

文章编号: 1001-3571 (2023) 06-0001-12

我国选煤工业和技术的发展

程宏志^{1,2}

(1. 中煤科工集团唐山研究院有限公司, 河北唐山 063012; 2. 河北省煤炭洗选工程技术研究中心, 河北唐山 063012)

摘要: 从新中国建立以来我国选煤厂设计建设、选煤技术进步、原煤入选量、肩负使命等的演进过程, 简要回顾了我国选煤工业从起步、成长、快速发展转向高质量发展的历史进程, 概要总结了选煤方法、工艺流程、技术装备发展过程中的一些标志性成果。20世纪50年代, 我国开始建立选煤工业, 当时的任务是“洗煤保钢”, 1956年先后成立了唐山煤炭研究院和选煤设计院; “一五”“二五”期间在前苏联、波兰援助下设计建设了6座跳汰选煤厂; 1958年自主建立了我国第一个重介选煤车间; 1959年自主设计建设了第一座完整的选煤厂, 奠定了我国选煤工业基础。20世纪60年代我国从波兰引进了10座选煤厂, 总设计规模16.4 Mt/a, 大大提高了选煤能力; 选煤厂设计开始采用跳汰+重介+浮选联合工艺。1970年我国自行设计建设了第一座全部采用国产装备的选煤厂, 为我国选煤工业与技术发展积累了经验。1980—2000年, 我国选煤工业处于成长阶段, 重点任务是“洗煤节能”。改革开放后, 我国采取自主创新、引进吸收和中外合作等方式, 建成了一大批设备性能好、规模大、自动化程度高的选煤厂。采用选煤设计院编制的1.80 Mt/a选煤厂通用设计, 建设的选煤厂初步实现了洗水闭路循环; 从德国、美国、波兰等引进了3.0~4.0 Mt/a大型先进选煤厂成套设备, 采用了跳汰+重介+浮选联合工艺; 1987年从美国引进了第一座15.00 Mt/a特大型动力煤选煤厂, 采用块煤浅槽重介+末煤重介质旋流器分选工艺; 1990年从前苏联引进了1.80 Mt/a 晋阳选煤厂, 采用 $\phi 710/500$ 型三产品重介质旋流器分选工艺。成套装备的引进大大促进了我国选煤工业与技术的发展。“九五”期间, 取得了“大型高效全重介选煤简化流程新工艺及设备”等一批重大科研成果, 使自行研制的设备已能满足年生产能力400万t以下不同厂型、不同煤质、不同洗选工艺的新厂建设和老厂技术改造的需要。2000年, 我国入选原煤3.37亿t, 入选率为33.7%, 在各种选煤方法中, 跳汰占52%, 重介28%, 浮选14%, 干选等其他方法占6%。21世纪以来, 选煤作为洁净煤技术源头和煤炭清洁高效利用的重要基础, 进入了快速发展时期, 选煤方法多采用重介质分选, 选煤厂建设呈现大型化集约发展, 动力煤入选率大幅提高, 煤炭产品从单一燃料向燃料与原料并重转变。“十三五”期间, 我国自主研发的千万吨级湿法全重介质选煤技术、大型干法分选技术、低阶煤泥浮选技术、原煤井下排矸技术成功应用, 使我国选煤技术进入国际先进或领先行列, 到2020年, 我国原煤入选率为74.1%, 煤矸石综合利用率达72.2%。截至2021年, 我国拥有规模及以上选煤厂2400余座, 原煤入选能力达34亿t/a, 平均单厂入选能力从2000年的33万t/a提高到140万t/a; 千万吨级特大型选煤厂有84座, 入选能力超过13亿t/a, 占当年总入选能力的38.2%; 在各种选煤方法中, 跳汰占8%, 重介80%, 浮选6%, 干选等其他方法占6%, 已有数十座选煤厂达到了智能化中级水平。面向碳达峰碳中和战略需求, 为推进煤炭供给侧结构优化、消费侧能效提升, 应加强煤岩显微组分分选、粉煤干法分选、大宗低阶煤泥提质、矸石综合利用和选煤基础理论等科技攻关, 实现煤炭应选尽选, 推动选煤工业安全、高效、绿色、智能的转型升级。

关键词: 选煤工业; 选煤方法; 选煤设备; 选煤工艺; 科技攻关; 入选率; 转型升级

中图分类号: TD94

文献标志码: C

收稿日期: 2023-12-11 责任编辑: 邓明瑞 DOI: 10.16447/j.cnki.cpt.2023.06.001

作者简介: 程宏志(1963—), 男, 满族, 河北三河人, 博士, 研究员, 从事科研和管理工作。E-mail: chengzhz@126.com, Tel: 0315-5819666。

引用格式: 程宏志. 我国选煤工业和技术的发展[J]. 选煤技术, 2023, 51(6): 1-12.

CHENG Hongzhi. Development of China's coal preparation industry and technologies[J]. Coal Preparation Technology, 2023, 51(6): 1-12.

Development of China's coal preparation industry and technologies

CHENG Hongzhi^{1,2}

(1. CCTEG Tangshan Research Institute Co. Ltd., Tangshan 063012, China; 2. Hebei Province Coal Engineering & Technology Research Center, Tangshan 063012, China)

Abstract: The paper presents a brief review of the gradual progress of the coal preparation plants, since the founding of the People's Republic of China, in the aspects of plant design and construction, advances of coal cleaning technologies, raw coal treatment rate, and the entrusted missions, as well as the historical course of the country's coal preparation industry starting from start-up and growth to transition from a phase of rapid growth to a stage of high-quality development. Following that, some significant achievements obtained during the course of development of coal cleaning technologies, processes and equipment are briefly summarized. In the 50s of the 20th century, the coal preparation industry started to be established, for undertaking then the mission to supply cleaned coal for the iron and steel industry. In 1956, Tangshan Coal Research Institute and Tangshan Coal Preparation Design Institute (TCPDI) were established in succession. During the first and the second Five-Year Plan periods, six coal jigging plants were set up with technical assistance provided by the former USSR and Poland. In 1958, the first independently designed heavy-medium separation shop came into being. In 1959, an independently designed and built coal preparation plant made its debut, laying a foundation for the coal preparation industry of the country. In the 60s of the 20th century, ten plants with a total designed capacity of 16.4 Mt/a were introduced from Poland, making it possible for China to drastically increase its raw coal treatment capacity and to start using jigging + heavy medium separation + flotation combined processes in design of plants. In 1970 an independently designed and built plant which used all home-made equipment, the first of its kind in China, was set up, through which the experience for the development of the coal cleaning industry and related technologies was accumulated. In the period of 1980—2000, the coal preparation industry was in its growing stage with its mission focusing on energy conservation. Following the implementation of the reform and opening up policy, a large batch of large-sized plants operating with high-performance equipment and a high automation level were set up through independent innovation, assimilation of introduced foreign technologies and running plants in form of joint ventures with foreign partners, and also in this period, in the plants built according to the general design specifications complied by TCPDI for the design of the 1.8 Mt/a plant, the coal washing operation with closed washwater circuit was made preliminary possible. And complete sets of advanced washing equipment for the 3.0 ~ 4.0 Mt/a plants were also introduced from Germany, the U.S. and Poland, making it possible for such plants to operate with jigging + heavy-medium separation + flotation combined processes as a general practice. In 1987, the first extra-large 15.00 Mt/a power coal washing plant featuring the use of heavy-medium vessel plus heavy medium cyclone for respectively washing coarse coal and small coal was introduced from the U.S. Before 1990, the 1.8 Mt/a Jinyang plant operating with the use of $\phi 710/500$ 3-product H.M. cyclone was introduced from the USSR. The introduction of complete sets of equipment from overseas countries helped promote to a large extent the growth of the coal preparation industry and the development of the related technologies. During the 9th Five-Year Plan period, a series of major research-derived achievements was obtained, for instance, in the development of new washing processes and equipment, allowing large-sized plants to operate with a simplified washing system featuring the use of large-size and highly efficient all-heavy medium washing equipment. This is more than sufficient to cater to the needs for the building of new plants and technical transformation of old plants each with an annual capacity of less than 4 million tons, all with the use of self-developed equipment, no matter what kind of coal was treated and what washing processes were employed therein. In 2000, the amount of raw coal treated totaled 337 million tons with a treatment rate of 33.7%. Among the dif-

ferent washing methods used, the jigging, heavy medium separation, flotation, and dry cleaning and other methods accounted for 52%, 28%, 14% and 6% respectively. Starting from the onset of the 21st century, as the source of clean coal technology and a crucial basis for realizing clean and high-efficiency utilization of coal, the coal preparation sector was seen to enter a rapid growth phase which was characterized by the predominant use of heavy medium separation method, emergence of large-size and intensive plants, sharp rise of power coal treatment rate, and transition of production of only fuel coal to production of both fuel coal and chemical materials. In the 13th Five-Year Plan period, the successful application of the all-wet, all-heavy-medium separation system with an annual capacity of over 10 million tons, the high-capacity dry cleaning technology, low-rank coal slime flotation technology and underground raw coal destoning technology pushed China's coal preparation technology to stand globally at either forefront or a leading position. By 2020 the raw coal treatment rate and comprehensive utilization rate of refuse had reached 74.1% and 72.2%, respectively. Up to the year 2021, 2 400-plus plants above the designated scale were in operation with an combined treating capacity of 3.4 billion tons a year, and the average treating capacity of an individual plant increased to 1.4 Mt/a from 300,000 t/a in 2000. The number of superlarge plants each having a capacity of over ten million tons a year amounted to 84, reaching an aggregate capacity of over 1.3 billion tons a year, which accounted for 38.2 percentage of the total raw coal treated in that year. Among the cleaning methods employed, the jigging heavy-medium separation, flotation, and dry cleaning and other methods accounted for 8%, 80%, 6%, and 6%, respectively. Several dozen of plants reached the medium level in terms of intelligentization. In order to meet the needs for reaching the strategic goals of achieving carbon peaking and carbon neutrality, promote supply-side structural optimization, upgrade consumption-side energy efficiency, it is proposed to strengthen the research work on separation of macerals, dry cleaning of fine coal, upgrading of bulk low-rank coal slime, comprehensive utilization of refuse and making breakthrough in basic theory of coal preparation. Plus, endeavors should be made to clean all the coal that needs to be separated, so as to promote the transition and upgrading of the coal preparation industry to make it safer, greener, smarter and more efficient.

Keywords: coal preparation industry; coal cleaning method; coal cleaning equipment; coal cleaning process; technical breakthrough; raw coal treatment rate; transition and upgrading

煤炭是我国的主体能源和重要工业原料, 从1949年至今累计生产煤量达960亿t以上, 为国家经济社会发展提供了70%以上的一次能源(煤炭消费占比已由改革开放初期的80%以上减少到2020年的56.8%), 支撑了国内生产总值年均增长9%以上, 为中华民族伟大复兴做出了不可磨灭的历史贡献。在今后较长时期内, 特别是在推动我国能源转型发展中煤炭还将发挥不可或缺的兜底保障作用。同时, 煤炭行业一直紧跟时代步伐, 坚持改革开放, 科技创新能力显著增强, 清洁低碳利用步伐不断加快, 初步探索出一条安全、高效、绿色、智能的转型升级发展之路^[1]。

新中国成立至今, 我国选煤工业发生了巨大变化, 所肩负的使命也在不断演进, 起步阶段——“洗煤保钢”, 成长阶段——“洗煤节能”, 快速发展阶段——“清洁低碳”。1949—2021年, 原煤年入选量从5.10 Mt到29.6亿t, 入选率从7.67%到

71.7%, 选煤厂数量从十几座到2400多座, 选煤厂规模从数十万吨到数千万吨, 主导工艺从跳汰到重介^[2-3], 选煤装备从无到有, 科研教育从弱到强, 生产操作从手工到自动/智能, 选煤技术从落后到领先。

1 我国选煤工业的发展

我国选煤工业起步较晚, 20世纪50年代才建立起自己的选煤工业。“一五”(1953—1957年)“二五”(1958—1962年)期间, 在前苏联、波兰援助下, 设计建设了6座选煤厂^[2], 总设计能力10.00 Mt/a。新中国成立之初没有专门的选煤研究和设计机构, 直到1956年3月成立了煤炭部唐山煤炭科学研究院(以下简称唐山研究院)。唐山研究院是我国最早专业从事选煤研究的机构, 1958—1959年协助通化铁厂选煤厂建立了用斜轮重介质分选机处理溜洗槽中煤和6~100 mm块煤的我国第

一座重介质选煤车间，1966年在彩屯选煤厂建成 $\phi 500$ mm两产品重介质旋流器分选0.5~8 mm粒级的末煤分选车间；1956年6月成立煤炭部选煤设计研究院（以下简称选煤设计院），是我国最早专业从事选煤厂工程设计研究的机构，1956年6月—1957年7月，完成了峰峰邯郸选煤厂扩大初步设计和施工图设计，设计能力为1.5 Mt/a，采用跳汰+浮选工艺，1957年8月开始施工，1959年12月26日建成投产，这是我国自行设计建设的第一座完整的选煤厂；1960年北京矿业学院与阜新海州露天矿合作建成斜轮重介质分选系统；此后，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。1970年，年设计处理能力为350万t的平顶山田庄选煤厂，采用重介质分选工艺，其采用的直径为2.6 m的斜轮重介质分选机、 $\phi 500$ mm的末煤重介质旋流器、3 m²和15 m²的共振筛、4 m³的浮选机等32种新设备，均由国内自行设计制造。田庄选煤厂是我国自行设计建设的第一座全部采用国产装备的大型选煤厂，为我国选煤工业和技术的发展积累了经验。60年代从波兰引进了10套选煤厂，总设计规模16.4 Mt/a，大大提高了选煤能力。70年代选煤设计院结合芦岭、大屯、平顶山八矿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，采用原煤混合跳汰+煤泥直接

浮选+尾煤浓缩压滤的联合工艺，初步实现了洗水闭路循环。

改革开放后，采取自主、引进和中外合作等方式，建成了一大批设备性能好、规模大、自动化程度高的选煤厂。从德国、美国、波兰等引进了3.0~4.0 Mt/a大型先进选煤厂成套设备，多数采用跳汰+重介+浮选的联合工艺；1987年由美国麦克纳利公司设计的我国第一座15.00 Mt/a特大型动力煤选煤厂——安太堡选煤厂建成投产，采用块煤重介浅槽主再选+末煤两产品重介质旋流器主再选工艺，全套设备从美国、日本和德国引进。成套先进装备的引进大大促进了我国选煤技术的发展，“九五”期间自行研制的设备，已能满足年生产能力400万t以下不同厂型、不同煤质、不同洗选工艺的新厂建设和老厂技术改造的需要。

21世纪以来，选煤作为煤炭清洁高效利用的重要基础，进入了快速发展时期，选煤厂建设呈现大型化集约发展态势，发达国家设在中国的分支机构为中国承建了大量选煤厂，引进了国际先进的技术和装备，促进了我国选煤工业和技术进步，千万吨级特大型选煤厂装备基本实现了国产化，煤炭产品向清洁燃料和高品质原料转变。

不同时期的原煤入选量、入选率见表1^[2-4]，各种选煤方法所占比例见表2^[2-4]。

表1 不同时期我国原煤入选量和入选率数据

Table 1 Amounts and rates of raw coal treated in different years in China

年份	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021
原煤产量/(亿t)	6.20	8.72	10.79	12.92	10.0	21.9	32.4	37.5	39.0	41.3
入选量/(亿t)	1.14	1.43	1.91	2.02	3.37	7.03	16.5	24.7	29.1	29.6
入选率/%	18.4	16.4	17.7	15.6	33.7	31.9	50.9	65.9	74.7	71.7

表2 不同时期我国各种选煤方法所占比例

Table 2 Proportions of the coal cleaning methods employed in different years

选煤方法	2000年	2005年	2010年	2015年	2021年
跳汰	52.0	45.0	30.5	12.0	8.0
重介	28.0	39.5	54.0	75.0	80.0
浮选	14.0	9.5	9.5	8.0	6.0
干选及其他	6.0	6.0	6.0	5.0	6.0
合计	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

我国选煤工业发展大致可分为以下三个阶段^[2,5]。

1.1 起步阶段（1949—1980年）：洗煤保钢

1949年，新中国接管下来的选煤厂只有十几座，选煤方法只有跳汰和溜洗槽，工艺简单落后，工序不全，产品质量差，年入选原煤5.10 Mt，入选率7.67%。建国初期，为了保证钢铁工业大发展，

中央提出了“工业发展以钢为纲”的方针，煤炭工业落实“洗煤保钢”任务，仅洗选炼焦煤，动力用煤不洗选。

1950年2月14日，中国同前苏联签订了《中苏友好同盟互助条约》，苏联分期分批帮助设计、提供成套设备和主要物资，建设一批重点项目。当时确定援建我国156个项目，其中煤炭工业25项中有选煤厂6项。由于种种原因煤炭项目只实现17项，选煤厂实际只建成4座。

第一、第二个五年计划期间，在前苏联援助下，设计建成的选煤厂有淮南望峰岗（1958年，1.00 Mt/a）、双鸭山（1959年，1.50 Mt/a）、峰峰马头（1959年，2.00 Mt/a）和鹤岗兴安台（1960年，1.50 Mt/a）4座选煤厂，采用分级跳汰+浮选工艺，设备均是

前苏联40年代的产品,能力小、效率低,煤泥水处理系统简单,洗水不能闭路循环。同期还有波兰援助建成的湖南株洲选煤厂(1960年,2.00 Mt/a)和山西太原选煤厂(1960年,2.00 Mt/a),采用二次破碎不分级跳汰+浮选工艺,工序齐全,厂房设备布置整齐简捷,煤泥水处理系统能够与入选量相匹配。这批国外设计引进后,即作为我国整套选煤厂设计的蓝本,经过消化、吸收,促进了选煤厂设计工作的发展。

1959年12月26日,我国第一座自行设计施工建设的选煤厂——邯郸选煤厂建成投产,结束了我国不能自己设计选煤厂的历史。该厂采用跳汰+浮选工艺,设计生产能力1.50 Mt/a,跳汰机面积 8 m^2 ,为立式风阀、水泥(混凝土)机体,浮选机单槽容积为 2.5 m^3 。

20世纪60年代为保证钢铁工业发展,大力发展选煤工业。在选煤厂设计中,发展了块煤重介+末煤跳汰+煤泥浮选的联合工艺;设计建设了年处理能力3.00 Mt和3.50 Mt的大型选煤厂;研制了一批大型选煤设备;开展了选煤厂自动化的研究与设计工作,选煤厂设计技术有了很大进步。沈阳设计院在1.75 Mt/a通化铁厂选煤厂设计中,采用了 $10\sim 100\text{ mm}$ 块煤斜轮重介主再选+ $<10\text{ mm}$ 末煤跳汰主再选+煤泥浮选的联合工艺,1965年建成投产;设计的中国第一座褐煤选煤厂——平庄西露天选煤厂,1967年投产,设计能力为2.70 Mt/a,采用大块煤重介排矸、高灰劣质混煤跳汰排矸、优质混煤不入选工艺,为褐煤选煤厂设计提供了经验。

这一期间,从波兰引进了开滦吕家坨(1968年,2.4 Mt/a,块煤重介+末煤重介+煤泥浮选联合工艺)、宁夏大武口(1969年,3.0 Mt/a,块煤重介+末煤跳汰联合工艺)、开滦唐家庄(1969年,1.2 Mt/a)、水城老鹰山(1969年,0.9 Mt/a)、渡口巴关河(1970年,1.8 Mt/a)、淮北青龙山(1972年,2.0 Mt/a,跳汰+浮选联合工艺)、水城汪家寨(1970年,1.2 Mt/a,跳汰+重介联合工艺)、汾西介休(1970年,2.0 Mt/a,跳汰+浮选)和盘县火烧铺(1972年,0.9 Mt/a)等10套选煤厂,总设计规模16.4 Mt/a,大大提高了选煤生产能力。

煤炭部组织选煤科研和设计人员开展了选煤厂自动化研究。1965年,在株洲选煤厂进行了跳汰机自动排矸和浮选入料矿浆浓度自动检测试验;在铁厂、彩屯选煤厂进行了重介悬浮液密度自动测量和调整试验,并进行了快速测定煤炭灰分的研究;

国内自行设计的自动化装置开始应用于生产,1967年吕家坨选煤厂采用国内自行设计的双管压差密度计,并成功地使用了电控气动执行机构,实现了重介悬浮液的自动调整。

20世纪70年代,选煤厂设计中采用了煤泥不经浓缩的直接浮选工艺,继续研制大型选煤设备,选煤厂设计技术水平继续提高。选煤设计院编制完成了年处理能力为3.00 Mt的淮南潘集一号井选煤厂初步设计,采用了我国研制的 35 m^2 跳汰机、 16 m^2 振动筛、 200 m^2 圆盘过滤机等8种大型选煤设备;编制完成了1.80 Mt/a跳汰+浮选工艺选煤厂的通用设计。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。

从建国初期至1980年,我国原煤入选量从5.10 Mt/a增加至114.22 Mt/a,原煤入选率由7.67%提高到18.4%。1980年精煤灰分平均为12.5%。

1.2 成长阶段(1981—2000年):洗煤节能

这一阶段我国能源供应极度紧张,国家非常重视节约能源、提高煤炭燃烧效率,把选煤作为提高煤炭质量、节约能源的重要手段。据统计,每入选1亿t原煤,可排除矸石1800万t、黄铁矿150万t,减少二氧化硫排放49万t;炼焦煤灰分每降低1个百分点,焦炭灰分可降低1.33个百分点、生铁产量可提高3个百分点;焦炭硫分每降低0.1个百分点,生铁产量可提高2个百分点;对于发电用煤,发热量每降低 4.18 MJ/kg ,标准煤耗将增加 $80\sim 100\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。据电力专家测算,烟煤发热量由 18.81 MJ/kg 降至 12.54 MJ/kg 时,电厂的总投资约增加22%,供电煤耗约增加24%,厂自用电率约增加33%,锅炉的热效率约下降4.5%,最终导致供电成本提高66%^[6]。1980年1月,邓小平明确指出:“开发煤炭,首先应当做也必须做的,是要提高洗煤比重。”1982年11月12日,国务院发布《关于发展煤炭洗选加工合理利用能源的指令》(节能指令第五号,国发〔1982〕135号),明确指出:“为了节约能源,减少矸石运输,防止环境污染,并提高工业产品质量,必须积极发展煤炭洗选加工,合理使用煤炭,逐步由主要燃用原煤改为主要燃用加工后的商品煤。”

20世纪80年代,采取自主、引进和中外合作等方式,一大批洗选设备性能好、规模大、自动化程度高且达到世界先进水平的选煤厂先后开工建成

投产。采用选煤设计院的1.80 Mt/a选煤厂标准设计，建成了淮北芦岭、江苏大屯、邢台东庞、平顶山八矿等选煤厂，煤泥采用压滤机脱水，初步实现了洗水闭路循环。同期还建设了淮南潘一、兖州鲍店等3.0 Mt/a大型炼焦煤选煤厂和平顶山一矿、阳泉一矿、阳泉三矿等动力煤选煤厂。淮南潘一采用原煤混合跳汰主再选+煤泥浮选联合工艺，兖州鲍店

采用原煤混合跳汰粗选+粗精煤重介质旋流器精选+煤泥浮选工艺流程。

在此期间，经国务院批准，先后从国外引进先进选煤厂（表3）及成套设备，大大推进了我国选煤工业的发展：选煤厂规模增大，国外先进选煤工艺、设备逐渐引入，特大规模动力煤选煤厂开始建设。

表3 20世纪80年代我国引进的选煤厂

Table 3 List of coal preparation plants introduced from foreign countries in the 80s of the 20th century

选煤厂名称	设计能力/(Mt·a ⁻¹)	引进国家	选煤方法	投产年份
开滦范各庄	4.0	德国KHD	块煤重介+末煤跳汰+煤泥浮选	1983
兖州兴隆庄	3.0	美国RS、德国	跳汰粗选+重介精选+直接浮选	1985
西曲	3.0	美、日、德	跳汰粗选+重介精选+煤泥浮选	1987
安太堡	15.0	美国	块煤浅槽重介主再选+末煤重介质旋流器主再选	1987
霍州白龙	2.4	罗马尼亚	跳汰+浮选	1989
开滦钱家营	4.0	波兰	块煤立轮重介主再选+末煤重介质旋流器主再选+浮选	1989
晋阳	1.8	前苏联	三产品重介质旋流器+浮选	1990
双鸭山七星	1.8	前苏联	三产品重介质旋流器+浮选	1992

范各庄选煤厂（4.00 Mt/a）由选煤设计院与德国合作设计，是80年代我国最大、技术装备具有当时世界先进水平的大型炼焦煤选煤厂，采用13~200 mm块煤立轮重介主再选、0.5~13 mm末煤跳汰、煤泥浮选工艺，并设有块煤除杂系统和精煤干燥系统。主要设备从德国引进，包括TESKA（太斯卡）立轮重介质分选机、巴达克跳汰机、200 m²圆盘真空过滤机，生产过程采用10台SimaticS5-150a型可编程序控制器对全厂600多台设备进行程序控制，根据工艺要求设置了16个闭环系统，并对一些工艺参数如流量、速度、密度、液位、浓度、浊度等进行监测。

兴隆庄选煤厂（3.00 Mt/a）由济南煤矿设计院与美国罗伯茨·谢菲尔公司（R·S公司）联合设计，原煤采用德国巴达克跳汰机粗选+美国重介质旋流器精选+煤泥用美国丹佛浮选机直接浮选+尾煤泥压滤机厂内回收的联合工艺，主要选煤设备由国外引进，在引进设备的同时引进了设备的制造许可证。

西曲选煤厂（3.00 Mt/a）采用跳汰粗选+重介质旋流器精选+煤泥浮选工艺流程，是80年代末至90年代初期洗选炼焦煤具有代表性的工艺。所引进的部分设备通过消化吸收实现了国产化生产，其中的VC-48、VC-56型振动卸料离心机和1400×1800型沉降过滤式离心机在我国一段时期内得以广泛应用。

安太堡选煤厂是中美合资建设并由美方经营

管理的我国第一座特大型动力煤选煤厂，设计规模15.00 Mt/a，由美国麦克纳利公司设计，采用块煤浅槽重介分选机主再选+末煤两产品重介质旋流器主再选工艺，全套设备从美国、日本和德国引进。在此之前我国的选煤厂最大规模只有4.0 Mt/a，安太堡选煤厂建成后，带来了选煤厂设计的新理念，从此特大型选煤厂如雨后春笋般在我国出现，其中大多是动力煤选煤厂。

晋阳选煤厂（1.8 Mt/a）由山西煤矿设计院与前苏联南方煤炭设计院联合设计，全套设备从前苏联引进，是采用三产品重介质旋流器+煤泥浮选工艺的炼焦煤选煤厂，1990年9月投产。

上述这些选煤厂的引进，一方面增加了我国选煤厂总入选能力，更重要的是在选煤厂设计、选煤工艺和设备、自动控制、快速装车和经营管理上带来了新理念，对促进我国选煤技术发展起到很大作用。

1990年，我国原煤入选量为1.91亿t，入选率为17.7%。当年入选炼焦用原煤126.77 Mt，生产精煤67.42 Mt，为新中国成立时的100倍，产品平均灰分10.27%、水分11.50%、回收率53.19%，入选比例为当年炼焦原煤产量的24.72%；入选动力煤64.11 Mt，入选比例11.31%。

20世纪90年代，“八五”期间原煤入选量的增长速度首次超过原煤产量的增长速度，“九五”期间选煤生产规模持续快速增长。炼焦煤选煤厂采用较复杂的工艺流程，一般情况下，入选原煤粒度范

围在50~0 mm,对易选和中等可选性煤采用跳汰+浮选工艺流程,对难选或极难选煤采用重介+浮选或跳汰粗选+重介质旋流器精选+煤泥浮选工艺流程。动力煤选煤厂一般采用较为简单的工艺流程——重介或跳汰排矸,入选粒度上限为300 mm或100 mm、下限多为13(50, 25, 6) mm。

除了钢铁需求量增加带动炼焦煤选煤厂快速发展外,为了降低炼钢(铁)成本,高炉喷吹煤的需求大增,带动了无烟煤选煤厂的建设发展,无烟煤洗选由过去的满足化肥厂需求只洗选块煤改变为也分选末煤,这一时期建设、改造或引进的选煤厂有:永城陈四楼选煤厂,阳泉一、二、三、五矿选煤厂和晋城成庄末煤重介模块式选煤厂(1994年,2.4 Mt/a)等,都生产高炉喷吹煤。这一时期,国家又进一步出台了鼓励煤炭出口的税收优惠政策,促进了动力煤洗选的发展,期间又有兖州东滩(1993年,4.0 Mt/a)、济宁二号(1995年,4.0 Mt/a)、平朔安家岭(2000年,15.0 Mt/a)、大同四台沟(1991年,5.3 Mt/a)、神东大柳塔(1999年,6.0 Mt/a)等选煤厂都是为适应出口煤需要而建设的。其中的安家岭选煤厂是我国自行设计的第一座特大型现代化选煤厂,建设规模15.0 Mt/a,采用13~150 mm块煤浅槽重介、0.15~13 mm末煤重介质旋流器主再选、煤泥加压过滤回收工艺。安家岭选煤厂的投产运行,为我国特大型选煤厂的设计积累了宝贵经验,推动了我国选煤厂建设的大型化和高效化进程,带来了选煤厂设计、管理的新理念,为我国选煤厂设计与建设树立了一座新的里程碑,其采用的块、末煤分级重介至今仍是动力煤的主流分选工艺。

2000年,全国拥有选煤厂1584座,设计能力521.99 Mt/a,平均单厂规模为0.33 Mt/a;实际入选原煤量336.65 Mt,原煤入选率为33.7%,选煤厂能力利用率为64.5%。2000年全国共生产炼焦精煤105 Mt,精煤平均灰分9.50%、水分为10.35%;全国动力煤入选量为106.84 Mt,产品主要供化肥、城市气化、高炉喷吹、出口和电厂使用,动力煤入选比例仅14%。在各种选煤方法中,跳汰占52%,重介占28%,浮选占14%,其他方法占6%。跳汰仍是主要选煤方法,但重介质分选方法在20世纪90年代发展很快,由“八五”初期的23%上升到“九五”末的28%。风力干法选煤技术从无到有,随着干旱缺水地区煤炭的大力开发,风力干法选煤技术在中小型动力煤选煤厂得到快速发展。

通过自主研发和引进吸收,自行研制的设备

已能满足年生产能力400万t以下不同厂型、不同煤质、不同洗选工艺的新厂建设和老厂技术改造的需要。研制成功的自动化仪表、计算机软件及自动控制系统已能实现主要生产环节自动测控和全厂集中控制,技术进步推动了选煤工业快速发展。

1.3 快速发展阶段(2001年—):选煤作为煤炭清洁高效综合利用的重要基础

进入21世纪,我国工业化进程加快,以煤为主的能源格局带来了严重环境问题。国家把节能减排、保护环境、安全生产和矿产资源综合利用作为基本国策,选煤成为煤炭清洁高效综合利用的重要基础。选煤厂建设的特点一是规模增加;二是动力煤选煤厂数量占多数;三是多采用重介为主的选煤工艺^[5]。呈现出规模大型化、工艺高效化、系统单元化、生产自动化、流程灵活化、产品多元化、管理精细化、全厂信息化/智能化、资源清洁化的选煤发展态势。

在选煤厂设计、建造和管理创新上,这一阶段出现突飞猛进的发展。从选煤工艺上,适用于洗选动力煤的块、末煤重介质分选工艺和洗选炼焦煤的大直径三产品旋流器分选工艺被大力推广采用;从工艺布置上,模块式、高效装配式钢结构厂房得以推广应用;选煤设备大型化、成套化、自动化得以大规模应用;选煤厂的建设标准、管理水平有了很大提高;在建设模式上,开始实行以设计为龙头的工程总承包,大大提高了选煤厂建设速度,缩短了建设工期。在生产管理方面越来越多的采取洗选中心集中管理或专业的托管运营公司。

截止2010年底,全国拥有选煤厂数量约1800座,年入选能力为17.6亿t,已建成入选能力10.00 Mt/a及以上的特大型选煤厂41座,入选能力5.95亿t/a,占总入选能力的33.8%。2010年原煤入选量约16.5亿t,入选率为50.9%;其中,炼焦煤入选量8.27亿t,入选率近90%;动力煤入选量8.23亿t,入选率仅为35%。按洗选能力计主要选煤方法所占比例,跳汰占30.5%、重介占55%、浮选占9.5%、其他方法占5%^[4]。

到2013年底,我国已拥有世界上最先进的选煤工艺和设备,原煤洗选加工能力接近24亿t,原煤入选率达60.2%,已达到世界平均水平,成为世界第一选煤大国。

煤矸石综合利用率由1995年的23.5%提高至2005年的59%,再由2017年的67.3%稳步保持到2020年的72.2%^[1]。

截至2021年,我国在运行的规模及以上选煤厂2400多座,原煤入选能力为34亿t/a,其中炼焦煤约10亿t/a、动力煤约24亿t/a,平均单厂入选能力达到1.40 Mt/a。在各种选煤方法中,跳汰占8%,重介80%,浮选6%,干选等其他方法占6%。新建了一大批具有世界先进水平的大型和超大型选煤厂,原煤入选能力达到或超过10.00 Mt/a的特大型选煤厂有84座,总计入选能力超过13亿t/a,占当年总入选能力的38.2%^[3]。最大的炼焦煤选煤厂能力达到30.00 Mt/a,最大的动力煤选煤厂能力达到40.00 Mt/a^[5]。

2 选煤技术与装备的发展

唐山研究院在1956年成立之初就建立了较全面的选煤专业研究室,如重介室、跳汰室、浮选室、筛分室、脱水室、自动化室,20世纪80年代又成立了干选室、破碎室等等,对选煤工艺、装备及自动化技术开展了全方位的研究开发与推广应用,研究领域涵盖了选煤全过程。先后研发了多种选煤工艺、技术和装备,原始创新了混煤不脱泥重介洗选工艺、双供介无压给料三产品重介质旋流器、振荡浮选技术与设备、复合式干法选煤设备;自主开发了3NWX/3NZX型三产品重介质旋流器选煤工艺与成套装备、大型SKT筛下空气室数控跳汰机、XJM/XPM型浮选机、FGX/FX型干法选煤成套设备、SSC/2PLF型分级破碎机、LVB/BVB型振动筛、WZYT型离心脱水机、GPJ/3-C型智能加压过滤机、JNG型滚筒干燥机、JK-5型选煤厂集中控制系统、HM-CS型重介质选煤过程自动测控系统、FC-5型浮选加药自动控制系统等大批煤炭洗选技术与装备,攻克了多项工艺与装备技术难题,推动了选煤技术进步和工业发展。

2.1 选煤工艺技术不断发展完善,跻身世界领先行列

20世纪70年代以前,我国普遍采用原煤混合跳汰+煤泥浓缩浮选工艺,大多数选煤厂采用沉淀池回收尾煤,洗水不能闭路循环。70年代在选煤厂设计中,采用了煤泥不经浓缩的直接浮选工艺,一方面,煤泥水直接浮选解决了循环水细泥积聚难题,另一方面,板框式压滤机作为煤泥水把关设备,实现了洗水闭路循环。

20世纪80年代,从德国、美国、波兰、前苏联等引进了大型选煤厂成套装备,包括巴达克跳汰机、立轮和浅槽重介分选机、两产品和三产品重介质旋流器、浮选机以及筛分破碎脱水设备,选煤工

艺流程也发生了明显变化,完善了块煤立轮重介主再选+末煤跳汰主再选+煤泥水直接浮选、块煤重介浅槽主再选+末煤重介质旋流器主再选、原煤混合跳汰主选+中煤重介质旋流器再选、原煤跳汰粗选+粗精煤重介质旋流器精选、原煤脱泥三产品重介质旋流器+煤泥浮选等多种工艺。

1986—1989年,唐山研究院开展了重介质旋流器分选50~0 mm原煤工艺及设备的研究,1989年成功应用于山西古交选煤厂,当处理量为80 t/h时,可能偏差为0.03 g/cm³,数量效率达93%,有效分选下限达0.15 mm,填补了重介质旋流器不脱泥入选的工艺空白;“九五”国家科技攻关项目“大型高效全重介选煤简化流程新工艺及设备”研究成果,进一步完善了不脱泥入选工艺,强化了重介质选煤的高精度、低下限优势。

进入21世纪,随着选煤技术进步和煤炭市场需求的变化,选煤工艺更加注重精细化、个性化、灵活化,以适应原煤性质变化、产品结构调整和清洁利用要求。我国煤种齐全,煤质差别大,产品用途广,因而跳汰、重介、浮选、干选等各种选煤方法均有应用。自20世纪90年代以来,我国大力加强选煤科技攻关,逐步研发出一大批具有自主知识产权的高效选煤工艺与成套装备。在重介质选煤方面,形成了原煤不脱泥无压三产品重介质旋流器+煤泥重介质旋流器简化工艺、原煤脱泥重介质旋流器分选工艺、块煤浅槽重介+末煤重介质旋流器分级洗选工艺;在跳汰选煤方面,形成了块煤跳汰、末煤跳汰、混合跳汰分选和井下排矸工艺;在粗煤泥分选方面,形成了干扰床、螺旋分选机、水介旋流器分选工艺;在煤泥浮选方面,形成了分级浮选、粗选+精选、粗选+扫选+精选、脱泥浮选工艺;在干法选煤方面,形成了风力分选、光电射线智能干选、空气重介分选工艺;在低阶动力煤洗选方面,形成了脱粉入选工艺;等等。以上各种工艺方法的组合应用,基本满足了不同原煤性质和产品质量要求的高效洗选加工需求,我国选煤技术已跻身国际领先行列。

2.2 选煤装备技术取得了长足进步,设备性能、大型化程度和可靠性显著提高

跳汰选煤方面,唐山研究院在1956—1964年开始了跳汰机结构和工艺参数研究,1959年在北票三宝选煤厂采用了卧式风阀,使跳汰机的处理能力提高1倍左右。1964年研究改进了望峰岗选煤厂鲍姆BM-10型末煤跳汰机;同年研制成功了东风

型筛下空气室跳汰机,抚顺龙凤矿和西露天矿都按图纸自制跳汰机,用于分选不分级原煤。1981年研制出跳汰机数控风阀,对提高跳汰机的机械性能和工艺性能起到了重要作用。1985年,成功研制出SKT-24筛下空气室跳汰机用于分选0~80 mm原煤。1996—1999年,承担完成了“九五”国家科技攻关课题“自动化跳汰机的研制”,在单位面积处理量为15~25 t/(m²·h)时,不完善度低于0.14,矽石中低密度物含量不超过5%。目前,SKT型跳汰机最大面积为42 m²,处理能力达550~600 t/h,入选上限可达200 mm,基本实现了无人值守,对易选和中等可选性煤的分选效率在95%以上。并且,该类型跳汰机在2012年就成功应用于井下排矸。

在重介质选煤方面,唐山研究院在1956年开始了重介质选煤加重质类型及其流变性质和净化回收方法的研究,对不同粒级煤炭分选工艺流程中各种技术参数的选择进行了试验探索。1958年配合通化铁厂选煤厂建立了我国第一座块煤重介质分选车间;1970年研制出4 m槽宽的斜轮重介质分选机,用于抚顺古城子选煤厂分选>50(30) mm块煤;1993年研制出JLT4565大型立轮重介质分选机,应用于范各庄选煤厂13~300 mm块原煤的分选,当平均处理能力为512 t/h、分选密度在1.78~1.80 g/cm³时,可能偏差为0.015 g/cm³,数量效率达99.45%;2009年研制成功的大型高效浅槽重介质分选机应用于陕西、贵州的选煤厂,入料粒度13~200 mm,数量效率达到98%以上。

唐山研究院于1958年开始研究重介质旋流器选煤,1966年在彩屯选煤厂建成 ϕ 500 mm圆柱-圆锥形两产品重介质旋流器分选0.5~8 mm末原煤车间,1969年在田庄选煤厂建成采用 ϕ 500 mm重介质旋流器分选0.5~13 mm末原煤车间;截止1973年,全国使用 ϕ 500 mm重介质旋流器选末煤已有24台。1983年在马家沟选煤厂用浮选尾矿作加重质,用DBZ型重介质旋流器分选跳汰中煤,使全厂精煤产率提高了4个百分点。1984年研制出 ϕ 500/350有压给料三产品重介质旋流器,用于彩屯选煤厂分选0.5~8 mm末原煤,一段可能偏差为0.05 g/cm³,二段可能偏差为0.07 g/cm³,数量效率在90%以上;1990年研制成功 ϕ 710/500有压给料三产品重介质旋流器选煤工艺及设备,应用于鸡西市选煤厂分选0~50 mm粒级原煤,一段可能偏差为0.037 g/cm³,二段可能偏差为0.071 g/cm³。1991年研制成功 ϕ 650

无压给料两产品重介质旋流器,入料粒度为0.5~13 mm,在处理量为80 t/h时,可能偏差为0.045~0.054 g/cm³,有效分选下限达0.2 mm;1992年研制成功 ϕ 710/500无压给料三产品重介质旋流器选煤工艺及设备,当处理量为70~110 t/h时,一段可能偏差为0.03 g/cm³,二段可能偏差为0.043 g/cm³;1996—1999年,承担完成了“九五”国家科技攻关项目“大型高效全重介选煤简化流程新工艺及设备”,研究成功3NWX1200/850大型无压给料三产品重介质旋流器+煤泥重介质旋流器的不脱泥入选简化工艺、SZK4236型双通道振动筛以及重介质选煤过程自动控制系统,系统处理能力为250~350 t/h,一段可能偏差为0.03~0.05 g/cm³,二段可能偏差为0.04~0.06 g/cm³,悬浮液密度控制精度为 \pm 0.01 g/cm³。目前,已形成两产品与三产品、有压给料与无压入料、脱泥与不脱泥、分级与不分级入选等不同选煤工艺的系列化重介质分选设备,旋流器最大直径达1.5 m,最大处理能力达600~800 t/h。

在煤泥浮选方面,唐山研究院在1956—1957年研究国内外有关浮选技术资料,制订煤泥实验室浮选试验方法,测定不同疏水性物料与单气泡的接触角,开始进行浮游选煤理论研究。1959年协助望峰岗选煤厂进行气升式浮选机工业性试验,1961年进行仿前苏联的自吸气式浮选机的研究,1962年研究改进了林西选煤厂的6AM-2.8型浮选机。1965年在选煤中间试验厂进行了田庄、大武口煤泥半工业性连续浮选试验。1966年开始研制XJM-4型煤用机械搅拌式浮选机,该浮选机的研制成功,及时地赶上田庄选煤厂装备浮选系统的需要,用于分选0~0.5 mm煤泥时,单位容积干煤泥处理量达0.6~1.2 t/(m³·h);截至1986年12月,该机在全国推广使用250余台,占当时我国选煤厂浮选机总容量的一半以上。1975年研制成功我国第一代XPM-4型喷射式浮选机,首台应用于鹤岗南山选煤厂。1983—1986年研制成功XJX-T12型浮选机,首台应用于大武口洗煤厂,这是我国当时最大的煤用浮选机,一台的处理量相当于五六台PA-3型浮选机,生产电耗仅为后者的1/2左右,填补了我国煤用大型浮选机的空白。1993年研制出XJM-S16型浮选机,首台应用于枣庄八一选煤厂,采用假底下吸、周边串流的入料方式,解决了直流式矿浆短路、吸入式通过能力受限的技术难题;研究了自吸气机械搅拌式浮选机的模拟放大方法,制定了相似准则,解决了浮选机大型化技术难题;该机属国内

首创,在此基础上,开发了最大单槽容积 90 m^3 的XJM型浮选机系列化产品,得到广泛应用。

在煤泥脱水方面,唐山研究院1985年与洛阳矿山机械厂合作首创了国内WLG-900型沉降过滤式离心脱水机;1994年研发成功GPJ-60型盘式加压过滤机,应用于枣庄八一选煤厂的浮精脱水,滤饼水分在 $18\% \sim 20\%$ 之间;1996年研发成功强气压穿流式一次卸料全自动压滤机,用于浮选精煤脱水,当入料质量浓度为 19% 时,平均处理量为 18.2 t/h ,滤饼水分 17.9% ,滤液浓度为 0.45 g/L 。

在干法选煤方面,唐山研究院1986年开始了干法选煤机理研究,1993第一台复合式干选机问世,分选床面积为 1 m^2 ,在辽宁边杖子煤矿完成工业性试验,入料粒度为 $6 \sim 50\text{ mm}$,生产能力为 10 t/h ,可能偏差为 0.23 g/cm^3 ;1992—1997年研制出FGX-3型复合式干法分选机,分选 $6 \sim 75\text{ mm}$ 易选煤,不完善度为 0.12 、数量效率为 93.97% 。1993年唐山研究院引进俄罗斯CII-12型风选技术,经消化吸收、改进提高,1995年研制成功FX-6型、FX-12型风力干选机。目前FX型风力干选机最大面积达 32 m^2 ,处理能力达 550 t/h 。1996年3月,复合式干法选煤技术专利转让给唐山市选煤成套设备厂(唐山神州机械集团有限公司前身),神州机械集团对其进行了大型化、系列化研究开发,在国内外推广应用。

在筛分破碎方面,唐山研究院1971年研制出GS型 15 m^2 单、双层共振筛;1984年研制出适用于大中型选煤厂的大中块物料分级和脱介用的ZYKH2245重型振动筛;1994年研制出ZK30525直线振动筛。1995年研制出第一台2PLF型分级破碎机;1996年完成了分级破碎机齿形结构及齿布置形式的研究,为新型分级破碎机设计奠定了技术基础;2000年研制成功新齿型分级破碎机,与同类设备相比,生产效率提高 55 个百分点,能耗降低 21 个百分点、使用寿命提高 2 倍。

至20世纪90年代,通过多年的自行开发和引进消化,我国选煤技术取得了长足进步,如自行研制的SKT系列跳汰机、三产品重介质旋流器、XJM-S系列浮选机、微泡浮选柱等大量推广应用,达到了世界先进水平;掌握了国际上先进的选煤方法,已经建立起自己的选煤设备制造体系。先后研制成功 24 m^2 筛下空气室数控风阀跳汰机、 $\phi 1\ 200/850$ 三产品重介质旋流器、 $\phi 3\text{ m}$ 微泡浮选柱、单槽容积 16 m^3 浮选机、 96 m^2 加压过滤机、 $\phi 1\text{ m}$ 离心机、宽

度 2.4 m 振动筛、穿流式精煤压滤机、高效浓缩机、强力齿式分级破碎机、耐磨渣浆泵等选煤装备,逐步在选煤厂推广应用;选煤厂实现了集中控制,重介、跳汰、浮选等关键生产环节的一些参数实现了不同程度的自动化控制;“九五”期间取得的“大型高效全重介选煤简化流程新工艺及设备”等一批重大科研成果成功应用,在2000年以前 400万 t 以下选煤厂装备基本实现了国产化。然而对一些大型振动设备,如 18 m^2 以上振动筛, $\phi 1\ 300\text{ mm}$ 以上的卧式振动卸料离心机,由于国内尚未生产或者技术不过关,一些选煤厂引进了国外产品^[7]。

进入21世纪以来,尤其是煤炭行业“黄金十年”(2003—2012年)的规模化集约发展,对选煤技术与装备产生了更高需求,美国、德国、澳大利亚等在中国纷纷设立分支机构,在承建大量选煤厂的同时,也将国际先进技术装备引入国内,大大促进了我国选煤技术整体进步。

“十一五”(2006—2010年)期间是我国煤炭洗选加工发展速度最快的时期,市场需求促进了技术进步,形成了一批具有较强研发能力、取得多项科研成果的选煤技术与设备研发生产基地,为我国选煤厂建设提供了绝大多数分选和辅助设备。例如:研发成功具有自主知识产权的三产品重介质选煤工艺及主选设备、多供介大型三产品重介质旋流器、大型全自动快速隔膜压滤机、干法选煤成套技术等,均达到国际领先水平,得到大规模推广应用并开始出口;跳汰机、机械搅拌式浮选机、喷射式浮选机、旋流微泡浮选柱、加压过滤机,总体技术达到国际先进水平,成为我国选煤厂使用数量达到或超过 90% 以上的国产设备,基本替代了进口;研发成功接近国际先进水平的各种离心脱水机、分级破碎机、振动筛、磁选机等设备得到应用,迫使同类设备的进口价格大幅下降^[4]。

“十三五”(2016—2020年)以来,形成了包含煤炭洗选、提质加工、清洁转化与污染物控制的洁净煤技术体系。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、大型井下选煤排矸技术和新一代空气重介干法选煤技术成功应用^[8]。S-3GHMC870/410型超级重介质旋流器单机处理量达 810 t/h 、 400万 t/a ,对 $0.5 \sim 50\text{ mm}$ 粒级进行分选,可能偏差小于 0.03 g/cm^3 、数量效率超过 98% ^[9];SID500型超级干选机处理量达 550 t/h ;TDS等智能干选机得到广泛应用^[10-12];XJM-S90型浮选机单机矿浆处理量达 $2\ 400\text{ m}^3/\text{h}$,使 11.00 Mt/a

全粒级入选的特大型长焰煤选煤厂浮选作业实现了单机生产^[13];跳汰、重介、智能干选成功应用于井下排矸。SSC型分级破碎机在大型化、可靠性、应用范围等方面取得了显著进步,最大入料粒度达1 500 mm,最大处理能力为8 000~10 000 t/h,破碎强度为250~300 MPa,广泛应用于全国大型煤炭基地的选煤厂、煤矿井下、露天煤矿破碎站。这一阶段选煤整体技术步入国际领先行列。

2.3 选煤厂自动化水平显著提高,正在向智能化发展

信息技术与选煤工业的融合促进了选煤自动化/智能化的技术进步,提高了生产效率和科学管理水平。在选煤专用仪表及传感器方面,先后研发成功灰分、水分、发热量、悬浮液密度、煤浆流量、浓度、料(液)位等各种在线检测装置,均已应用于工业生产,实现了选煤厂原煤系统、重介质分选系统、跳汰分选系统、浮选系统和产品储配系统的自动控制。这些在线检测装置配合计算机专家系统和全厂监控,为选煤设备的高效运行、生产工艺参数的优化、产品质量的稳定提供了技术保证,提高了生产效率、产品产率和经济效益。

在智能化选煤厂建设方面,2021年,国家能源局印发了《煤矿智能化建设指南(2021年版)》(国能发煤炭规〔2021〕29号)、《智能化示范煤矿验收管理办法(试行)》(国能发煤炭规〔2021〕69号)等政策性文件,中国煤炭加工利用协会组织制定了《智能化选煤厂建设通用技术规范》(T/CCT 005.1—2020)及评价验收等行业团体标准。作为智能化选煤厂建设的典型,国家能源集团神东公司,以“保障安全、降低成本、降低劳动强度、稳定产品质量与提高经济效益”为目标,以“AI人工智能”为核心,把18类子项目通过智能化改造整合为9个项目,形成了智能化建设成套技术方案,实现了区域巡视向无人值守、调度室集中控制向移动集中控制、人工数据采集向系统自动采集、运行状态判断由经验分析向大数据智能分析的转变。该项目从2013年提出建设,经历了“从无到有”的开拓创新之路,取得了智能化建设的阶段性成果。通过智能化实施应用,上湾选煤厂年电力消耗减少8个百分点以上,生产效率提升5个百分点,日均生产时间缩短1 h,煤质稳定率提高了12个百分点,全员工效逐步提升^[14]。

3 选煤技术展望

碳达峰、碳中和战略目标正在加速推进煤炭

清洁高效综合利用,煤炭由单一燃料向燃料与原料并重转变,催生了对选煤技术的更高要求,选煤行业迎来了转型升级的发展机遇。

3.1 加强煤岩显微组分分选技术研究

现代煤化工是煤炭清洁高效利用的重要途径,面向低阶煤中低温热解分质利用、清洁高效转化等现代煤化工产业对高品质原料煤的需求,加强煤岩显微组分分选技术的研究与应用,可促进煤化工产业的低碳化发展,提高煤炭利用效能。煤热解焦油产率、煤液化油产率均随镜质组含量增加而明显升高^[15]。研究表明,原料煤的镜质组含量每提高10个百分点,油收率可提高4个百分点^[16]。然而,由于煤岩显微组分充分解离后粒度细,且不同组分密度差别小,因此煤岩显微组分分选难度极大,至今尚未实现工业化。针对现代煤化工产业对高品质原料煤的需求,应从浮选、重选、光电色选等方面加强煤岩显微组分分选技术研究,一旦突破,对提高选煤技术整体水平和煤炭清洁利用效能具有极大推进作用。

3.2 攻克粉煤干选技术难题

发热量是动力煤的主要指标。粉煤(粒度在6 mm以下)湿法分选后虽然灰分降低了,但是水分明显升高,尤其煤泥滤饼的水分通常在20%以上,导致一些粉煤湿法分选后产品发热量不升反降,因此近年来低阶动力煤多采用脱粉入选工艺,以大大减少产生的煤泥量。但是,井工开采原煤中粒度小于6 mm的粉煤含量通常高达30%~40%^[17],突破粉煤干选技术是进一步提高动力煤质量的迫切需求。

3.3 持续研究大宗低阶煤泥提质利用技术

一是持续研究大宗低阶煤泥浮选提质技术,从高灰分低热值煤泥中分选出合格的精煤产品。针对长焰煤、不黏煤等低阶煤孔隙发达、含氧官能团多、表面疏水性差的浮选难题,一方面需要深入研究不同类型捕收剂与低阶煤表面作用机理,筛选优化捕收剂分子结构,研究不同性质低阶煤的浮选药剂匹配,改善煤粒疏水性;另一方面还要研究适于低阶煤的浮选工艺,加强浮选预处理表面改性,优化浮选搅拌强度、矿浆流态、充气速率、浮选时间等操作参数,以强化浮选过程、提高浮选效率。

二是研究煤泥深度加工利用技术。煤泥粒度细,煤岩显微组分和煤矸的解离度均高于粗粒煤炭,通过深度分选加工,不仅精煤可作为现代煤化工、水煤浆、精细煤粉等分质利用的高品质原料,而且

尾煤粒度细、纯度高,可因地制宜,作为建材、陶瓷等综合利用的原料。

3.4 加强选煤基础理论研究,为智能化选煤厂建设奠定基础

选煤理论与控制模型的建立是实现智能化的重要基础。应在各种选煤方法分选机理基础上建立影响因素间的数学模型或经验模型,作为智能控制策略的重要依据。如果缺乏对各因素之间的作用机理、响应机制和规律性研究,难于科学制订控制策略、实现智能生产。

4 结语

选煤是煤炭清洁高效利用的重要基础。伴随经济发展对能源供给的需求,我国选煤工业经历了从起步、成长、快速发展向高质量发展的不同历史时期,从“一穷二白”到跨入世界先进或领先行列;年入选原煤从500多万t到近30亿t、入选率从7%到超过70%;选煤工艺从单一跳汰到种类齐全、简单高效;精煤产品从炼焦用煤向高品质燃料和原料转变;肩负使命从“洗煤保钢”到节能减排、清洁低碳。通过自主研发设计和引进消化吸收,选煤装备从无到有、从有到优,创新能力从弱到强。选煤技术的进步支撑了我国选煤工业规模化、集约化的持续健康发展和高质量发展,我国正在从选煤大方向选煤强国迈进。

参考文献:

- [1] 刘峰,郭林峰,赵路正.双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J].煤炭学报,2022,47(1):1-15.
- [2] 吴式瑜,叶大武,马剑.中国选煤的发展[J].煤炭加工与综合利用,2006(5):9-11.

- [3] 程子墨,马剑.“双碳”背景下选煤高质量发展研究[J].中国煤炭,2022,48(7):10-15.
- [4] 马剑.我国煤炭洗选加工现状及十二五发展构想[J].煤炭加工与综合利用,2011(4):1-4.
- [5] 李明辉.煤炭洗选加工60年回顾[J].煤炭工程,2014,46(10):24-29.
- [6] 于尔铁.21世纪的选煤与电煤[J].中国煤炭,2000(3):5-7.
- [7] 马剑,叶大武.我国选煤工业主要技术装备现状与今后发展的建议[J].选煤技术,2003(2):1-3.
- [8] 刘峰,曹文君,张建明,等.我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J].煤炭学报,2021,46(1):1-14.
- [9] 刘亿,朱宏政.临涣选煤厂重介系统的改造实践[J].选煤技术,2022,50(1):56-62.
- [10] 张振,谢广元,周光华,等.动力煤分选设备特点及选择[J].选煤技术,2022,50(3):1-6.
- [11] 缙新学,何晨.TDS智能干选机在黄陵一号煤矿选煤厂的应用[J].煤炭加工与综合利用,2020(8):26-29.
- [12] 侯鹏辉.块煤TDS智能干选机在曙光煤矿选煤厂的应用[J].煤炭加工与综合利用,2019(1):39-41.
- [13] 史英祥.XJM-S90型浮选机浮选机的研制与应用[J].选煤技术,2018(4):45-49.
- [14] 罗文.国能神东煤炭集团重大科技创新成果与实践[J].煤炭科学技术,2023,51(2):1-43.
- [15] 周安宁,张怀青,李振,等.低阶烟煤煤岩显微组分分选及其分质利用研究进展[J].洁净煤技术,2022,28(7):1-22.
- [16] 朱子祺.煤制油选煤厂煤显微组分迁移规律[J].洁净煤技术,2020,26(6):89-95.
- [17] 程宏志.碳达峰碳中和战略目标下选煤技术发展的思考[J].选煤技术,2022,50(5):1-6.