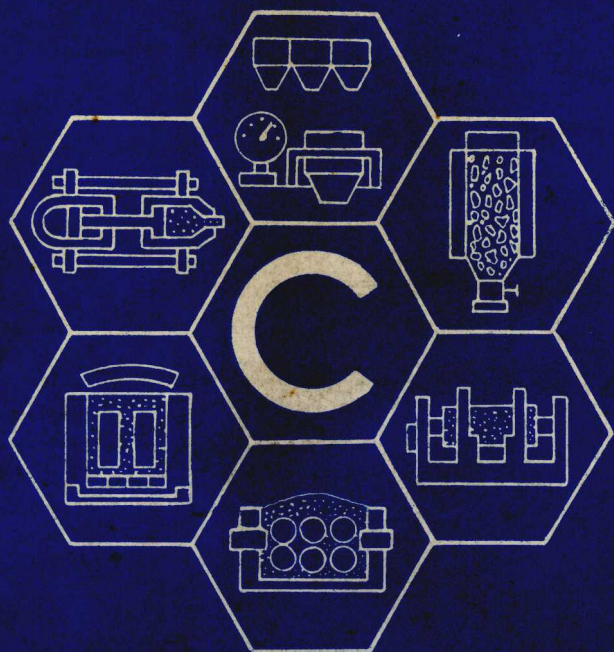




炭素工艺与设备

第 2 辑

CARBON TECHNOLOGY AND EQUIPMENTS

1983

内 容 提 要

本辑着重介绍了原料及煅烧、筛分、混捏、压型、石墨化和机械加工等工艺和设备方面的国内外动态或研究成果，介绍了石墨阳极和碳素糊料的国内外动态，还介绍了各种碳纤维、热解石墨、复合材料等的制造、性能和测试方法，对生产和使用碳和石墨材料的工程技术人员、管理人员、工人和大专院校师生有一定参考价值。

责任编辑：史小罗 徐新建
封面设计：徐敬千

炭素工艺与设备

（第二辑）

黄启震 主编

（内部交流）

*

兰州新华印刷厂印刷

※

开本787×1092毫米 1/16 印张22 1/2 字数534千字

1983年7月 印数1—2500

目 录

我国碳素工业的成就与中近期发展目标.....	傅征蔚 (1)
抚顺石油一厂油焦评价.....	蔡甲林 段文立 (21)
罐式煅烧炉烘炉技术.....	王友德 (33)
莫根生筛分机及其在碳素工业上的试验研究.....	王鉴溥 (47)
混捏工艺和爱里希高效率混捏机.....	史小罗 (73)
试论挤压制品外表裂纹的形成.....	李介车 (95)
型咀几何学 (一)	
电极挤压型咀特性的统计学分析.....	黄启震 (115)
1500吨油压机“背压”现象的成因及排除.....	邵占英 (127)
碳素制品挤压成型设备.....	李国武 顾宝林 秦浩庭 洪建中 (131)
石墨化过程的热力学和动力学分析.....	陈蔚然 (147)
内串石墨化炉电感系数的理论计算.....	尹小鹏 (163)
内串石墨化工艺中, 焙烧电极的温度分布及允许的升温速率.....	饶永生 (185)
关于提高石墨电极加工质量的商榷.....	徐敬千 (197)
苏联电极工业改造的途径.....	王占清 (207)
氯碱工业隔膜槽用石墨阳极的国内外现状和今后方向.....	林定浩 (219)
碳素捣料材质的改进途径.....	续正国 (251)
碳纤维工业展望.....	蒋冬生 (257)
碳纤维生产工艺.....	敬君昌 (277)
碳纤维研究开发前景.....	高瑞林 沈曾民 (299)
由中间相沥青制取高性能碳纤维.....	贺 福 (313)
碳纤维单强、复强及其缺陷的关系.....	杨树根 卫甘霖 (339)
高定向热解石墨 (综述).....	颜志齐 (347)
几种碳/碳复合材料的一些高温短时拉伸性能.....	邹健梧 徐红梅 (355)
《炭素工艺与设备》赞助单位.....	(20)
《炭素工艺与设备》编委会.....	(32)
自然界中炭元素的丰度.....	(46)
炭的同素异构体.....	(72)
沥青软化点测定方法的英美标准.....	(114)

炭素材料科学与炭素工艺学术语订名原则刍议.....	(126)
全炭人造心瓣.....	(130)
无取代基芳族化合物在液相中的反应性.....	(196)
征稿简则.....	(218)
《炭素工艺与设备》(第一辑)勘误表.....	(276)

我国碳素工业的成就 与中近期发展目标

傅 征 蔚

解放前,我国冶金系统的碳素工业基础极为薄弱,仅有两三个碳素材料厂(车间),品种只有天然石墨电极和碳糊产品,质量低劣,工艺装备也比较简陋,分设在抚顺、天津、大同等地,配合电解铝和小型电弧炉炼钢进行作坊式生产。解放后,随着冶金工业的发展,“一·五”中期,国家重点建设吉林碳素厂,从此碳素材料工业的面貌发生了深刻的变化,并在过去的四分之一世纪里取得了重大的全面的进步。

第一部分

碳素材料工业基本成就的回顾

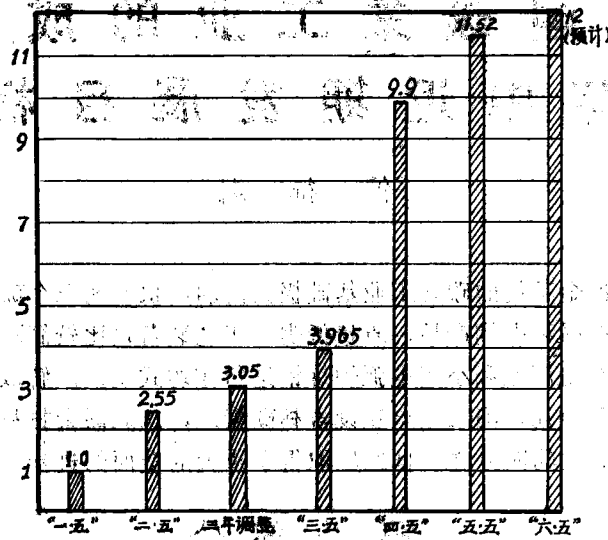
一、合理布局,有计划地建立起碳素工业体系。

经过三年经济恢复后,为了适应冶金、化工、机械等部门生产建设发展的需要,“一·五”与“二·五”期间先后在吉林、上海、抚顺、山东等地新建和扩建了若干个骨干企业。这批碳素企业按商品性与自给性分类,建成独立经营的碳素厂或附设于铝厂的大型碳糊车间。“三·五”期间除重点建设兰州碳素厂外,为了适应地方工业的发展需要,在辽宁、广东、江苏等地筹建一批中小型碳素厂。“四·五”期间,从管理体制上作了调整,将独立经营的碳素厂划归钢铁工业系统领导,全力发展以人造石墨为代表的压型—焙烧—石墨化产品,生产石墨电极、石墨阳极、碳砖碳块,“三高”特殊石墨和电极糊产品,为电炉钢、烧碱、有色金属、机电及军品生产直接服务;原来依附于炼铝厂的碳糊车间继续发展自焙阳极糊与预焙阳极的生产。这些骨干企业都是以较新的技术装备起来的,具有相当的生产规模,和分布在长江南北、京广、京沪铁路沿线的中小企业,组成了我国碳素材料工业的生产体系。现每年生产规模达四十余万吨碳素材料,其中独立碳素厂经销的商品占45~50%,铝厂自用阳极糊与预焙阳极占50~55%。所有品种的规格和质量均能满足国民经济各部门的广泛需要。自1976年以来,每年还有少量石墨电极供出口外销。

二十五年来,以人造石墨电极为代表的主要产品产量,累计已超过100万吨,估计可供用户至少生产一亿吨电炉钢。现以“一·五”期间平均年产量基数为“1”作比较,各个五年计划期间的电极平均年产量增长倍数如下图。

下图说明,目前石墨电极的生产规模已达到开创时期的12倍,约占世界石墨产品总

量的7~8%，居于美国、日本、西德、苏联之后的第五位，这与我国钢产量居世界第五位是相适应的。



七十年代前，石墨电极经常供不上电炉钢增长的需要。自调整独立碳素厂的管理体制后，即1970至1979年的十年中，石墨电极平均每年递增10.5%，绝对数量增加了146%，同期内电炉钢平均每年递增7.2%，电炉钢绝对数量增加了86%，电极供应由长期短缺变为产需平衡的新局面。

产品质量大有提高，每吨电炉钢的电极消耗量降至文革前的低耗水平，还研制成功适应电炉高功率强化精炼作业的高功率、超高功率大电极。

在发展碳素材料工业的过程中，基本实现了生产点的合理布局。按企业的石墨生产规模分析，五、六十年代，大型企业一家独占85%，中型厂占13.5%，小型厂仅占1.5%。而大型厂偏处东北一隅，更受到交通运输能力的制约，这种布局不能适应广大用户的发展需求。1977至1981年，构成比例已改变为：大型厂占60.3%，中型厂占21.25%，小型厂占18.45%。按地区计算：东北占39.7%，西北占24%，华北占6.4%，华东占26.3%，中南占3.6%。布局比过去大为合理，可以适应我国幅员辽阔，逐步提高地区自给率的应变能力，现在全国有三分之一的省、市，石墨电极可以做到省内自给。

国家用于碳素材料工业的投资，累计约4.7亿元，其中大型企业占用61.5%，中型厂占用11.7%，小型厂占用26.8%。从总的投资效果来看，不同规模企业均取得了不同程度的经济效益。对国家而言，碳素产品分配流向日趋合理，缩短的运距，避免了往返运输等浪费现象。象吉林碳素厂那样的大企业，拥有原料好、工艺配套，用电较有保障和稳定的销售市场等优势，历年来为国家积累的资金已超过国家给企业的投资两倍多。但个别新建大企业，因地处边远，基本建设工期长，单位投资比沿海高得多，大大影响投产后的经济效益。尤其在产品的调拨价偏低、电价不统一、固定资产折旧率偏低诸因素没有全面合理调整之前，内地厂比沿海厂的经济效益差得多，但两厂的平均投资效益

还是好的（占用投资61.5%，为国家提供80.3%的产能）。中型企业均在东南沿海，地区协作条件好，建设工期短，投资比较节省，企业又重视搞好多种经营和延伸加工，投资效益比大厂还好（占用碳素投资11.7%，为国家提供21.25%的产能）。小厂的建设，对于改善布局，逐步提高省、市自给能力，正在发挥它的作用。过去十年里，小厂对弥补全国碳素材料的短缺起到了积极的作用。但有的省出现了重复项目，分散使用有限投资，造成工艺不配套，延长建设工期等后遗症，有些厂由于缺乏经验想搞“小而全”，结果是难于摆脱“散而差”的被动局面。小型企业共使用碳素投资的26.8%，至今只发挥总产能18.45%的效益。

总的来说，碳素投资效果普遍不够理想，不同类型厂的效益更是参差不齐，通常大中型厂优于小厂，沿海厂优于内地边远厂，自筹资金建厂优于国家投资厂，生产民用品优于军品效益，诸如此类问题，都需要在调整时期中，区分不同条件择优进行技术改造，尽快改善其经济效益。

二十五年来，碳素企业为国家提供石墨阳极17万吨，估计可供化工部门生产2200万吨烧碱；提供碳块碳砖25万吨，不仅保证了全国电解铝工业的生产维修需要，还为重点炼铁企业大中型高炉的炉底炉缸部位提供了碳砖，迄今为止，改用碳质材料砌筑炉底炉缸的高炉已达40座，其总容积约32000m³，炉容最大为2580m³，最小为300m³，除大量使用焙烧加工碳砖外，还使用我国独创的自焙碳砖，大宗初级产品电极糊，共向用户提供150余万吨，广泛用于电石、电炉铁合金、黄磷、磨料等产品的生产，这四种产品的年产量约达200万吨。各碳素企业还利用石墨坯料搞延伸加工，每年向化工、有色金属冶炼厂提供10000至15000m²的石墨热交换器，以及耐酸耐碱石墨反应釜，综合生产种类繁多、用途特异的碳和石墨器件、碳纤维织品和热解石墨等等，这里就不一一列举。

各碳素厂为了提高经济效益，在产品结构调整方面做了大量工作。随着国内市场需求情况的变化，有的侧重抓高中档产品的增产，有的厂打破人为规定的品种比例，压长线补短板；有的厂改进经营作风，增长改制过去不愿干的低利异型小产品；有的厂大力增产电池碳芯棒、光谱碳棒，为轻工市场和科研测试配套，从薄利中求多销，每年销售近万吨碳芯棒，5~6吨光谱纯碳棒。目前，经过初步调整生产方向后，亏损的企业自见减少，有的已取得扭亏转盈、节支增收的经营效果。

二、利用丰富的优质石油焦焦炭资源，采用适合国情的新工艺，增产适销对路产品。

冶金工业使用石油半焦作为生产炼钢石墨电极和炼铝阳极糊的原料，在我国已有三十年的历史。但大量使用则是在大庆油田投产以后，同时，石油焦的原料油和焦化工艺亦发生了根本性的变化，从产量极微的油页岩质釜式焦发展成年产数十万吨延迟焦化石油半焦。我们碳素工作者面对石油工业飞跃发展中油焦生产工艺的大变革，积极而又及时地对挥发份很高、成分不稳定的生延迟焦进行煅烧攻关，各企业因地制宜地改造罐式煅烧炉，回转窑以及冶金焦炉的炉体结构和操作制度，调配入炉原料成分，充分利用半焦挥发物的热能等技术措施，成功地掌握起一整套煅烧石油焦技术，可将挥发份10—13%（用焦炉可达16%）的低硫延迟焦加工成比电阻 $460\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{M}$ 、真比重2.08~2.10、

强度较好的电极用焦。1978年吉碳逆流罐式煅烧炉荣获冶金部科技大会成果奖。大庆油田开发前，石油焦的供应严重不足，在自力更生方针指导下，钢铁联合企业焦化厂每年向碳素厂供应大量煤沥青焦。这种我国特有的优质碳素原料，对碳素材料工业的顺利发展起了至关重要的支援作用。

无烟煤是生产碳块和电极糊的主要原料，而使用碳块碳砖电极糊的高温熔炉，正日益向设备大型化和密闭式作业发展，从而对无烟煤的灰分含量提出了严格的限制。我国碳素厂不仅可以从山西、宁夏煤炭基地获得灰分较低、热稳定性优良的无烟煤，今后还将得到贵州等煤炭基地的扩大供应。可是，我国的原生（或经粗选的）无烟煤，其灰分一般高达8~15%，必须进行洗选或化学净化处理，将灰分降至2~8%，甚至更低。为了生产高质量的碳块碳砖，有的工厂成功地采用跳汰式洗煤机，将原煤灰分降至5~8%以下，洗剩的含矸煤还得到了综合利用。

某设计院和工厂合作，在当地缺乏油焦的条件下，利用精选宁夏无烟煤（灰分1.5%左右），经特殊工艺处理，研制成石墨化度达85%的石墨阳极。灰分5~6%的无烟煤，如经电煅烧处理后，是生产密封电极糊的理想原料。

我国生产的碳和石墨材料品种已初步形成系列，除石墨电极、石墨阳极、炉衬碳砖及各种糊类产品外，还生产新型碳—石墨材料，如：高纯石墨、核石墨、高强度高密度石墨、细结构冷压石墨、涂层石墨、碳纤维、碳毡、碳—碳复合材料、热解石墨、生物碳等总计三十多个品种，几百个规格，基本可满足我国社会主义建设的需要。热解石墨喷管材料，各向同性碳质心脏瓣膜等品种荣获国家和冶金部科技成果奖。近几年，大型碳素厂为适应电炉炼钢工业提高用电功率的技术变革，使电弧炉作为一种主要的独立的钢生产工艺发挥更好的经济效益，利用国产和进口针状焦研制成功超高功率高功率石墨电极，电极的使用电流密度达到 $24\sim30\text{ A/cm}^2$ 以上的国际先进水平。

石墨产品的质量水平，自1977年以来逐年提高，一些主要品种的质量超过历史先进水平，如石墨电极和石墨阳极的使用单耗均已恢复或超过历史低耗水平。六十年代中期，以吉碳为主供应公称五吨电炉的吨钢消耗电极5.22公斤（注：配备2250~3000KVA变压器，出钢量达10~12吨）。近三年的统计资料表明，东北、华北、中南等地的电炉，使用吉碳电极的单耗已降到5公斤以下，例如，大连钢厂为3.9公斤/吨钢，本钢为4.8公斤/吨钢，大冶为5.0公斤/吨钢，抚钢为5.2公斤/吨钢等。吉林碳素厂 $\Phi 350\text{ mm}$ 电极及兰州碳素厂 $\Phi 300\text{ mm}$ 电极被评为冶金工业部的优质产品。目前重点厂的电极优级品率能稳定在94.2~97.5%的优异水平上。供应全国电化厂的石墨阳极，每吨烧碱平均净耗已降到6公斤的低耗水平。所有这一切，标志着我国碳素工业的技术进步，初步实现了石墨产品质量升级换代的规划。产品标准方面，我们参照国际先进技术指标建立起来的标准（分国家与部级两种），已取代原来的仿苏老标准。

国家为了发展电石、黄磷、铁合金等的生产，花费巨额资金建设起一批大型密闭式矿热电炉，装备有10000~40000KVA变压器，重点碳素厂为满足大型矿热炉安全生产的要求，积极研制并扩大了密闭电极糊的生产，可以做到按地区就近供应：吉林碳素厂负责供应东北、华北及长江以北华东的用户，上海碳素厂负责供应华东以及部分中南用户，兰州碳素厂负责供应西北、西南的用户。在质量方面，经不断改进密闭糊的配方，

在用户的密切配合试验下，已取得比较令人满意的结果。与过去相比，“流糊”软断事故显著减少。配入石墨化焦、石墨碎等优质原料的密闭糊，具有良好的导热性和导电性，有助于加快糊料的烧结，使电极的烧结速度等于或略大于其消耗速度，密封糊的比电阻值亦比标准糊低，有利于提早起导电作用，减少因电极铁壳过负荷击穿而引起“流糊”软断事故，从而达到连续自焙正常运行的要求。用户使用电阻低的电极糊，还可以降低产品的单位电耗，烧结良好的自焙电极，具有较高的机械强度与安定的高温性能，能够大大减少电极的压放量，降低电极糊的消耗量，有助于实现安全生产，达到低耗低成本的目标。

三、碳素材料主要工艺与设备，初步实现了技术改造。

1. 碳素材料的成型，既发展传统的挤压工艺，又采用振动成型工艺。

碳和石墨品种繁多，形状各异，大截面体居多，传统的挤压工艺，只限使用圆形、矩形、方形等压型咀，将糊料挤压成特定外形与密实度的条状物，再按定尺剪切成生坯，这种挤压品都具有较大细长的特征。

十年前吉林碳素厂与贵阳铝镁设计院按冶金部下达的任务，为了解决特大截面带“短粗”特征的碳和石墨制品的生产，研制用振动成型机生产碳素制品的新工艺，取得了成功。这种按碳素工艺特点建立起来的新成型设备，设计采用齿轮箱同步传动、双轴振动，偏心轴加偏心配重、顺序控制作业等技术特征；经1973年8月技术鉴定证明，振动成型产品的使用效果接近或超过挤压成型品，是解决大异型碳素材料的又一种新成型设备。特别对目前缺乏大型挤压机的某些企业来说，因振动成型机结构简单、制作容易、投资仅为挤压机的20~30%，花较短的时间，可以生产出2500吨水压机尚不能压制的异型特大截面产品，从而受到生产厂的普遍欢迎，这项成果已荣获1978年冶金部科技大会成果奖，并在国内铝厂、碳素厂初步推广应用。

振动成型机与1000~2500吨挤压机相比，有四个方面的适用特征：（1）中小型碳素厂可用来生产 $\Phi 200$ 毫米以上的电极、坩埚及石墨管等异型产品，长度可达1200毫米；（2）生产炼铝用预焙阳极，特别是大截面带有导杆槽孔的异型阳极；（3）用于生产大截面铝电解槽阴极碳块、高炉碳砖（例如 $500 \times 750\text{mm}$ ），可提高成品率，减免磨砖工作量；（4）用于生产大直径电极（例如 $\Phi 400 \sim 880\text{mm}$ ）和大型石墨块。

近年来，我国从西德克哈德（KHD）公司引进了包括称量装料、振实、脱模三个工位的转台式振动成型机，可为国产振动机的技术改进提供借鉴。由此可以期望振动成型工艺与传统挤压工艺并行不悖地得到发展，成为增加碳素品种规格的一支生力军。

挤压机属于国家控制的重点大型成套设备，设备费用占碳素投资的很大比重。现有碳素厂普遍正视国家投资困难的情况，一方面对1000~2500吨水压机设备和压型工艺进行维护和改进，不断发挥效率，增产了成倍的压型品。例如在糊料缸增设了抽真空装置，使体积密度提高 0.10克/厘米^3 左右，有的厂采用了“逐根预压”措施，压制出 $\Phi 400\text{mm}$ 体积密度大于 1.65克/厘米^3 的生坯。我国第一台5000吨水压机已在兰州碳素厂顺利投产，这台带有立捣预压结构的大型挤压机，可以成型 $\Phi 400 \sim 700\text{mm}$ 大电极和 $600 \times 700\text{mm}$ 大型碳砖。另一方面，根据领导部门的规划，为了适应钢铁发展的需要，在资料不

足,加工设备不配套的情况下,南通、兰州、吉林等碳素厂发扬自力更生精神,并得到湖北、江西等钢铁厂的大力支持,协作制造2500吨或1500吨挤压机10套,现已顺利投产6~7套。

这批自制的挤压机,经多次实践验证,选定的1500吨电极挤压机技术参数是经济合理的,一次试车成功,能够满足销量最大的 $\phi 350\text{mm}$ 石墨电极生产要求,生坯结构致密强度大,体积密度达到 $1.66\sim 1.69\text{克/厘米}^3$,设计采用高压油泵直接驱动、活塞式副缸、小型挡板架、副缸差压式油路传动及咀型、料缸工频感应加热五项新技术新结构,传动平稳、噪音较低、以油代水作介质免使机件锈蚀与密封件过早磨损等技术性能均优于传统的水压式电极挤压机。造价要比外购便宜20%,从制造安装到投产的建设工期只用四年左右。这批性能优异的油压挤压机将在1985~1990年的经济发展期间内逐步发挥重大作用。

2. 大力研制并推广直流石墨化新技术,取得了重大的节电增产效益。

建设吉林、兰州、上海等大型碳素厂时,对石墨化工艺与设备的选用,无一例外地都沿用了艾契逊式石墨化炉,采用交流单相供电方式,将呈无定型碳的焙烧品加热转化成晶体结构有序化的人造石墨毛坯。根据七十年代初期的统计资料,当时投产的交流石墨化炉为100000KVA/17组,省市碳素厂部分试产与建设中的交流石墨化炉约有36000KVA/18组。这种沿传八、九十年的艾契逊式交流石墨化炉普遍存在如下缺点:

- (1)电耗高,实际用于碳转化石墨的能量仅占用电量的30%;
- (2)因电阻炉功率小,炉温低,石墨产品质量很不稳定,以比电阻为质量考核指标的优品率不高;
- (3)单相用电给三相电流带来不平衡,产生负序分量电流,不仅动力设备起动困难,还危及电网的三相平衡,当电容补偿条件不足时,功率因数很低,长期遭致罚款;
- (4)地区小电网出于安全供电考虑,不允许交流石墨化炉运行;
- (5)交流石墨化炉短网具有集肤效应和邻近效应,一般短网损耗达26%。

1970~1971年,北京冶金设计公司、沈阳铝镁设计院分别在北京、南通碳素厂的设计中,采用了直流(交流电经单晶硅整流)石墨化技术。1972年10月北京碳素厂利用一台水银整流变压器改造成我国第一台直流石墨化原型机组,变压器容量3000KVA,一次电压10KV,一次电流173A,二次相电流 $2\times 8300\text{A}$,带13级有载调压开关,强迫油循环水冷却,整流设备接成双Y带平衡电抗器的六相半波整流,输出电流35000A。石墨化炉长9.28米,炉芯截面 2.2m^2 ,装炉量15吨,直流送电时间与电耗均比交流炉下降25~30%,试验取得了成功。冶金部钢铁司于同年11月中旬在该厂召开现场会议,交流了经验,肯定了成绩,指出直流石墨化炉新工艺是发展我国石墨化生产的新途径。

次年1月,南通碳素厂自行改制的第一台13500KVA大型直流化机组投产运行,石墨阳极电耗低于4000KWh,约比吉林厂5000KVA交流炉节电20%以上。至此,冶金部再次召开会议,根据国内外石墨化技术的发展动向进行总结,并采取具体措施:(1)决定为省、市碳素厂制造一批石墨化整流机组设备,请贵阳铝镁设计院负责提出技术参数与性能要求:变压器额定3340KVA,短路阻抗10%以下,主、调、炉变三合一,强油循环,10KV和35KV两种直降,15级有载调压开关,整流柜采用同相逆同联三相桥式

结线, 直流输出电压范围95~38V, 调压级差在5V以下, 输出电流 $2 \times 20000\text{A}$ 。并拟以此设备为基础编制省、市碳素厂工艺配套通用设计。(2)要求吉林碳素厂参考南通、北京、贵阳三种直流石墨化工艺设计参数和设备运行经验, 研制更大功率石墨化变压器整流机组。吉林厂1975年9月制成第一套ZSSPZ-16000/60变压整流机组并顺利投产, 其后又有三套大型石墨化炉投产, 折除了三分之二旧式交流石墨化设备。这三套大功率整流机组容量均为16000KVA, 二次电流为100~125KA, 技术性能又有新的提高, 归纳为主、调、炉变三合一, 66KV直降, 正反激磁, 27级有载调压开关, 同相逆并联, 三分之一进出线, 以及水冷30KA大电流开关等。经长期运行的技术经济指标如下: 通电时间36分/吨, 电耗3949度/吨, 功率因数0.91, 优级品率99%, 炉温2700℃, 产品比电阻 $7.39\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{M}$; 分别比5000KVA交流炉缩短通电时间52%, 节约电26%, 提高功率因数26.4%, 增加优级品率3%, 提高炉温400℃, 降低比电阻17%。在1978年冶金部科技大会上分别授于沈阳院、南通、吉林碳素厂大功率直流石墨化炉以科技成果奖。

1978年10月兰州碳素厂将三套3340KVA整流机组并联运行, 同样取得可喜的技术经济效益, 二次电流达103.3KA, 最高功率达10470KW, 通电时间43分/吨, 电耗4200度/吨, 功率因数0.94, 比8820KVA交流炉缩短通电时间47%, 节电21%, 优级品率逐年上升到目前的92%的好水平。

最近, 抚顺碳素厂按照笔者建议, 对直流石墨化炉通电工艺进行强化试验, 先用单机(一套3340KVA机组)送电, 待炉温升至1700℃时, 与第二套机组并联运行, 直至炉温2600℃停炉, 试验炉的电流密度达 $2.25 \sim 2.5\text{A}/\text{cm}^2$, 通电时间降至40小时以下, 装炉品电耗3700度/吨。与过去单机运行比较, 直流石墨化机组的技术经济潜力还是很大的。

综上所述, 近几年发展起来的大型或小型直流石墨化新工艺设备, 已达到国际先进水平。投产设备的总容量约有126000KVA, 基本上顶替了原有交流石墨化设备, 并在不同规模的碳素厂内普及应用, 若以每年生产4万吨石墨产品计算, 则可节电5~6千万度。

尽管近十年来, 各地供电情况普遍短缺, 由于我们大力推广直流石墨化新技术, 不仅不减产, 反而出现了年年增产, 十年翻番, 同时节电数亿度的显著效果。现在可以肯定地认为, 直流石墨化新工艺是成功的, 它在节电、优质、增产方面发挥了主导作用。用于改建交流设备, 增加整流机组部分的投资, 不仅得到了补偿还有盈余。碳素业界普遍认为, 直流石墨化工艺技术是先进的, 经济上也是合算的。但是, 由于经验不足, 这批新设备还存在着装出炉机械化、填充料处理、厂房炉体结构等方面不配套的问题, 应在调整时期因地制宜地加以改进。我们相信, 经过统筹规划的技术改造后, 石墨化能力还可能比现有水平翻一番, 并为国家节约更多的电力。

3. 采取综合技术措施, 全面节约能源, 调整产品结构, 改善劳动保护条件。

碳素石墨材料生产具有工艺流程长、工序多的特点。从原料到成品的生产周期约需40~50天, 要经过十一道工序, 每道工序加工的好坏, 都将最终影响产品质量与使用效果。我国碳素产品的质量, 之所以能达到今天的水平, 应该说是关键与一般的工艺设备进行了综合技术革新的结果。与五十年代初期苏联援建的技术模式相比, 发生了很大的

变化。除了上面说到的煅烧、成型、石墨化三大工艺有了重大变革外，还对碳素生产工艺的全过程进行科学实验与研制，取得了不同程度的技术进步与经济效益。现按工序先后将各单位取得的科技成果汇列如下。

- (1) 对我国石油焦性能的调查研究；
- (2) 对我国煤沥青性能的调查研究；
- (3) 煤沥青熔化输送与自动称量；
- (4) 回转窑和罐式炉可燃烟气的余热利用；
- (5) 煅后焦风动输送管道的革新；
- (6) 使用概率筛筛分焦炭粒度；
- (7) 电磁振动给料机可控硅控制操作；
- (8) 挤压机压型咀工频加热及料缸真空脱气装置；
- (9) 环式焙烧炉节能与炉型结构改进；
- (10) 真空高压浸渍和二次焙烧技术；
- (11) 焙烧炉填充料抽吸装置及焙烧品表面粘料清理机；
- (12) 焙烧炉沥青烟气静电集尘器净化；
- (13) 脉冲收尘器净化回收碳粉尘；
- (14) 连续石墨化炉试验；
- (15) II型炉石墨化炉试验；
- (16) 电极接头加工自动线；
- (17) 电极接头粘固材料——栓、粘胶片、碳销钉；
- (18) 抗氧化涂层电极的研制；
- (19) 小碳棒压型、剪切、调直、槽整、加工的连续机械化；
- (20) 碳素产品技术经济指标统计方法。

第二部分

碳素材料工业的中近期发展目标

建国以来，我国碳素工业从无到有，由低到高，有了很大的发展，总的来看，适应了电炉炼钢发展的需要，经济效益也在逐步好转。但是，目前碳素工业的经济效益还不够理想，我们的产品在国际市场上还没有竞争能力。今后，我们应在国家计划的指导下，以提高经济效益为前提，以提高产品的性能和质量，降低能源和原材料消耗为中心，加快现有企业特别是骨干企业的技术改造，使它们的生产技术水平有一个较大的提高。

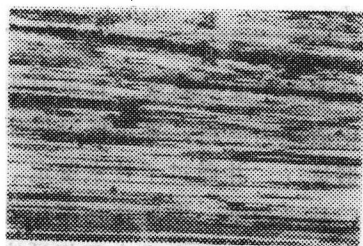
一、发挥我国碳素原料资源优势，采取战略性措施，尽快实现精料与综合利用。

针状焦是碳素工业的一种新型优质原料。针状焦有两种。一种是以石油渣油为原料炼制的油系针状焦，它是四、五十年代由美国大湖碳素公司与大陆石油公司先后研制成

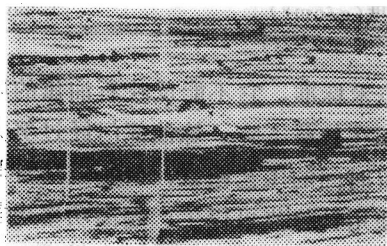
功，并于六十年代开始工业化生产的，目前全世界年产量80余万吨，它的热膨胀系数较普通石油焦小一、二倍，且容易石墨化，焦碳晶体结构以成束的纤维状。另一种是从煤焦油炼制得到的煤系针状焦，又称沥青针状焦，它是七十年代至1980年6月由日本三菱化成（株）和日铁化学工业（株）先后试制成功的，现年产十万吨，国内消耗约70%，其余30%外销到西德、美国与苏联。煤系针状焦的原料性能及其制成品的使用效果毫不比油系针状焦逊色，而售价则便宜10%，是一种很有竞争力的新原料。现将两种煨后针状焦的性能与试制品指标比较如下：

技术指标 品名	焦炭筛分焦炭理化性能										
	<12 mm (%)	12~4 mm (%)	4~2 mm (%)	<2 mm (%)	灰份 (%)	挥发份 (%)	水分 (%)	硫分 (%)	粉末 比电阻 ($\Omega \cdot \text{mm}^2$ /M)	真比重 (g/cm^3)	K值
日铁煤系针状焦	24.6	23.4	14.5	37.5	0.03	0.64	0.01	0.21	573	2.12	(4~2mm) 1.86 (2~1mm) 2.10
水岛油系针状焦	33.8	31.6	11.8	22.8	0.04	0.59	0.09	0.29	601	2.11	(4~2mm) 1.70 (2~1mm) 1.80

焙烧试样			试制品性能									
体积密度 (g/cm^3)	体积 收缩 (%)	重量 烧损 (%)	比电阻 ($\Omega \cdot \text{mm}^2$ /M)	CTE ($100 \sim 600^\circ\text{C}$) ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	体积密度 (g/cm^3)	真 比 重	灰分 (%)	杨氏 模量 (kg/mm^2)	抗折 强度 (kg/cm^2)	抗压 强度 (kg/cm^2)	d_{502} ($\text{\AA}$)	石墨 化度 (%)
1.492	1.59	11.66	10.13	1.5 ± 0.05	1.398	2.23	0.15	935	164.3	122	3.379	71
1.53	5.07	13.28	13.26	1.7 ± 0.04	1.486	2.24	0.23	995	103.2	134	3.378	72



日铁煤系针状焦400×



水岛油系针状焦400×

两种针状焦制得的高功率电极的性能与使用情况如下表：

我国石油与煤炭资源蕴藏丰富，年产原油1亿吨，原煤6亿吨，经炼油厂或焦化厂加工成80~90万吨石油焦及40万吨沥青与沥青焦，就数量而言，足以满足碳素工业和炼铝工业近期发展的需要。

然而，在石油焦方面，其生产工艺已由釜式焦化基本改造成延迟焦化，并建成了占生产能力百分之九十以上的延迟焦化装置。迄今为止，延迟石油焦仍沿用被淘汰的釜式

浸渍电极尺寸		φ610毫米×2400毫米				φ508毫米×2100毫米				φ508毫米×1800毫米			
电炉钢厂		A 厂		B 厂		C 厂		D 厂		E 厂		F 厂	
针状焦种类		煤系	油系	煤系	油系	煤系	油系	煤系	油系	煤系	油系	煤系	油系
试用电极根数		142	500	200	67	160	200	280	470	40	73	173	100
电极单耗(kg/t)		4.2	4.7	3.16	3.3	3.28	3.65	3.85	4.19	3.7	3.8	3.8	4.0
事故分析	丝孔破损(%)	0.7	1.0	2.0	3.0	3.1	2.5	0.7	0.2	0	0	0	0
	丝头破损(%)	1.4	1.2	0.5	0	0	0	0	0	0	0	1.7	2.0
	端头龟裂掉块(%)	0	1.4	0	0	1.9	8.0	2.9	10.4	5.0	15.0	0	0
电炉容量(t)		120		150		70		70		60		70	
变压器容量(MVA)		56		40		35		45		45		40	
使用电压(V)		740		670		525		675		580		550	
最大相电流(KA)		71		55		43		45		59		40	
电极典型特征比较		煤系针状焦高功率电极						油系针状焦高功率电极					
热膨胀系数(10 ⁻⁶ /℃)		1.35						1.50					
比电阻(10 ⁻⁵ Ω·cm)		49						51					
抗断强度(kg/cm ²)		110						126					
杨氏模量(kg/mm ²)		920						900					
体积密度(g/cm ³)		1.656						1.671					

油焦技术标准,它不能反映石油焦的质量,又不能满足碳素工业的要求,且延迟生焦的质量正在日益下降。炼油部门经过努力,以大庆热裂化渣油为原料,采用低温低压低速长停留时间的工艺路线,研制成功针状石油焦(未经煅烧),并通过了技术鉴定。碳素工业使用针状焦可以生产超高功率电极,适应电炉钢厂技术改造、发展高功率炉外精炼等新工艺的需要。应尽快转产供应。为了把我国石油焦质量与国际先进水平相适应,笔者曾与桂竞先、孙义诚等同志共同起草了冶金用石油焦(未经煅烧)国家标准建议稿,提请有关领导部分审定,其简要内容如下表。

同时,现行的石油焦调拨价存在着不合理现象。国外一吨煅后普通焦的价格相当于1.8~2吨原油价,一吨煅后针状焦价格相当于2.5吨原油价。我国现行石油焦调拨价与国际市场的比价关系是颠倒的,油焦比原油便宜。此外,据国外资料介绍:用减压渣油生产普通焦的产品收率中,可燃气体占7.1%,汽油20.5%,柴油49.5%,生焦22.9%,用热裂化渣油生产针状焦的产品收率中,可燃气体占16.5%,汽油4.2%,柴油21.2%,

	高功率石墨电极用焦	普通石墨电极用焦	铝工业用焦
灰分(%), 不大于	0.15	0.5	0.5
硫分(%), 不大于	0.3	0.5	1.0
挥发分(%), 不大于	8	10	12
水分(%), 不大于	3	3	3
热膨胀系数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) (试样经1000 $^{\circ}\text{C}$ 焙烧后)	1.6	2.0	—
平均K值, 不小于	1.73	1.63	—
焦炭块度(<5mm) (%), 不大于	20	20	—

生焦58.1%。显然炼油部门着眼于减压渣油焦化时可以获得较高的汽柴油收率与经营利润,影响着普通油焦质量的提高和针状焦的生产。而碳素工业却只对针状焦的优良性能感兴趣。这种供需之间的矛盾,应运用经济杠杆通过调整价格加以解决。我们认为,应根据优质优价,分等计价的原则,协商报请国家物价部门进行合理调整,并相应调整碳素产品价格。

我国冶金焦炭年产量达三千万吨,其中63%是由大型钢铁联合企业焦化厂生产的。在炼焦炉干馏生产焦炭时副产大量焦油,估算的粗焦油量不下135万吨,煤沥青35万吨及煤沥青焦7万吨。过去对如此大量的煤焦油,只有一部分加工成化工原料,其余部分既未得到合理利用,也没有以新的碳化技术生产高级碳素原料——针状沥青焦。我们认为,钢铁业界可以参照石油针状焦的工艺原理,研究脱除焦油中喹啉不溶物等重质成分,将焦油中芳烃化合物进行脱氢缩合反应,利用多环芳烃在碳化过程中形成中间相小球体制取煤系针状焦的实用技术,综合利用好煤焦油资源。应该作这样的展望,煤系针状焦在我国的诞生只是时间问题,它的优良性能与油系针状焦有“异曲同工”之妙。届时,碳素生产部门将同时获到两种国产针状焦,无疑可大大加快高档碳素产品的发展。

笔者还建议:待辽宁省的原油供应好转时,在鞍钢炼油厂的炼油装置后面增设一套针状焦焦化装置,将鞍钢炼油厂的常减压渣油与附近的抚顺、大庆、锦西、辽化炼油厂用作燃料的热裂化渣油、乙烯渣油对调,让鞍钢炼油厂有足够的热裂化渣油与乙烯渣油生产延迟针状焦,并利用准备停下的沥青焦炉煅烧延迟针状焦。

釜式焦的淘汰,延迟焦的广泛使用,给碳素原料的煅烧技术带来了因挥发份偏高而难于煅烧的新课题。国外炼油业界重视对回转窑、回转床煅烧炉进行热工、机械运转系统的全面革新,这个问题早已得到解决,煅烧时基本上毋须外加燃料,并实现了连续化自动化操作,煅后针状焦的真比重可达2.10~2.14。在我国,也曾在这方面做过很多工作,取得了一定的效果。如,某些碳素厂和铝厂的阳极糊车间,推广吉碳逆流式罐式炉的先进经验,改造罐体结构,采取相应的操作制度,成功地用罐式炉余热于熔化沥青和浸渍加热工艺,收到了优质节能的效果。但罐式炉产能小,造价较贵,维修费用高,操作条件差,对新厂建设而言,终究不是有发展前景的煅烧装置。因此,完全有必要对贵铝引进工程中的炭素回转窑和电煅烧炉进行消化,汲取其中有益的精华,对现有回转窑

进行技术改造，或结合我们的具体情况和条件进行移植。

贵铝引进的回转窑，其整套装置和工艺技术培训，均参照日铁化工（株）的针状焦回转窑。初步分析，这种回转窑的特点是：直径大，窑体长，高温带采用空心氧化铝球作骨料的浇注料砌，炉衬的抗热震与耐磨耐蚀性能好，窑筒体中间设有二次风轴向喷射管，冷却筒内大半部直接喷水冷却等。若在这些方面对我国回转窑作相应改造，我国回转窑的经济技术指标将会明显提高：产能从目前的20公斤/时·米³提高到60公斤/时·米³，碳质烧损率则由10~12%降为7%，能耗可从24~40万大卡/吨煨后焦降为10万大卡/吨煨后焦，窑衬大修期由半年左右提高到一年以上。

焦炉作为我国第三种煨烧设备，具有碳质烧损小，产能大，完全不外加燃料，操作稳定，煨后焦质量理想等优点。我国早有用冶金焦炉生产煤沥青煨后焦与电极用石油煨后焦的成熟经验。但是，焦化厂习惯于炉外喷水熄焦操作，煨后焦水分很高，影响着细粉碎后焦炭颗粒级配合的准确性，严重损害了对焦炉煨烧优越性的评价。为了向碳素厂供应干焦，可参照贵铝回转窑的冷却筒内用控制喷水量冷却炽红焦炭的原理，将自焦炉落下的炽热红焦转运入密闭筒室内，向料面喷洒一定比例的清水，进行控制喷水量的熄焦作业。还应对因喷水急冷红焦引起的水淬粉化现象进行研究。此外，焦化厂外销煨后焦时，还应推广集装箱尼龙编织袋包装办法，避免雨淋和混入杂质。

供电充足的地区应当发展电煨烧工艺。多数碳和石墨材料是作为导电材料和抗化学腐蚀材料使用的，而制品性能的好坏，取决于煨烧、焙烧与石墨化的热处理温度。原料煨烧是重要的第一关，煨烧温度应高于焙烧温度，在电气煨烧炉中，被煨烧材料同时起着电阻发热体的作用，炉温比燃油燃气窑炉高得多，在1700~2000℃条件下部分煨后焦已呈现半石墨化现象。贵铝引进工程中也有电煨烧炉，可消化移植于石油焦、精选无烟煤的煨烧处理，为生产大型铝电解槽阳极碳块及4000~5000m³级高炉用石墨——碳砖提供精料。

二、改造利用好现有电极挤压机，总结提高真空卧摆成型新工艺。

运行的1000吨级和2500吨水压式电极挤压机各有10套，两、三年内还将陆续投产一批1500吨级油压式电极挤压机。我们如对现有挤压机的产能效果考核评议，多半可谓不够理想。国家给企业配备的挤压机台数偏多，但压力吨位偏小，且技术性能比较陈旧，工厂对此类设备的保养与操作管理都比较差，因此，生产的压型坯体积密度偏低，显气孔率较高，断面组织结构不够均匀，生坯与焙烧品的外形废品比国外同类厂多。

调整时期内，要国家拿出很多资金来添置大吨位挤压机是不可能的。有重点地对电极挤压机等主体设备进行技术改造，无疑是十分必要的，在现有基础上搞改造具有多方面的有利条件，能够解决质量关键增加适销品种的生产。只要坚持这个目标，就可以做到化钱少，见效快，收益大。

笔者以为，围绕挤压机的技术改造问题，有如下科研课题急待解决：

（1）使现有水压式技术状况复原，按铭牌工作压力作业，克服普遍的低压运行现状；

（2）水压改油压，采用高压油泵直接驱动装置，取代水介质泵阀管路系统；

- (3) 改用副缸压差式油路传动装置, 增加挤压机的总压力;
- (4) 在糊料缸内增设抽真空脱气装置, 压型品密度约可提高 0.10 克/厘米^3 ;
- (5) 压型咀料缸采用工频感应加热, 适应高温沥青糊料的塑性变化, 取代蒸汽加热;
- (6) 优选压型咀喇叭型曲线的数理研究与模拟试验;
- (7) 对挤压坯使用同步剪切装置, 定尺剪切偏差要小, 断口要平整;
- (8) 试用鼓形冷却筒改善糊料的松散性, 降低噪音与沥青烟的排放浓度;
- (9) 挤压机的自动程序控制操作机构。

不论挤压成型或模压成型, 均以大吨位压机为好, 而大吨位挤压机的结构比较复杂, 制造技术要求高, 制作周期长, 中小碳素厂以至没有大压机的大厂, 因限于资金困难, 一般都不容易自筹解决。前文已经初步介绍用振动成型机代替大型挤压机的现实可能性。现在顺便叙述一下西德克哈德公司制造的真空卧振成型机。迄今为止, 国际上已应用 35 套设备, 包括贵铝引进的三工位转合式阳极振动成型机, 可以用作改进国产碳素振动成型机的借鉴, 再按照电极呈圆柱型的特征, 准备花一些时间和资金, 争取尽快应用到生产大规格电极 ($\phi 500 \sim 1000$ 毫米) 或大截面碳块 (1500×700 毫米) 上。国外与我们的实践都证明, 振动成型是一种经济有效的成型方法。

振动成型机安装简单, 不需要昂贵的基础, 动力消耗小, 设备投资不到挤压机的三分之一, 操作简便, 品种规格多样, 易于实现生产自动化, 很适用于老厂的技术改造。在西德的联合铝业公司, 我们实地观看了滑台式振动成型机上卧放模具生产大规格电极坯的全过程。联合铝业公司中附设一个相当陈旧的预焙阳极车间, 在没有挤压机的条件下, 与康拉蒂碳素公司搞生产联营, 运用振动成型一般原理, 研制成功电极卧振的技术专利。其特征是: 电极模具卧放在振动台面上, 上下两个扣膜近似半圆型, 加料后, 随着振动加压, 上下扣膜叠合在一起, 初振开始前先启动真空抽气装置, 设备运转声并不使人感到难受。卧振工艺与挤压工艺相比, 压型品结构均匀, 密实度、强度比挤压品高, 两种成品质量不相上下。德方认为, 即使采用质量稍差的煅后焦, 也能生产出较好的石墨电极。对此项新技术, 我们应该在引进样机的有利条件下, 再接再厉, 改进国产设备结构方面的某些缺陷, 加快试验掌握圆柱形大电极的卧振工艺诀窍, 改变那种认为电极成型必须靠挤压的传统观念。

如今个别大厂虽已投产了大吨位挤压机。然而, 就全国而言, 大吨位水压机仍处于“僧多粥少”的境地, 不能满足碳素工业的需要。为此, 如能尽快掌握起先进的、可靠的电极卧振工艺, 与改进的电极挤压工艺比翼双飞, 岂不更有利于碳素业界品种质量的共同进步。

三、提高密闭环式炉的节能效果。

我国专业碳素厂比较习惯采用密闭环式焙烧炉。但过去由于供应方面的原因, 很少使用轻质绝热材料与优质耐火材料, 更由于热工制度的落后, 焙烧能耗约比国外同类工厂高一倍。近几年来, 工厂利用大修机会, 采用了带火井、加高炉深等新结构, 开展以节能为中心、提高焙烧质量的技术革新。在新建改建的预焙阳极车间中, 配备有多功能