

油田注汽锅炉烟气余热利用协同低氮燃烧改造实践

沈和平 杨晓勇 姜 瑜 王榕培 张云鹏

(中石化河南油田分公司采油二厂, 河南 南阳 473000)

摘 要: 结合地方政府关于锅炉超低排放环保工作要求, 以 SF-23/17.2-YQ 型油田专用燃气注汽锅炉为例, 开展了预混燃烧和扩散燃烧两种低氮燃烧方式的技术对比, 提出了利用复合相变换热器技术回收烟气余热、协同分级低氮燃烧 + 烟气再循环控制的一体化技术改造方案。改造应用后, 锅炉烟气氮氧化物排放浓度控制在 $25\text{mg}/\text{m}^3$, 锅炉热效率提高 5.4 个百分点, 实现了注汽锅炉节能环保改造工程目标。

关键词: 注汽锅炉; 低氮燃烧; 烟气再循环; 余热利用; 相变换热器

0 引言

注汽锅炉是国内稠油油田注蒸汽开采的专用设备, 是将生产的高温高压湿饱和蒸汽注入至稠油油藏目的层, 补充地层压力和改善稠油流动性, 达到开采稠油的目的。以河南稠油油田为例, 目前在注汽锅炉应用上存在如下问题:

一是满足不了省、市政府关于锅炉大气污染物排放限值要求。烧天然气后氮氧化物排放浓度不能达到所在地市政府规定的 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 以下要求。

二是锅炉热效率低下。2019 年底油田注汽锅炉平均役龄为 21.7 年, 新度系数仅 0.21。改烧天然气后锅炉平均热效率仅 87.51%, 锅炉运行极不经济。

三是受国际原油价格长期低迷影响, 油田设备的更新投入必须适应油田低成本效益开发的步伐, 购买新型的低氮锅炉投入较大。

为此, 河南油田确定了对现有注汽锅炉采取分级燃烧 + 烟气再循环 FGR 为主的低氮燃烧技术, 以复合相变换热器为主的烟气余热利用技术, 并利用相变换热器对 FGR 烟气温度调控作用协同低氮燃烧控制, 实现了锅炉氮氧化物排放浓度稳定控制在 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 以下的目标。

1 低氮燃烧技术的选取

低氮燃烧器选型和改造必须与锅炉结构和受热面相匹配, 改造后不仅要满足低 NO_x 排放标准, 同时还应保证改造后火焰轮廓和长度不冲刷辐射段受热面管壁和过渡段耐火墙体, 并且锅炉负荷要达到原设计负荷的 80% 以上, 蒸汽干度满足稠油开发需要。

1.1 燃气氮氧化物控制的基本机理

近年来, 各类企业及油田企业加快了以天然气替代燃煤或燃油的锅炉清洁能源改造。天然气燃烧过程中 NO_x 的生成主要包括快速型 NO_x 和热力型 NO_x , 快速型 NO_x 比热力型 NO_x 小一个数量级^[1], 在低氮燃烧器研发及配套应用上通常把控制热力型 NO_x 的生成作为主要研究方向。当温度低于 1500°C 时, 热力型 NO_x 的生成量很少, 高于 1500°C 时, 温度每升高 100°C , 其生成速度将增大 6~7 倍。燃烧方式可分为预混燃烧和扩散燃烧^[2]。

影响氮氧化物的生成主要有三个方面的因素:

一是 NO_x 的生成速率, 通过降低炉内平均温度、增强炉内换热等措施抑制 NO_x 的生成。

二是燃烧反应区域的大小, 通过优化燃料流经燃烧器喷口的速度、空气燃料动量比、降低助燃空气温度和增强炉内烟气内循环等, 避免燃烧反应局部高温, 减少 NO_x 的生成。

三是烟气在高温区停留的时间, 停留时间越短, NO_x 的生成越少。

1.2 注汽锅炉的结构特点

改造的 4 台注汽锅炉型号为 SF-23/17.2-YQ, 采取卧式布置, 锅炉结构主要包括辐射段、过渡段、对流段及水-水换热器等, 见图 1。其中辐射段为圆筒型卧式炉膛, 辐射段受热面采取直流式单路布置, 炉管沿炉膛内壁水平方向往复排列。王珏等提出炉膛结构参数中对燃烧影响较大的是炉膛直径, 炉膛直径增加, 便于火焰在炉膛中沿垂直方向展开, 单位截面热负荷减少, 温度降低, 有利于减少氮氧化物的生成^[3]。

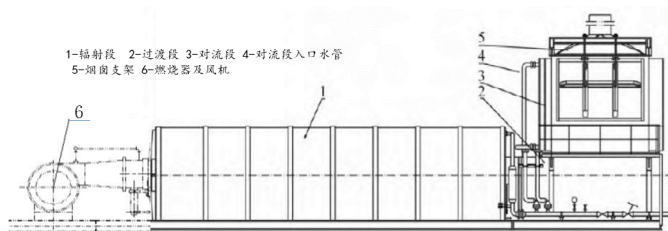


图 1 燃气注汽锅炉结构布置图

燃料从燃烧器喷入辐射段燃烧, 产生的烟气经辐射段、过渡段和对流段后, 从烟囱排出, 排烟温度在 200°C ~ 220°C 之间。锅炉给水经柱塞泵升压后, 经水-水换热器管程升温后进入对流段进行对流换热, 对流段出口水回到水-水换热器壳程与低温的给水换热后进入辐射段, 在辐射段完成从水相到饱和水、一定干度的湿饱和蒸汽的蒸发过程, 饱和蒸汽经锅炉出口蒸汽管道注入至油井。

1.3 低氮燃烧技术的比较

选取与注汽锅炉相匹配的低氮燃烧器是工程改造的

重点。低氮燃烧器的选取主要考虑以下几个方面的因素：

1.3.1 燃烧方式

预混燃烧相比于扩散燃烧，具有燃烧温度高、燃烧强度大、节电性好的特点。燃烧火焰相对短但截面大。分级低氮燃烧技术通过对燃气喷嘴的位置、数量及旋流喷入结构设计，将燃气分级送入炉膛燃烧，使燃烧温度场尽可能均布，避免出现局部高温，从而抑制氮氧化物的生成。相比于预混燃烧，其火焰圆周尺寸便于控制，但其火焰长度更长、空气送入电能消耗较高。

1.3.2 烟气再循环工艺

在燃烧火焰区域加入烟气，有助于降低 NO_x 的生成。分内部再循环和外部再循环。烟气内循环通过优化喷嘴结构来实现，利用喷嘴流速产生的卷吸烟气效应，使少量烟气再次参与燃烧。烟气外循环则需要通过再循环风机将锅炉尾部烟道的烟气抽出后送入送风机入口，与空气混合后送入炉膛参与燃烧反应。减弱了氧气与氮气生成热力型 NO_x 的过程，也降低燃烧的温度，从而抑制了 NO_x 的生成。若要将 NO_x 排放浓度控制在 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，则必须采用烟气外循环工艺协同处理。FGR 流量是衡量低氮燃烧器的一项重要指标，一般控制在总烟气量的 15%–25%。

1.3.3 空气温度的影响

烟气循环量的大小对参与燃烧反应的空气温度产生直接影响，尤其是在冬夏季空气温差高达 50°C ，必须考虑空气温度对 NO_x 排放浓度稳定控制的影响。随着空气预热温度的升高， NO_x 排放浓度也随着提高。吴晓磊等通过 CFD 数值模拟了空气温度为 220°C 时 NO 排放浓度为 280°C 时的 65.9%^[4]。低氮改造后锅炉炉膛火焰温度降低，为减少 FGR 循环烟温对空气温度的影响，应采取余热回收利用降低烟温的协同措施。

1.3.4 自动控制技术

预混燃烧方式需要高精度的燃气空气当量比控制以确保燃烧安全，因而对燃气量、空气量的测量精度及等比例控制要求较高，同时还需要满足油田开发对注汽锅炉生产的蒸汽量及蒸汽品质稳定性的要求。

综合以上因素，本案例采取分级低氮燃烧技术。

2 烟气余热回收技术的确定

本次改造一方面要解决锅炉改烧天然气后低氮排放环保问题，另一方面要配套解决好锅炉热效率偏低的问题。从低氮燃烧配套改造来说，应考虑低氮改造后对流段出口烟温上升对 FGR 烟温的影响。从锅炉烟气余热充分利用方面，应保证锅炉尾部受热面不出现低温腐蚀的情况下尽可能降低排烟温度。

基于上述考虑，本案例选用了复合相变换热器技术回收烟气余热，其优点有：

2.1 壁面温度的可调性，避免锅炉尾部受热面低温腐蚀

复合相变换热器的底部蒸发段由多排并联的翅片蒸

发管束组成，与水平烟道相连，管束内软化水与高温烟气对流换热后完成从液态到气态的蒸发过程。顶部冷凝段由蒸汽冷凝室与锅炉给水高压管段组成，它将从蒸发管束收集来的蒸汽与给水对流管段换热，完成蒸汽的冷凝与向给水的传热过程。冷凝段底部有冷凝水收集器，由下降管引接至蒸发管束下集箱。为减少因锅炉给水温度和烟气温度变化造成的冷凝水温度变化较大的问题，专门设置有冷凝水再热工艺，以确保进入蒸发管束内冷凝水温度稳定和均衡。壁面温度主要通过调整顶部冷凝室压力来调节蒸发管束内热媒介质蒸发温度，并通过再热工艺来实现壁面温度的调节，保证受热面不结露的情况下降低排烟温度，避免露点腐蚀。

2.2 烟气出口温度相对稳定

锅炉运行中通常依据燃气中含硫量的不同来设置复合相变换热器的壁面温度。壁面温度一旦设定，在运行中就会保持相对稳定，从而使高温烟气与之对流换热后，出口烟气温度保持相对稳定。

3 现场改造

2020 年 12 月在河南油田某注汽站四台燃气注汽锅炉上进行了低氮燃烧和烟气余热利用一体化技术改造。改造后总体工艺流程图见图 2。

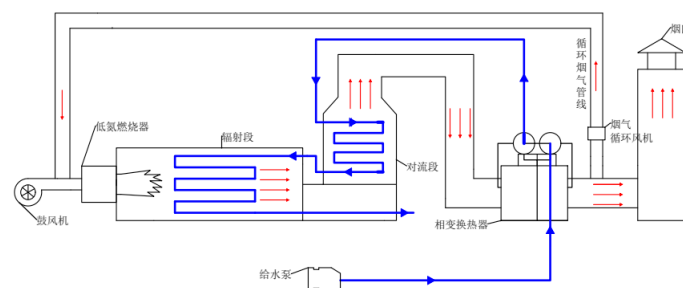


图 2 注汽锅炉低氮燃烧和
余热利用一体化改造工艺流程图

3.1 低氮燃烧器的选型

根据锅炉结构特点，选取 SAACKE ATONOX G200 低氮燃烧器，其中燃料和空气均分 2 路进入燃烧室，每一路配备有独立的控制阀以适应不同负荷下的低氮燃烧控制；一次风和一次燃料布置于燃烧器前部中心处，确保在不同负荷下火焰的稳定性和连续性。分级后的二次燃料通过四个均匀布置在燃烧室四周的喷嘴与二次风混合后燃烧，使燃烧温度场均匀并避免出现局部高温。

3.2 烟气再循环的控制

通过控制 FGR 风机，从相变换热器出口抽取少量烟气，送至鼓风机出口的混风箱，降低混合空气中氧气浓度，抑制燃烧时 NO_x 的生成，流量通过伺服电机来实现。在锅炉调试中，绘制出固定的燃气量 - 风门开度 - 烟气伺服电机行程关系曲线，固化在专门的程序控制器里，伺服电机的行程按照曲线来动作，从而保证燃烧器运行的稳定性。（下转第 34 页）

备和油料的运行是否正常等。在必要的位置要通过悬挂警示标志的方式,增加员工的安全意识,让员工具有足够的安全操作意识。注重对于现场的安全情况的把控,一旦发现违规操作行为要及时的制止,以防各种突发事件的产生。

3.4 加强对于专业人员的技术培训

安全管理工作的顺利实施,与油库管理人员的专业素养以及认真的工作态度是分不开的。企业必须要重视对于油库管理人员定期的安全管理知识培训以及技能知识的培训。培训方式可以通过开展宣传讲座或者是技能课程的方式,让员工在定期在培训过程中不断的掌握新的知识内容,使其培养理念以及安全理念更好的与现代化石油企业安全管理模式进行匹配。对于油库管理单位来说,最为重要的内容包含定期的对油库可能存在的问题进行检查,使其薄弱点更好地被发现,有助于企业安排相应人员对隐患进行排查。安全演习是最贴合油库可能存在的问题进行的演练,企业应该使油库的安全演习更加符合现实生活中可能存在的安全故障事故,使相关人员可以积累更多的安全知识,一旦发生事故可以更加灵活地对事故进行处理。

3.5 加强对油库设备的管理和维护

对于油库安全管理来说,最为重要的内容包含保证油库设备的正常运行。目前我国存在的主要设备问题是长时间使用导致的老化以及维护保养不周到等问题。主要的解决方法是石油企业利用专项资金,定期的对石油储存设备以及其他运行设备进行监管和维护,建立相应

的设备管理部门,一旦发现设备运行存在问题,要及时的进行上报进行处理。对于仪器设备维护和保养次数的设置,也要更加符合设备的使用情况和运行时间,石油企业不能为了减少成本的投入,使检查的次数和时间间隔不符合标准。对于设备的日常管理,要通过落实责任制度的方式使设备可以更好的被监管,避免相互之间产生较多混杂的影响,维护安全管理制度。

4 结束语

目前对于石油企业来说,最为重要的内容包含对成品油库的安全管理,保障其生产秩序以及稳定性发展,已成为企业的主要目的。油库的安全性会受到环境、人员以及设备等不同因素的干扰,制定的管理制度也要更加具有针对性,确保改善不同影响因素带来的不利作用。加强设备维护的同时,将提升人员安全意识作为安全管理的中中之重。

参考文献:

- [1] 翟春海. 浅谈成品油库的安全管理 [J]. 石化技术, 2021,28(04):185-186.
- [2] 吴珣. 浅谈成品油库的安全管理 [J]. 科学咨询(科技·管理), 2020(11):45.
- [3] 赵强, 孙林朋. 浅论现阶段成品油库安全管理模式的转变 [J]. 石化技术, 2020,27(02):317-318.
- [4] 王超. 成品油库安全因素及其安全评价探究 [J]. 化工管理, 2018(36):70.
- [5] 冯琳. 对成品油库安全因素及其安全评价研究 [J]. 科技致富向导, 2013(35):138+169.

(上接第 31 页)

3.3 复合相变换热器的布置

将复合相变换热器布置在给水泵和锅炉对流段之间的地面基础上。该布置方式的优点有三个方面。一是烟气余热利用装置及烟囱落地布置减少了设备高度,提高了专用环保设备日常检查维护的安全性。二是将烟气余热利用装置水侧流程设置为泵出口的高压段,可取消锅炉原水-水换热器的设置,降低给水压力损失。三是在换热器烟气侧除有利于保持排烟温度稳定、协助低氮控制外,还便于设备的维护与维修。

4 应用效果及结论

4.1 应用的效果

改造后,烟气温度由对流段出口的 212℃ 下降至 115℃,相变换热器壁面温度保持在 105℃ 左右;通过测试,锅炉热效率由改造前的 87.51% 提升至 92.91%;安装于烟囱上的 CEMS 监测数据显示 NO_x 排放浓度控制在 25mg/m³ 左右,达到了地方环保部门的排放要求。从运行上看,改造后锅炉炉膛压力上升约 1.2kPa,鼓风机电耗有所增加。

4.2 结论

通过对注汽锅炉进行烟气余热利用和低氮燃烧一体

化改造实践,运用复合相变换热器回收了烟气余热的同时,协同 FGR+ 分级低氮燃烧技术,实现了氮氧化物稳定控制在 30mg/m³ 以内的工程目标,为国内各油田开展注汽锅炉低氮燃烧环保改造提供了借鉴。改造后锅炉热效率提高了 5.4 个百分点,年节约燃气费 52.5 万元,取得较好的节能环保效益。

参考文献:

- [1] 苏毅,揭涛,沈玲玲等. 低氮燃气燃烧技术及燃烧器设计进展 [J]. 工业锅炉, 2016(4):17-25.
- [2] 赵钦新,商俊奇,倪永涛等. 我国燃气锅炉的差距和突破 [J]. 工业锅炉, 2017(5):1-16.
- [3] 王珏,赵向东. 基于烟气再循环的燃气炉低氮氧化物排放性能研究 [J]. 工业锅炉, 2017(1):22-25.
- [4] 吴晓磊,刘波,任政等. 新型低氮燃气分级燃烧器燃烧特性和 NO_x 排放的 CFD 研究 [J]. 化工进展, 2014(9): 2298-2303.

作者简介:

沈和平 (1969-), 男, 2005 年毕业于武汉理工大学控制理论与控制工程专业,工学硕士,高级工程师,现从事油田机械设备应用研究与管理工。