

小型化锅炉热效率提升的机械设计方法研究

李国梅

(河北热华锅炉有限公司, 河北 张家口 075000)

摘要 在全球提倡节能减排与可持续发展的背景下, 能源的高效利用已经成为社会各界共同关注的焦点。小型锅炉广泛应用于工业、民用供暖等领域, 其热效率与能耗及环境效益密切相关。然而, 当前小锅炉普遍存在热效率有待提高的问题, 制约着小锅炉的高效利用。本文以小型锅炉为对象, 围绕提升锅炉热效率的关键科学问题展开研究, 首先对小锅炉工作原理和现有热效率不足的影响因素进行了深入剖析, 然后从优化受热面结构、燃烧系统、改进余热回收装置、锅炉整体结构及保温设计等方面对小型化锅炉热效率的机械设计方法进行了探讨, 以期形成一套完善的小型锅炉热效率提升机械设计理论指导, 实现小锅炉能量利用率的提升和小锅炉性能的优化。

关键词 小型化锅炉; 热效率; 机械设计; 受热面结构; 燃烧系统

中图分类号: TK229.6

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.07.021

0 引言

随着世界范围内能源需求的增加以及环境保护意识的增强, 提高能源利用效率已成为社会各个领域迫切需要解决的问题。小型锅炉是一种应用十分广泛的热能装置, 被广泛应用于工业和民用领域。然而, 传统的小型锅炉普遍存在着热效率低、能耗高、运行费用高、对环境污染严重等问题。在工业方面, 小锅炉在食品、印染、制药等行业中应用广泛。这些行业虽用水量不大, 但所用锅炉却能耗高、效率低。在居民生活中, 许多地区的冬季供暖都是由小锅炉来完成的, 它的热效率直接影响到居民的采暖成本和舒适度。基于此, 本文以提高微型锅炉热效率为目标, 探索一种系统的机械设计方法, 实现对其关键部件的优化设计, 以期大幅提高其热效率。

1 小型化锅炉工作原理及热效率影响因素

1.1 小型化锅炉工作原理

小型蒸汽锅炉是指单位时间内蒸发量较小而且蒸汽压力较低的蒸汽锅炉, 该设备机电一体化、主机辅机一体化, 使用方便, 安装简单。小型锅炉主要由两大部分组成: 一是锅, 二是炉。锅体是用来盛水的部件, 它利用受热表面吸收燃料燃烧时所放出的热, 再加热水, 就可以产生蒸气或热水。炉子就是把燃料放到炉子里去燃烧, 把化学能转化为热能的地方。就常见的水管锅炉而言, 它是一种燃烧燃料, 产生高温烟气的设备。高温烟气冲刷着水冷壁等辐射传热面, 并以辐射的形式向管道输送热量^[1]。烟气进入对流烟道后, 与对流管束等对流传热面进行对流换热, 再将热传递

给管内介质。经过一系列传热后, 水被加热成蒸气或热水, 供用户使用。

1.2 热效率影响因素

1.2.1 受热面结构

受热面结构的优劣直接影响着换热器的传热效果, 如果受热面面积过小或传热系数过小, 烟气热量得不到充分吸收, 就会导致热量损失增加。其中, 传热管管径、间距及布置方式是影响传热效果的重要因素: (1) 管径过小会增大流体阻力, 影响水循环; (2) 管径过大, 单位面积受热面积减小; (3) 管道间距太小, 容易形成积灰, 影响传热效果; (4) 如果管道间距过大, 则会降低传热效率。

1.2.2 燃烧系统

燃烧系统的性能对热效率有很大影响, 燃料与空气的混合比例、燃烧方式及燃烧器工作特性等都是影响燃料充分燃烧的重要因素。如果燃料与空气混合不均, 将导致部分燃料无法充分燃烧, 在化学反应中造成不完全燃烧。另外, 燃烧器的调节能力较差, 不能根据负荷的变化及时调整供油和供气, 从而影响了燃烧效率。

1.2.3 排烟热损失

排烟热损失在小锅炉中占有相当大的比重, 由于烟气温度过高, 大量热量随烟气排出, 无法得到有效利用。烟气出口温度与受热面清洁度、过剩空气系数等因素密切相关。锅炉受热面积灰、积灰会严重影响锅炉的传热效率, 导致烟气温度升高。随着过量空气系数的增大, 排烟量增大, 送热量增加。

1.2.4 散热损失

在锅炉运行过程中,热量会通过炉壁、管道等途径散发出去,热损失与锅炉保温性能直接相关。如果隔热层质量不好或者厚度不够,会造成大量的热损失,从而降低热效率^[2]。

2 提升小型化锅炉热效率的机械设计方法

2.1 受热面结构优化设计

2.1.1 强化传热技术应用

强化传热技术是提高换热效率的有效途径,通过在换热管内加装扰流器,改变工质的流动状态,增强管内流体的扰动,从而提高传热系数。螺旋扭带可以使流体在管内形成螺旋流,增加壁面接触面积,增加速度梯度,强化传热。此外,还可以采用翅片管、波纹管等异型传热管,翅片管采用增加肋条的方式增大换热面积,改善传热效果;波纹管特有的波纹结构增加了流体的扰动量,增大了传热系数。

2.1.2 受热面布置优化

在设计时,应根据烟气的流动方向和温度场的分布情况,合理地确定辐射面和对流面的位置和比例。例如,由于炉内辐射传热温度较高,辐射传热占主导地位,故应优先布置辐射传热面。在对流烟道中,为了充分利用烟气余热,合理布置对流换热面是非常必要的。此外,还应考虑受热面的布置方式。常用的管束排列方式有顺排和叉排两种。结果表明,叉排束具有较强的流动扰动和较高的传热系数,具有比顺排束更好的传热效果。但叉排管束的流动阻力也相当大,在设计时必须综合考虑传热和阻力的关系。

2.2 燃烧系统改进设计

2.2.1 燃烧器优化

燃烧器是燃烧设备的核心部件,它的性能直接影响着燃烧效果。首先要使燃油与空气充分混合,使其达到最佳状态。根据燃料特点和锅炉运行要求,选择不同类型的燃烧器,如旋流燃烧器、直流燃烧器等。其次,燃烧器应具备良好的调节能力,能够根据锅炉负荷的变化适时调整供气量。这种燃烧器是一种比例燃烧器,它可以通过调节燃料和空气的比例,使燃烧器能够在不同的负荷下保持良好的燃烧效果。

2.2.2 配风系统优化

合理的配风是保证燃料充分燃烧的关键,配风系统应该能够满足燃烧各阶段所需的风量。在燃烧初期,应保证一次风量充足,有利于燃料迅速点火;燃烧时应保证充足的二次风,保证燃料充分燃烧;在燃烧进行到最后阶段时,应适当增加三次风以保证燃料的充分燃烧^[3]。通过对配风系统的优化设计和加装风量调节器,可以实

现配风系统的优化。如采用渐缩流道,使气流逐级加速,强化燃油和燃油的混合,同时,安装有风量调节阀,可以根据需要精确调节各部分的风量。

2.3 余热回收装置设计

2.3.1 省煤器设计

省煤器是利用烟气余热对锅炉给水进行预热的重要设备,可有效提高能源利用率。其设计应与烟气温度、烟气流速、给水温度等重要参数密切相关。

首先,在省煤器的选型上,钢管型省煤器由于具有较高的换热效率和较小的体积,在大中型锅炉中得到了广泛的应用。以300 MW火电机组锅炉为例,该装置可使锅炉给水温度从200℃明显上升至240℃,综合热效率提高3%。这是因为钢管具有良好的导热性能,可以快速地将烟气热量输送到给水系统中。铸铁式省煤器以其优良的耐腐蚀性在小锅炉上显示出独特的优越性。例如,一些蒸发量2 t/h小时的小型工业锅炉采用高硫煤作为燃料,其抗酸烟气腐蚀性强,使用寿命比普通钢管省煤器长约2年。

其次,合理地确定省煤器的加热面积、管径、间隔等参数是十分重要的。加热区面积大小直接影响余热回收效果,面积过小会造成大量排出热量得不到有效利用,造成能源浪费;但是,过大的加热面积不仅会使设备投资增加,还会使管内流体流动阻力增大,使风机能耗增大。例如,某中型蒸汽量10 t/h锅炉省煤器改造项目,因前期计算失误,实际安装的省煤器受热面积超出理论值20%,导致安装后余热回收效率虽提高,却因流动阻力增大15%而抵消了部分节能效益。因此,在设计时,应根据传热学原理及相关经验公式,结合实际操作条件,对加热面积进行精确计算。一般情况下,对这种中型锅炉,省煤器直径可选为32 mm,管间距为60 mm,这样既能保证良好的传热效果,又利于烟气循环,减少积灰现象。

最后,省煤器的布置位置直接影响余热回收的效果,它通常设置在锅炉尾部烟道内,烟气温度相对较低,刚好能满足省煤器对烟气温度的适应性要求,使烟气余热得到充分利用。省煤器一般设置在离出口8~10 m的烟道内,当烟气温度降至300~400℃时,省煤器可实现高效换热。同时,这种布局方式可以方便地与其他设备进行合理的联接,从而降低了系统的复杂性。

2.3.2 空气预热器设计

空气预热器是废热回收系统的核心部件,它主要起到利用烟气余热加热燃烧需要的空气、改善燃烧条件和提高燃烧效率的作用。一般的空气预热器可分为管型和旋转型两种。

管式空气预热器具有结构简单、制造方便、热效

率高等优点。例如, 在一些蒸发量为 4 t/h 的小蒸汽锅炉中, 采用管式空气预热器, 可以将进入炉内的空气温度从 20 ℃ 提高到 120 ℃, 从而使燃料燃烧更加充分, 有效降低了不完全燃烧损失, 锅炉热效率提高约 5%。在设计管式预热器时, 应考虑管内空气流速和管外烟气流速。选择适当的流速, 不仅可以保证传热效果, 而且可以降低流动阻力。管道中空气的速度通常是 8 ~ 12 m/s, 管道外的空气速度是 6 ~ 10 m/s。当风速太大时, 尽管传热系数有所增加, 但空气侧的流动阻力增大, 风机能耗增大; 流速过慢会降低传热效率, 使烟气余热无法完全回收^[4]。同时, 为防止积灰及磨损, 需合理控制烟气侧流速。

回转式空气预热器以其体积小、受热面积大等特点, 已成为大型电站锅炉的首选设备。以某 600 MW 机组锅炉为例, 采用回转式空气预热器后, 与常规管式预热器相比, 其体积可减少约 40%, 而加热面积可增大 30%。但其结构复杂, 维护成本高。旋转空气预热器的设计要特别注意密封问题。由于动静部件间的相对运动, 密封性能差, 极易出现漏风现象, 致使大量冷空气混入热烟气流, 降低了传热效率, 增大了风机负荷。一般而言, 回转式空气预热器的漏风率应控制在 8% 以内, 采用先进的密封结构和材料, 如柔性密封件和接触式密封件, 并定期对密封件进行检查和维修, 可确保其密封性。

2.4 锅炉整体结构及保温设计

2.4.1 整体结构优化

锅炉整体结构的合理设计对提高锅炉热效率具有重要意义, 烟气流动阻力的降低是设计中应考虑的问题。采用适当的烟道形状和转弯半径, 可以防止烟道内出现盲区和涡流区, 降低局部阻力损失。若采用圆形烟道比矩形烟道, 则在相同截面面积条件下, 烟流阻力可降低约 20%, 有利于烟流的顺畅。同时, 在烟道转角位置, 采用半径不小于烟道当量直径 1.5 ~ 2 倍的圆弧过渡段, 并设置导流板等措施, 使烟道平稳过渡, 减小烟道内的涡流。它具有结构紧凑, 占地面积大等特点, 对降低生产成本, 便于安装和维护, 具有重要意义。

2.4.2 保温设计

良好的保温性能对降低锅炉散热损失、提高能源利用率具有重要意义, 锅炉内壁及管道等部位应选用优质保温材料, 如岩棉、硅酸铝纤维等。岩棉的导热系数约为 0.04 W/(m·K), 硅酸铝纤维导热系数约为 0.035 W/(m·K), 具有很好的隔热性。保温层的厚度应根据热损失计算和相关规范确定, 对于一般的工业锅炉, 如果用岩棉作保温材料, 它的壁厚通常在

100 ~ 150 mm; 用硅酸铝纤维进行保温时, 其壁厚一般在 80 ~ 120 mm。

此外, 保温层施工的重点是保证保温层的完整性和密封性。只要有缝隙的地方, 都有可能成为散热的通道。为此, 必须严格按照施工规范要求, 采取合适的施工工艺, 如采用岩棉保温材料错缝拼接、接缝处用专用粘合剂封闭等。同时, 为防止外界因素对保温层的破坏, 保温层外还应加镀锌铁皮或彩钢板^[5]。另外, 保温层要定期进行检修, 建立完善的检验制度, 每季度进行一次保温层的外观和温度检测。如发现保温层有破损或脱落, 应及时进行修补, 使保温性能始终处于理想状态。如某热电厂采用严格的保温材料维修制度, 单是降低散热损失就可节省近 50 万元的能源消耗。

3 结束语

本文针对微型锅炉, 从换热表面结构、燃烧系统、废热回收及整体隔热性能四个方面, 深入探究了提升微型锅炉热效率的机理及影响因素。在换热表面上, 通过强化传热技术, 优化布置, 提高传热效率; 采用燃烧器及配风系统改造燃烧系统, 实现充分燃烧; 废热回收装置能有效地回收烟气的热量; 通过对整体结构进行优化设计, 并对其隔热设计, 减少阻力及散热损失, 形成一套提高小锅炉热效率的完整方案, 但该研究也存在一些限制。在实际运行中, 由于小锅炉工况多样, 工况复杂多样, 需要深入研究其共性方法。同时, 面对快速发展的新材料、新工艺、新技术, 小型锅炉机械设计中应用新型材料与先进制造技术的研究还处于初级阶段。展望未来, 智能化和绿色化是小锅炉发展的方向。一方面, 深入研究机械结构设计和智能控制系统, 实现运行参数实时准确调控, 持续提升热效率。另一方面, 积极探索与新能源的耦合, 开发太阳能一小锅炉联合供暖等多能互补系统, 推动我国小锅炉行业向高效、清洁、可持续方向发展, 实现节能减排目标。

参考文献:

- [1] 朱永隆, 王海. 基于 FLUENT 小型生物质锅炉换热器分析与研究 [J]. 安徽科技学院学报, 2022, 36(01): 86-95.
- [2] 杨国峰. 小型蒸汽锅炉水煤浆燃烧行为的数值模拟研究 [J]. 世界有色金属, 2024(14): 50-53.
- [3] 汤华振, 李科育. 低温省煤器支持下的锅炉余热回收节能改造方法研究 [J]. 化工设计通讯, 2024, 50(08): 60-62.
- [4] 高海旺. 分布式小型燃气锅炉调峰研究 [J]. 区域供热, 2022(02): 21-29, 40.
- [5] 陈飞飞. 小型燃煤锅炉改造技术路线研究 [J]. 能源与环境, 2021(02): 30-32.