

煤间接液化工艺中气化炉渣综合利用研究进展

刘子梁 孙英杰 李卫华 杨 强 马 强
(青岛理工大学 环境与市政工程学院 山东 青岛 266033)

摘要: 随着煤间接液化技术的日益成熟,副产物气化炉渣的产生亦逐渐增多。气化炉渣作为固体废弃物的一种,其处理处置问题已是当前煤间接液化行业的热点问题,然而对气化炉渣的综合利用研究更是急需考虑的发展方向。介绍了我国煤间接液化技术的背景,发展现状及未来趋势,论述了煤间接液化的工艺流程、气化炉渣的产生、危害及组成。同时概括了国内外气化炉渣在污水处理和建筑行业上的研究现状,论述了气化炉渣在铺路、制备免烧砖、生产混凝土和制备矿渣硅酸盐水泥等方面的应用。最后,提出了气化炉渣在利用局限性、产品缺陷性方面存在的问题,同时为其在污水处理中的应用提出了新思路。

关键词: 煤间接液化; 气化炉渣; 组成; 综合利用

中图分类号: TQ529.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2016)01-0118-06

Research progress of gasification slag utilization from indirect coal liquefaction process

LIU Ziliang, SUN Yingjie, LI Weihua, YANG Qiang, MA Qiang

(Department of Environment and Municipal Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

Abstract: In order to improve utilization rate of gasification slag, the background, research status, future trends of indirect coal liquefaction technologies in China were introduced, and the process of indirect coal liquefaction, generation, harms and composition of gasification slag were reviewed. The domestic and foreign research status of gasification slag in waste water treatment and construction industry were summarized. The gasification slag was mainly used in paving, preparation of baking-free bricks, concrete and Portland cement and other aspects. The problems of gasification slag existing in limitations of application and defects of products were discussed.

Key words: indirect coal liquefaction; gasification slag; composition; utilization

0 引 言

石油不仅是一种不可再生的商品,更是国家生存和发展不可或缺的战略资源,对保障国家经济和社会以及国防安全有着不可估量的作用。根据国际能源署(IEA)估计,到2030年中国的石油进口比例将高达84%^[1-2]。从我国“富煤、贫油、少气”的能源结构来看,以煤为原料将其转变成液体油品并尽快实现产业化是缓解我国石油供需矛盾、保障能源安全的重要战略举措。国家发改委2014年发布的《能源行业加强大气污染防治工作方案》

提出,拓展新的清洁油品来源,发挥煤制油的优势,推进陕西榆林、内蒙古鄂尔多斯、山西长治等煤炭液化项目。煤间接液化制油项目和部分煤制油企业规划表明,到2020年我国煤制油规模可达到3300万t/a^[3]。目前,我国煤间接液化已经从技术产业化的开始阶段过渡到工业化进程阶段。

煤间接液化是煤炭在高温下与氧气和水蒸气反应,使煤炭全部气化,转化成合成气(CO和H₂的混合物),然后在催化剂的作用下合成为液体燃料的工艺技术^[4]。煤间接液化合成油具有清洁、环保、燃烧性能优异等优点,是化石燃料的直接替代品,已

收稿日期:2015-09-16;责任编辑:孙淑君 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2016.01.024

作者简介:刘子梁(1990—),男,山东招远人,硕士研究生,研究方向为固体废弃物处理与处置。E-mail: liuzl0921@163.com

引用格式:刘子梁,孙英杰,李卫华,等.煤间接液化工艺中气化炉渣综合利用研究进展[J].洁净煤技术,2016,22(1):118-123.

LIU Ziliang, SUN Yingjie, LI Weihua, et al. Research progress of gasification slag utilization from indirect coal liquefaction process[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(1): 118-123.

成为当前洁净煤技术的发展热点^[5-6]。但煤间接液化过程中同时会产生大量的气化炉渣,以山西潞安集团年产18万t油品的煤间接液化项目为例,煤气化炉渣产生量高达14万t/a^[7-8]。大量气化炉渣的不合理处置和利用对环境和生态造成危害。因此需要对气化炉渣的利用进行研究。

1 煤间接液化技术工艺流程

煤间接液化是将煤转化为液化石油气、煤油、汽油、柴油等液体燃料的工艺过程,由煤制合成气、合成气费托合成和合成油品加工精制部分组成。典型的费托合成煤间接液化工艺流程如图1所示。

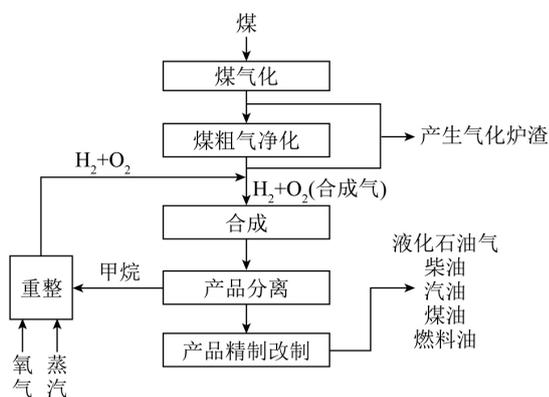


图1 典型的煤间接液化工艺流程

Fig. 1 Typical process of coal indirect liquefaction

2 气化炉渣的产生及危害

气化炉渣是煤在气化炉中完全气化后剩下的残渣,是煤中可燃物部分完全气化后剩余的物质,是煤中矿物质在煤气化过程中经过一系列分解、化合反应生成的产物。作为煤气化的副产物,气化炉渣是煤中灰分和添加剂在气化炉中高温条件下形成的,以液态形态由锁斗收集定期从炉底排出。煤间接液化过程中产生气化炉渣、蜡渣、粉煤灰等残渣,气化炉渣产生量占整个残渣总量的80%左右。如此高产生量的气化炉渣不但增加运输成本,而且会造成侵占土地、扬尘污染、水体和土壤污染等环境问题。

1) 侵占土地。气化炉渣排到地面,无论利用与否都会对土地造成不同程度的侵占,破坏自然景观。气化炉渣的大量堆放一方面占用大量的土地资源,另一方面影响耕地面积,使周围的耕地受到污染而不被利用。

2) 扬尘污染。气化炉渣由于堆放、装卸操作及风蚀作用生成的堆场扬尘,在一定的动力条件

(风力、机动车碾压)的作用下进入大气中,造成扬尘污染。

3) 水体和土壤污染。气化炉渣中含有大量Cr、Zn、Cu等重金属。气化炉渣本身没有浸出毒性,但随着酸雨淋洗、长时间堆存、降雨喷淋等外界条件的累积,炉渣中重金属成分溶解进入土壤或水体,造成土壤和水体污染。何绪文等^[9]采用改进BCR连续提取法对气化炉渣中的重金属进行分析,结果表明炉渣中Cr、Zn、Cu含量较高,Cd和Cr对环境有较高的潜在性危害。残渣中有机残渣被微生物分解产生的有毒有害物质被雨水淋溶通过土壤进入地下水系统,造成土壤环境和水资源的污染。

3 气化炉渣的岩相组成和化学组成

3.1 气化炉渣的岩相组成

气化炉渣的岩相主要以玻璃相和不定型物质为主,晶相主要为石英和方解石。其中,石英是由高温液相冷却过程中玻璃相析晶而得。高旭霞^[10]研究发现,气化炉渣中石英颗粒在800℃时与高岭石等成分反应生成新的矿物质。方解石是为了调整灰分的熔点和熔体性质而引入的助溶剂,由于颗粒粒径较大,在气化炉中停留时间较短没有完全分解而残留在气化炉渣中。尹洪峰等^[11]通过对Texaco气化炉渣进行X-射线衍射分析得知,Texaco气化炉渣中除了未燃烬的煤和石墨之外,主要以玻璃相和不定型残余碳为主,另外还存在石英、方解石和斜长石等晶体。

3.2 气化炉渣的化学组成

气化炉渣是一种复杂的无机混合物,通常以氧化物的形式来表示气化炉渣的组成。煤气化炉渣由SiO₂、CaO、Fe₂O₃、Al₂O₃、MgO、TiO₂、Na₂O等组成,其中SiO₂、CaO、Fe₂O₃、Al₂O₃含量占绝大多数。汤云^[12]分析了气化炉渣的化学组成, SiO₂、CaO、Fe₂O₃含量较高,分别达到了38.16%、10.99%、8.75%,这与国内外研究的气化炉渣化学成分含量相近。Wagner等^[13]对气化炉渣进行XPS扫描研究,结果表明:气化炉渣矿物组成主要是硅、钙、铁、铝的氧化物。各种气化炉渣的化学组成见表1。尽管各类气化炉渣由于气化工艺和工艺参数的不同,煤灰分含量、组成差异、造渣助熔剂类型的不同而导致各类气化炉渣的化学成分含量有所差异,但各类炉渣的主要化学成分是SiO₂、CaO、Fe₂O₃、Al₂O₃,这为其综合利用提供了结构基础^[14-15]。

4 煤间接液化工艺中气化炉渣的综合利用

近年来,随着对气化炉渣的组成结构、性能研究的进一步深入,气化炉渣在废水处理、建筑行业等领域内得到了一定程度的应用。林旭阳^[16]利用气化炉渣处理含重金属离子的酸性废水,研究结果表明:利用气化炉渣处理含重金属的酸性废水后,废水中

重金属去除率在97.3%以上且pH值达标。卢润强^[17]研究了利用气化炉渣作为填料生物,采用接触氧化法处理生活污水的工艺流程,结果表明:此工艺中生活污水的化学需氧量(COD)去除率可达到60%,且处理费用低。然而,气化炉渣在废水处理领域内应用研究甚少,主要应用于铺路、制备免烧砖、生产混凝土和矿渣硅酸盐水泥等建筑行业上。

表1 气化炉渣的化学成分

Table 1 Chemical composition of gasification slag

%

炉渣种类	质量分数/%							
	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O
榆林气化炉渣	34.32	25.83	15.97	9.36	3.27	0.44	2.12	0.96
西班牙 IGCC	56.73	11.44	4.38	18.77	0.97	0.47	0.33	1.23
Texaco 炉渣	38.16	8.75	4.23	10.99	1.23	0.59	1.12	1.64
潞安气化渣	40.96	9.25	5.31	11.1	2.35	2.13	—	—
神木气化炉渣	42.18	9.67	4.68	12.15	1.07	0.65	1.24	1.81

4.1 铺路

利用煤间接液化工艺中的气化炉渣铺路是残渣利用的基本途径。

欧洲国家将气化炉渣应用到建筑和道路行业已经进入工业化阶段^[18-20]。美国和日本一些国家将气化炉渣通过筛分、磁选等技术,在一定粒级下与其他建筑骨料混合使用,作为石油沥青铺面材料^[21]。国内对气化炉渣在铺路上应用研究较晚,宋碧再^[22]通过室内研究并从反应机理上验证了气化炉渣作为路面稳定层材料的可行性,研究结果表明:水泥:炉渣:石子:水的配比为1:8.33:11.67:3.15时,气化炉渣制备的路面稳定层的7d无侧限抗压强度平均值达到3.7MPa,符合《公路路面基层施工技术规范》的相关要求,可作为路面基层材料。张互助等^[23]采用电测法研究了水泥复掺炉渣稳定煤矸石基层材料的温缩性能,研究结果表明:与水泥稳定碎石相比,水泥复掺炉渣稳定煤矸石基层材料具有较小的温缩系数,可用于寒冷地区道路的路面基层。

4.2 制备免烧砖

利用煤间接液化工艺中的气化炉渣制备免烧砖是残渣利用的重要途径。

章丽萍等^[24]采用气化炉渣(35.6%)、热动力炉渣(32.4%)、除尘灰(14%)、石灰(8%)、石膏(4%)、水泥(6%)为材料,通过预搅拌、陈化、二次搅拌、成型、蒸汽养护等工序,在100℃的蒸养条件下,制备了免烧砖,结果表明:砖的密度是1.76×

10³ kg/m³、吸水率14%、抗压强度达到了22.25MPa,均符合《非烧结砖垃圾尾矿砖》的相关标准。焦淑侠^[25]采用80%的炉渣、5%的磷石膏、15%的β-半水石膏为原料来制备空心砖,经过混合、定型、自然养护工艺,7d抗压强度11.08MPa,制备的空心砖的隔热保温性能较好。尹维新等^[26]利用低质粉煤灰和气化炉渣制备墙体砖,研究结果表明:低质粉煤灰和气化炉渣的掺入量达到30%、40%,并采用常压蒸汽养护,制成砖的等级可达到MU10。Giuseppe Cultrone等^[27]研究了气化炉渣的掺加量(1%、2%、5%、10%、15%)对砖性能的影响,研究表明:气化炉渣的掺加量低于10%时对砖的性能影响不大,且掺加气化炉渣制备的砖暴露于空气中受到的损伤比普通砖小。黄巍等^[28]利用煤间接液化气化炉渣、热动力炉渣、除尘灰,添加水泥、生石灰、石膏等制成了渗水砖以解决城市步行街、广场降水不能顺畅渗透到地底的问题。以煤间接液化工艺中气化炉渣为原料制备的免烧砖不仅为建材市场提供了广阔的前景,而且降低了气化炉渣所带来的环境危害。

4.3 生产混凝土

煤间接液化工艺中的气化炉渣可作为混凝土生产过程中的骨料和掺和料,是另一种有效利用间接液化残渣的途径。

1) 作为混凝土的骨料

煤间接液化过程中气化炉渣的颗粒大小不一,

具有一定级配。若用间接液化残渣代替石头或沙,作为混凝土中粗骨料和细骨料,是间接液化残渣利用的有效途径。

杨雷等^[29]利用5 mm以下炉渣的代替沙作为骨料生产喷射混凝土,试验结果表明:利用炉渣作为骨料制备的喷射混凝土可以降低混凝土的自重、减少混凝土的回弹,并且有利于提高混凝土后期的强度和抗渗性。ISa Yuksel等^[30]利用粒化高炉炉渣替代3~7 mm砂制备混凝土,替代比例为10%~50%,试验结果表明:粒化高炉炉渣对混凝土的耐久性有益。其中,当炉渣掺量为20%时混凝土的抗冻性等耐久性能最好。Seung等^[31]利用炉渣替代粗骨料来制备发泡混凝土,研究表明:在一定替代量范围内,随着炉渣替代量的增加,对渗透系数的影响甚微。但是对于混凝土抗折强度和抗压强度影响较大,当炉渣替代量为40%时,混凝土抗折强度和抗压强度分别降低26.4%和11.7%。Watcharapong等^[32]采用20%气化炉渣+5%硅灰来取代水泥制备轻骨料混凝土,蒸压养护条件下养护6 h后抗压强度达到了18.8 MPa,与正常养护28 d后的强度相当,大大优于普通轻骨料混凝土。

2) 作为混凝土的掺和料

气化炉渣的化学成分与粉煤灰成分相似,作为混凝土的掺和料提供了可能性。

李燕^[33]研究了气化炉渣作为混凝土掺合料,当炉渣等量取代水泥时,炉渣掺量小于30%时,掺有炉渣的混凝土后期抗压强度甚至高于掺有粉煤灰的混凝土。因此可以利用炉渣制备高性能混凝土。周俊龙等^[34]研究了不同掺入量的炉渣对水泥混凝土性能的影响。试验数据表明:在炉渣掺入量为20%以内时,炉渣对混凝土的各项性能影响较少,但是由于炉渣的掺入,混凝土的抗渗性、抗侵蚀性等性能得到改善,当炉渣掺入量超过30%时,抗折强度和抗压强度均有明显下降,并通过试验论证了炉渣作为混凝土的掺合料的可行性。郭殿波等^[35]通过对气化炉渣的性质、矿物组成、活性及对水泥性能的影响研究,结果表明:适量的气化炉渣和矿渣或粉煤灰一样,可作为混凝土的混合材。潘攀^[36]研究利用煤气化炉渣制备高强混凝土,研究结果表明:随着煤渣掺量的增加,混凝土强度先增加后降低,在强度最大时,最佳掺量为20%。在此掺量条件下,28 d抗压强度达86.56 MPa,同时具备良好的抗氯离子渗透能力。

4.4 制备矿渣硅酸盐水泥

气化炉渣中存在大量的活性 SiO_2 、 Al_2O_3 ,与硅酸盐水泥主要化学成分(SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3)类似。因此,从化学成分上分析,可以用气化炉渣取代部分水泥来制备硅酸盐水泥。

闫秀清^[37]采用磨细的30%煤气化炉渣和5%的二水石膏替代黏土生产硅酸盐水泥,水泥的抗折强度、抗压强度分别达到了6.8、38.6 MPa,达到了《通用硅酸盐水泥》国家标准。王昊^[38]研究了利用炉渣制备少熟料复合水泥,试验结果表明:炉渣的掺量为30%时,胶砂的强度最大达到了30.7 MPa。在此掺量条件下,生产硅酸盐水泥净浆标准稠度用水量、初凝时间、终凝时间、安定性均符合规范要求。由分析可知,气化炉渣可作为水泥混合材料制备32.5级的少熟料复合水泥。Lin等^[39]通过高温急冷方法对气化炉渣进行改性,增加炉渣玻璃体含量、提高火山灰活性以制备矿渣硅酸盐水泥,研究结果表明:10%~20%气化炉渣取代水泥时,90 d的抗压强度可达到相关规范要求。景园等^[40]采用熟料、矿渣、炉渣、石膏质量比为69.5:21:6:3.5的配料比生产矿渣硅酸盐水泥,水泥的细度可达到2.0%、抗压强度达到38.5 MPa,均达到了《通用硅酸盐水泥》国家标准。Kula等^[41]采用比表面积为 $720 \text{ m}^2/\text{kg}$ 的气化炉渣来取代25%的水泥,28 d的平均抗压强度可达到45 MPa,远高于硅酸盐水泥的抗压强度,从而验证了气化炉渣可作为水泥掺料制备矿渣硅酸盐水泥。张超^[42]采用气化炉渣(掺量为22%)作为混合材配制复合硅酸盐水泥,结果表明:水泥的比表面积是 $350 \text{ m}^2/\text{kg}$ 、初凝时间和终凝时间分别是2.2和2.6 h;8 d抗压强度达到48.8 MPa,符合《通用硅酸盐水泥》国家标准。Radoslaw^[43]在水泥、气化炉渣、水质量比为0.5:3:1的条件下制备矿渣硅酸盐水泥,并进行长期的抗压强度试验。试验结果表明:养护后28、90 d的平均抗压强度分别42、50 MPa,平均抗弯强度分别是2、4 MPa,均达到了相关标准,从而证实了气化炉渣可以作为制备矿渣水泥的掺和料。

5 结 语

随着我国煤间接液化技术的不断推广,势必会产生更多的气化炉渣。目前针对煤间接液化工艺中气化炉渣的利用主要存在以下缺陷:① 气化炉渣的利用大多数局限于建材、混凝土等工程的应用;②

制备的渗水砖易开裂;③ 气化炉渣早期活性较低导致炉渣掺量较少;④ 将炉渣作为水泥混合材的相关研究较少且实际生产没有形成产业化。针对以上问题,应该加大对煤间接液化工艺中气化炉渣物理化学性质的研究力度以提高气化炉渣的价值利用率。特别是可以从扩大气化炉渣的比表面积、提升吸附容量等方面进行研究,将煤间接液化工艺中气化炉渣应用于生活污水处理中,为处理生活污水提出新思路。

参考文献:

- [1] 陈刚. 2007年中国原油进口走向[J]. 中国海关, 2007, 3(6): 66-67.
Chen Gang. 2007 Chinese crude oil imports[J]. Chinese Customs, 2007, 3(6): 66-67.
- [2] 张国宝. 中国能源发展报告[M]. 北京: 经济科学出版社, 2010: 134-136.
Zhang Guobao. China energy development report[M]. Beijing: Economic Science Press, 2010: 134-136.
- [3] 李贺. 中国煤间接液化技术及未来前景概述[J]. 内蒙古石油化工, 2014, 2(7): 97-98.
Li He. Overview of indirect coal liquefaction technology and future prospects in China[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2014, 2(7): 97-98.
- [4] Zhou W J, Zhu B, Chen D L, *et al.* Techno economic assessment of China's indirect coal liquefaction projects with different CO₂ Capture alternatives[J]. Energy, 2011, 36(11): 6559-6566.
- [5] Rong F, Victor D G. Coal liquefaction policy in China: explaining the policy reversal since 2006[J]. Energy Policy, 2011, 39(12): 8175-8184.
- [6] 郝学民, 张浩勤. 煤液化技术进展及展望[J]. 煤化工, 2008, 16(4): 28-32.
Hao Xuemin, Zhang Haoqin. Progress and prospect of coal liquefaction technology[J]. Coal Chemical Industry, 2008, 16(4): 28-32.
- [7] 李龙, 杨兴, 刘万州, 等. 节能减排在大型煤间接液化中的应用研究[J]. 硅谷, 2012(1): 20-25.
Li Long, Yang Xing, Liu Wanzhou, *et al.* Study on the application of energy saving and emission reduction in large coal indirect liquefaction[J]. The Silicon Valley, 2012(1): 20-25.
- [8] 孙启文, 吴建民, 张宗森, 等. 煤间接液化残渣技术及其研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(1): 1-10.
Sun Qiwen, Wu Jianmin, Zhang Zongsen, *et al.* Coal indirect liquefaction residue technology and its research progress[J]. Progress in Chemical Industry, 2013, 32(1): 1-10.
- [9] 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]. 化工学报, 2014, 34(5): 499-502.
He Xuwen, Cui Wei, Wang Chunrong, *et al.* Analysis on leaching characteristic and chemical speciation of heavy metals in gasification slag[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2014, 34(5): 499-502.
- [10] 高旭霞. 气流床煤气化渣的特性[J]. 华东理工大学学报, 2009, 35(5): 677-683.
Gao Xuxia. Characteristics of entrained flow gasification slag[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2009, 35(5): 677-683.
- [11] 尹洪峰, 汤云, 任耘, 等. Texaco 气化炉渣基本特性与应用研究[J]. 煤炭转化, 2009, 32(4): 30-35.
Yin Hongfeng, Tang Yun, Ren Yun, *et al.* Study on basic characteristics and application of slag in Texaco gasifier[J]. Coal Conversion, 2009, 32(4): 30-35.
- [12] 汤云. 利用气化炉渣和煤矸石制备 sialon 基复相陶瓷[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011: 25-27.
Tang Yun. Preparation of Sialon-based multiphase ceramics using gasification slag and coal gangue[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011: 25-27.
- [13] 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.
- [14] 杜晓光, 马筠, 吴莹庆, 等. 火电厂燃煤及固体产物中危害元素的测定方法、迁移规律及对环境的影响研究[J]. 热力发电, 2010, 39(11): 17-21.
Du Xiaoguang, Ma Jun, Wu Yingqing, *et al.* Study on determination method of hazardous elements in fuel coal and other solid by-products in thermal power plants, their migration rules during combustion and their influence upon environment[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(11): 17-21.
- [15] 宋远明, 钱觉时, 吴智. 燃煤灰渣火山灰反应活性[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(8): 963-967.
Song Yuanming, Qian Jueshi, Wu Zhi. Pozzolanic reactivity of coal ashes[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2006, 34(8): 963-967.
- [16] 林旭阳. 利用煤渣处理酸性废水及酸性重金属离子废水[J]. 材料保护, 1991, 24(9): 23-26.
Lin Xuyang. The use of coal processing acid wastewater and acidic heavy metal ions from wastewater[J]. Material Protection, 1991, 24(9): 23-26.
- [17] 卢润强. 煤渣填料生物接触氧化法处理我市生活污水技术探讨[J]. 环境, 2008, 12(6): 40-41.
Lu Runqiang. Biological contact oxidation of coal in our city sewage treatment technology[J]. Environment, 2008, 12(6): 40-41.
- [18] Higman Ch, Van Der Burgt M. Gasification[J]. GPP Elsevier, 2008, 5(8): 136-138.
- [19] Pomykala R, Mazurkiewicz M. The coal gasification process in the light of properties of arising wastes[J]. Przegląd Gorniczy, 2011, 183(4): 7-8.
- [20] Aineto M, Acosta A, Rincon J M, *et al.* Production of lightweight aggregates from coal gasification fly ash and slag[J]. World of Coal Ash, 2005, 34(58): 179-182.
- [21] Alp L, Deveci H, Sungun H. Utilization of flotation wastes of copper slag as raw material in cement production[J]. Journal of Haz-

- ardous Materials 2008 ,159(2) :390-395.
- [22] 宋碧再. 利用水泥煤稳定碎石的技术研究[J]. 城市道桥与防洪 2007 3(9) :158-161.
Song Bizai. Research on the technology of using cement stabilized crushed stone[J]. Journal of City Bridge and Flood Control , 2007 3(9) :158-161.
- [23] 张互助 程培峰. 水泥煤渣稳定煤矸石基层材料温缩性能的试验研究[J]. 公路交通科技 2007 24(11) :29-32.
Zhang Huzhu , Cheng Peifeng. Test research on temperature shrinkage performance of cement and cinder stabilized coal gangue base course materials[J]. Journal of Highway and Transportation on Research and Development 2007 24(11) :29-32.
- [24] 章丽萍 温晓东 马圣存 等. 煤间接液化残渣制备免烧砖研究[J]. 煤炭工程 2014 46(4) :103-105.
Zhang Liping , Wen Xiaodong , Ma Shengcun *et al.* Study on Baking-free preparation with residue of indirect coal liquefaction [J]. Journal of Coal Engineering 2014 46(4) :103-105.
- [25] 焦淑侠. 利用石膏煤渣制备空心砖的试验研究[J]. 中国资源综合利用 2010 28(3) :35-36.
Jiao Shuxia. Study on preparation of hollow brick using cinder system [J]. Journal of Comprehensive Utilization of Resources in China 2010 28(3) :35-36.
- [26] 尹维新 孙 补. 利用低质粉煤灰和煤渣开发墙体砖[J]. 砖瓦世界 2005 12(10) :37-38.
Yin Weixin , Sun Bu. The use of low quality fly ash and cinder brick wall [J]. Journal of Tile World 2005 12(10) :37-38.
- [27] Giuseppe Cultrone , Eduardo Sebastian. Fly ash addition in clay material to improve the quality of solid bricks [J]. Construction and Building Material 2009 23(2) :1178-1184.
- [28] 黄 巍 茹晓云. 煤间接液化残渣渗水砖: 中国 , CN203222714U [P]. 2013-10-02.
Huang Wei , Ru Xiaoyun. Indirect coal liquefaction residue: China , CN203222714U [P]. 2013-10-02.
- [29] 杨 雷 罗树琼 管学茂 等. 粉煤灰对矿用炉渣喷射混凝土性能影响[J]. 混凝土 2010 4(3) :108-110.
Yang Lei , Luo Shuqiong , Guan Xuemao *et al.* Effect of fly ash on the performance of coal mine slag concrete [J]. Concrete 2010 4(3) :108-110.
- [30] Isa Yuksela , Turhan Bilirb , Omer Ozkan *et al.* Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate [J]. Building and Environment 2007 42(7) :2651-2659.
- [31] Seung Bum park , Young Jang Jun L *et al.* An experimental study on the hazard assessment and mechanical properties of porous concrete utilizing coal bottom ash coarse aggregate in Korea [J]. Journal of Hazardous Materials 2009 166(41) :348-355.
- [32] Watcharapong Wongke. Compressive strength , microstructure and thermal analysis of autoclaved and air cured structural lightweight concrete made with coal bottom A-S-H and silica fume [J]. Construction and Building Material 2010 24(16) :3676-3684.
- [33] 李 燕. 沸腾炉渣用作混凝土掺和料的试验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学 2008:10-13.
Li Yan. Research on ground bubbling fluidized bed combustion ash used for cement and concrete [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology 2008:10-13.
- [34] 周俊龙 杨德斌. 煤渣作混凝土掺和料的性能研究[J]. 粉煤灰综合利用 2003 13(1) :22-23.
Zhou Junlong , Yang Debin. Research on performance of concrete admixture for coal cinder [J]. Comprehensive Utilization of Fly Ash 2003 13(1) :22-23.
- [35] 郭殿波 张继涛 朱 献. 用电厂炉渣作水泥混合材的研究[J]. 水泥工程 2003 2(4) :60-61.
Guo Dianbo Zhang Jitao , Zhu Xian. Study on using furnace slag of electric plant as cement admixture [J]. Cement Engineering , 2002 2(4) :60-61.
- [36] 潘 攀. 煤渣及其作为混凝土掺和料的研究[D]. 广州: 暨南大学 2011:52-55.
Pan Pan. Research of coal cinder and using it as concrete admixture [D]. Guangzhou: Jinan University 2011:52-55.
- [37] 闫秀清. 煤渣烧制水泥熟料的试验研究[J]. 山西建筑 2009 , 35(15) :151-153.
Yan Xiuqing. Experimental study on cement clinker burning cinder [J]. Shanxi Architecture 2009 35(15) :151-153.
- [38] 王 昊. 炉渣作为水泥混合材的试验研究及机理分析[D]. 厦门: 厦门大学 2014:39-46.
Wang Hao. The experimental study and mechanism analytics of coal cinder used as cement admixture [D]. Xiamen: Xiamen University 2014:39-46.
- [39] Lin K L , Chang W C , Lin D F *et al.* Pozzolanic characteristics of pulverized incinerator incinerator bottom A-S-H slag [J]. Construction and Building Material 2008 22(3) :324-329.
- [40] 景 园 史普天. 利用固体废渣生产矿渣硅酸盐水泥的试验研究[J]. 水泥工程 2005 6(3) :83-85.
Jing Yuan , Shi Putian. Experimental study on the production of slag Portland cement with solid waste slag [J]. Cement Engineering 2005 6(3) :83-85.
- [41] Kula I , Olgun A. Effects of colemanite waste , coal bottom A-S-H and fly A-S-H on the properties of cement [J]. Cement and Concrete Research 2001 31(3) :491-494.
- [42] 张 超. 粉煤灰和炉渣作为水泥混合材及粉煤灰掺量对不同水胶比混凝土的强度影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学 2012:21-24.
Zhang Chao. Study on fly ash and cinder used as cement admixture and the influence of fly ash dosage on the strength of the concrete [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology 2012:21-24.
- [43] Radoslaw Pomykala. The mechanical properties of coal gasification slag as a component of concrete and binding mixtures [J]. Environment 2014 23(4) :1404-1406.