空气预热器

空气预热器（air preheater）也被简称为空预器，是提高锅炉热交换性能，降低热量损耗的一种预热设备。空气预热器的作用，是将锅炉尾部烟道中排出的烟气中携带的热量，通过散热片传导到进入锅炉前的空气中，将空气预热到一定的温度。

一般简称为空预器。多用于燃煤电站锅炉。可分为管箱式、回转式两种，其中回转式又分为风罩回转式和受热面回转式两种。电站锅炉较常采用受热面回转式预热器。在锅炉中的应用一般为两分仓、三分仓、四分仓式，其中四分仓较常用于[循环流化床锅炉](https://baike.baidu.com/item/%E5%BE%AA%E7%8E%AF%E6%B5%81%E5%8C%96%E5%BA%8A%E9%94%85%E7%82%89)中。

工作原理

以回转式空气预热器为例说明空气预热器的原理，在工作时会缓慢的旋转[2]  ，烟气会进入空预器的烟气侧后再被排出，而烟气中携带的热量会为空预器中的散热片所吸收，之后空预器缓慢旋转，散热片运动到空气侧，再将热量传递给进入锅炉前的空气。

空气预热器在锅炉中的应用多为三分仓式，附带有火警报警系统、间隙调整系统和变频控制系统。空气预热器的使用方便、操作简单、运行安全，并能提高锅炉系统的热交换性能，因此在烟气锅炉系统中有很普遍的使用。

作用

1、 改善并强化燃烧[3]

经过余热器后的空气进入炉内，加速了燃料的干燥、着火和燃烧过程，保证了锅炉内的稳定燃烧，提高了燃烧效率。

2、 强化传热

由于炉内燃烧得到了改善和强化，加上进入炉内的热风温度提高，炉内平均温度水平也有提高，从而可强化炉内辐射传热。

3、减小炉内损失，降低排烟温度，提高锅炉热效率

由于炉内燃烧稳定，辐射热交换的强化，可以降低化学不完全燃烧损失；另一方面空气预热器利用烟气余热，进一步降低了排烟损失，因此提高了锅炉热效率。根据经验，当空气在预热器中升高1.5℃，排烟温度可以降低1℃.在锅炉烟道中安装空气预热器后，如果能把空气余热150-160℃，就可以降低排烟温度110-120℃，可将锅炉热效率提高7%-7.5%。可以节约燃料11%-12%。

4、热空气可以作燃料干燥剂

对于层燃炉，有热空气可以使用水分和灰分较高的燃料，对于电站锅炉，热空气是脂粉系统的重要干燥剂和煤粉输送介质。

分类

按空气预热器的传热方式可将空气预热器分为导热式和再生式两大类。在导热式空气预器中最常用的是管式空气预热器。随着锅炉参数的提高和容量的增加，管式空气预热器的受热面也增大，这给尾部受热面的布置带来了困难。因此，在大容量机组中多数采用结构紧凑、质量较轻的回转式空气预热器。空气预热器一般分为板式、回转式和管式三种[4]  。

板式

这种空气预热器多用1.5-4mm的薄钢板制成。将钢板焊接成成长方形的盒子，将若干盒子拼成一组，整个空气预热器由2-4个盒子组成。烟气由上向下通过，经过盒子外侧，空气则横向通过盒子的内部，在下部转弯向上，两次与烟气交互传递能量，使烟气与空气形成逆向流动，获得较好的传热效率。

板式空气预热器由于耗用刚才较多，结构不紧凑；焊缝多且易渗漏，现在很少采用。

管式型

管式空气预热器的主要传热部件是薄壁钢管。管式空气预热器多呈立方形，钢管彼此之间垂直交错排

列，两端焊接在上下管板上。管式空气预热器在管箱内装有中间管板，烟气顺着钢管上下通过预热器，空气则横向通过预热器，完成热量传导。

管式空气预热器的优点是密封性好、传热效率高、易于制造和加工，因此多应用在电站锅炉和工业锅炉中。管式空气预热器的缺点是体积大、钢管内容易堵灰、不易于清理和烟气进口处容易磨损。

回转式型

回转式空气预热器是再生式空气预热器最常见的形式，它是利用烟气和空气交替地通过金属受热面来加热空气。回转式空气预热器按运动方式可分为受热面转动和风罩转动两种，本炉的两台空气预热器为三分仓受热面旋转式空气预热器。

转子旋转式空气预热器由圆筒形转子和固定的圆筒形外壳及[驱动装置](https://baike.baidu.com/item/%E9%A9%B1%E5%8A%A8%E8%A3%85%E7%BD%AE)组成。

回转式空气预热器又可分为两种型式：一种是受热面旋转的转子回转式，另一种是风道旋转的风道回转式。

转子回转式空气预热器是由转动的圆形转子和固定的外壳组成，转子式受热面，它被分为许多仓格，里面装有蓄热板，蓄热板吸收燃气热量并蓄积起来，等到转至空气那面，再将袭击的热量释放给空气，自身温度降低。受热面不断旋转，热量便会不断从烟气传送给空气，空气得到加热，烟气冷却，这是回转式空气预热器的工作原理。

回转式空气预热器的主要优点是体积小、重量轻、传热元件允许有较大磨损，因此特别适合大型锅炉使用，缺点是结构复杂，且消耗电力，漏风量较大。

附带系统

回转式预热器主要有火灾报警（热点探测）、间隙调整、[变频](https://baike.baidu.com/item/%E5%8F%98%E9%A2%91%22%20%5Ct%20%22_blank)控制、[润滑油系统](https://baike.baidu.com/item/%E6%B6%A6%E6%BB%91%E6%B2%B9%E7%B3%BB%E7%BB%9F)、转子停转报警系统、吹灰和[清洗系统](https://baike.baidu.com/item/%E6%B8%85%E6%B4%97%E7%B3%BB%E7%BB%9F)等。

影响回转式空气预热器性能的关键问题是[1]  ：漏风、腐蚀和堵灰。在设计

[管式空气预热器](https://baike.baidu.com/item/%E7%AE%A1%E5%BC%8F%E7%A9%BA%E6%B0%94%E9%A2%84%E7%83%AD%E5%99%A8)时，应合理地选用空气流速和管箱尺寸，或者沿气流方向加装防振隔板，以防止引起空腔共振。防振隔板还有消除噪声的作用。回转式空气预热器的漏风是一个重要问题，应从设计、制造、安装和运行等方面采取措施，使其在热状态下动静组件之间保持合理的密封间隙。燃用高硫燃料时，管式和回转式预热器均易产生腐蚀和堵灰。防止的措施有：在空气进口处加装暖风器或采用热风再循环；采用低氧燃烧或掺烧添加剂，以减少烟气中SO2 气体的生成量；定期吹灰，以保持受热面清洁；受热面采用耐腐蚀的材料等。

着火原因

**着火原因分析**

大量未燃尽的可燃物沉积在传热元件上是空预器着火的必要条件，也是关键所在。空预器的传热元件由薄板组成，排列很密，单位体积受热面很高，在其下部金属温度低，低负荷运行时最低，很容易积灰。在锅炉最初调试阶段，在点火（油点火）以及长期低负荷运行的情况下（投油），因燃烧不完全，从炉膛带来的凝结油雾和未燃尽的可燃物堆积在空预器中层下部及冷端传热元件上，这是着火的根源。

造成大量油雾和未燃尽可燃物堆积在空预器上的主要原因有：

⑴机组设备故障多，运行调试人员经验不足，造成调试周期过长，烧油过多，而且燃烧不好；

⑵油压或雾化汽压不适当，汽孔、油孔堵塞，雾化不佳；

⑶配风不当；

⑷点火器漏油；

⑸长期低负荷运行，锅炉启停次数多；

⑹空预器吹灰器未能有效投入。在锅炉启动和低负荷运行时，由于冷端金属温度低，使空预器易积灰，这时应加强吹灰。然而由于某些原因启动初期吹灰介质的汽压和汽温不足，过热度低，吹灰效果不理想。

**着火的预防措施**

尽量减少在空预器上沉积未燃尽可燃物

其关键是使燃料完全燃烧。用油点火及低负荷投油时，油温、油压、汽压应合适，使油雾化良好，配风正确；油枪不堵塞，不漏油；燃烧稳定、充分，以尽量减少未燃尽的可燃物。

加强对空预器的监视

机组启动前应对空预器全面检查，若发现或判断空预器有较多未燃尽的可燃物堆积时，决不能投入热态运行，一定要进行水清洗，然后烘干。应保证吹灰器能正常投入，吹灰介质参数合格。

运行过程中，特别是启动、热备用后再启动以及空预器突然停转和停炉后，应严密监视空预器的端点温度（空预器烟风进、出口温度）。若其中的一点或多点温度不正常升高，则应立即分析研究，以便即时发现着火。例如，运行时排烟温度超过正常值30℃左右就预示可能着火，若继续升高就认为已着火，若温度继续升高肯定着火。当停炉后，空预器已停止转动，入口烟温不变或变化很小时，而出口烟温起初缓慢增加，后急剧上升，也表示空预器着火。运行人员应监视炉膛火焰，定期观察烟囱。空预器转子停转后，应观察传动电机电流。

经验表明，着火最有可能发生在停炉后的几小时之内，而此时大部分运行人员已撤离现场，留守人员往往不注意空预器的端点温度，当突然发现着火时，一般已烧了1h以上，使损失增加。因此，熟悉预热器性能和操作规程是监视空预器的前提。

装设着火探测系统

红外线着火探测系统：在空预器空气侧入口或出口安装数个红外线探头，探头做直线运动，在预热器转动时，对所有传热元件进行1次扫描约需10min。若空预器局部着火，发出的红外线超出正常水平，系统就发出报警信号。该系统的优点是灵敏度高，能早期探测出着火情况。这时立即投入大量水灭火，一般很快就能将火扑灭。

有效吹灰

大量的积灰除容易产生着火外，还会降低传热效率、增加空预器的阻力。因空预器冷端最容易积灰，所以通常在空预器出口烟气侧装有吹灰器。为防止着火必须有效吹灰，正常运行时一般8h吹1次；启动期间每4h吹1次；停炉前也应吹灰；点火期间、长期低负荷运行或堵灰严重时应增加吹灰次数。

启动初期，若吹灰蒸汽参数达不到要求，可用压缩空气吹扫。

正确水清洗

空预器吹灰器的作用是有限的，例如空预器中间层下部传热元件易堵灰，吹灰器一般不能清除。因此进行正确的水清洗也很重要。另外，某些可燃物结垢也只能用水冲洗来清除。一般水清洗周期为1~2次/年。水清洗后一定要烘干空预器，否则空预器将很快发生腐蚀、堵灰。

增设消防水系统

在空预器的烟气侧、一次风和二次风侧均装有环行消防水管道，管道上安装数十个喷咀。

**空预热器着火处理**

空预器的着火常起源于中间层下部和冷端传热元件。从局部极小面积着火到大面积燃烧需要较长时间，通常需1~2h，有时更长。为了减少损失，就尽快判断是否着火。通常从空预器端点温度着手，有时通过空预器空气出口入的观察孔观测是否着火，如发现着火应立即关闭观察孔，着火严重时有烟气泄漏或明显辐射，烟囱冒黑烟。

当发现空预器已着火，应立即手动MFT，停止引风机运行，隔离空预器，关闭空预器进、出口挡板。空预器保持转动，消防水和多喷咀清洗水管路立即投入灭火，同时打开烟风道上的排水口。经验表明，用泡沫、化学物或蒸汽来闷熄火焰效果均不好，此时保证消防水量很关键。空预器着火后绝不能打开入孔，防止空气进入助燃。万不得已时，如消防水和清洗水管道故障而没有水投入，可以打开入孔，用电厂消防水灭火。注意灭火一定要彻底，并认真检查决不留后患。

掉闸分析

**一、故障原因**

⑴ 经解体检查发现接触器内部同一槽内主接点（B相）与辅助接点（A相）在送电时引起短路，触头烧毁，分析在减速机油泵热偶动作时，接触器内部已因过热而烧损，送电时引起短路。

⑵ 空预器减速机油泵接线为螺丝压紧线头的方式，受外力作用容易脱开，造成电机缺相运行。

⑶ 运行人员在送电时仅摇测电机绝缘，而未摇测接触器的绝缘（接触器上还有空气开关）。

⑷ 原设计上存在问题，空预器为2路电源，正常运行时分别带1台空预器及其辅助设备运行，2路电源互为暗备用，且为互联动，这样在一路电源发生永久性故障的情况下，另外一路电源自投于故障点上，致使2路电源均失电，造成空预器均停，直接威胁机组正常运行。

**二、采取措施**

⑴ 同一槽内主接点与辅助接点接为同一组。

⑵ 对空预器电机电缆在离接线盒10 cm处进行固定，其它电机有类似情况也同样加固。

⑶ 对有接触器和空气开关的接线，在故障掉闸后检测绝缘时，同时检测接触器上下口绝缘，都合格后方可送电。

⑷ 运行方式上原2路电源各带1个空预器，2路电源为暗备用，应改为明备用或取消自动互联（在1台空预器故障情况下，查明情况后手动送电）。

⑸ 对掉闸设备，检修人员进行处理时应同时检查开关或接触器切断故障后有无烧损等情况。

通过对空预器回路的改造以及运行检修方面采取措施后，空预器未发生类似情况，从而有效地防止了因此导致的停机。

漏风治理

**1、漏风的原因分析**

1） 由于转子转动，必然会将格仓中的空气带入烟气中而形成携带漏风。

2） 由于转子转动，动静之间必然存在间隙，烟气侧为负压，空气侧为正压，因此由压差的存在而使空气漏向烟气负压侧而形成直接漏风。

①空预器漏风控制系统（LCS）一直工作不正常，运行中热端扇形密封挡板不能自动跟踪转子的 蘑菇状变形以减小漏风间隙，而且带灰空气漏向烟气侧时造成扇形密封挡板严重磨损，进一步增大了漏风间隙，而漏风量的大小与漏风区域面积成正比，因此空预器漏风剧增。

②由于锅炉燃用热值低、灰份高的广旺贫煤和空预器换热元件特别是低温段换热元件的低温腐蚀等原因，造成空预器换热元件积灰、堵灰严重，流道堵塞后增大了流通阻力，造成空气侧与烟气侧压差增大，而漏风量的大小与压差的平方根成正比，因此堵灰又加剧漏风。

**2、漏风治理措施**

1） 漏风治理措施的探索。空预器配有漏风控制系统（LCS），由于扇形密封挡板可以调节，在空预器外壳和可调扇形密封挡板之间设有滑片密封条。长时间运行后，这些密封条被磨损， 形成一条缝隙，使空气和灰尘可以在扇形密封挡板背后通过，这样一方面增加了空预器的漏风，另一方面随着灰尘的积累，限制了扇形密封挡板的移动。因此，从其工作环境就决定了空预器漏风控制系统（LCS）工作的不可靠性，换句话说，投入大量人力、物力恢复漏风控制系统（LCS）得不偿失。

相反，豪顿华工程有限公司的容克式空预器 VN 设计技术则取消漏风控制系统（LCS），在扇形密封挡板、轴向密封挡板和外壳之间焊接新的板条，将扇形密封挡板和轴向密封挡板固定在某一位置，形成完整的焊接结构，从而消除了二次漏风的可能。当然，在固定之前应预先计算出扇形密封挡板和轴向密封挡板固定的位置，以保证在任何负荷情况下扇形密封挡板和轴向密封挡板均能适应转子热态变形。同时，采用“双道密封”来加强现有空预器的径向和 轴向密封效果，它是通过加倍掠过径向轴向密封板上的密封片的数量来实现的。这样，烟气 空气流压力之间有一个中间压力，使得两股气流之间压差减小一半，也可以理解为迷宫式的 “双道密封”增大了空气流向（漏向）烟气侧的流动阻力，这样可以有效地降低漏风率。

经反复研究、比较，决定采用豪顿华工程有限公司的 VN 设计技术对容克式空预器密封系统进行改造，以控制空预器的漏风。

2） 利用空预器换热元件已到使用寿命应全部更换的机会，委托豪顿华工程有限公司采用其容克式空预器的 VN 设计技术，以锅炉在燃用广旺煤并掺烧4 000 Nm/h天然气的 M CR 工况为改造设计基础进行改造设计。

①改造前后设计参数对比（见表1）；

②改造前后换热元件变化的对比（见表2）；

③取消漏风控制系统（LCS），固定所有的扇形密封板、轴向密封板，并加装二次径向隔板，使径向和轴向密封片加倍；

④根据转子隔仓变化选用豪顿华工程有限公司换热元件板型重新设计换热元件外形尺寸；

⑤因扇形板和热端中心筒密封盘的重量转移到上连接板上，因此取消四根悬吊螺杆，将热端中心筒密封盘固定在上连接板上，并把中心筒密封盘轴封焊死。

3） 校核推力[轴承承载能力](https://baike.baidu.com/item/%E8%BD%B4%E6%89%BF%E6%89%BF%E8%BD%BD%E8%83%BD%E5%8A%9B%22%20%5Ct%20%22_blank)。空气预热器底部推力轴承为 45 BV 型可倾瓦式滑动轴承，其承载能力为 263 083 kg，即 263 t。改造前空气预热器转子重量为190 t，改造后转子重量 为 200 t，比推力轴承设计的最大支撑重量低得多，因此不会影响轴承使用。

**3、漏风治理经济性分析**

由于改造前后锅炉使用的燃料等条件不可能完全相同，以下仅以机组在空预器改造前后满 负荷工况下作粗略对比分析。

1） 空预器改造前后满负荷工况下主要性能参数比较（见表3）

2） 空预器换热元件已到使用寿命，库房内换热元件备件已用完，此时进行空气预热器改造即改造了密封装置，又更换了换热元件，可谓一举两得。

3） 漏风率降低，可保护锅炉燃烧氧量充足，减少锅炉不完全燃烧热损失和排烟热损失，排烟温度降低了19 ℃，锅炉效率大致提高1%，每年可节约标煤7 200 t。同时，热风温度 提高了30 ℃，有力地保证了广旺贫煤的着火和稳定燃烧。

4） 漏风率降低，减少了空气和烟气流量，降低送风机、引风机电耗 300kW·h，每年大约可 节省厂用电 180万kW·h，同时也避免了因风机出力不足而影响整台机组的出力。

5） 漏风率降低，减少了空预器出口烟气流量，降低了烟气流速，从而使静电除尘器的效率增加，同时所有在空预器下游的设备磨损降低，其维修、维护量大大减少。

6） 对空预器本身，漏风率减小，空气侧漏向烟气侧的流量下降，流速降低，各易磨损件的寿命也延长，维修、维护工作量减少。

7） 取消漏风控制系统（LCS），径向滑片密封条、轴向正滑片密封条、各密封挡板的位置校正 等维修工作可完全取消，简化了检修工作，同时减少了空预器的检修工作量。

**空气预热器排烟温度高的主要原因：**

由于电站锅炉的空气预热器普遍排烟温度较高，而较高的排烟温度造成锅炉效率下降，所以制粉系统干燥出力不足，长期运行，很不经济。这是预热器行业普遍共性的问题，通过对电厂调研，可以看到预热器排烟温度高的主要原因是[1]  ：

1） 设计缺陷严重，如对锅炉实际设计参数的分析，对预热器选型计算的疏忽，错误的选用传热元件板型和预热器型号等造成了预热器存在先天不足。这是预热器换热能力不足的主要原因。

2） 制造质量太差，预热器内部传热元件有严格的尺寸要求，几何学上微小的差异也会造成预热器换热能力的天壤不同，因此，在制造时由于传热元件板厚的变化、元件之间内部组合尺寸的差异，均会大副影响预热器的换热能力。这也是预热器换热能力不足的主要原因。

3） 制粉系统的漏风过大，制粉系统的漏风过大，造成进入预热器的有组织风量减少，造成预热器排烟温度高。

4） 炉底漏风的增加，原理同制粉系统，都是经过预热器的有组织风风量减少。

5） 其他原因。

解决办法：针对具体原因进行分析后，进行性价比较高的改造，如果预热器先天不足，则需重新更换。所以对于预热器的设计问题的重视，才是其性能的有力保障。

常见问题

空气预热器是用来传导锅炉系统中排出烟气热能的一种装置。空气预热器的应用能提高锅炉系统的热交换性能，因此在锅炉系统中使用的较为广泛。空气预热器在运行中会出现一些故障和问题，以下是其中常见的几种[5]  。

1、空气预热器的振动问题

空气预热器在运行中容易出现振动的问题，这个问题的根源主要在于空预器的设计。空气预热器在设计时就要考虑其运行中的振动问题，避免空预器发生振动，需要合理的选择空气流动的速度，或沿着空气流动的方向加装防振隔板。

2、空气预热器的堵灰问题

空气预热器另外一个常见问题是堵灰。空预器在工作时会接触到锅炉排出的烟气及其中所携带的颗粒型灰尘，长时间灰尘堆积即会形成堵灰。同时，空气预热器在基础锅炉排出烟气中所携带的二氧化硫气体时可能发生腐蚀，腐蚀后的物质也会形成空气预热器的堵灰。

空气预热器防止堵灰的方法，是在空气进气口加装暖风器或采用热风再循环，并采用低氧燃烧和加入添加剂的方法，降低烟气中二氧化硫气体的生成。另外，空气预热器的定期吹灰，也对保持空气预热器的清洁有很大的作用。

3、空气预热器的其他问题

空气预热器的其他常见问题还有噪声和漏风。空气预热器处理振动问题时加装的防振隔板，对降低和消除空气预热器的噪音问题也有很大作用，而关于空气预热器的漏风问题，则需要从设计、运行等多个方面提高空气预热器的密封性。

**锅炉**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| ▪ [锅炉](http://baike.baidu.com/view/71206.htm) | ▪ [蒸汽锅炉](http://baike.baidu.com/view/503642.htm) | ▪ [锅炉机组](http://baike.baidu.com/view/1578866.htm) | ▪ [电站锅炉](http://baike.baidu.com/view/2240531.htm) | ▪ [固定式锅炉](http://baike.baidu.com/view/3823772.htm) |
| ▪ [自然循环锅炉](http://baike.baidu.com/view/545380.htm) | ▪ [锅筒锅炉](http://baike.baidu.com/view/3823773.htm) | ▪ [直流锅炉](http://baike.baidu.com/view/545403.htm) | ▪ [控制循环锅炉](http://baike.baidu.com/view/3823774.htm) | ▪ [复合循环锅炉](http://baike.baidu.com/view/1835633.htm) |
| ▪ [低循环倍率锅炉](http://baike.baidu.com/view/3823775.htm) | ▪ [低压锅炉](http://baike.baidu.com/view/8986524.htm) | ▪ [中压锅炉](http://baike.baidu.com/view/8986525.htm) | ▪ [高压锅炉](http://baike.baidu.com/view/8986526.htm) | ▪ [超高压锅炉](http://baike.baidu.com/view/8986527.htm) |
| ▪ [亚临界压力锅炉](http://baike.baidu.com/view/8986528.htm) | ▪ [超临界压力锅炉](http://baike.baidu.com/view/3138604.htm) | ▪ [固体燃料锅炉](http://baike.baidu.com/view/3823776.htm) | ▪ [液体燃料锅炉](http://baike.baidu.com/view/3823777.htm) | ▪ [燃煤锅炉](http://baike.baidu.com/view/2254354.htm) |
| ▪ [煤粉锅炉](http://baike.baidu.com/subview/3823778/3823778.htm) | ▪ [燃油锅炉](http://baike.baidu.com/view/2297829.htm) | ▪ [燃气锅炉](http://baike.baidu.com/view/1329051.htm) | ▪ [混烧锅炉](http://baike.baidu.com/view/3823779.htm) | ▪ [余热锅炉](http://baike.baidu.com/view/847521.htm) |
| ▪ [固态排渣锅炉](http://baike.baidu.com/view/2166380.htm) | ▪ [液态排渣锅炉](http://baike.baidu.com/view/3823780.htm) | ▪ [旋风炉](http://baike.baidu.com/subview/3823781/3823781.htm) | ▪ [平衡通风锅炉](http://baike.baidu.com/view/3823782.htm) | ▪ [微正压锅炉](http://baike.baidu.com/view/8986529.htm) |
| ▪ [增压锅炉](http://baike.baidu.com/view/8194351.htm) | ▪ [П型锅炉](http://baike.baidu.com/view/3823783.htm) | ▪ [T型锅炉](http://baike.baidu.com/view/3823784.htm) | ▪ [塔式锅炉](http://baike.baidu.com/view/3823785.htm) | ▪ [启动锅炉](http://baike.baidu.com/view/3823786.htm) |
|  |  |  |  |  |

**其他科技名词**

参考资料

* 1.应静良, 李永华. 电站锅炉空气预热器[M]. 中国电力出版社, 2002.
* 2.王建国, 徐志明, 杨善让. 空气预热器积灰在线监测模型[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7):37-39.
* 3.曲建安, 赵东飞. 锅炉上的空气预热器[J]. 应用能源技术, 2001(1):22-23.
* 4.闫本近, 董绍平. 炼油加热炉空气预热器的发展与展望[J]. 石油化工设备, 2014, 43(1):56-60.
* 5.吕兆聚, 邢学山, 吕维勇. 回转式空气预热器的常见问题及改进措施[J]. 吉林电力, 2001(2):44-47.