

变负荷下空气预热器内硫酸氢铵粘结性积灰特性研究

雷健康, 赵伶玲

(东南大学 能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要:针对SCR脱硝氨逃逸造成的空气预热器堵塞问题,构建了可反映蓄热板表面飞灰碰撞、粘附与脱离特性的硫酸氢铵(ABS)粘结性积灰计算模型,并对比分析了锅炉在50%~100%最大连续蒸发量工况(BMCR)之间的6种负荷下蓄热板间烟气流速分布及ABS粘结性和松散性积灰的积灰强度、积灰概率等积灰特征量,同时对30% BMCR负荷下蓄热板表面积灰情况进行了预测。结果表明:各负荷下ABS粘结性积灰强度均为松散性积灰强度的4.8倍以上;负荷每增加10%,ABS粘结性积灰与松散性积灰强度分别增加约9.90和2.15 $\mu\text{g}/\text{mm}^2$,ABS粘结性积灰强度增加量较大;ABS粘结性积灰区域随负荷增大逐渐减小,当负荷由50%增大到100%时,积灰上限向冷端移动0.07 m;ABS粘结性积灰概率受负荷影响较小,各负荷下均为0.9,而松散性积灰概率为0.2~0.4,且随着飞灰粒径增大而降低。

关键词:回转式空预器;变负荷;硫酸氢铵;积灰模型;积灰强度;积灰概率

中图分类号:TK224.9

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2021.11.015

[引用本文格式]雷健康,赵伶玲.变负荷下空气预热器内硫酸氢铵粘结性积灰特性研究[J].热能动力工程,2021,36(11):107-113. LEI Jian-kang, ZHAO Ling-ling. Study on cohesive ash accumulation characteristics of ammonium bisulfate in air preheater under variable boiler load[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(11): 107-113.

Study on Cohesive Ash Accumulation Characteristics of Ammonium Bisulfate in Air Preheater under Variable Boiler Load

LEI Jian-kang, ZHAO Ling-ling

(Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096)

Abstract: Aiming at the problem of air preheater blockage caused by the escape of SCR denitrification ammonia, a calculation model of ammonium bisulfate (ABS) cohesive ash accumulation that can reflect the collision, adhesion and detachment characteristics of fly ash on the surface of the regenerative plate was constructed. At the boiler maximum continuous rating (BMCR) of 50% to 100%, the flue gas flow rate distribution between the regenerative plates and the ash accumulation characteristic quantity under six boiler loads, such as ash accumulation intensity and probability of ash accumulation of ABS adhesion and looseness, were analyzed contrastively. Meanwhile, the ash accumulation situation on the surface of the regenerative plate at BMCR of 30% was predicted. The results show that the ABS cohesive ash accumulation intensity is 4.8 times or more than the loose ash accumulation intensity under each load; For every 10% increase in load, the intensities of ABS cohesive ash accumulation and loose ash accumulation are increased by about 9.90 $\mu\text{g}/\text{mm}^2$ and 2.15 $\mu\text{g}/\text{mm}^2$ respectively, and the increase of ABS cohesive ash accumulation intensity is greater; The cohesive ash accumulation area of ABS gradually decreases with the increase of load. When the load increases from 50% to 100%, the upper limit of cohesive ash accumulation moves 0.07 m towards the cold end; The probability of cohesive ash accumulation of ABS is less af-

ected by the load, which remains 0.9 under each load, while the probability of loose ash accumulation is 0.2 to 0.4, which decreases with the increase of fly ash particle size.

Key words: rotary air preheater, variable load, ammonium bisulfate, ash accumulation model, ash accumulation intensity, probability of ash accumulation

引言

回转式空气预热器(简称空预器)因其结构紧凑、换热效率高^[1]等优点被广泛应用于电站锅炉中。然而,选择性还原法(SCR)脱硝过程中伴随生成的气态硫酸氢铵(ABS)会在空预器冷端(420 ~ 493 K)液化,粘结大量飞灰造成空预器堵塞^[2],且其积灰特性与空预器运行参数相关^[3]。因此,研究工况变化(如负荷变化)过程中空预器蓄热板表面ABS粘结性的积灰特性,对保证空预器安全运行具有重要意义。

国内已有学者应用实验的方法研究了ABS对飞灰颗粒的影响。马双忱等人^[4]通过XRD、XPS等实验得出ABS与飞灰发生反应,改变了飞灰的形貌;颜鲁等人^[5]通过自主搭建的试验台研究了ABS对飞灰粒径、粘附性等物理特性的影响。此外,不少学者采用数值模拟的方法研究了空预器温度分布及ABS飞灰沉积特性。闫顺林等人^[6]模拟得到某600 MW机组空预器三维温度分布情况,并得出ABS沉积危险区集中在热段和冷段交界处的结论;罗闽等人^[7]构建了液态ABS积灰的沉积模型,并对某300 MW机组空预器蓄热板ABS积灰特性进行了数值计算与分析。然而,随着电站锅炉调峰灵活性要求的提高,ABS粘结性积灰特性受锅炉负荷变化的影响尤为凸显,而该方面的研究还鲜有报道。

本文结合动网格技术和Fluent用户自定义函数(UDF),构建了可用于预测ABS粘结性积灰与蓄热板表面碰撞、粘附及脱离过程的沉积模型,同时以某600 MW机组空预器HCP型蓄热板为研究对象,详细分析了不同负荷下蓄热板表面的积灰特性。

1 计算模型与研究对象

1.1 气相模型

蓄热板间烟气的湍流流动采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,

遵循基本的守恒定律,其通用控制方程^[8]为:

$$\operatorname{div}(\rho u \phi) = \operatorname{div}(\Gamma_{\phi} \operatorname{grad} \phi) + S_{\phi} \quad (1)$$

式中: ρ —烟气密度; u —烟气流速; ϕ —通用变量; Γ , S —不同通用变量下的扩散系数和源项。

1.2 离散项模型

飞灰颗粒的运动轨迹采用Lagrange方法进行跟踪,主要考虑飞灰颗粒受到的曳力、重力和热泳力作用,其控制方程^[9]为:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_{th} \quad (2)$$

式中:下标 p —飞灰颗粒; t —时间; $F_D(u - u_p)$ —飞灰颗粒受到的曳力; g —重力加速度; F_{th} —飞灰颗粒受到的热泳力。

1.3 颗粒碰撞与沉积模型

飞灰颗粒与蓄热板表面发生碰撞时,其粘弹性采用Maxwell模型^[10]来描述,其中,松散性飞灰只考虑弹性作用,而ABS粘结性飞灰同时考虑弹性和粘性作用。

采用Brach等人^[11]建立的临界速度模型判定飞灰颗粒在蓄热板表面的沉积。当颗粒与蓄热板表面碰撞的法向速度小于临界积灰速度 v_{cr} 时,认为飞灰发生沉积,附着在蓄热板表面。临界积灰速度 v_{cr} 的表达式为:

$$\begin{cases} v_{cr} = [2K/(d_p R^2)]^{10/7} \\ K = 0.51 \left[\frac{5\pi^2(k_s + k_p)}{4\rho_p^{1.5}} \right]^{0.4} \\ k_s = (1 - \nu_s^2)/\pi E_s \\ k_p = (1 - \nu_p^2)/\pi E_p \end{cases} \quad (3)$$

式中: d_p —颗粒直径; ρ_p —颗粒密度; R —恢复系数; ν_s, ν_p —蓄热板表面和颗粒的泊松比; E_s, E_p —蓄热板表面和颗粒的弹性模量; k_s, k_p —过程量。

基于式(3),分别构建了松散性飞灰颗粒和ABS粘结性飞灰颗粒的临界积灰速度准则,各物理量取值如表1所示^[7]。

表 1 颗粒沉积模型物理量参数

Tab. 1 Physical parameters of particle deposition model

参 数	数值
颗粒平均粒径 d_p/m	4.6×10^{-5}
颗粒密度 $\rho_p/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2 600
蓄热板表面泊松比 ν_s	0.31
飞灰颗粒泊松比 ν_p	0.27
松散性积灰区蓄热板杨氏模量 E_{s1}/Pa	9×10^{10}
ABS 积灰区蓄热板杨氏模量 E_{s2}/Pa	4×10^5
飞灰颗粒杨氏模量 E_p/Pa	7.91×10^6
松散性积灰区恢复系数 R_1	0.4
ABS 积灰区恢复系数 R_2	0.9

同时,为了更好地描述积灰层的生长过程,沉积模型采用弹簧近似光滑网格技术^[12],以实现边界层网格的动态变化过程。

1.4 简化与假设

考虑到颗粒运动与沉积的复杂性和计算能力的限制,作简化与假设:不考虑烟气与空气间的交替流动,通过给定边界完成气体间换热;烟温处于 420 ~ 493 K 时,蓄热板表面产生 ABS 粘结性积灰;蓄热板表面的弹性模量及泊松比均为定值;忽略飞灰颗粒间的相互作用;忽略烟气中化学反应对飞灰沉积的影响。

1.5 物理模型及网格划分

某脱硝改造后的 600 MW 机组回转式空预器采用 HCP 型蓄热板。以一个流通单元(长、宽、高分别为 2 300,98 和 7 mm)作为计算域,模型及网格划分如图 1 所示。经网格独立性验证后,最终确定网格数量为 41.8 万。

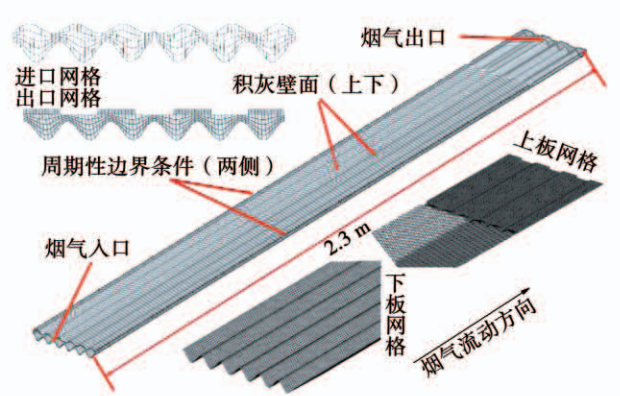


图 1 HCP 型蓄热板物理模型及网格划分

Fig. 1 Physical model and grid division of HCP type regenerative plate

1.6 工况设置

分别对 50% ~ 100% BMCR 负荷下蓄热板表面的飞灰沉积过程进行了一个旋转周期的数值模拟计算。因为回转式空预器转速为 0.75 r/min,所以旋转周期为 80 s。此外,计算所需的边界条件通过采集空预器运行数据获得,如表 2 所示。

表 2 不同负荷工况下边界条件

Tab. 2 Boundary conditions under different loads

工 况	入口烟温/K	入口烟速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	飞灰颗粒流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
50% BMCR	578	8.13	2.13×10^{-5}
60% BMCR	583	8.34	2.51×10^{-5}
70% BMCR	588	8.64	2.90×10^{-5}
80% BMCR	598	9.31	3.28×10^{-5}
90% BMCR	606	9.73	3.66×10^{-5}
100% BMCR	613	10.20	4.05×10^{-5}

2 结果与分析

2.1 模型验证

为验证烟气及飞灰颗粒在蓄热板间流动过程的准确性,建立了文献[13]中同尺寸的 DN 波纹板通道,并应用所构建的数学模型进行了模拟计算,得到了不同雷诺数 Re 下的流动阻力系数 f ,同时将计算结果与文献值[13-14]进行了对比,如图 2 所示。由该图可以看出,模拟得到的不同 Re 时的 f 值与文献实验和模拟的结果吻合较好。因此,所构建的积灰模型可以较好地模拟烟气及飞灰在蓄热板间的流动过程。

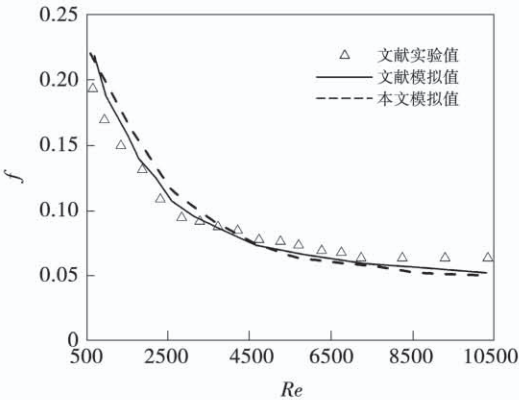


图 2 阻力系数 f 与 Re 关系

Fig. 2 Relationship between resistance coefficient f and Re

此外,当蓄热板温度处于 420 ~ 493 K 区间时,其表面产生 ABS 粘结性积灰。为了验证这一假定,构建了与文献[15]相同的物理模型进行计算,并将模拟得到的温度分布和实验值^[15]进行对比,结果列于表 3。由表 3 可知,不同长度位置处模拟温度与实验温度吻合度较好,误差均小于 5%,同时,当温度处于 420 ~ 493 K 时,ABS 液化率在 80% 以上。综上,可认为所建立的积灰模型能够很好地预测蓄热板表面的积灰过程。

表 3 温度对比及 ABS 液化率

Tab.3 Temperature comparisons and ABS liquefaction rates

长度位置/m	实验温度/K	模拟温度/K	误差/%	ABS 液化率/%
0.09	516.5	523.2	1.30	1.28
0.19	498.6	509.8	2.25	52.77
0.22	493.1	496.9	0.77	81.09
0.37	462.8	451.6	-2.42	98.30
0.46	420.2	413.6	-1.57	98.72

2.2 烟气流速分布

随着锅炉负荷的增大,燃煤量逐渐增加,烟气量也随之增加,不同负荷下空预器旋转一个周期(80 s)后沿流动方向烟气流速分布曲线如图 3 所示。由该图可知,对于不同负荷,烟气流速沿流动方向整体上呈现逐渐降低的趋势,这是由于烟气在流动过程中与蓄热板表面发生摩擦,烟气克服摩擦阻力进而产生部分能量损耗,导致流速逐渐衰减。同时,由于流体沿程阻力损失与流速的平方成正比^[16],因此烟气流速衰减量随着流速的增大而增大。锅炉负荷由 50% BMCR 增加到 100% BMCR,其烟气流速衰减量由 1.66 m/s 增加到 2.35 m/s,即负荷每增加 10%,烟气流速衰减量增加约 0.14 m/s。

通过对比图 3,当 $z = 1.3 \sim 1.5$ m 区间时,不同负荷下烟气流速均反常突增。这是由于此段蓄热板上下表面温度降低至 ABS 凝固点,ABS 粘结性积灰大幅度增加,造成蓄热板间烟气流通截面积骤减,烟气流速突增。

2.3 积灰强度分布

定义积灰强度为蓄热板单位面积上沉积的飞灰颗粒的质量(单位为 $\mu\text{g}/\text{mm}^2$),采用积灰强度来表

征蓄热板 ABS 粘结性积灰和松散性积灰的严重程度。

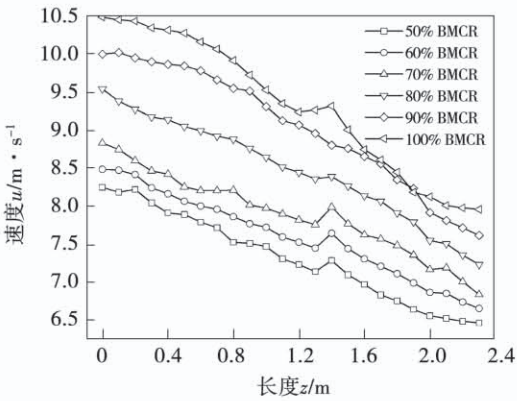


图 3 不同负荷下沿流动方向烟气流速分布

Fig.3 Flue gas velocity distribution along the flow direction under different loads

空预器旋转一个周期后,50% ~ 100% BMCR 负荷下蓄热板上、下板积灰强度分布如图 4 所示。可以看出,不同负荷下无论是蓄热板上板还是下板,松散性积灰主要集中在烟气入口区域,而 ABS 粘结性积灰则集中在烟气下游段,且 ABS 粘结性积灰强度远大于松散性积灰强度。这是由于在 $z = 1.3 \sim 1.5$ m 附近,ABS 开始液化且附着在蓄热板表面,造成壁面弹性模量降低,飞灰颗粒临界积灰速度增大,使得靠近烟气出口区域的飞灰颗粒容易沉积,进而缩小了烟气流通截面,这与 2.2 节中烟气流速反常突增相佐证。此外,在 HCP 型蓄热板的冷端,上板采用“弓字形”结构,在牺牲换热效率的情况下可有效地减轻飞灰颗粒沉积,因此蓄热板冷端上、下板积灰强度均明显小于其他区域。

随着锅炉负荷由 50% BMCR 逐渐升高到 100% BMCR,蓄热板上、下板 ABS 粘结性积灰区均逐渐向冷端移动,积灰区范围逐渐减小。这是由于空预器入口烟温随锅炉负荷增大而增大,导致 ABS 液化区不断向冷端移动。

为了更好地研究 ABS 粘结性积灰区随锅炉负荷变化的规律,分别取 ABS 粘结性积灰出现的位置和消失的位置为该区域的上限和下限,如图 5 所示。由该图可知,随着锅炉负荷逐渐升高,ABS 粘结性积灰区下限无变化,保持在距离烟气入口 2 m 处,此

处为蓄热板上板“人字形”结构与“弓字形”结构交接处;而 ABS 粘结性积灰区上限则逐渐向冷端移动,由 50% BMCR 负荷时积灰上限 $z = 1.32\text{ m}$ 移动到 100% BMCR 负荷时积灰上限 $z = 1.39\text{ m}$,即 ABS 粘结性积灰区上限向蓄热板冷端移动了 0.07 m 。

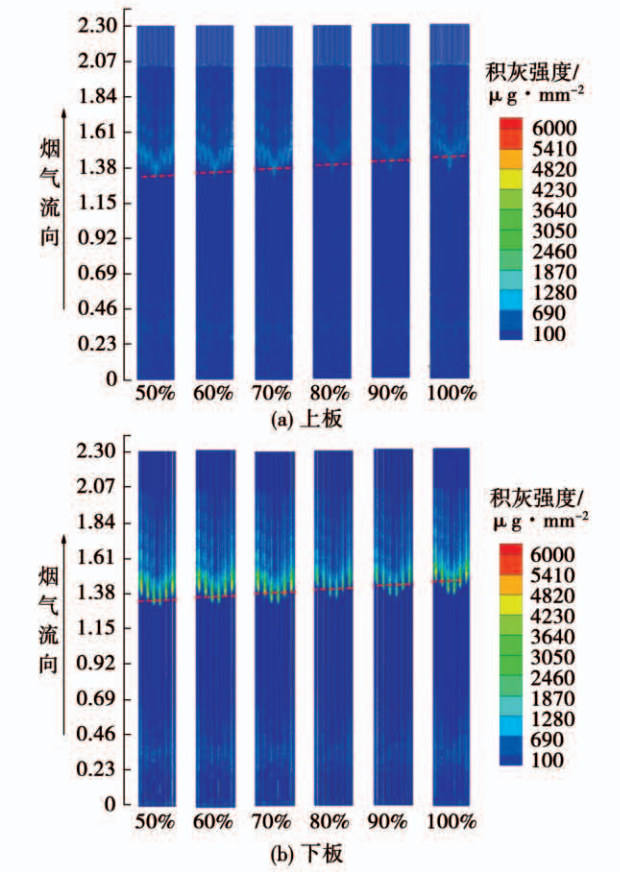


图 4 不同负荷下蓄热板上、下板积灰强度
Fig. 4 Ash accumulation intensities of upper and lower plates of regenerative plates under different loads

进一步分析了松散性积灰和 ABS 粘结性积灰的积灰特性,将不同负荷下空预器旋转一周后两类积灰的积灰强度如表 4 所示。通过对比表 4 平均积灰强度可知,对于同一负荷,ABS 粘结性积灰强度均为松散性积灰强度的 4.8 倍以上;随着锅炉负荷增大,松散性积灰强度和 ABS 粘结性积灰强度均增大,负荷平均每增加 10%,松散性积灰强度增长约 $2.15\text{ }\mu\text{g}/\text{mm}^2$,而 ABS 粘结性积灰强度增长约 $9.90\text{ }\mu\text{g}/\text{mm}^2$,其增长速度约为松散性积灰强度的 4.6 倍。因此,当空预器投入吹灰器时,冷端吹灰时长或吹灰蒸汽量应达到热端吹灰的 4.8 倍以上。同

时,若锅炉长时间高负荷运行,吹灰时长或吹灰蒸汽量也需相应增加。

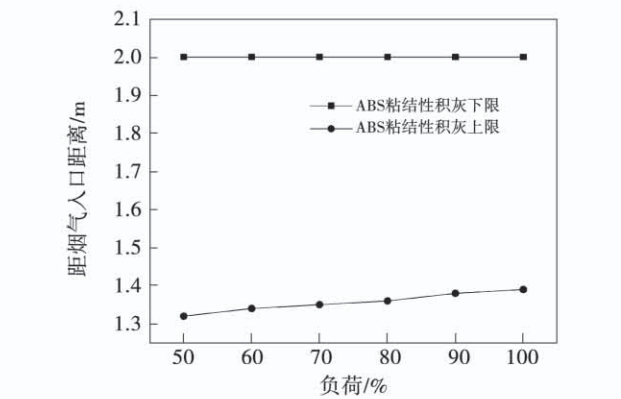


图 5 不同负荷下 ABS 粘结性积灰区上下限
Fig. 5 Upper and lower limits of ABS cohesive ash accumulation area under different loads

表 4 不同负荷下平均积灰强度对比
Tab. 4 Comparison of average ash accumulation intensities under different loads

负荷	平均积灰强度		B/A
	松散性积灰区	ABS 粘结性积灰区	
	A/ $\mu\text{g} \cdot \text{mm}^{-2}$	B/ $\mu\text{g} \cdot \text{mm}^{-2}$	
50% BMCR	110.13	535.32	4.86
60% BMCR	111.43	543.79	4.88
70% BMCR	113.11	551.26	4.87
80% BMCR	115.69	561.22	4.85
90% BMCR	118.54	578.19	4.88
100% BMCR	120.90	584.81	4.84

2.4 积灰概率分布

定义积灰概率为蓄热板某位置沉积的飞灰颗粒数量与该位置发生碰撞的飞灰颗粒数量的比值,用来表征飞灰颗粒与蓄热板发生碰撞时沉积于蓄热板表面的可能性。该值越大,说明飞灰颗粒越容易沉积。

空预器运行一周后,不同负荷下积灰概率随飞灰颗粒粒径变化关系曲线如图 6 所示。由该图可以看出,对于 ABS 粘结性积灰区,积灰概率与颗粒粒径大小、锅炉负荷无明显关系,其值保持在 0.9 附近。这是因为 ABS 积灰区内临界积灰速度处于较大水平,不同负荷下飞灰颗粒碰撞壁面的法向速度

均远小于该值,使得飞灰颗粒与蓄热板表面发生碰撞后难以脱离。

对于松散性积灰区,其积灰概率整体上远小于 ABS 粘结性积灰区,且当颗粒粒径由 $1\text{ }\mu\text{m}$ 增大到 $100\text{ }\mu\text{m}$ 时,各负荷下积灰概率逐渐从 $0.2\sim 0.4$ 降低至接近于 0。这是由于松散性积灰区内大粒径飞灰颗粒的临界积灰速度较小,颗粒法向碰撞速度小于其临界积灰速度的可能性也更小;同时,不同负荷下积灰概率也存在一定差异,这是因为松散性积灰区临界积灰速度与颗粒法向碰撞速度处于同一数量级,锅炉负荷变化引起的烟气流速变化会影响到积灰的可能性。

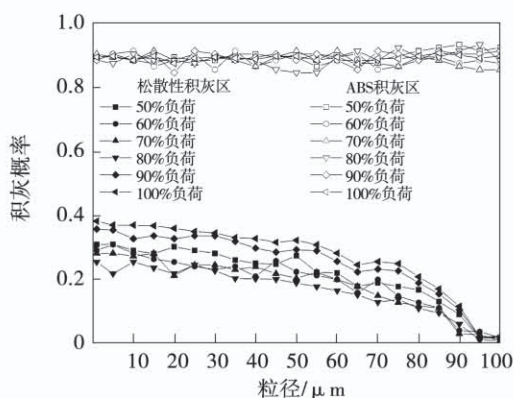


图6 不同负荷下积灰概率随粒径变化关系

Fig. 6 Variation relationship of ash accumulation probability with particle size under different loads

2.5 深度调峰积灰预测

近年来,太阳能、风能、核能等清洁能源装机容量逐年增长,由于其具有间歇性、波动性等^[17]特点,因此迫切需要火电机组实现深度调峰。深度调峰背景下,要求火电机组负荷可降低至 30% BMCR,甚至更低,此时会影响到空预器的换热性能及运行状况。

根据上述某 600 MW 机组 50% ~ 100% BMCR 负荷下空预器蓄热板积灰研究,对 30% BMCR 下空预器积灰进行预测。空预器入口烟温及入口烟速将有所降低,蓄热板换热过程中烟气温度更早达到 ABS 液化温度,导致 ABS 粘结性积灰区上限向远离冷端移动,ABS 粘结性积灰区域范围增大;空预器蓄热板表面松散性积灰强度和 ABS 粘结性积

灰强度均将有所降低,分别可降低至约 106 和 $515\text{ }\mu\text{g}/\text{mm}^2$,均约为 100% BMCR 运行时积灰强度的 88%;空预器蓄热板表面 ABS 粘结性积灰概率仍将保持在 0.9 附近,且不受飞灰颗粒粒径影响,而松散性积灰概率维持在 0.4 以下,且随飞灰颗粒粒径增大而逐渐降低。

3 结论

(1) 本文构建的积灰模型可准确地预测 HCP 型蓄热板上、下板表面的松散性积灰及 ABS 粘结性积灰过程。

(2) 50% ~ 100% BMCR 负荷区间内,负荷每增大 10%,蓄热板表面松散性积灰强度增长约 $2.15\text{ }\mu\text{g}/\text{mm}^2$,ABS 粘结性积灰强度增长约 $9.90\text{ }\mu\text{g}/\text{mm}^2$,且各负荷下 ABS 粘结性积灰强度均为松散性积灰强度的 4.8 倍以上。

(3) ABS 粘结性积灰概率与锅炉负荷及飞灰颗粒粒径无明显关系,保持在 0.9 附近;松散性积灰概率随颗粒粒径 ($0.2\sim 0.4$) 的增大逐渐降低至 0.02。

(4) 30% BMCR 负荷时,ABS 粘结性积灰概率仍将保持在 0.9 附近,而积灰强度约为 100% BMCR 负荷运行时的 88%。

参考文献:

- [1] 王 谦,王恩禄,毛明江,等. 回转式空气预热器传热元件阻力特性试验研究[J]. 锅炉技术,2011,42(6):10-12,17.
WANG Qian, WANG En-lu, MAO Ming-jiang, et al. Experimental research on friction characteristics of heat transfer elements in rotary air preheater[J]. Boiler Technology, 2011, 42(6):10-12, 17.
- [2] 刘建民,陈国庆,黄启龙,等. 燃煤脱硝机组空气预热器蓄热片表面飞灰沉积粘结机理研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(S1):132-139.
LIU Jian-min, CHEN Guo-qing, HUANG Qi-long, et al. Study on mechanism of fly ash deposition and hardening on the air preheater regenerative piece surface of the coal-fired and denitration unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(S1):132-139.
- [3] 陈 衡,王云刚,赵钦新,等. 燃煤锅炉低温受热面积灰特性实验研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(S1):118-124.
CHEN Heng, WANG Yun-gang, ZHAO Qin-xin, et al. Experimental investigation of ash deposition on low temperature heating surfaces in a coal-fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35

- (S1):118-124.
- [4] 马双忱,邓悦,吴文龙,等. SCR 脱硝副产物硫酸氢铵与空预器中飞灰反应特性[J]. 环境工程学报,2016,10(11):6563-6570.
- MA Shuang-chen, DENG Yue, WU Wen-long, et al. Reaction characteristic of by-product ammonium bisulfate from SCR denitrification and fly ash in air preheater[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(11): 6563-6570.
- [5] 颜鲁,李秀财,孙奉仲,等. SCR 脱硝伴生硫酸氢铵对飞灰颗粒特性影响的实验研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(10):2987-2994.
- YAN Lu, LI Xiu-cai, SUN Feng-zhong, et al. Experimental study on the effect of ammonium bisulfate on particle characteristics of fly ash during the SCR denitrification process[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 2987-2994.
- [6] 闫顺林,曹保鑫. 回转式空气预热器温度场三维数值模拟[J]. 热力发电,2020,49(4):51-57.
- YAN Shun-lin, CAO Bao-xin. Three-dimensional numerical simulation on temperature field in rotary air preheater[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(4): 51-57.
- [7] 罗闽,赵伶玲,李偲宇. 空气预热器硫酸氢铵积灰的数值研究[J]. 动力工程学报,2016,36(11):883-888.
- LUO Min, ZHAO Ling-ling, LI Si-yu. Numerical simulation of ash deposition with adhesion of NH_4HSO_4 in an air preheater[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(11): 883-888.
- [8] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第2版. 西安:西安交通大学出版社,2001.
- TAO Wen-quan. Numerical heat transfer (2nd edition) [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
- [9] 李金波,王沛丽,程林. 一种新型受热面飞灰颗粒的沉积特性[J]. 化工学报,2016,67(9):3598-3606.
- LI Jin-bo, WANG Pei-li, CHENG Lin. Characteristics of ash deposition on a novel heat transfer surface[J]. CIESC Journal, 2016, 67(9): 3598-3606.
- [10] CROWE C T. Multiphase flows with droplets and particles[M]. USA: CRC Press, 1998: 50-55.
- [11] BRACH R M, DUNN P F. A mathematical model of the impact and adhesion of microspheres[J]. Aerosol Sciences & Technology, 1992, 16(1): 51-64.
- [12] 袁宝强,赵哲华,王湛,等. 基于动网格的飞灰沉积特性数值模拟[J]. 工程热物理学报,2019,40(6):1332-1337.
- YUAN Bao-qiang, ZHAO Zhe-hua, WANG Zhan, et al. CFD analysis of ash deposition performance based on dynamics mesh[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(6): 1332-1337.
- [13] 张磊,杜娟,白文刚,等. 复合式波纹板传热与阻力特性数值研究[J]. 热力发电,2019,48(5):44-48.
- ZHANG Lei, DU Juan, BAI Wen-gang, et al. Numerical investigation on heat transfer and resistance characteristics of composite corrugated plate[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(5): 44-48.
- [14] 张磊,聂鹏,刘文娟,等. 复合式波纹板传热与阻力特性单吹瞬态实验研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(22):6675-6680,6780.
- ZHANG Lei, NIE Peng, LIU Wen-juan, et al. Single-blow transient test on the thermal-hydraulic performance of the composite corrugated plate[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6675-6680, 6780.
- [15] MENASHA J, DUNN R D, MUZIO L, et al. Ammonium bisulfate formation temperature in a bench-scale single-channel air preheater[J]. Fuel, 2011, 90(7): 2445-2453.
- [16] 刘明. 流量系统中阻力损失的分析与计算[J]. 工业计量, 2017, 27(1): 62-63, 74.
- LIU Ming. Analysis and calculation of resistance loss in flow system[J]. Industrial Metrology, 2017, 27(1): 62-63, 74.
- [17] 付旭晨,郭洋,于英利,等. 300 MW 等级锅炉变工况低负荷稳燃能力数值模拟与预测[J]. 热能动力工程,2020,35(5):112-118.
- FU Xu-chen, GUO Yang, YU Ying-li, et al. Numerical simulation and prediction on low load stable combustion of 300 MW grade unit boiler at off-design condition[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(5): 112-118.

(丛敏编辑)