

燃生物质固硫型煤热管式热风炉的设计开发

汪琦，张慧芬，俞红啸，汪育佑

(上海热油炉设计开发中心，上海200042)

摘要：介绍了生物质固硫型煤的节能环保特点和成型加工工艺，讨论了生物质固硫型煤在炉膛内的燃烧过程及其在炉前的成型制作方法，分析研究了燃生物质固硫型煤热管式热风炉、热管式换热器、链条炉排与炉拱的结构型式，总结了该型热风炉烟气再循环系统的设计计算。

热管式热风炉燃烧生物质固硫型煤，生成的高温烟气先经过烟气沉降室，再经过热管式换热器，从而使得其温度降至150℃左右；然后抽取一部分排出热风炉外的烟气，使其进入烟气再循环系统，由循环风机加压后送到炉膛内和高温烟气均匀混合，使之成为温度约为900℃的中温烟气，再次进入热管式换热器；剩余的烟气由烟囱排出。而通过鼓风机送入的常温空气，在热管式换热器中与烟气逆流换热，换热后清洁空气的温度可升至100~550℃，然后进入用热设备供生产加工使用。燃生物质固硫型煤热管式热风炉以高温热管作为传热元件，而由热管元件组成的热管式换热器产生的清洁热风的最高温度可达到550℃，并且热管式热风炉的热效率较高、生产运行安全可靠、使用寿命长、检修维护方便。

1 生物质固硫型煤及其燃烧、成型

1.1 生物质固硫型煤

生物质固硫型煤是含有纤维状的生物质，属于干式冷态成型煤，生物质不仅起黏结作用，而且有助燃作用。生物质固硫型煤进入炉膛后，由于炉膛的高温辐射，生物质首先燃烧，型煤表面形成蜂窝状，使氧气能够逐渐进入型煤内部，同时增大了燃烧面积，加快了燃烧速度，使燃烧更加充分，直至燃尽^[1]。

加入固硫剂的型煤称为固硫型煤，它可以使燃烧过程中产生的SO₂

与固硫剂发生化学作用，生成硫酸盐，而且被固定在灰渣中，从而可减少SO₂

的排放量。生物质固硫型煤的固硫剂可采用石灰石粉，生物质可选用稻草或稻壳；生物质的质量分数一般在15%左右，粉碎后的稻草(或稻壳)和细煤粉、石灰石粉、添加剂需充分混合。生物质固硫型煤的成型工艺是：石灰石粉和添加剂先混合好，再与已经制备好的细煤粉进行混合，最后与粉碎制备好的稻草(或稻壳)互相混合，然后进行型煤成型加工^[2]。这种成型工艺过程具有成型轮的轧辊直径较小、成型压力较低、原料粒度与水分要求相对较低的特点。

1.2 生物质固硫型煤的炉内燃烧过程

生物质固硫型煤随着链条炉排向前移动进入炉膛后，在炉排上燃烧。生物质固硫型煤受到炉拱和炉膛内高温烟气的热辐射，以及相邻炽热燃烧层的直接热传导，进行预热干燥、热分解（析出挥发物），挥发物与由下而上穿过煤层的一次风进行充分混合，然后穿出煤层向上流动进入炉膛，在高温作用下着火，挥发物的燃烧热又使析出挥发物后的焦炭激烈燃烧，这就是生物质固硫型煤层在炉膛内的主要燃烧阶段^[3]。

当一次风流体由下而上穿过炽热的焦炭层时，空气中的氧气便与焦炭中的碳原子进行氧化反应生成二氧化碳，并且产生大量的热。经过氧化反应后的一次风混合流体继续往上穿越炉排上炽热的焦炭层时，由于空气中的氧气在氧化反应中已经基本耗尽，剩余的主要气体是二氧化碳，所以二氧化碳中的氧原子便会被焦炭中的碳原子所夺取，发生还原反应，将二氧化碳还原为一氧化碳，一氧化碳穿出焦炭层向上流动后在炉膛内继续燃烧。随着燃烧的进行，焦炭层已基本燃尽，随着链条炉排的继续移动，焦炭层进入炉膛后部的燃尽区，最后，炉渣落入灰斗内排出炉外^[4]。

1.3 生物质固硫型煤的炉前成型方法

生物质固硫型煤的炉前成型过程为：将煤炭全部粉碎成为细煤粉，先后加入石灰石粉和添加剂，并混合均匀，然后加入已经粉碎好的稻草(或稻壳)原料，继续搅拌使混合均匀，最后通过制作型煤的双轧辊机械进行成型加工。双轧辊是由2根直径为200mm、长度为2700mm的实心钢件组成，钢件轧辊上有许多椭圆形小槽。2个轧辊都向内旋转，混合均匀的稻草(或稻壳)、石灰石粉、添加剂、细煤粉燃料通过双轧辊机械加工成型为椭圆形煤球，其尺寸以小于37mm

×21mm×13mm为宜。两轧辊一个是主动轮，一个是从动轮，主动轧辊由电动机及减速机带动。燃烧运行过程中，热管式热风炉供热负荷的调整，不仅可以通过调节生物质固硫型煤的供给数量和炉排速度实现，还可以通过利用无级调速装置调节轧辊的运转速度来实现。

为了避免轧辊过长引起轧辊直径增大，并进一步造成轧辊加工难度增大、制作成本增加，以及热风炉前方安装尺寸不够等问题，可以将轧辊设计制作成2段，并在中间设计安装约200mm宽的支撑装置，同时采用滚动轴承支撑。在中间支撑点的部位专门设有倾角为50°的溜落生物质固硫型煤滑道，以避免中间支撑对应部位的链条炉排上没有生物质固硫型煤的供应输送。

生物质固硫型煤成型的大规模生产线主要有对煤块与生物质原料进行干燥、粉碎的加工设备，包括煤块粉碎机、生物质原料粉碎机、煤粉与生物质原料的混合机、生物质固硫型煤的成型机等设备，以及相应的成型加工专用生产线。

2热管式热风炉的结构及其控制

2.1热管式热风炉的结构设计开发

燃生物质固硫型煤热管式热风炉的主要部件为热管及热管式换热器、链条炉排和炉膛、烟气沉降室、鼓风机、引风机、电控柜等。对热管式热风炉的炉膛和热管式换热器进行结构设计开发时，可以采用两个结构整体合并布置设计的结构方式，或者两个结构分开布置设计的结构方式。用于高温除尘预处理的烟气沉降室布置在炉膛后的烟气出口处，热管式换热器布置在烟气沉降室的后段。

生物质固硫型煤在链条炉排上燃烧后形成高温烟气，通过沉降室重力除尘后进入热管式换热器的加热段，热量通过热管上部的冷凝段加热清洁空气。在热管式换热器中把烟气温度降到其露点温度以下后，将一部分烟气通过循环风机加压后送到炉膛的前部(或中部)与高温烟气均匀混合，使之成为900℃左右的中温烟气并再次进入换热器中进行换热。剩余的烟气通过烟气脱硫除尘装置后经烟囱排出^[5]。

由于燃生物质固硫型煤热管式热风炉炉膛内的燃烧接近于绝热燃烧，所以其炉膛温度很高，在设计开发中需要采用耐热铸铁和加厚炉排片的特殊结构，以保证链条炉排的安全稳定运行和长久的使用寿命。热管式热风炉的热管换热器中，各个热管元件互相独立，即使某一根热管因磨损、氧化、腐蚀、热变形等原因而出现穿透，也仅仅是该根热管发生失效，而不会造成烟气贯通，从而可以保证热风空气与烟气互不掺混。此外，即使数根热管发生了失效，对整台热管式热风炉额定供热负荷的影响也不会太大。

燃生物质固硫型煤热管式热风炉采用热管作为传热元件。热管是抽真空后充入工质的传热元件，工作时工质的蒸发-冷凝在管内反复循环，不断将热量从加热段传至冷凝段。由于热管内部工质是以传热最强的相变过程工作，因此它几乎是在等温下传递极高的热流密度。通过调节冷热端的长度比和翅片间距可改变冷热端的传热热阻，从而提高热风炉尾部热管元件热端管壁的壁温，降低炉尾部受热面的低温腐蚀，使排烟温度更低、炉的热效率更高。

2.2热管式换热器

热管式换热器由矩形外壳体和带翅片的热管束组成，许多单根带翅片的热管布满于矩形壳体中，热管的布置有错列呈三角形的排列方式，也有顺列呈正方形的排列方式，热管数量的多少取决于换热量的大小。在矩形壳体内部的中央有一块隔板将壳体分成两部分，形成烟气通道与空气通道，当烟气与空气同时在各自的通道中流过时，热管就把高温烟气的热量传递给低温空气，从而实现烟气与空气的热量交换。

热管式换热器的优点是：结构简单、体积紧凑、换热效率高、压力降小。由于在热管上附设了翅片，克服了气体换热系数小的缺点，使得所需传热的热管数目大为减少，因此在传递相同热量的条件下，制造热管式换热器的金属消耗量要低于列管式换热器。此外，烟气与空气通过热管式换热器时的压力损失比列管式换热器(或板翅式换热器)要小得多，因而输送风机的动力消耗也比较少。

热管式换热器具有独特的结构形式：每根热管采用弹簧压紧或拉紧的方式固定，这样既能保证中间管板的气密性，又能使热管在温度较高时自由膨胀，不至于引起热管和隔板的弯曲变形；采用了烟气再循环系统，使进口烟温大幅度降低，热膨胀量进一步下降，从而较好地解决了受热面的热膨胀问题；热管式换热器采用纯逆流式布置，可以提高传热平均温差、减少传热面积、提高热风空气的出口温度。

2.3链条炉排与炉拱

生物质固硫型煤从煤斗内落在链条炉排上，并随着炉排向炉膛内缓慢移动，助燃空气从炉排下面吹入，与型煤的供给运行方向垂直相交。生物质固硫型煤的着火依靠炉膛内的热烟气和炉墙的热辐射作用，型煤层的表面先被加热发生燃烧，然后通过接触传热、型煤空隙中的对流和辐射传热，将热量向型煤内部进行传递，继而发生内部燃烧；助燃空气在鼓风机的作用下，经炉排下各个供风室均匀分配后，穿越炉排上的型煤层后到达炉膛内部，从而加快了型煤的燃烧过程^[6]。

在助燃空气的作用下，链条炉排可以分为如下几个区域：燃料加热和干燥区、挥发分析出区、主要燃烧区、灰渣燃尽区。其中：主要燃烧区又分为焦炭燃烧区和还原区，在挥发分析出区、焦炭燃烧区及还原区内所需要的空气量最多，燃烧的高温区也主要集中在该区域。充足的空气是保证生物质固硫型煤燃烧完全的前提条件。挥发分析出区和主要燃烧区也是考验链条炉排片质量优劣的区域。由于炙热的焦炭可能直接和炉排片接触，如果此时没有助燃空气的冷却作用，炉排片在有限的时间内可能会被烧坏，所以充足的助燃空气供给不仅为燃烧提供足够的氧气，还可以冷却链条炉排片。

为了强化燃烧、提高炉子的热效率，炉拱的结构设计也是十分重要的环节。前拱、后拱采用异型砖设计成弧形：炉前拱采用30°倾角，主要作用是合理组织烟气流动，将燃烧火床面的辐射热和部分火焰辐射热传递到新进炉膛内生物质固硫型煤的着火区，从而有利于型煤的着火燃烧；炉后拱采用17°倾角，具有合理的长度和高度，目的是将大量的高温烟气和炽热炭粒输送到生物质固硫型煤的燃烧区，以保证燃烧区内的型煤处于高温燃烧状态。炉拱的另一作用是对燃尽区的保温促燃，以便大幅度降低灰渣的热量损失。

生物质固硫型煤在炉膛内随链条炉排移动，燃烧过程是持续的，为了保持良好的排烟效果并抑制烟尘的生成量，应使链条炉排上的生物质固硫型煤层进行正常的燃烧，拨火时应尽量避免将燃烧带层搅乱，人为地造成燃烧恶化现象，同时严禁直接往链条炉排上投入型煤进行燃烧，以避免产生周期性的排烟污染现象^[7]。

2.4 自动控制系统

为了使进入炉膛内生物质固硫型煤的数量随着供热负荷变化得到平稳调节，从而提高热管式热风炉的燃烧效率，应选用可控硅直流无级调速装置，以带动链条炉排的运行。该装置的炉排运行速度调整范围宽、调节性能好，在超负荷以及链条炉排卡死的情况下，由于有电子限流器和机械离合器的双重保护作用，并配有手动机构装置和正转、反转的功能，使得热管式热风炉的可控性能大为提高；如果将出口热风温度作为被调参数，而将进入炉膛的生物质固硫型煤的数量、引风量、鼓风量作为调节量，便可构成比值调节燃烧控制系统^[8]。

3 烟气再循环系统

3.1 烟气再循环系统的设计开发

燃生物质固硫型煤热管式热风炉的炉膛烟气温度一般可达到1300℃左右。高温烟气具有很强的辐射能力，如果直接进入热管式换热器，即使采用高温耐热管，并通过调节冷、热端的长度和翅片间距等手段来降低冷端的换热热阻，烟气进口处前面几排的热管元件仍有可能因为管壁温度过高而产生氧化、热变形、裂纹，从而使热管壁开裂泄漏；或者由于热管内部工质的压力过高而产生超压爆管事故。所以需要采用烟气再循环系统，把排出热风炉外的烟气通过循环风机加压后，送到热风炉的炉膛前部(或中部)位置，与炉膛内的高温烟气均匀混合，使其成为900℃左右的中温烟气，再次进入热管式换热器。这样不仅可以使热管元件的安全性和可靠性大为提高，确保热管式热风炉的正常运行，且不会降低热管式热风炉的热效率。同时，因为降低了燃烧温度和氧气的浓度，还可以减少NO_x的生成量，从而减少了氮氧化物的排放，起到保护大气环境的作用。

在设计烟气再循环系统的方案时，如果再循环烟气和炉膛内燃烧产生的高温烟气混合不均匀，局部高温烟气进入热管式换热器，将会导致局部热管的超温爆炸。所以，再循环烟气与高温烟气的混合方式可以采用交叉混合方式或者旋转混合方式。具体的设计方法是将再循环烟气与高温烟气以一定的角度交叉混合；当烟气量很大的时候，可以采用多股烟气交叉混合方式，或者高温烟气在中间流动、再循环烟气以旋转的方式不断卷吸高温烟气，以达到均匀混合的目的。

3.2 烟气再循环系统的设计计算

烟气再循环系统是将热管式热风炉排出的烟气抽取一部分，使其进入热风炉的炉膛内与高温烟气均匀混合，混合后的烟气温度可降至900℃左右。该混合烟气再次进入热管式换热器，与清洁空气进行热交换。所以，如果采用了烟气

再循环系统的设计方案，需要对排烟系统进行详细的热平衡计算，最后根据热平衡计算结果来确定合适的掺混烟量。

烟气再循环系数的计算公式如下：

$$r = \frac{V_r}{V_h} \quad (1)$$

式中： r 为烟气再循环系数； V_r 为再循环烟气量， m^3/h ； V_h 为燃烧产生的烟气量， m^3/h 。

如果烟气再循环系数 r 增大时，再循环烟气量 V_r 增加，则高温烟气混合后的烟温降低，传热温差减小，换热面积增大，投资成本增加。但如果烟气再循环系数 r 变小，混合烟气温度将过高，使得热管元件的工作可靠性和安全性降低，甚至引起热管元件的过热、超温、超压爆炸，从而使得热管式热风炉被迫停止运行，影响正常生产。因此，烟气再循环系数 r 及混合烟气温度的选择至关重要，通常可根据热管元件使用的工质、管径、管材壁厚、冷热端长度、翅片间距、排列方式、纵向间距、横向间距、烟气速度、空气进口速度等因素来决定。一般可根据其他约束条件先确定热管式换热器的结构尺寸和热管元件的几何尺寸，再假定一个混合烟气温度，然后进行热力计算。计算出的热管工质的最大工作温度 $T_{V_{\max}}$ 应小于热管工质的最高允许温度 $[T_V]$ ，管材的最大管壁温

度 $T_{p\max}$ 应小于管材的最高允许温度 $[T_p]$ 。其计算公式如下：

$$T_{V\max} = T_1 - (T_1 - T_2) \times \frac{R_e}{R_t} \leq [T_V] \quad (2)$$

$$T_{p\max} = T_1 - (T_1 - T_2) \times \frac{R_1}{R_t} \leq [T_p] \quad (3)$$

式中： T_1 为烟气的进口温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T_2 为空气的出口温度， $^{\circ}\text{C}$ ； R_t 为第一排热管的传热总热阻， $(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{W}$ ； R_e 为蒸发段的热阻 $(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{W}$ ； R_1 为烟气对翅片管对流换热热阻， $(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{W}$ ； $T_{V\max}$ 为热管的最大工作温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $T_{p\max}$ 为热管的最大管壁温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $[T_V]$ 为热管工质的最高允许温度（蔡工质取 400°C ，水工质取 300°C ）； $[T_p]$ 为管材的最高允许温度（碳钢材料取 420°C ，不锈钢材料取 700°C ）。

再循环烟气的抽取位置最好选择在引风机的出口侧，这样可使得再循环风机能够按照实际需要的参数进行选取，节省部分电能。另外，在低负荷运行时也可以让再循环风机停止运行，这样既不会对炉体再循环烟气管道有任何不利的影响，也不会出现负压现象。

再循环烟气的抽取位置最好选择在引风机的出口侧，这样可使得再循环风机能够按照实际需要的参数进行选取，节省部分电能。另外，在低负荷运行时也可以让再循环风机停止运行，这样既不会对炉体再循环烟气管道有任何不利的

影响，也不会出现负压现象。

4结语

燃生物质固硫型煤热管式热风炉燃烧产生的热量通过烟气传输给清洁空气，完全由热管元件完成，并且热管元件相互独立，单根或数根热管元件的损坏不会影响热风炉的正常运行。热管元件的管子可以拆卸，并且安装维修方便，同时彻底解决了热膨胀的问题。另外，烟气与空气是完全隔开的，从而避免了烟气泄漏进入清洁空气现象的发生。

燃生物质固硫型煤热管式热风炉采用了热管这一高效导热元件，再通过优化设计调节各排热管的加热段和冷却段的长度比、翅片螺距和高度、两段传热面积，从而可以控制热管壁温，防止酸露点腐蚀。

参考文献：

- [1]汪琦，张慧芬，俞红啸，等.清洁能源供热技术在纺织印染行业中的应用开发[J].工业炉，2018，40(6)：7-13.
- [2]汪琦，俞红啸，张慧芬.燃生物质固硫型煤导热油炉的设计开发[J].化工装备技术，2014，35(6)：4-7.
- [3]汪琦，张慧芬，俞红啸，等.燃生物质颗粒燃料导热油炉的研究开发[J].化工装备技术，2017，38(3)：26-30.
- [4]汪琦，汪萍.载热体加热炉燃烧过程的研究[J].化工装汪琦，等：燃生物质固硫型煤热管式热风炉的设计开发备技术，1997，18(6)：7-12.
- [5]汪琦.新型间接式热风炉的设计开发[J].化工装备技术，2001，22(2)：15-17.
- [6]汪琦.大型热载体加热炉的设计开发[J].化工装备技术，2002，23(4)：28-32.
- [7]汪琦，许末兴，陈国栋.载热体燃煤加热炉的燃烧方式及其对环境污染的影响[J].化工装备技术，1998，19(5)9-12.
- [8]汪琦，俞红啸，张慧芬，等.导热油循环供热系统的自动控制技术研究[J].上海化工，2017，42(3)：36-39.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/160921.html>