

脱硫喷淋管支撑件整体建模及设计改进

钟莎, 郑浣琪

(浙江天地环保科技有限公司 浙江 杭州 310003)

摘要: 针对石灰石-石膏湿法脱硫工艺中, 针对核心部件—喷淋系统的改造是脱硫提效方法之一, 主要通过新增喷淋层和更改喷嘴形式来提高吸收塔喷淋液气比。利用有限元软件, 对某电厂600 MW机组脱硫塔内新增喷淋层支撑钢梁及喷淋管整体建模, 准确分析喷淋管和支撑钢梁这一组合结构模型的挠度和应力分布情况, 通过计算改进原支撑结构重新建模复核。最终, 支撑钢梁形式得以优化, 使单层支撑梁用钢量降低, 同时验证了结构的安全可靠性。

关键词: 湿法脱硫; 喷淋管; 喷嘴; 支撑梁; 有限元软件
中图分类号: TK05 文献标识码: B
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.06.021

引言

现今, 国内火电厂烟气脱硫的主流工艺是石灰石-石膏湿法技术, 吸收塔是湿法烟气脱硫系统的主体和核心设备^[1]。随着国家针对火电厂大气污染物排放标准的不断提高, 原有火电机组脱硫效率已不能满足新标准的要求, 需对整个系统的工艺及设备进行改进。喷淋系统作为湿法脱硫技术的核心部件之一, 本文涉及增加喷淋层数或加大现有喷淋层喷嘴密度等举措来提高喷淋液气比, 从而提高脱硫效率。

石灰石-石膏湿法脱硫工艺中的喷淋管道布置复杂, 周边环境恶劣^[2], 出于安全的考虑, 原喷淋层支撑钢梁设计时数量较多, 且规格较大, 设计选型相对粗放和偏于保守。在对吸收塔进行增设喷淋层改造时, 需抬升吸收塔筒体高度并新设喷淋管支撑钢梁, 此时若仍采用原结构形式, 不仅耗材较多、工期相对较长、经济性能差, 同时对土建基础利旧的原吸收塔整体承载也很不利。实际工程运行数据表明, 在喷淋量不变的情况下, 双向喷嘴能形成数量更多粒径更小的颗粒, 浆液与烟气反应的表面积增大, 也能促进提高脱硫效率。出于经济性能及安全等方面

考虑, 无论新增喷淋层或更换原喷淋喷嘴, 都需对喷淋支撑系统实行设计改进。

1 喷淋系统概况简介

1.1 喷淋管及支撑梁

脱硫喷淋管目前主要有两种材质和结构形式: 第一种是全玻璃钢(FRP)材质, 其支撑一般为搁置或悬挂两种方式, 其中又以悬挂为主。FRP材质喷淋管材质重量轻, 能适用于任何塔径; 另一种喷淋管主管主材为碳钢, 内外壁贴衬丁基橡胶防腐, 支管采用FRP管, 主管与支管之间通过法兰连接, 主管一般为管径较大的等径钢管, 其自身可起到支撑钢梁的作用, FRP支管底部无需另设支撑钢梁。该种喷淋主管为较重的碳钢, 对吸收塔的本体结构影响较大, 一般更适合塔径较小的吸收塔。

机组投运后发现, 喷淋层支撑钢梁会受到上部喷嘴喷射浆液的冲刷, 当防腐质量不过关时, 支撑钢梁会发生被浆液击穿破坏的情况, 对工程长期安全运行存在隐患。近年来, 国内外在吸收塔喷淋层支撑方面都逐步进行了简化设计。有些烟气量小的小塔径吸收塔中, 喷淋层直接由碳钢母管取代支撑钢梁, 结构得以进一步简化。

1.2 喷嘴

石灰石-石膏湿法脱硫工艺实施初期, 喷淋系统配备的均为单向空心锥喷嘴。随着双向喷嘴的研发成功和工程化应用, 经过可靠的测试数据分析得知: 双向喷嘴提高了气液间的相对速度, 改进了传质性能, 同时其密集的二次雾化提高了雾滴表面的传质系数, 形成的液滴粒径比单向喷嘴更小, 反应的总表面积变大。双向喷嘴可以同时上下喷淋形成逆流、顺流的雾滴层, 烟气从吸收塔入口进入, 可以逐级与逆流、顺流的雾滴层直接接触反应, 接触更加充

收稿日期: 2016-03-15; 修订日期: 2016-04-21

作者简介: 钟莎(1983-), 女, 侗族, 湖南茶陵人, 浙江天地环保科技有限公司工程师。

分, 反应时间加长, 可大幅提高脱硫效率。

双向喷嘴布置时应确保避免将浆液喷淋到支撑梁和喷淋管道上^[3], 不能让浆液直接冲刷到钢梁表面, 破坏钢梁防腐层, 从而影响整个系统的安全性。在周密均匀的喷嘴布置前提下, 这对钢梁的布置提出了更高要求, 减少钢梁的数量及降低其规格势在必行。

而无论采用何种脱硫提效方法, 对喷淋层的改动都会影响到原有支撑钢梁的受力情况, 需要对其安全性做出评估。本文主要是以 FRP 材质悬挂式喷淋层为模型, 利用 ANSYS 软件建立喷淋层母管及支撑梁整体模型, 对原有喷淋系统进行刚度和强度校核, 根据计算结果预设改造方案, 继而对原有支撑形式进行简化建模并验算, 同时针对双向喷嘴的特性改进支撑钢梁结构设计, 在保证喷淋系统安全系数的前提下, 降低生产成本, 缩短改造工期。

2 喷淋层及支撑钢梁布置说明

本文以某 600 MW 燃煤发电机组脱硫项目(吸收塔塔径 16 m)为例, 原喷淋层及支撑钢梁如图 1 所示。喷淋层均采用 4" 单向 SiC 空心锥喷嘴, 周边喷嘴数 42 只、中心喷嘴数 148 只; 支撑钢梁为: 4 根主梁, 规格为 700(高) × 250(宽) × 12(壁厚); 6 根次梁, 规格为 400(高) × 250(宽) × 12(壁厚), 母管悬挂于次梁下, 一层支撑钢梁重约为 15 t。

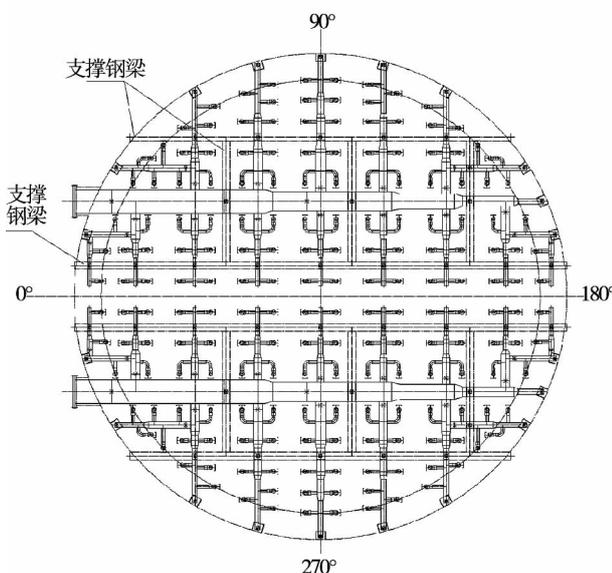


图 1 原喷淋层及支撑平面图

Fig. 1 Original spray layer and support beams

在喷淋层数量保持不变的基础上, 对喷嘴布置进行了改进。喷淋层周边利旧原 4" 单向喷嘴, 以避免烟气从塔壁短路排走, 中间区域除 2 根大梁下方仍然采用 4" 单向喷嘴外, 其余喷嘴均更改为 4" 双向喷嘴。喷嘴布置时除满足覆盖率外同时考虑避免喷淋浆液直接冲刷到支撑梁或喷淋母管。

改进后的喷淋层及支撑钢梁布置如图 2 所示, 支撑钢梁为: 2 根主梁, 规格为 700(高) × 250(宽) × 12(壁厚); 5 根次梁, 规格为 200(高) × 120(宽) × 12(壁厚), 母管悬挂于主梁下, 一层支撑钢梁重为 7.2 t。

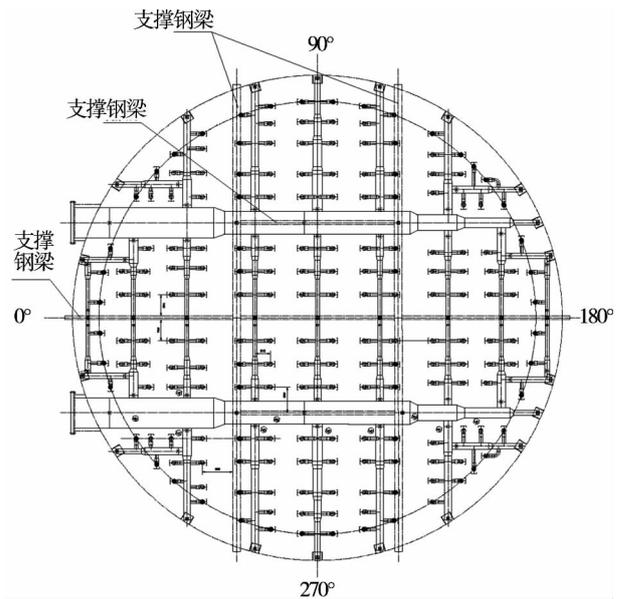


图 2 改进后的喷淋层及支撑平面图

Fig. 2 Improved spray layer and support beams

3 研究内容及计算描述

3.1 模型建立依据

利用 ANSYS 有限元分析软件, 对喷淋母管及支撑钢梁进行整体建模分析, 详细分析评定母管及钢梁的挠度和应力, 以确定改进方案的可行性。首先赋予各个构件的材料属性, 管道为 FRP 材料, 支撑梁为 Q235 碳钢, 抱箍为 S32205 合金, 各材料属性如表 1 所示。

吸收塔内部近似为均匀压力, 母管表面受到烟气均匀外压, 该部分作用力不会影响母管的挠度; 另一个作用力为烟气的冲击力, 塔内空塔流速一般不超过 4 m/s, 折算风压为 10 Pa, 即每平方米受力 10 N。

而母管重量加上浆液重量每平方米大于 2 000 N ,垂直向上的烟气冲击作用力的影响微乎其微 ,且与母管及浆液重力方向相反 ,实际上会使挠度减小 ,故在建立计算模型时不计烟气荷载的影响。

表 1 喷淋管、钢梁及抱箍的材料属性

Tab.1 Material properties of spray pipe ,steel beam and hoop

| 名称 | 弹性模量 /MPa | 泊松比 | 密度 /kg·m ⁻³ |
|------|-----------|------|------------------------|
| 喷淋母管 | 12 500 | 0.25 | 1 900 |
| 支撑钢梁 | 20 480 | 0.3 | 7 850 |
| 抱箍 | 19 980 | 0.3 | 8 000 |

吸收塔最大的温差变化区域位于入口的干湿交接处 ,塔内正常运行温度一般为 40 ~ 50 ℃ 。在塔内均匀喷淋的情况下 ,喷淋层上下的实际温差并不大。根据喷淋母管生产厂家提供的 FRP 测试数据 (依据 ASTM D696 测试) ,母管材料的平均线膨胀系数为 $2.27 \times 10^{-5} \text{ mm/mm} \cdot \text{℃}^{-1}$ (温度在 24 ~ 93 ℃ 范围内均为该值) ,故计算时不计热应力对母管的影响。

母管及支撑梁均采用 Beam189 单元 ,设置不同的横截面;抱箍采用 Link180 单元 ,设置抱箍横截面积和材料特性等模拟抱箍的作用。喷淋管采用结构层建模 (去掉耐磨层) ,管内浆液质量根据管径的不同施加等效重力荷载、喷嘴及连接小支管的重量也等效加载在支管上。施加荷载及约束描述如下:

- (1) 结构自重 (包括喷嘴自重);
- (2) 浆液自重 (据管径不同施加等效重力荷载);
- (3) X、Y、Z 三向位移约束 (施加于钢梁两端及主管进口管口处);
- (4) Z 方向垂直位移约束 (施加于周边支管末端及主管末端)。

3.2 初步改进模型介绍

原喷淋层支撑梁考虑两路母管同侧进 ,互不干涉 ,支撑梁结构为关于吸收塔轴线对称的两独立框架结构 ,中间无连接件。改进后的结构为连接在一起的整体构件 ,中间区域设置了一支撑次梁 ,为保证模拟结果的准确性 ,以全模型进行模拟计算。

据图 3 ~ 图 7 的计算结果可知 ,母管最大应力为 22.453 8 MPa ,小于许用应力 25 MPa。最大应力位于中心 8"支管的末端位置 ,该处跨度较长 ,可采取适当加大管径、管子壁厚或缩短悬臂等方法来进一步保证其安全性。最大变形位移为 18.319 5

mm ,位于中心区域的支管末端。同样取图 5 中的塔中心跨距最大的 2 根支管 1、2 进行评定 ,结果如表 2 所示。

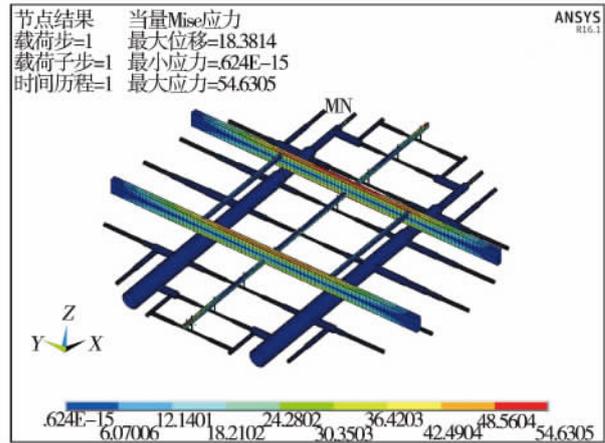


图 3 喷淋及支撑应力分布云图

Fig.3 Stress distribution of spray pipes and the support beams

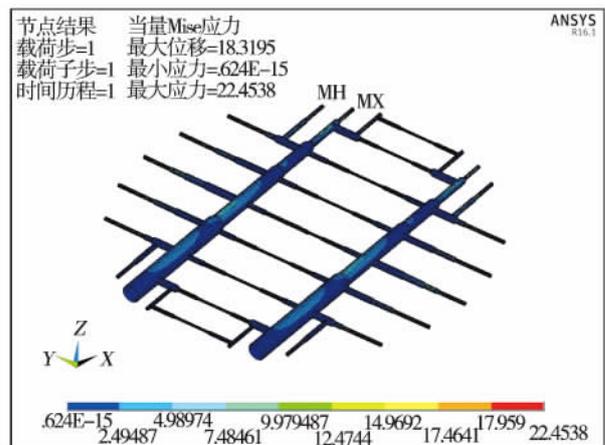


图 4 喷淋管应力分布云图

Fig.4 Stress distribution of spray pipes

表 2 初步改进后支管挠度

Tab.2 Branch deflection after preliminary improvement

| 名称 | 支管长度 L /mm | 最大挠度 w _{max} /mm | 允许挠度 w (1/400 L) /mm |
|------|------------|---------------------------|----------------------|
| 支管 1 | 4 440 | 10 | 11 |
| 支管 2 | 2 760 | 3.2 | 6.9 |

支管 1 的变形挠度已接近限制值 ,而支撑钢梁的最大应力为 54.630 5 MPa ,远小于其许用应力

135 MPa , 钢梁最大挠度为 18.381 4 mm , 主梁长度为 15 100 , 变形小于钢梁长度的 1/800。

造成了中心支管的挠度过大。考虑到母管的重力主要由支撑钢梁及其抱箍来承受 , 塔壁槽钢支托仅起到搁置作用 , 受力并不大。因此为解决这一问题 , 在空载安装时 , 将槽钢支托的位置预先下移约 10 mm , 以减小中心支管的相对挠度。

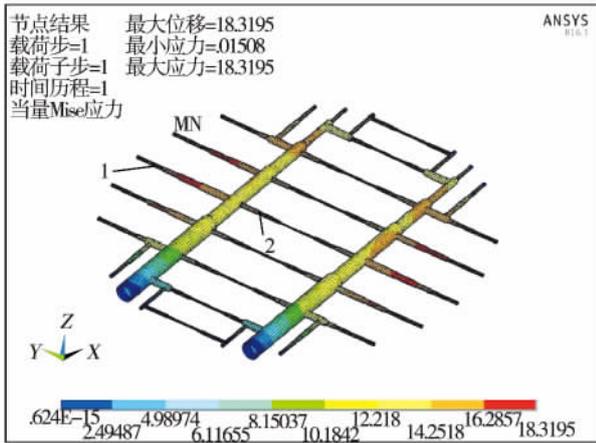


图 5 喷淋管变形分布云图

Fig. 5 Deformation distribution of spray pipes

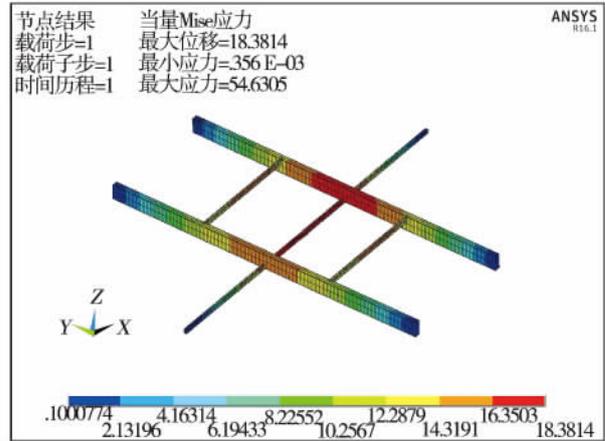


图 7 支撑钢梁变形分布云图

Fig. 7 Deformation distribution of support beams

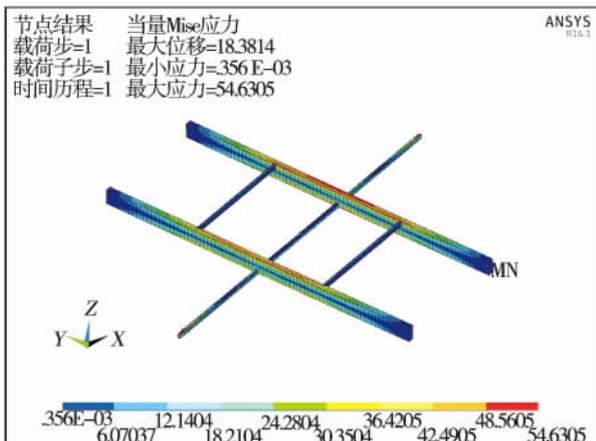


图 6 支撑钢梁应力分布云图

Fig. 6 Stress distribution of support beams

可见 , 钢梁变形相对较小 , 母管与钢梁的整体结构改进主要受限于母管的强度与变形。减少钢梁数量后 , 抱箍点相应减少 , 局部支管的变形挠度增大 , 趋近于允许的挠度限值 , 需采取措施减少其挠度 , 保证一定的设计裕量。

进一步分析后发现 , 中心支管的变形挠度过大是由于母管整体结构随着梁的变形而一起变形所导致的。梁的最大挠度位于中心位置 , 虽然与梁的长度相比其挠度很小 , 但由于母管与梁为整体悬吊结构 , 母管会随着梁一起下沉。中心位置支管与梁一起沉降 , 而支管的另一端支撑于塔壁槽钢支托上 , 由于焊接固定于塔壁 , 不会随着梁的下移而移动 , 因此

3.3 二次改进后的结构模拟

初步改进后结构模拟发现的问题 , 拟采取以下措施决: (1) 将中心末端 8" 支管管径扩大至 12"; (2) 将塔壁上槽钢支托位置预先下移 10 mm (即空载安装时支托顶低于支管底 10 mm)。二次改进后重新进行计算 , 结果显示钢梁并无变化 , 因此只分析母管 , 具体结果如图 8、图 9 所示。

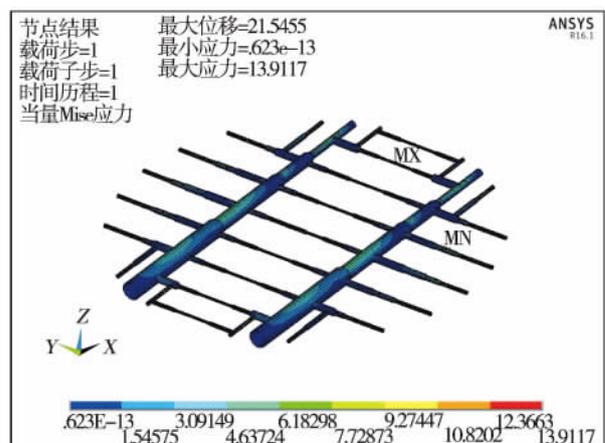


图 8 二次改进后喷淋母管的应力分布云图

Fig. 8 Stress distribution of spray pipe after second improvement

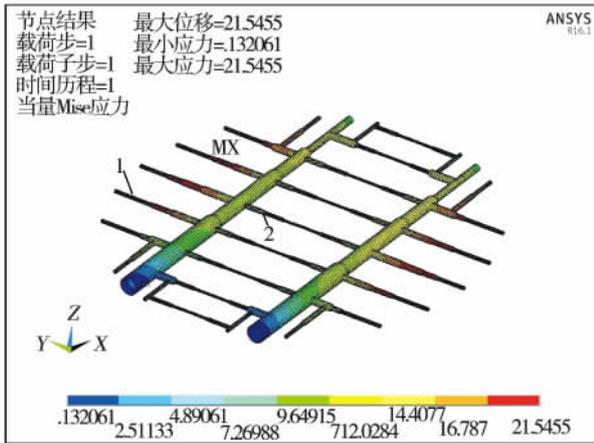


图 9 二次改进后喷淋母管的位移分布云图
Fig. 9 Displacement distribution of spray pipe after second improvement

二次改进后,母管最大应力为 13.92 MPa,小于其许用应力 25 MPa,留有一定余量。最大变形位移为 21.55 mm,位于中心区域的支管中间位置。同样取塔中心跨距最大的两根支管进行评定,结果如下。

表 3 二次改进后支管挠度

Tab. 3 Branch deflection after second improvement

| 名称 | 支管长度 L /mm | 最大挠度 w_{max} /mm | 允许挠度 $w(1/400L)$ /mm |
|------|-----------------|-----------------------|-------------------------|
| 支管 1 | 4 440 | 8.1 | 11 |
| 支管 2 | 2 760 | 4.3 | 6.9 |

可见,图 9 中支管 1 的最大挠度减小,而支管 2 的最大挠度增大,充分利用了结构的整体刚性,结构的位移分布更加合理。

由于空载时使塔壁上槽钢支托下移了 10 mm,运行过程中母管内部充满浆液,最大变形为 21.55 mm,母管会自然变形下沉搁置在支托上。但安装过程中母管内部并无浆液,母管自重产生的变形是否能够使其下沉搁置在支托上,为避免端部悬空导致母管安装时无法进行准确定位后缠绕。因此需要对此进行验证,以保证施工质量。

为验证该问题,在模拟过程中去掉母管中浆液的质量,而仅考虑安装时母管自重下梁与母管本体的变形。同样只评价母管,计算结果如下。

据计算结果可知:安装过程中,母管内部无浆液时,母管的最大位移为 10.7 mm,位于中心处的支管

末端。由于支管均是连接于 2 根母管上,对于连接的根部位置,其变形位移与母管的变形位移应具有一致性。在没有塔壁上支托限制支管位移的前提下,支管与母管连接处的位移变化值与支管另一端的位移变化值一致。这样才能保证支管端部搁置于支托之上。如图 10 所示,将支管重新编号,分别取出每个支管与母管连接处的位移,具体如表 4 所示。

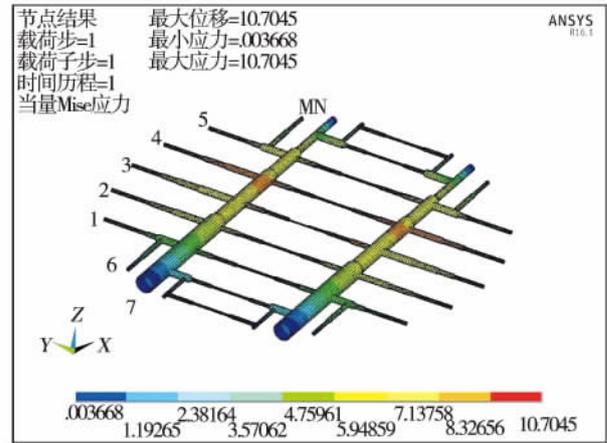


图 10 安装时喷淋母管的位移分布云图
Fig. 10 Displacement distribution of spray pipe during installation

表 4 支管位移数据

Tab. 4 Displacement of branch pipe

| 名称 | 支管 1 | 支管 2 | 支管 3 | 支管 4 | 支管 5 | 支管 6 | 支管 7 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 位移/mm | 5.5 | 7.4 | 8.2 | 8.4 | 7.9 | 5.4 | 2.5 |

图 10 可知支管 2~5,空载安装时支管端部支托下降 8 mm;支管 6 连接于支管 1 上,其变形与支管 1 基本相同,安装时支管端部支托下降 5 mm;而由于支管 7 的位置靠近母管进口,且由于母管进口刚性较好,变形仅为 2.5 mm,支托可不上降。

综上所述,母管端部的应力可采用加大管径的方法降低;局部支管的变形挠度可采用下移塔壁支托的方法减小,支托的下移距离根据母管空载时的变形来确定,调整后母管整体变形挠度分布更为合理。

由于改进后的钢梁结构主梁与喷淋母管垂直,母管进口处无法采用原先的支撑方式,即通过在塔内支撑梁上焊接外伸梁来支撑塔外循环浆液管,需要在塔外设三角架和塔壁加强筋来单独支撑,该部

分增加的材料约重 2.5 t, 因此整体优化后该结构大约可节省钢梁 5 t。而对于改进后支撑钢梁的防腐, 虽然设计时已考虑喷淋避开支撑梁与管道, 但喷嘴安装时可能存在偏差, 为安全起见, 在原防腐基础(衬胶或涂鳞)上, 增加一层 PP 板防腐包覆层。

4 结 论

本文采用 ANSYS 有限元分析软件对石灰石湿法脱硫工程中喷淋系统支撑件进行了结构分析, 综合考虑了各部分重力的影响, 得出以下结论:

(1) 脱硫喷淋管与支撑钢梁的应力和挠度会相互作用和影响, 整个系统受力复杂不能孤立计算, ANSYS 软件的有限元分析方法有利于脱硫塔喷淋层结构的精准设计;

(2) 原支撑系统设计思路偏保守, 采用相应改进措施后, 针对 16 m 塔径吸收塔, 一层喷淋层支撑钢梁可减少碳钢量 5 t, 抱箍合金用量 200 kg, 节约了建设成本;

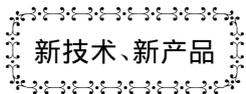
(3) 设计改进后的钢梁整体强度、刚度均符合规范要求, 喷淋系统安全、可靠;

(4) 新的支撑形式更适合布置双向喷嘴, 双向喷嘴较单向喷嘴更有利于脱硫效率的提升。

参考文献:

- [1] 代旭东, 王美春. 湿法脱硫吸收塔喷淋层分析方法与优化设计 [C]. 2014 中国环境科学学会学术年会(第六章). 2014.
DAI Xu-dong, WANG Mei-chun. Analysis method and design optimization of spray layers for wet desulfurization absorption tower [C]. 2014 Academic Annual Meeting of China Environmental Science Society 2014, Chapter 6.
- [2] 秦福初, 王厚林, 刘艳荣. 脱硫吸收塔喷淋系统的结构优化分析 [J]. 中国资源综合利用. 2013(7).
QIN Fu-chu, WANG Hou-lin, LIU Yan-rong. Structure optimization analysis of spray system for the desulfurization absorption tower [J]. Comprehensive Utilization of Resources of China 2013, 7.
- [3] 谭学谦. 浅谈超大型机组湿法脱硫吸收塔喷淋系统优化设计 [C]. 600/1 000 MW 超超临界机组技术交流 2010 年会. 2010.
TAN Xue-qian. Introduction to spray system optimization for ultra large wet desulfurization absorption tower [C]. 2010. 600/1 000 MW Ultra Supercritical Unit Technical Exchange Annual Conference 2010.

(姜雪梅 编辑)



新技术、新产品

把水套内水的热量转换成电力

据《Motor Ship》2015 年 10 月刊报道, 和 MHI(三菱重工)合作, Calnetix Technologies 已经研制出一种把来自发动机水套内水的热量转换成电力的新系统。

该液压流动系统由闭合回路 ORC(有机朗肯循环)模块、IPM(集成动力模块)和电气柜组成。循环从被储存在接收罐内的压力略高于大气压力和温度、略高于海水几度的工作流体开始。该流体被加压到更高的压力并使之循环到蒸发器, 在该处它吸收来自发动机水套内水的热量并汽化。然后, 被增压的蒸汽通过 IPM 的涡轮膨胀; 涡轮驱动发电机, 生产电力。工作流体在冷凝器内被冷却到液体状态, 并最终回到接收罐, 重复该循环。

应用表明, 该系统能生产 125 kW 电力, 节省 200 t 燃料舱储用燃料, 每年减少 18 t CO 排放。

(徐立民 提供, 吉桂明 译)

tra-supercritical unit was studied based on the simple calculation method for thermal system and equivalent enthalpy drop method. By installing the regenerative back pressure turbine, the steam from the high-pressure cylinder of the unit will continue to expand in the regenerative turbine to provide extracted steam for the regenerative heaters. With lower superheat degree in the extraction steam, the irreversible loss inside regenerators is reduced and the efficiency of the unit is improved. Calculation results show that the standard coal consumption rate could be decreased by $0.38 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ when the relative internal efficiency of the regenerative turbine is 0.86. The regenerative turbine can be used to drive the feed water pump, replacing the original feed water pump turbine. The benefits include the reduction the costs of devices and additional power available. When the relative internal efficiency of the regenerative turbine is not high enough, adopting the NO.8 extraction as regenerative turbine's gas source could improve the operation reliability of feed water pump. **Key words:** Regenerative turbine, reheat extraction, Shortcut calculation, Equivalent enthalpy drop

脱硫喷淋管支撑件整体建模及设计改进 = **The overall Modeling and Design Improvement of Desulfurization Spray Pipes** [刊 汉] ZHONG Sha, ZHENG Huan-qi (Zhejiang Tiandi Environmental Protection Technology Co. , LTD ,Hangzhou ,Zhejiang ,China ,Post Code: 310003) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016, 31(6) . - 114 ~ 119

In order to enhance the desulfurization efficiency, it is an efficient method to upgrade the spray system which is the key component of the Limestone-Gypsum WFGD System. Usually increasing the numbers of spray layers and altering the nozzles style are the typical methods for raising the ratio of liquid to gas. In this paper, an integrated finite element model of a spray layer including steel support beams and spraying pipes was established in finite element software. By analyzing this finite element model, the status of strain and stress under different loads was obtained, which implies the direction of improvement. Finally the steel support beams were optimized by reducing the mass of steel while maintaining the structural reliability. **Key words:** wet desulphurization, spray pipes, spray nozzles, support beams