

商晓甫,马建立,张剑,等.煤气化炉渣研究现状及利用技术展望[J].环境工程技术学报,2017,7(6):712-717.

SHANG X F, MA J L, ZHANG J, et al. Research status and prospects of utilization technologies of slag from coal gasification [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2017, 7(6): 712-717.

煤气化炉渣研究现状及利用技术展望

商晓甫^{1,2}, 马建立^{1,2*}, 张剑³, 许丹宇¹, 张良运^{1,2}, 周金倩^{1,2}, 段晓雨¹, 张晓敏¹

1. 天津市环境保护科学研究院, 天津 300191

2. 天津环科立嘉环境修复科技有限公司, 天津 300191

3. 兖矿集团有限公司, 山东 济宁 273500

摘要 煤气化技术的应用是我国能源战略的重要一环,但同时也会产生大量的煤气化炉渣,亟需研究可批量消纳的资源化利用技术。煤炭灰分中各种矿物相在气化炉内会随温度发生变化,通过对该变化的研究和总结,描述了煤炭灰分中各种矿物相在气化炉内的物化反应过程,并指出煤炭灰分对煤气化炉渣的最终形态特点具有决定性的影响;对煤气化炉渣中残碳的组成及其变化特点的研究表明,残碳对煤气化炉渣的最终利用途径具有重要影响;此外,通过分析煤气化炉渣利用技术研究现状,指出建材化利用技术和掺烧循环流化床原料技术是目前的主流途径;最后,展望了煤气化炉渣利用技术的发展方向,并提出了煤气化炉渣用于混凝土和水泥原料以及井下回填的技术途径。

关键词 煤气化炉渣;灰分;残碳;研究现状;技术展望;井下回填

中图分类号:X705 文章编号:1674-991X(2017)06-0712-06 doi:10.3969/j.issn.1674-991X.2017.06.098

Research status and prospects of utilization technologies of slag from coal gasification

SHANG Xiaofu^{1,2}, MA Jianli^{1,2}, ZHANG Jian³, XU Danyu¹, ZHANG Liangyun^{1,2},
ZHOU Jinqian^{1,2}, DUAN Xiaoyu¹, ZHANG Xiaomin¹

1. Tianjin Academy of Environmental Science, Tianjin 300191, China

2. Tianjin Huankelija Environment Remediation Technology Co., Ltd., Tianjin 300191, China

3. Yancoon Group Co., Ltd., Jining 273500, China

Abstract Coal gasification technology has become an important part in China's energy strategy. However, a great amount of slag has been generated due to this technology, which requires urgent development of resource utilization technology to consume and reuse the slag largely. Considering that different mineral phases of coal ash content will change with the temperature in the gasifier, and based on the investigation and summarization of this change, the physicochemical reaction process of various mineral phases in gasifier is described and the decisive impact of coal ash content on final morphological characteristics of slag from coal gasification is also revealed. The research on the constituents of carbon residue in the slag and their features of change shows that final utilization approaches of the slag are significantly influenced by carbon residue. Additionally, by analyzing current research status of utilization technology of coal gasification slag, it is pointed out that the utilization as building material and mixed combustion with circulating fluid-bed raw material are the most popular approaches for slag utilization. Finally, the prospects of utilization technology for slag from coal gasification are proposed and some utilization approaches are suggested,

收稿日期:2017-05-21

基金项目:兖矿集团科技创新重大专项(YK2015ZD16-R41);天津市科技计划项目(16YFXTSF00420);天津市环境保护科学研究院自主创新基金暨院长基金(YZJJ-2016-003)

作者简介:商晓甫(1989—),男,硕士,主要从事场地修复和固体废物污染控制与资源化利用技术研究,shxiaofu@189.cn

* 责任作者:马建立(1977—),男,高级工程师,博士,主要从事场地修复和固体废物污染控制与资源化利用技术研究,majianguang@163.com

including using as raw material of concrete or cement and being backfilled underground.

Key words slag from coal gasification; ash content; carbon residue; research status; technology prospect; underground backfill

富煤贫油少气的特点使得煤炭在我国能源结构中的主体地位短期内不会改变,以煤气化为核心技术之一的煤制气、煤制油等产业在我国得到了大力发展。然而,一个百万吨级的煤间接制油项目每年会产生逾 60 万 t 的煤气化炉渣,如果填埋处置,不仅环保效益差,而且成本高昂,企业负担沉重。因此,研究煤气化炉渣的减量化、资源化利用技术成为相关企业实现环保效益和经济效益兼得的关键所在。

笔者分析总结了煤气化炉渣的研究工作,包括煤炭灰分对煤气化炉渣的影响、残碳对煤气化炉渣的影响和煤气化炉渣的利用技术现状,结合其他类型固体废渣的成熟利用技术,提出了煤气化炉渣用于建材原料和井下回填的技术对策,以期对相关研究工作者和企业提供参考。

1 煤炭灰分对煤气化炉渣的影响

在气化炉高温高压条件下,煤炭灰分中的矿物质完全熔融后,发生分解和相互反应,液态熔渣经冷却后最终生成以非晶态玻璃体为主的气化炉渣^[1],该过程与煤炭灰分组成密切相关,并以煤的灰熔点变化表现出来,最终影响煤气化炉渣的特性和利用途径。

1.1 煤炭灰分中矿物质在炉内的行为

煤炭灰分中的矿物相从化合态上讲主要包括 Si、Al、Fe、Ca、Mg、Ti、K、Na 等元素的氧化物、碳酸盐或硫酸盐,根据化合态晶相的不同和复合条件的不同形成了各种各样的矿物相,这些矿物相主要包括石膏、石英、方解石、方钙石、钙长石、高岭石、偏高岭石和莫来石等,根据地区的不同,这些矿物质在煤炭灰分中的含量和种类也不尽相同。

一般来说,当气化炉温度升至 600 ~ 800 °C 时,高岭石开始脱水变为偏高岭石,同时赤铁矿、石膏等矿物晶相也开始遭到破坏^[2];当温度升至 800 ~ 900 °C 时,石英开始与高岭石发生反应,该反应最高可以持续至 1 600 °C^[3];850 °C 时,方解石和白云石开始分解^[4];偏高岭石在 980 °C 时开始生成莫来石的前躯体——硅线石^[2];1 000 °C 时莫来石开始生成,并在 1 400 °C 内呈升高趋势^[5];1 100 °C 时会有铁尖晶

石和钙长石生成^[2];1 200 °C 时方解石分解产生的方钙石开始与莫来石发生反应生成钙长石,并于 1 400 °C 左右停止^[6]。

1.2 煤炭灰分对结渣的影响

目前气化炉的操作温度多在 1 100 ~ 1 400 °C,其主要由煤的灰熔点决定,常选择稍高于灰熔点以保证气化炉正常结渣。研究表明^[4,7-9],灰分组成及其在气化炉内的行为特点对煤的灰熔点和渣块的形成具有重要影响。

根据固相反应的海德华定律,当反应物之一存在晶型转变时,其转变温度也是反应开始变得显著的温度,通常也是最佳选择温度^[10]。但是由于煤炭灰分组成的复杂性,该显著温度选择区间变得相当宽泛,这也是煤气化炉操作温度难以控制的原因之一。在 1 100 ~ 1 400 °C 时,莫来石的生成是导致灰熔点升高的主要原因,而钙长石的生成则会降低灰熔点^[8,11],因此,煤灰分中石英、高岭石类矿物含量越高,煤的灰熔点越高,对应化合物即二氧化硅、氧化铝等;煤灰分中石膏、石灰石、方解石、赤铁矿含量越高,煤的灰熔点越低,对应化合物即硫酸钙、碳酸钙、氧化铁等,这些碱金属硫酸盐和富铁氧化物同时也是煤炭燃烧过程中引起煤炭结渣的主要原因^[12]。

另外,煤气化的结渣行为与煤炭中矿物质的玻璃化过程和炉型、煤种等密切相关。周俊虎等^[13]研究表明,铁硅酸盐玻璃化作用产生的黏附灰渣颗粒对神华煤气化炉结渣具有重要影响;李继炳等^[11]认为,大量钙长石的生成是导致安庆石化 Shell 气化炉产生大块熔渣的原因之一;李风海等^[2]认为,在晋城无烟煤流化床气化过程中,1 100 °C 左右时低熔点共融物铁尖晶石以及钙长石等的形成是引起结渣的主要因素,且在 1 200 °C 高温处理后煤灰快速冷却时,铁、钙元素主要转化成玻璃态物质;毛燕东等^[14]研究发现,气化炉渣中钙、铁元素发生了明显富集,并最终形成玻璃态物质,引发炉内结渣;杨鑫等^[9]认为,大部分钙、铁等助熔组分赋存于由长石类矿物经熔融和烧结形成的结块中,促进了气化炉的结渣过程和结渣的致密性。

煤炭灰分中含钙、铁矿物质的存在不仅能够降低煤的灰熔点,而且还能促进非晶体玻璃态结渣和

气化渣的致密化。由于非晶体玻璃态物质在一定条件下能够发生二次水硬化反应,具有一定的火山灰活性,能够提高炉渣的火山灰效应;而气化渣的致密化则可以提高其用于建材集料的强度。因此,有企业曾尝试向煤粉中加入含钙类矿物以降低煤灰熔点,但是含钙矿物过量时,往往会导致气化渣中游离氧化钙增加,经高温煅烧的游离氧化钙结构致密,水化缓慢,而且水化生成的产物体积明显增加,在硬化水泥浆体系中造成局部膨胀应力,最终导致水泥或混凝土抗折强度下降,安定性受到影响^[15]。可以说,煤炭的灰分组成对煤气化灰熔点和煤气化炉渣的特性及其最终利用途径有着极为重要的影响。

2 残碳对煤气化炉渣的影响

残碳含量与煤种、气化工艺、运行情况等因素有关,不同种类的煤气化炉渣中残碳含量差异较大^[1],一般来讲,气化细渣的停留时间比气化粗渣短,造成细渣较粗渣残碳含量高,机械强度较粗渣低,如神华宁煤集团大甲醇厂采用四喷嘴对置式气化炉,细渣含碳量为20.61%^[16],粗渣含碳量不高于3.1%^[1];小甲醇厂采用Texaco气化炉,细渣含碳量高达31.28%^[16],粗渣含碳量不高于3.6%^[1];烯烃公司采用GSP气化炉,细渣含碳量为21.44%^[16],粗渣含碳量不高于2.05%^[1];神华包头煤化工公司采用GE气化炉,细渣和粗渣含碳量分别为22.0%和4.8%^[17]。

另外,残碳在粗渣、细渣中的分布也不均^[18],Wagner等^[19]将某商业煤气化炉渣分为未燃炭、页岩炭和炭收缩核三部分,其中未燃炭主要由惰性煤生成的密实炭颗粒组成,粒径集中在4~13 mm,与原料煤颗粒相比具有较低的灰分、挥发分、硫含量(0.29%~0.31%)和较高的固定碳含量;未燃炭又可以分为残余煤颗粒、实心炭、层状炭和多孔炭,而层状炭和多孔炭具有高孔容和高比表面积,具有用于制造活性炭和其他高附加值碳材料的潜质。

然而,较高的残碳含量将不利于煤气化炉渣用于水泥和混凝土原料。残碳本身属于多孔惰性物质,不仅会增加新拌混凝土的需水量,造成混凝土沁水增多,干缩变大,进而降低强度和耐久性,而且会在颗粒表面形成一层憎水膜,阻碍水化物的胶凝体和晶体的生长与相互间的联结,破坏混凝土内部结构,造成内部缺陷,从而降低混凝土的性能,特别是降低了混凝土的抗冻性^[20-21]。因此,残碳含量是影响煤气化炉渣利用途径的关键指标。

3 煤气化炉渣利用技术现状

3.1 煤气化炉渣用作建材原料

煤气化炉渣满足或经分选富集处理后满足低残碳要求,则首选制砖、砌块等;如果炉渣颗粒足够细,并具有火山灰活性,还可以用于掺制水泥或混凝土。如Acosta等^[22]利用50%的低含碳量煤气化炉渣(烧失量只有2.64%)与黏土制备了可以满足使用要求的建筑用砖;尹洪峰等^[23]利用添加量达70%的粉状德士古煤气化炉渣烧制成了MU 7.5以上的低密度保温墙体材料;云正等^[24]在尾矿中添加部分煤气化炉渣和少量黏土,采用挤压成型的方法制备了铁尾矿烧结墙体材料;章丽萍等^[25]利用某企业煤气化炉渣(35.6%)、锅炉渣(32.4%)为主材料,以除尘灰(14%)、石灰(8%)、水泥(4%)为辅助材料,以石膏(6%)为激发剂,100℃下蒸养18 h制备出了符合JC/T 422—2007《非烧结砖垃圾尾矿砖》和GB 11945—1999《蒸压灰砂砖》标准要求的免烧砖。

选择制砖、砌块、掺制水泥或混凝土等都是基于煤气化炉渣的集料作用和火山灰效应,但是煤气化炉渣整体上高残碳的特点将严重影响其建材化利用技术,根据GB/T 1596—2005《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》标准规定,粉煤灰的烧失量不得高于15%,该限值对煤气化炉渣来说是一个挑战。理论上讲,利用残碳在渣中分布不均的特点可以通过分选富集分别选出高残碳渣和低残碳渣,然后再做分别利用^[26]。但无论是干法分选还是湿法分选都将涉及一系列技术问题,如干法分选对原料要求苛刻,分选效率低,湿法分选技术流程长,投资高等。

3.2 煤气化炉渣用于循环流化床掺烧料

满足高残碳,高热值,而且粒径足够细的煤气化炉渣可以考虑掺烧循环流化床锅炉。如王伟等^[27]用煤气化炉渣、煤泥、白泥以一定比例混合成流态化锅炉原料,采用煤泥管道输送技术输送至循环流化床锅炉燃烧,经济效益和环境效益显著;李刚健^[16]认为,神华宁夏煤业集团有限责任公司的3种煤气化炉(Texaco、四喷嘴对置式和GSP)产生的高残碳细渣可以直接通过低比例掺混后进入循环流化床锅炉燃烧利用,燃烧后的低碳灰渣可以用于建材建工原料;杨帅等^[28]建议以低比例掺烧循环流化床锅炉原料的方式利用神宁煤化工公司的3种煤气化细渣;高继光等^[29]利用河南心连心化肥有限公司的德士古气化炉细渣代替中煤,按照180 t/h的循环流化床锅炉设计比例进行掺烧,对锅炉的正常稳定运行

几乎没有影响;晁岳建等^[30]研究认为,掺烧煤气化炉渣和煤泥的循环流化床锅炉综合发热量可以满足锅炉设计的燃料要求。

选择掺烧循环硫化床锅炉则是基于煤气化炉渣高残碳,有一定热值的特点,而且循环流化床锅炉具有技术成熟、市场成熟、消耗量大的优点,经循环硫化床燃烧后,炉渣中残碳量降低,再用作建材原料,完全满足煤气化炉渣的资源化利用要求。但是循环流化床锅炉投资高昂,技术难度高,一旦投入运行,需要综合考虑其经济可行性和锅炉燃烧运行的稳定性。

3.3 煤气化炉渣的高附加值开发

根据局部地区煤气化炉渣成分的特殊性,进行高附加值开发。如 Kennedy 等^[31]将位于美国宾州荷马城的 Bi-Gas 厂加压煤气化炉渣加热至 800 ~ 900 ℃时,发现这些气化渣的体积增至原来的 20 倍,具有良好的绝缘性,呈现出与蛭石相似的特性;Acosta 等^[32]通过对 GICC 渣的物化表征研究,认为原则上 GICC 渣可以作为原料生产眼镜、玻璃纤维、玻璃陶瓷以及陶瓷烧结材料等;尹洪峰等^[23]利用煤气化炉渣为主要原料,通过碳热还原氮化可合成主要成分为 Ca-α-sialon 和 β-sialon 的粉体。但是,选

择制备高附加值材料的技术目前多处于实验室研究阶段。

4 煤气化炉渣利用技术展望

4.1 煤气化炉渣用于混凝土和水泥原料

固体废渣用于混凝土和水泥等建材原料是一种常见的利用方式,如 GB/T 1596—2005《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》、GB/T 2847—2005《用于水泥中的火山灰质混合材料》、GB/T 20491—2006《用于水泥和混凝土中的钢渣粉》、GB/T 203—2008《用于水泥中的粒化高炉矿渣》和 GB/T 18046—2008《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》、JC 418—2009《用于水泥中的粒化高炉钛矿渣》、JC/T 742—2009《掺入水泥中的回转窑窑灰》、GB/T 26751—2011《用于水泥和混凝土中的粒化电炉磷渣粉》、GB/T 27690—2011《砂浆和混凝土用硅灰》、GB/T 29423—2012《用于耐腐蚀水泥制品的碱矿渣粉煤灰混凝土》以及 GB/T 25176—2010《混凝土和砂浆用再生细骨料》、GB/T 25177—2010《混凝土用再生粗骨料》等,根据原料来源和最终产品不同,标准对烧失量、SO₃ (或硫酸盐)、游离 CaO (或碱含量)、氯离子和废渣粒度等项目给出了限值,如表 1 所示。

表 1 常见固体废渣用于建材原料的化学组分要求
Table1 Requirement of chemical constituents of common solid waste using for building materials

固废类型	烧失量/%	SO ₃ /%	游离 CaO/%	氯离子/%	备注
粉煤灰	≤15	≤3.5	≤4		
火山灰	≤10	≤3.5		≤0.06	
钢渣		≤4	≤3		碱性系数[$w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5)$] ≥1.8
高炉矿渣	≤3	≤4		≤0.06	
钛矿渣		≤3			
回转窑灰					碱含量($\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$)最高 ≤8%
电炉磷渣	≤3	≤4		≤0.06	碱含量($\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$) ≤1%
硅灰	≤4			≤0.1	总碱量 ≤1.5%
碱矿渣	≤6	≤3%		≤0.15	碱性系数[$w(\text{CaO} + \text{MgO})/w(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$] ≥0.95

注:w 表示对应物质的质量分数。

目前煤气化炉渣用于混凝土和水泥等建材原料还没有标准或技术规范可依,但煤气化炉渣中含有丰富的无机相,包括 SiO₂、Al₃O₂、Fe₂O₃、CaO、MgO、TiO₂ 等,当 SiO₂、Al₃O₂、Fe₂O₃ 含量之和达 70% 和 50% 以上时,可以分别满足 ASTM 的 F 类和 C 类粉煤灰标准。另外,经过煤气化炉高温高压条件的熔融重塑,游离 CaO 和 SO₃ 含量一般较低,为煤气化

炉渣用于混凝土和水泥等建材原料奠定了基础。因为在水泥生产过程中,过高的碱性物质、SO₃ 和氯离子在悬浮预热器中容易引起结皮堵塞,影响生产。然而煤气化炉细渣因工艺限制往往具有较高的残碳含量,不利于建材化利用,但可以将煤气化炉细渣用于烧制水泥。理论上煤气化炉细渣在水泥窑的高温环境中经二次燃烧后不仅可以满足低碳要求,而且

可以节省燃料。

4.2 煤气化炉渣用于井下回填

煤气化炉渣中重金属浸出率非常低,属于第Ⅰ类一般工业固体废物^[33-34],回填的环境风险低。如果企业附近存在具有填充条件的矿井,可以利用煤气化炉渣无需破碎,易成浆的特点,考虑将煤气化炉渣按比例与水、砂、碎石等混合制成浆状,然后泵送至填充位置实现井下填充,必要时可以加入适量黏土强化填充填料的黏结性和惰性,进一步避免可能发生的有害元素的浸出迁移,该技术的优点是可以利用成熟工艺实现煤气化炉渣的大量消纳,但是需要进一步研究探讨煤气化炉渣浆填充的安全性,已有输送和填充设备的可靠性,以及短驳运输和人力投入的经济可行性等问题。

5 结语

(1)煤炭灰分和残碳量对煤气化炉渣的终态特点和利用途径具有决定性的影响。

(2)建材化利用和掺烧循环流化床锅炉原料是目前煤气化炉渣的主流利用途径。

(3)理论上煤气化炉渣可以用于混凝土和水泥原料,井下回填技术不仅可以实现煤气化炉渣的大量消纳,而且环境风险低。

参考文献

- [1] 赵永彬,吴辉,蔡晓亮,等. 煤气化残渣的基本特性研究[J]. 洁净煤技术,2015(3):110-113.
ZHAO Y B, WU H, CAI X L, et al. Basic characteristics of coal gasification residual [J]. Clean Coal Technology, 2015 (3): 110-113.
- [2] 李风海,黄戒介,房倚天,等. 晋城无烟煤流化床气化结渣机理的探索[J]. 太原理工大学学报,2010,41(5):666-669.
LI F H, HUANG J J, FANG Y T, et al. Exploration on slagging mechanism of Jincheng anthracite during fluidized-bed gasification [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2010, 41(5): 666-669.
- [3] 梁国治. 煤灰中矿物组成分析[J]. 矿业科学技术,2005(4):27-29.
- [4] MATJIE R H, ALPHEN C V. Mineralogical features of size and density fractions in Sasol coal gasification ash, South Africa and potential by-products[J]. Fuel, 2008, 87(8/9):1439-1445.
- [5] 须藤俊男. 黏土矿物学[M]. 北京:地质出版社,1981.
- [6] DYK J C V, MELZER S, SOBIECKI A. Mineral matter transformation during Sasol-Lurgi fixed bed dry bottom gasification-utilization of HT-XRD and FactSage modelling[J]. Minerals Engineering, 2006, 19(10):1126-1135.
- [7] SONG W, TANG L, ZHU X, et al. Fusibility and flow properties of coal ash and slag[J]. Fuel, 2009, 88(2):297-304.
- [8] 丰芸,李寒旭,丁立明. 利用 XRD 分析高温下淮南煤灰矿物质变化[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版),2008,16(5):53-57.
FENG Y, LI H X, DING L M. Study of huainan coal ash mineral variation under high temperature with XRD[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture(Natural Science), 2008, 16(5):53-57.
- [9] 杨鑫,黄戒介,房倚天,等. 无烟煤流化床气化飞灰的结渣特性[J]. 燃料化学学报,2013,41(1):1-8.
YANG X, HUANG J J, FANG Y T, et al. Slagging characteristics of fly ash from anthracite gasification in fluidized bed[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2013, 41(1):1-8.
- [10] 饶东生. 硅酸盐物理化学[M]. 北京:冶金工业出版社,1991.
- [11] 李继炳,汤永新,芦涛,等. 皖北刘二煤在 Shell 气流床气化过程中熔渣形成机理初探[J]. 化工时刊. 2009, 23(5):42-46.
LI J B, TANG Y X, LU T, et al. Study of slag melt mechanism of liuer coal in shell gasifier by X-ray diffraction (XRD) [J]. Chemical Industry Times, 2009, 23(5):42-46.
- [12] HUFFMAN G P, HUGGINS F E, SHAH N, et al. Behavior of basic elements during coal combustion[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 1990, 16(4):243-251.
- [13] 周俊虎,赵晓辉,杨卫娟,等. 神华煤结渣倾向和结渣机制研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(8):31-36.
ZHOU J H, ZHAO X H, YANG W J, et al. Study on the ash deposition propensity and mechanism of shenhua coal [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(8):31-36.
- [14] 毛燕东,李克忠,孙志强,等. 小型流化床燃煤自供热煤催化气化特性研究[J]. 高校化学工程学报,2013(5):798-804.
MAO Y D, LI K Z, SUN Z Q, et al. Characteristics of catalytic coal gasification in lab scale autothermal fluidized bed [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2013 (5):798-804.
- [15] 杨力远. 现代水泥生产知识概要[M]. 郑州:郑州大学出版社,2009.
- [16] 李刚健. 煤化工气化滤饼组份分析与综合利用简述[J]. 科技信息,2012(35):466.
- [17] 毛兆锋,李志祥,刘泽. GE 水煤浆气化装置渣水分离问题探讨[J]. 中氮肥,2015(4):31-33.
- [18] 高旭霞,郭晓镭,龚欣. 气流床煤气化渣的特征[J]. 华东理工大学学报(自然科学版),2009,35(5):677-683.
GAO X X, GUO X L, GONG X. Characterization of slag from entrained-flow coal gasificaion [J]. Journal of East China University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2009, 35(5):677-683.
- [19] WAGNER N J, MATJIE R H, SLAGHUIS J H, et al. Characterization of unburned carbon present in coarse gasification ash[J]. Fuel, 2008, 87(6):683-691.
- [20] 肖忠明,王昕. 工业废渣在水泥生产中的应用[M]. 北京:中国建材工业出版社,2009.
- [21] 王迎春,苏英,周世华. 水泥混合材和混凝土掺合料[M]. 北京:化学工业出版社,2011.

- [22] ACOSTA A, IGLESIAS I, AINETO M, et al. Utilisation of IGCC slag and clay steriles in soft mud bricks (by pressing) for use in building bricks manufacturing[J]. Waste Management, 2002, 22(8):887-891.
- [23] 尹洪峰, 汤云, 任耘, 等. Texaco 气化炉炉渣基本特性与应用研究[J]. 煤炭转化, 2009, 32(4):30-33.
YIN H F, TANG Y, REN Y, et al. Study on the characteristic and application of gasification slag from Texaco gasifier[J]. Coal Conversion, 2009, 32(4):30-33.
- [24] 云正, 于鹏超, 尹洪峰. 气化炉渣对铁尾矿烧结墙体材料性能的影响[J]. 金属矿山, 2010(11):183-186.
YUN Z, YU P C, YIN H F. Effect of gasification slag on the properties of sintered wall materials with iron ore tailings[J]. Metal Mine, 2010(11):183-186.
- [25] 章丽萍, 温晓东, 史云天, 等. 煤间接液化灰渣制备免烧砖研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(2):354-358.
ZHANG L P, WEN X D, SHI Y T, et al. Reserch on making non-burnt brick from indirect coal liquefaction residues[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(2):354-358.
- [26] TAO W, MEI G, LESTER E, et al. Characterisation of residual carbon from entrained-bed coal water slurry gasifiers[J]. Fuel, 2007, 86(7/8):972-982.
- [27] 王伟, 王继征. 气化渣煤泥白泥在循环流化床锅炉的综合利用[J]. 科技致富向导, 2011(31):64.
- [28] 杨帅, 石立军. 煤气化细渣组分分析及其综合利用探讨[J]. 煤化工, 2013, 41(4):29-31.
- YANG S, SHI L J. Composition analysis of the fine slag from coal gasification and its comprehensive utilization[J]. Coal Chemical Industry, 2013, 41(4):29-31.
- [29] 高继光, 马银亮, 刘锐杰. 水煤浆气化灰渣综合利用和效益分析[J]. 节能与环保, 2014(2):72-73.
- [30] 晁岳建, 王洪记. 循环流化床锅炉掺烧气化渣和煤泥的可行性研究[J]. 化肥工业, 2015(3):48-50.
CHAO Y J, WANG H J. Feasibility study of circulating fluidized bed boiler blending burning gasification slag and coal slime[J]. Chemical Fertilizer Industry, 2015(3):48-50.
- [31] KENNEDY C R, KREIS S W, POEPEL R B, et al. Utilization of coal slag from pressurized coal-gasification plants[J]. Journal of Materials for Energy Systems, 1980, 2(1):51-54.
- [32] ACOSTA A, AINETO M, IGLESIAS I, et al. Physico-chemical characterization of slag waste coming from GICC thermal power plant[J]. Materials Letters, 2001, 50(4):246-250.
- [33] 何绪文, 崔炜, 王春荣, 等. 气化炉渣的重金属浸出特性及化学形态分析[J]. 化工环保, 2014, 34(5):499-502.
HE X W, CUI W, WANG C R, et al. Analysis on leaching characteristics and chemical speciation of heavy metals in gasification slag[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2014, 34(5):499-502.
- [34] 章丽萍, 刘青, 陈傲蕾, 等. 煤间接液化固体废物污染特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015(5):931-936.
ZHANG L P, LIU Q, CHEN A L, et al. Pollution characteristics of residues from indirect coal liquefaction[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015(5):931-936. ▷

声 明

本刊已被美国《化学文摘》(CA)、美国《乌利希期刊指南(网络版)》(Ulrichsweb)、英国《农业与生物科学研究中心文摘》(CAB Abstracts)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)收录,被《中国核心期刊数据库》、《万方数据-数字化期刊群》、《中国学术期刊网络出版总库》及 CNKI 系列数据库、《中文科技期刊数据库》(维普)、《超星期刊出版平台》全文收录,作者的网络及电子版著作权使用费已与本刊稿酬一次性给付,特此声明。如作者不同意将文稿编入以上数据库,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理,否则视作同意。

《环境工程技术学报》编辑部