

## 天然气工业锅炉NO<sub>x</sub>控制技术现状

现有低NO<sub>x</sub>燃烧技术主要围绕如何降低燃烧温度，减少热力型NO<sub>x</sub>生成开展的，主要技术包括分级燃烧、预混燃烧、烟气再循环、多孔介质催化燃烧和无焰燃烧。

### (1) 燃料分级燃烧或空气分级燃烧

热力型NO<sub>x</sub>生成很大程度上取决于燃烧温度。燃烧温度在当量比为1的情况下达到最高，在贫燃或者富燃的情况下进行燃烧，燃烧温度会下降很多。运用该原理开发出了分级燃烧技术。

空气分级燃烧(见图1)第一级是富燃料燃烧，在第二级加入过量空气，为贫燃燃烧，两级之间加入空气冷却以保证燃烧温度不至于太高。燃料分级燃烧与空气分级燃烧正好相反，第一级为燃料稀相燃烧，而在第二级加入燃料使得当量比达到要求的数值。这两种方法最终将会使整个系统的过量空气系数保持一个定值，为目前普遍采用的低氮燃烧控制技术。

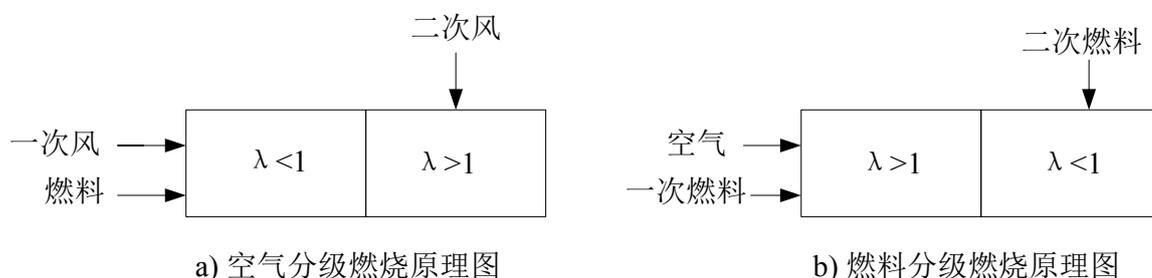


图1 空气分级a)和燃料分级b)燃烧原理图

## (2) 贫燃预混燃烧技术

预混燃烧是指在混合物点燃之前燃料与氧化剂在分子层面上完全混合，其工艺流程见图2。对于控制 $\text{NO}_x$ 的生成，这项技术的优点是可以通过对当量比的完全控制实现对燃烧温度的控制，从而降低热力型 $\text{NO}_x$ 生成速率，在有些情况下，预混燃烧和部分预混可比非预混燃烧减少85%—90%的 $\text{NO}_x$ 生成。另外，完全预混还可以减少因过量空气系数不均匀性所导致的对 $\text{NO}_x$ 生成控制的降低。但是，预混燃烧技术在安全性控制上仍存在未解决的技术难点：一是预混气体由于其高度可燃性可能会导致回火；二是过高的过量空气系数会导致排烟损失的增加，降低了锅炉热效率。

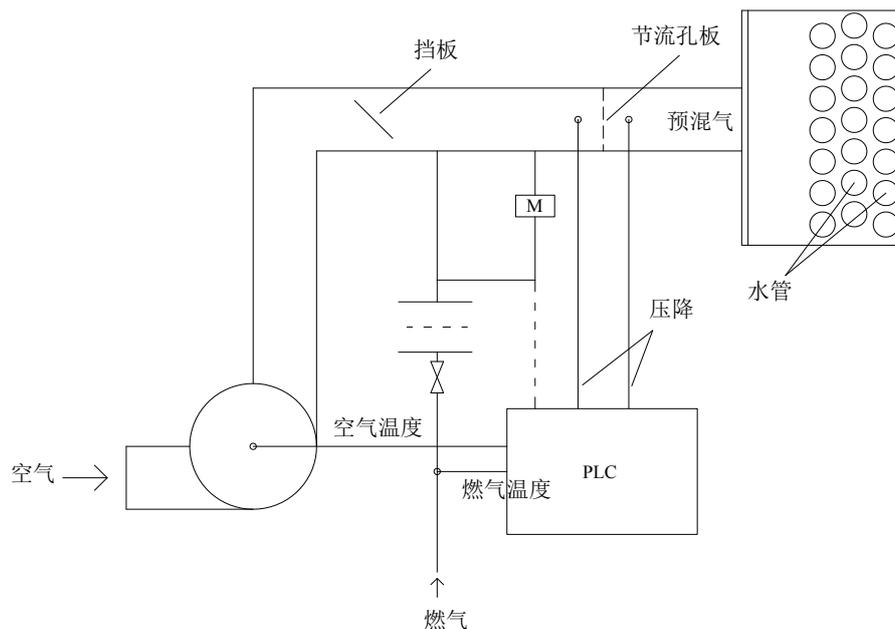


图2 预混燃烧系统的工艺流程图

### (3) 外部烟气再循环和内部烟气再循环技术

燃烧温度的降低可以通过在火焰区域加入烟气来实现, 加入的烟气吸热从而降低了燃烧温度。通过将烟气的燃烧产物加入到燃烧区域内, 不仅降低了燃烧温度, 减少了 $\text{NO}_x$ 生成; 同时加入的烟气降低了氧气的分压, 这将减弱氧气与氮气生成热力型 $\text{NO}_x$ 的过程, 从而减少 $\text{NO}_x$ 的生成。根据应用原理的不同, 烟气再循环有两种应用方式, 分别为外部烟气再循环与内部烟气再循环。

对于外部烟气再循环技术来说, 烟气从锅炉的出口通过一个外部管道, 重新加入到炉膛内。根据R0kke等的研究, 外部烟气再循环可以减少70%的 $\text{NO}_x$ 生成。图3为外循环烟气的结构示意图。外循环比例对 $\text{NO}_x$ 控制效果也有较大影响, 随着外循环比例的增加 $\text{NO}_x$ 降低幅度也更加明显, 但循环风机电耗也将增加。

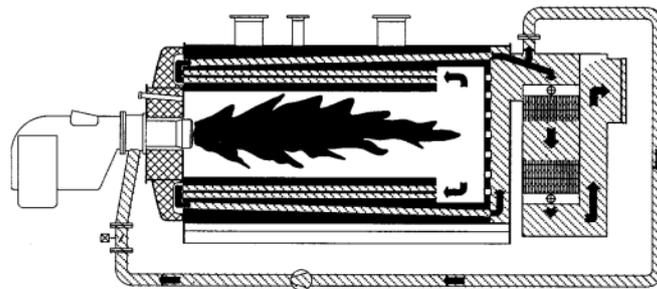


图3 外部烟气循环系统

对于内部烟气再循环，烟气回流到燃烧区域主要通过燃烧器的气体动力学。内部烟气再循环主要通过高速喷射火焰的卷吸作用或者旋流燃烧器使得气流产生旋转达到循环效果。图4a在燃烧器头部加了一个循环杯，中间通过高速气流，由于压力差使得烟气重新加入到燃烧区域中。图4b通过高速气流喷嘴达到循环效果。



图4-4 烟气内循环:a)再循环罩, b)射流卷吸

通过运用一个旋流器或者切向气流进口来生成一个有切向速度的气流，旋转过程即产生了涡流。涡流的强度可以用一个无量纲数旋流度 $S$ 表示。当旋流度超过0.6，气流中将会产生足够的径向和轴向压力梯度，这会导致气流反转，在火焰中心产生一个环形的再循环区域。中心再循环区域的高温气体将回到燃烧器喉部，这确保了对冷的未燃烧气体的点火，同时通过降低火焰温度和降低氧气分压减少 $\text{NO}_x$ 生成。

#### (4) 多孔介质催化燃烧

降低火焰温度的另一个办法就是尽可能快和多的加强火焰对外的传热。Zepter在燃烧器内增加了多孔介质(PIM)，使得燃烧反应发生在多孔介质内，这样从燃烧器到周围环境的辐射和对流换热就被加

强了。实验表明,使用PIM燃烧器的燃烧温度低于1500K, NO<sub>x</sub>生成量在5-20ppm左右。

PIM燃烧器还可以在燃烧器入口处添加催化剂,这样燃料分子和氧化剂分子就会以一个比较低的活化能在催化剂表面进行反应。这样反应温度相比于同类的燃烧要更低。由于反应过程只在催化剂表面进行,不会产生NO<sub>x</sub>,这样催化燃烧的NO<sub>x</sub>生成可以降至1ppm。催化燃烧的缺点就是必须保证活性表面在一个比较低的温度下不被氧化或蒸发,且催化剂造价相对较高,难以得到工业化应用。

### (5)无焰燃烧

传统的火焰燃烧分为预混燃烧和扩散燃烧,其主要特点包括:①燃料与氧化剂在高温下反应,温度越高越有助于火焰的稳定;②火焰面可视(甲烷燃烧的火焰一般为蓝色,有碳烟产生时为黄色);③大多数燃料在很薄的火焰层内完成燃烧,但是燃烧反应会在下游的不可见的区域内完成。

为了建立一个火焰,燃料与氧化剂之比必须在可燃极限之内,同时需要点火装置。一般情况下,火焰在点燃以后一般自己充当点火器,对来流进行点火。这就需要足够高的火焰温度来达到最小点火能量,但是高的火焰温度会使得NO<sub>x</sub>生成增加。

Wuening

J. G等在实验室内观察到了一种无焰的燃烧,如图5所示。在炉内温度

为1000°C, 空气预热到650°C的情况下, 燃料在无焰的情况下燃烧, 一氧化碳低于1ppm, NO<sub>x</sub>接近于零排放。

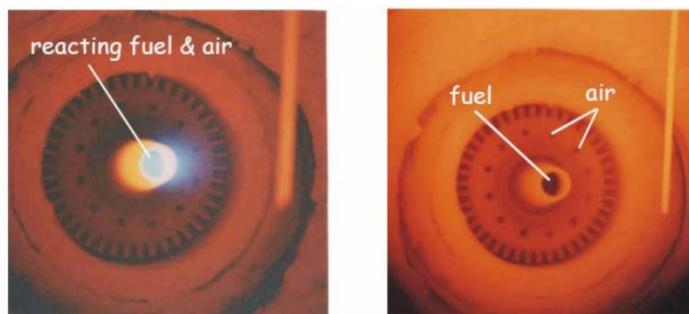


图5 火焰燃烧和无焰燃烧

为了稳定火焰, 可视的燃烧过程需要在燃烧后产生很强的烟气回流; 对于无焰燃烧, 烟气回流发生在燃烧之前, 甚至可能在燃烧器当中, 这样再循环的烟气加热了预混的燃料, 降低了炉膛温度, 扩大了反应区域。

无焰燃烧火焰分布均匀, 燃烧温度低, 同时羟基生成少, 这使得NO<sub>x</sub>产生更少。无焰燃烧需要以下条件: ①分别射入高动量的空气和燃料流; ②大量内部的或者外部的高温燃烧产物循环; ③热量的快速移除, 以保证炉膛内各处均未达到绝热火焰温度。无焰燃烧不需要传统的稳燃装置或条件(比如强涡)。

### 当前燃气工业锅炉NO<sub>x</sub>最佳可行控制技术路线

NO<sub>x</sub>排放的控制可通过抑制热力型和燃料型NO<sub>x</sub>来实现。当燃料为天然气时, 由于天然气N含量较低, 热力型NO<sub>x</sub>是唯一可以在实际中被控制的组分。燃烧修正技术通过降低火焰的高温来实现, 对降低热力

型NO<sub>x</sub>是最为有效的。当使用预热式燃烧气时，通过向燃烧区喷入水或蒸汽，将一部分烟气引回至燃烧区(FGR)，可以降低预热空气温度。但由于南加州非常严格的NO<sub>x</sub>排放标准，WI/SI在小型燃气锅炉的应用十分有限。虽然这项技术对于降低热力型NO<sub>x</sub>非常有效，但是由于对燃烧效率的降低、安全以及燃烧器的控制问题导致其不能被广泛应用。另一方面，FGR有较大的应用基础，既可以单独使用又可以和低氮燃烧器(LNB)联合使用。在实际操作上，很多燃气工业锅炉的LNB设计都是与FGR一起的。很多燃气工业锅炉业主认为LNB控制可行。

热力型NO<sub>x</sub>还可以通过最小化过剩氧量、延迟燃料和空气的混合、将锅炉燃烧容量降至某一程度。第一种技术通常是指氧削减(OT)或低过量空气(LEA)，可以通过优化燃烧器的操作达到最小的过剩空气量使得不增加过量的热力型NO<sub>x</sub>排放。较低的氧浓度对于NO<sub>x</sub>的影响可能在一定程度上增加热力型NO<sub>x</sub>，这是由于较小的烟气体积造成的较高温度尖峰。OT和LEA一般对于组装型水管和火管锅炉是不适用的，由于火焰长度和CO浓度较高可能导致背墙火焰爆震。第二种技术通过分级供应输入燃烧区的燃烧空气量来降低火焰温度和氧含量。分级燃烧空气可以通过多种方法实现。对于多燃烧器锅炉，最为实用的方法是让某些燃烧器停用(BOOS)或者将燃料流量偏重于选定的燃烧以达到类似于空气分级的效果。第三种技术通过降低锅炉的热功率以降低炉膛内的尖峰温度，该方法由于涉及降低蒸汽产量而不常使用，仅在某些场合使用。