

文章编号: 1001-3571 (2023) 06-0040-08

我国煤炭洗选50年发展历程

陶能进, 郑继洪, 李智阳

(中煤科工集团北京华宇工程有限公司, 河南平顶山 467000)

摘要: 煤炭在我国能源结构中长期占据主导地位, 煤炭洗选加工是煤炭清洁高效利用的源头和基础。文章回顾了我国煤炭洗选50年发展历程, 对各时间段煤炭洗选技术、装备水平及选煤工艺特点进行了总结, 重点阐述了跳汰选煤、重介选煤、浮选、干法选煤等主要选煤装备及工艺组合的演变。首先, 介绍了选煤技术装备在不同时期的发展历程: 跳汰选煤装备经历了从鲍姆跳汰机、自主研发筛下空气室跳汰机、动筛跳汰机、空气脉动式跳汰机及井下跳汰机等不断发展, 近十年来又通过PIV测速系统对跳汰机结构进行试验, 向更加智能的方向发展; 重介选煤装备主要有斜轮重介质分选机、立轮重介质分选机、浅槽重介分选机以及重介质旋流器, $\phi 1.4\text{ m}$ 大型重介质旋流器的使用标志着我国重介质旋流器选煤的研究与应用已居世界前列; 浮选装备从开始仿造国外的浮选设备开始, 自主研发了机械搅拌式浮选机、喷射式浮选机、浮选柱一系列浮选设备, 近年来又利用计算流体力学技术, 通过数值模拟的方法研究浮选槽内流体运动状态; 干法选煤装备从风力选矸设备的逐渐淘汰, 到自主研发研制成功空气重介质流化床分选机、摩擦静电分选机, 结合无风干式摇床和风选机的优点后设计改良出一种复合式干法分选机, 近年来智能干选机由最初的块煤预先排矸逐步向块煤分选、井下排矸等方向转变。然后, 介绍了选煤工艺在不同时期的发展历程: 20世纪70年代之前, 大部分选煤厂以跳汰、浓缩浮选联合工艺为主; 70年代编制了年处理能力180万t的选煤厂通用设计, 大多数选煤厂原煤采用混合跳汰、煤泥采用不经浓缩的直接浮选工艺, 少数选煤厂采用重介工艺, 1970年建成的田庄选煤厂是我国自行设计的第一座机械、电气设备全部为国产的全重介选煤厂; 80年代选煤厂大量引进国外先进的技术装备, 采用可编程序控制器对全厂主要工艺流程设备进行顺序控制与监控, 使用了各种现代技术的仪表, 实现了全厂自动化, 最具典型的安太堡选煤厂是我国引进国外技术、装备和管理模式建成的唯一一座特大型现代化选煤厂; 90年代以生产高炉喷吹煤为主的选煤厂、动力煤选煤厂和特大型选煤厂的选煤工艺开始向全重介方向发展, 工艺流程也表现出简单化、模块化的特点, 模块式选煤厂在我国开始出现; 进入21世纪, 在2000—2015年, 重介选煤代替跳汰选煤成为主流选煤工艺, 安家岭选煤厂成为我国自行设计、自行建设、自行管理的第一座特大型现代化选煤厂, 树立了我国特大型现代化选煤厂设计的新的里程碑; 2015年以后, 我国选煤工艺逐渐达到了国际先进水平, 主要以改扩建, 自动化、智能化升级改造及设备更新换代为主, 催生了智能干选机排矸+超级重介质旋流器分选+浮选精煤新型穿流式压滤机+浮选尾矿超高压压滤机脱水回收的新型工艺设备组合。最后, 对国内煤炭洗选技术进行了展望: 选煤方法仍以重介选和浮选为主, 且大型复合干法和块煤干法分选技术、井下选煤排矸技术和新一代空气重介质干法选煤技术将得到合理应用; 煤泥减量入选、中煤解离再选、煤泥深度浮选以及无泥化将是选煤厂工艺改进的主要方向; 应继续完善我国的洗选装备体系, 大力推进选煤装备国产化。通过创新选煤方法与工艺, 研发推广先进的洗选设备, 有利于实现选煤厂的自动化、信息化和智能化。

关键词: 煤炭洗选; 选煤方法; 选煤装备; 选煤工艺; 特大型现代化选煤厂; 装备国产化; 选煤厂智能化

中图分类号: TD94

文献标志码: A

收稿日期: 2023-10-20 责任编辑: 李梅 DOI: 10.16447/j.cnki.cpt.2023.06.005

作者简介: 陶能进(1966—), 男, 安徽枞阳人, 教授级高级工程师, 煤炭行业勘察设计大师, 从事选煤设计咨询工作。E-mail: 13837581918@163.com, Tel: 13837581918。

引用格式: 陶能进, 郑继洪, 李智阳. 我国煤炭洗选50年发展历程[J]. 选煤技术, 2023, 51(6): 40-47.

TAO Nengjin, ZHENG Jihong, LI Zhiyang. A General review of the course of development of China's coal preparation technologies over the past five decades[J]. Coal Preparation Technology, 2023, 51(6): 40-47.

A General review of the course of development of China's coal preparation technologies over the past five decades

TAO Nengjin , ZHENG Jihong , LI Zhiyang

(CCTEG Beijing Huayu Engineering Co. Ltd., Pingdingshan 467000, China)

Abstract: Coal will occupy a dominant position in the primary energy structure over a long period of time. Coal preparation constitutes the source and basis for clean and high-efficiency utilization coal. The paper looks back to the course of development of the coal preparation technologies over the past 50-odd years, and presents a summary of the coal cleaning technologies, technological level of process equipment and characteristics of coal cleaning processes in different periods of time, with the focus on the evolution of the equipment applied for major coal washing processes involving, for instance, heavy medium separator, jigging machine, flotation cell and dry separator, as well as the combined coal washing processes. What is introduced first is the course of development of process equipment in different time periods: the jigging machine has made continued development evolving from the Bam jig to the independently developed Batac jig, movable-bed jig, air pulsating jig and the jig for use underground; over the past ten years, the optimum jig structure has been defined through testing with PIV velocity measuring system, and the jig has become more intelligent; the use of the heavy medium separators, such as the inclined lifting wheel and vertical lifting wheel versions, heavy medium vessel and heavy medium cyclone, especially the use of the $\phi 1.4$ m large-sized H.M. cyclone, signified that the research work on and application of the H.M. cyclone for coal washing stood at the forefront worldwide; the development of flotation machine started from imitation of overseas equipment to manufacture of a series of independently developed versions such as the subaeration-type, jet-type cells and flotation column; in recent years, study has been made on motion pattern of fluid in the cell using computational hydrodynamic technology and numerical simulation method; as for the coal cleaning equipment, following the gradual phasing out of the pneumatic destoning equipment, the self-developed air-medium fluidized-bed separator, triboelectrical separator, and the compound dry separator developed through incorporating the special features of the airless dry cleaning table and air separator made their debut in succession; in recent years, the intelligent dry separator has been gradually shifting its use early for preremoval of gangue to the use for coarse coal separation and underground destoning. Following that, the paper goes to introduce the course of development of coal preparation processes during different periods. Before the 70s of the 20th century, most of the coal preparation plants operated with the jigging and thickened slime flotation combined process; in the 70s, the document for the general design of the 1.8 Mt/a-capacity coal preparation plant was compiled; most of the plants started to use jigging and direct flotation processes to wash mixed raw coal and unthickened slime, respectively, with only a few plants operating with heavy medium separation process; in 1970 the Tianzhuang Plant went into operation. It was an independently designed all heavy medium separation plant operating exclusively with home-made mechanical and electrical equipment, making it the first of its kind in China; in the 80s, advanced overseas equipment were extensively introduced in plants, and some plants become fully automated plants where the main process equipment could be brought under sequential control and monitoring with programmable controller and various up-to-date sensing, measuring and dispatching devices. Among these plants, Antaibao Plant was a most typical one. It was then the only superlarge modern plant in the country operating with the technologies, process equipment and manage mode all introduced from abroad; in the 90s the plants engaging mainly in producing coal for injection in blast furnace, the power coal plants and extralarge plants started to shift to the use of heavy medium separation process, and their washing processes offered the features of being more simplified and modularized. Not long afterward, the first modular plant emerged in China; in 2000—2015 of the 21th century, heavy medium separation process took the place of jigging process become the mainstream washing process. Anjialing Plant, a superlarge modern plant op-

eration with all heavy medium separation system, was independently designed, constructed and managed. Its successful operation marked a new milestone of the country's ability to design superlarge modern plants; from 2015 onward, the coal washing processes applied in China was approaching the advanced international level, during this period, most of the plants plunged into technical remoulding, capacity expansion, upgrading and regeneration of process equipment, with an aim to turn the plants into automated and intelligent ones. This led to the development of a combined washing process featuring the use of intelligent dry separator for removal of gangue, the superlarge H.M. cyclone, the novel cross-flow filter press for dewatering of flotation concentrate, and ultrahigh-pressure filter press for dewatering of flotation tailing. Lastly, the paper presents the future outlook: the heavy medium separation and flotation will remain the predominant washing processes; the large compound dry separator, coarse coal dry separator, the dry separator for separation and destoning of coal underground, and the new-generation air-heavy medium dry separator will be applied in a more rational manner; for improvement of washing processes, the main efforts should be made directed toward the following aspects — washing feed coal with reduced amount of fine slime or producing no fine slime, rewashing of middling after liberation of intergrown constituents through crushing, and in-depth flotation of slime; the washing equipment should be continuously improved and upgraded, and vigorous endeavors should be made to promote the domestication of process equipment; and research and development and popularization of advanced process equipment through innovation of washing process and methods can help coal preparation plant to become automated, intelligent and informationized.

Keywords: coal preparation; coal preparation method; process equipment; washing process; ultralarge modern plant; domestication of process equipment; intelligent plant

煤炭是我国主要的一次能源消耗品，在我国能源结构中占有重要地位。根据工程院预测，到2050年，煤炭在我国一次能源消费中的比例仍将保持在50%左右，在很长一段时间内，煤炭在我国能源中的优势地位不会改变。

煤炭洗选加工目的是为了实现在煤炭清洁利用，对保护生态环境、充分利用煤炭资源、提高经济效益等具有重要意义。改革开放以来，伴随着我国经济的快速发展，化工、钢铁等行业对煤炭的需求日益增大，煤炭洗选技术也迎来了快速发展。到目前为止，我国已经形成了多种不同的选煤技术，如重介选、跳汰选、浮选及干选等；随着这些选煤技术的应用和不断提升，使得选煤效率不断提高，大大提高了我国原煤入选率。

1 选煤技术装备发展历程

传统的选煤方法主要包括跳汰选煤、重介选煤、浮选及干法选煤等，在不同时期先后出现，并得到应用和推广；经过近50年的不断发展和创新，其技术装备水平不断提高，分选精度、处理能力、自动化程度、智能化水平都得到了极大地提升。

1.1 跳汰选煤装备

新中国建立初期，除个别处理易选煤的选煤

厂采用槽选法之外，大多数选煤厂都以跳汰选煤为主，使用的是鲍姆跳汰机。用跳汰法处理的原煤，最高时占全部入选原煤的75%以上。早期建立的一大批选煤厂，如辽宁的采屯、三宝、黑龙江鹤岗的南山等选煤厂均采用跳汰选煤工艺。20世纪50年代末，国内开始了煤用筛侧空气室跳汰机的研制工作。选煤设计院设计的LTW-12.5型侧鼓式跳汰机借鉴了前苏联、波兰等国家的跳汰设备研制而成，是国内较早的选煤设备。60年代中期开始研制筛下空气室跳汰机，唐山研究院通过改进日本的高桑跳汰机，开发了“东风型筛下空气室跳汰机”，这种设备适用于原煤不分级入选，很快在抚顺龙凤、西露天等选煤厂推广应用，开启了国内跳汰不分级入选的先河。

80年代，邓小平提出了提高原煤入选比例的要求，国内选煤厂技术发展也进入了新阶段。随着一大批新型选煤厂的建立，跳汰选煤技术也迎来了长足发展，结合当时的实际情况和国内外的研发经验，我国自主研发了LTG型筛侧空气跳汰机，X系列、SKT系列筛下空气室跳汰机^[1]，是当时国内较为先进的跳汰选煤设备。1989年唐山研究院完成了“块末煤分级联选跳汰机”的研制，研制出世界上第一台块末煤分级联选跳汰机，应用于北票东

升矿选煤厂,比传统不分级跳汰机分选效率提高 2 个百分点以上,处理能力提高 20% 以上。

进入 21 世纪,动筛跳汰机和空气脉动式跳汰机逐渐成为主流,2012 年唐山研究院研发了井下跳汰机,并成功应用于冀中能源邢东煤矿。目前,我国已具备了各种自主知识产权的系列化大型高效跳汰机及其配套设施。最近十年来,高新技术与选煤的结合使得跳汰分选的研究不断朝着更加智能的方向发展^[2]。通过 PIV 测速系统对不同结构进行试验研究,从理论上论证了不同结构参数对流场的影响,设计出了更加合理的气室结构,同时也为后续的研究提供了新的思路^[3]。总的来看,跳汰选煤技术在很长一段时间内依旧具有很强的生命力,依旧是我国选煤行业的一个重要的洗选设备。

1.2 重介选煤装备

我国的重介选煤技术研究开始于 1956 年,重介选煤设备主要有斜轮重介质分选机、立轮重介质分选机、浅槽重介分选机以及重介质旋流器。其中,斜轮重介质分选机和立轮重介质分选机主要用于块煤分选,应用较少,且设备主要依靠进口;随着 20 世纪 80 年代末浅槽重介分选机的引入,斜轮重介质分选机和立轮重介质分选机逐渐被淘汰。我国对浅槽重介分选机的研究始于 20 世纪 50 年代,但进展一直比较缓慢,21 世纪以后才逐渐形成国产系列化的浅槽重介分选机。

1966 年,彩屯选煤厂首次采用了重介质旋流器分选系统,此后重介质选煤的理论研究、设备开发、设计和生产在国内逐步发展起来。70 年代,选煤设计院先后在国内设计建设了一批重介选煤厂,如平顶山田庄选煤厂,阳泉一矿、阳泉二矿选煤厂、晋城凤凰山选煤厂等。截至 1983 年,国内先后建立了 28 座重介选煤厂(车间),其中包括 4 座采用国外引进设备并主要由国外设计的大型选煤厂,即:吕家坨选煤厂(240 万 t/a)、大武口选煤厂(300 万 t/a)、范各庄选煤厂(400 万 t/a)和兴隆庄选煤厂(300 万 t/a)。

到 80 年代末,我国重介质选煤占各种选煤方法的比例已达到 23% 左右;重介选煤技术迎来了快速发展期,其中研究较多、使用较成熟的是旋流器技术。1989 年山西晋阳选煤厂引进前苏联的圆筒-圆锥式有压给料三产品重介质旋流器,在生产中展现出了它提高分选质量和简化工艺流程的优越性。同年,唐山研究院开始了无压给料三产品重介质旋流器的研究,并在 1992 年与黑龙江鸡西滴道矿选煤厂合作试验成功我国第一台无压给料三产品

重介质旋流器。此后,大量研究人员开始对无压给料方式进行深入研究。1999 年作为“九五”国家科技重点攻关项目,由唐山研究院和贵州盘江老屋基选煤厂合作试验成功了我国第一台大型无压给料三产品重介质旋流器(3NWX1200/850A 型)。在国内逐渐形成了各种规格的有压给料及无压给料三产品重介质旋流器的系列。

21 世纪以来,重介选煤设备主要向着大型化的方向发展。2004 年, $\phi 1.4$ m 的大型重介质旋流器开始投入使用,这标志着我国大型三产品重介质旋流器选煤技术已经全面走向成熟,大型三产品重介质旋流器成为许多选煤厂的首选。

目前,我国重介质旋流器选煤的研究与利用已居世界前列,其工艺在提高入料上限和降低分选下限两个方向有了新的进展,另外,煤泥重介质旋流器配合大直径重介质旋流器分选煤泥的工艺已经在许多地方使用。

1.3 浮选装备

浮选是国内较早使用的处理煤泥的方法。我国关于浮选的研究起步较晚,20 世纪 50 年代以后才开始仿造国外的浮选设备进行研究。80 年代以前,国内主要的浮选设备为机械搅拌式浮选机,占比达到 90%。80 年代以后,浮选柱作为一种新型浮选设备在国内迎来了较快发展。

为适应厂型及单机大型化需要,1966 年我国开始自行研制新型浮选机的工作。1966—1974 年,研制成功 XJM-4 型浮选机。该浮选机是我国早期自主研发的技术比较先进的浮选机,在平顶山田庄选煤厂投入使用后,其在生产使用过程中表现良好^[4]。1975 年,喷射式浮选机通过了技术鉴定,生产实践表明该类型浮选机的生产效果符合实际生产的需要^[5]。1989 年,唐山研究院研制的浮选柱在庞庄选煤厂投入使用,这是国内首台应用于工业生产的浮选柱。随着上述设备的投入使用,大量研究人员开始对其结构参数进行更深入的研究,研发出一系列新型浮选设备^[6]。

近年来,新技术的发展使得研究人员可以采用新的方法对设备进行分析和改进^[7]。利用计算流体力学技术,通过数值模拟的方法研究浮选槽内流体运动状态已经成为目前较为常用的研究方法^[8-9]。然而,目前的研究仍然集中在颗粒流或低流速矿浆中,关于流场复杂的浮选三相体系的研究相对较少,仍然需要研究人员的努力^[10-11]。

1.4 干法选煤装备

20世纪60年代风力选煤引入我国,1967年选煤设计院首先研制了风力选矸设备,先后在阳泉三矿、田师付矿、苏邦矿进行了工业性试验,后来因系统不够完善等原因逐渐被淘汰。80年代以后,由于我国西北、东北等一些干旱地区用水不方便,国内一些研究人员开始了干法选煤技术的研究和开发工作^[12]。

我国从80年代开始研究空气重介质流化床干法选煤工艺。1984年,中国矿业大学自主研发研制成功空气重介质流化床分选机、摩擦静电分选机。1994年,七台河市投入使用一座50 t/h空气重介质流化床干法选煤示范厂,可以用来处理难选或极难选煤。该示范厂为干法选煤提供了新的思路。特别值得一提的是,我国吸收了无风干式摇床和风选机的优点后,设计改良出一种复合式干法分选机,目前该系列产品已成为我国干法选煤中的重要设备。1993年,唐山研究院研发的复合式干选机在辽宁边杖子矿完成工业性试验,标志着这种技术的成熟。随着技术的不断推广,复合式干法分选机在我国东北、西北等严寒和干旱地区的一些选煤厂中得到较多应用。干法选煤避免了煤与水介质的接触,特别适用于寒冷、水资源短缺地区的煤炭分选以及易泥化煤种的分选,对于分选西北干旱地区的低变质程度煤种具有实际应用意义^[13]。

为了解决传统干选技术的缺陷,研究人员不断对干选技术进行改进,近年来国内的智能干选技术取得了长足发展,涌现了如天津美腾科技的TDS智能干选机、奥地利宾德科MINEXX矿物分选系统、波兰COMEX的KRS智能干选分选系统等利用X射线基于朗伯比尔定律研发的分选设备^[14]。自2015年以来,智能干选机先后在赵庄选煤厂、枣矿三河口选煤厂、干河煤矿、准能哈尔乌素选煤厂等许多地方投入应用^[15-16]。目前智能干选机由最初的单纯代替人工手选、动筛跳汰机、浅槽重介分选机实现块煤预先排矸,逐步向块煤分选、井下排矸等方向转变。随着智能干选机在分选精度、处理能力和智能化水平方面的进一步提高,以及与传统选煤方法的深度融合,今后将具有更加广阔的应用前景^[17]。

2 选煤工艺发展历程

2.1 20世纪70年代之前

跳汰选是主要的重选方式,煤泥浓缩浮选是

主要的浮选方式。在这一时间建设的选煤厂大部分以跳汰+浮选联合工艺为主,少数选煤厂采用块煤重介+末煤跳汰+煤泥浮选联合工艺。

2.2 20世纪70年代

随着浮选设备的发展,国内的浮选工艺也在不断发展。早期选煤厂中多采用浓缩浮选,研究人员发现,采用直接浮选的方式可以有效提高煤泥可浮性,同时解决细煤泥集聚和洗水恶化问题,这种洗选方式很快获得了大量推广^[18-19]。随着直接浮选技术的广泛应用,半直接浮选由于其工艺相对灵活也受到一些选煤厂的重视。1974年,夹河选煤厂进行了捞坑的部分溢流不经浓缩直接送入浮选机浮选的工业性试验。结果表明,这种方法可以有效提高入浮浓度,降低药耗^[20]。随着煤炭资源的进一步开采,部分煤炭洗选过程中产生的入料煤泥呈现出贫、杂、细的难浮特点,一次浮选之后的产品不能满足要求,因此产生了二次浮选^[21]、三次浮选等工艺。

在选煤厂设计中,当采用煤泥不经浓缩的直接浮选工艺,以及研制国产大型选煤设备的同时,开始引进西方选煤技术装备及工艺,选煤厂设计技术水平继续提高。选煤设计院结合芦岭、大屯、平八和东庞四座选煤厂的设计任务,编制了年处理能力180万t的选煤厂通用设计。该设计采用了原煤混合跳汰+煤泥直接浮选的联合工艺流程,煤泥水采用板框式压滤机处理,初步实现了洗水闭路循环,这代表了这一时期选煤厂设计的标准工艺流程,这一时期建成投产或改造升级的多数选煤厂如邢台选煤厂等都采用了相似的工艺流程。也有少数选煤厂采用重介工艺,大部分设备是中国自己研制的仿波兰、德国和日本的产品。例如:1970年建成的田庄选煤厂是我国自行设计的第一座机械、电气设备全部为国产的全重介选煤厂,该厂采用块煤重介斜轮分选、末煤重介质旋流器分选、煤泥浮选工艺流程,是我国重介质选煤技术从探索走向全面发展的典型。70年代后期国内设计的选煤厂,着重在生产工序的自动化上做了改进,如跳汰机单机自动化、重介系统密度和液面的自动控制与调整、浮选工艺参数的检测与控制等。

2.3 20世纪80年代

各种新型选煤技术和选煤设备开始出现,设计人员依据煤质、用户要求的不同设计出了不同的工艺流程,实现煤泥厂内回收成为这一时期设计过程的基本要求。这一时期建成的选煤厂大量引进国外先进的技术装备,并开始大量引入自动化技术。

1984年,选煤设计院设计的年处理能力3.00 Mt的范各庄选煤厂建成投产,该厂200~13 mm块煤采用立轮重介质分选机主再选、13~0.5 mm末煤采用跳汰分选、0.5~0 mm煤泥采用主再浮选工艺,并设有块煤除杂系统和干燥系统,主要设备从德国引进。1987年由选煤设计院与国外合作设计的西曲选煤厂建成投产,采用跳汰粗选+重介质旋流器精选+煤泥浮选联合工艺流程,其设备主要从日本、美国引进。1989年建成投产的开滦钱家营选煤厂,设计能力为400万t/a。块煤采用立轮重介质分选机分选、末煤重介质旋流器分选、煤泥浮选的工艺流程,并设有块煤除杂系统和干燥系统。主要工艺设计及设备成套从波兰引进、部分设备由国内供货。同一时期,山东煤炭设计院与美国合作设计的兴隆庄选煤厂采用的工艺为跳汰+重介+浮选联合流程,使用动筛跳汰机排矸,KHD跳汰机粗选,重介质旋流器精选,选出灰分在8%以下的优质精煤供宝钢使用或出口。主要设备从美国引进,采用可编程序控制器对全厂主要工艺流程设备进行顺序控制与监控,使用了各种现代技术的仪表、计量和调度,实现了全厂自动化,代表了当时国内选煤厂自动化发展的较高水平。

最具划时代意义的是引进了安太堡露天矿选煤厂,该厂是由中国煤炭开发总公司与美国西方石油公司共同开发,美国麦克纳利公司设计,引进国外技术、装备和管理模式,设计入选能力15.00 Mt/a的我国第一座特大型现代化选煤厂。该厂15~13 mm块煤采用浅槽重介分选机主再选工艺,13~0.15 mm末煤采用重介质旋流器主再选工艺,设备从德国及美国引进,采用MMD型破碎机,块煤浅槽重介分选机,大直径两产品重介质旋流器,分级、脱介用香蕉筛,末精煤脱水用大型离心机,沸腾床干燥机,快速装车站等。该厂也是20世纪我国建成的唯一一座特大型现代化选煤厂。安太堡选煤厂带来了选煤厂设计的新理念,推动了我国特大型现代化选煤厂的建设和发展。

2.4 20世纪90年代

以生产高炉喷吹煤为主的选煤厂、动力煤选煤厂和特大型选煤厂开始出现。选煤工艺开始向全重介方向发展,大型设备开始由国外引进。浅槽重介分选机、大直径重介质旋流器、大型分级(脱介)筛、大型末煤脱水离心机、加压过滤机、浮选柱开始在选煤厂应用,细粒级煤泥开始采用螺旋分选机分选。这一时期建成投产的选煤厂工艺流程也表现出简单化、模块化的特点,模块式选煤厂在我国首

次出现,重介选工艺得到推广。1991年,七台河矿务局铁东选煤厂建成投产。该厂采用>13 mm块煤跳汰选、13~0.5 mm粒级重介选、<0.5 mm粒级浮选的分级入选工艺,这是我国第一座以三产品重介质旋流器为主导工艺的大型选煤厂,这也标志着这一工艺的成熟。1999年,选煤设计院与朗艾道公司共同设计的成庄选煤厂(末煤系统),主厂房采用模块式布置,采用脱泥两产品重介质旋流器分选、煤泥压滤回收工艺,是当时具有代表性的模块化工艺。1996—2000年期间,受东南亚金融危机影响,国内煤炭市场需求下降,选煤厂建设主要以技术改造为主,着重改造分选工艺、降低分选下限、完善煤泥回收环节,在工艺上多采用跳汰改重介、增加末煤入选,煤泥回收设备采用加压过滤机等。

2.5 2000—2015年

投入建设的选煤厂规模进一步扩大,10.00 Mt/a以上的特大型选煤厂如雨后春笋般出现,最大规模甚至已经达到40.00 Mt/a。这一时期跳汰选煤工艺所占比例逐渐下降,重介选煤代替跳汰选煤成为主流选煤工艺。典型的动力煤选煤厂分选工艺有:块煤浅槽重介分选机分选、块煤浅槽重介分选机+末煤重介质旋流器分选、块煤浅槽重介分选机+末煤重介质旋流器+螺旋分选机(TBS干扰床分选机)分选工艺;典型的炼焦煤选煤厂分选工艺为:重介质旋流器+浮选、重介质旋流器+TBS干扰床(煤泥重介)+浮选工艺。2001年,选煤设计院设计的平朔安家岭选煤厂,建设规模15.00 Mt/a,采用分级重介选工艺,选煤厂工艺系统分出口煤选煤系统和内销煤排矸系统;出口煤分选系统采用150~13 mm块煤浅槽重介分选机主再选、13~0.15 mm末煤重介质旋流器主再选工艺,内销煤采用150~13 mm块煤浅槽重介分选机排矸、13~0.15 mm末煤重介质旋流器排矸工艺,全厂煤泥采用加压过滤回收。该厂是我国自行设计、自行建设、自行管理的第一座特大型现代化选煤厂,安家岭选煤厂的设计成功,为我国特大型现代化选煤厂的设计积累了许多宝贵的经验,树立了我国选煤设计一座新的里程碑,我国从此掀起了特大型现代化选煤厂的建设浪潮。在此基础上,国内先后建成一系列同类型的特大型动力选煤厂,如平朔一、二号井选煤厂,准格尔哈尔乌素选煤厂,平朔木瓜界选煤厂以及布尔台选煤厂等。建成的特大型炼焦煤选煤厂有淮北临涣选煤厂、淮北涡北选煤厂和新汶龙固选煤厂等。

2.6 2015年以后

随着煤炭市场低迷,选煤厂建设速度逐渐放缓,这一时期选煤厂主要以改扩建,自动化、智能化升级改造及设备更新换代为主。我国选煤工艺逐渐达到了国际先进水平,同时出现了一批新的选煤设备,如智能干选机、超级重介质旋流器、新型穿流式压滤机、高压(超高压)压滤机等。催生了智能干选机排矸+超级重介质旋流器分选+浮选精煤新型穿流式压滤机脱水+浮选尾矿超高压压滤机脱水回收的新型工艺设备组合。

3 我国煤炭洗选发展及展望

50年来,我国煤炭洗选业取得了举世瞩目的成就,新技术、新装备、新工艺不断涌现。千万吨级湿法全重介选煤技术、大型复合干法和块煤干法分选技术、细粒级煤高效分选技术已经推广应用;大型井下选煤排矸技术和新一代空气重介质干法选煤技术也得到成功应用。现如今我国的煤炭入选比例已经基本与西方发达国家持平,煤炭洗选的技术水平已经达到国际先进水平。

随着国家“双碳”战略深入推进,煤炭清洁高效利用的重要性将更加凸显。在提高煤炭入选比例的基础上,资源的合理利用、装备国产化、以及选煤厂自动化、信息化、智能化是未来选煤厂建设的发展方向。

(1) 选煤方法方面。重介选煤仍占主导地位,跳汰选煤可用于部分易选煤,浮选仍是炼焦煤与高炉喷吹用煤泥分选的首选。其他选煤方法例如干法选煤在特定条件下将得到合理应用和充分推广。

(2) 选煤工艺方面。将更加注重各分选环节的衔接,完善工艺水平,充分融合新技术、新装备,未来将以提质增效的工艺优化改进为主;煤泥减量入选、中煤解离再选、煤泥深度浮选以及无泥化将是选煤厂工艺改进的几个主要方向。

(3) 选煤装备方面。随着我国洗选技术的进步,我国形成了独具特色的选煤装备制造体系,但由于设备制造水平和设备材料的不足,我国的选煤装备仍然存在着一定程度的不足,发展空间较大。因此,针对我国国情,应继续完善我国洗选装备制造体系,大力推进选煤装备向国产化、可靠、高效、节能方向发展。

4 结语

煤炭在我国能源结构中将继续长期占据主导地位,

煤炭洗选加工是煤炭清洁高效利用的源头和基础。通过创新选煤方法与工艺、研发推广先进的洗选设备,将不同的工艺环节科学有机融合,不仅有利于实现选煤厂自动化、智能化,更是实现煤炭高效低碳洗选加工的必要措施和有效途径。同时还应该加强矿业集团、设计院、科研院校、设备生产企业多方合作,全面整合优势资源,做到高效工艺、高效设备与高水平设计充分融合,从而促进选煤技术的进一步发展。

参考文献:

- [1] 严国斌. LTG—8型鲍姆跳汰机的设计与使用[J]. 选煤技术, 1988(4): 14-17.
- [2] 匡亚莉, 邓建军, 刘怀宇. 人工智能技术在选煤领域的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(6): 558-563.
- [3] 贾金鑫. SKT跳汰机新型空气室结构的研究[J]. 煤矿机械, 2015, 36(3): 67-69.
- [4] 林兆鹏. XJM-4型浮选机使用中的问题及解决方法[J]. 选煤技术, 1979(6): 34-36.
- [5] 杨少和. 关于喷射旋流式浮选机的结构和充气情况的分析[J]. 选煤技术, 1978(6): 18-26.
- [6] 吴大为, 马连清, 顾少雄, 等. 有关喷射旋流式浮选机几个问题的探讨[J]. 选煤技术, 1975(5): 28-49.
- [7] 孟诗淇. 小型多流态浮选柱气液两相流场数值模拟与PIV测量[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [8] TAO D, LUTTRELL G H, YOON R H. An experimental investigation on column flotation circuit configuration[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2000, 60(1): 37-56.
- [9] 牛福生, 王学涛, 张晋霞. 颗粒粒径对浮选机固-液两相流场分布特征影响研究[J]. *中国矿业*, 2016, 25(10): 137-141.
- [10] LI Z, LIU H, WANG C, et al. Research on Performance Optimization of Liquid Concentration Detection Systems Based on Turbulence Elimination[J]. *Processes*, 2023(11): 85.
- [11] LI Y, ZHANG J, FAN L S. Numerical simulation of gas-liquid-solid fluidization systems using a combined CFD-VOF-DPM method: bubble wake behavior[J]. *Chemical Engineering Science*, 1999, 54(21): 5101-5107.
- [12] 陈清如, 杨玉芬. 21世纪高效干法选煤技术的发展[J]. 中国矿业大学, 2001, 30(6): 527-530.
- [13] 姚广华, 杨宏智, 郝俊, 等. 低阶块煤智能干选的必要性分析[J]. 煤炭加工与综合利用, 2016(9): 13-16.
- [14] 段福山, 孙友彬. TDS智能干选机在干河煤矿的应用[J]. 选煤技术, 2018(2): 68-72.

- [15] 乔治忠, 刘利波. TDS 智能干选机在准能哈尔乌素选煤厂的应用研究[J]. 选煤技术, 2017(5): 35 - 37.
- [16] 赵 炜. TDS 智能干选机分选宁东矿区低变质烟煤的研究应用[J]. 煤炭加工与综合利用, 2019(12): 7 - 11.
- [17] 梁兴国, 李云峰, 李 燕. 智能干选技术研究应用及发展趋势[J]. 选煤技术, 2019(1): 92 - 96.
- [18] 王振生. 论直接浮选的应用条件[J], 选煤技术, 1984(5): 13-14.
- [19] 辛置矿洗煤厂. 全部煤泥水直接浮选的生产实践[J]. 选煤技术, 1978(5): 1 - 5, 49.
- [20] 吕先浦, 汪建华. 谈谈半直接浮选工艺[J]. 选煤技术, 1979(1): 28 - 40.
- [21] 宋云霞, 魏昌杰. 难浮煤泥二次浮选工艺研究与应用[J]. 煤炭工程, 2017, 49(7): 93 - 96.