



移动扫码阅读

王锐,胡斌,李润迪. 叶片磨损缺失对垃圾焚烧半干法脱酸塔影响的数值研究[J]. 能源环境保护, 2022, 36(4): 72-79.

WANG Rui, HU Bin, LI Rundi. Numerical study on the influence of blade wear loss on semi-dry flue gas desulfurization tower of waste incineration[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(4): 72-79.

叶片磨损缺失对垃圾焚烧半干法脱酸塔影响的数值研究

王锐¹, 胡斌², 李润迪¹

(1. 辽宁朗源环境科技有限公司, 辽宁鞍山 114003;

2. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘要:针对垃圾焚烧半干法脱酸塔旋流器叶片磨损缺失问题, 利用 CFD 技术进行了数值模拟, 分析了无磨损情况下脱酸塔的流动情况, 探讨了上部旋流叶片、下部旋流叶片和下部倾斜叶片的磨损缺失对脱酸塔流场的影响。结果表明: 上部旋流叶片和下部旋流叶片的缺失对脱酸塔流场的影响较小; 下部倾斜叶片磨损缺失会导致雾滴运动轨迹整体上扬、脱酸塔内部蒸发区域变大、脱酸塔整体压力损失降低等问题。

关键词: 半干法脱酸; 数值模拟; 磨损缺失; 流场

中图分类号: X705

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2022)04-0072-08

Numerical study on the influence of blade wear loss on semi-dry flue gas desulfurization tower of waste incineration

WANG Rui¹, HU Bin², LI Rundi¹

(1. Liaoning Bright-Source Environmental Technology Co., Ltd., Anshan 114003, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Aiming at the wear and tear of swirler blades in waste incineration semi-dry flue gas desulfurization tower, numerical simulation was conducted by computational fluid dynamics (CFD) technique. The flow field of desulfurization tower without wear of swirler blades was analyzed. The influence of wear loss of upper swirl blades, lower swirl blades and lower inclined blades on the flow field of desulfurization tower were studied respectively. The results showed that the wear loss of upper swirl blades and lower swirl blades had little effect on the flow field of desulfurization tower. The wear loss of lower inclined blade causes the overall upward movement of droplets trajectory, enlarge the evaporation area inside the desulfurization tower, and reduce the overall pressure loss of the desulfurization tower.

Key Words: Semi-dry desulfurization; Numerical simulation; Wear loss; Flow field

0 引言

随着近些年来城乡居民生活水平的提高, 生活垃圾的产量也在逐年增长^[1]。随着生态环保要求的日益提高, 传统的填埋方式已逐渐被淘汰, 垃圾焚烧则成为现在生活垃圾处理的主流方式^[2-4]。由于生活垃圾成分的复杂性, 在焚烧处理中会产

生大量的 SO₂、HCl 和 HF 等酸性有害气体。这些酸性气体不仅会污染大气, 也会对人体健康产生影响。因此垃圾焚烧后的烟气必须经过脱酸处理, 才能对外排放^[5-6]。一般而言, 垃圾焚烧可以采用湿法、半干法、干法对烟气进行脱酸处理^[7], 其中半干法脱酸是主流方法。垃圾焚烧厂采用的半干法脱酸工艺主要是通过旋转雾化器将石灰浆

($\text{Ca}(\text{OH})_2$)雾化成雾滴,并在脱酸塔中与烟气中的酸性气体进行反应,并将雾滴蒸发形成粉体,最终在布袋除尘器中收集。因此,该方法又可称为喷雾干燥法。

由于烟气是在脱酸塔中与雾滴进行反应,脱酸塔的设计直接影响烟气脱酸的效率。因此,不少专家学者对脱酸塔的设计及内部反应的模拟仿真进行了研究。Jannelli E^[8]对某个燃煤电厂半干法脱酸系统进行了数值模拟,朱远^[9]等人给出了一种喷雾干燥塔的设计方法,并利用 CFX18.1 对其进行了数值仿真,验证了该方法设计的可行性和可靠性。Strock T W^[9]和曾芳^[10]对脱酸塔的内部流场进行了研究,结果表明脱酸塔内部烟气的流动情况和雾滴的运动情况对脱酸塔内压降和脱酸效率影响较大。林军^[11]等人对某加装烟气分布器的半干法脱酸塔进行了仿真模拟,表明烟气预分布器可以有效地均匀分布烟气,进而提高脱酸率。纪辛^[12]等人对某半干法脱酸塔进行了数值仿真模拟,分析了空塔条件和喷雾条件下脱酸塔内部流场的不同,结果表明喷雾可以改变脱酸塔内部流场的形态,在局部空间产生强烈的湍流流动,促进塔内的气液传质和化学反应。李双双^[13]等人以某 750 t/d 的垃圾焚烧电厂旋转喷雾半干法烟气脱酸塔为研究对象,利用 CFD 技术对脱酸塔不同烟气入口旋转角时的流场分布进行数值模拟,为脱酸塔的优化设计及运行提供理论基础和研究依据。杨树俊等^[14]系统研究了分散气旋流、热空气旋流以及二者共同旋流对雾滴颗粒运动及对最终干燥效果的影响。研究中采用了均一雾滴分布模型,结果表明旋流角度为 30° 时,干燥效果最佳,并且使用同向旋流时,可以进一步提高干燥效果。李翔宇^[15]等人研究了不同进风方式对喷雾干燥过程的影响,研究结果表明旋流式的喷雾干燥塔效果要比直流式的喷雾干燥塔优异。

众多专家学者对半干法脱酸塔内部流场情况进行了研究,这些研究均建立在脱酸塔旋流器完好无损情况下。但是在实际过程中,由于焚烧烟气中包含颗粒物及腐蚀性气体,脱酸塔旋流器的旋流叶片会不可避免地产生磨损乃至缺失,而目前这种情况下脱酸塔内部流动情况的研究较少。因此,本文以某 350 t/d 的垃圾焚烧线适配的半干法烟气脱酸塔为例,利用 ANSYS CFX2020 R2 研究了旋流叶片磨损缺失对脱酸塔内部流场的影

响,为垃圾焚烧厂半干法脱酸系统的维护和保养提供了依据。

1 分析模型及理论

1.1 物理模型

某 350 t/d 垃圾焚烧线适配的半干法烟气脱酸塔简图如图 1 所示。烟气从烟气—空气预热器出来后,首先通过蜗壳进入脱酸塔旋流器,再进入脱酸塔内部与石灰浆雾滴进行反应,最后从脱酸塔锥部部分的出口管道流出。脱酸塔圆柱部分直径为 7.5 m,高度为 7.5 m,锥体部分的角度为 50° 。脱酸塔旋流器如图 2 所示,主要有三组叶片,分别为上部旋流叶片,下部旋流叶片和下部倾斜叶片,其中上部旋流叶片数量为 16 片,下部旋流叶片数量为 12 片,下部倾斜叶片数量为 1 片。本文主要研究这三组叶片磨损缺失对脱酸塔性能的影响。根据脱酸塔的实际情况,本文建立脱酸塔的数值计算模型,如图 3 所示。为了简化模型,将叶片视为零厚度,并忽略其它细小零件对脱酸塔内部空间的影响。模型网格主要采用六面体网格,使用 ICEM CFD 软件进行网格划分,以期获得最好的计算结果;在其余较难划分的部位,则采用四面体网格填充,并使用 Pointwise 软件进行网格划分。网格在脱酸塔中心蒸发最为强烈的地方进行加密,最终网格数量为 19 682 276。

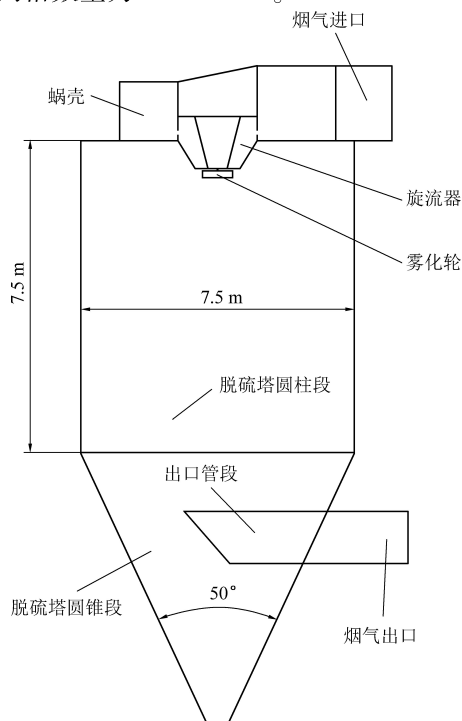


图 1 脱酸塔简图

Fig.1 Desulfurization tower diagram

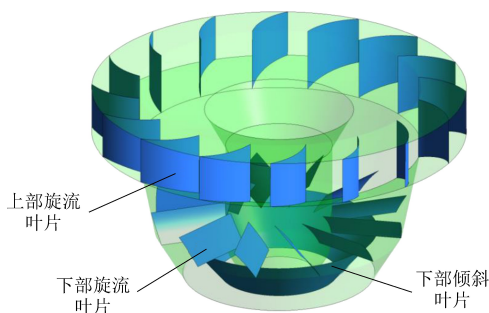


图2 旋流器简图

Fig.2 Swirler diagram

1.2 数学模型

烟气在脱酸塔内的流动遵守连续介质流体的假设。根据假设并全面地考虑了流体的粘性、热传导和可压缩性等影响下,可得到烟气的连续方程、动量方程和能量方程^[16],如下所示。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_m \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho h^*)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} h^*) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\vec{U} \cdot \tau) + S_E \quad (3)$$

上式中: ρ 为烟气的密度, kg/m^3 ; $\vec{U}$ 为烟气的速度矢量, m/s ; p 为烟气的压力, Pa ; T 为烟气温度, K ; t 为时间, s ; τ 为烟气的应力张量; S_m 为外界的动量源项; S_E 为外界的能量源项。

这些方程是一组全面描述烟气流动的偏微分方程,在对以上方程进行计算时,需要对其进行雷诺平均和引入湍流模型。由于烟气在脱酸塔内部的流动具有一定的旋度,综合计算资源和精度对比,选择 RNG k - ϵ 湍流模型来对雷诺时均方程进行封闭。由于本文主要目的是研究流场的整体情况,为了降低计算规模,采用定常计算方法,即不考虑式(1)至式(3)中非稳态项。

在雾滴建模方面,选择离散相模型(DPM)对雾滴的轨迹进行跟踪计算,并与连续相双向耦合。计算中,假设雾滴为圆球状,并且忽略雾滴上的浮力、Basset力、Magnus力和Saffman力,仅考虑雾滴自身的重力及烟气对雾滴的拖拽力,雾滴的运动方程可简化为:

$$\frac{d\vec{U}_p}{dt} = F_D(\vec{U}_p - \vec{U}) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (4)$$

式(4)中: $F_D(\vec{U}_p - \vec{U})$ 为雾滴受到烟气的单位质量拖拽力,单位为 N ,其中 F_D 为烟气的拖拽力系数,采用 Schiller Naumann 拖拽力模型进行计算, ρ_p 为雾滴的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; $\vec{U}_p$ 为雾滴的速度矢量, m/s 。与此同时,雾滴在脱酸塔中蒸发和换热遵守能量方程,方程为:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T - T_p) + \frac{dm_p}{dt} r_p \quad (5)$$

式(5)中: c_p 为雾滴定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_p 为雾滴的温度, K ; h 为雾滴表面与烟气的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A_p 是雾滴的表面积, m^2 ; m_p 为雾滴的质量, kg ; r_p 为雾滴的汽化潜热, J/kg 。

在本文中,喷雾雾滴的直径以 Rosin-Rammler 分布进行建模,分布参数为 2.7,特征粒径由雾滴平均直径求解,雾滴的平均直径由公式(6)确定:

$$d_{rs} = \frac{1.4 \times 10^4 G_1^{0.24}}{(Nd)^{0.83} (nh_d)^{0.12}} \quad (6)$$

式(6)中: G_1 为浆液的质量流量, kg/h ; N 为雾化盘转, r/min ; d 为雾化盘直径, m ; n 为雾化盘孔数; h_d 为雾化盘孔高, m 。在本文中,雾化盘转速设定为 12 000 r/min ,雾化盘直径为 215 mm ,雾化盘孔数为 18,雾化盘孔高 13 mm 。

1.3 边界条件

该脱酸塔烟气的设计流量为 62 000 Nm^3/h ,进口烟气温度为 190 $^\circ\text{C}$,换算成实际流量时烟气流量为 105 126.5 m^3/h ,烟气的水蒸气含量为 14.7%。根据此烟气数据,建立烟气模型,计算时烟气简化为空气与水蒸气混合,采用理想气体模型;在脱酸塔的蜗壳入口处给定流量进口边界条件及进口总温边界。在脱酸塔出口处,给定出口静压边界条件,出口静压设置为 0。在脱酸塔圆柱部分和圆锥部分与环境接触的壁面,给定表面换热系数为 0.921 3 $\text{W}/(\text{K} \cdot \text{m}^2)$ ^[17],外界环境温度为 300 K 。由于脱酸塔工作时雾化盘处于高速旋转状态,因为雾滴喷出区域简化为雾化盘上的一个环带区域,并从此区域均匀喷出,如图 4 所示。浆液从雾化轮喷出时,切向速度为 130 m/s ,径向速度为 10 m/s ,流量为 1 300 kg/h ,密度为 1 040 kg/m^3 。根据式(6)计算,雾滴的平均直径为 139 μm ,据此再计算出 Rosin-Rammler 模型的雾滴特征特征粒径,为 151.2 μm 。在计算中,雾滴运动到壁面时采用完全弹性碰撞模型,且雾滴轨迹追踪的数量约 2 000 条。

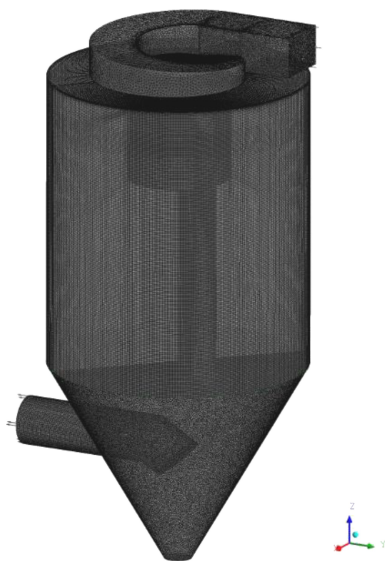


图 3 脱酸塔网格示意图

Fig.3 Desulfurization tower mesh diagram

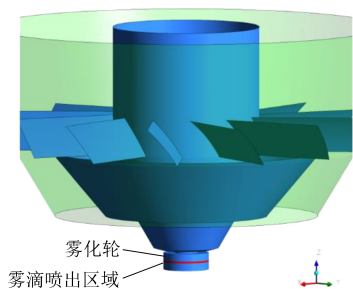


图 4 雾滴喷出区域示意图

Fig.4 Droplets emit area diagram

2 结果与分析

2.1 旋流叶片无磨损

首先,对旋流叶片无磨损情况下的脱酸塔进行数值模拟,做为整个研究的基准。图 5 展示了脱酸塔的流线图。可以看出,烟气从蜗壳分布器切向进入旋流器和脱酸塔内部后,不断旋转发展,充满整个脱酸塔,最终从下部烟道排出。从雾化轮喷出的雾滴也跟随烟气做螺旋运动,如图 6 所示。大部分的雾滴在脱酸塔内部蒸发完毕,少部分初始直径较大雾滴会在脱酸塔圆筒段下向脱酸塔塔壁运动,其中某些雾滴会一直向脱酸塔下部运动,直至运动到脱酸塔出口管段附近,才完全蒸发完毕。这些雾滴的运动会引起脱酸塔下部和锥体部分产生轻微结垢现象。图 7 展示了 $X=0$ 截面处脱酸塔内部温度分布情况。可以看出,烟气从蜗壳进入脱酸塔时,与雾化轮喷出的雾滴产生强烈的换热作用,迅速降温,脱酸塔大部分区域的温度在 420 K 附近,其中由于喷雾降温的作用,脱

酸塔上部区域的温度略低于脱酸塔下部区域。最终,脱酸塔总的静压损失为 1 510 Pa。

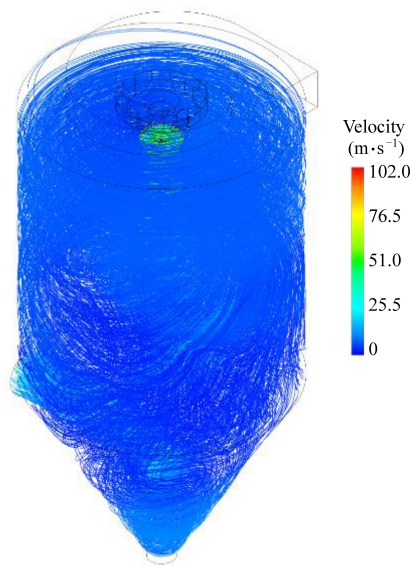


图 5 旋流叶片无磨损时脱酸塔流线图

Fig.5 Desulfurization tower streamline without swirler blades wear loss

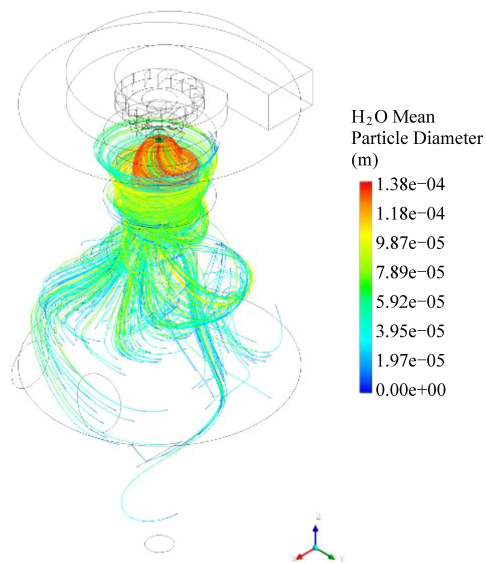


图 6 旋流叶片无磨损时脱酸塔雾滴运动轨迹图

Fig.6 Droplets trajectory inside desulfurization tower without swirler blades wear loss

2.2 上部旋流叶片磨损缺失

本文研究了 1 至 3 片上部旋流叶片磨损缺失情况对脱酸塔流场的影响,磨损缺失叶片位于沿烟气运动方向,进气蜗壳蜗舌的前部。图 8 展示了叶片磨损缺失时的雾滴轨迹,可以看出上部旋流叶片缺失对雾滴轨迹影响并不显著,三种叶片磨损缺失情况下的雾滴轨迹基本一致,并且与原始情况下的雾滴轨迹(图 6)基本一致。从图 9 中

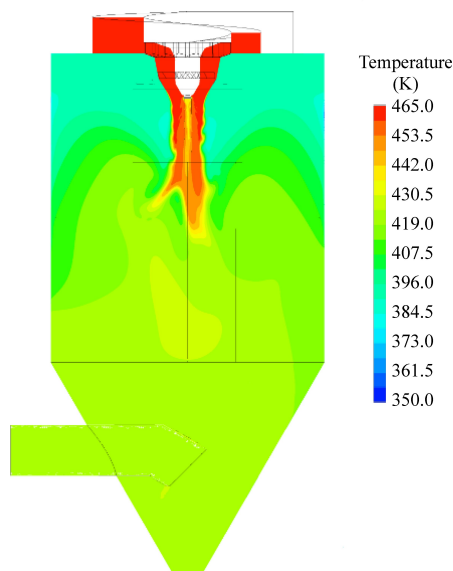


图 7 旋流叶片无磨损时脱酸塔温度云图

Fig.7 Temperature contour inside desulfurization tower without swirl blades wear loss

可以看出,在缺失 3 片上部旋流叶片的情况下,第一级旋流叶片出口处的烟气流动的角度会受到缺失叶片的影响,如图 9 右侧所示,但由于下部旋流叶片完整,在其导流的作用下,烟气在分布器出口的速度与角度均较为统一,与原始情况一致,如图 10 所示。因此,上部旋流叶片的缺失对脱酸塔内部流场影响较小。整个脱酸塔的压力损失也与原始情况一致,均在 1 500 Pa 附近。

2.3 下部旋流叶片磨损缺失

本文研究了 1 至 3 片下部旋流叶片磨损缺失情况对脱酸塔流场的影响,磨损缺失叶片的位置角度与上部旋流叶片缺失研究一致。图 11 展示了叶片磨损缺失时的雾滴轨迹,可以看出下部旋流叶片缺失对雾滴轨迹影响并不显著,三种叶片磨损缺失情况下的雾滴轨迹基本一致,并且与原始情况下的雾滴轨迹(图 6)基本一致。产生这种情况的原因主要是因为下部旋流叶片的缺失对烟气分布器出口的速度分布影响较小,如图 12 所示。即使当三片旋流叶片缺失时,由于相邻叶片与旋流自身的作用,经过无旋流叶片处的烟气依然发生了一定程度的偏转,从而在烟气分布器出口处的速度和角度与有旋流叶片处的烟气几乎一致,如图 13 所示。由于流场具有相似性,下部旋流叶片磨损缺失对脱酸塔的温度分布的影响很小,对脱酸塔的压力损失影响几乎没有,本小节中所有下部旋流叶片磨损缺失情况下的脱酸塔静压损失均在 1 500 Pa 左右。

2.4 下部倾斜叶片磨损缺失

本文研究了两种下部倾斜叶片磨损情况,分别为下部倾斜叶片下方磨损一半及下部倾斜叶片完全磨损的情况。不同下部倾斜叶片磨损情况时的雾滴运动轨迹图如图 14 所示,对比图 6 可以看出,随着下部叶片磨损的加剧,雾滴的运动明显有上移的趋势,这种趋势会导致脱酸塔内部塔壁的

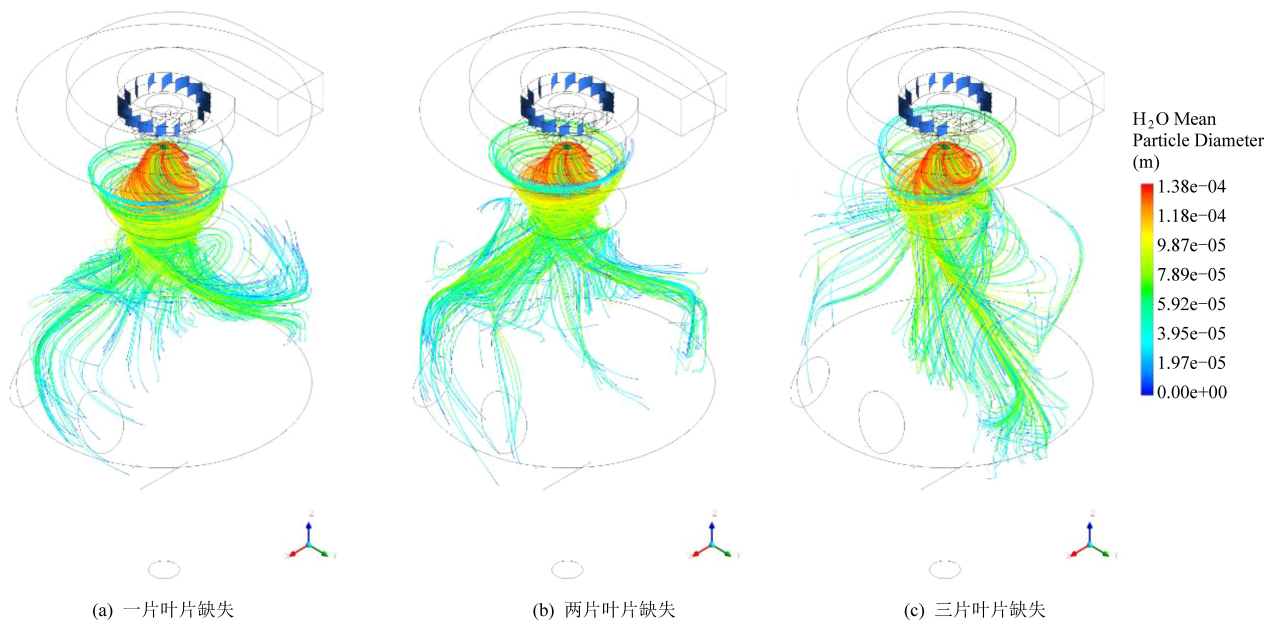


图 8 上部旋流叶片磨损缺失时雾滴的运动轨迹图

Fig.8 Droplets trajectory inside desulfurization tower with upper swirl blades wear loss

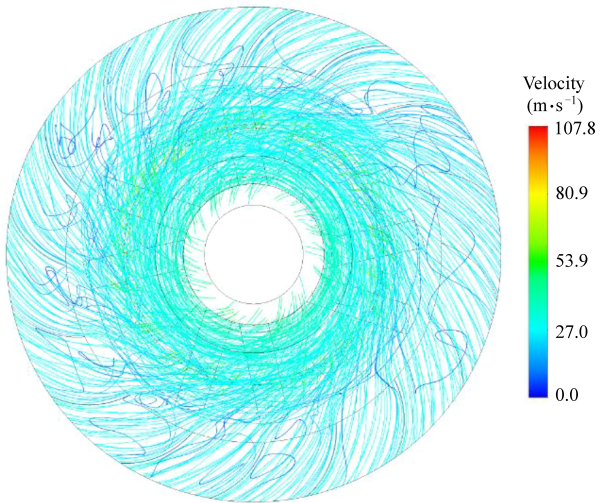


图 9 上部旋流叶片缺失时流线图

Fig.9 Streamline inside swirler with upper swirl blades wear loss

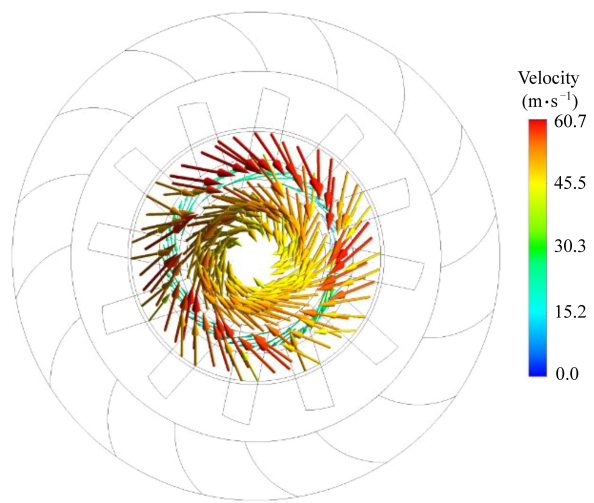


图 10 上部旋流叶片缺失时旋流器出口速度矢量图

Fig.10 Velocity vector on outlet of swirler with upper swirl blades wear loss

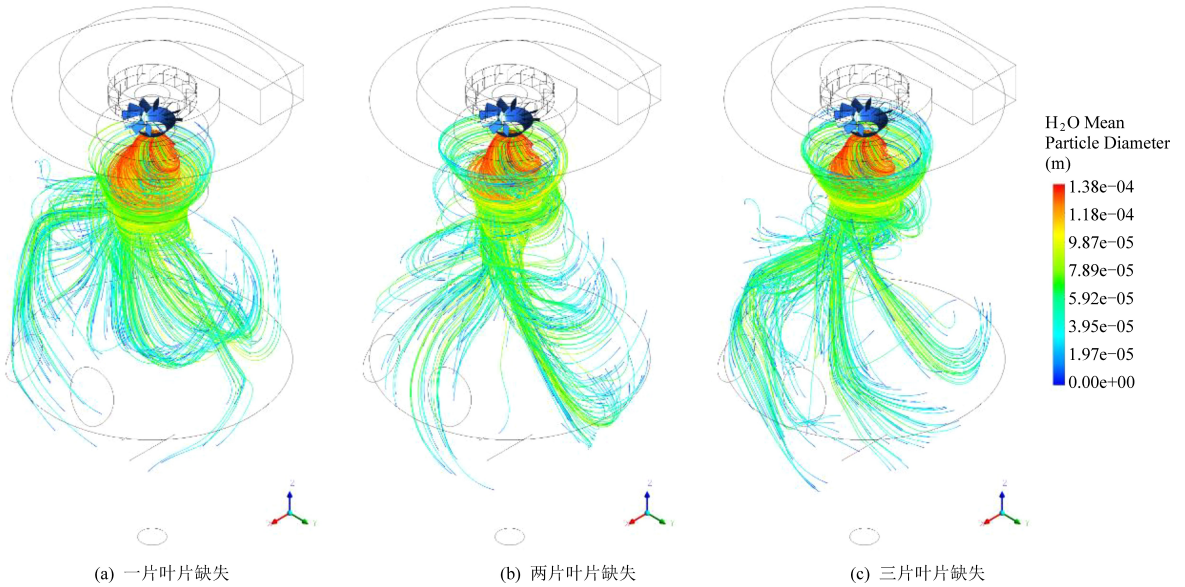


图 11 下部旋流叶片磨损缺失时雾滴的运动轨迹图

Fig.11 Droplets trajectory inside desulfurization tower with lower swirl blades wear loss

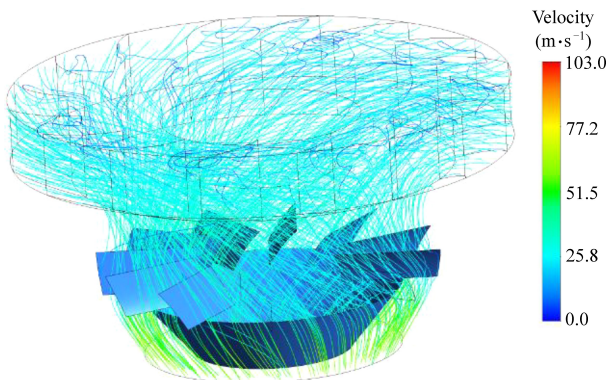


图 12 下部旋流叶片缺失时流线图

Fig.12 Streamline inside swirler with lower swirl blades wear loss

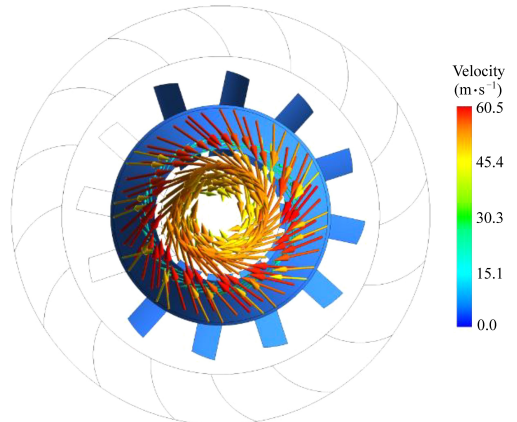


图 13 下部旋流叶片缺失时旋流器出口速度矢量图

Fig.13 Velocity vector on outlet of swirler with lower swirl blades wear loss

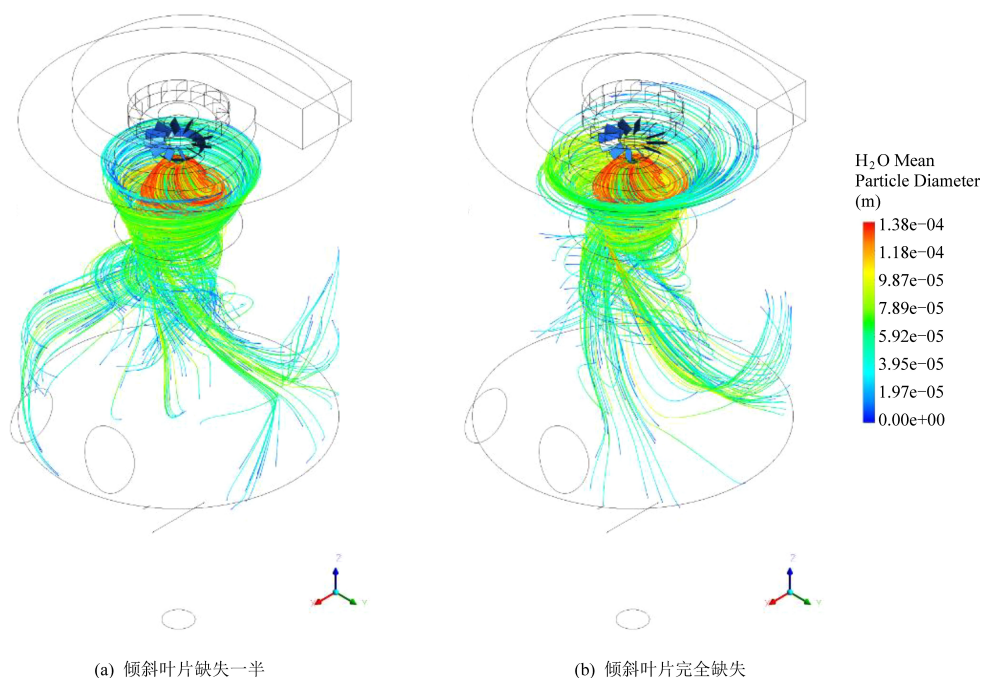


图 14 下部倾斜叶片磨损缺失时雾滴的运动轨迹图

Fig.14 Droplets trajectory inside desulfurization tower with lower inclined blade wear and loss

结垢区域向脱酸塔上部发展,进而使得脱酸塔内部结垢区域增加。图 15 为两种磨损情况时塔内温度分布云图,对比图 7 可以看出,塔内温度分布无明显改变,但随着磨损区域的加大,雾滴蒸发区域明显变大。两种下部叶片磨损情况下,脱酸塔静压损失分别为 1 000 Pa 和 890 Pa,与相对于原始脱酸塔情况有了大幅度下降。这些现象产生的

根源可归结为随着下部倾斜叶片磨损缺失情况的加剧,其束流效应在不断弱化,如图 16 所示。在下部倾斜叶片完整的情况下,其有明显的束流作用,使得烟气较为集中且以较高的轴向流速进入脱硫塔内部,而在下部倾斜叶片磨损缺失的情况下,烟气缺乏约束并且轴向流速较低,因此使得雾滴的运动有上移的趋势。

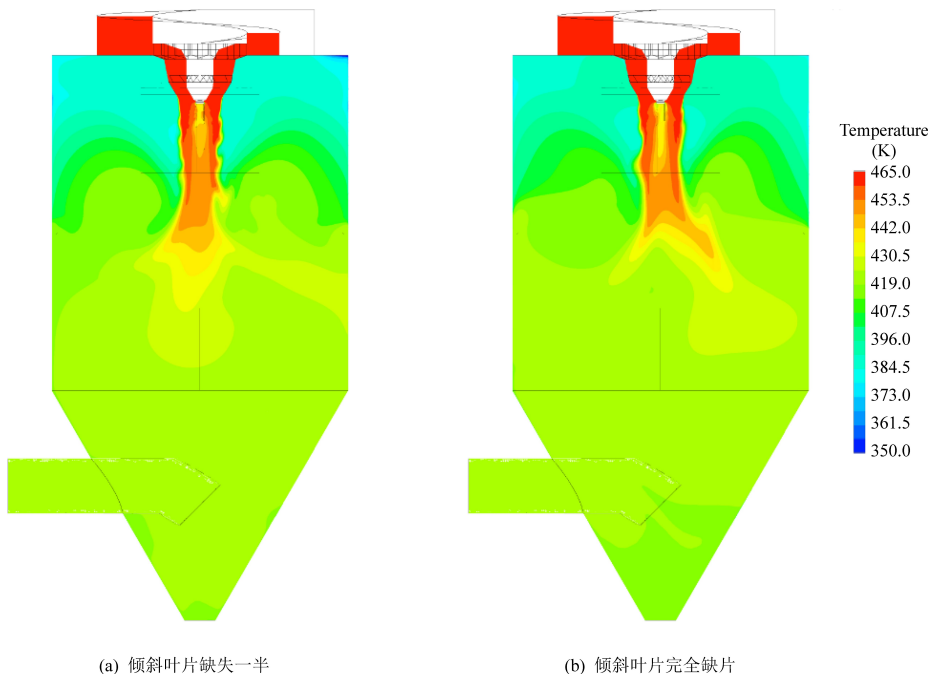


图 15 下部倾斜叶片磨损缺失时脱酸塔温度云图

Fig.15 Temperature contour inside desulfurization tower with lower inclined blade wear and loss

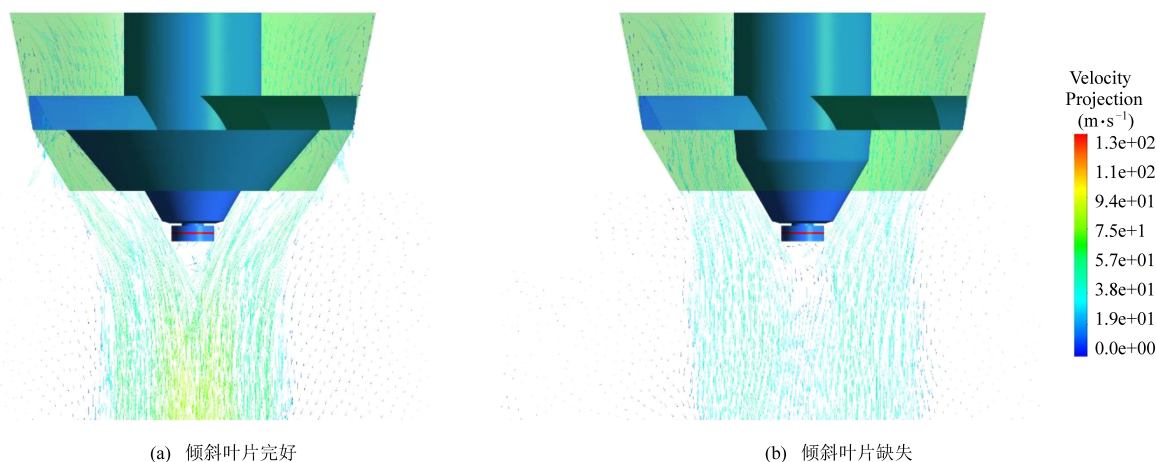


图 16 下部倾斜叶片对烟气速度矢量的影响

Fig.16 Influence of lower inclined blade on velocity vector of flue gas

3 结 论

对某 350 t/d 垃圾焚烧线使用的半干法脱酸塔进行了数值建模和仿真,研究脱酸塔旋流叶片完好及磨损缺失状态下对脱酸塔内部流场的影响。研究的结果表明,CFD 技术可以有效地模拟脱酸塔内部的旋流和雾滴蒸发现象,在旋流器叶片完整的情况下,大部分雾滴在脱酸塔内部蒸发完毕,少部分会运动到脱酸塔下部塔壁附近。上部旋流叶片和下部旋流叶片磨损缺失对脱酸塔流场的影响较小,雾滴轨迹分布与无磨损情况类似;下部倾斜叶片的磨损缺失对脱酸塔流程的影响较大,随着磨损缺失的加剧,雾滴轨迹有明显上移的趋势,并且脱酸塔的蒸发区域也逐渐变大,压力损失也在逐渐降低,可能会导致脱酸塔上部塔壁粘壁效应加剧。

参考文献

- [1] 张大勇,王乐乐,刘洪荣.“十四五”生活垃圾焚烧发电行业发展趋势分析[J].建设科技,2021(17):38-41.
- [2] 赵由才,牛冬杰,柴晓利.固体废物处理与资源化[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [3] YAMAZAKI H, AOYAMA Y, KAWAGUCHI H. A system for coinincineration of municipal and industrial waste for Kashima Resource Regeneration Center[J]. Hitachi Zosen Technical Review, 2005, 66(1): 2-5.
- [4] MURPHY J D, McKEOGH E. Technical economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste[J]. Renewable Energy, 2004, 29(7): 1043-1057.
- [5] Nie Y. Development and prospects of municipal solid waste (MSW) incineration in China[J]. 环境科学与工程前沿

(英文), 2008, 2(1): 1-7.

- [6] 王雷,张运翹.垃圾焚烧电厂常用烟气净化工艺分析[J].锅炉技术,2008,39(3):73-76.
- [7] 徐宝东.烟气脱硫工艺手册[M].北京:化学工业出版社,2012.
- [8] Jannelli E, Minutillo M. Simulation of the flue gas cleaning system of an RDF incineration power plant[J]. Waste Management, 2007, 27(5): 684-690.
- [9] Strock T W, Gohara W F. Experimental approach and techniques for the evaluation of wet flue gas desulfurization scrubber fluid mechanics[J]. Chemical Engineering Science, 1994, 49(24A): 4667-4679.
- [10] 曾芳,陈力,李晓芸.湿式脱硫塔流场数值计算[J].华北电力大学学报,2002(2):106-110.
- [11] 林军,王凡,张凡,等.半干半湿法烟气脱硫塔流场分析[J].环境科学研究,2005,18(6):34-36.
- [12] 纪辛,黄碧纯,黄昕,等.垃圾焚烧烟气喷雾干燥脱酸塔流场数值模拟[J].化学工业与工程,2010,27(4):340-345.
- [13] 李双双,马晓茜,余昭胜,等.垃圾焚烧半干法脱硫塔内流场数值计算[J].能源环境保护,2013,27(5):24-29.
- [14] 杨树俊,魏玉聪, Woo Meng Wai, 等.入口旋流对均一粒径液滴喷雾干燥塔影响的数值模拟[J].化工学报,2018,69(9):3814-3824.
- [15] 李翔宇,杜健军,樊江莉,等.不同进风方式喷雾干燥过程的 CFD 模拟研究[J].现代化工,2020,40(1):202-206.
- [16] ANSYS. Inc. ANSYS 2020 R2 help manual [R/OL]. (2020). [2021-12-21] https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/main_page.html?v=202.
- [17] 朱远,许京荆,施英莹,等.基于 CFX 的雾化盘转速对分子筛喷雾干燥影响研究[J].工业控制计算机,2018,31(7):99-100.