

新疆高碱煤四喷嘴气化炉结渣特性研究

吾买尔江·卡瓦^{1,2},林雄超¹,杨远平¹,吕俊鑫¹,周梦远²,姚刚²,王永刚¹

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083;2. 兖矿新疆煤化工有限公司,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:针对新疆高碱煤为气化原料造成气化炉堵渣的问题,以四喷嘴气化炉实际运行过程中产生的渣块为研究对象,采用扫描电子显微镜结合X射线电子能谱(SEM-EDX)、X射线荧光光谱(XRF)和灰熔点测试仪等分析了灰渣物化及矿物学特性。对新疆北山煤和牧场煤以及2种煤的混煤进行气化试验,考察了煤中矿物质高温演变行为规律。结果表明,新疆煤中矿物质具有不均一性,在高温热转化过程中,矿物质相互作用发生一系列复杂的物理化学反应,导致形成的矿物质灰渣具有多样性。采用新疆煤为气化原料时,大量灰渣在气化炉渣口处积累,形成了层状灰渣,主要由Na、Ca、Mg和Fe的硅酸盐或硅铝酸盐共熔物和Na-Al-Si-O构成。新疆煤气化后不同形态灰渣中Na含量差别较大,Na含量差异导致矿物质灰渣的黏温特性及固化温度不同。通过热力学模拟发现,Na-Si-O体系中其初始液相形成温度仅为800℃左右,随着Na₂O含量升高,其初始液相形成温度基本保持不变;混入一定量Al₂Si₂O₇后,其液相初始形成温度迅速升高至1050℃左右。矿物质高温下发生熔融形成组分复杂的共熔物,随温度降低液态灰渣中具有高熔点的矿物质体系将结晶形成晶核,晶核迅速生长形成结晶颗粒而析出。在高温热转化过程,煤中活性Na可与石英黏土类矿物质发生反应生成低熔点的NaAlSiO₄;而Ca、Mg和Fe等与酸性矿物质反应生成具有高熔点的硅铝酸盐矿物质,在降温过程中首先从熔渣中析出,导致堵渣的发生。通过选取或调配煤种的熔渣黏温特性和灰熔融温度与气化运行参数一致可预防煤灰结渣发生。

关键词:高碱煤;熔融温度;配煤;结渣;水煤浆气化

中图分类号:TQ51

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)03-0062-06

Study on the slagging characteristics of Xinjiang high-alkali coal in four-nozzle gasifier

KAWA Omarjiang^{1,2}, LIN Xiongchao¹, YANG Yuanping¹, LYU Junxin¹, ZHOU Mengyuan², YAO Gang², WANG Yonggang¹

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China;

2. Yankuang Xinjiang Coal Chemical Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

Abstract: Aiming at the problem of slag plugging in gasifier caused by Xinjiang high alkali coal as gasification raw material, the slag produced in the actual operation of four-nozzle gasifier was taken as the research object and the physical and chemical characteristics of ash and slag were analyzed by means of scanning electron microscopy, X-ray electron spectroscopy (SEM-EDX), X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) and ash melting point tester. In addition, the ash transformation behaviors of Beishan (BS) coal, Muchang (MC) coal and their mixture were examined in a high temperature furnace. The results show that the distribution of minerals in Xinjiang coal are heterogeneous. During the process of thermal transformation at high temperature, a series of complex physical and chemical reactions occur among minerals, which result in the diversity of mineral ash. When Xinjiang coal is used as gasification material, a large amount of ash accumulates at the slag mouth of the gasifier and form layered slag which is composed of silicate or alumina silicate eutectic of Na, Ca, Mg and Fe

收稿日期:2019-03-25;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19032502

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21406261);越崎青年学者项目

作者简介:吾买尔江·卡瓦(1983—),男,新疆喀什人,工程师,主要从事煤化工研究。E-mail:omarali@163.com。通讯作者:林雄超,副教授,博士生导师。E-mail:lx@cumb.edu.cn

引用格式:吾买尔江·卡瓦,林雄超,杨远平,等.新疆高碱煤四喷嘴气化炉结渣特性研究[J].洁净煤技术,2019,25(3):62-67.

KAWA Omarjiang, LIN Xiongchao, YANG Yuanping, et al. Study on the slagging characteristics of Xinjiang high-alkali coal in four-nozzle gasifier[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(3): 62-67.



移动阅读

and Na-Al-Si-O. The contents of Na in the different forms of slags after coal gasification are quite different, which leads to different viscous-temperature characteristics and curing temperature of mineral slag. The thermodynamic simulation shows that the initial liquid phase forming temperature of Na-Si-O system is ca. 800 °C, and it varies slightly with the increase of Na₂O. Nevertheless, the liquid phase forming temperature rapidly increases to 1 050 °C when a certain amount of Al₂Si₂O₇ is mixed. The minerals melt to form complex eutectics at high temperatures with the decrease of temperature, the minerals in liquid ash with high molten point would form crystal nucleus, and then the crystal nucleus grows rapidly and precipitates out into crystalline particles. In the process of thermal transformation at high temperature, the active Na can react with quartz and clay minerals to form NaAlSiO₄ with low melting point. However, Ca, Mg and Fe react with acid minerals to form silica-aluminate minerals substances with high melting point, which are firstly precipitated from slag during the cooling process, resulting in slag blocking. The coal ash slagging propensity could be prevented by selecting or blending the coals with viscosity and melting temperature approaching to the gasification operation parameter.

Key words: high-alkali coal; molten point; coal blending; slagging; coal water slurry gasification

0 引言

我国新探明高碱煤储量巨大,主要分布在新疆地区,其中仅准东煤田预计储量就高达3 900亿t。高碱煤在燃烧或气化等热转化过程中,极短时间内即引起锅炉换热面损毁、管路堵塞、高温过热器和再热器腐蚀爆管等问题,严重威胁设备安全,增加运行成本^[1-3]。新疆地区是我国重要的煤化工和战略资源接替基地,但由于高碱煤灰污结渣问题,极大制约了地区资源开发和经济发展。因此,阐明高碱煤的结渣过程规律,寻求碱金属灰污结渣的抑制技术尤为重要。诸多学者针对新疆煤易结渣问题进行了大量研究。宋国良等^[4]对准东煤气化过程中碱金属的迁移特性进行研究,发现在850~1 000 °C,煤中86.7%~93.1%的Na将冷凝富集于飞灰中,主要以NaCl形态存在。陈衡等^[5]通过对准东煤循环流化床燃烧的研究发现,煤中活性矿物质会以Na₂SO₄、NaK₃(SO₄)或NaO·Al₂O₃·2SiO₂等低熔点化合物形式释放到气相形成气溶胶,并吸附烟气中的飞灰颗粒黏结在壁面形成结渣沾污。崔育奎等^[6]对新疆准东高碱煤沾污结渣研究发现,煤中高熔点矿物质能与助熔矿物质反应,改变混煤灰中的主要矿物质组成,减少高碱煤中含碱低温共熔物的生成,从而

达到改变和调节煤灰熔融特性的目的。以上研究多基于传统的宏量分析建立煤灰特性指标,具有一定的局限性,对实际工业中的高碱煤结渣过程缺少系统认识。本文基于工业气化运行过程中新疆煤气化结渣特性,揭示了2种新疆煤及混煤在高温条件下煤灰中矿物质演变特性,分析了新疆高碱煤气化过程中易形成结渣的原因,并提出了预防措施。

1 试验

1.1 试验煤样分析

选取兖矿新疆煤化工有限公司气化用煤(新疆北山煤(BS)和牧场煤(MC))为试验煤样。2种原煤和混煤(HM,其中MC、BS质量比=4:1)的工业分析和灰成分分析见表1、2。可知2种煤灰中Na₂O含量均很高,尤其是北山煤中Na₂O含量为4.42%,远高中国其他地区煤种。

表1 煤样的工业分析

Table 1 Proximate analysis of coal samples

样品	工业分析/%				$Q_{\text{net,ad}}/$ (MJ·kg ⁻¹)
	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	
BS	4.94	5.78	28.80	58.48	24.46
MC	4.94	7.14	28.30	46.64	24.07

表2 原煤灰成分分析

Table 2 Ash composition analysis of coal samples

样品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	P ₂ O ₅	MnO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Cl
BS	31.83	9.45	6.23	19.43	13.76	11.67	1.12	0.24	0.57	4.42	0.25	0.930
MC	29.65	12.94	3.58	20.26	16.31	12.38	0.67	0.27	0.62	1.93	0.11	0.075

1.2 试验方法及样品表征

称取3种煤样各10g分别置于不同的高纯铂金坩埚中,放入预先加热到一定温度(600、1 100、1 200 °C)的高温管式炉中快速燃烧,停留30min后

自然冷却至室温。采用X-射线衍射仪(D8 advance, Bruker)对煤灰进行分析,扫描角度为10°~90°,扫描步进5(°)/min, Cu靶,扫描电流300 mA,扫描电压40 kV。采用德国Bruker S4-Pioneer型X

射线荧光光谱仪(XRF)测定灰样中元素种类及含量。利用扫描电子显微镜和X射线光电子能谱分析(EDX、IE250X-Max50)观察矿物质的显微结构和组成。

2 结果与讨论

2.1 气化炉灰渣形貌及组成分析

多喷嘴水煤浆气化炉不同部位的结渣现象如图1所示。气化炉下降管堵渣主要是渣在流动过程中黏结在下降管,导致下降管挂渣,合成气偏流或下降管烧穿。下降管堵渣后需在系统停车降温后进入气化炉燃烧室清理;如烧穿还需更换下降管。渣口结渣是指渣口变小,渣口压差变大,使燃烧室的灰渣无法顺利排出,从而影响炉膛压力、炉壁超温以及合成气产出。气化炉激冷室堵渣主要是由于激冷后的大块炉渣不能顺利进入锁斗而堵渣。激冷室堵渣后需系统停车降温后进入气化炉激冷室清渣。

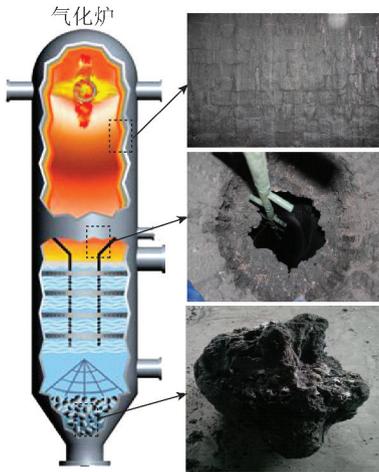


图1 多喷嘴水煤浆气化炉不同部位的结渣现象

Fig.1 Slagging phenomenon in the different zones of multi-nozzle coal water slurry gasifier

高温气化过程中,煤中矿物质在高温条件下熔融,使煤中灰分在炉膛下部呈液态排出。采用新疆混煤为气化原料时,在气化炉膛下部呈现如图2所示的堵渣现象。大量灰渣在气化炉渣口处积累,最

终导致气化炉堵塞而停止运行,在气化炉排渣口处形成了层状灰渣。对不同位置的熔渣进行分析可见,S1和S3的宏观形貌基本一致,均为黑色玻璃质;而中间层S2则为灰色质地坚硬的灰渣,表明此处排出的熔融矿物质的组成及矿物相特性发生变化。对熔渣分层界面进行打磨抛光,通过SEM-EDX观察断口的元素分布发现,灰渣S1组成较为均一,主要为Na、Ca、Mg和Fe的硅酸盐或铝硅酸盐共熔物。S2则存在明显边界,深灰色区域主要是由Na-Al-Si-O构成,而浅灰色矿物质的组成主要是Ca、Mg和Fe的硅酸盐共熔物。

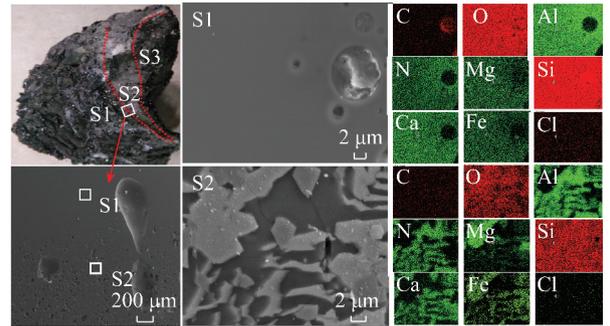


图2 气化炉渣块SEM-EDX分析结果

Fig.2 SEM-EDX images of slag block obtained from gasifier

为进一步明确不同形貌灰渣的组成特性,将上述渣块物理分离,分析S1、S2和S3部位的矿物组分并进行XRF分析。将混煤气化后排出的气化粗渣和细渣成分进行分析,结果见表3。可知, SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 是气化灰渣的主要成分,含量相差不大。 Na_2O 含量在不同灰渣中差别较为明显。S1和S3中, Na_2O 含量分别为3.90%和3.84%;S2中含量为4.87%,较S1和S3明显偏高; Na_2O 在气化粗渣中含量为6.25%,而气化细渣中只有1.15%。矿物质中Na的存在起助熔作用,降低矿物质的灰熔融温度,因此气化粗渣中钠含量很高^[7-8]。推测灰渣中钠含量差异导致矿物质灰渣的黏温特性及固化温度不同。

表3 不同灰渣成分分析
Table 3 Compositions analysis of different ash

样品	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	SO_3	MgO	TiO_2	K_2O	MnO	%
S1	34.22	16.57	15.09	22.96	3.90	0.23	3.85	0.69	0.45	0.30	
S2	34.81	15.46	15.82	22.36	4.87	0.22	3.21	0.65	0.50	0.28	
S3	34.94	16.19	15.24	22.66	3.84	0.22	3.76	0.70	0.48	0.29	
气化细渣	35.02	16.23	18.09	20.38	1.15	0.69	5.44	0.80	0.18	0.27	
气化粗渣	34.70	14.97	14.42	23.25	6.25	—	3.13	0.69	0.38	0.28	

2.2 灰渣熔融特性分析

煤灰熔融特性对气化炉操作参数的设定具有重要作用^[9]。原煤及不同渣块的灰熔融特性如图3所示。由图3(a)可知,BS煤的灰熔融温度约为1 235℃,略高于MC煤。混煤的半球温度、软化温度和变形温度均较纯煤低,但流动温度较MC煤和BS煤高。由图3(b)可知,混煤气化后灰渣中S1的灰熔融温度与混煤灰较为相近。S2的半球温度、软化温度和变形温度均高于S1,而流动温度却低于S1。值得注意的是,S1和S2的灰熔融温度均明显高于正常工况下获得的气化粗渣。煤中矿物质具有不均一性等特点,在高温热转化过程中,这些矿物质相互作用发生一系列复杂的物理化学反应,导致形成的矿物质灰渣具有多样性。因此,熔渣组成的波动使其本身的高温矿物学特性(即灰熔融温度和黏温特性)发生变化,从而导致熔渣黏度增大而黏附到气化炉壁上产生结渣。

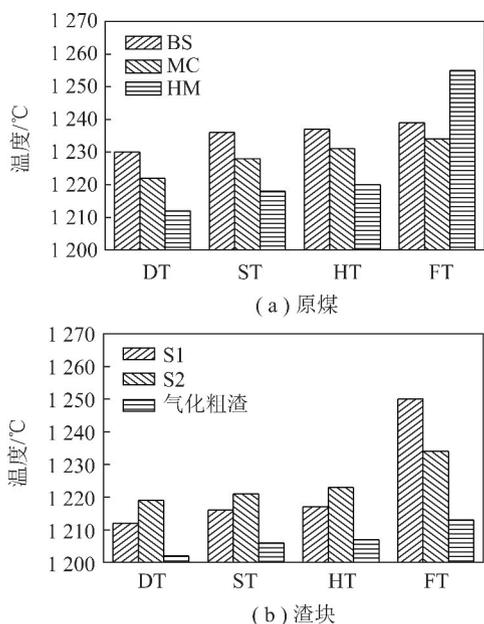


图3 原煤及不同渣块的灰熔融特性

Fig. 3 Ash fusing characteristics of raw coal and different slagging fractions

试验采用 Factsage 热力学计算软件,从理论上阐明矿物质的熔融特性随组成的变化规律,结果如图4所示。Na-Si-O体系中其初始液相形成温度仅为800℃左右,随着Na₂O含量升高,其初始液相形成温度基本保持不变。混入一定量Al₂Si₂O₇后,其液相初始形成温度迅速升至1 050℃左右;随着Na₂O增加至0.95 mol时,其初始液相温度约为750℃。煤气化过程中,矿物质高温下发生熔融形成组分复杂的共熔物,随着温度的降低液态灰渣中某些具有高熔点的矿物质体系将结晶形成晶核,晶核迅速生长形成矿

物质颗粒,如图2中S2灰渣所示。而该固液混合物的形成将显著增加熔渣的黏度^[10-11],从而导致灰渣无法顺利从气化炉内排出而发生堵渣。此外,由于高温气化过程中碱金属元素的高挥发性及其分布的不均一性,导致形成的熔渣中Na、Ca等碱性助熔矿物质分布不均,不同矿物质体系中的矿物质高温熔融流动性特性差异明显。这与实验室所测定的煤灰熔融温度及黏温特性存在偏差,可能导致某些高熔点、高黏性的矿物质在指定工况下达不到液体排渣的要求而引发气化炉排渣口灰渣积累。

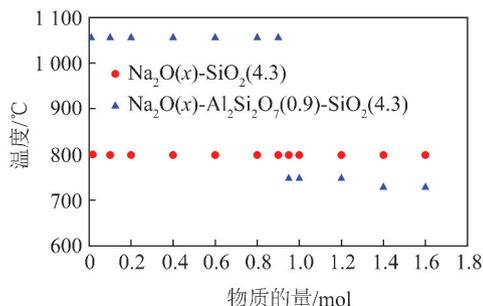


图4 不同矿物质组分初始液相温度的 Factsage 计算结果
Fig. 4 Factsage calculation results of initial liquid temperature of different mineral components

2.3 煤灰高温演变特性

图5分析了BS煤和MC煤高温热转化过程中矿物质的演变规律。由图5可知,在600℃灰化时,BS煤灰中主要的矿物质为CaCO₃、Fe₂O₃和石英。MC煤灰中的晶相矿物质主要包括石英和Fe₂O₃以及少量的CaSO₄,煤灰中钠含量较低,未检测到含钠矿物质的存在。混煤灰的XRD结果和鉴定出来的晶相矿物质与MC煤相似,这是由于混煤中MC煤的质量分数为80%;且低温下,煤中矿物质几乎不发生相互反应,因此混煤中矿物质的组成较接近MC煤。低温灰的XRD衍射结果能在一定程度上反应原煤中矿物质的化学组成。1 100℃灰化后,BS煤中矿物质主要以石英和Fe₂O₃为主,煤中钠、钙与煤灰中的黏土、石英等反应生成了NaAlSiO₄和Ca₂Al₂SiO₇低熔点矿物质,这与图2中扫描电镜的分析结果一致。灰化温度进一步升至1 200℃后,BS煤中的矿物质较1 100℃时无明显变化,主要区别在于1 200℃后矿物质中CaO的衍射峰明显增强。从XRD分析结果可得出高温下BS煤的矿物质主要发生了如下反应^[12]:



MC煤在1 100℃和1 200℃灰化后,其主要晶相矿物质仍为石英、Fe₂O₃和CaSO₄以及CaCO₃,因

此 MC 煤灰在高温下矿物质的相互作用及转化不显著。混煤高温灰化后煤中矿物质未发生显著的矿物相转化,但 1 100 °C 灰化后的矿物质中检测到 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 的衍射峰,混煤中 Ca、Fe 和 Mg 等碱性金属元素还与石英反应生成 $\text{Ca}(\text{Mg},\text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$ 。

BS 煤中 Na 含量非常高,具有助熔效果的碱金

属很容易与煤中酸性矿物质,如石英、黏土等相互作用产生低温共熔物。而钙镁铁等硅铝酸盐矿物质具有较高熔点,在熔渣降温过程中与无定形玻璃体矿物形成固液共融体系,这些高熔点的矿物质为煤灰熔融过程中提供了较强的“骨架”作用(图 2 中的 S2),从而促进混煤灰中结渣的形成^[13-14]。

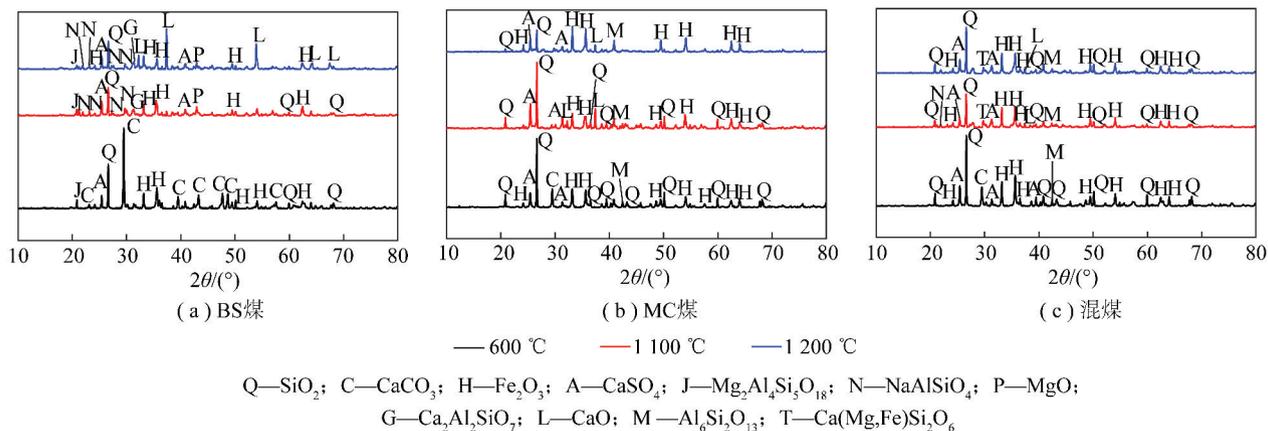


图5 不同温度燃烧灰化后的 XRD 谱图

Fig. 5 XRD spectras of coal samples ashed at different temperature

2.4 煤灰结渣特性预测及预防

煤灰结渣受多种氧化物的综合影响。煤灰由 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 TiO_2 和 SO_3 等组分构成,其中 SiO_2 、 Al_2O_3 和 TiO_2 为酸性氧化物, Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 为碱性氧化物^[15]。酸性氧化物具有提高煤灰熔融温度的作用,降低结渣性;碱性氧化物具有降低煤灰熔融温度的作用,提高煤的结渣性。在煤灰组分相近的情况下,高灰煤比低灰煤易结渣。煤灰含量对结渣性的影响还体现在灰分 10% ~ 25% 时灰熔融温度出现最低值。因此,一般说来灰熔融温度低、灰分高、碱酸比 (B/A) 值大的煤,具有较强的结渣倾向。在煤中矿物质的赋存形态和分布上,与结渣性密切相关的玻璃态物质主要是由煤中内在矿物质转化形成,如灰的团聚、结渣以及在气体输送管和热交换器的沉积。

通过前期研究建立的灰渣预测模型,对煤灰的酸碱分析值与结渣进行判断^[16]。

1) 酸碱比值 B/A

$B/A = w(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{SO}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / w(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5)$ 。 $B/A < 0.4$ 时不易结渣, $0.4 < B/A < 1$ 时为中等结渣, $B/A > 1$ 时为严重结渣。

2) $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 质量分数

$w(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) \leq 64.1\%$ 时严重结渣; $64.1\% < w(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) < 79.8\%$ 时中等结渣; $w(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) \geq 79.8\%$ 时轻微结渣。

3) $\text{CaO} + \text{FeO}$ 质量分数

$w(\text{CaO} + \text{FeO}) \geq 25.5\%$ 时严重结渣; $9.8\% < w(\text{CaO} + \text{FeO}) < 25.5\%$ 时中等结渣; $w(\text{CaO} + \text{FeO}) \leq 9.8\%$ 时轻微结渣。

从 3 种样品的组分分析可初步判定,BS 煤 $B/A = 12.89$, $w(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) = 41.28\%$, $w(\text{CaO} + \text{FeO}) = 33.19\%$; MC 煤 $B/A = 16.07$, $w(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) = 42.59\%$, $w(\text{CaO} + \text{FeO}) = 36.57\%$,属于严重结渣煤,与本文试验结论一致。

控制煤灰结渣的首要原则是选取煤种的熔渣黏温特性和灰熔融温度尽可能与气化炉设计参数接近。若煤质与设计相差较大,应选择配煤方式。熔渣临界黏度温度较低且变化平缓的原料煤,抗温度波动干扰强,熔渣流动性好且排渣稳定。一般控制原料煤熔渣的黏度在 $15 \sim 25 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 为最佳,灰分控制在 $< 10\%$,灰熔融温度一般不高于 $1 250 \text{ }^\circ\text{C}$ 为宜^[17]。

针对操作原因导致的气化炉堵渣,避免由于操作工况大幅变化导致气化炉堵渣。正常运行时控制中心氧比例 $15\% \sim 16\%$,调节时以气化炉上下温差不超过 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 为宜,避免中心氧比例过大破坏激冷水膜(设计中心氧比例为 15%)。在操作中随系统负荷变化及时调整激冷水量,激冷水量就高不就低,以保护激冷环及下降管。

3 结 论

1) 新疆煤气化后不同形态灰渣中 Na 含量差别

较大,Na含量差异导致矿物质灰渣的黏温特性及固化温度不同。Na-Si-O体系中其初始液相形成温度仅为800℃左右,随着Na₂O含量升高,其初始液相形成温度基本保持不变;混入一定量Al₂Si₂O₇后,其液相初始形成温度迅速升高至1050℃左右。

2)矿物质高温下发生熔融形成组分复杂的共熔物,随温度降低液态灰渣中具有高熔点的矿物质体系将结晶形成晶核,晶核迅速生长形成结晶颗粒而析出。在高温热转化过程煤中活性Na可与石英黏土类矿物质反应生成低熔点的NaAlSiO₄;而Ca、Mg和Fe等与酸性矿物质反应生成具有高熔点的硅铝酸盐矿物质,在降温过程中首先从熔渣中析出,导致堵渣的发生。

参考文献(References):

- [1] WU X J, ZHANG X, YAN K, et al. Ash deposition and slagging behavior of Chinese Xinjiang high-alkali coal in 3 MWth pilot-scale combustion test[J]. *Fuel*, 2016, 181: 1191-1202.
- [2] 林雄超, 杨远平, 徐荣声, 等. 新疆高碱煤分选组份中碱性矿物赋存及差异演化研究[J]. *燃料化学学报*, 2017, 45(2): 157-164.
LIN Xiongchao, YANG Yuanping, XU Rongsheng, et al. Occurrence and transformation behavior of AAEMs in the flotation fraction of a typical Xinjiang coal[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2017, 45(2): 157-164.
- [3] YANG Y P, LIN X C, CHEN X J, et al. The formation of deposits and their evolutionary characteristics during pressurized gasification of Zhundong coal char[J]. *Fuel*, 2018, 224: 469-480.
- [4] 宋国良, 齐晓宾, 宋维建, 等. 新疆准东高碱煤流态化气化过程中碱金属的迁移特性[J]. *过程工程学报*, 2015, 15(4): 541-547.
SONG Guoliang, QI Xiaobin, SONG Weijian, et al. Migration characteristics of alkali metals in Zhundong high-alkali coal from Xinjiang during fluidized gasification process[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2015, 15(4): 541-547.
- [5] 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, 33(3): 431-435.
CHEN Heng, WANG Yungang, MA Haidong, et al. Analysis and study of the slagging and contamination of a CFB boiler burning Zhundong-originated coal[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2015, 33(3): 431-435.
- [6] 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.
CUI Yukui, ZHANG Xiang, WU Xiaojiang. The effect of coal blending ratio on slagging/fouling characteristics of Zhundong Xinjiang high-alkali coal[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2015, 35(5): 361-365.
- [7] ZENG X, YU D, LIU F, et al. Scavenging of refractory elements (Ca, Mg, Fe) by kaolin during low rank coal combustion[J]. *Fuel*, 2018, 223: 198-210.
- [8] 徐荣声, 王永刚, 林雄超, 等. 配煤和助熔剂降低煤灰熔融温度的矿物学特性研究[J]. *燃料化学学报*, 2015, 43(11): 1303-1310.
XU Rongsheng, WANG Yonggang, LIN Xiongchao, et al. Mineralogical properties of lowering coal ash melting temperature using blending coal and fluxing agent[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2015, 43(11): 1303-1310.
- [9] WANG D, LIANG Q, GONG X, et al. Influence of coal blending on ash fusion property and viscosity[J]. *Fuel*, 2017, 189: 15-22.
- [10] XUAN W, WHITTY K J, GUAN Q, et al. Influence of isothermal temperature and cooling rates on crystallization characteristics of a synthetic coal slag[J]. *Fuel*, 2014, 137: 193-199.
- [11] LIU X, YU G, XU J, et al. Viscosity fluctuation behaviors of coal ash slags with high content of calcium and low content of silicon[J]. *Fuel Processing Technology*, 2017, 158: 115-122.
- [12] XUAN W, WHITTY K J, GUAN Q, et al. Influence of SiO₂/Al₂O₃ on crystallization characteristics of synthetic coal slags[J]. *Fuel*, 2015, 144: 103-110.
- [13] DAI X, BAI J, HUANG Q, et al. Viscosity temperature properties from molecular dynamics simulation: The role of calcium oxide, sodium oxide and ferrous oxide[J]. *Fuel*, 2019, 237: 163-169.
- [14] SAIMIR A L, HAJRI H, ROLANDA D, et al. Correlation between ash fusion temperatures and chemical composition in Albanian coal ashes[J]. *Fuel*, 2002, 81: 2257-2261.
- [15] SHEN Z J, HUA X, LIANG Q F, et al. Reaction, crystallization and element migration in coal slag melt during isothermal molten process[J]. *Fuel*, 2017, 191: 221-229.
- [16] CHENG X L, WANG Y G, LIN X C, et al. Effects of SiO₂-Al₂O₃-CaO/FeO low-temperature eutectics on slagging characteristics of coal ash[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31: 6748-6757.
- [17] BRYANT G W, BROWNING G J, EMANUEL H, et al. The Fusibility of blended coal ash[J]. *Energy & Fuels*, 2000, 14: 316-325.