

我国煤气化技术发展及展望

王 利 峰

(中国煤炭科工集团 安标国家矿用产品安全标志中心有限公司,北京 100013)

摘 要:煤气化技术作为煤炭资源清洁高效利用的关键技术,近年来发展迅速。概述了煤气化技术在我国能源利用和发展中的重要作用,介绍了当前我国煤气化技术应用的发展脉络,对比了常见的固定床气化技术、流化床气化技术和气流床气化技术在我国的应用情况,总结了各种气化技术的特点和应用情况,指出我国应用煤气化技术的经验和教训,并对新生的气化技术及常见的煤气化技术未来发展趋势进行了展望。我国煤气化技术已逐步从早期“外延粗放式”进入到了“内涵集约式”的发展阶段,在“双碳”产业政策背景下,煤气化技术应进入精耕细作研究阶段以提质增效,提高气化炉的整体效率、拓宽煤种适应性、提高气化炉单炉生产能力、降低停车风险保障装置的可靠性、降低气化技术对环境的影响程度、强化煤气化与新型煤化工的技术集成是煤气化技术的发展方向。

关键词:煤化工;煤气化技术;双碳;提质增效

中图分类号:TD713 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2022)02-0115-07

Development and prospect of coal gasification technology in China

WANG Lifeng

(China Mining Products Safety Approval and Certification Center, China Coal Technology & Engineering Group, Beijing 100013, China)

Abstract: As a key technology for clean and efficient utilization of coal resources, coal gasification technology has developed rapidly in recent years. The important role of coal gasification technology in energy utilization and development in China was summarized, the current development context of coal gasification technology application in China was introduced, and the mainstream fixed bed gasification technology, fluidized bed gasification technology and entrained bed gasification technology were compared. The characteristics and applications of various gasification technologies were summarized, the experience and lessons of coal gasification technology application in China were pointed out, the future development trend of new gasification technology and mainstream coal gasification technology was forecasted. It is proposed that China's coal gasification technology has gradually changed from extensive in the early stage to connotation intensive development stage. Under the background of "carbon peaking and carbon neutrality goals", the development direction of coal gasification technology mainly focus on improving the overall efficiency of the gasifier, broadening the adaptability of coal types, improving the production capacity of a single furnace of the gasifier, reducing the risk of shutdown, ensuring the reliability of the device, reducing the impact of gasification technology on the environment, and strengthening coal gasification technology integration with new coal chemical industry.

Key words: coal chemical industry; coal gasification technology; carbon peaking and carbon neutrality goals; improve quality and efficiency

0 引 言

煤气化是在高温条件下以空气或氧气为气化介质,通过化学反应将煤或煤焦转变为 CO、CH₄、H₂ 等可燃性混合气体的过程^[1-2]。我国现代煤化工经 20 多年的发展已形成较大的产业规模,截至 2020 年底,我国现代煤化工产能包括煤制油、烯烃、气、乙

二醇等四大类主要煤化工产品约 2 647 万 t,年转化煤炭约 9 380 万 t 标准煤^[3]。其中,煤炭气化是煤化工产业链的龙头,是煤化工发展的关键过程之一^[4]。截至 2020 年全年通过煤气化转化的原料煤近 3 亿 t,占我国煤炭消费总量的 6%左右^[5]。以煤气化技术为核心的现代煤化工技术是煤炭高效清洁利用的有效途径,是煤炭企业转型升级的现实路径,

收稿日期:2022-01-28;责任编辑:张 鑫 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.22012801

作者简介:王利峰(1974—),男,吉林德惠人,工程师。E-mail:wanglifeng@ccteg.cn

引用格式:王利峰.我国煤气化技术发展及展望[J].洁净煤技术,2022,28(2):115-121.

WANG Lifeng. Development and prospect of coal gasification technology in China [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28 (2): 115-121.



移动阅读

对增强我国能源战略保障能力发挥重要作用^[6-7]。

笔者介绍了不同煤气化技术的发展脉络、产业化应用和市场布局,并对主流煤气化技术未来发展趋势进行了展望,以期能为煤气化技术的发展应用提供借鉴。

1 煤气化技术开发及应用

煤气化工艺技术的发展持续了近140余年,煤气化技术开发涉及煤炭、化工、材料、控制等多学科多要素之间的协同,作为煤化工的龙头技术其先进性影响着煤化工整体技术的效率、成本和发展^[8-9]。自新中国建立到改革开放起始的30 a期间,西方发达国家对我国进行了学术和技术方面的封锁,我国工业界的煤气化装置几乎完全依赖常压固定床气化技术,装置规模普遍较小且原料适应性差,环境污染情况严重,经济效益有限^[10]。改革开放后,在面临与西方煤气化技术巨大差距的形势下,我国结合当时经济社会发展的情况开启了煤气化技术开发工作,相继在固定床、流化床和气流床方面进行了深入的技术开发工作,特别是在气流床气化技术方向开发了多喷嘴对置式水煤浆/粉煤气化、航天炉粉煤加压气化技术、SE粉煤加压气化等先进煤气化技术,打破了跨国公司的技术垄断,有力支持了我国现代煤化工行业的快速发展^[11-12]。

随着1882年第1台固定床空气间歇式气化和连续式固定床加压气化技术的成功工业化到流化床煤气化的工业化应用,再到气流床气化技术的成功开发,煤气化技术在煤炭资源高效利用领域中承担了重要角色。我国煤气化技术发展历史较短,20世纪50—60年代以后我国煤气化技术开发工作取得实质性进展,我国煤气化技术开发与国外煤气化发展的路径一致,炉型开发从固定床、流化床再到气流床,入炉煤颗粒逐渐由厘米级到微米级,反应温度从中温到高温,气化煤种由焦炭、无烟煤到烟煤和褐煤,我国现代煤化工的整体技术水平已位居前列,相继实现了很多关键共性技术的突破,煤化工行业的科技创新取得了多项重大突破且多项技术已达到国际领先水平。笔者将3种主流气化技术的发展结合我国实际应用和开发的情况做简要回顾。

1.1 固定床气化技术

固定床气化是原料煤由上部加煤装置加入,与底部通入的气化剂接触并发生化学反应生产煤气的过程,产生的灰渣由气化炉底部排出。煤料下降速度相对于气化剂的上升速度非常慢,因此称为固定床气化炉或移动床气化炉。固定床气化技术最早由

德国研究开发并实现工业化,19世纪80年代第1台常压固定床间歇气化炉实现工业化,随后美国联合气体改进公司在此基础上进行优化,形成了UGI炉固定床间歇式气化技术^[13-14]。UGI炉的原料为无烟煤或焦炭,气化剂为空气中的氧气,可以采用连续或间歇式操作方式,产品为煤气或水煤气。UGI炉设备结构简单、投资低,在我国化肥生产史上做出了重要贡献,但由于其产能和热效率低,渣中含碳量高且生产过程中产物中有大量含氰废水,间歇的操作方式使得操作较为复杂,UGI炉各项指标不能满足当时工业发展需要。为了解决这些问题,鲁奇公司采用加压和连续进料的方式使气化炉单炉处理能力显著增加,加压固定床气化炉使煤气化技术取得了重大突破,满足了快速发展的化学工业对装置大型化的需求^[15]。为提高气化高硫、高挥发分、低活性煤种的气化效率,BGL气化炉在鲁奇炉固态排渣气化炉的基础上进行了改进,对气化炉底部进行重新设计以适应更高的气化温度,碳转化率达90%以上,大幅提高了气化效率和气化强度,同时采用熔融态排渣,单炉生产能力大大提升。相较于固态排渣的鲁奇炉,BGL气化炉对水蒸气分解率超过90%,使得气化耗水量大幅降低,进一步降低了气化炉的操作费用,降低了生产成本^[16]。BGL气化炉较高的气化温度加强了水蒸气分解和CO₂还原,使得煤气组成中CH₄和CO₂体积分数明显降低,CO和H₂体积分数提高,这些特点都使得BGL炉更适合生产合成原料气^[17-18]。

固定床气化技术从早期的常压间歇式气化方式发展到加压连续进料的固定床气化炉技术,由固态排渣到高温气化的熔融排渣方式,固定床气化技术不断发展改进,固定床气化炉的单炉处理能力逐步提升,气化强度和效率、煤种适应性逐步提高,污染物生成量逐步减少。尽管固定床气化技术发展最早,但凭借其特有的成本、投资优势及应用特点,目前在生产城市煤气和合成氨方面应用仍十分广泛。

1.2 流化床气化技术

流化状态是指当气体介质以一定的线速度通过颗粒床层,床层发生膨胀并使各颗粒物之间保持连续运动状态,流化床气化炉内固体颗粒在床层中混合程度高且均匀,因此具有较高的气-固传热和传质速率,气化过程易于控制,生产规模也便于扩大^[19]。由于存在气化炉操作温度偏低及细粉带出量多等问题,早期开发的常规流化床仅适用于活性高的褐煤、低阶烟煤以充分保障灰渣中含碳量处在较低水平。为充分解决灰渣碳含量过高的问题,近

几十年来国内外致力于新型流化床气化炉尤其是灰熔聚流化床气化炉的开发^[20]。

煤灰的熔聚是指煤粉在高温气化过程中黏聚成块的现象,当温度在煤灰的熔融温度附近时,流态化燃烧和气化过程中可熔聚成为球状或块状灰渣排出。灰熔聚流化床气化工艺技术的关键是严格控制气化炉的操作条件,使煤灰在软化而未熔融的状态下从床层中将含碳量较低的大粒黏聚物连续、有选择性地排出^[21]。灰熔聚气化法是煤气化排渣的重大技术发展,有效降低了气化排出煤灰中的碳损失,提高了过程的碳利用率(96%~98%)。

20世纪60年代美国巴特尔实验室开发了 Battelle-Union Carbide 黏聚灰法,由2个流化床分别进行原料煤颗粒的燃烧和蒸气气化,灰黏聚发生在稍低于煤灰熔融温度的条件下,煤燃烧产生的黏聚灰循环至蒸气段提供气化所需热量。该法可选择性地脱除较大的灰块降低灰的碳含量,解决了通常流化床中碳转化率低这个共性问题,1976年初在西杰弗逊市建成采用25 t/d煤生产合成气的中试装置。

U-Gas 气化法的气化炉是一种原理较简单的灰熔聚流化床气化炉,该技术在气化炉底部通过将含有煤焦的灰从气炉底部分离以较大幅度提高气化炉的碳转化率。上海焦化厂在20世纪90年代初曾引进U-Gas 气化技术,建立了由8台U-Gas 气化炉组成的大型生产装置,但1995年建成后未正常运行。U-Gas 技术经过多次技术变更,以SES 气化技术进入我国,目前我国运行的U-Gas (SES) 气化炉共10台。

1.3 气流床气化技术

气流床气化是采用粉状煤炭作为原料与气化剂共同送入气化炉内充分混合并发生气化反应以生产合成气原料的一种气化工艺过程^[22]。气流床技术工业化起步虽晚,但在近40 a得到了快速发展,是当前煤炭气化的重要工艺过程。气流床技术易实现高压连续进料,使单炉处理能力有较大幅度提高。同时该类技术的气化反应温度高,采用纯氧化且煤种适应性广等特点契合现代煤化工发展对煤气化技术单系列、大型化等方面的需求。该技术种类丰富,按照进料方式不同分为煤粉和水煤浆进料,国内外先进的气流床煤气化技术主要有:以德士古气化技术、E-Gas 气化技术、单喷嘴和多喷嘴对置式水煤浆气化为代表的水煤浆气化技术;以壳牌气化技术、GSP 气化技术、科林气化技术、多喷嘴对置式气化技术、航天炉粉煤加压气化技术、SE 粉煤加压气化为代表的水煤浆气化技术^[23-24]。

原料煤以粉状或水煤浆状喷入炉内,煤粉微粒在高温下(1 300~1 500 ℃)与气化炉内的气化气流接触,经历热解、气化及形成熔渣的过程,由于煤粉微粒之间几乎无相互作用,微粒在膨胀软化时发生相互黏结的概率大大降低,使得气流床气化受煤黏结性的影响较低,操作更为稳定可靠。同时,气流床气化工艺灵活,气化压力高使得生产能力提高,反应物在炉内停留时间短,碳的转化率可达95%~99%,合成气不含焦油、酚类等杂质,适用于化工合成、制氢和煤气化联合循环发电等。但同时需要指出,气流床气化技术要求所选用原料煤的灰熔融温度和灰含量处在较低范围(灰熔融温度不应高于1 500 ℃且灰质量分数低于20%)以使灰渣顺畅地在气化炉底部排出,如果灰熔融温度较高则需要加入CaO或Fe₂O₃等助熔剂来调整煤灰熔融温度,将会增加气化炉的运行成本。我国煤种的灰熔融温度普遍偏高使得该技术在我国应用的成本增加,高温运行环境下对耐火材料和喷嘴的要求较为苛刻,导致气流床气化炉的投资普遍较高,另外运行过程中比氧耗高也提高了煤气生产的成本^[25]。

我国在引进国外气流床气化技术时遇到了大量的技术问题,如在初期应用德士古水煤浆气化技术时存在烧嘴和气化炉耐火材料寿命偏短、激冷环和下降管烧蚀严重、合成气出激冷室带水带灰导致洗涤系统积灰堵塞,且在变换工段中合成气细灰含量超标等问题,严重制约了气化炉的长周期安全稳定运行。E-gas 技术也出现了二段炉出口及后系统的焦油热解器堵塞问题,这是由于在该技术的两段式气化炉结构中第2段气化室经热解反应产生的半焦在与水蒸气和CO₂反应时出口焦油含量过高导致,在配套气化制氢方案时需额外配置甲烷转化或焦油分离装置来保障气化装置的长周期稳定运行,这增加了整体气化系统的投资和运行成本,制约了气化装置的长周期运行^[26]。Shell 粉煤气化技术早期在运行调试上缺乏经验,出现了气化炉堵渣、烧嘴隔焰罩烧蚀、锅炉积灰、细灰过滤器陶瓷管断裂等影响装置长周期稳定运行的问题。GSP 粉煤气化技术也在宁夏煤业投产初期出现了煤粉输送不稳定、烧嘴烧蚀、碳转化率低、后系统积灰堵塞严重等问题^[27]。

针对以上国外气流床气化技术在国内应用存在的大量工程问题,近30 a,针对煤种特点和技术要求,我国先后开发了多喷嘴对置式水煤浆/粉煤气化技术、航天炉粉煤气化技术、SE 水煤浆/粉煤气化技术、晋华炉单喷嘴水煤浆等气化技术。一批国产大型化气流床气化技术的成功开发及在国内企业成规

模的应用标志着我国拥有了完全自主知识产权的气流床煤气化技术,打破了跨国公司的技术垄断,有力支持了我国现代煤化工行业的快速发展。

1.4 其他气化技术

近40 a,我国煤化工行业研究的重点主要集中在气流床等研发设计领域,同时在等离子体气化、催化气化等方面的探索研究也更丰富、更常态化^[28-29]。20世纪80年代后,中国矿业大学(北京)等有关单位进行了一些试验设计,为我国煤炭地下气化技术的高质量发展提供了关键数据支撑和决策参考^[30]。2005年以来,新奥集团股份有限公司建立了超临界水气化、加氢气化和催化气化的中试装置,在加氢气化和催化气化工业示范装置的运行和建设方面进行了大量开创性工作^[31]。谢克昌院士团队是我国在该领域进行深入探索的首个团队,在精准研究和深度探索的基础上形成了一些具有代表性的成果。后期大连理工大学以及新疆天业(集团)有限公司等单位开始对5 MW煤等离子体裂解制乙炔中试装置进行了深入的探索和研究,并取得了显著成绩^[32-33]。

2 煤气化应用现状

我国煤化工产品种类繁多,煤化工工艺过程结合各地资源禀赋特点各不相同,应根据所用煤的性质和原料气要求对气化条件以及气化反应器的结构进行调整,这必然要求煤气化技术多元化发展以适应不同煤质和煤化工产品路线的要求^[34]。

在我国实现工业化应用的煤气化技术约有30多种,仅占全球煤气化技术的1/3左右,已投产和正在建设的气化炉达700余台,且60%以上的气化炉已投产运行。其中应用较多的主流炉型中,固定床技术有鲁奇碎煤加压气化炉、赛鼎碎煤加压气化炉、BGL熔渣气化炉。目前国内在建或运行的鲁奇炉固定床碎煤加压气化炉共146台,其中18台用于城市煤气生产,24台用于合成氨生产,其余用于煤制天然气生产^[35]。但固定床气化工艺的普遍问题是会排出大量含焦油、氨、酚等污染物的废水,目前通用的处理方式是采用水气分离的方式将酚、氨回收处理,处理难度大,难以做到达标排放,导致废水处理投资和成本提高,一定程度上影响了固定床气化技术的投资回报率^[36]。

流化床气化炉结构简单、操作方便,对煤炭生产的部分碎煤可直接利用,因单炉处理能力高且产品中焦油等杂质含量较低,得以广泛推广^[37]。流化床技术主要包括中科院山西焦化所开发的灰融聚煤

气化技术、中科院工程热物理研究所的循环流化床煤气化技术、美国综合能源系统公司的SES(原U-Gas)煤气化技术。流化床气化在我国属于新型气化工工艺技术,处在起步阶段,由于该技术的气化强度不够高,与固定床和气流床气化炉相比碳转化率略低,应用竞争力有待验证^[38]。

气流床气化技术具有较好的原料适应性且资源利用效率高,单炉处理能力高,符合煤化工大型化的发展要求^[39]。目前我国在气流床煤气化技术的研究上已处于国际领先地位,具有自主知识产权的多喷嘴对置式气化技术和航天粉煤气化技术已在国内大规模成功应用并走向世界。多喷嘴对置式气化技术已大规模应用于国内外61家企业,在建和运行的气化炉182台,气化装置煤处理能力位列世界第1;航天炉粉煤气化技术截至2020年底已应用于国内51家企业,在建和运行的气化炉共117台^[40-41]。

3 未来发展方向

随着煤气化技术“大型化、高压化”主流技术的不断发展,在“双碳”“双控”产业政策背景下,提高气化炉的整体效率、拓宽煤种适应性、提高气化炉单炉生产能力、降低停车风险保障装置的可靠性、降低气化技术对环境的影响程度、强化煤气化与新型煤化工的技术集成^[42-43]是煤气化技术的发展方向。

1) 优化回收煤气化高温显热,提高热量的回收利用。结合厂区资源通过合理选择和优化激冷工艺、废热锅炉回收气化高温热量以实现节能降耗。

2) 大型煤化工企业采用“坑口就地转化”,在实现资源优化配置的同时可大幅降本增效,提高企业竞争力。同时根据煤质、产品情况选择合适的气化技术,通过采用合适的配煤技术和劣质煤预处理技术以拓宽气化炉对煤种的适应范围。

3) 在大型化发展方面,气流床气化技术是优选的技术方向,通过提高气化反应温度、气化压力和强化混合等方式提高单炉处理能力,有利于提高煤化工整体产业链的经济性。其次在气流床气化技术中,通过设置合理的喷嘴数量及位置强化混合过程,形成更合理的炉内流场结构,可进一步提高装置的处理能力,满足大型化需求。

4) 优化入炉煤的配煤标准保证灰熔融温度和黏温特性的稳定性,同时也要通过关键设备、材料以及关键部位防护技术的突破,实现气化装置的长周期安全可靠运行;结合全厂的能量供应和消耗,从上下游全面优化气化工工艺流程,精细化管理能量流和物料流,优化整个气化系统的效率。

5) 针对煤气化过程污染物开发绿色煤气化技术,如煤气化中的废水问题是气化技术发展的一大难题,开发有针对性的工艺对废水进行处理,根据技术成熟度稳妥推进新技术在解决煤气化污水处理的问题。通过工程示范推动相关基础研究成果落地,降低煤气化过程中污染物的排放;对于已有设备,采用新型废物治理和利用技术,如生物法处理废水、废渣资源化利用等新型技术,降低煤气化装置污染物排放,最后实现近零排放。

4 结 语

煤炭资源的高效清洁利用对我国实现碳达峰、碳中和的目标具有重要意义。在双碳目标实现过程中,煤气化技术是十分典型的技术类型,笔者分析了煤气化技术在我国能源利用和发展中的重要作用,介绍了固定床气化技术、流化床气化技术、气流床气化技术及其他气化技术的特点和应用现状,分析了当前我国煤气化技术应用的发展脉络并提出我国煤气化技术已逐步从早期“外延粗放式”进入到了“内涵集约式”的发展阶段,结合当下双碳目标在节能降耗、提升煤种适应性、煤气化装置的改进优化等方面进行技术提升。

参考文献 (References):

- [1] 王辅臣. 煤气化技术在中国:回顾与展望[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(1): 1-33.
WANG Fuchen. Coal gasification technologies in China: Review and prospect[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1): 1-33.
- [2] 汪寿建. 现代煤气化技术发展趋势及应用综述[J]. 化工进展, 2016, 35(3): 653-664.
WANG Shoujian. Development and application of modern coal gasification technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(3): 653-664.
- [3] 王辅臣, 于广锁, 龚欣, 等. 大型煤气化技术的研究与发展[J]. 化工进展, 2009, 28(2): 173-180.
WANG Fuchen, YU Guangsuo, GONG Xin, et al. Research and development of large-scale coal gasification technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, 28(2): 173-180.
- [4] 张锦光. 现代煤化工产业发展现状及对石油化工产业的影响[J]. 石化技术, 2016, 23(6): 266.
ZHANG Jinguang. Development status of modern coal chemical industry and its impact on petrochemical industry[J]. Petrochemical Industry Technology, 2016, 23(6): 266.
- [5] 梁官考, 李维. 内蒙古现代煤化工产业发展现状及趋势分析[J]. 中国煤炭, 2018, 44(7): 15-20.
LIANG Guankao, LI Wei, Analysis of development status and tendency of modern coal-chemical industry in Inner Mongolia [J]. China Coal, 2018, 44(7): 15-20.
- [6] 黄格省, 李振宇, 王建明. 我国现代煤化工产业发展现状及对

- 石油化工产业的影响[J]. 化工进展, 2015, 34(2): 295-302.
HUANG Gesheng, LI Zhenyu, WANG Jianming. Development status of coal chemical industry in China and its influence on petrochemical industry [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(2): 295-302.
- [7] 高恒, 刘宏建. 煤气化技术现状、发展及产业化应用[J]. 煤化工, 2009, 37(1): 37-39.
GAO Heng, LIU Hongjian. Status and development of coal gasification technology[J]. Coal Chemical Industry, 2009, 37(1): 37-39.
- [8] 孙凤伟. 煤气化技术研究与发展[J]. 辽宁化工, 2010, 39(5): 526-528, 557.
SUN Fengwei. Research progress of coal gasification technology[J]. Liaoning Chemical Industry, 2010, 39(5): 526-528, 557.
- [9] 蔡国峰, 刘勇, 安德成. 煤气化技术的研究现状与发展[J]. 广州化工, 2011, 39(23): 37-38.
CAI Guofeng, LIU Yong, AN Decheng. Research and development of coal gasification technology[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2011, 39(23): 37-38.
- [10] 朱明娟, 李学英. 煤气化技术的现状及发展趋势[J]. 化学工程师, 2017, 31(5): 54-56.
ZHU Mingjuan, LI Xueying. Present situation and development trend of coal gasification technology [J]. Chemical Engineer, 2017, 31(5): 54-56.
- [11] 王辅臣. 大规模高效气流床煤气化技术基础研究进展[J]. 中国基础科学, 2008, 10(3): 4-13.
WANG Fuchen. Basic research progress of large-scale high-efficiency entrained flow gasification technology [J]. China Basic Science, 2008, 10(3): 4-13.
- [12] 赵冉. 我国煤气化技术发展现状研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(21): 237-238.
ZHAO Ran. Study on the development status of coal gasification technology in China[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2019, 39(21): 237-238.
- [13] 曾杰, 张兴芳. BGL 固定床熔渣气化技术简介[J]. 云南化工, 2018, 45(9): 210-211.
ZENG Jie, ZHANG Xingfang. Brief introduction of fixed bed slag gasification technology [J]. Yunnan Chemical Technology, 2018, 45(9): 210-211.
- [14] 王庚寅, 郭靖. BGL 气化炉装置搅拌器长周期运行实践[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(S2): 246-248.
WANG Gengxiao, GUO Jing. Practice of long period operation of agitator of BGL gasification furnace [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(S2): 246-248.
- [15] 施峰. 影响 BGL 气化炉运行的设备问题分析与技改[J]. 煤化工, 2018, 46(S1): 32-34.
SHI Feng. Analysis and technical transformation of equipment problems affecting the operation of BGL gasifier [J]. Coal Chemical Industry, 2018, 46(S1): 32-34.
- [16] 郑万德, 王鹏娥. BGL 碎煤加压熔渣气化炉运行情况分. [J]. 煤炭加工与综合利用, 2014(4): 39-40.
ZHENG Wande, WANG Peng'e. Operation analysis of BGL pulverized coal pressurized slag gasifier[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2014(4): 39-40.

- [17] 王庚宵. 浅析鲁奇煤加压气化工工艺 BGL 炉装置搅拌器长周期运行的实践理论[J]. 中国化工贸易, 2018, 10(5): 106-107.
WANG Gengxiao. Practice and theory of long-term operation of agitator in BGL furnace of Lurgi coal pressurized gasification process[J]. China Chemical Trade, 2018, 10(5): 106-107.
- [18] 刘立强. 中煤图克项目 BGL 气化炉阶段性运行分析[J]. 煤化工, 2020, 48(6): 53-55.
LIU Liqiang. Phased operation analysis of BGL gasifier in China Coal Tuke project[J]. Coal Chemical Industry, 2020, 48(6): 53-55.
- [19] 彭万旺, 步学朋, 王乃继, 等. 加压粉煤流化床气化技术试验研究[J]. 煤炭转化, 1998(4): 69-76.
PENG Wanwang, BU Xuepeng, WANG Naiji, et al. Pilot test of pressurized fluidized bed gasification technology[J]. Coal Conversion, 1998(4): 69-76.
- [20] 曾上游. 浅谈我国自主研发的气流床煤气化技术现状与发展[J]. 广东化工, 2011, 38(5): 299-300.
ZENG Shangyou. The status and development of flow bed gasification technology with self-owned intellectual property in China[J]. Guangdong Chemical Industry, 2011, 38(5): 299-300.
- [21] 褚晓亮, 苗阳, 付玉玲, 等. 流化床气化技术在我国的应用现状及发展前景[J]. 化学工程师, 2014, 28(1): 50-52.
CHU Xiaoliang, MIAO Yang, FU Yuling, et al. Present situation and development of fluidized-bed gasification technology in China[J]. Chemical Engineer, 2014, 28(1): 50-52.
- [22] 蔡昂. 当前主要气流床煤气化工艺技术分析[J]. 化工管理, 2017(33): 95.
CAI Ang. Analysis of the current main entrained flow coal gasification technology[J]. Chemical Enterprise Management, 2017(33): 95.
- [23] 贺国章, 周敏, 雷佳莉, 等. 我国气流床气化技术发展现状及工艺选择原则[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(6): 110-114.
HE Guozhang, ZHOU Min, LEI Jiali, et al. Development status and technique selection principle of entrained flow bed coal gasification technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(6): 110-114.
- [24] 步学朋, 彭万旺. Shell 加压粉煤气流床气化技术的开发和应
用[J]. 洁净煤技术, 1997(1): 42-46.
BU Xuepeng, PENG Wanwang. The development and utilization of shell pressurized pulverized coal entrained bed gasification technology[J]. Clean Coal Technology, 1997(1): 42-46.
- [25] 徐振刚, 宫月华, 蒋晓林. GSP 加压气流床气化技术及其在中国的应用前景[J]. 洁净煤技术, 1998, 4(3): 9-11, 18.
XU Zhengang, GONG Yuehua, JIANG Xiaolin. GSP entrained flow gasification process and its application prospect in China[J]. Clean Coal Technology, 1998, 4(3): 9-11, 18.
- [26] 杨英, 魏璐, 罗春桃. GSP 气化技术工业化应用及发展方向[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(1): 72-74, 77.
YANG Ying, WEI Lu, LUO Chuntao. Industrial application and development direction of GSP gasification technology[J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(1): 72-74, 77.
- [27] 朱世明. 40 万 t/a 煤制乙二醇项目气流床气化技术比较研究[J]. 煤化工, 2021, 49(1): 50-55.
ZHU Shiming. Comparative study on entrained flow gasification technology of 40Wt/a coal to ethylene glycol project[J]. Petro-Chemical Industry Technology, 2021, 49(1): 50-55.
- [28] JUN Xie, LIN Xin, HU Xiangming, et al. Technical application of safety and cleaner production technology by underground coal gasification in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 250(20): 119487.
- [29] ZOU Caineng, CHEN Yanpeng, KONG Lingfeng, et al. Underground coal gasification and its strategic significance to the development of natural gas industry in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(2): 205-215.
- [30] 陈鲁园, 高艳艳, 郭旭, 等. 新形势下我国煤炭资源的高效清洁利用的途径分析[J]. 当代化工研究, 2019(7): 35-37.
CHEN Luyan, GAO Yunyan, GUO Xu, et al. Analysis on ways of efficient and clean utilization of coal resources in China under the new situation[J]. Modern Chemical Research, 2019(7): 35-37.
- [31] 庞先勇, 吕永康, 谢克昌. 煤气化等离子体反应器内的温度[J]. 煤炭转化, 2002(4): 23-26, 69.
PANG Xianyong, LYU Yongkang, XIE Kechang. Temperature in coal gasification plasma reactor[J]. Coal Conversion, 2002(4): 23-26, 69.
- [32] 王倩, 张小庆, 杨永忠, 等. 中国煤气化技术进展及应用概况[J]. 山东化工, 2019, 48(3): 58-61.
WANG Qian, ZHANG Xiaoqing, YANG Yongzhong, et al. Advances in research and application of the coal gasification technology in China[J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(3): 58-61.
- [33] 邱介山. 等离子体在煤化工中的应用[J]. 煤炭转化, 1995(2): 26-32.
QIU Jieshan. Application of plasma in coal chemical industry[J]. Coal Conversion, 1995(2): 26-32.
- [34] 孙坤, 聂松. 现代煤气化技术发展趋势及应用综述[J]. 化工管理, 2016(26): 201.
SUN Kun, NIE Song. Research and development of large-scale coal gasification technology[J]. Chemical Enterprise Management, 2016(26): 201.
- [35] 高明, 付伟贤. 煤气化技术的现状及发展趋势[J]. 化工管理, 2020(15): 113-114.
GAO Ming, FU Weixian. Present situation and development trend of coal gasification technology[J]. Chemical Enterprise Management, 2020(15): 113-114.
- [36] 高恒, 刘宏建. 煤气化技术现状、发展及产业化应用[J]. 煤化工, 2009, 37(1): 37-39.
GAO Heng, LIU Hongjian. Present situation, development and industrial application of coal gasification technology[J]. Coal Chemical Industry, 2009, 37(1): 37-39.
- [37] 张宏伟. 碎煤加压熔渣气化及航天炉粉煤气化组合工艺在煤制气中的应用[J]. 煤炭与化工, 2015, 38(11): 112-114.
ZHANG Hongwei. Application of crushed coal pressurized slag gasification and space furnace pulverized coal gasification integrated process in coal gasification[J]. Coal and Chemical Industry, 2015, 38(11): 112-114.
- [38] 吴枫, 闫承信. 循环流化床气化技术应用探讨[J]. 煤化工,

2002,30(3):76-79.

WU Feng, YAN Chengxin. Discussion on the application of circulating fluidized bed gasification technology [J]. Coal Chemical Industry, 2002, 30(3): 76-79.

- [39] 徐京磐, 鲍礼堂. 流化床和气流床气化技术综述(上) [J]. 小氮肥设计技术, 2002, 23(1): 11-22.

XU Jingpan, BAO Litang. Summary of fluidized bed and entrained flow gasification technology (Part I) [J]. Design Technology of Small Nitrogen Fertilizer, 2002, 23(1): 11-22.

- [40] 樊克莉. 国产煤气化技术达国际领先水平 [J]. 气体分离, 2013(6): 43.

FAN Keli. Domestic coal gasification technology has reached the international leading level [J]. Gas Separation, 2013(6): 43.

- [41] 徐振刚, 张飞. 煤炭深加工示范项目中的煤气化技术 [J]. 煤炭

加工与综合利用, 2014(2): 22-28.

XU Zhengang, ZHANG Fei. Coal gasification technology in coal deep processing demonstration project [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2014(2): 22-28.

- [42] 林汝谋, 金红光, 邓世敏, 等. 整体煤气化联合循环技术研究方向与进展 [J]. 燃气轮机技术, 2002(2): 15-22, 39.

LIN Rumou, JIN Hongguang, DENG Shimin, et al. Research direction and progress of integrated coal gasification combined cycle technology [J]. Gas Turbine Technology, 2002(2): 15-22, 39.

- [43] 亢万忠. 当前煤气化技术现状及发展趋势 [J]. 大氮肥, 2012, 35(1): 1-6.

KANG Wanzhong. Current situation and development trend of coal gasification technology [J]. Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry, 2012, 35(1): 1-6.