中低温烟气换热器气侧积灰、磨损及腐蚀的研究

何雅玲*, 汤松臻, 王飞龙, 赵钦新, 陶文铨

西安交通大学, 热流科学与工程教育部重点实验室, 西安 710049

* 联系人, E-mail: yalinghe@mail.xjtu.edu.cn

2016-02-22 收稿, 2016-03-10 修回, 2016-03-11 接受, 2016-05-10 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2013CB228304)资助

摘要 工业烟气具有含灰量大、含黏性物质及含腐蚀性气体多的特点, 易造成烟气换热器换热表面积灰、磨损和腐蚀等一系列严重问题, 是余热回收领域目前亟待解决的研究课题. 本文对中低温余热回收所用的管排式烟气换热器的积灰、磨损及腐蚀特性等方面的研究进行了总结和回顾, 分析了换热器换热表面积灰、磨损及腐蚀的形成原因及影响因素, 同时介绍了近年来作者团队在换热表面飞灰颗粒沉积、磨损及腐蚀特性方面开展的有关研究成果. 首先, 对现有的和前期作者团队建立的颗粒碰撞沉积模型进行了简要回顾, 并以前期团队开展的工作为例, 具体介绍了管排式烟气换热器的积灰特性及其影响因素, 并给出了能有效减轻积灰的椭圆管换热器设计; 接着, 介绍了气固两相绕流换热管的流动和磨损特性, 以及烟气参数对磨损特性的影响规律; 随后, 介绍了一种预测换热器表面酸蒸气凝结的耦合计算方法, 说明了运行参数和几何参数对换热器局部腐蚀特性的影响规律, 并给出了相应条件下的H型翅片管换热器的酸传质计算关联式; 同时, 介绍了团队前期提出的在线检测和实验室低温腐蚀装置, 说明了不同材料的抗腐蚀特性及换热面积灰与酸的耦合作用机理. 最后, 对中低温烟气换热器积灰、磨损及腐蚀特性的研究前景进行了展望.

关键词 工业余热, 烟气换热器, 积灰特性, 磨损特性, 腐蚀特性

提高能源利用效率, 发展节能减排技术是实现我国经济和社会可持续发展的重要途径. 据统计, 在我国, 工业能耗占全国能耗总量的70%以上, 其中约60%转化为不同温度的余热, 而可以回收利用的余热约占余热总量的60%. 在可回收余热资源中, 烟气和各种高温过程中的气体占了很大比重, 同时也是余热中较容易回收的部分. 因此, 烟气的余热回收对于节省化石能源消耗, 提高能源利用效率具有重大意义^[1].

换热设备在烟气余热的回收利用中起着重要作用, 但由于其应用环境多样, 气体侧的换热介质常是含灰、含黏性物质及含腐蚀性气体的烟气, 因此换热器表面易产生积灰、磨损和腐蚀等一系列问题, 不仅

影响设备的换热性能, 也影响系统的稳定运行^[1]. 从我国电站锅炉事故的调查报告中可以发现, 由积灰、磨损、腐蚀引起的“四管”(水冷壁管、过热器管、再热器管、省煤器管)爆漏事故占有电厂炉管爆管事故的50%左右^[2]. 因此, 认识含灰、含酸性气体在换热器换热表面的沉积、磨损和腐蚀机理, 研究换热面的积灰、磨损及腐蚀特性与规律, 进而最大限度地发挥设备的作用和避免意外事故的发生, 对节能减排工作及经济社会的可持续发展是一项十分重要而紧迫的任务.

本文对中低温烟气换热器在余热回收中的积灰、磨损及腐蚀方面相关研究进行了回顾, 同时介绍了作者团队近年来针对含灰、含酸性气体在烟气换热器

引用格式: 何雅玲, 汤松臻, 王飞龙, 等. 中低温烟气换热器气侧积灰、磨损及腐蚀的研究. 科学通报, 2016, 61: 1858–1876

He Y L, Tang S Z, Wang F L, et al. Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchanger for middle and low temperature flue gas waste heat recovery (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1858–1876, doi: 10.1360/N972016-00248

换热表面上的积灰、磨损和腐蚀方面所开展的研究工作. 希望对解决防积灰、防磨、防腐烟气换热器的设计难题, 推动中低温烟气余热高效利用相关技术发展起到积极作用.

1 积灰特性研究

在烟气换热器回收余热的使用过程中, 由于燃料燃烧不完全、挥发相凝结和团聚等因素的作用, 烟气中含有一定浓度的飞灰颗粒. 在烟气流动过程中, 飞灰颗粒易在换热设备的换热面上积聚, 从而形成具有一定形态的积灰层.

在各种涉及从烟气中回收余热的场合, 例如燃煤电站、垃圾焚烧电站、玻璃熔炉、水泥窑等都普遍存在换热器的积灰问题. 换热表面积灰会导致换热器设计换热面积增大、锅炉效率降低等问题, 增加了烟气换热器设计的难度. 目前烟气换热器的设计一般采用灰污系数法, 但由于灰污系数的取值具有较大的不确定性, 因而该方法的应用具有一定的局限性^[3,4]. 所以, 研究飞灰颗粒在烟气换热器换热表面上的沉积特性及其对换热性能的影响具有重要意义.

本节结合作者团队的研究工作, 总结了烟气换热器中飞灰颗粒的沉积机理, 同时介绍了飞灰颗粒在换热器表面碰撞沉积过程的研究结果以及所提出的可有效减轻积灰的错排椭圆管换热器.

1.1 积灰机理分析

鉴于实验研究和经验方法的不足, 部分学者对积灰的形成机理开展了理论研究, 获得了一定的认识. 烟气中飞灰随烟气运动并在设备的换热面上沉积, 最终以积灰或结渣的形式存在. 其中, 积灰是指烟气中温度低于灰熔点的飞灰颗粒在换热面的沉积, 主要发生在对流换热面上; 而结渣是指烟气中熔化和半熔化状态的飞灰颗粒在换热面的黏附、积聚的过程, 一般发生在辐射换热面上. 这里我们主要针对对流换热面上的积灰. 以燃煤过程中的积灰形成为例, 换热面积灰过程主要包括飞灰形成、飞灰运输、飞灰黏附及生长. 图1为文献[5]描述的积灰形成过程示意图.

(i) 飞灰形成. 煤是由无机物和有机物组成的复杂混合物, 在燃烧时经历复杂的物理化学变化后, 分别以气相、液相和固相的形式随烟气进入烟道.

(ii) 飞灰运输. 飞灰颗粒向换热面的运输主要可分为^[6]: 惯性碰撞、热泳扩散、挥发相凝结等. 在积灰的初始阶段, 积灰层与烟气的温度梯度较大, 热泳力影响较大. 挥发相凝结在积灰初期的影响也十分显著. 研究表明, 惯性碰撞是积灰形成的主要原因^[7]. 通常认为, 大颗粒具有较大的惯性, 能够穿过边界层, 直接和换热表面发生碰撞; 较小颗粒主要在热泳力或者湍流的作用下运动到换热表面; 对于更

图1 煤燃烧过程中积灰形成示意图^[5]

Figure 1 Schematic diagram of deposit formation during coal combustion^[5]

小的颗粒,则主要在布朗运动和分子扩散作用下穿过边界层,到达换热面^[8].

(iii) 飞灰黏附及生长. 当飞灰颗粒运动到换热面时,并不是所有的颗粒都会在换热设备表面发生沉积,部分颗粒在与换热面接触后,直接发生反弹;当烟气流速较大时,部分已经沉积的灰粒也可能在气流的作用下脱离换热表面再次进入烟气. 飞灰颗粒能否在换热表面黏附和生长取决于飞灰和积灰层表面的物理性质、颗粒和流体的运动状态等.

不同于高温条件下的黏结性积灰,中低温条件下(工业余热回收中多数场合烟气温度低于500~600℃),换热面的积灰一般为松散性积灰^[9],且主要发生在换热管背部,并形成楔形积灰^[2,10]. 影响颗粒沉积的因素众多(如颗粒受力、颗粒尺寸、表面弹性条件、壁面材料及粗糙度等),颗粒在换热表面的沉积机理十分复杂,是目前研究中的一个重点.

已有大量学者对颗粒沉积模型开展了研究,Rogers和Reed^[11]基于两体碰撞过程的能量守恒,提出了用于描述颗粒和壁面发生弹-塑性碰撞时的沉积模型. 同时Brach和Dunn^[12]基于碰撞动力学和Hertz接触理论提出了一种判断颗粒黏附的半经验模型,但当恢复系数为常数时,颗粒黏附与颗粒碰撞速度无关.Thornton和Ning^[13]针对理想弹、塑性球体的法向碰撞,提出了碰撞恢复系数的分析解. 但是由于大量的研究主要集中在颗粒与壁面的法向碰撞方面,而对于倾斜碰撞的研究相对较少. 故Konstandopoulos^[14]针对颗粒倾斜碰撞引入了临界碰撞角的判据,当入射颗粒的角度超出临界碰撞角的范围,不论颗粒的法向速度多大,均不会发生颗粒沉积.

作者团队基于两体碰撞模型,并结合临界碰撞角判据和颗粒与积灰层的弹塑性碰撞判据,在前期完善了飞灰颗粒在流体中的跟随运动以及颗粒和换热器表面碰撞沉积的数学模型,详细可参见文献[1,15].

1.2 积灰特性计算研究

本节主要针对中低温条件下烟气换热器表面的松散型积灰,以团队前期开展的工作为例,介绍了余热回收场合典型的烟气换热器的积灰特性,以及颗粒直径、流速、管束横/纵向节距、管子几何形状和布置方式等因素对换热器积灰特性的影响.

部分学者将颗粒沉积模型和计算流体动力学相

结合,用于实际换热设备表面积灰特性的预测. 如Li等人^[16]利用分离涡模拟(DES)方法模拟了不同涡结构、颗粒直径、流速等对飞灰颗粒沉积特性的影响. 同时对燃煤锅炉结渣层的生长过程进行数值预测^[17]. Bouris等人^[18]数值研究了褐煤燃烧锅炉中管排换热器表面的积灰,分析了顺排圆管、顺排椭圆管及非对称管排圆管等3种布置形式对积灰特性的影响,且提出一种液滴形截面的换热管来抑制积灰^[19]. Paz等人^[20]对柴油机排气系统的颗粒沉积过程进行模拟,考虑布朗扩散、湍流扩散、热泳、黏附及剥离等因素,得到飞灰颗粒在换热管表面的沉积层厚度的增长规律.

作者团队综合了颗粒弹/塑性碰撞和倾斜碰撞模型,对飞灰颗粒在烟气换热器换热表面的碰撞、沉积、反弹等过程进行了建模和数值计算;同时分析了换热器结构参数和运行参数对积灰特性的影响规律;进而设计了能够有效抑制积灰的错排椭圆管换热器结构,由于篇幅所限,具体的数值模型和计算方法这里不再赘述,详见文献[1,15],部分计算结果介绍如下.

在来流速度为5 m/s,横/纵向节距为2倍换热管直径 D 时,分析了圆管顺排布置换热管表面的积灰分布情况^[15],参见图2所示. 图2为顺排圆管表面的沉积率分布图,可以看出:(1)在迎风侧,颗粒沉积主要集中在迎风侧与管子呈20°~60°角之间,此处正好对应前排管脱落的尾涡在后排管壁的再附着区,沉积最大值出现在迎风侧与管子呈30°~40°,该结论与文献[20]中分析一致;(2)在背风侧,在管子正后方1/3管周存在明显的颗粒沉积;在背风侧沉积区域,

图2 (网络版彩色)顺排布置圆管圆周的沉积率分布^[15]. $u=5$ m/s, $d_p=5$ μ m

Figure 2 (Color online) Deposition rate distribution of aligned circular tube^[15]. $u=5$ m/s, $d_p=5$ μ m

沉积最大值出现在管子背风侧 180° 处附近, 这一结论与文献[18]一致。

尽管许多学者在换热器积灰特性的数值预测方面取得一定的进展, 但烟气换热器的结构及运行参数对积灰以及换热性能影响的定量分析目前所见不多。为此, 我们进一步数值分析了颗粒直径、流速、

换热管束横/纵向节距等对管排换热表面沉积特性的影响, 发现增大横向节距、减小纵向节距能够有效减少颗粒的沉积, 而椭圆管正好满足此要求, 进而分析了顺排、错排椭圆管管排表面的积灰特性^[1,15], 计算结果介绍如下。

图3给出了颗粒直径 d_p 、流速 u 、横向节距 S_1 及纵

图3 (网络版彩色)不同参数对换热性能和沉积率的影响^[15]。(a), (b) 颗粒直径和流速对沉积率的影响; (c), (d) 纵向节距对换热阻力性能和沉积率的影响; (e), (f) 横向节距对换热阻力性能和沉积率的影响

Figure 3 (Color online) Effects of different parameters^[15]. (a), (b) Particle diameter and velocity versus deposit ratio; (c), (d) longitudinal tube pitch versus heat transfer, hydrodynamics performance and deposit ratio; (e), (f) spanwise tube pitch versus heat transfer, hydrodynamics performance and deposit ratio

向节距 S_2 对圆管顺排布置换热器的换热阻力特性及积灰特性的影响图. 其中, 图3(a)为不同颗粒粒径下各管排换热表面的颗粒沉积率情况, 由图3(a)可知, 在所研究的颗粒粒径范围内, 随着粒径增大, 沉积率先略微增加, 而后迅速下降. 这是由于当粒径较小时, 颗粒随动性较好, 很难直接在表面沉积; 随着颗粒直径的增大, 颗粒碰撞壁面的动能更大, 相对容易达到壁面, 形成沉积; 进一步增大颗粒直径, 颗粒的碰撞动能增加, 更容易在碰触壁面后反弹, 脱离壁面, 因此沉积率下降, 另外大颗粒惯性更大, 不容易受流体的影响, 不太可能被卷入尾涡区, 因此在管后部的沉积相对较少, 而只有少数颗粒在管前部的流动滞止区沉积.

图3(b)为不同粒径条件下换热器总沉积率随流速的变化情况. 由图3(b)可知, 对大颗粒, 随着流速的增加, 换热表面总沉积率迅速下降. 对小颗粒, 增加流速后颗粒的沉积率反而有所上升.

图3(c)和(d)分别为在横向节距 S_1 一定时, 纵向节距 S_2 对 Nu 数、压降 Δp 、换热器单位迎风面积下的换热量 ΦA_f^{-1} 、单位体积下的换热量 ΦV^{-1} 和单位泵功的换热量 ΦP^{-1} 等换热阻力性能和颗粒沉积率的影响. 由图3(c)和(d)可知, 增加纵向节距会使 Nu 数以及单位迎风面积下的换热量明显增加, 但同时也会导致沉积率的增加并降低换热器的结构紧凑性. 综合考虑结构和换热性能, 推荐纵向节距值为2倍管径.

图3(e), (f)分别为在纵向节距 S_2 一定时, 横向节距 S_1 对换热阻力性能和颗粒沉积率的影响. 由图3(e), (f)可知, 增加横向节距, 降低了流体在横向管间的流速, 导致了压降迅速下降, 单位泵功的换热量升高, 小颗粒的沉积率均明显下降, 而大颗粒的沉积率变化不大.

综合图3计算结果可以发现, 通过抑制尾涡、减少流动滞止区、增加横向节距和减小纵向节距等方法可以有效减少积灰. 因此, 我们提出椭圆管管型并对其换热管顺、错排布置方式等对换热器表面积灰特性的影响展开了进一步的研究.

图4为顺排椭圆管布置换热管表面的积灰分布情况^[15]. 与图2对比可以看出: (1) 当采用椭圆管布置时, 颗粒沉积不同于圆管, 而主要集中在管子前部相对来流呈 30° 角的管子两侧; (2) 由于椭圆管的尾涡区更为狭长, 而前排管子的尾迹区未充分发展便发生再附着, 显著减小了颗粒卷入管后尾迹区的可能性, 故管子正

图4 (网络版彩色)顺排椭圆管圆周的沉积率分布^[15]. $u=5$ m/s, $d_p=5$ μ m

Figure 4 (Color online) Deposition rate distribution of aligned oval tube^[15]. $u=5$ m/s, $d_p=5$ μ m

后方仅有少量的颗粒沉积.

图5为不同管型(圆型与椭圆型)及管排布置(顺排与错排)时的涡量场和颗粒场分布图. 其中, 图5(a)和(b)分别为圆管顺排和圆管错排布置时的涡量和颗粒场分布图, 可以看出采用错排布置时, 其尾涡相对稳定, 颗粒场分布较为均匀, 仅少量颗粒能够进入尾涡, 大部分颗粒在管前冲刷壁面. 图5(c)为椭圆管顺排布

图5 (网络版彩色)不同管型和管排布置的涡量和颗粒场分布图^[15].

(a) 圆管顺排; (b) 圆管错排; (c) 椭圆管顺排; (d) 椭圆管错排. $u=5$ m/s, $d_p=5$ μ m

Figure 5 (Color online) Vorticity and particle field distribution^[15]. (a) Aligned circular tube; (b) staggered circular tube; (c) aligned elliptical tube; (d) staggered elliptical tube. $u=5$ m/s, $d_p=5$ μ m

置时的涡量和颗粒场分布图,可以看出,由于椭圆管迎风面积较小,管后的尾涡区更为狭长,而对主流的影响相对较小.当采用椭圆管时,大部分颗粒直接被主流带走,不与壁面发生作用.图5(d)为椭圆管错排布置时的涡量场和颗粒场分布图,可以看出,其尾迹区的特点与圆管错排情况类似,均表现出相对稳定的流动状态,只是尾迹区更为细长,尾迹区更小.颗粒场的分布特点与圆管错排类似.

图6为圆管顺排、圆管错排、椭圆管顺排、椭圆管错排4种不同管型及管排布置方式下,颗粒在各排管表面的沉积率对比情况.由图6可知,采用椭圆管,尤其是错排椭圆管布置可以有效降低换热管表面的沉积率,相比同样的圆管布置,沉积率降低约68.8%,这主要由于椭圆管具有更小的迎风面积,流线型的管型及较小漩涡分离区,且错排布置能够增强气流对沉积颗粒的冲刷作用,进而显著减少颗粒沉积^[19,21].

2 磨损特性研究

由于能源成本、煤种等多方面的限制,我国大部分电站以煤作为燃料,煤中灰分含量较大,煤粉燃烧后生成烟气中具有大量的飞灰颗粒,飞灰在换热表面沉积的同时,也对换热表面产生频繁撞击,逐渐使换热管管壁变薄,即飞灰颗粒对换热面管束造成了磨损.

磨损、腐蚀引起的换热管破裂是导致燃煤锅炉停机的主要原因,由换热管破裂引起的停机时间占锅炉总停机时间的50%~75%,且对破损换热管的维护成本

图6 (网络版彩色)管型及布置形式对沉积率的影响^[15]. $u=5$ m/s, $d_p=5$ μ m

Figure 6 (Color online) Effects of tube geometries and arrangements on deposit ratios^[15]. $u=5$ m/s, $d_p=5$ μ m

高达总生产成本的54%^[22].因此,研究换热面磨损特性,提出合理的防磨措施对于烟气换热器的安全运行显得至关重要.

此节总结了烟气换热器中飞灰颗粒的磨损机理及文献中已有的计算模型,同时结合作者团队的研究工作,介绍了飞灰颗粒在换热器表面碰撞并造成磨损的研究结果.

2.1 磨损机理分析

含有硬颗粒的流体相对固体表面运动时,对固体表面产生的磨损称为冲击磨损.根据颗粒撞击固体表面的碰撞角度不同,冲击磨损可分为冲刷磨损和撞击磨损两种基本的类型^[2].一般工业余热回收场合烟气换热器内飞灰冲刷换热表面和管子造成的磨损是冲刷磨损和撞击磨损共同作用的结果.

磨损是碰撞颗粒与靶金属的交互作用,故磨损主要取决于碰撞颗粒与靶金属的物理状态^[23],影响磨损程度的主要因素有:碰撞速度、碰撞角度、颗粒浓度、颗粒尺寸、颗粒形状、机械性质及靶金属温度等.这些因素对磨损的影响通常不是孤立的,而是综合表现出来的.对于实际烟气颗粒在换热表面的磨损过程,飞灰颗粒对靶金属的冲击速度及冲击角对磨损的影响尤为重要,介绍如下.

冲击速度的影响:当冲击速度小于临界冲击速度时,只发生弹性碰撞,几乎没有磨损;当冲击速度大于临界冲击速度时,磨损速率与冲击速度的 n 次方成正比,通常 $n=3.3\sim 4.0$ ^[24,25].

冲击角度的影响:对于典型塑性材料,最大磨损速率通常出现在低冲击角($15^\circ\sim 30^\circ$)附近;对于典型脆性材料,则出现在正向冲击角 90° 附近;对于其他材料,一般介于两者之间^[25,26].

许多研究者从实验和理论方面对磨损过程进行了研究,提出了多种磨损预测模型^[27~34].不同的模型基于特定的环境,包含不同的参数.典型的磨损模型总结汇总于表1中,具体参数详见相关文献.

由于Tabakoff半经验模型^[30]对于飞灰颗粒的磨损量具有较好的预测能力并已得到广泛的应用^[35,36],故作者团队在研究换热器换热表面的磨损计算^[37]时,采用Tabakoff半经验公式^[30].

2.2 磨损特性计算研究

对于烟气换热器内飞灰颗粒在换热表面上磨损

表1 磨损模型对比

Table 1 Summary of different erosion models

文献	数学模型及主要参数	模型介绍	优缺点
Finnie ^[27]	$V = K \frac{mv^2}{p} f(\alpha)$ $f(\alpha) = \begin{cases} \sin 2\alpha - 3\sin^2 \alpha, & \alpha \leq 18.5^\circ \\ \cos^2 \alpha / 3, & \alpha > 18.5^\circ \end{cases}$	该模型是很早根据磨损的实验现象和各种结果描述磨损微切削机理的模型。模型假设颗粒在切削金属的过程中不发生碎裂,认为固体颗粒对韧性材料的磨损主要源自颗粒对材料的犁削作用	此磨损模型对于韧性材料在冲击角度是小角度($\alpha < 45^\circ$)时,与实验结果吻合较好,但当冲击角度较大时,该模型与实验偏差较大,尤其 $\alpha = 90^\circ$ 时,该模型的磨损量为0
Hashish ^[28]	$W = \frac{7}{\pi} \frac{m}{\rho_p} \left(\frac{v}{C} \right)^{2.5} \sin(2\alpha) \sqrt{\sin \alpha}$ $C = \sqrt{\frac{3\sigma_f R_f^{3/5}}{\rho_p}}$	该模型对Finnie模型进行了修改,改进了其中的速度指数并加入了粒子形状的影响	该模型中不需要实验常数,所以使用较方便。然而该模型主要基于韧性材料,因而主要适用于韧性材料低冲击角的磨损情况
Mbabazi等人 ^[29]	$E = \frac{0.47z^{4.95} \rho_m \rho_p^{1/2} V 3 \sin^3 \beta}{\sigma_y^{3/2}}$	该模型综合考虑了颗粒和金属表面的性质、颗粒的运动特性	该模型计算简便,但主要适用于特定材料(低碳钢)
Tabakoff等人 ^[30]	$E = K_1 \left\{ 1 + C_K \left[K_2 \sin \left(\frac{90}{\beta_0} \beta_1 \right) \right] \right\}^2$ $+ V_1^2 \cos^2 \beta_1 (1 - R_1^2)$ $+ K_3 (V_1 \sin \beta_1)^4$	该模型是通过煤灰颗粒磨损金属材料进行了大量的实验研究,回归总结出煤灰碰撞管壁磨损率的计算公式	此模型已被Schade等人 ^[40] 用于预测燃煤电站锅炉磨损速率,与实验结果十分吻合。但含碳量不同时机械性能差别较大。此模型反应不出碳钢含碳量不同时磨损量的差异
The Erosion/Corrosion Research Center (E/CRC) ^[31]	$ER = C(BH)^{-0.59} F_s V_p^n F(\theta)$ $F(\theta) = \sum_{i=1}^5 A_i \theta^i$	该模型源于实验数据,主要针对碳钢和铝材料。该模型引入了包含目标材料的机械特性的变量-布氏硬度	此模型是在高速撞击条件下获得的,对于低速撞击的工况不具有普遍适用性。且没有明确考虑颗粒大小的影响
Oka等人 ^[32,33]	$E(\alpha) = g(\alpha) E_{90}$ $g(\alpha) = (\sin \alpha)^{n_1} (1 + H\nu(1 - \sin \alpha))^{n_2}$ $E_{90} = K(H\nu)^{k_1} \left[\frac{v}{v'} \right]^{k_2} \left[\frac{d}{d'} \right]^{k_3}$	该模型以大量的磨损实验为基础,综合考虑颗粒的碰撞速度、碰撞角度、目标材料的硬度、颗粒粒径和几种颗粒类型等主要影响因素	适用于任何材料,任意撞击角度和撞击速度。但没有明确考虑颗粒的形状
Lee等人 ^[34]	$E = \sum_{j=1}^2 K_j C_{\beta_j} f(\beta_j) V^{n_j} g(d_p) h(T_h) \omega_j$	该模型从撞击速度、粒子尺寸、粒子形状、粒子的力学特性、飞灰浓度、被撞击材料的温度和省煤器结构等方面进行考虑	该模型包含有重要的磨损参数,但磨损常数的确定需要进行大量的试验获得

特性的分析,部分学者利用数值方法对换热设备表面的磨损特性进行了研究。Fan等人^[38]基于已有磨损模型,提出新型翅片管防磨技术,利用碰撞反弹和侵蚀模型预测颗粒反弹现象及磨损损伤,同时探讨了翅片相对长度、主流速度、粒径对碰撞频率与磨损程度的影响。Lee等人^[23]采用拉格朗日方法模拟飞灰颗粒的磨损过程,发现磨损速率是飞灰颗粒组分、浓度、尺寸和形状分布的强函数,且磨损速率正比于碰撞速度的2.2~2.8次方。Wang等人^[39]数值模拟了烟气横掠顺列螺旋槽管束的磨损问题,分析了烟气流速、粒径、横/纵向节距等参数对螺旋槽管磨损的影响。

作者团队^[37]采用对飞灰冲击磨损量具有较好的预测能力的Tabakoff半经验模型^[30],对飞灰颗粒在换热器表面的磨损过程进行了数值计算,并分析了烟

气换热器内飞灰颗粒冲击速度、冲击角度及颗粒直径等对磨损特性的影响规律。

图7为不同尺寸颗粒在换热管表面的碰撞轨迹图。由图7可以看出,随着粒径的增加,颗粒的惯性随之增大,使得撞击壁面的颗粒数增加,反弹现象也更为显著。

图8为颗粒直径 d_p 、颗粒流量 q_m 和雷诺数 Re 对管壁磨损深度 P 的影响。从图8可以看出,(1)随着颗粒粒径的增大,颗粒的动能增加,磨损程度加剧;继续增大粒径,磨损程度基本不变,主要由于在恒定颗粒流量时,增大粒径,颗粒数目减少,碰撞次数减少,磨损程度减弱;(2)随着颗粒流量和雷诺数的增加,颗粒对管表面的磨损深度逐渐增加,而最大磨损位置几乎不变,在 32° 左右,这一结论与文献[41]中的结论一致。

图7 不同尺寸颗粒的碰撞轨迹^[37]. (a) $d_p=0.01$ mm; (b) $d_p=0.03$ mm; (c) $d_p=0.05$ mm; (d) $d_p=0.08$ mm; (e) $d_p=0.1$ mm

Figure 7 Typical particle trajectories for different size particles around single row tube^[37]. (a) $d_p=0.01$ mm; (b) $d_p=0.03$ mm; (c) $d_p=0.05$ mm; (d) $d_p=0.08$ mm; (e) $d_p=0.1$ mm

图9为不同时刻圆管表面在颗粒冲刷下的磨损变形结果(其中外轮廓为换热管变形形貌). 由图9可以看出, 随着时间推移, 管表面变形加剧.

图10为雷诺数对最大磨损深度 $P_{\max}$ 的影响. 由图10可以得出, 最大磨损深度正比于雷诺数的3.62次方, 符合Fan等人^[25]提出的磨损量正比于流速的指数区间. 可知流速是影响磨损的关键参数, 同时也是影响流动、换热及积灰的重要参数^[42,43], 因此需综合考虑磨损、积灰和传热三方面的因素来合理选择流速.

3 低温腐蚀特性研究

在使用烟气换热器回收烟气余热的过程中, 当换热设备表面温度低于烟气的露点温度时, 烟气中硫酸和水蒸气将在换热表面凝结, 换热面发生低温腐蚀, 这不仅会减少换热面的使用寿命, 严重威胁设备的安全经济运行, 而且还会因其表面粗糙不平使飞灰更易于发生黏结, 进一步加剧低温段换热面的积灰和腐蚀^[1]. 因此, 如何减轻或避免换热表面的低温腐蚀已成为深度回收余热资源领域的一个迫切需要解决的问题.

传统研究金属低温腐蚀特性的方法有挂片实验和浸泡加速实验等方法. 挂片实验简单易行, 能够测得金属在真实条件下的腐蚀情况, 但实验周期长, 受工况波动、煤质变化等因素的影响, 实验几乎不可复现; 浸泡加速实验, 虽解决了挂片吹扫实验周期长的问题, 但浸泡腐蚀的机理为电化学腐蚀, 与实际烟气环境中的换热器腐蚀机理不一致. 这两种方法因其局限性, 难以对换热器表面局部腐蚀特性进行预测. 因此, 开展换热器表面的酸沉积特性的数值研究, 能

图8 (网络版彩色)管壁磨损深度圆周分布^[37]. (a) 不同颗粒直径; (b) 不同颗粒流量; (c) 不同雷诺数

Figure 8 (Color online) Distribution of local penetration depth of tube surface^[37]. (a) Particle size; (b) particle mass flow rate; (c) Re number

够获得换热器结构和运行参数对酸沉积特性的影响, 为烟气换热器的设计和改进提供一定参考.

这里总结了烟气换热器中低温腐蚀的机理, 同时结合作者团队的前期研究结果, 介绍了酸蒸气在换热器表面凝结沉积过程以及在低温腐蚀方面的相关实验研究.

3.1 低温腐蚀机理分析

换热器表面低温腐蚀特性也是影响换热器运行

图9 不同时刻管壁边界变化图^[37]. $d_p=30\ \mu\text{m}$, $Re=11174$

Figure 9 The deformation of tube surface at different operating time^[37]. $d_p=30\ \mu\text{m}$, $Re=11174$

图10 雷诺数对最大磨损深度的影响^[37]. $d_p=30\ \mu\text{m}$, $q_m=0.004\ \text{kg/s}$

Figure 10 The effect of Re number on the maximum penetration depth of tube^[37]. $d_p=30\ \mu\text{m}$, $q_m=0.004\ \text{kg/s}$

可靠性的关键因素之一. 影响低温腐蚀的因素众多, 但硫酸是引起换热器低温腐蚀的主要原因^[44].

目前在燃煤及燃油电站中, 大量消耗的一次性化石燃料, 燃料中通常会含有少量的硫, 硫成分在燃烧后生成 SO_2 , 其中一部分 SO_2 又会进一步被氧化成 SO_3 , SO_3 与烟气中的水蒸气化合而形成硫酸(H_2SO_4)蒸气^[1]. 由于烟气中硫酸蒸气的存在, 烟气露点温度明显升高, 烟气中 H_2SO_4 露点温度高于 HCl , HF , H_2SO_3 或 HNO_3 的露点温度, 因此, 当烟气换热冷却时, 硫酸优先凝结析出. 烟气中硫酸蒸气体积分数大致在1~50 ppm, 对应的烟气露点温度的变化范围约为129~147℃^[45]. 当烟气换热器换热表面壁温低于烟气露点时, H_2SO_4 蒸气将先在壁面上冷凝并沉积, 由于冷凝硫酸溶液腐蚀性强, 造成低温面腐蚀, 即通常所说的低温腐蚀.

低温腐蚀通常是不可避免的, 不仅与壁面温度有关, 而且与酸冷凝速率、硫酸溶液浓度有关. 图11

图11 (网络版彩色)腐蚀速率随壁温变化的曲线^[1,46]

Figure 11 (Color online) Effect of tube temperature on the corrosion rate^[1,46]

为腐蚀速度随温度变化曲线^[1,46]. 从图11可以看出, 当温度逐渐降低, 硫酸开始凝结, 随着壁温的降低, 硫酸凝结量增加, 腐蚀速度逐渐升高; 壁温较高时, 冷凝的酸液浓度较高, 硫酸的腐蚀速度相对较低; 随着壁温降低, 酸液浓度下降, 且冷凝量增加, 腐蚀速度升高并逐渐达到最大值(露点温度以下15~50℃); 当壁温进一步降低时, 酸凝结量足够多, 已不再成为限制腐蚀的因素, 同时酸浓度也降至较弱腐蚀范围内, 此时腐蚀速度取决于壁面温度, 随着壁温继续降低, 腐蚀速度开始下降, 并逐渐达到局部的最低点; 随后在烟温降低至水露点时, 由于大量水蒸气和硫酸蒸气的凝结, 此时壁面上的水膜与烟气中的 SO_2 结合生成强腐蚀性的 H_2SO_3 溶液, 使得腐蚀速率急剧增加, 形成新的严重腐蚀区^[1]. 低温腐蚀速率与酸沉积率以及冷凝酸液浓度直接相关. 较大的酸沉积率和较低的冷凝酸液浓度通常会加剧金属表面的低温腐蚀, 严重影响设备的寿命和安全运行.

目前, 许多学者对酸凝结模型开展了研究, Abel^[47]推导了硫酸水溶液的逸度方程, 其中液体逸度可表示成热力学依赖参数和温度的函数, 该方程能够合理的预测水分压. Gmitro等人^[48]通过考虑气相中 H_2SO_4 解离成 SO_3 和 H_2O 并采用新的热力学参数修正了Abel提出的逸度方程. Wilson等人^[49]在前人工作基础上, 重新评估了液相逸度表达式的系数并考虑了酸组分和水的溶解作用, 改善了硫酸分压力的预测精度. Pessoa等人^[50]基于Prigogine 和Defay的化学理论发展了一种用于计算 H_2O - H_2SO_4 溶液的气液平衡的数学模型, 模型同时考虑了液相的解离反应和

气相复杂的生成反应. Levy等人^[51]结合修正的逸度方程和多组分热动力学相平衡理论,建立了理论传质模型.

作者团队^[1,52]基于 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 溶液的气液平衡数据和多元组分传输理论,建立了烟气中酸蒸气输运、凝结过程的数值模型,实现了硫酸和水蒸气复杂边界条件的耦合求解,及硫酸、水蒸气和空气多元组分扩散输运行为的计算,详见文献[1,52].

3.2 低温腐蚀计算研究

针对实际设备局部表面腐蚀特性的预测和计算,部分学者将酸沉积模型和数值方法相结合,如Vorgelegt^[53]研究了含硝酸、硫酸和水蒸气的烟气在垂直水冷壁上的凝结过程. Comini等人^[54]建立了含湿空气在换热器表面冷凝过程的数值计算方法,并研究了湿工况下翅片表面局部凝结换热特性,直观给出了换热器翅片表面的水凝结率分布. 金保升等^[55]数值预测了烟囱内酸液的沉积速率,并探讨了烟气中硫酸蒸气含量、水蒸气含量、壁面温度和烟气流速等因素对硫酸冷凝速度的影响. 目前,对冷凝酸

沉积速度的研究,还未考虑具体对象几何特性、运行条件等的影响,且研究对象多为烟气通道,很少涉及对换热器腐蚀特性的;而且尽管有学者对多排H型翅片管换热器的流动和换热性能开展研究,但对其酸沉积特性的研究依然较少.

这里介绍作者团队^[1,52,56]根据团队前期建立的硫酸在换热器表面沉积的预测模型,对广泛用于余热回收的H型翅片管换热器表面酸沉积特性进行了数值分析,获得了冷凝酸液质量分数和酸沉积率等在翅片表面的分布规律,详细分析了H型翅片换热器运行参数、结构参数、管型、管排布置方式等因素对酸沉积量和冷凝酸浓度等的影响规律,获得了H型翅片管换热器的酸传质计算关联式.

图12为烟气温度为420 K、硫酸蒸气体积分数为 5×10^{-6} 、水蒸气体积分数为6%、烟气流速为5 m/s时,翅片表面温度、酸液浓度、分压和酸凝结率分布图. 由图12可以看出,翅片表面酸液质量分数和翅片温度分布趋势相一致;翅片温度越高,相应的酸液质量分数越大;酸沉积主要位于翅片前缘及靠近管壁的横向管间;受较低酸溶液浓度和较高凝结率影响,迎

图12 (网络版彩色)翅片表面温度、硫酸质量分数、酸分压及酸凝结率在翅片表面的分布图^[52]. (a) 翅片温度; (b) 硫酸质量分数; (c) 酸分压; (d) 凝结率

Figure 12 (Color online) The distribution of the investigated variables on fin surface^[52]. (a) Fin temperature; (b) acidic solution concentration; (c) acid partial pressure; (d) acid deposition rate

风侧管子周围翅片可能受到严重低温腐蚀。

图13为烟气流速、酸组分含量、烟气温度、水组

分含量等因素对酸凝结率和酸液质量分数的影响。

图13(a)为烟气流速对酸凝结率和冷凝酸液质量分数

图13 (网络版彩色)不同参数对酸凝结率和酸液质量分数的影响^[52]。(a) 流速; (b), (c) 酸组分含量; (d), (e) 烟气温度; (f), (g) 水组分含量

Figure 13 (Color online) Effects of different parameters on acid deposit ratio and acidic solution concentration^[52]. (a) Flow velocity; (b), (c) acid vapor concentration; (d), (e) flue gas temperature; (f), (g) water vapor concentration

的影响,可以看出,随着烟气流速增大,酸沉积率线性增加,而冷凝的硫酸溶液的质量分数随烟气流速的升高而略有增加。图13(b), (c)分别为酸蒸气含量对酸凝结率和冷凝酸液质量分数的影响,可以看出,随着烟气中酸组分体积分数的升高,酸凝结率线性增加,而酸液质量分数不随烟气中酸组分体积分数的改变而变化。图13(d), (e)分别为烟气温度对酸凝结率和冷凝酸液质量分数的影响,可以看出,烟气温度越高,翅片表面饱和酸分压越高,传质的驱动力相应越小,凝结率随温度升高而降低;与此同时,酸液质量分数随烟气温度升高而增大。图13(f), (g)分别为水蒸气含量对酸凝结率和冷凝酸液质量分数的影响,可以看出,酸凝结率随水蒸气体积分数升高而略微增大,而冷凝酸液质量分数则随着水蒸气体积分数的升高而显著减小。综合分析可知,在气体流速、烟气温度、酸组分含量、水组分含量等4种因素中控制烟气水蒸气含量和增加烟温是减轻酸腐蚀的有效措施^[52]。

多排H型翅片管换热器示意图如图14所示。图15为 Re 数和翅片厚度对翅片表面酸沉积率和冷凝酸液质量分数的影响,其中,图15(a)为 Re 数对翅片表面平均酸沉积率和酸液质量分数的影响,可以看出,随着 Re 数的增大,通道内的烟气流速增加,烟气中的硫酸蒸气和温度较低的H型翅片表面之间的对流传质增强,硫酸在换热器表面的沉积率明显增加,而酸液质量分数变化不大,酸液浓度最大增加了2.6%。图15(b)为翅片厚度对翅片表面平均酸沉积率和酸液质量分数的影响,可以看出,较大的翅片厚度会使得翅片表面酸沉积率大幅增加,同时使得冷凝酸液质量分数降低,两者同时作用,极大增加了翅片表面的腐蚀风险,因此实际中不宜用较大的翅片厚度。

针对10排管顺排H型翅片管,对影响H型翅片表面酸沉积特性的 Re 数、横/纵向节距、翅片高度、翅片间距、翅片厚度、缝隙宽度等7种因素进行了数值研究,拟合了一定条件下的酸传质关联式,如式(1)所示,详细参见文献[1,56]。

$$Sh = 0.0154 Re^{1.167} \left(\frac{F_p}{D} \right)^{0.131} \left(\frac{F_t}{D} \right)^{0.485} \left(\frac{S_1}{D} \right)^{-1.809} \left(\frac{S_2}{D} \right)^{0.24} \times \left(\frac{H}{D} \right)^{-0.276} \left(\frac{W}{D} \right)^{0.031}, \quad (1)$$

关联式适用范围如下: $Re=15000\sim39000$, $D=38\text{ mm}$,

图14 (网络版彩色)10排H型翅片管换热器示意图^[56]

Figure 14 (Color online) Schematic diagram of H-type finned tube bank with 10 rows^[56]

$F_p/D=0.158\sim0.474$, $F_t/D=0.026\sim0.105$, $S_1/D=2.43\sim3.42$, $S_2/D=2.37\sim3.95$, $H/D=1.45\sim2.36$, $W/D=0.158\sim0.632$.

图16为圆管顺排、圆管错排、椭圆管顺排和椭圆管错排等4种管型及布置方式对酸的凝结速率和冷凝酸液浓度的影响。图16(a)为烟气流速对翅片表面酸的平均凝结速率的影响,从图中可以看出,不同管型和布置方式的H型翅片管表面酸的凝结速率随入口烟气流速度的增加而增加;当采用顺排布置且烟气流速较低时,采用椭圆管可以使翅片表面酸的凝结速率降低50%~70%,即便是在较高烟气流速下,翅片表面酸的凝结速率也会降低25%以上。图16(b)为烟气流速对冷凝的酸液浓度的影响,从图中可以看出,不同管型和布置方式的H型翅片管表面冷凝的酸液平均浓度随入口烟气流速的增加而增加;采用椭圆管顺排布置的H型翅片表面冷凝的酸液浓度最低。

3.3 低温腐蚀实验研究

为了认识不同材料的抗腐蚀特性以及积灰与酸耦合作用机理,一些学者在材料抗腐蚀特性和积灰与酸耦合作用机理方面开展了实验研究。

早期, Damon^[57]研究了5种不同碳钢在13种不同浓度的硫酸溶液下的腐蚀,指出含碳量在0.06%~0.37%的碳钢腐蚀速率最低。Kivisäkk^[58]对Slaiman等提出的实验装置进行改进,得到了3种不同不锈钢材料在稀盐酸溶液中的腐蚀速率。顾国亮等^[59]实验研究了ND钢、316L和20号钢在硫酸中的腐蚀情况,分析了硫酸浓度、壁面温度对腐蚀速率的影响规律。

作者团队^[60~62]在已有研究基础上,分别提出了实验室模拟气氛下挂片实验装置和真实烟气在线水冷低温腐蚀性能实验装置,分别参见图17和18所示。根据实验装置,分析了多种典型余热用换热器材料的低温腐蚀特性。

图19为1种钛合金和5种钢材共6种材料实验室模拟气氛下不同壁温的腐蚀层厚度对比图^[61],可以看

图 15 (网络版彩色) Re 数和翅片厚度对酸沉积率和冷凝硫酸质量分数的影响^[56]. (a) Re 数; (b) 翅片厚度

Figure 15 (Color online) Condensation rate and acidic solution concentration for different parameters^[56]. (a) Re ; (b) fin thickness

图 16 (网络版彩色)管型和布置方式的影响. (a) 酸凝结速率; (b) 冷凝的酸液浓度

Figure 16 (Color online) Effect of tube shape and geometry conditions on condensation rate (a) and acidic solution concentration (b)

图 17 (网络版彩色)实验室挂片实验装置示意图^[60]

Figure 17 (Color online) Laboratory static sample test system^[60]

出, 6种材料的抗腐蚀能力为: GR2钢>ND钢>316L钢>Corten钢>20G钢>20号钢; 同时可以看出, 随着壁温的降低, 腐蚀层厚度增加, 即腐蚀程度加剧。

图20为5种钢材在燃煤电厂真实烟气中不同入口水温下的腐蚀层厚度对比图^[62], 可以看出, 5种钢材

的抗腐蚀能力为: 316L钢>ND钢>Corten钢>20G钢>20号钢; 同时可以看出, 随着入口水温的降低, 腐蚀层厚度增加, 即腐蚀程度加剧。和图19相比, 不同材料的腐蚀趋势一致, 但模拟气氛和真实烟气下的实验数据有偏差, 这可能是由于灰分的影响所致。

图 18 (网络版彩色)真实烟气水冷低温腐蚀实验装置示意图^[61]

Figure 18 (Color online) Online water-cooled test system^[61]

图 19 (网络版彩色)不同材料模拟气氛下腐蚀层厚度对比图^[60]

Figure 19 (Color online) Comparison of the corrosion layer thickness for different materials in simulated gas^[60]

图 20 (网络版彩色)不同钢材真实烟气中腐蚀层厚度对比图^[62]

Figure 20 (Color online) Comparison of the corrosion layer thickness for different steels in real flue gas^[62]

进一步分析可以看出: 当壁面温度大于70℃左右时, 高于HCl、低于H₂SO₄的露点温度, 此时只有H₂SO₄凝结析出, ND, Corten钢具有较好抗腐蚀能力; 当入口水温大于40℃左右时, 高于H₂O、低于H₂SO₄

和HCl的露点温度, 此时随着入口水温的降低会有H₂SO₄和HCl相继凝结析出, 316L等级的奥氏体不锈钢具有较好抗腐蚀能力; 而当入口水温小于40℃时, 低于H₂O、同时也低于HCl, H₂SO₄, H₂SO₃, HNO₃的露点温度, 此时, 随着入口水温的降低, 以上各种酸同时凝结析出, 当溶液随着HCl浓度增加时, 需要依次选用316L、317LM、双相不锈钢2205、超级奥氏体不锈钢、超级双相不锈钢2507, 904L, Hastelloy C22, Hastelloy C276等钢材及镍基合金; 而当HF出现时, 几乎可以腐蚀所有的金属; 因此当HF, HCl, H₂SO₄, H₂SO₃或HNO₃同时出现时, 可能只有使用非金属材料才具有长期抵抗复合型的酸根离子腐蚀的能力, 如氟塑料PFA, PTFE等制成的烟气换热器^[63]。

此外, 实践表明当烟气温度深度冷却至传统热力学露点温度以下时, 并未发生露点腐蚀现象, 这主要由于积灰与酸的耦合作用改变了酸露点。为此, 作者团队^[64]利用扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射仪(XRD)、能谱分析(EDS)探查腐蚀后各材料微观组织结构、元素迁移规律及黏性积灰的成分, 并以此为基础揭示传热管材料积灰与露点腐蚀耦合机理。

图21为黏性积灰下的露点腐蚀机理示意图^[64], 可以看出, 反应顺序为: 首先金属及金属氧化物与酸发生反应, 产物主要是铁的硫酸盐, 积灰迅速将管壁覆盖; 接着, 在积灰层外层发生积灰与酸的反应, 而在内层发生金属壁面与水和氧的氧化还原反应。因此, 积灰层从外到内可分为飞灰及腐蚀产物、硫酸盐层和铁的氧化物层, 其中内层是主要的腐蚀层。

4 总结和展望

本文回顾中低温余热回收烟气换热器的积灰、磨损和腐蚀方面的研究进展, 与此同时, 结合着也介绍了作者团队在相关方面所开展的一些研究工作: (1) 建立了飞灰颗粒沉积的数学模型, 实现了颗粒在换热器表面复杂的输运、碰撞和沉积过程的预测, 揭示了飞灰颗粒在管壁的沉积分布特性, 提出了能有效减轻积灰的椭圆管换热器设计; (2) 研究了飞灰颗粒对换热管表面的磨损特性, 分析了烟气参数对磨损特性的影响规律; (3) 发展了一种预测换热器表面酸蒸气凝结的耦合计算方法, 通过将该方法用于H型翅片管换热器, 揭示了运行参数对换热器局部腐蚀特性的影响, 拟合了酸传质关联式; (4) 实验研究了不同材料的抗腐蚀特性, 揭示了换热面积灰与酸的耦

图 21 (网络版彩色)积灰与酸耦合机理示意图^[64]

Figure 21 (Color online) Schematic diagram of dew point corrosion mechanism^[64]

合作用机理。

尽管众多学者及本团队已经对换热器的积灰、磨损和腐蚀问题进行了相应研究,并取得了一些进展,但仍还存在一些尚未清楚认识的问题,这些问题在今后的研究中还需进一步开展。

(1) 积灰的研究方面:对于烟气换热器积灰特性的机理研究目前主要有两类研究途径:一是建立和完善颗粒沉积与剥离理论模型;二是采用数值方法模拟积灰沉积特性。由于影响颗粒沉积和剥离的因素众多,对颗粒沉积与剥离理论模型的研究难度较大,目前仍不能对松散型积灰的形成机理进行准确地解释。在颗粒沉积与剥离模型基础上,目前学者的研究对复杂颗粒沉积机理均进行了不同程度的简化,如未考虑颗粒表面蒸汽冷凝产生的包覆层对弹塑性碰撞过程的影响;颗粒碰撞-黏附-剥离的综合积灰模型不够完善等等。为了能够更全面地分析积灰机理,需要综合数值模拟和实验结果,建立更为全面准确的积灰模型,并提炼出烟气换热器的预防积灰设计准则为工程实际服务。此外,确定换热管表面的积灰形貌,对于清晰认识积灰对换热器换热性能的影响也十分重要,仍有待进一步研究。

(2) 磨损的研究方面:在磨损模型的建立方面,尽管学者基于磨损机理和实验数据提出了大量磨损计算模型(表1),但均存在一定程度的适用条件,主要体现在两方面:影响磨损的因素众多,已提出的磨损模型仅考虑了其中部分影响因素;磨损模型均是基于特定的实验条件下提出的,不具有普遍适用性。影响磨损的因素众多,建立一个完善的磨损预测模型,对于准确预测换热面的磨损至关重要。同时数

值模拟为材料的抗磨损设计提供了新的改进途径,今后磨损数值模拟将朝着从机理到现象,从部分到整体,从微观到宏观,从单一磨损机制到多机制交互作用的方向发展,仿真将应用于磨损机理的分析,抗磨损材料的选择,材料表面的改性处理等。

(3) 腐蚀的研究方面:对于腐蚀过程的数值计算方面,移动边界反应扩散模型是预测酸腐蚀速率的重要手段,但此类方法的应用还较少,因此有待进一步研究。此外,建立换热表面酸沉积率和腐蚀速率间的定量描述方面,也有待开展进一步研究。对于腐蚀机理实验研究方面,实验室模拟气氛环境较为单一,和实际烟气相比仍有差距,实际烟气低温腐蚀实验结果可指导工程实践,今后在建立酸性气体成分及其微量检测以及和腐蚀速率关系方面还有待深入探索。

(4) 积灰、磨损和腐蚀耦合机理的研究:目前只有少数针对积灰和低温腐蚀两者的耦合机理的研究,其主要是通过对换热表面的微观腐蚀特点、元素迁移规律及黏性积灰的成分进行分析,来揭示换热管积灰与腐蚀耦合作用机理。但由于积灰、磨损和腐蚀在实际过程中往往是同时存在的,对其三者的耦合机理研究仍十分缺乏。因此,换热面积灰、磨损和腐蚀的耦合机理有待进一步研究。

(5) 积灰、磨损及腐蚀防控技术的研究:针对中低温烟气换热器的积灰、磨损及腐蚀问题,可以通过合理选择换热器介质流速、优化换热器结构、采用热管技术、离子注入技术、表面涂层技术和氟塑料换热器等措施,达到积灰、磨损及腐蚀防控的目的,继而进一步优化,研发出新型的高效烟气换热器将成为重要的研究方向。

参考文献

- 1 Han H. Numerical and experimental studies on heat transfer enhancement and erosion and fouling characteristics in heat exchanger of gas (in Chinese). Doctoral Dissertation. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2014 [韩辉. 气体换热器强化换热及腐蚀积灰特性的数值模拟与实验研究. 博士学位论文. 西安: 西安交通大学, 2014]
- 2 Cen K F, Fan J R, Chi Z H, et al. Prevention and Calculation of the Fouling, Slagging, Erosion and Corrosion of the Boilers and Heat Exchangers (in Chinese). Beijing: Science Press, 1994 [岑可法, 樊建人, 池作和, 等. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算. 北京: 科学出版社, 1994]
- 3 Holman J P. Heat Transfer. 10th ed. New York: McGraw-Hill, 2010
- 4 Marner W J, Suitor J W. A survey of gas side fouling in industrial heat transfer equipment: Final report. JPL Publication 83-74. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, Institute of Technology, 1983
- 5 Weber R, Mancini M, Schaffel-Mancini N, et al. On predicting the ash behaviour using computational fluid dynamics. Fuel Proc Technol, 2013, 105: 113–128
- 6 Baxter L L. Ash deposition during biomass and coal combustion: A mechanistic approach. Biomass Bioenergy, 1993, 4: 85–102
- 7 Naruse I, Kamihashira D, Khairil, et al. Fundamental ash deposition characteristics in pulverized coal reaction under high temperature conditions. Fuel, 2005, 84: 405–410
- 8 Xu X G. Experimental investigation on the formation mechanisms of ash deposition during biomass combustion (in Chinese). Doctoral Dissertation. Beijing: Tsinghua University, 2009 [徐晓光. 生物质燃烧过程积灰形成机理的实验研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2009]
- 9 Wang Y, Hu C, Hui S, et al. Deposition of cement kiln ash on the tubes of waste heat recovery boiler. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific. IEEE, 2011. 1–4
- 10 Wacławski K, Kalisz S. A practical numerical approach for prediction of particulate fouling in PC boilers. Fuel, 2012, 97: 38–48
- 11 Rogers L N, Reed J. The adhesion of particles undergoing an elastic-plastic impact with a surface. J Phys D: Appl Phys, 1984, 17: 677–689
- 12 Brach R M, Dunn P F, Li X. Experiments and engineering models of microparticle impact and deposition. J Adhes, 2000, 74: 227–282
- 13 Thornton C, Ning Z. A theoretical model for the stick/bounce behaviour of adhesive, elastic-plastic spheres. Powder Technol, 1998, 99: 154–162
- 14 Konstandopoulos A G. Particle sticking/rebound criteria at oblique impact. J Aerosol Sci, 2006, 37: 292–305
- 15 Han H, He Y L, Tao W Q, et al. A parameter study of tube bundle heat exchangers for fouling rate reduction. Int J Heat Mass Transfer, 2014, 72: 210–221
- 16 Li X, Zhou H, Cen K. Influences of various vortex structures on the dispersion and deposition of small ash particles. Fuel, 2008, 87: 1379–1382
- 17 Fan J R, Zha X D, Sun P, et al. Simulation of ash deposit in a pulverized coal-fired boiler. Fuel, 2001, 80: 645–654
- 18 Bouris D, Konstantinidis E, Balabani S, et al. Design of a novel, intensified heat exchanger for reduced fouling rates. Int J Heat Mass Transfer, 2005, 48: 3817–3832
- 19 Bouris D, Papadakis G, Bergeles G. Numerical evaluation of alternate tube configurations for particle deposition rate reduction in heat exchanger tube bundles. Int J Heat Fluid Flow, 2001, 22: 525–536
- 20 Paz C, Suárez E, Eirís A, et al. Development of a predictive CFD fouling model for diesel engine exhaust gas systems. Heat Transfer Eng, 2013, 34: 674–682
- 21 Han H, He Y L, Li Y S, et al. A numerical study on compact enhanced fin-and-tube heat exchangers with oval and circular tube configurations. Int J Heat Mass Transfer, 2013, 65: 686–695
- 22 Patel R D, Patel I J. A review paper on erosion and corrosion behavior of coal combustion chamber. Int J Innov Res Sci Technol, 2015, 1: 72–76
- 23 Lee B E, Fletcher C A J, Behnia M. Computational study of solid particle erosion for a single tube in cross flow. Wear, 2000, 240: 95–99
- 24 Bahadur S, Badruddin R. Erodent particle characterization and the effect of particle size and shape on erosion. Wear, 1990, 138: 189–208
- 25 Fan J R, Zhou D D, Cen K F. An investigation of tube banks erosion by coal ash impact (in Chinese). J Eng Thermophys, 1989, 10: 452–455 [樊建人, 周大冬, 岑可法. 煤灰粒子冲击管束的碰撞和磨损研究. 工程热物理学报, 1989, 10: 452–455]
- 26 Humphrey J A C. Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact. Int J Heat Fluid Flow, 1990, 11: 170–195
- 27 Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles. Wear, 1960, 3: 87–103

- 28 Hashish M. A modeling study of metal cutting with abrasive waterjets. *J Eng Mater Technol*, 1984, 106: 88–100
- 29 Mbabazi J G, Sheer T J, Shandu R. A model to predict erosion on mild steel surfaces impacted by boiler fly ash particles. *Wear*, 2004, 257: 612–624
- 30 Tabakoff W, Kotwal R, Hamed A. Erosion study of different materials affected by coal ash particles. *Wear*, 1979, 52: 161–173
- 31 McLaury B S. A model to predict solid particle erosion in oilfield geometries. Thesis for Master Degree. Tulsa: University of Tulsa, 1993
- 32 Oka Y I, Okamura K, Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. *Wear*, 2005, 259: 95–101
- 33 Oka Y I, Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2: mechanical properties of materials directly associated with erosion damage. *Wear*, 2005, 259: 102–109
- 34 Lee B E, Tu J Y, Fletcher C A J. On numerical modeling of particle-wall impaction in relation to erosion prediction: Eulerian versus Lagrangian method. *Wear*, 2002, 252: 179–188
- 35 Yao J, Zhang B, Fan J. An experimental investigation of a new method for protecting bends from erosion in gas-particle flows. *Wear*, 2000, 240: 215–222
- 36 Fan J, Yao J, Zhang X, et al. Experimental and numerical investigation of a new method for protecting bends from erosion in gas-particle flows. *Wear*, 2001, 251: 853–860
- 37 Jin Y, Dan D, Tang G H, et al. Numerical study of the solid particle erosion on a single row tube surface. The 4th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow, Hong Kong, 2013
- 38 Fan J, Sun P, Zheng Y, et al. A numerical study of a protection technique against tube erosion. *Wear*, 1999, 225: 458–464
- 39 Wang Y H, Sun N, Gui K T. Numerical simulation on erosion characteristics of flue gas flowing across spirally corrugated tubes in aligned arrangement (in Chinese). *J Southeast Univ: Natural Science Edition*, 2014, 44: 585–590 [王迎慧, 孙宁, 归柯庭. 烟气横掠螺旋槽管束磨损特性的数值模拟. 东南大学学报: 自然科学版, 2014, 44: 585–590]
- 40 Schade K P, Erdmann H J, Hädrich T, et al. Experimental and numerical investigation of particle erosion caused by pulverised fuel in channels and pipework of coal-fired power plant. *Powder Technol*, 2002, 125: 242–250
- 41 Lin Z H, Xu T M. Practical Boiler Handbook (in Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2009 [林宗虎, 徐通模. 实用锅炉手册. 化学工业出版社, 2009]
- 42 Wang Y, He Y L, Li R, et al. Heat transfer and friction characteristics for turbulent flow of dimpled tubes. *Chem Eng Technol*, 2009, 32: 956–963
- 43 Wang Y, He Y L, Lei Y G, et al. Heat transfer and hydrodynamics analysis of a novel dimpled tube. *Exp Thermal Fluid Sci*, 2010, 34: 1273–1281
- 44 Tang Z Y. Investigation on corrosion behaviors of downstream components of power plant following the WFGD (in Chinese). Doctoral Dissertation. Nanjing: Southeast University, 2006 [唐志永. 湿法脱硫后燃煤电站尾部装置腐蚀研究. 博士学位论文. 南京: 东南大学, 2006]
- 45 Cen K F. Combustion Test Methods and Measurement Techniques (in Chinese). Beijing: China Water and Power Press, 1987 [岑可法. 锅炉燃烧试验研究方法及测量技术. 北京: 水利水电出版社, 1987]
- 46 Holmes D R. Dewpoint Corrosion. Birmingham: Horwood Publishing Limited, 1985
- 47 Abel E. The vapor phase above the system sulfuric acid-water. *J Phys Chem*, 1946, 50: 260–282
- 48 Gmitro J I, Vermeulen T. Vapor-liquid equilibria for aqueous sulfuric acid. *AIChE J*, 1964, 10: 740–746
- 49 Wilson R W, Stein F P. Correlation of sulfuric acid-water partial pressures. *Fluid Phase Equilib*, 1989, 53: 279–288
- 50 Pessoa F L P, Siqueira Campos C E P, Uller A M C. Calculation of vapor-liquid equilibria in aqueous sulfuric acid solutions using the UNIQUAC equation in the whole concentration range. *Chem Eng Sci*, 2006, 61: 5170–5175
- 51 Levy E K, Wilson R W. A method for calculating acid deposition rates in regenerative air preheaters. *Nat Heat Transfer Equipm Fund Design Appl Oper Probl*, 1989, 108: 289–296
- 52 Han H, He Y L, Tao W Q. A numerical study of the deposition characteristics of sulfuric acid vapor on heat exchanger surfaces. *Chem Eng Sci*, 2013, 101: 620–630
- 53 Vorgelegt V. Condensation of Water Vapor and Acid Mixtures from Exhaust Gases. Berlin: Technical University of Berlin, 2004
- 54 Comini G, Nonino C, Savino S. Numerical evaluation of fin performance under dehumidifying conditions. *J Heat Transfer-Trans ASME*, 2007, 129: 1395–1402
- 55 Jin B S, Tang Z Y, Sun K Q, et al. Numerical prediction of the deposit rate of condensed sulfuric acid from the flue gas of power plant chimney (in Chinese). *Proc CSEE*, 2006, 26: 40–44 [金保升, 唐志永, 孙克勤, 等. 燃煤电站烟囱中硫酸冷凝沉积速度的数值预测. 中国电机工程学报, 2006, 26: 40–44]
- 56 He Y L, Han H, Tang S Z, et al. Sulfuric acid deposition characteristics of H-type finned tube bank with 10 rows. *Int J Heat Mass*

- Transfer, 2015, 81: 137–141
- 57 Damon G H. Acid corrosion of steel. *Industr Eng Chem*, 1941, 33: 67–69
- 58 Kivisäkk U. A test method for dewpoint corrosion of stainless steels in dilute hydrochloric acid. *Corros Sci*, 2003, 45: 485–495
- 59 Gu G L, Yang W Z. Corrosion behaviour of ND steel, 316L and 20# carbon steel in sulfuric acid (in Chinese). *Corr Protect*, 2005, 26: 336–337 [顾国亮, 杨文忠. ND 钢, 316L, 20# 碳钢在硫酸介质中的腐蚀行为. *腐蚀与防护*, 2005, 26: 336–337]
- 60 Zhao Q X, Zhang Z X, Du W Z, et al. Experimental study on sulfuric acid dew point corrosion in simulated atmospheric conditions (in Chinese). *J Chin Soc Power Eng*, 2012, 32: 420–424 [赵钦新, 张知翔, 杜文智, 等. 模拟气氛下硫酸露点的腐蚀试验研究. *动力工程学报*, 2012, 32: 420–424]
- 61 Liang Z Y, Zhao Q X, Zhang Z C, et al. Dew point corrosion of nickelizing layers and CrNiMo coatings (in Chinese). *China Surf Eng*, 2012, 25: 56–61 [梁志远, 赵钦新, 张智超, 等. 表面渗层和 CrNiMo 涂层材料的露点腐蚀. *中国表面工程*, 2012, 25: 56–61]
- 62 Zhang Z X, Zhang Z C, Ye Q J, et al. Study of dewpoint corrosion of coal-fired boilers (in Chinese). *Mater Eng*, 2012, 2: 19–23 [张知翔, 张智超, 曳前进, 等. 燃煤锅炉露点腐蚀实验研究. *材料工程*, 2012, 2: 19–23]
- 63 Heitmuller R J, Fischer H, Sigg J, et al. Lignite-fired Niederaussem K aims for efficiency of 45 percent and more. *Mod Power Syst*, 1999, 19: 53–66
- 64 Wang Y G, Zhao Q X, Zhang Z X, et al. Mechanism research on coupling effect between dew point corrosion and ash deposition. *Appl Thermal Eng*, 2013, 54: 102–110

Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchanger for middle and low temperature flue gas waste heat recovery

HE YaLing, TANG SongZhen, WANG FeiLong, ZHAO QinXin & TAO WenQuan

Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of Ministry of Education, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

With the ongoing emphasis on the efficient use of energy, much effort is put on the development and application of various heat recovery technologies. Heat exchangers play an important role in energy transfer and utilization and are widely used to recover waste energy from different kinds of heat sources in many fields such as energy and power engineering, petroleum and chemical engineering, air conditioning and refrigeration, aviation and aerospace, etc. In the heat exchangers for waste heat recovery, the gas-side fluid mediums usually are unclean and corrosive. The problems of fouling, erosion and corrosion of heat exchangers in the middle and low temperature flue gas-side caused by the high ash content, viscous and corrosive components are inevitable, and how to effectively solve the problems has been the subject of much research in recent years. In this paper, the researches of fouling, erosion and corrosion characteristics in middle and low temperature flue gas heat exchangers are reviewed. The causes and influence factors are discussed. Firstly, the fouling mechanisms of heat exchangers are introduced and the existing theoretical models, empirical models, and numerical methods of particle transport, impact and deposition are reviewed. The ash fouling characteristics of 6-row tube heat exchangers are presented and the effects of flue gas velocity, particle diameter, spanwise tube pitch, longitudinal tube pitch, tube shape and geometry conditions on fouling rate are discussed. Both decrease of the longitudinal tube spacing and increase of spanwise spacing can effectively reduce the deposition of particles. The geometry of elliptical tubes can fulfill this requirement for fouling reduction with smaller longitudinal spacing and larger spanwise pitch. The feasibility of using oval tube is explored for the fouling reduction. Compared with the circular tube arrangement, the deposition rate of the elliptical tube was decreased by 68.8%. Secondly, the existing erosion mechanisms, theories and methods are introduced. Different erosion models, including the model advantages and disadvantages are also summarized. The dynamics behaviour of the entrained solid particles in the flow and the deformation of the tube surface due to erosion are presented. The effects of particle diameter, particle mass flow rate and fluid Reynolds number are discussed. Among the three parameters, fluid Reynolds number has the most important effect on the erosion of tube surface. Erosion mainly occurs at the first part of the single tube surface. Thirdly, the existing mechanisms, theories and methods of corrosion characteristics of heat exchangers are introduced. Then a coupling numerical model, developed in author's previous research, is discussed to predict the condensation characteristics of sulfuric acid vapor on heat exchanger surfaces. The corrosion risk can be reduced by decreasing the water vapor concentration and increasing the flue gas temperature. The effects of operating parameters and geometry conditions on the sulfuric acid condensation and corrosion characteristics are also discussed. A correlation of Sh number of sulfuric acid versus fin geometries for a 10-row tube bundle is provided. In order to reveal the anti-corrosion characteristics of different materials and the coupling mechanisms between the fouling and dewpoint corrosion, the online water-cooled test system and laboratory static sample test system on the corrosion characteristics of heat exchangers are introduced. Some dewpoint corrosion resistant steels are presented. The mechanism of dewpoint corrosion is revealed, the relationship between the thickness of corrosion layer and wall temperature is discussed and the coupling mechanisms between the fouling and dewpoint corrosion are also discussed. The corrosion products are composed of the ash and acid reaction products in the outer layer, iron sulfate in the middle layer, and iron oxide in the inner layer. The innermost layer is the main corrosion layer. Finally, the research needs and prospect of fouling, erosion and corrosion research are discussed. Hope to solve the problems of designing the anti-fouling, anti-erosion and anti-corrosion heat exchangers, and promote the development of efficient utilization technologies in middle and low temperature flue gas heat exchangers.

industrial waste heat, flue gas heat exchanger, fouling characteristics, erosion characteristics, corrosion characteristics

doi: 10.1360/N972016-00248