

# 浮法玻璃熔窑余热锅炉受热面积灰分析与对策

## The analysis and measures of ash deposit covering heat transfer surface in waste heat boiler of float glass kiln

蒙应龙 李彦涛 丁广阳

成都南玻玻璃有限公司 成都 610213

**摘要** 浮法玻璃熔窑低温余热锅炉的积灰给其运行安全性和经济性带来了危害。结合玻璃熔窑烟气的特性,分析了余热锅炉产生积灰和堵灰的成因及特点。可将余热锅炉积灰分成粘结性和松散性2种形态,采取相应的措施控制积灰或清除积灰。

**Abstract** The ash deposit of low temperature waste heat boiler in float glass kiln threatens the safety and economic benefits of the kiln. This paper analyzes the cause and specialty of the ash deposit from waste heat boiler with the specialty of the smoke in glass kiln. The ash deposit of waste heat boiler can be divided into two forms, one is binding property and the other is looseness, so we can adopt different measures to control and clear the ash deposit.

**关键词** 温余热锅炉 受热面 积灰 危害 成因 防止 对策

**Key words** low temperature waste heat boiler heat transfer surface the ash deposit threaten cause prevention and measures.

随着玻璃行业生产工艺的改进和规模的不断扩大,以及能源和环境保护的意识增强,玻璃熔窑的低温余热发电技术逐步得到推广应用。由于玻璃熔窑的排烟温度只有450~550℃,配置的余热锅炉受热面无法象其它高温锅炉那样得到大量辐射传热,主要靠对流和热传导两种方式,而受热面的导热系数则直接影响纯低温余热锅炉的传热效果。所以余热锅炉积灰则是锅炉设计、运行、维护的重点和难点,也是影响余热利用效率和锅炉安全、稳定运行的重要因素之一。为此本文通过对玻璃熔窑余热锅炉受热面积灰问题的浅析,提出一些解决方案和措施,仅供参考。

## 1 积灰的危害

锅炉受热面的积灰是非常有害的。由于灰的导热系数很小(通常灰的导热系数为0.0581~0.116W/(m·℃),而钢管的导热系数为46.5~58.1W/(m·℃),相差为500~800倍),因此即使是干松的积灰也会使受热面热阻大大增加,传热减弱,以致排烟温度升高,锅炉效率下降。积灰还会使烟气流道截面积缩小,流动阻力增加,致使引风机电耗升高。当积灰堆积到一定的程度并且受外力作用时可能突然垮塌,造成炉内压力突变,进而影响熔窑窑压。严重时还会堵塞受热面管之间的间隙,被迫减负荷运行,甚至被迫停炉清理。这种情况在国内目前已经投产的玻璃余热发电锅炉中已普遍出现,锅炉运行大约45天就必须停炉1~2天,需要清理人员进入炉内进行人工除灰,其操作非常困难,且除灰效果相当有限。同时,积灰还可能导致受热面的腐蚀加剧。总之,锅炉受热面的积灰将严重影响锅炉运行的可靠性和经济性。

## 2 积灰的成因、分类及特点

### 2.1 玻璃熔窑的灰分分析

目前玻璃熔窑的燃料主要采用重油、在重油中添加煤焦油的燃料或相对清洁的天然气等燃料。玻璃熔窑烟气中所含的灰分,除燃料燃烧后所形成的炭质成分外,主要是熔窑中的玻璃原料或其部

分氧化物被烟气挟带出熔窑而形成的。

表1 重油燃料玻璃熔窑灰分

成分	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	TiO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
成分质量百分比	1.85	0.66	3.11	0.4	18.34	17.17	1.53	18.5

表2 添加煤焦油后的重油燃料玻璃熔窑灰分

成分	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	TiO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
成分质量百分比	2.77	1.26	3.06	0.46	2.2	5.83	1.31	29.19

由以上表1、表2可以看出，玻璃熔窑烟气成分中金属氧化物含量相当高，尤其钠氧化物含量较高。天然气燃料较其它燃料清洁，产生的灰分相对很少，但灰分中所含的玻璃原料成分大致与重油相当。

## 2.2 积灰的分类及成因

### 2.2.1 黏结性积灰。

当燃用多升华物质燃料（包括重油）锅炉的高温对流受热面上部分灰分在高温状态下发生化学反应，反应物具有黏性，能大量捕捉飞灰，在受热面上产生坚硬的黏结灰，形成高温黏结积灰。高温积灰其烟尘大部分呈熔融状态，不同成分的烟尘其熔点相差很大，有的在1000℃以上，有的只有500~700℃，这种积灰一般属于粘结性积灰。对多种情况的粘结性积灰试验表明，其成分包括碱、钙、磷和硅的化合物，由粘结所引起的粘污的严重程度取决于积灰的组成。锅炉对流过热器发生的积灰，一般是由内外两层组成。内层积灰中Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub>的含量较高，而外层则有类似于飞灰的成份。黏结性积灰不仅在管子背风面形成，更多地是在迎风面形成，两侧较少。当燃烧灰分中含碱金属较多（碱金属>0.5%）的燃料时，由于碱金属升华引起黏结灰，其形成机理大致为：燃料灰分中碱金属的氧化物（Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O）在燃烧时升华为气态，升华的氧化物随烟气到达高温过热器等高温对流受热面，由于烟温降低，就冷凝在管壁上；冷凝在管壁上的碱金属氧化物与烟气中SO<sub>3</sub>反应形成硫酸盐，由于钢管壁面的催化作用较强，可使烟气中的SO<sub>2</sub>在氧化为SO<sub>3</sub>的同时形成硫酸盐；硫酸盐与飞灰中的氧化铁（Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）及烟气中的SO<sub>3</sub>反应生成白色的复合硫酸盐[Na<sub>2</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>，K<sub>2</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>]，这个过程成为烧结。这些反应物在500~800℃范围内呈融化状态，有黏性。以这层为黏结剂，一方面捕捉飞灰，一方面还可继续形成黏结物。结灰层迅速增厚，当灰层变厚时内层就硬结起来，机械振打、钢珠等难于清除，会引起管束阻力不断增加，直到烟道完全堵塞，锅炉破坏为止。玻璃熔窑中含有较多的碱金属和碱土金属，在高温燃烧时升华于烟气当中，可随烟气进入余热锅炉受热面，只不过进入余热锅炉时的烟气温度较低（500~600℃），碱金属升华气体相对较少，但仍有部分回迅速冷凝到高温过热器、蒸发管等表面，形成黏结积灰，不可忽视。通过已投运的发电余热锅炉实践证明，锅炉运行15天以上时，在锅炉的高温段（过热器和蒸发器）换热管表面就黏结约0.5mm厚的粘性积灰，并不断地捕捉烟气中的飞灰和凝结碱金属升华气体，使积灰厚度逐渐增加且板结硬化，目前已试验的机械振打、声波和弱爆等在线除灰方式都难以清除掉该部分的板结积灰。这一现象已成为玻璃熔窑余热锅炉效率下降的普遍性难题。

低温积灰其烟尘在凝固点以下呈固体颗粒状，这种积灰一般属于松散性积灰，但积灰时间延长，吸收烟气中的SO<sub>3</sub>和水蒸气转换成硫酸盐等，可形成紧密性积灰，低温积灰多发生在低温区省煤器和空气预热器上，沉积在管子表面上的积灰由三类物质所组成：第一类是酸腐蚀所产生的腐蚀产物，其多少取决于产生酸腐蚀的量、温度以及金属的类型。第二类是形成的低温积灰所捕获的碰撞到管子上的大部分飞灰，如铅、钙、锡等易熔元素及其化合物在低温区逐渐凝固汇聚起来。第三类是酸与飞灰中的铁、钠、钙等起反应形成的硫酸盐，它增加了积灰量。当烟气通过锅炉低温段（如省煤器等）受热面时，积灰与冷凝在管壁上的硫酸形成以硫酸钙、硫酸钠等为基质的水泥状硬质灰层，或与低温烟气中的水蒸气凝结附着在受热面上，形成低温黏结性积灰。



图1 运行20天检查的过热器表面粘结积灰



图2 过热器表面硬结成壳的积灰

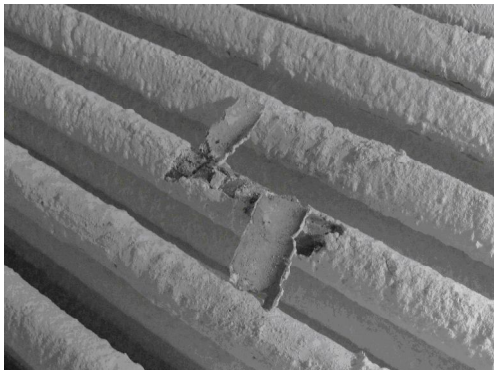


图3 高温受热面内层板结成壳，外层捕捉粘附飞灰



图4 高温段迎风面的板结积灰

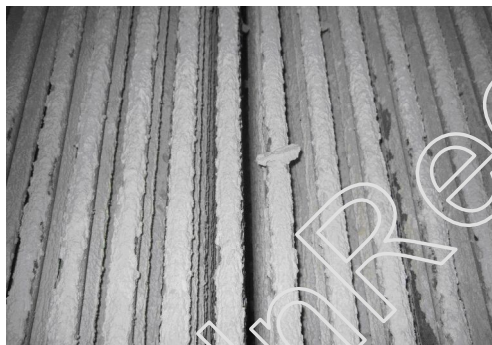


图5 水泥状的低温粘结积灰



图6 低温段迎风面粘结积灰

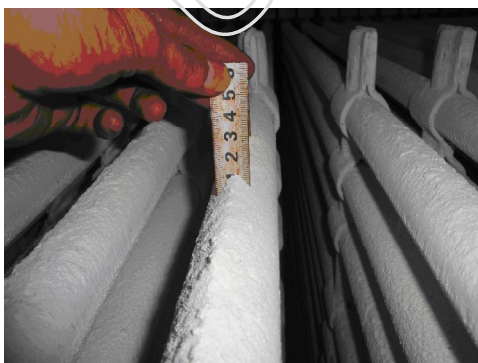


图7 200℃左右烟气的低温松散积灰



图8 低温段积灰易被风带走，积灰少

2.2.2 松散性积灰。烟气流中含有各种组分的颗粒，其粒度都在 $200\ \mu\text{m}$ 以下，以 $10\sim 30\ \mu\text{m}$ 的居多。一般认为发生在对流受热面上常见的松散性积灰是由于范德华力，静电力和表面张力的作用而形成。因为飞灰微小颗粒具有较大的表面积，也就具有较大的表面能，当灰粒与管壁接触时，其分子与管

壁吸引力大于灰粒本身的重力时，就会附着在管壁上。其灰粒直径一般为 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 。另外烟气流中的灰尘也有静电，如灰粒直径小于 $10\ \mu\text{m}$ ，静电力足以克服灰粒自身重力而附着在管壁上，甚至 $20\sim 60\ \mu\text{m}$ 的灰粒也可能被吸附上去。当含灰气流横向冲刷管束时，在管子背风面产生涡流区，小于 $30\ \mu\text{m}$ 的微小灰粒就被卷入并黏附在管子背风面上。积灰是微小灰粒在受热面上积聚与粗灰粒的冲击同时作用的过程。因而，开始飞灰积聚很快，随后逐渐减慢。当背风面积灰达一定厚度而能被气流中大灰粒所冲刷时或因灰粒自身重力超过引力而脱落，积聚的灰与被粗灰冲掉的灰相等时，则处于动态平衡的状态，积灰就不再增加。

由上述分析可知，在浮法玻璃熔窑余热锅炉中的积灰主要为两大类，一类是过热器、蒸发管表面形成的高温黏结性板结硬化积灰，另一类是省煤器及低温换热管表面形成的低温黏结积灰和松散积灰。

### 3 受热面积灰的防止及对策

#### 3.1 主动措施

3.1.1 提高受热面温度，有效防止水蒸气或硫酸蒸气的低温黏结性积灰。提高受热面管内工质温度，如提高锅炉给水温度到 $105\text{℃}$ 以上，则锅炉排烟温度被提升，排烟热损失增大。通过设计计算平衡后，以适当的排烟温度（一般在 $140\text{℃}$ 以上）有利于锅炉后的设备（如引风机、烟囱等）运行和烟气顺利排向大气。

3.1.2 适当的烟气流速可有效防止或减轻松散性积灰。烟气流过尾部受热面的烟速不能太低，如果烟气流速低于 $2.5\sim 3\text{m/s}$ 时，就很容易发生受热面积灰甚至堵灰，实验证明，一般应大于 $5.5\sim 6.5\text{m/s}$ ，针对玻璃熔窑的最佳烟气流速应为 $8.5\sim 12\text{m/s}$ ，当然，烟气流速过高，会加剧受热面管的磨损。由于受到玻璃熔窑窑压及其波动范围的限制，玻璃熔窑余热锅炉的烟气流速不能无限增加。

3.1.3 受热面管的结构型式和排列方式。采用较小管径或鳍片管（而非翅片管）可减轻高、低温黏结性积灰和松散性积灰。沿烟气流向的鳍片可有效破坏黏性物质和灰粒集结的表面张力与积灰的环形结壳，同时还起到增强传热和防止烟气磨损的效果。当采用翅片管作为传热元件时，要特别注意烟气侧的翅片间距。根据烟气含灰情况，选择不同的翅片间距，较清洁的烟气翅片间距可取 $2.4\text{mm}\sim 4.0\text{mm}$ 。含灰较大烟气可取 $6\text{mm}\sim 9\text{mm}$ 。特别容易积灰的烟气可取 $10\text{mm}\sim 15\text{mm}$ ，对于积灰特别严重而且难以清理的场合，甚至要采用光管。此外传热管的布置要有利于烟灰脱落和除灰。与光管相比，翅片管积灰倾向比较明显。

采用错列管束的方式也可减轻积灰，当含灰气流流过错列管束时，管子迎风面积灰很少，主要积灰发生在管子背面。当流速增加，错列管束气流扰动增大，管子上松散的积灰容易被吹走。错列管束纵向节距越小，气流扰动越大，气流冲刷作用越强，管子积灰也就越少，相反，顺列管排积灰相对严重。

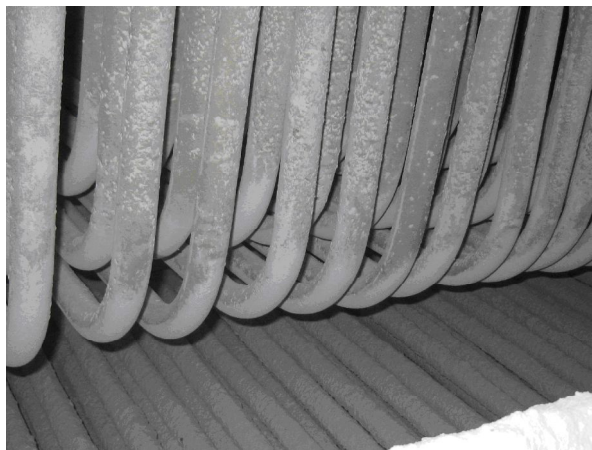


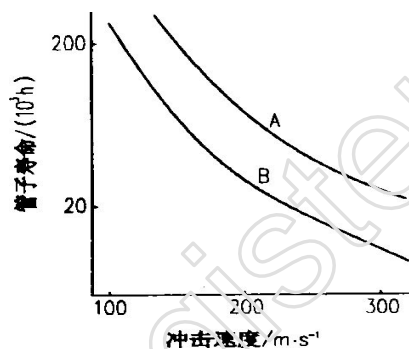
图9 纵向管束与横向管束积灰的对比

纵向（立式）布置的换热管束比横向（卧式）布置的换热管束积灰程度要轻得多。纵向布置即管束与烟气流向平行，横向布置即管束与烟气流向垂直。纵向布置的换热管束表面都将被烟气冲刷，没有背风面的形成，黏结附着与表面的积灰很容易被烟气带走，积灰没有沉积也就不会形成粘结积灰板结硬化。当换热管束横向布置时，管束迎风面不易积灰，而背风面因烟气的涡流作用，飞灰极易在沉积而附着于管束表面。

### 3.2 被动措施

被动措施主要是在易积灰部位的周围加装除灰装置，采用除灰装置是有效防止黏结积灰和松散积灰的重要辅助手段，也是历年各类大小锅炉采取的主要辅助措施。随着技术的发展，除灰装置的种类也越来越多，主要有以下几类：

3.2.1 流体类除灰。采用各种类型的喷嘴将流体直接喷向易积灰的部位，清除积灰。主要有水力除灰、蒸汽吹灰和压缩空气吹灰等。这类除灰装置能有效清除积灰部位的积灰，喷嘴的有效吹扫半径为2.5~3m。尾部受热面固定吹灰喷嘴一般有圆柱形、拉伐尔管形、长方形三种形式。应注意蒸汽或压缩空气吹灰器，如果安装位置不当，会引起锅炉管子的严重磨损。图10为吹灰冲击速度与管子寿命曲线。该图可用于确定吹灰器位置，以保证吹灰喷嘴与锅炉管子之间距离大于最小允许值。现代大容量锅炉仍多采用蒸汽吹灰方式。



A—弱磨蚀性灰 B—中等磨蚀性灰

图10: 吹灰冲击速度与管子磨损寿命

3.2.2 机械除灰。主要有机械振打装置和钢珠除灰。在受热面管屏上，安装振动除灰器，利用激振器产生的振动，通过振杆使受热面产生振动，清除积灰。振动除灰装置工作可靠、据使用经验，采用高频振荡效果最好。钢珠清灰法，用钢珠( $\phi 3\text{ mm} \sim 5\text{ mm}$ )从上部倾倒在换热管表面上，靠钢珠和管面的碰撞而将积灰清除。钢珠除灰系统主要由输送、播散、收集和分离等部分组成。

3.2.3 化学除灰。化学除灰是在锅炉燃烧过程中添加清灰剂以产生化学烟雾，达到除灰的目的。常用的清灰剂有，氧化型清灰剂及盐型清灰剂。氧化型清灰剂以硝酸盐、硝酸钠、硝酸钾(含量50%以上)为主，另加一定量(5~30%)的催化剂(如碳粉及硫磺粉等)以及其它附加物质(如硼砂，含量5~15%)。盐型清灰剂主要成分为氯化钠(含量50%以上)，附加20%左右的碱性物质(如硼砂和纯碱)及少量的催化剂(氧化铁)。将它们撒在锅炉的高温火床上，以产生大量化学烟雾，分布到炉膛及换热面的各个角落。经多次反复使用，可使受热面烟垢酥脆、龟裂、易于脱落及燃烬。

3.2.4 激振波除灰。激振波除灰主要有声波吹灰、激波吹灰等类型。

对余热锅炉对流受热面及其它不宜触及的区域可采用声波除灰。声波吹灰器的是通过声波发生器将压缩空气或高压蒸汽调制成声波，将压缩空气的能量转化为声能(声波)。产生的低频声波(20~400 Hz)、次声波(20 Hz以下)在弹性介质(炉内空间)里传播，使边界层形成断续，边界层的断续伴有烟气逆向流动，烟气流的声波振荡周期性地改变边界层中的压力纵向梯度，使微粒难以在筒体表面沉积，同时声波循环往复的作用在换热表面的积灰上，对灰粒之间及灰粒和管壁之间的结合力起到减弱和破坏的作用，声波持续工作，那种结合力必然会减弱，当它减弱到一定程度之后，由于灰粒本身的重量或烟气的冲刷力，灰粒会掉下来或被烟气带走。

激波吹灰，激波吹灰的原理是制造可控制的燃料爆燃，产生一道强度可控的激波。激波发生器中的可燃气体在罐体中发生强烈的爆炸，使罐体中的压力骤然升高，形成瞬时高压并产生压缩波。实验表明，当装置点火工作时伴随激波产生的声波在距喷口7m处，其声压级仍在160dB以上，相当2000Pa声压。伴生声波频率在30~200Hz，且以低频声波为主。由于频率低，声波长较长，在炉内不易衰减并形成多次反射，致使积灰层产生声疲劳而松散、破裂和脱落。同时混合气在激波发生器中被点燃爆燃瞬间产生高温高压气流，积灰层表面因较高温度作用而被软化，粘结强度和疲劳强度降低，在强气流吹扫下灰层破碎脱落。当激波气流以极高的速度冲击受热面管束时，由于作用时间很短，力度大，而喷口处燃气气流速度可达到350m/s左右，对受热面管束产生较强的冲击作用，管子表面的积灰受到很大的冲击作用使灰层脱离管壁。

#### 4 结束语

玻璃熔窑余热锅炉受热面的积灰是严重影响锅炉运行的可靠性和经济性的主要因素之一。根据玻璃熔窑烟气的特性，在锅炉设计制造中应采用高于烟气露点温度20~30℃的合理排烟温度，设计选取8.5~12m/s的合理烟气流速，高温段换热管采用小管径或鳍片管（而非翅片管），低温段管束可采用较大管径或光管结构；高温段管束采用纵向布置方式，以达到主动防止受热面管粘结积灰的良好效果。同时辅以机械振打、声波或激振波除灰等装置，有效防止锅炉受热面的松散性积灰，以保证余热锅炉的安全、经济、长周期稳定运行。

#### 参考文献

- [1] 张永涛. 锅炉设备及系统[J], 中国电力出版社, 1998.
- [2] 续爱世, 陆述超等. 锅炉设备运行技术[J], 水利电力出版社, 1985.
- [3] 徐森荣. 再生烟气余热锅炉积灰成因与防止措施[J], 《石油化工设备》2003年5月, 第32卷第3期.
- [4] 岑可法, 樊建人, 池作秋等. 锅炉和热交换器的积灰, 结渣, 磨损和腐蚀的防止原理与计算[J], 科学出版社, 1994.

#### 作者简介

丁广阳 (Ding Guangyang) 1976年2月出生，男，四川万源人，工程师，大学专科，2000年毕业于重庆电力高等专科学校，从事热力发电厂相关工作十年，2008年起开始从事并研究余热利用项目，参与组织了目前玻璃行业单机容量最大的成都南玻12MW烟气余热发电项目，成都南玻玻璃有限公司，CHENGDU CSG GLASS..LTD，四川省成都市双流县公兴镇黄龙大道二段16号，邮编：610200。  
E-mail: dgy213@hotmail.com