

# 配煤比例对准东煤燃烧沾污及结渣特性的影响

郭 帅, 宋维健

(中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190)

**摘要:**选取钠挥发量、煤灰组成、熔融温度、综合指数等作为定量分析指标,系统考察配煤比例对准东煤燃烧沾污及结渣特性的影响。结果表明,准东煤灰中钠硝石含量高,硅铝矿物质含量相对较低,燃烧时易发生沾污和结渣问题;乌海煤灰含量高,且灰中矿物质以高岭土、石英为主,是合适的配煤煤种。随乌海煤配比增加,混合样品中钠挥发量逐步降低,最大降幅为 47.85%,煤灰沾污的挥发性钠得到有效控制。同时,灰渣中低熔点霞石类矿物质比例逐步降低,在配比为 30% 时衍射峰全部消失;高熔点矿物质比例同步升高,当配比达 30% 时,煤灰主要以石英、硬石膏及赤铁矿为主,结渣特性关键指标熔融特征温度显著提高。关键熔融温度  $T_D$  呈先快速升高后基本不变的趋势,在配比为 20% 时出现拐点。经验性综合指数逐步降低,当配比为 30% 时,综合指数  $R_z$  为 1.67,位于轻微结渣区间。综合考虑煤灰沾污、结渣及经济性,乌海煤的最佳配比应为 30%。

**关键词:**准东煤;配煤;沾污;结渣

中图分类号:TQ530.2

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2023)S2-0454-06

## Effect of blending ratio on the fouling and slagging characteristics during combustion of Zhundong coal

GUO Shuai, SONG Weijian

(Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Wuhai coal was selected as the blending coal. Effect of blending ratio on the ash fouling and slagging characteristics during combustion of Zhundong coal was investigated. The fouling trend was characterized by sodium release and ash compositions, while the slagging trend was characterized by ash compositions, ash fusion temperatures and composite index. The results showed that the content of nitratine was relatively high in Zhundong ash, while kaolinite and quartz were predominant in Wuhai ash. With increasing ratio of blending Wuhai coal, the release of sodium gradually reduced, and the maximum reduction was 47.85%. Meanwhile, the percentage of nepheline minerals gradually reduced as well, and those mineral peaks were absolutely disappear at a ratio of 30%. With increasing ratio of blending Wuhai coal, the ratio of alkali/acid gradually reduced; the percentage of infusible minerals gradually increased, and at a ratio of 30%, quartz, anhydrite, hematite were predominant in ash.  $T_D$  presented a sharply increase and then remained basically unchanged. The value of composite index gradually reduced, and its value was located within the interval of slight slagging. It verified that the appropriate blending coal could effectively solve ash fouling and slagging. Taking ash fouling and slagging into consideration, the best blending ratio of Wuhai coal is 30%.

**Key words:** Zhundong coal; coal blending; fouling; slagging

## 0 引 言

准东煤煤质良好及储量丰富,被认为是优质动力用煤。然而,由于煤灰中碱金属钠盐含量较高,新疆地区大部分运行的循环流化床锅炉机组仍未实现

纯烧准东煤<sup>[1]</sup>。主要原因有 2 点:① 由于钠盐易与其他矿物质形成低熔点共融物,导致锅炉底部密相区煤灰结渣,破坏床内颗粒流动状态;② 由于钠盐易挥发至气相中,冷凝在下游换热器表面,导致积灰及高温过热器、再热器碱金属腐蚀<sup>[2]</sup>。

收稿日期:2021-04-01;责任编辑:常明然 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.22033101

基金项目:国家自然科学基金资助项目(22008236)

作者简介:郭 帅(1989—),男,山东潍坊人,助理研究员,博士。E-mail:guoshuai@iet.cn

引用格式:郭帅,宋维健.配煤比例对准东煤燃烧沾污及结渣特性的影响[J].洁净煤技术,2023,29(S2):454-459.

GUO Shuai, SONG Weijian. Effect of blending ratio on the fouling and slagging characteristics during combustion of Zhundong coal[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(S2):454-459.

调控钠挥发及煤灰结渣特性是解决准东煤燃烧利用难题的关键。目前,国内大多数学者侧重于直接添加特定矿物质的方法<sup>[1,3-8]</sup>。周上坤等<sup>[4]</sup>系统考察蛭石添加比例对准东煤结渣特性的影响,结果表明:当蛭石掺烧量达 4%时,渣样变得疏松多孔且易吹扫,同时蛭石表现出良好的固钠效果;田思达等<sup>[9]</sup>系统考察氧化硅添加比例对准东煤燃烧结渣沾污的影响,结果表明:当硅灰比达 1:9 时,氧化硅可有效减缓飞灰熔融物质的形成,同时氧化硅粒径越小效果越显著;张利孟等<sup>[3]</sup>系统考察高岭土添加比例对准东煤结渣特性的影响,结果表明:随高岭土添加比例增加,煤灰熔融温度呈先下降后上升的趋势,当比例达 6%时,高岭土可以有效缓解准东煤结渣问题。

然而,受限于添加剂成本及来源,矿物质添加并未广泛采用。目前,工业上配煤仍是最常见方法<sup>[10-13]</sup>。文献调研发现,关于配煤煤种选择及其比例对准东煤灰沾污及结渣特性影响的系统研究相对偏少。张海霞等<sup>[14]</sup>在 350 t/d 循环流化床工业气化炉上考察了高钠印尼煤与百矿煤掺烧对系统运行和气化特性的影响,结果表明:当百矿煤配煤比例达到 25%时,在 168 h 内,炉膛底部温度和密相区压差稳定,飞灰和底渣无明显变形或熔融现象发生;郭万贵<sup>[11]</sup>在 0.4 MW 燃烧试验台上考察将军庙煤配煤比

例对准东煤结渣、沾污特性的影响,结果表明:将军庙煤配煤比例在 10%~20%,可明显减缓煤灰结渣、沾污强度;周昊等<sup>[13]</sup>利用 CCD 相机检测系统和烧结探针考察了准东煤与北塔山煤、乌东煤掺混对煤灰结渣特性的影响,结果表明:北塔山煤和乌东煤能起到抑制灰块烧结熔融及固钠的效果。上述研究对解决准东煤燃烧结渣及沾污问题具有重要意义。

根据准东煤煤质特性,笔者选择一种高灰、高硅铝乌海煤作为配煤煤种,系统考察了配煤比例对准东煤灰沾污、结渣特性的影响。首先,利用低温灰化技术耦合 XRD 分析准东煤和配煤煤质内在矿物质形态;其次,针对煤灰沾污特性,利用 ICP 分析了不同配煤比例下钠盐的挥发特性;针对煤灰结渣特性,利用不同经验指数及熔融温度分析了不同配煤比例下煤灰的结渣特性,并提出配煤煤种选择的原则及配煤比例确定的方法。

## 1 试验部分

### 1.1 试验煤样

选用准东煤(ZD)和乌海煤(WH)作为试验煤样。根据 GB/T 30733—2014《煤中碳氢氮的测定仪器法》和 GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》,煤的工业和元素分析见表 1。

表 1 工业分析和元素分析

煤样	工业分析				元素分析				
	$M_{ad}$	$A_d$	$V_{daf}$	$FC_d$	$C_{daf}$	$H_{daf}$	$O_{adaf}$	$N_{daf}$	$S_{t,daf}$
ZD	10.65	3.82	28.93	68.36	82.06	3.47	13.25	0.87	0.35
WH	0.80	27.99	28.98	51.14	86.06	5.29	4.05	1.48	2.76

根据 GB/T 1574—2007《煤灰成分分析方法》,煤灰成分分析见表 2。煤样均烘干后研磨至粒径小

于 74  $\mu\text{m}$ 。在试验前,煤样再次在 110  $^{\circ}\text{C}$  下烘干 2 h 消除水分影响。

表 2 灰成分分析

煤样	质量分数									
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$
ZD	27.02	13.97	13.10	20.28	4.61	0.63	7.94	0.20	12.21	0.05
WH	50.11	38.33	6.30	0.61	0.42	0.84	0.36	0.85	0.16	0.07

### 1.2 配煤方法

通过机械混合方式制备混合样品。配煤质量比(以 WH 为基准)在 0~40%,间隔 10%。样品分别记为 100ZD、90ZD10WH、80ZD20WH、70ZD30WH 和 60ZD40WH。

### 1.3 燃烧过程

燃烧试验系统如图 1 所示,主要有水平管式炉及温度控制器、磁力进样器、气体瓶组及质量流量控

制器、双柱塞泵及自制水蒸气发生器等组成,考察煤炭不同气氛下快速热解、燃烧及气化特性的机理。其中,反应管直径 40 mm,反应瓷舟规格 60 mm $\times$ 30 mm $\times$ 15 mm。

试验开始之前,电炉首先以 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升温至 950  $^{\circ}\text{C}$ ;恒温 1 h 后,放入置有 1.000 g 样品的刚玉瓷舟,保证样品平铺后小于 0.15  $\text{g}/\text{cm}^2$ ;此后,通入 80%氮气和 20%氧气吹扫,流量为 500  $\text{mL}/\text{min}$ ;吹

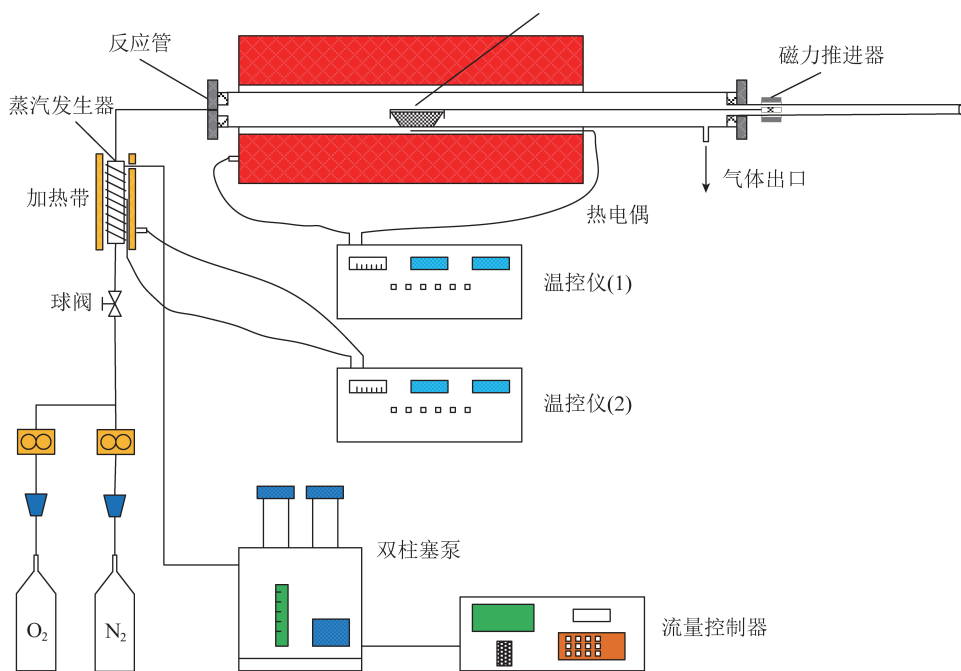


图1 试验装置示意

扫 15 min 后,移动磁力进样器,快速将样品推至恒温区;燃烧 30 min 后,将瓷舟拉回至石英管右端冷却。冷却至室温后,燃烧残渣收集待分析。

#### 1.4 表征方法

准东煤和配煤采用低温灰化仪(EMS1050X, ProSciTech, U.K.)灰化处理;低温灰化灰与燃烧残渣通过 X-射线粉末衍射仪(D2 Phaser desktop,

Bruker, Germany)定性分析晶体矿物质;煤灰熔点则采用灰熔点仪(CAF DIG, Carbolite, Germany)测定;消解溶液中钠的含量采用电感耦合等离子体光谱仪(iCAP 6300, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, U.S.A.)测定;煤中氯的含量依据 GB/T 3558—2014《煤中氯的测定方法》采用 Eschka 试剂进行测定。

$$R_Z = 1.237R_{B/A} + 0.282R_{S/A} - 0.0023T_S - 0.0189S + 5.415, \quad (1)$$

$$R_{B/A} = (w(\text{CaO}) + w(\text{MgO}) + w(\text{Fe}_2\text{O}_3) + w(\text{Na}_2\text{O}) + w(\text{K}_2\text{O})) / (w(\text{SiO}_2) + w(\text{Al}_2\text{O}_3) + w(\text{TiO}_2)), \quad (2)$$

$$R_{S/A} = w(\text{SiO}_2) / w(\text{Al}_2\text{O}_3), \quad (3)$$

$$S = (w(\text{SiO}_2) \times 100) / (w(\text{SiO}_2) + w(\text{CaO}) + w(\text{MgO}) + w(\text{Fe}_2\text{O}_3)). \quad (4)$$

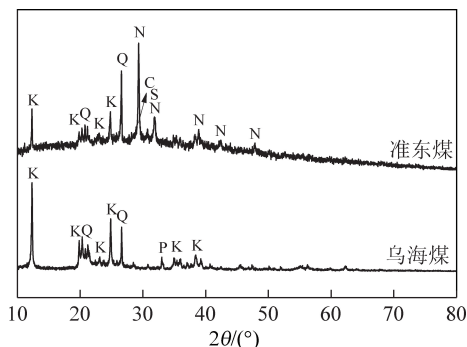
其中,综合指数  $R_Z$  用来评估煤灰结渣倾向,相关计算方法如式(1)所示。 $R_{B/A}$  为碱酸比; $R_{S/A}$  为硅铝比; $S$  为硅比; $T_S$  为煤灰软化温度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 样品分析

#### 2.1.1 原煤矿物质

煤灰熔融特性与其内在矿物质组成密切相关。试验煤样矿物质定性分析结果如图2所示。由图2可知,准东煤中矿物质主要是以高岭土、石英、钠硝石、石灰石及菱铁矿为主,其中钠硝石衍射峰强烈,说明准东煤中钠主要是以钠硝石为主<sup>[15]</sup>;乌海煤中矿物质主要是以高岭土、石英、黄铁矿为主,其中,高岭土衍射峰强烈,说明乌海煤灰中含有丰富的高岭土矿物质,这与表2中煤灰成分分析结果一致。

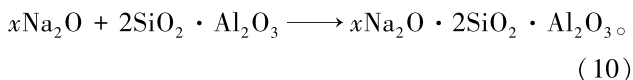
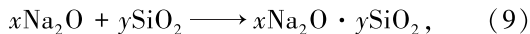
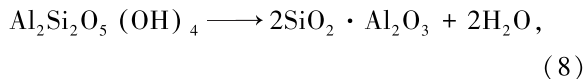
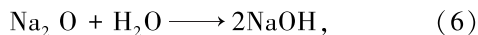
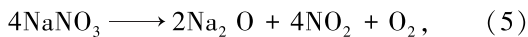


C: calcite ( $\text{CaCO}_3$ ); K: kaolinite [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ];  
N: nitratine ( $\text{NaNO}_3$ ); P: pyrite ( $\text{FeS}_2$ ); Q: quartz ( $\text{SiO}_2$ );  
S: siderite ( $\text{FeCO}_3$ )

图2 准东煤和乌海煤低温灰化灰 XRD 图谱

在燃烧过程中,准东煤中钠易于发生反应(5),大量

钠盐挥发至烟气中,造成换热器表面沾污;同时,准东煤中钠盐易与石英、偏高岭土发生反应(9)~(10),生成低熔点硅酸盐、硅铝酸盐类化合物,进一步与煤灰其他矿物质发生低温共融,造成炉膛底部密相区结渣。乌海煤中高岭土、石英锅炉燃烧产物为高熔点偏高岭土、石英,可有效避免煤灰结渣、沾污的问题<sup>[3,16-17]</sup>。



### 2.1.2 混合样品

为进一步明确掺混样品性质,对灰分及组分进行分析,结果如图3和4所示。

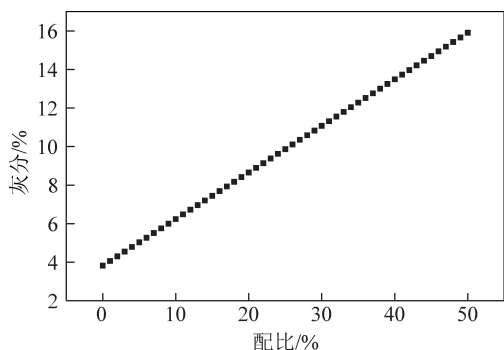


图3 配煤比例对样品灰含量的影响

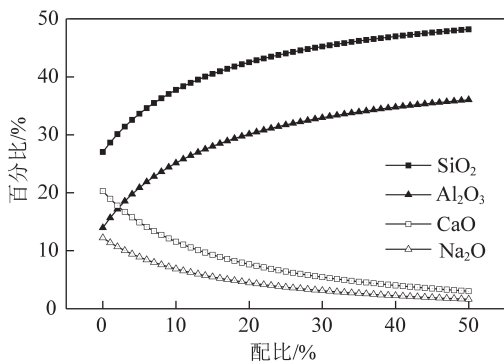


图4 配煤比例对煤灰组成的影响

由图3可知,随着配煤比例从0%增至40%,混合样品中灰分从3.82%大幅度增至13.49%;其中,配煤比例为30%时,煤灰含量为11.07%。对于循环流化床锅炉,适当的煤灰分对于保持炉底排渣顺畅、床层稳定及防止密相区结渣具有重要意义。经验表

明,煤中灰分应不低于10%。因此,乌海煤配煤比例应不低于30%。

由图4可知,随着配煤比例从0%增至40%,混合样品灰中碱性氧化物 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量从12.21%大幅降至2.25%,而混合样品灰中酸性氧化物( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ )含量则从41.01%大幅增至81.75%。其中,当配煤比例为30%时,煤灰中 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量为3.12%。经验表明,当煤灰中 $\text{Na}_2\text{O}$ 控制在3.3%及以下时,可有效降低高碱煤灰结渣、沾污问题发生的频率<sup>[18]</sup>。其灰成分判断,乌海煤配煤比例应为30%左右。

## 2.2 配煤比例对准东煤沾污特性的影响

### 2.2.1 钠挥发量

研究表明,准东煤燃烧过程中,煤中钠盐挥发至烟气中,部分与烟气中组分发生反应,钠盐及其生成物熔融温度较低,冷凝在换热器表面形成黏性底层,继而捕捉烟气中固体颗粒物,造成换热面沾污问题的发生。鉴于此,控制准东煤中钠盐挥发是解决煤灰沾污问题的关键之一。高岭土及石英等硅铝矿物质具有优异的固钠效果。因此,可以通过添加富含高岭土、石英的乌海煤调控准东煤燃烧过程中钠的挥发量。

配煤比例对准东煤中钠挥发量的影响结果如图5所示。由图5可知,随配煤比例逐步增至40%,钠挥发量分别为13.62%、9.89%、8.18%、7.62%和7.13%。当配煤比例40%时,钠挥发量相对纯烧准东煤降低了47.85%。需要说明的是,随配煤比例增加,新增乌海煤对于控制准东煤钠挥发的效果逐渐减弱。当配煤比例30%时,钠挥发量为7.62%,与配煤比例40%时钠挥发量绝对值仅相差0.49%。因此,从钠挥发量判断,乌海煤配煤比例应在30%左右。

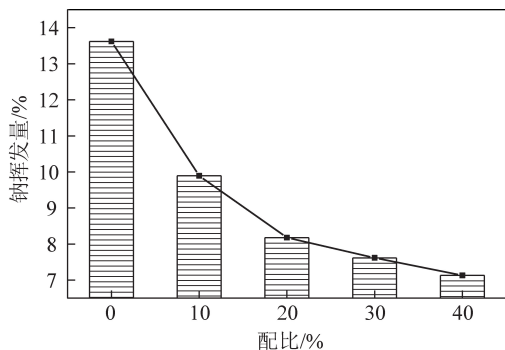
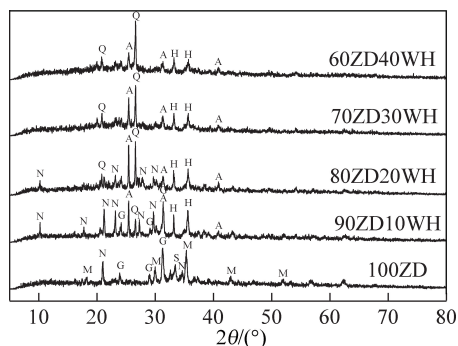


图5 配煤比例对混合样品钠挥发量的影响

### 2.2.2 灰渣组成

煤灰中低熔点组分的出现导致部分颗粒具有一定黏性,而黏性颗粒可能以飞灰形式进入下游系统,

极易冷凝在下游换热器表面,从而导致煤灰沾污。鉴于此,为探明煤灰中矿物质组成,对燃烧残渣进行 XRD 定性分析,结果如图 6 所示。



A: Anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ); H: Hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ); G: Gehlenite ( $\text{Ca}_2\text{SiAl}_2\text{O}_7$ ); M: Magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ); N: Nepheline ( $x\text{Na}_2\text{O} \cdot y\text{SiO}_2 \cdot z\text{Al}_2\text{O}_3$ ); Q: Quartz ( $\text{SiO}_2$ ); S: Srebrodolskite ( $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ )

图 6 燃烧残渣 XRD 图谱

由图 6 可知,在纯烧准东煤时,燃烧残渣中矿物质组分主要以霞石类矿物质、磁铁矿、钙铝黄长石及黑钙铁矿为主;其中,霞石类矿物质特征熔融温度普遍较低,易与其他矿物质结合形成低温共融物,意味着含有霞石类矿物质的飞灰颗粒极易黏附从而造成沾污问题<sup>[19]</sup>。当配煤比例达 30%及以上时,燃烧残渣中霞石类矿物质衍射峰完全消失,矿物质组成则以石英、硬石膏及赤铁矿为主。此时煤灰质地松软,易通过吹扫清除。说明配煤可以有效解决煤灰沾污问题。因此,从灰渣组成判断,乌海煤配煤比例应在 30%左右。

## 2.3 配煤比例对准东煤结渣特性的影响

### 2.3.1 煤灰组成

煤灰组成可通过矿物质组成和化学组成分别表征。

煤灰结渣特性与其矿物质组成密切相关。低熔点矿物质比例升高造成煤灰颗粒具有黏性,从而显著增大煤灰结渣问题出现的概率。如图 6 所示,准东煤及配煤比例 10%时燃烧残渣中霞石类矿物质衍射峰强烈,意味着煤灰颗粒具有一定黏性,易发生团聚形成较大颗粒。当配煤比例达 20%时,霞石类矿物质衍射峰显著削弱,燃烧残渣中高熔点石英、赤铁矿衍射峰强烈,此时煤灰结渣倾向显著减弱;当配煤比例达 30%及以上时,燃烧残渣中霞石类矿物质衍射峰完全消失,矿物质组成以石英、硬石膏及赤铁矿为主,此时煤灰结渣倾向微弱。从煤灰矿物质组成判断,乌海煤配煤比例应在 30%左右。

煤灰结渣特性与其化学组成密切相关。煤灰化学组成通常以氧化物的形式表示,根据氧化物化学性质不同,可分为酸性和碱性氧化物。其中,酸性氧

化物可明显提高熔融温度,而碱性氧化物则反之。因此,可以通过煤灰组成性指数碱酸比(B/A)评估煤灰结渣特性<sup>[5]</sup>。配煤比例对样品煤灰碱酸比的影响如图 7 所示,可知当纯烧准东煤时,碱酸比值高达 1.211,远高于严重结渣倾向的极限值 0.4,此时混合煤灰存在严重结渣倾向。随配煤比例增加,碱酸比值不断降低,但降低幅度逐渐减小,尤其是配煤比例高于 30%时,新增加的乌海煤对混合煤灰碱酸比值影响微弱。当配煤比例达 20%时,碱酸比为 0.320,在 0.206~0.400,混合煤灰属于中等结渣倾向;当配煤比例达 30%时,碱酸比值为 0.238,非常接近 0.206,混合煤灰结渣性显著减弱;当配煤比例达 40%时,碱酸比值为 0.191,数值低于轻微结渣倾向的极限值 0.206。从煤灰组成判断,乌海煤配煤比例应在 30%~40%。

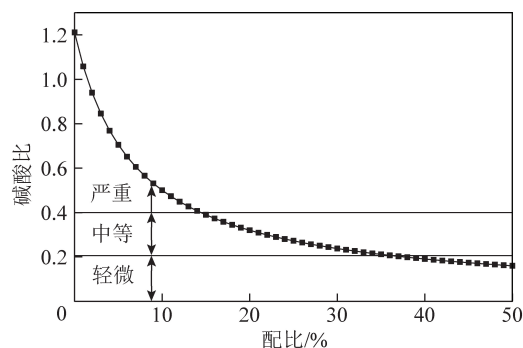


图 7 配煤比例对样品煤灰碱酸比值的影响

### 2.3.2 灰熔融温度

煤灰熔融特性与结渣特性密切相关。因此,通过特征熔融温度可较准确地预测煤灰结渣性。

配煤比例对混合煤灰熔融温度的影响如图 8 所示,可知随配煤比例增加,各熔融温度均呈逐渐升高趋势。其中, $T_H$  和  $T_F$  与配煤比例呈良好正相关; $T_S$  与配煤比例存在平台期; $T_D$  呈先快速升高后基本不变的趋势,转折点在配煤比例 20%。

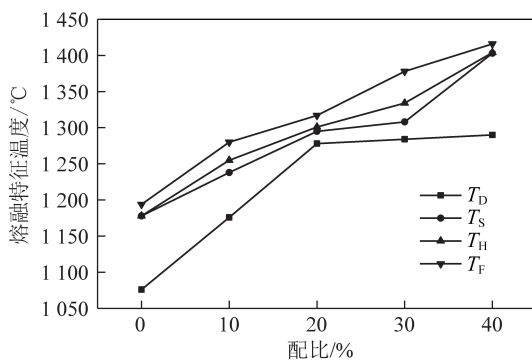


图 8 配煤比例对灰熔点的影响

需要说明的是,限制运行温度上限的是煤灰变形温度  $T_D$ 。运行温度与变形温度差值越大,煤灰结

渣风险也将越低。 $T_D$  升高对防止煤灰结渣有益。当配煤比例达 20% 时,混合样品灰  $T_D$  为 1 278 °C,相对准东煤灰  $T_D$  大幅提升 202 °C;当配煤比例达 40% 时,混合样品灰  $T_D$  为 1 290 °C,相对 20% 配煤比例时混合煤灰  $T_D$  仅提升 12 °C;鉴于此,当配煤比例大于 20% 时,继续增加乌海煤比例,对于关键熔融温度  $T_D$  影响甚微。根据灰熔点判断,乌海煤配煤比例应在 20% 左右。

### 2.3.3 综合指数

相对于煤灰组成及灰熔点等传统指标,综合指数  $R_z$  耦合了煤灰碱酸比  $B/A$ 、硅铝比  $S/A$ 、软化温度  $T_s$  及  $SiO_2$  比值  $S$  等多个关键影响因素,在预测煤灰结渣倾向方面具有相对更高的准确性<sup>[20]</sup>。配煤比例对综合指数  $R_z$  及煤灰结渣倾向的影响见表 3。

表 3 配煤比例对综合指数  $R_z$  及结渣倾向的影响

样品	$R_z$	结渣倾向
100ZD	3.96	严重
90ZD10WH	2.46	较易
80ZD20WH	1.91	中等
70ZD30WH	1.67	轻微
60ZD40WH	1.32	较低

注:判断标准: $R_z < 1.5$ , 较低; $1.50 < R_z < 1.75$ , 轻微; $1.75 < R_z < 2.25$ , 中等; $2.25 < R_z < 2.5$ , 较易; $R_z > 2.5$ , 严重。

由表 3 可知,随配煤比例增加,综合指数  $R_z$  呈不断减小趋势,说明煤灰的结渣倾向不断降低。准东煤灰综合指数  $R_z$  高达 3.96,远高于严重结渣标准的 2.5,说明纯烧准东煤将存在严重的煤灰结渣问题;当配煤比例为 10% 时,综合指数  $R_z$  大幅降至 2.46,属易结渣;当配煤比例为 20% 时,综合指数  $R_z$  继续降至 1.91,属中等结渣;当配煤比例为 30% 时,综合指数  $R_z$  继续降至 1.67,属轻微结渣;当配煤比例为 40% 时,综合指数  $R_z$  继续降至 1.32,属不易结渣。基于综合指数判断,乌海煤配煤比例不应低于 30%。

## 3 结 语

乌海煤满足煤中高灰、低氯且灰中高硅铝、低钙、低钠等煤质特性,是准东煤适宜的配煤煤种。随配煤比例增加,钠挥发量从 13.62% 降至 7.13%,降幅达 47.85%,同时,煤灰中低熔点霞石类矿物质比例逐步降低,当配比达 30% 时,对应衍射峰全部消失,煤灰沾污特性显著减弱。随配煤比例增加,煤灰碱酸比值  $B/A$  逐步降低,结渣倾向显著减弱;高熔点矿物质比例逐步升高,当配比达 30% 时,煤灰主要以石英、硬石膏及赤铁矿为主;关键熔融温度  $T_D$  先快速升高后基本不变,转折点位于配比为 20%

时。综合指数  $R_z$  逐步降低,当配比为 30% 时,其位于轻微结渣区间。综合考虑煤灰沾污及结渣特性,乌海煤最佳的配煤比例应为 30%。

## 参考文献:

- [1] 王萌,王毅斌,谭厚章,等.工业高碳富钙型灰对准东混煤结渣特性的影响[J]. 燃料化学学报,2021,49(1):1-10.
- [2] 陈衡,王云刚,马海东,等.循环流化床锅炉燃用准东煤结渣、沾污分析[J]. 热能动力工程,2015,30(3):431-435.
- [3] 张利孟,董信光,刘科,等.高岭土对准东煤结渣特性及矿物质演变的影响[J]. 燃料化学学报,2015,43(10):1176-1181.
- [4] 周上坤,王萌,谭厚章,等.蛭石对高钠高钙准东煤结渣特性影响研究[J]. 燃料化学学报,2019,47(4):419-427.
- [5] 何翔,施鸿飞,周文台,等.添加剂对准东煤结渣和沾污特性影响的研究[J]. 动力工程学报,2018,38(9):689-694.
- [6] 赵庆庆,代纪邦,金晶,等.添加剂对准东煤灰熔融特性的影响[J]. 上海理工大学学报,2014,36(6):511-515.
- [7] 周陈颖,周昊,邢裕健,等.添加剂对高碱煤灰渣流动特性及钠捕获效率的影响[J]. 浙江大学学报(工学版),2020,54(3):623-630.
- [8] WEI B, WANG X, TAN H, et al. Effect of silicon-aluminum additives on ash fusion and ash mineral conversion of Xinjiang high-sodium coal[J]. Fuel, 2016, 181: 1224-1229.
- [9] 田思达,李乐天,吴玉新,等.氧化硅添加剂对准东煤高钙飞灰物相热转化作用的差示扫描量热分析[J]. 中国电机工程学报,2020,40(15):4919-4927.
- [10] 崔育奎,张翔,乌晓江.配煤对新疆准东高碱煤沾污结渣特性的影响[J]. 动力工程学报,2015,35(5):361-365.
- [11] 郭万贵.准东煤混烧过程中结渣沾污特性研究[J]. 锅炉技术,2019,50(2):11-15.
- [12] 卢延梅.掺配五彩湾煤对乌鲁木齐主要电厂配烧的影响研究[J]. 煤质技术,2011(1):10-12.
- [13] 周昊,胡明月,张佳凯,等.配煤对准东煤灰烧结特性的影响[J]. 煤炭学报,2020,45(8):2968-2976.
- [14] 张海霞,刘伟伟,于旷世,等.循环流化床工业气化炉高钠煤配煤气化[J]. 煤炭学报,2017,42(4):1021-1027.
- [15] GUO S, JIANG Y, YU Z, et al. Correlating the sodium release with coal compositions during combustion of sodium-rich coals[J]. Fuel, 2017, 196: 252-260.
- [16] KOSMINSKI A, ROSS D, AGNEW J. Reactions between sodium and silica during gasification of a low-rank coal[J]. Fuel Processing Technology, 2006, 87: 1037-1049.
- [17] KOSMINSKI A, ROSS D, AGNEW J. Reactions between sodium and kaolin during gasification of a low-rank coal[J]. Fuel Processing Technology, 2006, 87: 1051-1062.
- [18] 薛长海.高钠煤质特性与沾污机理试验研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2015,42(4):89-95.
- [19] 张龙,黄镇宇,沈铭科,等.不同的灰熔点调控方式对煤灰熔融特性的影响[J]. 燃料化学学报,2015,43(2):145-152.
- [20] ZHU C, TU H, BAI Y, et al. Evaluation of slagging and fouling characteristics during Zhundong coal co-firing with a Si/Al dominated low rank coal[J]. Fuel, 2019, 254: 1-11.