

第二届火电厂锅炉、汽机新技术与节能改造研讨会



王春昌 西安热工研究院煤粉锅炉技术部副主任，研究员，硕士生导师。主要从事煤质特性、锅炉燃烧调整、锅炉技术改造、低NO_x燃烧技术等研究；获国家科技进步奖2项、省部级科技成果奖8项，发表学术论文50余篇，获国家发明专利9项、实用专利10余项。

演讲题目：双分级可调低NO_x技术与低负荷节能



双分级可调低NO_x燃烧技术与低负荷节能

王春昌

西安热工研究院有限公司

2014年12月16日

主要内容

一、SOFA技术的现状及问题

二、SOFA技术与负荷特性的适应性

三、SOFA技术及燃料特性的适应性

四、 燃料分级燃烧技术

五、双分级可调低NO_x技术与节能

六、脱硝设备入口NO_x浓度与节能

七、结束语

一、SOFA技术的现状及问题

1.1 SOFA技术的应用情况

(1) 应用现状

目前，电站燃煤锅炉几乎都采用了低NO_x空气燃烧分级技术，在我国，SOFA技术已经取代了各种方式的分级燃烧技术，成为我国电站燃煤锅炉的绝对的主流技术。300MW等级以上的燃煤机组锅炉，几乎都通过改造方式应用了SOFA技术；100MW-200MW等级的燃煤机组锅炉、甚至包括50MW等级的燃煤机组锅炉，相当数量的锅炉也都采用了SOFA技术。

(2) 应用效果：

300MW以上燃煤机组锅炉：在锅炉经济性牺牲较小的前提下，烟煤、褐煤锅炉NO_x排放可控制在300mg/m³以下或更低；贫煤锅炉可控制在450mg/m³以下；中小机组锅炉，锅炉的运行经济性受影响较大。

一、SOFA技术的现状及问题

1.2 SOFA技术存在的问题

- (1) 对煤种的适应性差，比较适应高挥发分煤种；
- (2) 对锅炉容量的适应性差，比较适应 300MW等级以上的燃煤机组锅炉；
- (3) 对锅炉运行负荷的适应性差；低负荷工况下锅炉的NO_x排放通常高于高负荷工况
- (4) 锅炉高温腐蚀明显加重：含硫量小于1%的高挥发分煤种也会发生严重的高温腐蚀；部分锅炉下层燃烧器以下部位发生严重的高温腐蚀；
- (5) 锅炉排烟中CO含量明显增加，特别是墙燃烧方式锅炉；
- (6) 飞灰可燃物含量升高，小容量锅炉尤其明显；
- (7) 炉内燃烧稳定性变差，锅炉灭火事故时有发生。

二、SOFA技术与负荷特性的适应性

2.1 锅炉运行氧量特性

由于工质吸热的需要，锅炉的运行氧量随着锅炉负荷的降低而升高，在此将其定义为锅炉运行氧量特性。其对炉内燃烧的影响主要表现为：

（1）额定负荷下；入炉风量根据燃烧需要供给，炉内及燃烧器区域过量空气系数小；

（2）低负荷下；入炉风量根据蒸汽需要供给，其量大于煤粉完全燃烧的需要，炉内及燃烧器区域过量空气系数高；锅炉运行负荷越低，炉内及燃烧器区域过量空气系数越高。

二、SOFA技术与负荷特性的适应性

2.2 SOFA技术与锅炉负荷的匹配性分析

(1) SOFA技术将入炉风量的30%左右从远离燃烧器区域的炉膛上方送入炉膛，在额定负荷到低负荷的变化过程中，燃烧器区域由缺氧燃烧转变为低氧燃烧再变为富氧燃烧，进而使锅炉NO_x排放随着锅炉负荷的降低而升高；

(2) 锅炉负荷降低，炉膛火焰温度水平降低，这一点有利于锅炉NO_x排放的降低；

(3) 从目前的锅炉运行实绩看，对于COFA技术，炉膛火焰温度水平的影响大于锅炉运行氧量特性的影响，采用该技术的锅炉的NO_x排放随着锅炉负荷的降低而降低；对于SOFA技术，炉膛火焰温度水平的影响小于锅炉运行氧量特性的影响，采用该高技术的锅炉的NO_x排放随着锅炉负荷的降低而升高。

锅炉运行氧量特性是SOFA技术对锅炉负荷适应差的主要原因。

三、SOFA技术与燃料特性的适应性

3. 低NO_x燃烧技术与燃煤的适应性

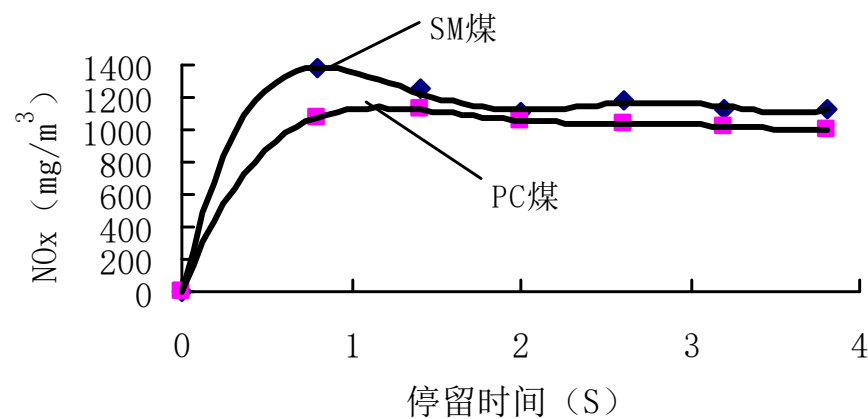
3.1 煤粉燃烧过程及其特性

在炉内的燃烧过程分为三个阶段，第一阶段，煤粉气流吸热，自身温度不断升高；第二阶段，挥发分释放并快速燃烧；第3阶段，焦炭的燃尽过程。第一、二阶段，通常在燃烧初期的1S时间内完成，其余为焦炭的燃烧阶段。

- 燃煤特性不同，其燃烧过程虽然相同，但各阶段中其燃尽特性与NO_x生成特性不同，各个阶段需要的助燃空气量不同。
- 高挥发分煤在燃烧初期，NO_x生成达到最大，之后，焦炭以及燃烧过程产生的CO等所还原NO_x的量大于焦炭燃烧过程的NO_x生成量，烟气中NO_x含量随之降低，低挥发分煤在燃烧初期，NO_x生成达到最大，之后，焦炭的还原NO_x的量与自身燃烧过程的NO_x生成量基本持平，烟气中NO_x含量基本不变。
- 高挥发分煤在燃烧初期，煤粉颗粒的燃尽率达到90%左右；低挥发分煤则不同，在燃烧初期，燃尽率只有60%左右。

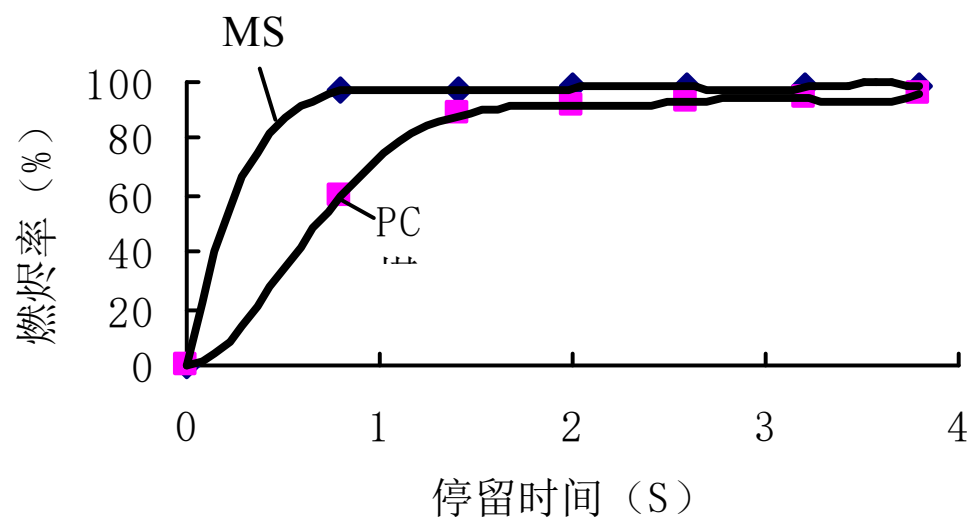
三、SOFA技术与燃料特性适应性

图1 SM 煤和PC煤NO_x生成量沿程变化规律



三、SOFA技术与燃料特性的适应性

图2 SM煤和PC煤燃烬率沿程变化情况



三、SOFA技术与燃料特性的适应性

3.2 燃烧初期需要供给的空气量

高挥发分煤初期燃烧需要供给的空气量为其当量空气量的0.9左右；

低挥发分煤初期燃烧需要供给的空气量为其当量空气量的0.6左右。

3.3 SOFA技术燃烧器区域实际供给的空气量

燃烧器区域实际供给的空气量小于当量空气量0.8-0.9；通过各种方式扩散到初期燃烧过程中的当量空气量约0.5-0.6。

3.4 SOFA技术的适应性分析

高挥发分煤初期能够形成缺氧燃烧；低挥发分煤初期燃烧充其量是低氧燃烧。这是SOFA技术以及所有空气分级燃烧技术与低挥发分煤不适应的根本原因。

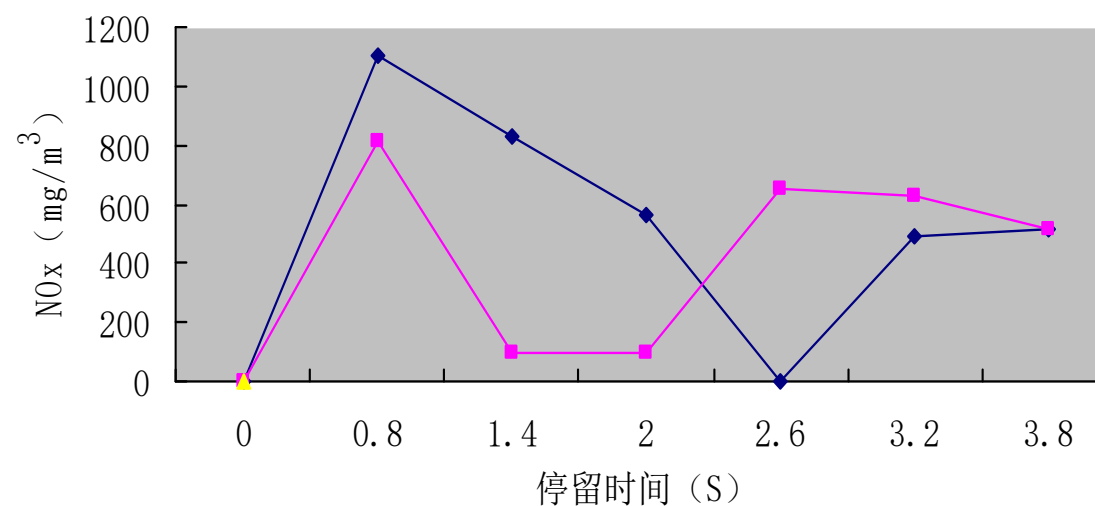
四、燃料分级燃烧技术

4.1 燃料分级燃烧技术

燃烧分级燃烧技术与空气分级技术的原理完全不同，它是通过在燃烧过程中设置再燃区域来还原燃烧初期的 NO_x 来降低锅炉的 NO_x 排放。其降低 NO_x 的效果主要与再燃燃料的份额相关，其次为再燃燃料加入前燃烧产物的过量空气系数。

四、燃料分级燃烧技术

图3 SM煤和PC煤再燃条件下NO_x沿程变化情况



说明：蓝色为高挥发分烟煤（SM煤），粉色为低挥发分贫煤（PC煤）

四、燃料分级燃烧技术

4.2 燃料分级燃烧技术的适应性

机组高负荷运行时，燃烧分级燃烧技术更易出现炉膛出口烟气温度升高，蒸汽参数超温、减温水量增加、锅炉飞灰可燃物含量升高等问题。

机组低负荷运行时，燃烧分级燃烧技术出现的炉膛出口烟气温度升高问题，恰好可改善锅炉运行氧量特性，在解决蒸汽参数偏低同时，使锅炉运行风量及烟气量减少，锅炉飞灰可燃物含量升高问题也因炉内停留时间的增加而改善。

燃料分级燃烧技术对煤种的适应性优于SOFA技术，对锅炉低负荷运行的适应性优于SOFA技术。

五、双分级可调低NO_x技术与节能

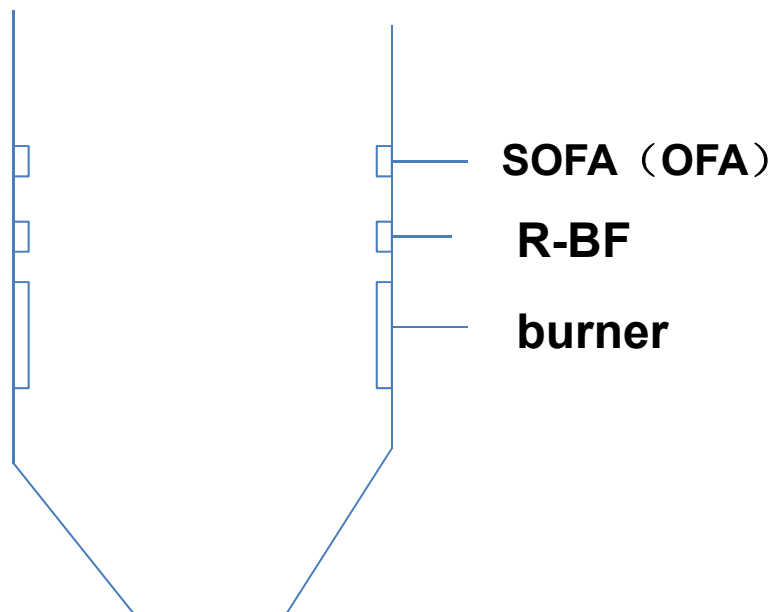
5.1 问题的提出

SOFA技术对机组高负荷运行的适应性优于燃烧分级燃烧技术，且NO_x排放值也比较理想；燃烧分级燃烧技术对机组低负荷运行的适应性优于SOFA技术，不仅可改善锅炉运行氧量特性，NO_x排放值也比SOFA技术低。

很显然，机组在高负荷运行应采用SOFA技术，在低负荷运行时应采用燃料分级燃烧技术。那么，能否将这两种机组组合应用在现代燃煤锅炉上，且能够在不同的负荷下实现两种技术的转换呢？

五、双分级可调低NO_x技术与节能

5.2 可调双分级燃烧低NO_x燃烧技术的燃烧器布置



五、双分级可调低NO_x技术与节能

5.3 可调双分级燃烧低NO_x燃烧技术的运行方式

- 高负荷运行：再燃燃料喷口退出运行，炉内的燃烧方式为空气分级燃烧方式；最上层燃尽风喷口即为SOFA喷口；其效果与目前的SOFA 技术相同。
- 低负荷运行：再燃燃料喷口投入运行，炉内的燃烧方式为燃料分级燃烧方式；最上层燃尽风喷口为与再燃燃料喷口匹配的OFA喷口。投入再燃燃料后，炉膛出口温度提高。蒸汽参数能够保证，可降低入炉风量即炉膛出口过量系数，这样，炉内不仅有燃料分级技术还原燃烧区产生的NO_x，同时，低氧运行（第一代低NO_x燃烧技术）也抑制了燃烧初期的NO_x生成，不仅可以降低NO_x生成；同时，由于入炉风量即烟气量的降低，锅炉排烟损失也得到降低。

五、双分级可调低NO_x技术与节能

5.4 双分级可调低NO_x燃烧技术的实施

- 现役机组改造：选择一台磨煤机供给再燃燃料喷口（有备用磨时），也可通过三通作为用一台磨分别供给主燃烧器喷口与再燃燃料喷口（无备用磨时），在高负荷运行时，该台磨供给主燃烧器燃料，再燃燃料喷口退出运行；在低负荷运行时，该台磨供给再燃燃料喷口，主燃烧器喷口退出运行；从而实现炉内的燃烧方式的调整。
- 新建机组：选择一或两台磨煤机供给再燃燃料喷口（作为备用磨时）的专用磨煤机，其它台磨分别供给主燃烧器喷口（能够带满负荷），在高负荷运行时，专用磨停运，再燃燃料喷口退出运行；在低负荷运行时，专用磨投入运行，再燃燃料喷口投入运行，从而实现炉内的燃烧方式的调整。

五、双分级可调低NO_x技术与节能

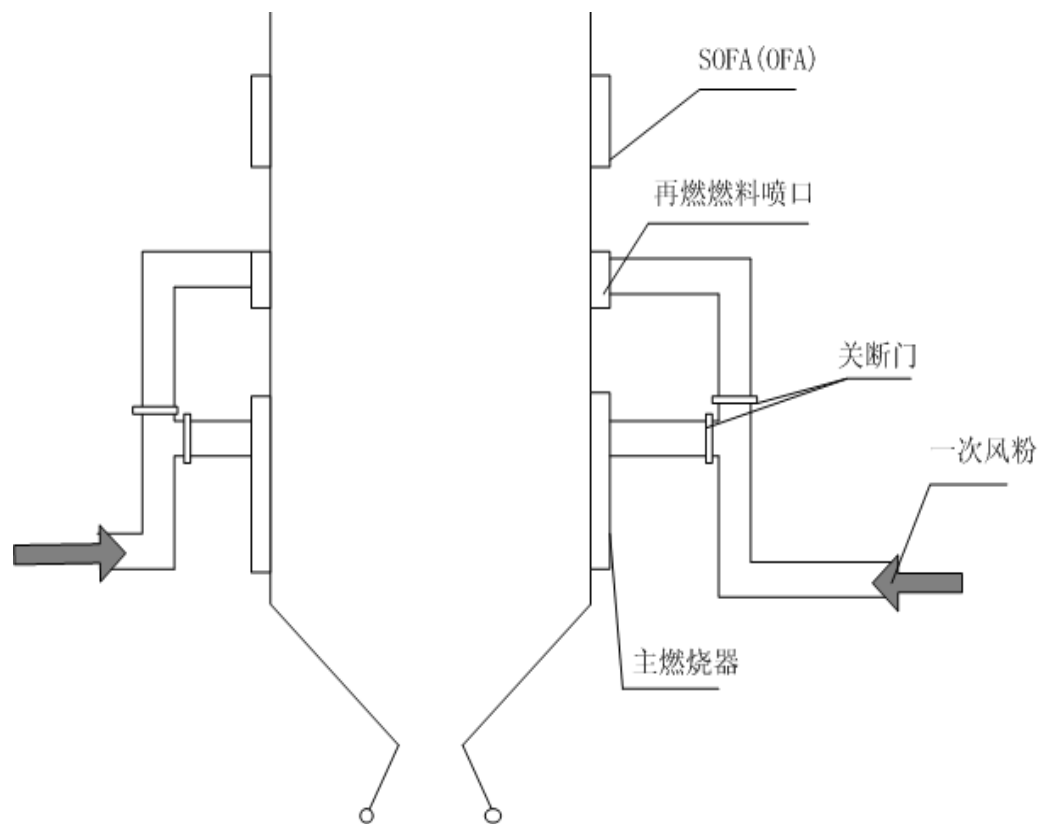


图5 双分级可调低NO_x技术改造示意图

五、双分级可调低NO_x技术与节能

5.5 双分级可调低NO_x燃烧技术的效果分析

- 锅炉低负荷运行时，普遍存在着蒸汽参数偏低、运行氧量偏大以及脱硝设备入口烟气温度偏低等问题，采用双分级可调低NO_x技术后，可获得如下效果：

NO_x排放降低100mg/m³；

蒸汽参数提高10-20℃，供电煤耗降低0.5-1.5g/kw.h；

- 运行控制氧量降低1%-2%，锅炉排烟热损失降低0.3%-0.7%，供电煤耗降低0.8-2.0g/kw.h；

脱硝设备入口温度提高，使脱硝设备无需采用旁路烟气、增大烟气量等耗能措施来保证其运行。

六、脱硝设备入口NO_x浓度与节能

6.1 脱硝技术与燃烧技术的运行特点费用比较

- (1) 脱硝技术的运行费用与降低NO_x的幅度成正比，但煤耗指标几乎不变；燃烧技术的运行费用因其使煤耗指标的增加而增加。
- (2) 低NO_x燃烧技术间接运行费用概算：燃煤价1000元/吨煤（0.1分/g煤），机组供电煤耗300g/kw·h，低NO_x燃烧技术造成的热损失为0.2%锅炉热效率时，每度电增加运行费用：0.06分/g/kw·h；0.4%——0.12分/g/kw·h……
- (3) 脱硝设备：脱硝设备为2+1时，NO_x排放量降低150mg/m³，每度电增加运行费用大约也为0.06分/g/kw·h（按3000元/吨）；NO_x排放量降低300mg/m³，每度电增加运行费用大约为0.12分/g/kw·h……
- (4) 低NO_x燃烧技术的间接运行费用已经与脱硝设备的直接运行费用基本上已处在同一数量级。在此种情况下，过度追求低NO_x空气分级燃烧技术的低NO_x效果，将会使低NO_x空气分级燃烧技术的运行费用大于烟气脱硝技术的直接运行费用；同时，机组供电煤耗将明显增加。

六、脱硝设备入口NO_x浓度与节能

6.2 不同煤种的间接运行费用比较

- (1) 以NO_x排放量降低300mg/m³计算，高挥发分大容量锅炉低NO_x燃烧技术的各项热损失可控制在0.2%以内，其间接运行费用小于脱硝设备的直接运行费用；低挥发分小容量锅炉低NO_x燃烧技术的各项热损失可很难控制在0.4%以内，其间接运行费用与脱硝设备的直接运行费用相当，甚至大于后者；
- (2) 以NO_x排放量降低500mg/m³计算，高挥发分大容量锅炉低NO_x燃烧技术的各项热损失可控制在0.5%以内，其间接运行费用小于脱硝设备的直接运行费用；低挥发分小容量锅炉低NO_x燃烧技术的各项热损失可很难控制在0.8%以内，其间接运行费用很有可能于大脱硝设备的直接运行费用；
- (3) 低NO_x燃烧技术造成的各项热损失超过0.8%锅炉热效率，其间接运行费用大于脱硝设备的直接运行费用。

六、脱硝设备入口NO_x浓度与节能

6.3 脱硝设备最佳入口NO_x浓度

- （1） 低NO_x燃烧技术的间接运行费用随着NO_x减排量的增加而增加，且降低300mg/m³中的每100mg/m³的间接费用不同，后边的100mg/m³费用通常大于其前的100mg/m³，这就是说；每增加100mg/m³的NO_x减排量，其折算到100mg/m³的费用都是相对增加的。
- （2） 脱硝设备的NO_x减排量几乎与运行费用成正比，且降低的NO_x幅度越大，其直接成本越低（脱硝效率随催化剂级数的增加而效率增加）。
- （3） 低NO_x燃烧技术造成的间接运行费用与脱硝设备的直接运行费用处于同一级别，且费用的增加特性不同，因此，脱硝设备入口存在一个最佳NO_x浓度，在该浓度下，NO_x减排的总费用最小。

六、脱硝设备入口NO_x浓度与节能

6.4 脱硝设备最佳入口NO_x浓度的确定

- (1) 脱硝设备的直接运行费用可以通过理论计算求得，且可建立入口NO_x浓度与直接费用的关系式，但低NO_x空气分级燃烧技术的间接费用无法通过理论计算获得，因此，脱硝设备入口最佳NO_x浓度无法通过理论计算获得。
- (2) 脱硝设备的入口的最佳NO_x浓度可以通过试验获得，考虑到影响因素的复杂性，脱硝设备的入口的最佳NO_x浓度应通过平行试验获得。
- (3) 通过不同锅炉低NO_x空气分级燃烧技术间接运行费用与NO_x效果的大量试验，回归出不同煤种、炉型NO_x减排效果与间接运行费用的关系式，并通过其求出脱硝设备入口存在一个最佳NO_x浓度，指导电厂运行。

七、结束语

- (1) SOFA技术与锅炉低负荷运行特性不匹配，这是其锅炉低负荷运行工况NO_x排放高于高负荷运行工况的原因。SOFA技术与锅炉低负荷运行特性不匹配的主要原因是其与锅炉运行氧量特性在原理上相互矛盾，导致SOFA技术在锅炉低负荷运行工况下无法在燃烧器区域形成缺氧燃烧。
- (2) 燃料分级燃烧技术对锅炉运行负荷的适应性与SOFA技术恰好相反，燃料分级燃烧技术在锅炉高负荷工况易造成蒸汽超温等一系列问题；但在锅炉低负荷运行工况下，燃料分级燃烧技术恰好与锅炉运行氧量特性相匹配。即其造成的炉膛出口温度提高恰好解决蒸汽参数偏低的问题，同时可降低入炉风量即炉膛出口过量系数，这样，炉内不仅有燃料分级技术还原燃烧区产生的NO_x，同时，低氧运行（第一代低NO_x燃烧技术）也抑制了燃烧初期的NO_x生成，同时，由于入炉风量及烟气量的降低，锅炉排烟损失也得到相对可观的降低。

七、结束语

(3) 双分级可调低NO_x燃烧技术通过燃烧器投运方式的改变，使炉内燃烧技术在SOFA技术与燃料分级燃烧技术之间形成转换。即锅炉高负荷运行工况下炉内燃烧方式为SOFA技术方式；锅炉低负荷运行工况下炉内燃烧方式为燃烧分级燃烧技术方式。与原有的单一SOFA技术相比，锅炉低负荷运行特性（包括NO_x排放至降低）与经济性得到明显提高，这一点不仅对大机组容量锅炉的减排非常重要，对其节能同样非常重要。

七、结束语

(4) 低NO_x空气分级燃烧技术与脱硝设备的结合使用时，在锅炉设计时，低NO_x空气分级燃烧技术应根据具体情况设计合理的空气分级深度；在机组投运后，应对锅炉烟气脱硝设备入口烟气的NO_x浓度进行调整，求出其入口最佳NO_x浓度值以指导运行，使锅炉的NO_x减排的总费用达到最低；同时，也使机组的供电煤耗有所降低。这一点对电站燃煤锅炉的节能非常重要。

七、结束语

(5) 双分级可调低NO_x燃烧技术对解决锅炉低负荷工况蒸汽参数偏低、脱硝设备因入口烟气温度低而无法投运等问题非常有利。且实施非常简单，尤其是切圆燃烧方式锅炉，其改造费用也很小。对该类锅炉应优先进行双分级可调低NO_x燃烧技术的工程应用研究，这对改善目前低NO_x空气分级技术存在的问题（包括低负荷下NO_x排放相对高的特性）具有重要的学术价值与现实意义。

Thank you very much for your attention!

追
求
卓
越

求
实
创
新

规
范
诚
信

以
人
为
本

谢谢!