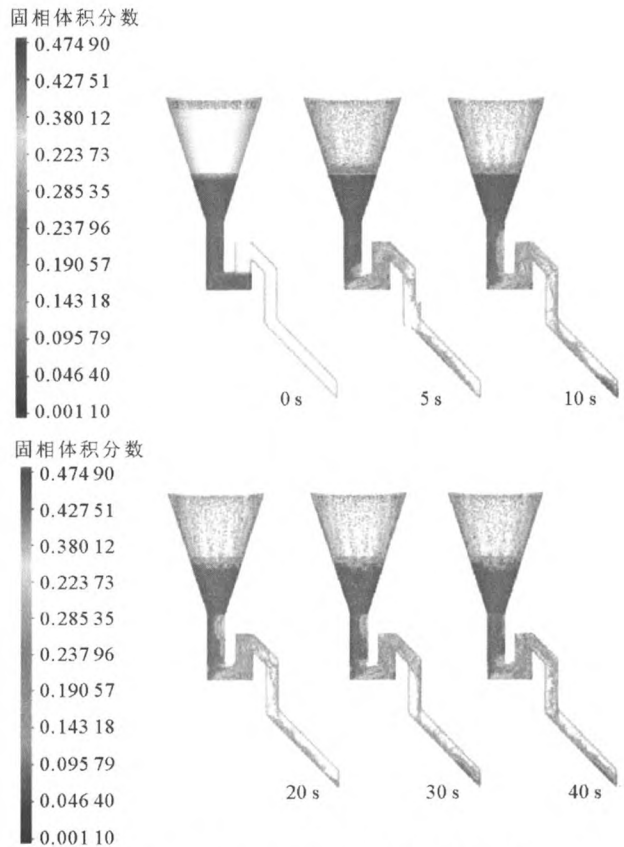


图 8 $2.0U_{mf}$ 松动风+ $20.0U_{mf}$ 返料风回料阀运行情况
Fig.8 Operation status of the loop seal under $2.0U_{mf}$ loose wind and $20.0U_{mf}$ return feed wind

2.3 匹配性分析

采用优化的回料阀工况来模拟整体 CFB，以验证优化结果的匹配性（松动风量为 $1305 \text{ m}^3/\text{h}$ ，返料风量为 $13050 \text{ m}^3/\text{h}$ ）。图 9 为 CFB 锅炉优化后的瞬时固相体积分数。由图 9 可以看出：与优化前相比，回料阀的运输室固相体积分数增加，没有出现运输室床料剧烈流化的情况，运输室中明显形成了足够的料封，松动风贴壁面向上流动，对固相颗粒的向下流动没有影响，因此回料阀可以起到有效的气体隔绝的作用；回料阀的返料室中固相体积分数明显增加，返料量增加，回料阀的运行情况呈现显著的改善，在回料阀的水平运输段，优化后的工况中水平运输段的固相颗粒体积分数增加，因此有效

地提高了单位时间内回料阀的固体输运量（即固体循环流量）；相较原运行工况，松动风和流化风都有所减小，因此风机能耗和厂用电均减少。对于炉内的床料流动，优化前炉膛内的平均固体循环流量为 3 195 kg/s，优化后模拟得到的炉膛平均固体循环流量为 3 218 kg/s。在不改变 CFB 一次风和二次风的条件下，优化后的固体循环流量略有上升，但不会对水冷壁及旋风分离器的磨损产生明显影响。回料阀的压力分布体现了回料阀的密封作用。图 10 为稳定状态下正中截面处的时均压力分布。

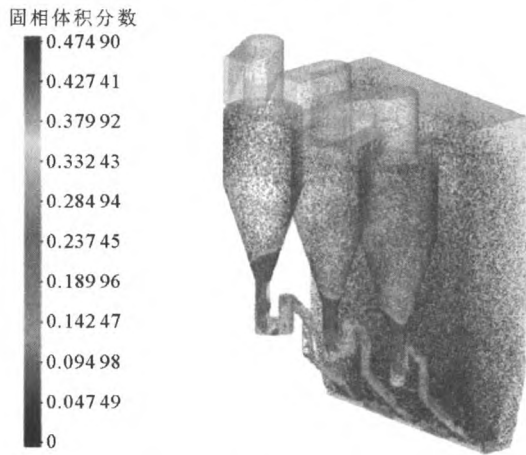


图 9 优化后瞬时固相体积分数分布

Fig.9 The instantaneous solid volume fraction distribution after the optimization

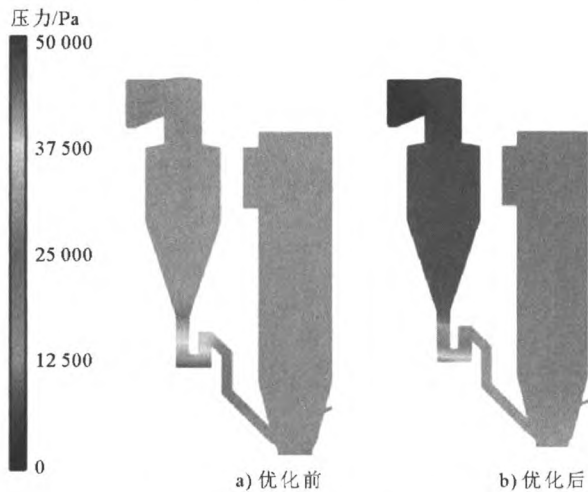


图 10 优化前后时均压力分布

Fig.10 The profiles of average pressure distribution before and after the optimization

从图 10 可以看出，优化后整个 CFB 锅炉压力分布有了很大改善，CFB 内部压力明显下降，出口处的压力由 12 500 Pa 降低为 559 Pa，提高了旋风分离器的分离效率，同时降低了引风机的负荷。此

处需说明一点，优化前后旋风分离器出口处压力均设置为 0，即计算区域外的网格压力设置为 0；而达到稳定状态后，优化前后旋风分离器出口压力则分别为 12 500 Pa 和 559 Pa，即计算区域内最外层的网格中压力为 12 500 Pa 和 559 Pa。旋风分离器的内部压力明显降低，有利于旋风分离器的气固分离效率提高。下降管的压差明显减小，有利于减小下降管中床料的堆积高度，提高旋风分离器锥形段的长度，进而也有利于提高旋风分离器的分离效率。另外，回料阀水平孔口的压差与运输室和返料室两个室的压差提升，因此提高回料阀的气体隔绝作用，更有利于回料阀进行颗粒的输运。回料阀出口的返料斜管压力同时降低，有利于翻越溢流口的床料稳定地返回至 CFB 锅炉内部。

优化后回料阀进口（与锥形段相连处）和出口（与返料斜管相连处）的压力波动如图 11 所示。与图 5 对比可见：优化前的回料阀进口压力稳定在 20 000 Pa 左右，但是压力脉动较大，脉动值约 15 000 Pa；优化后进口的压力稳定在 7 000 Pa，压力脉动明显减小；优化前回料阀出口压力稳定在 19 000 Pa，压力脉动小；优化后回料阀出口压力稳定在 12 000 Pa。可见优化后回料阀压力脉动明显减小，从而减小了回料阀的振动，提高了回料阀的安全稳定运行系数。

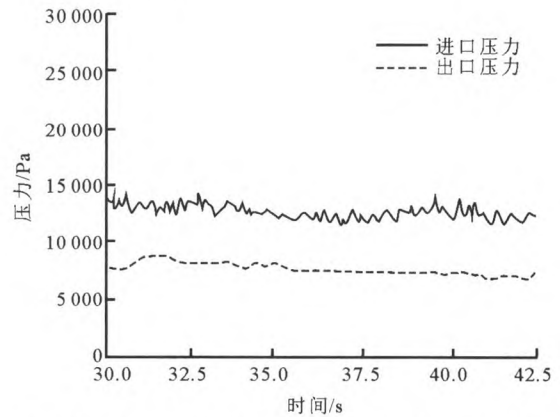


图 11 优化后 2 号回料阀进出口的压力波动对比
Fig.11 Comparison of pressure fluctuation after the optimization at inlet and outlet of No.2 loop seal

3 结果与讨论

1) 本文采用 CPFD 方法对某 CFB 及其重要组件回料阀进行了模拟分析。首先对 CFB 锅炉整体进行数值模拟，通过固相分布和回料阀的压力脉动情况发现回料阀内的颗粒呈现非稳定的流态化，因此判断这是造成回料阀低频振动的根本原因。

2) 通过模拟分析不同返料风和松动风配比下回料阀的流化情况、返料量和压力脉动等数据发现, 返料风和松动风的优化配比可以减少回料阀的压力脉动, 进而减少回料阀的振动; 回料阀的优化工况为“ $2.0U_{mf}$ 松动风+ $20.0U_{mf}$ 返料风”。

3) 采用优化的回料阀操作工况与整体 CFB 锅炉模拟进行匹配, 发现优化工况下 CFB 锅炉运行良好, 回料阀压力脉动量减小, 喘振现象明显减弱, 而整体 CFB 的固体循环流量未有明显改变。

[参 考 文 献]

- [1] 程乐鸣, 周星龙, 郑成航, 等. 大型循环流化床锅炉的发展[J]. 动力工程学报, 2008, 28(6): 817-826.
CHENG Leming, ZHOU Xinglong, ZHENG Chenghang, et al. Development of large-scale circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(6): 817-826.
- [2] BASU P, BUTLER J. Studies on the operation of loop-seal in circulating fluidized bed boilers[J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1723-1731.
- [3] CHENG L, BASU P, CEN K. Solid circulation rate prediction in a pressurized loop seal[J]. Chemical Engineering Research and Design, 1998, 76(6): 761-763.
- [4] KIM S W, NAMKUNG W., KIM S D. Solid recycle characteristics of loop-seals in a circulating fluidized bed[J]. Chemical Engineering and Technology, 2001, 24(8): 843-849.
- [5] KIM S W, KIM S D. Effects of particle properties on solids recycle in loop-seal of a circulating fluidized bed[J]. Powder Technology, 2002, 124(1/2): 76-84.
- [6] 王祥, 向文国, 陈晓平, 等. 流动密封阀调节特性实验研究[J]. 热能动力工程, 2014, 29(6): 719-724.
WANG Xiang, XIANG Wenguo, CHEN Xiaoping, et al. Experimental study of the regulation characteristics of a flow seal valve[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2014, 29(6): 719-724.
- [7] 曹文亮, 高建强, 王兵树, 等. 循环流化床锅炉流动密封阀工作特性分析[J]. 华北电力大学学报, 2002, 29(4): 55-59.
CAO Wenliang, GAO Jianqiang, WANG Bingshu, et al. Operation performance analysis of loop seal of circulating fluidized bed[J]. Journal of North China Electric Power University, 2002, 29(4): 55-59.
- [8] 王擎, 骆仲决, 李绚天, 等. 循环流化床流动密封阀型返料装置的设计方法探讨[J]. 动力工程学报, 1999, 19(2): 24-28.
WANG Qing, LUO Zhongyang, LI Xuantian, et al. Design method of loop seal typed recycle device for circulating fluidized bed boiler[J]. Power Engineering, 1999, 19(2): 24-28.
- [9] 王庆功, 汪佩宁, 杨海瑞, 等. N 阀和 U 阀内流动结构比较的数值模拟[J]. 锅炉技术, 2013, 44(5): 22-26.
WANG Qinggong, WANG Peining, YANG Hairui, et al. Comparison of the gas-solid flow characteristics between an N loop-seal and U loop-seal with numerical simulation[J]. Boiler Technology, 2013, 44(5): 22-26.
- [10] 王庆功, 杨海瑞, 吕俊复. 回料阀内气固两相流动特性的数值研究[J]. 中国电力, 2013, 46(7): 1-5.
WANG Qinggong, YANG Hairui, LU Junfu. Numerical study on gas-solid flow characteristic in loop seal[J]. Electric Power, 2013, 46(7): 1-5.
- [11] SNIDER D M. An incompressible three-dimensional multiphase particle-in-cell model for dense particle flows[J]. Journal of Computational Physics, 2001, 170(2): 523-549.
- [12] O'ROURKE P J, ZHAO P, SNIDER D. A model for collisional exchange in gas/liquid/solid fluidized beds[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(8): 1784-1797.
- [13] SNIDER D M. Three fundamental granular flow experiments and CPFD predictions[J]. Powder Technology, 2007, 176(10): 36-46.
- [14] SNIDER D M., CLARK S M., O'ROURKE P J. Eulerian-Lagrangian method for three-dimensional thermal reacting flow with application to coal gasifiers[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(6): 1285-1295.
- [15] KUNII D, LEVENSPIEL O. Fluidization engineering[M]. 2nd ed. Waltham: Butterworth-Heinemann, 1991: 61-94.

(责任编辑 马昕红)