

「锅炉设计」

# 1 050 MW超超临界机组锅炉炉顶密封优化设计改进

文/神华国神集团公司 孙希强

大型电站锅炉顶部密封设计、安装是一个既复杂又烦琐的工作，是设计、安装人员公认的难题。结合工程实践案例，分析、总结了东方锅炉厂在神华万州电厂 $2 \times 1\,050\text{ MW}$ 机组项目上对锅炉炉顶密封优化设计改进，通过锅炉运行一年以上表明，炉顶及穿墙部位密封达到了良好的效果，2台锅炉每年可节约费用约为676万元，该锅炉炉顶密封设计能够对类似工程炉顶密封起到借鉴作用，避免炉顶密封泄漏频繁发生，增加后期设备维护及运营成本。

神华万州港电公司新建 $2 \times 1\,050\text{ MW}$ 高效一次再热超超临界燃煤机组，锅炉为东方锅炉厂制造，型号为DG3035/29.3-II3 29.40 MPa(a)/605℃/623℃，采用一次中间再热变压运行直流炉，采用平衡通风、单炉膛、前后墙对冲燃烧方式、固态排渣、露天布置、全钢构架悬吊结构Π型锅炉，锅炉除渣方式采用湿式捞渣机除渣。

锅炉设计效率（BRL工况下）为94.54%，炉膛容积热负荷为 $62.76\text{ kW/m}^3$ ，炉膛漏风系数为0.06。而影响锅炉效率的最主要的因素即为排烟热损失与机械未完全燃烧热损失，排烟热损失约占锅炉热损失的80%，炉膛漏风增大后造成锅炉烟气量增加，相应的排烟热损失的比重增大。相关研究表明，烟气量增加1.5%，排烟热损失增加0.01%。锅炉主要的漏风部位为锅炉底部冷灰斗、炉膛本体水冷壁管穿墙部位、各人孔、看火观测孔、炉膛顶部膨胀密封结构以及尾部烟道的密封焊接部位。其中，锅炉设计安装结构整体上采取悬吊结构，锅炉整体全部重量通过大量的支吊架方式传递至锅炉钢架，锅炉在不同热态工况下运行，炉膛与其顶部的支吊结构产生相对运行，各固定与活动结构之间必须有相应的间隙。锅炉正常运行中，炉膛维持负压运行，各固定与活动结

构之间必须有相应的间隙密封不良，就会造成大量的冷空气漏入炉膛，影响锅炉的排烟热损失。

因此，做好炉顶密封、减少漏风率对降低排烟热损失也很重要，也是保证锅炉效率的关键。从近年来投运的机组来看，对锅炉炉顶密封设计不够重视，特别是一次密封设计不合理，存在密封拉裂、密封性能差等问题造成了锅炉漏风率大、现场安全文明生产环境差、炉顶散热损失大，后期被动实施改造，增加了企业的生产成本。

本文主要介绍了东方锅炉厂在本项目上对锅炉炉顶一次密封的改进，旨在通过总结经验，对一次密封优化设计改进，从密封结构、安装工艺、针对不同部位密封特点进行了密封改进，能够对类似工程炉顶密封起到借鉴作用，避免类似问题重复发生。

## 炉顶密封的基本结构及其特点

炉顶密封分成两部分。一是由水冷壁、过热器、再热器、吊挂管在穿出炉顶管处构成的高温烟气流道界面以隔离热烟气的气密封；二是对炉顶及炉顶上各集箱管道进行的保温密封。前者通常称作一次密封，后者称作二次密封。

炉顶一次密封是指在炉顶穿墙根部和接缝根

部以及所有受热面系统穿出顶棚处，用加装金属件来实现的密封。在一次密封方面，为适应各种穿墙管在不同温度下热膨胀，并承受烟气侧的压力，针对不同的受热面系统，穿墙处采用不同的全焊、可膨胀金属密封来阻隔热烟气的泄漏。

炉顶二次密封是指在炉顶及炉顶上各集箱管道上设置大罩壳结构以实现保温密封。大罩壳内侧敷保温层，外壳采用梯形金属护板，各吊杆穿顶护板处密封。同时还对屏过、高再、高过及高温管道进行集中式保温（大罩壳内其余低温管道和小管道不保温）。典型的炉顶密封结构示意图如图1~图3所示。

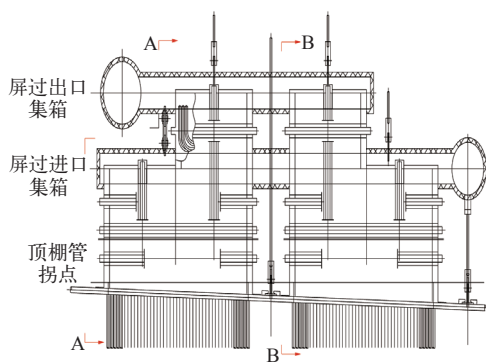


图1 屏式过热器穿顶棚处结构

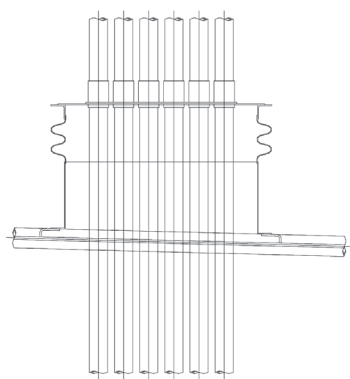


图2 高温过热器、高温再热器穿顶棚处密封结构

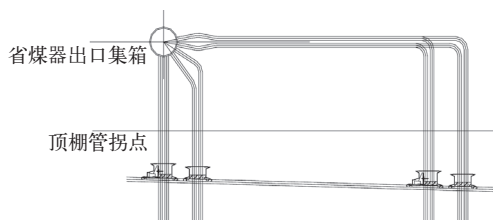


图3 吊挂管穿顶棚处密封结构

锅炉顶护板（也称炉顶大包）是锅炉顶部的一个护板结构，属锅炉顶部的二次密封设计。由于锅炉炉顶布置有大量的高温高压管道以及吊

杆，若每根管道单独敷设保温存在空间狭小施工困难等问题。同时，如果一次密封不好也存在漏灰、污染环境等问题。所以在锅炉顶部设置顶护板可以减少锅炉管道的保温施工工作量、保持锅炉的外观整洁。

神华万州港电公司1 050 MW超临界直流锅炉的顶护板是按照气密性结构设计的，在顶护板的顶部、底部、四周立面均铺设钢板。保温敷设在钢板外侧，保温外侧覆设压型板，顶护板的钢板、型钢受热。炉顶所有吊杆穿顶护板的位置，设置有金属膨胀节，四周立面所有连接管穿顶护板的位置，设置有非金属膨胀节。

神华万州港电公司1 050 MW超临界直流锅炉顶棚穿管较多，有水冷壁、过热器、再热器、包墙悬吊管等穿出顶棚，同时支吊顶棚及受热面的吊杆也特别密集，这种复杂的顶棚结构给炉顶密封的设计、安装带来诸多困难。为此，做好炉顶的密封设计和安装是保证锅炉密封性能，以及投运后能否安全、经济运行的基本条件。该炉炉顶密封设计具有如下特点：

- 1) 穿顶棚管采用单屏单密封盒与多屏密封盒结构，减少了焊接数量。
- 2) 膨胀问题考虑全面，针对不同部位膨胀特点，设置了折板吸收炉宽度、深度或高度方向膨胀，穿顶棚管采用波纹管膨胀接头。
- 3) 穿顶棚管采用插入式密封结构，便于现场安装焊接，降低劳动强度。
- 4) 炉顶穿墙与顶棚管之间安装无焊接式梳形板，减少烟气泄漏。
- 5) 过热器、再热器受热面管排穿顶棚处采用热套筒式密封结构。
- 6) 炉顶及炉顶上各集箱管道上设置大罩壳结构。
- 7) 各吊杆穿顶护板处采用筒形填料密封。

## 炉顶各部位一次密封设计改进对比

目前，炉顶密封主要有全焊接密封、箱形密封、塑膜防漏，全焊接密封焊接工作量大，易产生焊接缺陷，塑模防漏成本高。因而，普遍还是采用箱形密封形成，东锅设计百万超超临界锅炉也都采用这种方式，但是，早期投运机组炉顶密封主要存在密封板容易拉裂、贯穿性密封盒焊接应力大开裂、密封材料不足以吸收膨胀等问题，通过总结经验，对万州港电公司锅炉炉顶一次密

封改进,其各部位改造结构如下。

### 1. 顶棚与前墙水冷壁密封

锅炉炉膛尺寸为 $33.973\,4\,\text{m} \times 18.828\,4\,\text{m} \times 72.5\,\text{m}$ ,前墙锅炉水冷壁管子规格 $\phi 31.8\,\text{mm} \times 7.5\,\text{mm}$ ,材质12Cr1MoVG,节距 $63.5\,\text{mm}$ ,管子数量 $534 \times 2$ 根。顶棚管子规格 $\phi 63.5\,\text{mm} \times 10\,\text{mm}$ , $\phi 57\,\text{mm} \times 9\,\text{mm}$ ,材质12Cr1MoVG、15CrMoG,管子数量296根,节距114.3。顶棚管固定装置安装沿炉宽度方向每隔 $1.5\,\text{m}$ ,共计22个。

改进前,该部位采用大密封盒结构,如图4所示。主要存在密封焊接工作量大,膨胀沿着炉深度、高度方向上考虑不足,运行中容易出现密封焊缝拉裂。改进后,如图5所示,取消了该部位的大密封盒结构,改为折板连接,折板两端直接与密封塞块焊接,同时折板按 $2\,\text{m}$ 左右分段,相邻板间留 $30 \sim 100\,\text{mm}$ 左右间隙,在此中间用小密封盒连接,中间固定处采用小密封盒结构。

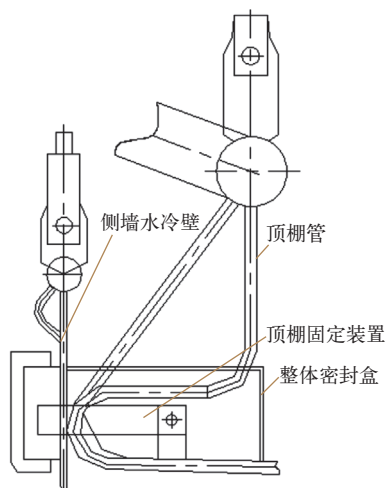


图4 大密封盒结构

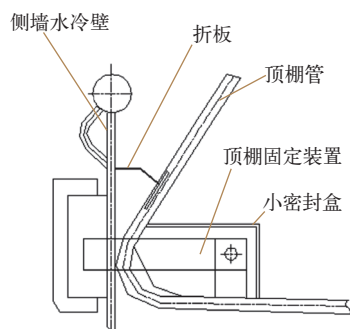


图5 折板小密封盒结构

改进后优点:结构简单,易于安装,焊接工作量少,充分考虑了沿炉宽度、高度、深度三个

方向的膨胀问题。

### 2. 炉顶棚与侧墙水冷壁密封

锅炉侧墙水冷壁管子规格 $\phi 31.8\,\text{mm} \times 7.5\,\text{mm}$ ,材质12Cr1MoVG,节距 $63.5\,\text{mm}$ ,管子数量 $264 \times 2$ 根。

改进前采用如图6所示的双Z形折板结构,改进后采用如图7所示的分段式单Z形折板结构,Z形折两端直接与水冷壁和顶棚上预埋密封塞块焊接,板在垂直段采用波形板,Z型板按长度 $2\,\text{m}$ 左右分段,相邻板间留 $100\,\text{mm}$ 左右间隙,在此间隙之间加装小密封盒。

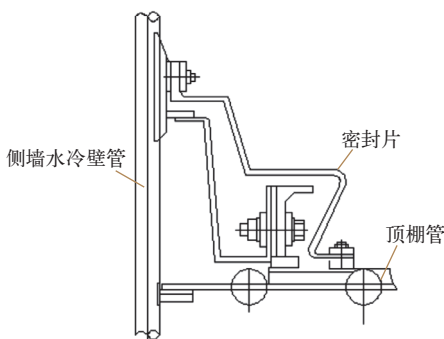


图6 双Z形折板结构

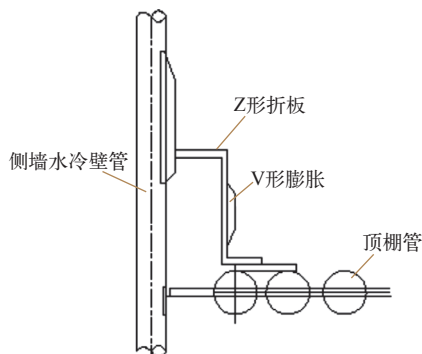


图7 分段式单Z形折板结构

改进后优点:优化了密封结构,增加沿炉宽度方向膨胀,减少安装工作量。

### 3. 屏过穿顶棚管密封

屏过布置在炉膛上部区域,在炉深方向布置了2排,两排屏紧挨着布置,每一排管屏沿炉宽方向布置19片,屏间距为 $17.15\,\text{m}$ ,每根管子规格 $\phi 51\,\text{mm} \times 8.5\,\text{mm}$ 、 $\phi 45\,\text{mm} \times 7.5\,\text{mm}$ 。改进前密封为大密封盒结构,改进后为单屏单密封盒结构,其主要特点是单屏单密封盒尺寸减少,数量增多,膨胀自由度高。

改进后,将密封盒缩短到管屏穿出顶棚管外约 $350\,\text{mm}$ ,密封钢板与屏过管之间预埋了2块半圆

快, 梳型板与预埋件密封焊接。中间布置膨胀节  $\delta 3$  mm, 12Cr1MoV。

改进后优点: 密封结构合理, 膨胀量适应性更好, 避免局部密封不良造成整体密封泄漏。

#### 4. 低再、低过穿顶棚密封

低再管子规格  $\phi 57$  mm  $\times$  4.5 mm, 材质 SA-213TP347H, 沿炉宽度方向节距 228.6 mm, 共 148 排, 低过管子规格  $\phi 51$  mm  $\times$  10 mm, 材质 12Cr1MoVG, 沿炉宽度方向节距 228.6 mm, 共 148 排。

改进前如图 8 所示的小间隙现场密封焊接结构, 改进后如图 9 所示的现场插入式密封焊接结构, 将膨胀节下方的两块 L 形折板合并成一块 V 形折板, 在地面分别于两个膨胀节焊接后, 再将组装好的膨胀节、V 形折板以及垫板等整体从管排侧面插入管屏间。

改进后优点: 现场易于安装, 提高安装效率, 有效避免焊接缺陷。

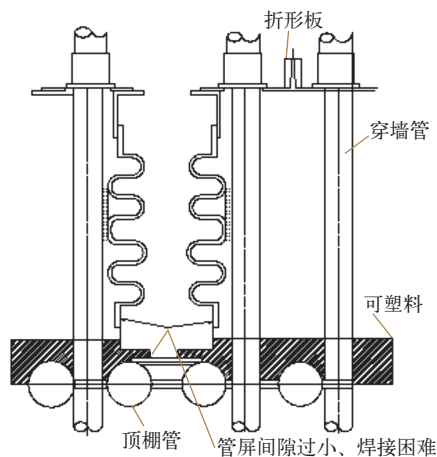


图8 小间隙现场焊接结构

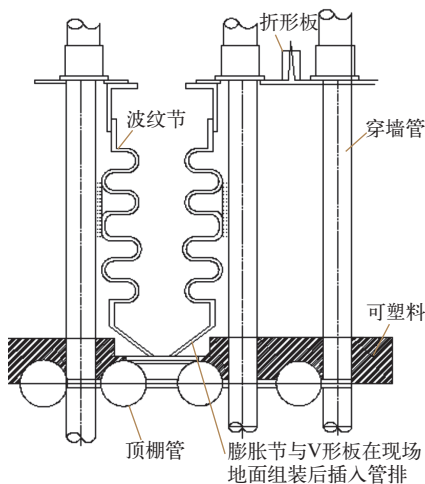


图9 现场插入式密封焊接结构

#### 5. 高过、高再管排穿顶棚根部密封

高温过热器布置在折烟角上部区域, 沿炉宽方向布置 36 片屏, 屏间距为 914.4 mm。高温过热器穿顶棚的密封, 与屏过穿顶棚密封结构基本相同, 这里不再做详细说明。凝渣管位于后墙水冷壁上上部, 在炉宽方向布置了 66 根管子 ( $\phi 76 \times 20$ ), 单根结构, 管间距为 523.9、504.8 交错布置。凝渣管穿顶棚密封采用多根管子连体密封盒结构, 每根管子之间用折板  $\delta 3$ , 12Cr1MoV 连接, 用于吸收沿炉宽方向的膨胀。每根管子与顶棚连接处都有一个独立的膨胀节  $\delta 3$ , 12Cr1MoV, 用于吸收高度方向的胀差。密封盒内部敷设轻质保温材料。在安装时, 在烟气能接触密封钢板的部位其空间内填充保温材料或用耐火材料隔离, 折板、钢板在填充保温材料或耐火材料后密封。

高温再热器布置在水平烟道上部区域, 在炉宽方向布置了 74 屏, 屏间距为 457.2 mm。高再穿顶棚密封采用单屏单密封盒结构。将密封盒做到管屏穿出顶棚管外约 400 mm 处, 中间布置膨胀节  $\delta 3$ , 12Cr1MoV。密封盒内部敷设轻质保温材料。在安装时, 在烟气能接触密封钢板的部位其空间内填充保温材料或用耐火材料隔离, 折板、钢板在填充保温材料或耐火材料后密封。

锅炉顶棚管子受热不均, 各管排之间的膨胀量不一致, 可塑料及保温料易受到挤压后密封处易开裂漏风。因此, 改进后, 在穿顶棚管与顶棚管之间及膨胀节上盖板之间增设梳形板, 如图 10 所示的穿顶棚处增加梳形板结构, 梳形板与顶棚管不焊接, 与穿顶棚管也不焊接, 并留有足够的间隙, 以保证管子的自由膨胀。

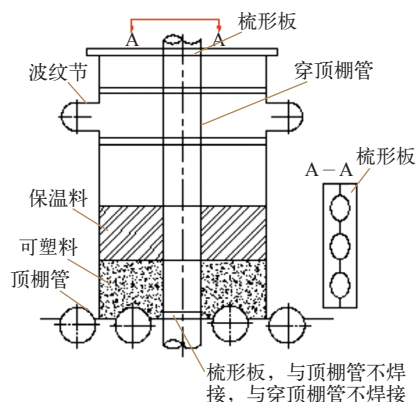


图10 穿顶棚密封结构

改进后优点: 减小了穿墙密封间隙, 避免因

可塑料损坏漏风增大，密封性能良好。

#### 6. 屏过、高过、高再密封盒膨胀节密封

改进前采用焊接式尖交膨胀节结构，改进后如图11所示的整体成形式圆角膨胀节，将尖角改为圆角，端部位180°，对接由角部改到直段，整体压制成形，膨胀节尺寸R20 mm增加为R30 mm。

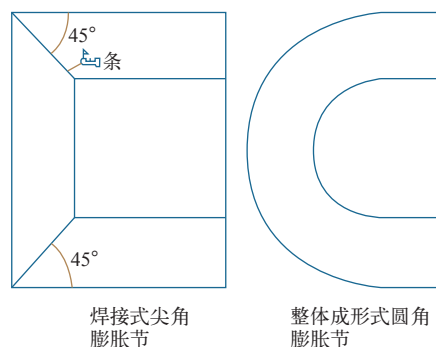


图11 密封盒膨胀节

改进后优点：降低尖角应力集中，整体压制结构强度高，易于吸收膨胀。

#### 7. 后竖井前包墙穿顶棚管密封装置

后竖井前包墙上部穿顶棚位置，在炉宽方向布置了99排管子，管间距为342.9 mm。每排有2根或者3根管子，其中一根为承重管 $\phi 54 \times 15$ ，其余为 $\phi 38.1 \times 7$ 。前包墙穿顶棚密封采用多排管子连体密封盒结构，每排管子之间用折板 $\delta 3$ ，12Cr1MoV连接，用于吸收沿炉宽方向的膨胀。密封盒与顶棚连接处设有膨胀节 $\delta 3$ ，12Cr1MoV，用于吸收高度方向的胀差。密封盒内部敷设轻质保温材料。在安装时，在烟气能接触密封钢板的部位其空间内填充保温材料或用耐火材料隔离，折板、钢板在填充保温材料或耐火材料后密封。

改进后优点：有效吸收了高度方向上的膨胀，膨胀节为整体结构，现场安装简单，同时采用折板结构容易吸收宽度方向的膨胀。

#### 8. 后竖井中隔墙穿顶棚管密封装置

后竖井中隔墙上部穿顶棚位置，在炉宽方向布置了148排管子，管间距为228.6 mm。每排有2根管子， $\phi 38.1 \times 7$ 。中隔墙穿顶棚密封与后竖井前包墙穿顶棚管密封结构基本相同。

#### 9. 后竖井后包墙穿顶棚管密封装置

后竖井后包墙与锅炉顶棚之间采用整体密封盒结构。后竖井包墙管屏与顶棚之间用折板 $\delta 3$ 、12Cr1MoV连接，折板可以吸收两者之间沿深度和高度方向胀差。沿炉宽方向每隔650 mm，加装单

波节 $\delta 3$ 、12Cr1MoV以吸收前后方向胀差。

改进后优点：采用单波节结构，吸收宽度方向的膨胀。

### 万州电厂炉顶密封改进效果及效益估算

万州电厂2台机组分别于2015年2月、2015年6月投产运行，至今已运行有二年多时间，经过几次停炉检查，炉顶大包、穿墙等部位均无任何漏风、漏灰问题，炉顶密封效果较好。同时，对炉顶密封保温效果测试，结果表明2台机组的炉顶表面温度均小于70℃。

锅炉燃用神华烟煤，1#机组在额定负荷工况下，锅炉出口氧量为2.5%~2.8%，锅炉效率为95.42%。引风机电耗率仅为0.75%，低于2014年全国火电机组竞赛1000 MW湿冷机组的平均水平1.1%。在经济效益上，按照锅炉漏风增加1%，厂用电率增加0.2%计算，机组全年平均负荷率按照75%计算，全年运行5000 h，1 kW·h电成本为0.45元。根据测算，两台锅炉每年节能产生的经济效益为675万元，同时也节省了大量的炉顶清灰等维护费用。

### 结束语

万州电厂在炉顶密封结构设计上进行了改进，使用效果良好，达到了运行炉顶密封不漏灰的目的，改善了炉顶的环境气氛，降低了后期因漏风增加的生产经营成本的增加，2台机组每年节约产生的经济效益为675万元。在后续的新建的神华皖能安庆2×1000 MW、神华国华寿光2×1000 MW项目上均采用了此种炉顶密封方式，具有很好的推广应用价值。EA

(收稿日期：2017.08.17)

(编辑：白文亭)

### 更正

本刊2017年第10期“市场纵横”栏目刊登的“电力行业数据中心一体化运维管理研究”一文的作者中“李继伟”应为“李济伟”。

特此更正。

电气时代编辑部