



### 2.1.3 煤粉燃尽指数

该指数表征特定条件下煤粉在炉膛内充分燃烧的难易程度，其计算结果越低，对锅炉燃烧系统越有利。

$$R_J = k_{J0}V_{daf} + k_{J1} \quad (2)$$

式(2)中，经验系数  $K_{J0}$ 、 $K_{J1}$  的取值分别为0.11和1.22。

### 2.1.4 煤粉结渣指数

$$R_z = k_{z0}(B/A) + k_{z1}(SiO_2/Al_2O_3) - k_{z3}ST - k_{z4}G + m \quad (3)$$

式(3)中，将煤粉结渣指数记为  $R_z$ ， $ST$  表示煤灰熔融性，经验参数  $K_{z0}$ 、 $K_{z1}$ 、 $K_{z2}$ 、 $K_{z4}$ 、 $m$  分别取值为1.24、0.28、0.0023、0.019、5.43， $G=SiO_2/(SiO_2+Fe_2O_3+MgO+CaO) \times 100$ ， $B/A=(K_2O+MgO+Na_2O+CaO+Fe_2O_3)/(SiO_2+TiO_2+Al_2O_3)$ 。拟采用烟煤燃烧特性评价指标计算结果见表1。

表1 拟采用烟煤燃烧特性评价指标计算结果

评价指标	烟煤计算结果	描述	原设计煤种计算结果	描述
着火稳定性指数	5.412	易点燃	4.431	难点燃
燃尽指数	4.970	易燃尽	2.950	难燃尽
结渣指数	1.84	中等结渣	0.94	不易结渣

### 2.2 煤质改变对锅炉燃烧系统的影响分析

煤粉燃烧时产生的灰分、硫分、水分等对锅炉燃烧系统具有多方面的影响，涉及锅炉燃烧室、燃烧装置以及各种附属机构。例如，煤粉中水分偏高会导致其在燃烧时产生过多的水蒸汽，进而抑制煤粉的着火稳定性和燃烧放热量，并且增加了设备腐蚀的风险。再如，燃煤挥发分的高低能够显著影响燃烧系统的性能及安全性，当  $V_{daf}$  数值  $\geq 25\%$  时，煤粉的爆炸风险将达到较高水平<sup>[1]</sup>。拟采用烟煤的各项参数与设计煤种不同，具体表现为挥发分、灰分明显高于贫煤。因此，应该根据燃煤特性对锅炉系统进行改进。

## 3 锅炉制粉系统改造

### 3.1 送粉系统改造

送粉系统是锅炉燃烧系统的重要组成部分，其作用是将煤粉送入炉膛，可分为中间仓储式和直吹式两大类，前者又包括乏气送粉（使用干燥剂）和热风送粉。该型锅炉存在  $NO_x$  排放量过高的问题，而这一点与热风送粉系统存在密切的联系，因为该送粉模式容易引起炉膛高温（形成  $NO_x$  的必要条件）<sup>[2]</sup>。

因此，在改造中采用乏气送粉代替热风送粉，其为难燃尽的劣质煤具有较强的适应性，有利于提高燃烧系统的着火稳定性指数和燃尽指数、降低  $NO_x$  生成量。另外，改进后的煤粉仓与原煤仓之间形成了良好的适应性，可满足连续稳定的送粉。

### 3.2 磨煤机出力改造

原有设计煤种的燃烧发热量高于拟使用的烟煤，为达到同等水平的发热量，须提高磨煤机的出力，以增大煤粉的供应量。制粉系统的磨煤机不做改变，但要校核其出力。

一是燃煤消耗量计算，煤粉在燃烧过程中通常会存在一定的损失，其消耗量以实际值为准，计算式(4)：

$$B = \frac{D_{gr}(h_{gr}'' - h_{gs}) + D_r(h_{gr}'' - h_{gr}') + D_{pw}(h_{pw} - h_{gs})}{Q_r \cdot \eta} \times 100 \quad (4)$$

式(4)中， $h_{gr}''$ 、 $h_{gr}'$ 、 $h_{gs}$  分别为过热器出口蒸汽焓、再热器出口蒸汽焓、再热器入口蒸汽焓， $h_{gs}$ 、 $h_{pw}$  表示锅炉给水焓、锅炉排污水焓， $D_{gr}$ 、 $D_{pw}$  为过热蒸汽流量、排污水流量，锅炉效率记为  $\eta$ ，锅炉输入热量记为  $Q_r$ ， $D_r$  为再热器的有效利用热量， $B$  为燃煤的实际消耗量。结合该锅炉系统的实际参数，得到  $B=152.98$  (t/h)。

二是出力校核，单台锅炉配备有四台磨煤机，其筒体直径为3.50m，长度为6.00m，容积为57.70m<sup>3</sup>。煤粉细度要求达到18.00  $\mu m$ ，其可磨性系数为74HGI。根据煤粉消耗量以及其他必要参数，求得磨煤机的碾磨出力最大值和最佳值，分别为53.24t/h、46.61t/h。

三是排粉机对锅炉系统变化的适应性，在改造之前，锅炉燃烧系统排粉机的额定电功率为700kW，扬程和流量分别为11.5kPa、1.1万 m<sup>3</sup>/h。虽然送粉系统发生了变化，但根据实际核算的结果，原有排风系统的功率、出力等足以满足改造后的运行需求，排粉机设计运行参数见表2。

表2 排粉机设计运行参数

参数名称	炉膛负压	燃烧器阻力	风机效率	风机流量	风机阻力	排粉管道阻力
设计值	-38Pa	2.1kPa	75%	127986.2m <sup>3</sup> /s	13.16kPa	4.5kPa

## 4 锅炉燃烧器改造

### 4.1 改造原因分析

锅炉  $NO_x$  的排放量、结渣以及整体的燃烧效率与其燃烧器存在直接联系，在系统改造之后，锅炉及其附属机构的运行方式发生了一定程度的变化，



1. 拟采用烟煤燃烧特性评价指标计算结果  
2. 拟采用烟煤燃烧特性评价指标计算结果  
3. 拟采用烟煤燃烧特性评价指标计算结果

如乏风送粉系统无须设置三次风。燃烧器应该进行改造，以便适应锅炉运行方式的变化。与此同时，为了降低 NO<sub>x</sub> 的生成量、减少燃烧器区域的结渣，原锅炉燃烧器分上下两组布置，但间距不合理，需要进行适当的调整。

## 4.2 改造方案

### 4.2.1 燃烧器改造的技术路径

原有设计方案缺乏对 NO<sub>x</sub> 的深度控制策略，在燃烧器改造中决定采用立体分级低氮燃烧技术，其设计要点为将原有燃烧器更换为低 NO<sub>x</sub> 燃烧器，并在这一基础上实施分级燃烧。相关的燃烧理论为百叶窗水平浓淡燃烧技术、炉膛内空气垂直分级燃烧技术、立体分级燃烧<sup>[3]</sup>。在炉内垂直分级燃烧中，将燃烧区域按照垂直空间划分为三部分，分别为主燃区、还原区以及燃尽区。空气进入炉膛时要进行分级处理，重点控制参数为过量空气系数，主燃区内该参数限制在0.78~0.90。主燃烧区内的燃料供应保持较高的富集水平，借此来延缓燃烧过程，NO<sub>x</sub> 和含氮基团进入还原区后，还原反应的产物为氮气，从而显著降低 NO<sub>x</sub> 的生成量。二次送风的位置是燃尽风喷口，由于供氧充分，焦炭在燃尽区内充分燃烧，提高了燃尽指数，同时还抑制了炉膛出口区域的结渣。百叶窗水平浓度煤粉燃烧技术由国内的科研院所自主开发而来，其特点为设置了类似于百叶窗的煤粉浓度调节机构，通过其调节作用，浓度较高的煤粉流在欠氧条件下燃烧，氧气浓度较低时不利于生成 NO，淡煤粉（浓度较低的煤粉）有助于限制含氮基团析出，从而达到抑制 NO<sub>x</sub> 的目的。

### 4.2.2 燃烧器改造实施要点

为了实现以上煤粉燃烧机理，必须对燃烧器进行重新设计，实施要点如下。第一，改造一次风送风形式。燃烧器的一次送风全部采用百叶窗水平浓淡控制技术，通过设置相应的浓缩器分流煤粉，使其形成浓淡差异。第二，改造二次风喷口的分布。这一改造内容关系到炉膛内能否实现空气分级燃烧，改造实施的重点为设置调风器。四角切圆燃烧设计中需控制假想切圆的直径，原锅炉设计的假想切圆直径为510mm（上）、710mm（下），改造后的直径分别为680mm（上）、775mm（下）。第三，燃烧器喷口布置形式改造。改造后的锅炉燃烧系统设置三组喷口，形成上、中、下空间布置，燃尽风

喷口与燃尽区对应，布置在上部<sup>[4]</sup>。中部的喷口主要服务还原区的燃烧控制，下部喷口控制主燃区的燃烧过程。

## 5 锅炉燃烧系统运行参数改进

随着燃烧器、制粉系统以及煤质的改变，锅炉的运行参数也需要进一步调整和优化，以便适应新的工作条件。主要改进点包括煤粉细度、燃烧器摆角、燃尽风风门开度、变氧量等。以主燃烧器摆角为例，该运行参数用于调节火焰的中心位置，从而改变锅炉的水汽系统。针对改造后的锅炉燃烧系统开展试验，设置六种摆角，分别为0%、20%、40%、60%、80%、100%。观察其对脱硝入口 NO<sub>x</sub> 浓度、过热器总喷水量以及再热器总喷水量的影响。过热器总喷水量、NO<sub>x</sub> 浓度与摆角的角度大小呈正相关。再热器总喷水量在摆角超过40%以后才开始上升。优化思路为控制 NO<sub>x</sub> 浓度，同时尽量提高过热器总喷水量和再热器总喷水量。因此，将燃烧器摆角角度限制在40%~65%。改造后锅炉燃烧系统运行参数控制要求见表3。

表3 改造后锅炉燃烧系统运行参数控制要求

参数名称	主燃烧器摆角	燃尽风总风门开度	煤粉细度 R90	周界风开度
改进结果	40%~65%	40%~50%	17%~20%	20%~30%

## 6 结语

结合发电厂锅炉设备的运行情况，分析 DG1025/18.2- II 4型亚临界锅炉燃烧系统存在的局限性，发现其炉膛燃烧区域易结渣、烟气含碳量偏高、氮氧化物排放量超标。煤粉燃烧特性及其制备方式影响了整个工艺过程，于是改用新的煤种，同时对燃烧器、送粉系统、磨煤机出力等进行改造或调整，引入立体分级低氮燃烧技术。★

## 参考文献

- [1] 张鹏林, 王俊超, 等. 300MW 锅炉燃烧系统优化控制技术研究 [J]. 自动化应用, 2022, 5.
- [2] 宋澜波, 王波, 等. 煤气锅炉燃烧系统工艺优化研究及改造实践 [J]. 冶金动力, 2021, 6.
- [3] 薛彤, 朱磊. 电站锅炉燃烧系统优化运行与应用研究 [J]. 科学技术创新, 2020, 5.
- [4] 王宏武, 刘欢, 等. 1000 MW 超超临界锅炉燃烧系统数值模拟及工程应用 [J]. 热能动力工程, 2019, 8.



1. 投稿请发送至《发电运维》编辑部，稿件请发送至《发电运维》编辑部，稿件请发送至《发电运维》编辑部。  
2. 本刊为《发电运维》编辑部，稿件请发送至《发电运维》编辑部，稿件请发送至《发电运维》编辑部。  
3. 本刊为《发电运维》编辑部，稿件请发送至《发电运维》编辑部，稿件请发送至《发电运维》编辑部。