

国家职业资格培训教程

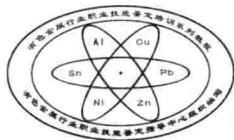
炭素成型工

中国有色金属工业协会
中国铝业公司 组织编写
有色金属行业职业技能鉴定指导中心

主 编 张怀武 姚定邦 副主编 柏登成 龚思如



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

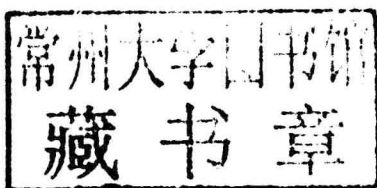


国家职业资格培训教程

炭素成型工

主 编 张怀武 姚定邦

副主编 柏登成 龚思如



北 京

冶金工业出版社

2013

内 容 简 介

本书共分8章,主要包括铝用炭素基础理论知识,炭素成型生产工艺、成型主要设备、生产操作与控制,质量控制,生产过程中的粉尘及烟气处理,质量管理基础,安全文明生产及环境保护。其中主要从预焙阳极、阴极炭块两方面,对铝电解用炭素生产的基本工艺流程、制品性质及要求、原料的性质、破碎、筛分与配料混捏、成型等工艺和主要设备进行了详细的阐述;同时对通用部分如质量管理基础、安全生产及环境保护方面进行了简单介绍。

本书可作为铝电解用炭素成型工职业资格培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

炭素成型工/张怀武,姚定邦主编. —北京:冶金工业出版社,
2013. 10

国家职业资格培训教程

ISBN 978-7-5024-6315-1

I. ①炭… II. ①张… ②姚… III. ①氧化铝电解—炭素
材料—成型—技术培训—教材 IV. ①TF821.032.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 215428 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 张熙莹 常国平 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 禹蕊 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-6315-1

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京慧美印刷有限公司印刷

2013 年 10 月第 1 版,2013 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm;13.75 印张;265 千字;207 页

42.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

《炭素成型工》编辑委员会

主 任	丁学全			
副 主 任	戴 山	丁跃华	岳旭光	李宏伟
	尹 键	韩 华		
编 委	赵永金	刘 泵	袁声波	周 勇
	唐宗荣	刘 杰	范建华	赵珊珊
	王全家	冀树军	毛旭生	刘权强
	潘三红	张庆刚	罗英涛	王瑞奇
	刘予湘	农世富		
主 编	张怀武	姚定邦		
副 主 编	柏登成	龚思如		
编写人员	张勇宏	秦福建	闫章林	仲桂英
	汪邦伦	王桂琴	唐阳生	尹生成
	高玲玲	周康宁	段 冰	李国平

前言

铝用炭素材料主要包括铝电解生产所必需的阳极、阴极炭块及阴极糊料等，是铝电解产业链中一个重要的组成部分。铝电解工业的发展，有力地推动了铝用炭素工业的发展和生产技术的进步。国内现从事与铝用炭素工业相关工作的从业人员已达数十万人。

现在很多企业、员工对职业技能资格的鉴定越来越重视，但就目前来看，关于铝用炭素生产专业类的书籍较少，尤其是面向从事铝用炭素生产人员的职业技能学习的基础理论书籍更是缺乏。

根据人力资源和社会保障部有关规定，由中国有色金属工业协会、中国铝业公司、有色金属行业职业技能鉴定指导中心组织，中铝青海分公司牵头，编写了国家职业资格培训教程《炭素成型工》一书。本书主要面向铝用炭素成型工种的职业资格培训和职业技能鉴定等。

本书第1章由张怀武、王桂琴、高玲玲编写；第2章由姚定邦、仲桂英编写；第3章由张勇宏、秦福建、闫章林编写；第4章由汪邦伦、段冰、周康宁编写；第5章由张怀武、尹生成编写；第6章由姚定邦、汪邦伦编写；第7章由唐阳生编写；第8章由李国平编写。本书涉及阴极内容（原料、工艺、设备等方面）的部分由柏登成编写。全书文字、图标录入及校对由张怀武完成。

全书由张怀武、姚定邦、柏登成、龚思如终审定稿。

在本书的编写过程中得到中铝青海分公司、贵州分公司各级领导的大力支持，在此表示深深的谢意！由于第一次组织编写职业技能培训教程，不足之处敬请批评指正，以便再版时改进和完善。

编者
2013年3月

目 录

1 铝用炭素基础理论知识	1
1.1 炭素生产用原料的性质及用途	1
1.1.1 石油焦	1
1.1.2 无烟煤	7
1.1.3 沥青焦	9
1.1.4 天然石墨	10
1.1.5 煤焦油	10
1.2 炭素生产的基本原理和工艺流程	11
1.2.1 煅烧	11
1.2.2 成型	14
1.2.3 焙烧	15
1.2.4 组装	18
1.3 预焙阳极的性质及用途	19
1.3.1 预焙阳极的性质	19
1.3.2 预焙阳极的用途	20
1.3.3 铝电解对预焙阳极的要求	23
1.3.4 铝电解过程中的阳极故障	25
1.4 阴极炭块的性能要求及破损机理	26
1.4.1 阴极炭块的使用及技术装备发展	27
1.4.2 铝电解工艺对阴极炭块性能的要求	29
1.4.3 铝电解槽阴极破损特征	29
1.4.4 铝电解槽阴极破损机理	29
2 炭素成型生产工艺	31
2.1 原料的破碎与筛分	31
2.1.1 破碎的基本理论	31
2.1.2 筛分的基本理论	34
2.1.3 破碎筛分系统流程设计原则	35

2.2 原料的磨粉	36
2.2.1 工作原理	36
2.2.2 系统简介	38
2.2.3 粉料的性能	40
2.2.4 球磨粉含量对预焙阳极性能的影响	41
2.3 热媒及沥青熔化	41
2.3.1 热媒	42
2.3.2 沥青熔化	44
2.4 配料	47
2.4.1 配料工作的主要内容	47
2.4.2 各种物料在配料中的作用	49
2.4.3 配方的计算	50
2.4.4 工作配方计算实例	51
2.4.5 进行工作配方计算时应注意的几个问题	55
2.5 混捏	56
2.5.1 混捏的目的	56
2.5.2 混捏的方法	56
2.5.3 黏合机理	57
2.6 成型原理及基本方法	63
2.6.1 预焙阳极成型	63
2.6.2 阴极炭块成型	67
2.7 生制品的冷却、运输	74
2.7.1 喷淋冷却	74
2.7.2 水浴冷却	74
2.7.3 冷却时间与冷却水温度	75
3 炭素成型主要设备	76
3.1 成型工序常见破碎设备	76
3.1.1 辊式破碎机	76
3.1.2 锤式破碎机	78
3.1.3 反击式破碎机	81
3.2 磨粉设备	83
3.2.1 球磨机	83
3.2.2 雷蒙磨	89
3.3 筛分设备	92

3.3.1 惯性振动筛	93
3.3.2 直线振动筛	94
3.3.3 振动筛安装与调整	95
3.3.4 振动筛故障处理	95
3.4 混捏设备	95
3.4.1 双轴搅拌混捏锅	95
3.4.2 连续混捏机	99
3.4.3 高速混捏机	104
3.4.4 强力连续混捏机	106
3.4.5 其他混捏机	108
3.4.6 混捏机常见故障处理	109
3.5 成型设备	112
3.5.1 阳极的振动成型	112
3.5.2 阴极部分成型	120
4 炭素成型生产操作与控制	126
4.1 破碎筛分的操作和控制	126
4.1.1 双辊式破碎机的操作	126
4.1.2 中碎筛分的操作	126
4.1.3 风扫球磨机的操作	127
4.1.4 反击式破碎机的操作	128
4.1.5 筛分析技术操作	129
4.2 配料操作	130
4.2.1 电子秤	130
4.2.2 沥青泵	131
4.2.3 生产技术条件	132
4.2.4 配料系统启动前的检查	132
4.2.5 操作启动	133
4.2.6 注意事项	133
4.3 混捏操作和控制	133
4.3.1 混捏工艺条件制订的依据	134
4.3.2 预焙阳极混捏工艺控制与操作	134
4.3.3 阴极混捏工艺控制与操作	135
4.3.4 混捏操作注意事项	140
4.4 成型操作与控制	140

4.4.1 挤压成型	140
4.4.2 振动成型	143
5 质量控制	147
5.1 质量判定	147
5.1.1 糊料类	147
5.1.2 预焙阳极的总体要求	148
5.1.3 阴极炭块质量要求	149
5.2 废品形式及影响因素	150
5.2.1 糊料类	150
5.2.2 阳极炭块	151
5.2.3 阴极炭块	155
5.3 工艺过程异常情况处理	157
5.3.1 中碎筛分系统异常情况处理	158
5.3.2 配料混捏系统异常情况处理	158
6 生产过程中的粉尘及烟气处理	160
6.1 粉尘处理	160
6.1.1 除尘系统	160
6.1.2 旋风除尘器	162
6.1.3 布袋除尘器	171
6.2 烟气处理	176
6.2.1 沥青熔化过程中产生的烟气处理	176
6.2.2 生产过程中的沥青烟气处理	178
7 质量管理基础	181
7.1 基本概念	181
7.1.1 质量的基本概念	181
7.1.2 质量职能和质量职责	182
7.1.3 朱兰质量管理三部曲	183
7.2 全面质量管理	184
7.2.1 质量管理发展三个阶段	184
7.2.2 全面质量管理的概念	184
7.2.3 全面质量管理的基本要求	185
7.2.4 全面质量管理的实现	186

7.2.5 全面质量管理的基础工作	187
7.2.6 现场质量管理	188
7.3 质量管理体系	191
7.3.1 质量管理体系和 ISO 9000 族标准	191
7.3.2 质量管理体系有关的基本术语	191
7.3.3 质量管理体系过程	192
7.3.4 质量管理体系的建立和运行	192
7.3.5 质量体系认证的基本知识	193
8 安全文明生产及环境保护	196
8.1 现场文明生产要求	196
8.1.1 交接班准备	196
8.1.2 交接班内容	196
8.1.3 交接班要求	197
8.1.4 劳保用品穿戴要求	197
8.2 危险源的辨识及防护	197
8.2.1 危险源简述	197
8.2.2 危险源辨识过程	197
8.2.3 主要岗位危险源辨识信息收集	198
8.2.4 事故类别	199
8.2.5 危险源辨识	200
8.3 环境因素的辨识及处理	202
8.3.1 环境因素辨识	202
8.3.2 环境因素评价方法	202
8.3.3 环境因素统计及处理	203
8.4 相关法律法规知识	205
参考文献	207

1 铝用炭素基础理论知识

1.1 炭素生产用原料的性质及用途

生产炭和石墨材料的原料都是炭素原料。由于来源和生产工艺的不同，炭素原料的化学结构、形态特征及理化性能均存在很大差异。按照物态来分，它们可分为固体原料（即骨料）和液体原料（即黏结剂和浸渍剂）。固体原料按其无机杂质含量的多少又可分为多灰原料和少灰原料，多灰原料灰分一般占 10% 左右，如冶金焦、无烟煤等，少灰原料如石油焦、沥青焦等。此外，生产中的返回料如残极、生碎和焙烧碎等也可作为固体原料。预焙阳极属于少灰产品，须选用少灰原料。

铝用炭素和所有的电极制品一样，是用焦炭（骨料）和煤沥青（黏结剂）的混合物生产的。

1.1.1 石油焦

石油焦是石油渣油、石油沥青经焦化后得到的可燃固体产物。其主要元素为碳，灰分含量很低，一般在 0.5% 以下，其外观为黑色或暗灰色的蜂窝状结构，焦块内气孔多呈椭圆形，且互相贯通。

渣油的焦化工艺很多，其共同点都是深度裂解。在石油炼制工业中，焦化工艺有釜式焦化、平炉焦化、延迟焦化、接触焦化和流化焦化等。我国现在各大炼油厂多采用延迟焦化设备，以便获得更多的石油产品，提高经济效益，改善劳动条件。

延迟焦化是近代生产石油焦的先进工艺，其焦化法的工艺流程如图 1-1 所示。

渣油经过热炉加热至 300 ~ 330℃，然后进入联合分馏塔，分馏出汽油、柴油和蜡油后，继续加热至 500℃ 左右，再迅速进入已经吹起试压和预热好的焦化塔中（塔内液面维持 2/3），塔顶温度 430℃ 左右，塔底温度 480 ~ 500℃，塔顶气压 1.2 ~ 2.0 atm（1 atm = 1×10^5 Pa），在这样的温度和压力下，渣油凭着本身所含的热量供给焦化所需的反应热，在无外加热源而仅靠从延迟焦化塔底进入的渣油维持一定温度。渣油在高温作用下在焦化塔内进行分解和缩合，保持 24 ~ 36 h，生成的焦炭称为延迟焦。同时，其挥发气体和液体馏分进入分馏塔，而焦化塔的焦炭用高压水切割冲出的方法除焦。

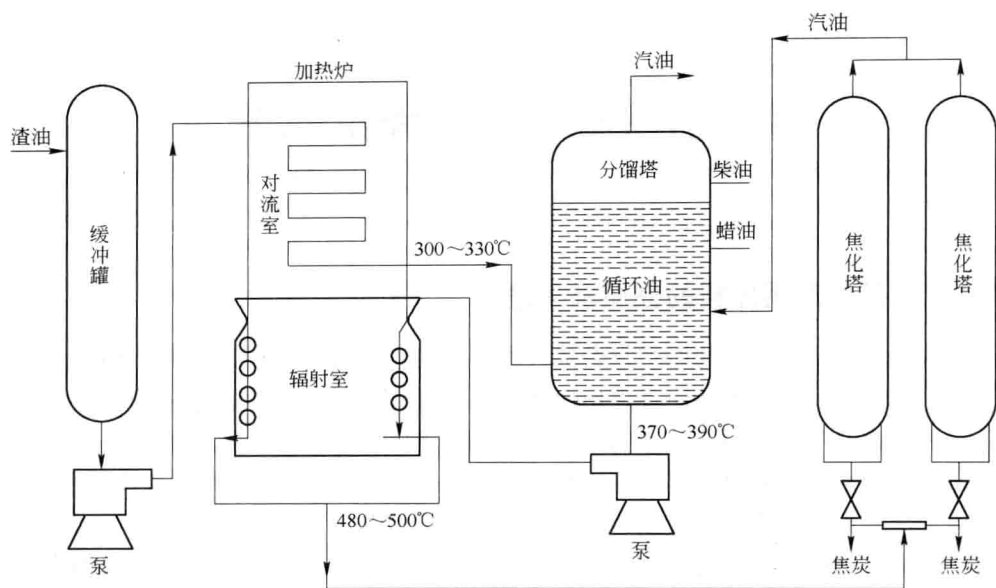


图 1-1 延迟焦化法工艺流程

所谓延迟焦化的意思是本来渣油在辐射室炉管内要结焦，但采取措施不让其在炉管内焦化，而延迟到焦化塔内起分解和缩合作用后生成焦炭。这些措施就是渣油通过管式加热炉时采用高流速（入口速度3.5m/s）和高的加热温度（500℃左右），渣油在很短的时间内达到焦化所需的温度，同时又迅速地离开加热炉进入焦化塔内结焦。有时在渣油进入加热炉时注入一定量的水，目的是降低渣油的黏度，增加流速，防止在管内结焦。

延迟焦的特点是挥发分高，塔顶部为最高可达30%，塔底和四周的焦约15%、塔中约10%，平均挥发分为10%~15%；其次是炭粉多，约占2/3。

延迟焦化法的特点是：

（1）连续操作。焦炭塔一般为2~4个，一边除焦一边充渣油，整个气-液分馏系统为连续生产。

（2）焦化塔为立式，用水除焦，切焦水压力高于10MPa。

1.1.1.1 石油焦的分类

石油焦通常有下列4种分类方法：

（1）按焦化方法的不同，可分为平炉焦、釜式焦、延迟焦、流化焦，前两种焦已很少生产，目前中国大量生产的是延迟焦。

（2）按热处理温度不同，可分为生焦和煅烧焦。生焦是由延迟焦化（或其他焦化方法）所得，含有大量的挥发分，机械强度低；煅烧焦是生焦经煅烧而得。中国多数炼油厂只产生生焦，煅烧作业多在炭素厂内进行。

(3) 按硫分的高低不同,可分为高硫焦、中硫焦和低硫焦。中国延迟石油焦质量标准将生焦分为1号、2号和3号,每个号又分为A焦和B焦两类,规定1号焦硫分不大于0.5% (A焦)及0.8% (B焦)、2号焦为不大于1.0% (A焦)及1.5% (B焦)、3号焦为不大于2.0% (A焦)及3.0% (B焦)。

(4) 按石油焦外观形态及性能的不同,可分为海绵状焦、蜂窝状焦和针状焦。海绵状焦外观类似海绵,杂质含量较多,内部含有许多小孔,空隙间焦壁很薄,其不适合作为生产炭材料的原料。蜂窝状焦内部小孔分布比较均匀,有明显的蜂窝结构,具有较好的物理性能和力学性能,此类石油焦可以作为普通功率石墨电极、预焙阳极和电炭制品生产用的原料。针状焦外表有明显条纹,焦块内部的孔隙呈细长椭圆形定向排列,破碎后成细长颗粒,其可作为生产高功率和超高功率石墨电极的原料。

1.1.1.2 石油焦的质量指标

石油焦的质量一般可以用灰分、硫分、挥发分和1300℃煅烧后的真密度来衡量。其具体质量指标见表1-1。

表1-1 石油焦质量指标

项 目	质量指标							试验方法
	一级品	合格品						
		1A	1B	2A	2B	3A	3B	
硫含量/%	≤0.5	≤0.5	≤0.8	≤1.0	≤1.5	≤2.0	≤3.0	GB/T 387—1990
挥发分/%	≤12	≤12	≤14		≤17	≤18	≤20	SH/T 0026—1990
灰分/%	≤0.3	≤0.3	≤0.5			≤0.8	≤1.2	SH/T 0029—1990
水分/%	≤3							SH/T 0032—1990
真密度/g·cm ⁻³	2.08~2.13	—						SH/T 0033—1990
粉焦量（块粒8mm以下）/%	≤25	—						—
硅含量/%	≤0.08	—						SH/T 0058—1991
钒含量/%	≤0.015	—						SH/T 0058—1991
铁含量/%	≤0.08	—						SH/T 0058—1991

注:本表数据来自 SH/T 0527—1992。

1.1.1.3 石油焦的物理化学性质

表征石油焦物理化学性质的指标有灰分、硫分、挥发分、真密度、孔隙率、电阻率、线膨胀系数和力学性能等。

A 灰分

石油焦灰分中含有的主要元素为铁、硅、钙、铝、钠、镁,还含有少量的钒、钛、铬、镍、锰等。除铝、镁、钙为电解质所需元素外,其余都是有害杂

质。灰分中的这些元素按照危害的受害体不同可分为两类：一类以电解最终产品原铝为受害体的元素，它们在电解过程中转入铝液中影响铝的质量。其最明显的危害就是降低铝的力学性能并且增大电阻，这样的元素有硅、铁、钒、钛、锰等。如纯度为 99.99% 的铝中，当混有 0.1% 的这些元素，铝的电阻率就按表 1-2 所示的幅度增加。另外，这些元素会增加炭阳极的活性，提高其与氧的反应速度，曾经有文献指出，阳极灰分增加 0.1%，阳极消耗就增加 3%，所以应该对炭阳极用石油焦中的这类元素含量予以特别的重视。还有一类元素能使炭阳极的化学性能下降，如钠元素。钠对电解质及铝的质量并无危害作用，对阳极的物理性能也无大的影响，但它却影响阳极的化学性能。它在电解过程中对阳极氧化起催化作用，促使阳极的选择性氧化，即含钠的那个“区域”氧化速度加快，造成阳极工作的不均匀性且使阳极脱落掉渣。这样不仅增加了炭耗量，而且使电解质中炭渣增多，污染电解质，影响生产和操作。

表 1-2 微量元素对铝电阻率的影响

元 素	V	Ti	Mn	Si	Cu	Zn	Fe
铝电阻率增加值/ $\mu\Omega \cdot m$	5	4	1	0.7	0.4	0.1	0.08

石油焦炭灰分中的大部分元素来源于原油，也有些是焦化、储运过程添加的。其中硅、铝在原油中以砂土形式存在，随焦化过程而进入了石油焦。另外，生产出来的石油焦如果堆放在露天，地面上的泥沙或刮风带来的泥沙也会增加石油焦的灰分。钠、钙、镁是油田附近矿物中这些元素的氯化物以水溶液形式而渗入原油中的，这些元素除与井场的地理位置有关外，还与炼油厂的生产工艺有关。铁主要是由于炼油厂生产设备的腐蚀而带入的。硫、钒、镍、钛则是高分子石油杂环链上所固有的，在石油分子中以化合物的形式存在，所以分离这些元素是一个难题。

B 硫分

硫是影响石油焦质量的杂质之一，石油焦的含硫量取决于渣油的含硫量，渣油中的硫分有 30% ~ 40% 残留在石油焦中，如果含硫量较高的渣油事先加氢脱硫，减少渣油中的含硫量，由此得到的石油焦含硫量相应降低。石油焦中的硫可分为硫的有机化合物（硫醚、硫醇、硫黄等）和硫的无机化合物（硫化铁、硫酸盐）两类。一般煅烧到 1300℃ 左右脱硫效果不大，只有将煅烧温度提高到 1450℃ 左右才能有较明显的脱硫效果，一部分硫化物需在石墨化的高温下才能排出。石油焦硫含量与煅烧温度的关系如图 1-2 所示。

对生产铝电解用阳极材料及生产石墨制品而言，硫是一种有害元素，硫含量较大的石油焦生产的石墨电极在石墨化过程中产生“气胀”现象，炭坯体积异常膨胀，容易导致产品裂纹。对于生产预焙阳极，若石油焦的硫含量高，也会降

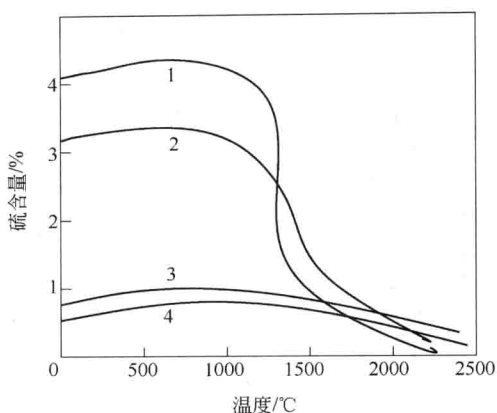


图 1-2 石油焦硫含量与煅烧温度的关系

1—鞅鞅原油残渣油焦炭；2—鞅鞅石油裂化焦炭；

3—高尔基厂焦油热解焦炭；4—戈洛茨涅斯基原油裂化焦炭

低产品的导电性能，同时硫在高温下会与预焙阳极的导电钢爪起作用，生成电阻很大的硫化铁膜，增大铁-炭间接触电压降，铝电解时就会多消耗电能。含硫较高的石墨电极炼钢时，吨钢电极消耗量有所增加，中国多数产地的石油焦硫分较低，只有使用国内高硫原油或进口高硫原油的炼油厂生产的石油焦硫分较高。

C 挥发分

石油焦挥发分的大小表明其焦化温度的高低。釜式焦的焦化温度较高，可达700℃左右，因此釜式焦的挥发分较低（3%~7%）；而延迟焦化石油焦的焦化温度只有500℃左右，因此挥发分高达8%~20%。延迟焦化生产的石油焦的挥发分不仅取决于焦化温度，还和渣油通入焦化塔的装填时间及向焦炭层吹入蒸汽的条件有关。同一塔卸出的焦炭挥发分差别也很大，如位于塔底的焦炭结构较致密、体积密度大、挥发分较低，而塔顶部的焦炭结构疏松，挥发分要高得多。石油焦挥发分的多少对炭素制品质量并无多大影响，但对煅烧作业有影响，高挥发分的石油焦使用一般结构的回转窑或罐式炉煅烧都有困难。

煅烧过程中一般炭质原料从200~300℃开始逸出挥发分，在此低温阶段从原料中排出的挥发分是其含有的轻馏分。炭质原料的挥发分逸出量随煅烧温度的升高而增多，在一定温度范围内，其挥发分排出量达到最大值（石油焦和沥青焦为500~700℃，无烟煤为700~850℃），随后继续升温，炭质原料的挥发分逸出速率减缓，当温度达到1100℃以上时，炭质原料的挥发分逸出基本停止。经过1250~1350℃的煅烧处理，炭质原料的挥发分含量一般在0.3%以下。煅烧石油焦的挥发分和真密度随温度的变化如图1-3所示。相对而言，煅烧热处理时无烟

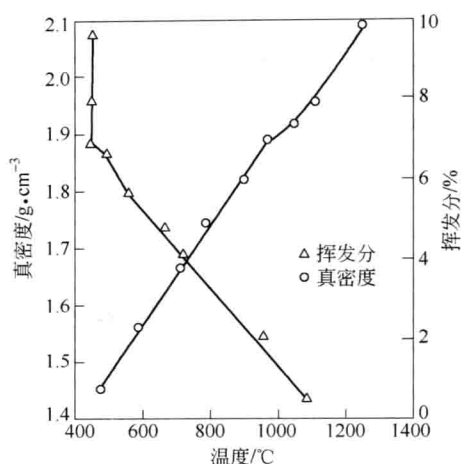


图 1-3 煅烧石油焦的挥发分和真密度随温度的变化

煤的挥发分逸出过程比石油焦平缓。

D 真密度

石油焦在 1300℃ 煅烧后的真密度的大小是衡量石油焦质量的主要指标。一般来讲，煅烧后真密度越高，说明这种焦越容易石墨化，而且石墨化后电阻率较低、线膨胀系数较小。石油焦的体积密度表示焦炭结构的致密程度，并且与机械强度成正比。振实密度除与焦炭的体积密度有关外，还与焦炭的颗粒度有关。

所有炭质原料在煅烧过程中都会逐渐发生体积收缩，这是由于炭质原料所含挥发分的排出以及热解缩聚反应导致结构变化，使炭质原料块体致密化而引起的，从而有效地提高了炭质原料的真密度和机械强度。

对于延迟焦来说，煅烧温度低于 700℃ 时，由于发生剧烈的热解缩聚反应，其体积收缩较大；700 ~ 1000℃ 时，延迟焦的体积收缩速率有所减缓；1000℃ 以后，焦炭进行结构收缩并产生许多微裂纹，这些裂纹直接导致煅烧炭质原料产生破碎现象，即使煅烧温度升至 1200 ~ 1300℃，这种体积收缩（致密化）仍在继续进行。炭质原料挥发分含量大并在煅烧时排出量多，则其收缩程度越大，煅后延迟焦和无烟煤的体积收缩在 20% ~ 30% 范围内。

炭质原料在煅烧过程中真密度的变化与煅烧温度呈线性关系，如图 1-3 所示，即真密度随煅烧温度上升而增大。各种炭质原料煅烧后的真密度都有较大幅度的提高，如石油焦的真密度从煅烧前的 1.36 ~ 1.62 g/cm³ 提高到煅后的 2.04 ~ 2.12 g/cm³，增加幅度高达 40% 以上。

E 电阻率

未经煅烧的生焦电阻率很高，接近于绝缘体，经过煅烧后，电阻率急剧下

降,石油焦的电阻率与煅烧温度成反比,经1300℃煅烧过的石油焦电阻率降低到 $500\mu\Omega\cdot\text{m}$ 左右。石油焦导电性的变化与其结构变化相关,它取决于共轭 π 键的形成程度。焦炭的导电性是碳原子网格中共轭 π 键体系的离域电子的传导性的反映,它随六角网格层面的增大而提高。

炭质原料电阻率随煅烧温度的变化可划分为四个温度区:

(1) 500 ~ 700℃时,炭质原料的电阻率最大,这对应着延迟焦化的温度范围。

(2) 500 ~ 1200℃时,炭质原料的电阻率随温度升高呈直线大幅度下降,从 $1\times 10^8\mu\Omega\cdot\text{m}$ 降至数百微欧米,这对应着煅烧热处理阶段,即在煅烧过程中,炭质原料的电阻率随煅烧温度升高而直线下降,到1200℃后逐渐转为平缓。炭质原料煅烧过程中导电性能的显著提高是挥发分逸出和分子结构重排的综合结果,尤其是煅烧物料所含炭质微晶尺寸的逐渐增大。

(3) 1200 ~ 2200℃时,炭质原料的电阻率略有降低,基本趋于稳定变化状态,这对应于燃气煅烧的终温区(1350℃左右)和电煅烧温度区间(1500 ~ 2000℃)。

(4) 2200℃以上,炭质物料的电阻率随热处理温度升高而进一步降低,这对应于石墨化热处理阶段,这时与炭质物料的石墨化有关。

经过相同温度煅烧后,石油焦的电阻率最低,沥青焦的电阻率略高于石油焦,冶金焦的电阻率又高于沥青焦,无烟煤的电阻率最高。无烟煤的电阻率不仅与煅烧程度有关,而且与其灰分含量有关,无烟煤灰分含量越大,煅烧后电阻率越高。

F 线膨胀系数

石油焦的线膨胀系数主要取决于渣油的性质,也即渣油中芳烃的含量和沥青质的含量。芳烃含量高及沥青质、胶质含量低的渣油,生产出的石油焦的线膨胀系数较低,针状焦就是这样的石油焦,同样是针状焦,线膨胀系数也有差别,生产大规格的超高功率石墨电极和接头坯料应该采用线膨胀系数较低的针状焦。石油焦的线膨胀系数与测试温度有关,中国测试线膨胀系数的标准温度为100 ~ 600℃,测试温度不同所得的结果不能直接比较。

G 力学性能

石油焦的力学性能包括可破碎性、脆性和磨损率等指标。石油焦的可破碎性及脆性在电极制造工艺中有一定的实际意义,可破碎性可以用焦炭在破碎前后的尺寸比来评价,而脆性是表示焦炭在运输和传送过程中发生破碎的可能性。表征石油焦磨损率的测试方法是转鼓实验法。原焦的磨损率与其挥发分含量呈正比,与体积密度呈反比,煅烧后的石油焦磨损率显著下降。

1.1.2 无烟煤

煤是古代植物埋藏在地下,在细菌作用及一定的温度和压力下逐渐变质而得