

混煤在 300MW 锅炉燃烧的实践与分析

何荣强

(湛江电力有限公司)

摘要：通过研究混煤在大型锅炉的实践应用，提出两种成分相差较大的不同煤种的混合比例要求，使混煤的燃烧特性接近锅炉设计燃用煤种，探讨混煤对锅炉燃烧工况的影响，并进行混煤燃烧的优化调整。经过一年多的大规模应用，采用混煤的办法可以使锅炉适用与设计煤种差异较大的不同煤种，混煤燃烧有较好的安全性，但经济性稍差。
关键词：锅炉 混煤 煤质特性 燃烧

1 引言

湛江电力有限公司锅炉燃煤是贫煤。近年来国内外煤炭资源供应紧缺，煤炭价格上涨，运输成本上升，已经影响到电力生产行业的正常运作。贫煤作为煤矿中的稀少煤种，价格高、煤源少，已经无法保证正常供应。如果能改用来源较广、价格相对便宜的越南无烟煤，就能缓解煤源的问题。

越南鸿基煤属于低挥发份、难磨、难燃烧的煤种，不适应在本厂锅炉单独使用，但由于地缘距离近，有价格低、运输成本低、煤源组织方便等优点。我厂进行混煤燃烧试验的目的，是为了解决越南无烟煤在我厂锅炉应用问题。

2 系统简介

本文以湛江电厂#3 号锅炉为研究对象，其他 3 台锅炉与#3 锅炉情况相近。#3 锅炉为东方锅炉厂优化设计的 300MW 机组的配套锅炉，型号 DG1025/18.2-II(5)。该锅炉燃烧器为内装稳燃船体的直流燃烧器，双切圆布置，假想切圆为φ600mm 和φ800mm。风箱为四角角式风箱形式，每角上下两只，共 8 只风箱，每层二次风可单独调整，两层三次风和其中 22m、27m、29m 的二次风喷口可上下摆动 20 度。ECR 工况下一次风温 332℃，二次风温 323℃。

锅炉采用中储式热风送风系统，每台锅炉配 4 套 MTZ3570 钢球磨，制粉乏气经排粉机送入燃烧器上部对角的两个三次风喷口。煤粉由热一次风送入四角的 4 层共 16 只一次风喷口。

锅炉燃用煤种为 100%贫煤。表 1 是锅炉燃用煤种和混煤中的烟煤、无烟煤的工业分析成分。其中，烟煤以澳大利亚烟煤的挥发分最高，无烟煤以越南煤的挥发分最低。这两种煤是湛江电力有限公司锅炉燃用的煤质差异最大的煤种。

表 1 使用煤种的煤质分析						
煤种	水分 Mad,%	灰分 Aad,%	挥发份 Vad,%	固定炭 Fcad,%	低位发热量 Qnet,ar MJ/kg	灰熔点 ST,℃
燃用煤种	1.43	26.36	10.77	59.73	22.71	>1500
烟煤	2.5	19.10	30.10	45.30	23.34	1270

无烟煤	0.96	32.34	6.27	60.43	19.99	>1500
-----	------	-------	------	-------	-------	-------

3 混煤的煤质特性

我厂经过现场的混煤燃烧多种配比试验，确定澳大利亚烟煤（以下简称烟煤）和越南无烟煤（以下简称无烟煤）按 1：1 比例混合得到的混煤（以下简称混煤）燃烧工况最接近原设计煤种。由于无烟煤和烟煤的煤质特性差异很大，根据我厂锅炉的需要主要是解决混煤是否符合机组负荷调节的需要以及在炉内燃烧稳定性、安全性这两大问题，控制混煤的煤质特性参数主要是收到基低位发热量 $Q_{net,ar}$ 和挥发分 V_{ad} 。这两个特性参数是评价动力用煤的最重要指标，同时也是评定煤燃烧性能的首要指标，因此是我厂进行混煤燃烧的主要判别依据。

3.1 混煤的工业成分分析

混煤的工业成分可以按照各煤种的煤量分别占混煤量的质量百分比用加权平均法计算得出。例如，我厂混煤的发热量按无烟煤和烟煤占混煤质量份额的加权平均值计算^[1]。即：

$$Q_{DW}^Y = \sum_{i=1}^n b_i (Q_{DW}^Y)_i \tag{1}$$

式中： $(Q_{DW}^Y)_i$ ——某种燃料中的应用基低位发热量
 b_i ——某种燃料占总燃料的质量份额

混煤的其它工业成分分析值如挥发分、灰分、水分均可按同样的原则进行计算。混煤的工业成分计算结果见表 2。我厂对混煤的煤质化验结果和计算结果吻合。混煤的灰熔点由于涉及化学反应过程，不能由加权平均法计算，由我厂实际测定得出。

表 2 混煤（1:1）的工业成分

煤种	水分	灰分	挥发份	固定炭	低位发热量	灰熔点
	Mad,%	Aad,%	Vad,%	Fcad,%	Qnet,ar MJ/kg	ST,℃
混煤	1.73	25.72	18.19	52.87	21.67	>1400

3.2 混煤的评价挥发分

由表 2 可见，混煤的水分、灰分、低位发热量均与燃用煤种相差不大，但挥发分相差较大，因此有必要对混煤的挥发份进行分析，确定是否符合我厂锅炉的使用。

混煤的挥发分虽然可以通过质量加权平均法算出，但混煤在炉内的实际燃烧过程比单一煤种复杂，两种差异较大的不同煤种的混煤，其燃烧特性比工业成分相近的贫煤差，相对接近混煤中的无烟煤，需要用混煤的评价挥发份来判别其燃烧特性。本文根据图 1 的方法求得混煤的评价挥发分^[2]。按照混煤的工业成分求得混煤的可燃基挥发分 $V_{daf(混)} = 24.8\%$ ，按照图 1 中虚线的箭头指示的方法得到混煤的评价挥发分 $V_{daf(混)}^{评} \approx 15.5\%$ 。我厂设计燃用的贫煤的可燃基挥发份换算得到 $V_{daf} \approx 14.91\%$ 。可见，混煤的评价挥发分和实际燃用煤种基本一致，在运行煤质的允许波动范围内^[3]，适合在我厂锅炉使用。

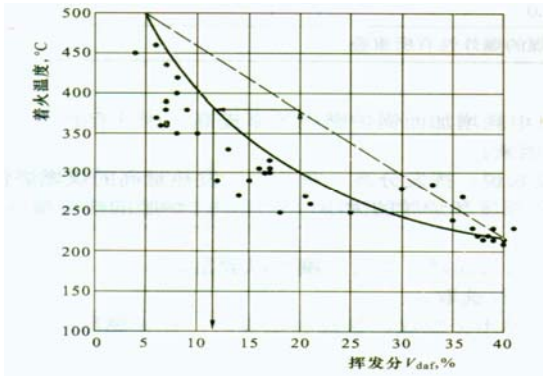


图 1 根据着火特性求混煤的评价挥发分

我们认为，图 1 中的混煤评价挥发分对于煤质相差较大的煤种混合是合适的，但对于煤质相差不大的煤种混合得到的混煤，其评价挥发分应在两种煤质之间靠近挥发分低的煤种，如按图中曲线得到评价挥发分可能会出现较大偏差。

3.3 混煤的着火特性评价

煤的着火特性是指煤粉在炉膛中在规定的条件下被燃烧着火的难易程度。它是评价煤粉着火难易程度的重要指标。煤粉的着火特性非常复杂，但对锅炉运行人员来说又极其重要，掌握煤粉气流的着火特性，将十分有利于锅炉设备的安全和经济运行。本文采用着火指数炉测定煤的着火温度 T_d 来评价混煤的着火难易程度^[3]。计算公式如下：

$$T_d = 654 - 1.9V_{daf} + 0.43A_{ad} - 4.5M_{ad}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

T_d 与煤的着火特性关系如下：

T_d 计算数值	煤的着火特性
$T_d > 638$	极难稳定区
$T_d > 613 \sim 638$	难稳定区
$T_d > 593 \sim 613$	中等稳定区
$T_d > 560 \sim 593$	易稳定区
$T_d \leq 560$	褐煤区

将表 1 和表 2 中的不同煤种和混煤的工业成分代入（2）式，其中混煤的挥发份使用评价挥发份进行计算，得到我厂锅炉燃用的不同煤种煤的着火温度 T_d 见表 3。

表 3 我厂燃煤的着火温度 T_d

煤种	贫煤	无烟煤	烟煤	混煤
T_d ($^\circ\text{C}$)	630.6	645.7	578	627.8

从 T_d 的计算结果得知，越南无烟煤和烟煤都不适宜在我厂锅炉单独使用。通过无烟煤和烟煤按 1：1 得到的混煤，其着火特性和我厂实际燃用的贫煤着火特性很接近。

3.4 混煤的燃烬特性评价

煤粉的燃烬特性反映煤粉在锅炉内燃烧的难易程度。我们可以通过一种简单而有效的方法判定煤粉气流的燃烬特性，即煤焦非均相着火温度与煤质的通用关系及判别煤焦着火特性的通用性指数 FZ。尽管煤的工业分析值千变万化，但若 FZ 数相同，则煤的着火特性相同^{[4][5]}。FZ 的计算公式与煤的燃烬特性关系如下：

$$FZ = (V_{ad} - M_{ad})^2 FC_{ad} \times 100^{-4} \quad (3)$$

FZ 与煤的燃烬特性关系如下:

FZ 计算数值	煤的燃烬特性
$FZ \leq 0.5$	极难燃煤
$0.5 \leq FZ \leq 1.0$	难燃煤
$1.0 \leq FZ \leq 1.5$	准难燃煤
$1.5 \leq FZ \leq 2.0$	易燃煤
$2.0 < FZ$	极易燃煤

把煤质的各工业成分代入 (3), 得到我厂锅炉燃用的不同煤种煤的 FZ 值见表 4。

表 4 我厂燃煤的 FZ 值

煤种	贫煤	越南无烟煤	澳洲烟煤	混煤
FZ	0.52	0.17	3.45	0.478

由 FZ 值计算结果得知, 我厂锅炉的实际燃用贫煤属于难燃煤。越南无烟煤属于极难燃煤; 烟煤属于极易燃煤。混煤的应用基挥发份由评价干燥无灰基挥发份换算为 $V_{ad(混)}^{\text{评}} \approx 11.24\%$, 并把其他工业成分代入 (3) 得到混煤的 FZ 值。可见, 混煤的燃烬特性比燃用煤种差。

4 混煤燃烧的结果与分析

湛江电力有限公司从 2004 年 1 月 6 日开始进行越南鸿基煤和烟煤混煤燃烧的试验, 取得了良好效果。混煤燃烧方式已成为我厂主要燃烧方式, 使我厂适应煤种的范围大大拓宽。我厂还没有专门的混煤设施, 因此只能通过两个斗轮机同时抓无烟煤和烟煤, 将两种煤同时卸到一条输煤皮带上进行混合后上锅炉, 其间经过碎煤机、煤仓、磨煤机、粉仓的混合, 基本能混合均匀。混煤的比例控制约为 1:1。

4.1 混煤的运行安全性分析

(1) 制粉系统运行的安全性

我厂制粉系统采用中间储仓式低速钢球磨煤机系统。由于混煤中烟煤的挥发份较高, 磨煤机出口煤粉气流温度控制在 85°C 以下, 和磨制贫煤的控制温度基本一致。经过一年的运行表明, 混煤在磨煤机出口的控制温度按照混煤的评价挥发份来确定, 可以保证制粉过程和粉仓储粉的安全。这是因为混煤中的无烟煤起到阻燃作用, 降低了混煤粉的着火和爆炸性。

(2) 热风送粉的安全性

由于混煤中有 50% 的高挥发分烟煤, 而且混煤粉采用热风送粉系统, 我厂一次风管中煤粉气流的温度一般在 $200\sim 230^{\circ}\text{C}$ 之间, 这对输送烟煤很不利, 但由于烟煤只占 50%, 同时由于越南无烟煤粉的阻燃作用, 避免了混煤的一次风管内提前着火。长期运行表明, 虽然混煤采用热一次风送粉方式, 但并没有出现其中的烟煤在燃烧器喷口提早燃烧甚至烧坏一次风管的问题。

(3) 混煤燃烧稳定性

运行表明, 混煤在炉膛内的着火稳定性较好, 有足够的安全保障。从观火孔观察, 煤粉气流的着火点一般在喷口处 $200\sim 300\text{mm}$ 左右, 与煤质特性相似的贫煤相比, 着火距离稍短, 着火点的火焰强度大, 温度要高些。这是由于我厂采用热风送粉系统, 一次风管内煤粉气流的温度达到 $180\sim 220^{\circ}\text{C}$ 之间, 烟煤中的部分挥发份在一次风管内逸出, 使混煤在燃烧器喷口的着火点提前, 同时混煤中

的烟煤和无烟煤保持各自的着火特性,烟煤在燃烧器喷口迅速着火,两者原因使混煤粉气流的着火距离短而火焰强度大。另外由于越南无烟煤难燃特性,在燃烧器喷口处起到阻燃作用,降低了火焰传播速度,避免火焰回火到燃烧器喷口内烧坏设备。混煤的着火特性和原实际设计煤种贫煤相似,基本符合其着火特性的评价结果。

(4) 混煤比例变化对燃烧着火稳定性的影响

我厂试烧过无烟煤和烟煤比例为 2:1 的混煤,但在实际运行观察时,发现锅炉燃烧器喷口着火点推迟,火检强度不稳定甚至经常失去火检的燃烧不稳定现象。这表明混煤中无烟煤的比例超过 50% 时,混煤的着火特性会急剧偏向无烟煤。根据本文方法,当无烟煤和烟煤的比例为 2:1 混合时,其评价挥发份 $V_{ad}'(\text{混}) \approx 7.7\%$ 左右,基本接近越南无烟煤的特性。混煤中无烟煤份额增大导致着火特性变差的原因主要有以下几个方面:①无烟煤对烟煤起到了更大的阻燃作用,降低了燃烧器喷口的火焰传播速度。②烟煤份额过小,使一次风的风量相对烟煤来说过剩,不利于烟煤的及时着火和稳燃。③混煤中无烟煤质量份额增加,使混煤的评价挥发份降低,一方面要求混煤的经济细度更细,另一方面因无烟煤难磨导致煤粉变粗,造成混煤的实际煤粉细度比其经济细度相差更大,使煤粉在炉膛的着火特性更差。

(5) 结焦特性

如前所述,混煤的结焦特性涉及复杂的化学反应过程,因此只能通过实际分析和现场运行观察得出结论。如表 2,我厂化验混煤的灰融点温度 $ST > 1400^\circ\text{C}$,属轻微结焦特性,在炉内结焦的可能性不大。实际运行观察表明,混煤在炉内燃烧没有明显的结焦恶化情况。

(6) 过热器、再热器的安全性

运行实践表明,混煤燃烧对锅炉各段受热面的换热没有明显影响,基本与原燃煤种一致,过、再热蒸汽温度均能维持正常,没有出现局部超温、热偏差恶化等问题。但越南无烟煤的难磨、难燃特性,会加剧受热面和风机的磨损,值得留意。

4.2 混煤燃烧的经济性分析

(1) 混煤的煤粉细度的选择

混煤在磨煤机中磨制成煤粉,基本上是不同的煤种根据各自可磨性得到。混煤的可磨性可以由组成混煤的单一煤种的可磨性按照质量加权平均的办法计算得到。因此混煤粉中存在无烟煤煤粉粗,烟煤煤粉细的情况,这就造成煤粉细度不均匀程度要比单一煤种大许多,也是混煤粉在燃烬程度上比单一煤种差的主要原因之一。由于混煤粉的不均匀,要有良好的燃烬效率,其煤粉细度要选择更细,以使其中无烟煤燃烧完全。煤粉的均匀性系数和经济细度由 (4)、(5) 式算出。

$$n = 2.88 \lg \frac{2 - \lg R_{200}}{2 - \lg R_{90}} \quad (4)$$

$$R_{90} = 4 + 0.5nV_{daf} \quad (5)$$

n ——煤粉均匀性指数

R_{90} ——燃煤的煤粉经济细度^[6]。

根据我厂 2005 年 2 月 4 日~6 日期间化验的一组典型的混煤粉细度,混煤的平均煤粉细度 $R_{200} = 1.26\%$ 、 $R_{90} = 12.9\%$,代入 (4) 式得混煤的均匀性指数 $n = 0.95$,达不到钢球磨煤机要求的煤粉均匀性 $n \geq 1.1$ 左右的水平。把 n 和混煤的评价挥发份 $V_{daf}^{\text{评}}(\text{混})$ 代入 (5),得到混煤的经济细度 R_{90} 取值应为 11.36%。我厂锅炉制粉系统磨制的混煤粉实际细度比其经济细度稍大,降低了燃烧经济效益。

(2) 混煤燃烧的飞灰可燃物

我厂在燃烧混煤期间,飞灰可燃物在 9~11% 左右,而在燃烧煤质特性相近的贫煤时飞灰可燃物

可以达到 3~4%。混煤的飞灰可燃物明显比单一煤种大许多。原因主要有：①混煤在炉膛中的燃烧过程表现为烟煤和无烟煤保持各自的着火特性，在燃烧器喷口处澳大利亚烟煤首先迅速着火燃烧，对无烟煤形成“抢氧”作用，在加热无烟煤有利于无烟煤及早着火的同时，又使无烟煤在燃烧初始阶段缺氧，造成无烟煤燃烧时间加长，燃烬困难。②越南无烟煤有硬度大，难磨特性，即使混煤的煤粉细度达到其评价挥发份的经济细度要求，其中无烟煤成分的煤粉细度也远高于无烟煤本身的煤粉经济细度，这造成了无烟煤燃烧不完全，使混煤的飞灰可燃物大于单一煤种。混煤的实际燃烧情况符合其燃烬特性的评价结果。

4.3 混煤的运行调整方式

(1) 制粉系统的运行调整

由前面的分析我们知道，混煤的煤粉细度均匀性比单一煤种差，因此制粉系统在磨制混煤时，应注意控制煤粉细度比原煤种的设计煤粉细度更小，以利于混煤的燃烬。磨煤机出口温度不宜过高，控制在 85℃以下，防止混煤中的烟煤在粉仓和一次风管内提早燃烧。

由于无烟煤有可磨性低、磨损性大的特点，因此磨煤机应适当增加钢球量，定期补充直径 $\Phi 50$ 的钢球，以利于无烟煤的破碎和研磨。

我厂没有专门的混煤设施，混煤不均匀的情况难以避免，局部过多的烟煤会对粉仓的安全性带来隐患，因此，保持粉仓内煤粉的流动性十分重要，除了定期降粉的工作以外，如机组停运超过三天，粉仓应进行放粉或充 CO₂，防止混煤中的烟煤自燃。

(2) 配风方式的调整

由于混煤的着火特性与设计煤种相近，一次风风速的调整应与设计值一致。混煤的燃烬性能差，为提高无烟煤的着火温度，可以采用一次风集中布置燃烧的方式，即关小两层一次风之间的二次风，开大一次风上层的二次风补风，这样可以延长无烟煤在炉膛的停留时间，同时提高燃烧区的温度，有利于无烟煤的着火和燃烬。底层二次风不易开得太大，因为烟煤只占 50%，燃烧不需要过多的二次风。底层二次风过大，会降低底层燃烧区域的温度，使越南煤更难着火和燃烧。但过小又会使煤粉下冲分散，不能集中燃烧，增大灰渣可燃物和影响燃烧不稳定。底层二次风的开度应以能托住煤粉为宜。其它各层二次风的开度，以倒塔型为主，尽可能延长无烟煤在炉膛的停留时间，但同时应注意避免汽温偏低的问题。

总之，二次风配风方式的选择，既要考虑到煤粉的燃烬性，同时也应注意保持主、再热汽温的正常，不能因为一味降低飞灰可燃物而降低机组循环热效率。

5 结论和建议

(1) 迄今为止，我厂通过混煤燃烧的方式，已经燃用了越南无烟煤 70 多万吨。这对电厂使用低挥发份、难磨、难燃的无烟煤种提供了很好的方法，也使我厂从只能使用贫煤扩展到能使用无烟煤、贫煤和烟煤，有效缓解了我厂的供煤压力。

(2) 通过对混煤的工业成分分析，可以得到煤质特性评价结果。由于煤的工业成分在各电厂都能分析，因此在电厂燃用混煤中有实际运用意义。

(3) 烟煤和无烟煤按 1:1 混合得到的混煤，在与单一煤种一样的煤质特性的情况下，混煤的着火特性比单一煤种好，但燃烬特性比单一煤种差。

(4) 混煤中无烟煤比例大于 50%时，其燃烧特性会急剧接近无烟煤，因此电厂锅炉在使用煤质差异较大的混煤时，难磨、难燃的煤种不应占混煤中的比例过大。

(5) 煤粉的经济细度计算公式适用于单一煤种，对混煤来说，混煤的煤粉经济细度应该要求更

高，更接近混煤中难燃煤种的经济细度要求。

(6) 虽然混煤的飞灰可燃物偏大，但由于越南无烟煤价格低，总体上仍对电厂带来明显的经济效益。

参考文献：

- [1] 电站锅炉性能试验规程。GB10184—1988
- [2] 郭嘉，曾汉才。大型电厂混煤挥发份含量确定方法的探讨。中国电力。1994.1
- [3] 丘纪华，陈刚。煤燃烧理论与技术。华中理工大学。2000.3
- [4] 韩才元，徐明厚，周怀春，邱建荣。煤粉燃烧。北京：科学出版社，2001
- [5] 傅维标，张恩仲。煤焦非均相着火温度与煤种的通用性关系及差别煤焦着火特性的通用指标。电站系统工程，1993.9 (4)
- [6] 樊泉桂，魏铁铮，王军。火电厂锅炉设备及运行。中国电力出版社。 2001.7