

碳和石墨手册

〔美〕 L. 曼德尔 著

《碳和石墨手册》翻译小组

TG 127.1-62
M 2.

碳 和 石 墨 手 册

〔美〕 L. 曼德尔 著

（供内部参考）

《碳和石墨手册》翻译小组译

40467

Carbon and
Graphite Handbook
Charles L. Mantel
1968

※

《碳和石墨手册》翻译小组译
郑州铝厂 叶肇坦审校
兰州炭素厂 组稿、汇总
兰州新华印刷厂印刷
(内部发行)
一九七八年
印数: 1—1,500册

中文版说明

本手册是美国的曼德尔编写的。写作活动始于二十年代，直至1968年才在纽约、伦敦、悉尼、多伦多出版，历时四十余年。

作者以80余万字的篇幅较详尽地介绍了碳素及电碳制品的原料、生产工艺、性能及用途。鉴于书中某些资料收入年代较远，不一定完全适应当前的需要，而且在文字叙述上也不够简练，但尚可供我们在炭素生产和科研工作中参考。

这部手册是1973年在兰州炭素厂召开的有关兄弟单位参加的专业会议上共同商议决定出版的。参加翻译的单位有：郑州铝厂、湖南大学、清华大学、吉林炭素厂、哈尔滨电碳研究所、沈阳铝镁设计院、上海炭素厂、北京电碳厂、兰州炭素厂研究所，最后由郑州铝厂的叶肇坦工程师统一校对并定稿。

这部书的翻译出版是各有关兄弟单位大力支持与共同协作的结果。但由于组稿工作不当，承译单位较多，故全书译名不统一及前后语意不衔接的现象较为严重，因此郑州铝厂叶工程师在两年来的统一校对过程中付出了巨大的劳动，在此表示诚挚的谢意。

本书的组稿、汇总以至出版，始终是在兰州炭素厂党委的关怀下和兰炭研究所直接主持下进行的。但由于组稿和汇总工作缺乏经验，缺点错误一定很多，望广大读者不吝批评指正。

兰州炭素厂研究所

一九七八年三月

序 言

“这不算是讽刺，炭素工业可以认为是‘黑色工艺’，首先是因为它的生产过程通常是保密的，其次是因为通常的电极厂实在很脏，炭素行业曾被人认为是一个堡垒，只有少数行会中人才能够进它的‘门’”。作者曾于1922年写过六篇文章，登在“化学与冶金工程”杂志上，名为“碳电极工业工艺学”，后来装印成小册子，并由世界各工业国家翻译出版，上面所引的那段话，就是该杂志主编卡柏锐克在介绍这些文章时说的。

作者在1928年出版“工业炭素”一书第一版的开头两节写道：“碳在工业上的应用是一个很广泛同时又很专业化的问题。它的分枝很多，形态也众多，它的工艺到目前为止远不够成熟，但在过去二十年的神速发展却是令人惊异的。

“关于碳的文献，以前极为分散，在它的某些方面文献极其稀少，而在其他方面则很丰富，其中有些似是而非有些自相矛盾，不完全，甚至有偏见，有关炭素工业的文献只是在近年才发展起来。”在“工业炭素”第二版（1946年）的头一节是这样写的：“自从本书第一版出版的十七年来，工业的进步，工业对碳元素吸附剂及其制品形式的性质的更高的评价，使得碳在应用上多倍的增长和更广泛的使用，因而不得不把本书全部重写”。

从那时候起，在炭素这个领域的活动增加了，在某些方面，特别是石墨和炸药方面，制造业增加，竞争者增多国际炭素会议甚为盛行，赢得了大量听众。

本书实际上是从四十年前开始的在这期间炭素行业有了飞速的发展，专业文献之多已来不及将它们全部汇编，希望本书对本行业的研究者、工人、生产者和用户有所帮助。

曼德尔

目 录

第 一 章	导言	1
第 二 章	不同形态的碳的性质	5
第 三 章	金刚石	36
第 四 章	天然石墨	50
第 五 章	灯黑	61
第 六 章	炭黑	66
第 七 章	乙炔黑	92
第 八 章	颜料黑	97
第 九 章	木炭	110
第 十 章	骨炭	117
第 十 一 章	焦炭	125
第 十 二 章	热解石墨	141
第 十 三 章	吸附剂	149
第 十 四 章	粘结剂	201
第 十 五 章	碳素制品的生产历史	215
第 十 六 章	电炉电极	253
第 十 七 章	炼铝用阳极和阴极	272
第 十 八 章	弧光和探照灯用碳棒	277
第 十 九 章	人造石墨	283
第 二 十 章	电解阳极	338
第 二 十 一 章	碳的纤维和布	343
第 二 十 二 章	核石墨	350
第 二 十 三 章	碳和石墨的耐火材料	381
第 二 十 四 章	碳和石墨的构件和容器内衬	384
第 二 十 五 章	碳和石墨的多孔性材料	388
第 二 十 六 章	碳和石墨的不渗透性和浸渍材料	391
第 二 十 七 章	电机用碳和石墨电刷	398
第 二 十 八 章	碳和石墨的特殊制品	413
第 二 十 九 章	分析和试验方法	435

第一章 导 言

碳在工业上的应用是一个很广泛同时又很专业化的问题。它的分枝很多，形态也不少，它的工艺到目前为止还不够成熟，但在过去二十年的神速发展却是令人惊异的。

关于碳的文献，以前极为分散，在它的某些方面文献极其稀少，而在其他方面则很丰富。其中，有些似是而非有些自相矛盾、不完全、甚至有偏见，有关碳素工业的文献则是近年才发展起来的。

元素的或同素异形的碳以及它的制成品，除去作为燃料以外，在我们的日常生活中它又起到十分重要的作用。它在工业上的价值通过它的制成品价值每年达数十亿美元就可以了解。

碳的希腊原名为“adamas”，意思是不可战胜的“金刚石的名字“adament”就是由此引伸过来的，许多世纪以来它都被排在宝石的首位。向来它都认为是超自然的东西，一般都知道工业上用的黑钻石是我们赖以钻探宝贵的石油和其它矿藏资源的极为稀缺的物质之一，我们日常也可以见到玻璃工用的钻石切刀或拉细丝用的钻石模板。

仅有小部分钻石（不到 $1/4$ ）用来作为首饰，大部分都用来做机械加工用的切割工具、磨轮、抛光剂等。

人造金刚石的发展对机械加工具有巨大的影响。与此一道发展起来的科学知识当然是具有巨大的重要性。

金刚石是已知的最硬的物质，而它的同素异形体石墨则是最软的物质之一。石墨，使世界的机器转的更平滑、更少噪音、更少磨损，石墨是一种很好的润滑剂，并且在许多恶劣条件下，对于化学侵蚀具有显著的抵抗能力，所有的电解工业、生产肥皂和洗涤剂的烧碱制漂白粉用的氯气，都要依赖石墨电极来生产，实际上，没有什么其他材料能胜过它。

我们正处于核子时代，在第一座原子反应堆中就使用了石墨作减速剂，第一个原子弹的制造中，就用了大量的前所未闻的高纯石墨，核石墨自1942年成为商品以来已经出售了将近十亿美元。

石墨的高温性能已被充分深入研究，这方面研制出的新产品已广泛用于火箭、火箭头、火箭原体抗融保护层。火箭发动机，以及耐高温用于宇宙航行和星际航行的石墨基质材料和石墨线石墨布、复合增强材料等。

石墨和粘土制成的坩埚自十六世纪起就用来熔炼非铁金属和合金，它在许多工业部门是不可缺少的，铸工用石墨来涂抹砂型使铸件光洁。电铸版工必须用石墨来复制印版，油漆工用石墨来防止腐蚀、火炉，甚至擦鞋也用石墨或碳制品来增加光泽。

当我们用铅笔写字时，我们是将碳涂在纸上，而不是用铅。

碳还以炭黑（灯黑）的形式出现，灯黑在印刷术发明以后就作为印刷的颜料直到1864年炭黑出现时，灯黑的使用还是唯一的。灯黑用于制造电刷、铅笔、颜料、墨水、金属和炉

子的磨光剂，唱片、复写纸、蜡笔、黑色材料的填料等。早年的印刷工人用手工很吃力地印刷出少量的书报，当时所用的墨是用一个碟子在牛油烛的火焰上熏，然后收集而得。很明显，印刷事业的迅速发展对油墨的质量，数量，价格方面提出新的要求，现代的高速卷筒复印机要求油墨能在贮墨器中自由流出，要能在一瞬间覆盖上每一个铅字和网纹版。对于这样的油墨炭黑是最理想而不可缺少的材料，这种炭通过印刷油墨而进入我们的书籍报纸和视觉的传达。印成的书页就是由大量精细地分布在油溶剂中的炭黑所构成的符号，当我们想起我们有些报纸每天能以每小时250,000张的速度（即每秒钟70张）用炭黑印刷出来，就可以想象出我们的报纸一天也不能离开它。

炭黑不仅是印刷业不可缺少的辅助材料，而且也是构成打字机墨带，复写纸和唱片的一个重要成分。因此，它也就是保存字迹和口语文字不可缺少的媒质。

炭黑发展史上最显赫的一章是它被应用到全世界橡胶工业，早期的自行车和汽车，爆胎和漏气是经常发生的事。橡胶化学工作者在经过长期寻找使轮胎更坚韧和更经用的物质，终于找到了炭黑，自从两个美国橡胶厂第一次应用炭黑作为轮胎橡胶原料的拼料以后，全世界的橡胶工业很快都使用了，在橡胶的组成中以抗磨为主要要求的皮管，外科手术和机械用橡胶，铺地板的橡胶等，炭黑也是必不可少的拼料。

从天然气中提取化学品，用天然气作燃料等，夺去了生产炭黑所需的廉价气体，而不得不改用石油精炼后的残油来生产炉黑。

炭黑也和它的同类品种颜料黑、灯黑一道使用于油漆、喷漆、搪瓷漆、青漆，因此碳也帮助我们维持美好的日常生活环境。

在骨炭和脱色木炭中，炭在许多食品制造中是作为一种纯化剂和脱色剂雪白的砂糖是用骨炭来脱色精制的，日常吃的生菜油之所以显的光鲜是因为用脱色炭漂白过，许多药用化学药品和药品都用骨炭提纯过。

还有金属吸附炭，它能从冶金溶液中回收金和银，在医药上，炭能帮助我们吸收到摧毁破伤风，霍乱和其他疾病的病菌。炭能吸附和排除有毒气体而在救护上使用。在战时用作为防毒面具以防备致死的毒气，在平时，气体吸附剂用来消减发臭物质的臭味。用来回收挥发性液体中的有价值的挥发气体，用来提取天然气中的汽油，以及用来提纯发酵气体，如二氧化碳，使它们能应用到非饮料中去。

吸附剂的原料来源很多，如褐煤果壳、木材，最近还用煤制得，它们用于净化环境系统，超吸附，气体分馏，溶剂回收，空气调节。水的再用和废水再生等等，每天其用量达到许多百万加仑。

碳能使我们远距离通话，电话的话筒主要包括两块薄的圆片，中间用粒状碳填充。声波引起碳粒间压力的波动而这种压力波动相应地引起流经碳粒的电流的波动，于是波动的电流就在电线收话的一端产生相应的声音。

在处理有腐蚀性化学品的场合，使用碳和石墨做结构材料的仪器和设备其进展曾是缓慢的。但是，碳质材料在工业上应用却是迅速的。碳和石墨做的块、棒、管、附件和各种各样管板，已经在许多腐蚀严重的条件下被使用，而如采用其他材料将会迅速遭到破坏。

电气工程师已经转用石墨作为高功率、高容量电子设备的部件，还有真空管、汞弧整流器和类似的仪器。

炭素材料在将来的工业中，处于日益重要的地位，因为它所服务的许多工业发展速度极

快,对于工业研究来说炭素工业是一个富有成果的研究领域,不仅是因为它的某些部分的产量很低,而且还因为对它的可能的、甚至是有希望的改进工作也做得太少。

碳以电极的形式用来传导电流对电炉来说是绝对必要的。工业上应用的许多重要材料都应用炭素电极来生产,如电炉钢、各种铁合金、碳化钙和乙炔碳化硅和氧化铝,其他碳化物和氮化物铝镁金属、磷和磷酸、电阻丝、白炽灯用的钨丝、冶金和杀虫剂用的氰化物、钠、烧碱、氯和漂白粉,以及所有电炉合金和稀有合金等,炭素电极因此已成为今天我们生活资料的一个重要组成部分。

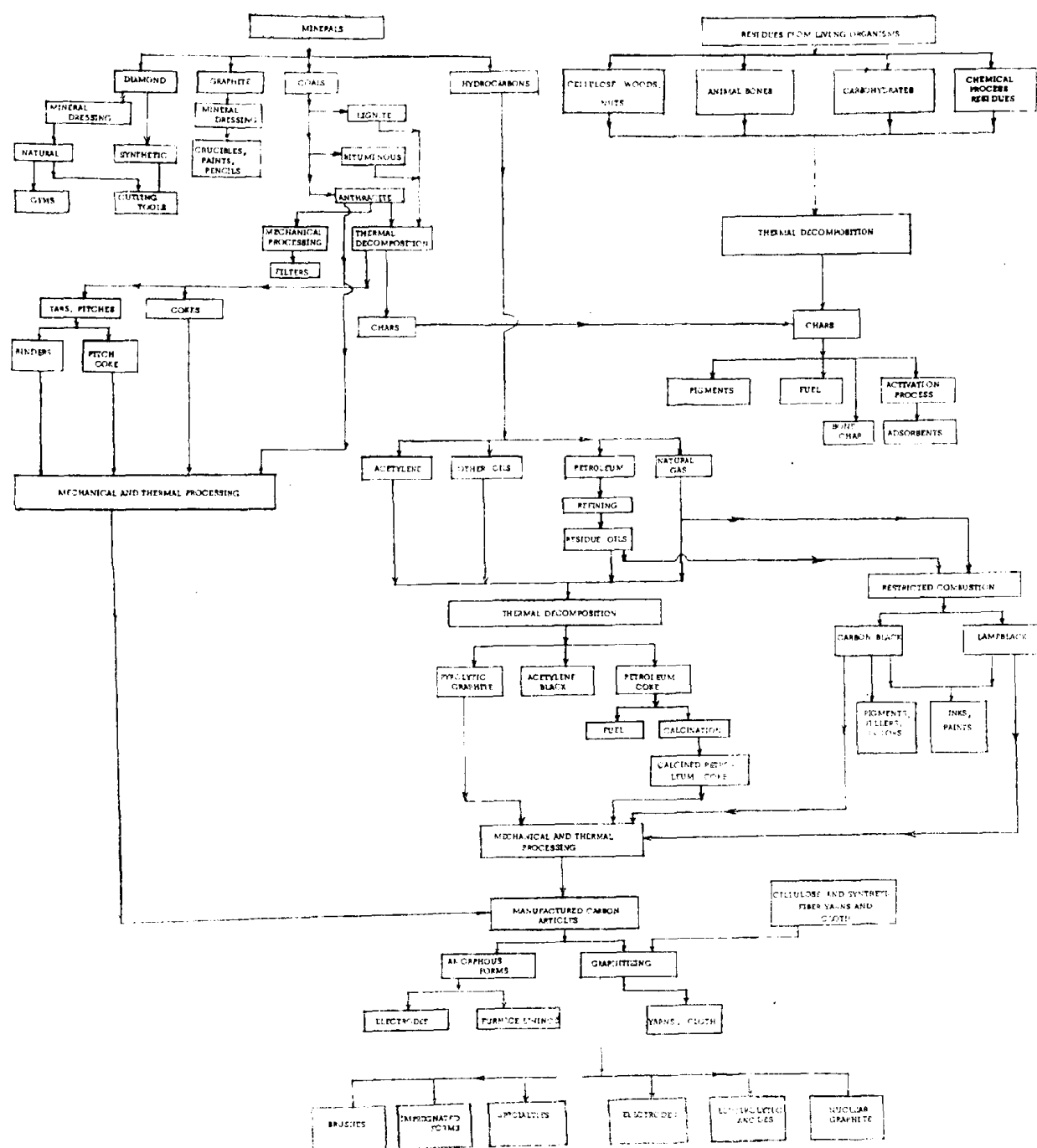


图1 炭素工业的原材料、工艺过程和产品

冶金炉容量日益加大，要求愈来愈多的电极，现在无定形碳和石墨电极长达10英尺（ $\phi 1524 \times 3000^{\text{mm}}$ ）的，已经很普通。

弧光炭精棒使我们的探照灯获得数百万烛光的亮度。碳做的电刷接触器和电池用碳帮助全世界的电机得以运转。当许多材料在高温下都已熔化时，碳仍能保持不熔，这就使它能够用来作电阻和鼓风炉的耐火材料。

本书中讨论到的多种形式的工业用碳包括：元素的碳、它的化学、物理机械和高温性质；金刚石和石墨的矿物形态，包括它们的人造产品，从碳氢化合物，特别是从天然气和石油残油抑制燃烧后能变为灯黑、炭黑、乙炔黑、以及它们的性质和应用，从碳氢化合物、褐煤、煤、天然气、石油残油等分解蒸馏和热解出来的产物，以及植物炭、骨炭、各种焦炭、热解石墨，这些炭经活性化后用作吸附剂，以及吸附剂的性质和应用用于净水处理，溶剂回收，消除臭气等；碳和石墨加工成的电极，用于各种冶金炉、铝镁冶炼以及弧光灯棒和探照灯、人造石墨，它的性质和生产上各种变化因数的关系以及用作导体、电解阳极、纤维和布，原子裂变用的核石墨以及用于空间航行、火箭、导弹的精制石墨，用碳和石墨制造的高炉耐火材料以及石油化工用的构件和容器内衬，化学工业的多孔性材料和不渗透性材料加工制品如电刷，电子设备零件，特制品，电阻和电触点，最后是相应的质量控制用的试验方法，化学分析方法，性能标准。

图1示出炭素工业的原材料、制造过程和各种炭素制品。

（湖南大学炭素专业教研室译）

第二章 不同形态的碳的性质

碳是一种化学元素，是有机化学的基础。本书所述仅涉及无机化学有关的问题：结构形态，制品形式，同素异形体及在高温下的变体，作为一种建筑材料在工程设计上的应用，抗腐蚀性，对破坏力的稳定性等。这些类似于元素铁和它的结构形态的钢的关系。

碳和石墨的应用大部分是利用它与别的材料不同的性质。碳和石墨是很有意思的东西，它们是过渡元素，兼有金属和非金属二者的性质。

碳和石墨的许多物理化学性质能够用数字与金属或其他材料比较：比热，电导率，热导率，机械强度和硬度是容易测定的，而且可以测得相当准确。碳不同于其他工程材料的地方，在于它的这些测量值可以在极大的范围内变化，尽管它们的化学组成并无明显的变化。这是由于碳有两种不同的形态：碳和石墨。而这两种形态，还由于它们的来源和多种制造过程的不同而有所差别。有些性质，如硬度，不同的测定方法将会改变它的质量等级。

碳，元素符号为C；原子量12.010；原子序数6；熔点3550℃（超过3500℃开始升华）；沸点4200℃，比重无定形炭为1.88；石墨为2.25，金刚石为3.51。碳的原子价为2，3或4。碳是史前就已发现的元素，是有机物质的特征。在自然界分布十分广泛，以游离形态存在的有石墨和金刚石。碳的化合物在大气中有CO₂，CO₂还溶解于天然水中。在岩石中有碳酸钙，碳酸镁，碳酸铁，还有作为碳氢化合物存在于石油和天然气中。煤主要也是碳的化合物。碳有三种同素异形体：金刚石，石墨和无定形碳，都是固体，不溶于任何普通溶剂。但能溶解于熔融金属，冷却时，它从金属中晶化而成为石墨；当冷却是在高压下进行，其中有些碳就形成金刚石。

碳是一种独特的元素，几乎能形成无限数目的化合物，常常是碳原子与碳原子互相连结。现在已知的碳化合物就有50万种，其中主要是CO₂，CO，CS₂，CHCl₃，CCl₄，CH₄，C₂H₄，苯（C₆H₆），乙醇（C₂H₅OH），醋酸（CH₃COOH）和无数碳化合物的衍生物。

原子结构

碳的国际原子量或质量为12.01。原子的光谱和化学性质几乎完全取决于其原子序数Z，这个序数是一个整数，代表原子核电荷的电子单位数。（因此就是原子核内的质子数），也等于中性原子的核外电子数。这种用原子序数的分类和化学家的化学元素分类是相符的。即化学元素和序数Z之间存在着一对一的相互关系。自然界大多数元素都是它们几种不同的同位素的混合物，也就是说，这几种同位素具有相同的原子序数Z，而它们原子核中的中子数N却不同，故原子核中的核子总数A等于

$$A = Z + N$$

A即为该原子的质量数。

自然界中已知元素的质子数Z达92，即铀的质子数。Z数高的是一种不稳定的元素，将通过放射作用而转化。对于Z数小于20的元素，稳定的同位素的质量数A大约等于2Z。如果Z数大于20，则对稳定的同位素来说，其质量数A将大于2Z。

因为元素的同位素的化学性质非常近似，故自然界各种同位素的相对丰度无论在那里发现几乎是一个常数，因此，元素的一般化学符号只能表示天然同位素恒量混合物的一个平均原子。

被测定的元素的原子量是在它们的自然丰度比例中稳定同位素的相对质量的平均值。一般是硬性地就把自然界氧的同位素混合物的原子量定为精确地等于16来比较各种原子量。这就是原子量的化学标尺。对自然界出现的高度稳定的同位素的丰度比例的化学测定工作已经完成。碳的同位素的原子量和它们间的比例列于表1。

表1 同 位 素

作 为 一 种 元 素		原 子 序 数 6	K	L	M
			2	2	1
		原 子 价	2	3,	4
自 然 丰 度 %		原 子 量	半 衰 期		辐 射
C ₁₀		10.02084	19.1秒		B + 2.2 1
C ₁₁		11.01499	20.5秒		B + 0.97
C ₁₂	98.892	12.00386			
C ₁₃	1.108	13.00756			
C ₁₄		14.00707	5700年		B - 0.155
C ₁₅					5.5
原子体积		6.7 - 8.0			
原子半径		碳.....11.0A°			
		金刚石.....0.77A°			

同素异形体可以被认为是形式不同，和同位素不同之处在于同位素中碳原子结构不同。碳的同素异形体在工业上分为无定形碳、半石墨和石墨、以及遵从金刚石晶格的结晶体。无定形碳可以在高温电炉中转化为石墨，并可在高温和极高的压力下转变为金刚石（压力大小在极高温度下随温度的变化而变化，是极高温度的函数）。

金刚石、石墨和炭黑是由同样的碳原子所组成，但它们的性质和用途则显著不同。它们之间的主要区别在于碳原子的空间排列不同。在石墨中，碳原子处于正六角形的角上，所有碳原子层（或称平面）都互相平行。在炭黑中，在一个平面上，六角形的碳原子排列多少是有规则的，但平面与平面之间的排列则是杂乱的。炭黑一经石墨化后，就得到半晶体或介晶体的碳。这种碳的平面或小片状体在两维空间中是很有规则的，但在三维上却是杂乱的。

固体的碳，除去金刚石，一般是由按六角晶格排列的碳原子小片状体所组成，而这些小片状体，由于它们之间排列的序数不同，就可以产生不同的品种。最高度的有序结构是碳原子小片状体相当大，并且互相平行。相互定向排列如图2所示，这就是晶体石墨的结构。另一方面，最无秩序的结构，即所谓“无定形碳”，它只有少量的，平均尺寸约25A°的平面层互相平行，但其它的定向却是杂乱的，同时，就是这样形成的少数平行束，它们相互之间也

是杂乱定向的。这两个极端之间，可以存在许多分阶级的中间结构，它们结构中的一些平行束基本上相互平行，但平行束中各层面的大小和数量则可以连续增加；同时，平行束中的一些平行层也可以和邻近的平行层相互增加定位排列。这样，相互平行和定向的趋势连续增大的结果，最后即达到石墨结构。

用碳氢化合物热解得到的物质就具有这种中间结构的形式，所形成一连串物质就含有许多这种中间结构。在较低的热解温度下沉积出的热解碳，结构中的平行束具有互相平行的层面，如果热解温度提高，则结构的有序性就越来越明显，到了最高沉积温度时，平行束中的层面就相互定向排列，因而就形成石墨。

图 3 表示碳的三种元素形式，炭黑和其他两者不同的地方还在于吸附在它表面上的物质。一个不到针尖那么大的炭粒就包含亿万计的无数分立的粒子。

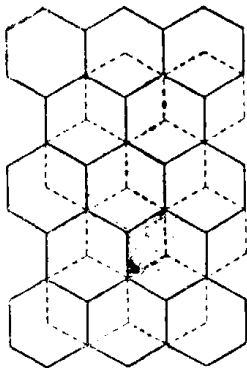


图 2 标准的石墨结构

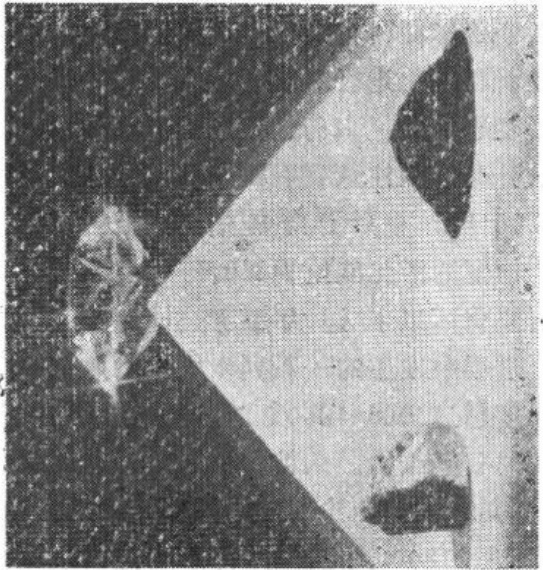


图 3 金刚石，石墨和炭黑是由同样的元素所组成，但由于原子的排列不同，所以它们的性质迥异

在自然界，元素炭有两种晶体的同素异形体存在。金刚石和石墨（其原子结构见图 4）。炭还存在于植物、动物、石油、煤、天然气、石灰石、白云石，大部分制品把热解得到的无定形炭进行处理，然后得来。

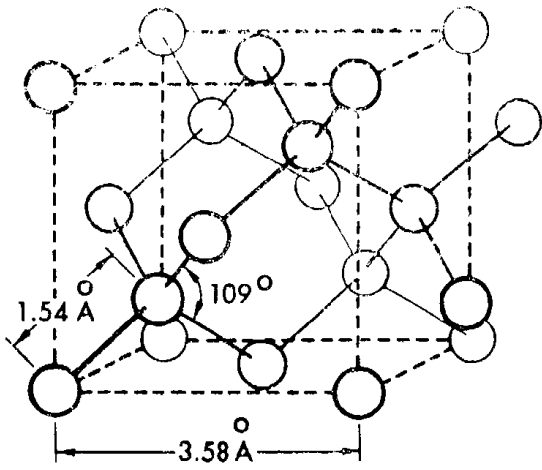
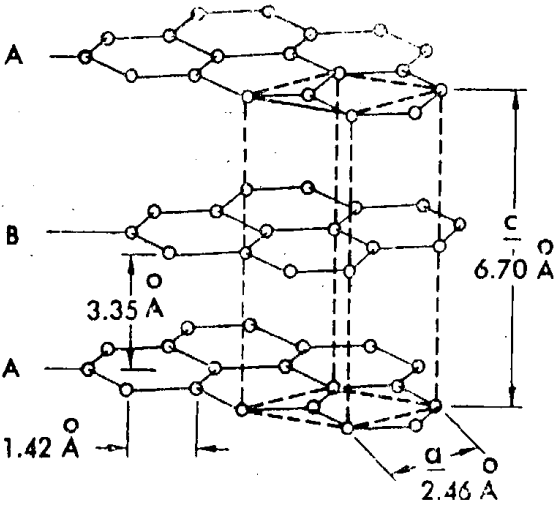


图 4 石墨和金刚石的晶体结构

石墨化过程：由无定形炭经过热处理转化为人造石墨的可能性首先由爱切生在1890年确认的。他的工作为今天石墨工业打下了良好基础。但石墨的晶体结构直到1924年才由巴雷尔提出。富兰克琳女士在关于石墨化的一系列论文中报导了“炭的石墨化”的概念。她解释了有些炭不管加到多高温度都不能形成充分的石墨结构的原因在于该原材料的结构不同。她规定了一个量值 P ，这个量值表明在一种石墨化过的炭中未定向层面的比例，从而可以推论某一种样品的“石墨化程度”。富兰克琳确定无定形炭的层间距离为 $3.44\text{ \AA}$ ，而晶体石墨则为 $3.354\text{ \AA}$ 。用这个方法测定 3000°C 热处理出来的各种形式炭黑，它们的特征是 P 值在 $0.75\sim 1$ 范围内，而马达加斯加鳞片石墨则接近于零。费尔和柯林斯等对石墨化动力学的研究解释了石墨化时晶体成长的机理，促进晶体成长的因素，以及用X射线测定晶体大小和层间距离以确定石墨化程度。费尔和柯林斯提出石墨化过程的活化能随着石墨化进行时层面有序排列的继续增加而变得更大。水岛的报告提出石墨化活化能的分布，他注意到有两个峰值，分别为100和200仟卡/克原子。费施伯克则报告说只有一个恒定的活化能值为260仟卡/克原子。

石墨化可以描述为温度升至 $2500\sim 3000^\circ\text{C}$ 过程中发生的一系列步骤。当焙烧中填料温度超过 $1000\sim 1300^\circ\text{C}$ 时，开始慢慢地生成最初的石墨结构。从粘合剂来的氢和硫在 $1500\sim 2000^\circ\text{C}$ ，挥发并发生体积膨胀（ $0.2\sim 0.6^\circ\text{C}$ ）。超过 1800°C ，石墨结构形成得很快并且到 2200°C 还继续增大。到了 2600°C 发生体积收缩，此时晶体的成长占优势。晶体的成长可以用X衍射技术测得，如图5所示，该图表示出石油焦的粉末型试样加热至不同温度的晶体成长情况。

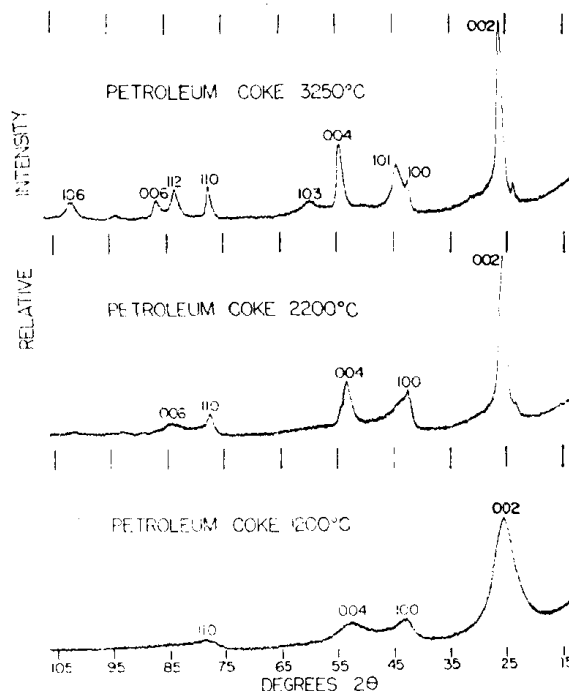


图5 石油焦经过连续加热后的衍射图样

表示出石油焦的粉末型试样加热至不同温度的晶体成长情况。002和004峰值的发展说明晶体的成长。层面间距是测量结晶完善程度的另一种方法，也可用X射线衍射测得。

在石墨化过程中，晶体从 $50\text{ \AA}$ 增至约 $1000\text{ \AA}$ ，此时层面间距从典型的无定形炭的 $3.44\text{ \AA}$ 降至公认为石墨结构的 $3.35\text{ \AA}$ 。

石墨化包括层面以及少数层面群的换位、重排过渡到三维有序排列。这种层面的成长可以通过单个炭原子或是单个炭环的移动来填

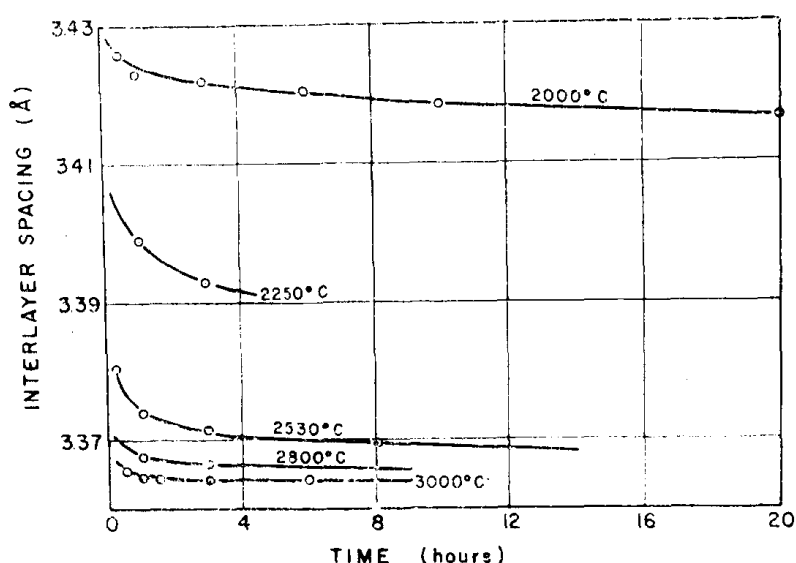


图6 石墨化时层面定向的理想顺序

充空隙，或是来提高现有晶体的完善程度而得到补充。层面成长的几率要看炭原子晶体不规则定向的程度和层面间炭到炭的横向键的成长程度而定。这一机理是由费尔和柯林斯提出的，如图6所示：

石墨化所达到的程度视无定形碳的原来结构而定的这一事实，所以得出一个结论，即所谓气相的冷凝、金属碳化物的分解，化学键的重排和其他的可能因素都不是石墨化的主要机理。

影响石墨化程度的，除了母体先质结构这个因素外，最高温度和在该温度下的逗留时间也是重要的因素。野田等呈报告说有氧和二氧化碳存在时将加强石墨化进展。

塔平尼安等报告了从2000到3000℃的逗留时间对结晶性质的影响。他们报告的数据表示于图7。

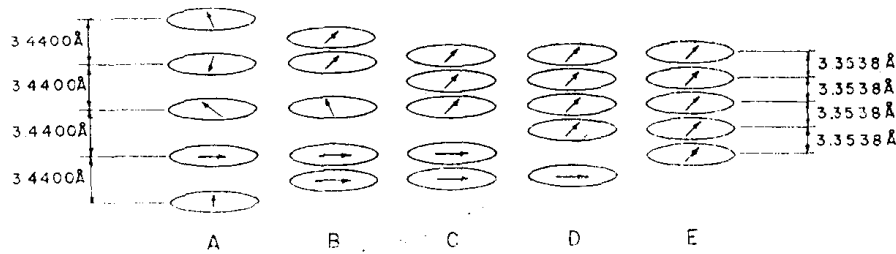


图7 层间距与石墨化逗留时间的关系

晶体的层面间距在每一个温度下都趋向一个极限值，虽然经过长时间逗留之后，层面间距在每一个温度也有所减小。当最高温度增高时，达到极限值的速度也增加，当石墨化温度超过2500℃逗留时间超过12小时之后，石墨化的分子运动可以忽略不计。

野田指出，在有氧化气体存在时晶体的形成得到促进，优先氧化发生在比较无序的非晶体区域，这样就能排除横向键，单层平面或其他无定形区，从而可以导致提高晶体的完善程度，达到更高层次的石墨化。

机械性能和石墨化最高温度的关系也有类似的表现。在2000℃时，机械强度值保持不变，或者稍有提高，直到2500—2600℃范围内出现最高值。从2600至2900℃机械强度降低，在3000~3200℃范围内曲线变平。如图8所示，图中，为了突出曲线的形状，纵座标以相对

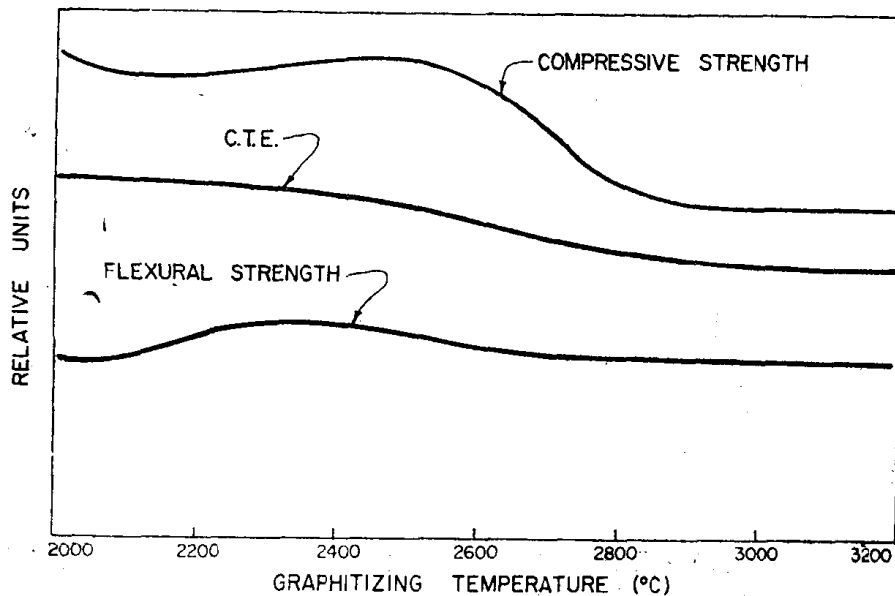


图8 机械性质与石墨化温度的关系曲线

单位来表示，其中抗挠强度是以和室温下测得的抗挠强度的相对值来表示。抗压强度和热膨胀系数则以和100~600℃范围内测得的数值的相对值来表示。

图9表示电阻率（分子运动性质）与石墨化温度的关系。

电阻率在2000~3000℃范围内降低，虽然在2900℃以上降低的速度很缓和。

石墨的所有物理性质不能在任何一个温度下达到最佳值。

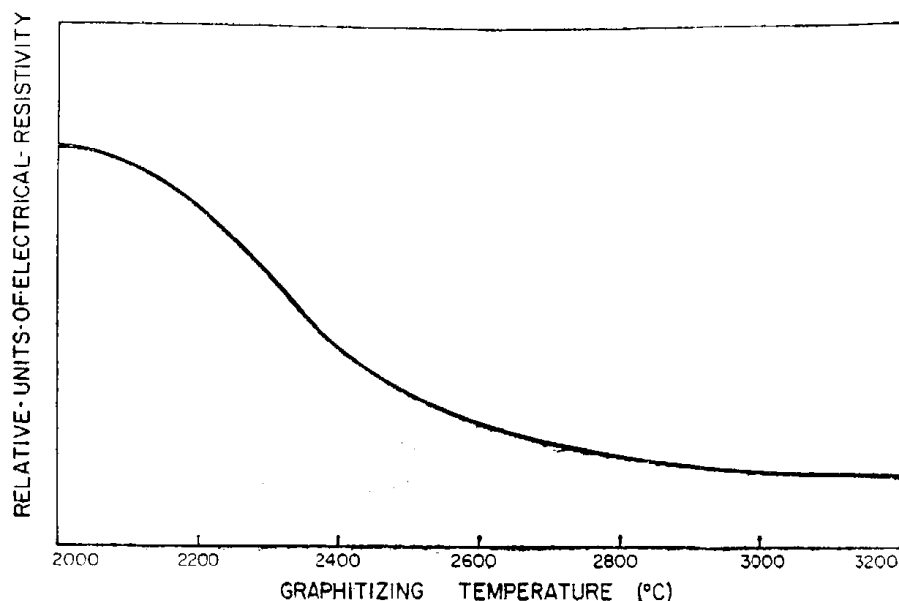


图9 电阻率与石墨化温度的关系曲线

X射线衍射就是指一束单色X射线投射在一种物质的试样上，然后把它的影象再投射并显影到感光版上，晶体物质给出一系列的同心圆。图10表示金刚石粉末的准确，轮廓分明的、定向的衍射图谱。使用粗糙的粉末如本试样时则图谱上就显出“粒状物”。

图11表示石墨的粉末图谱，其中有许多轮廓分明的衍射环。图12表示炭黑的粉末图谱，

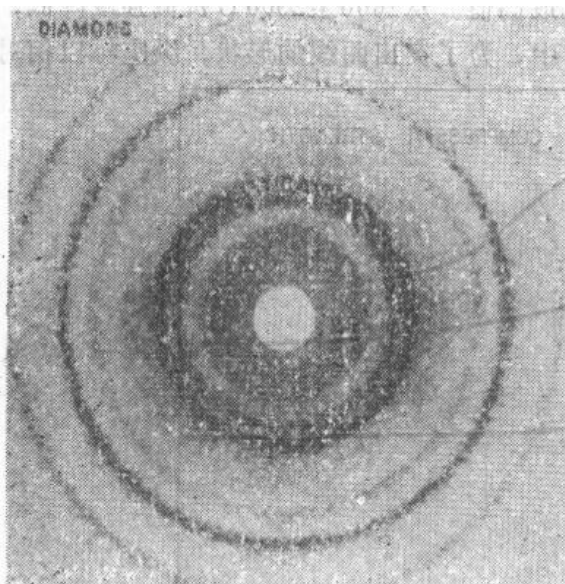


图10 金刚石粉末准确的、轮廓分明的、定向的、衍射图谱，表示其高度的晶体结构。图谱中的某些粒状物是粗粒的金刚石粉所引起。

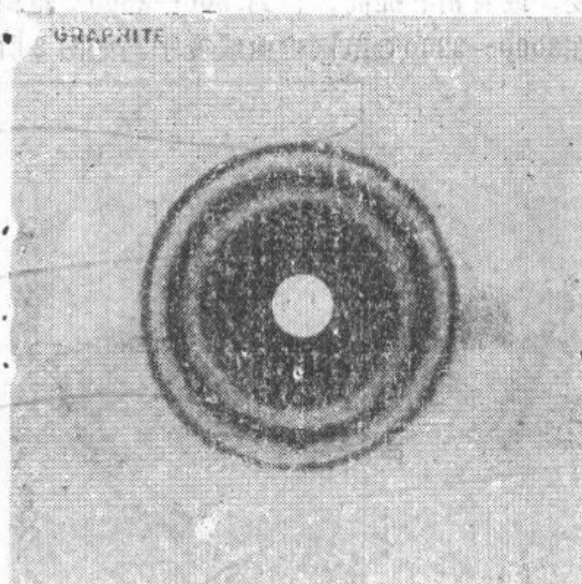


图11 石墨衍射花样中，多而尖锐的衍射环表示它有大量的完全的晶面，x衍射花样就象指纹一样，能显出它的特征

其中衍射环较少，并且轮廓不分明。但将炭黑置于高温下作X衍射，如图13所示，则衍射环比原来炭黑多，并变得明显，近于石墨，这表示随着失去了炭黑的许多物理性质的同时，它已部分地转化为石墨。

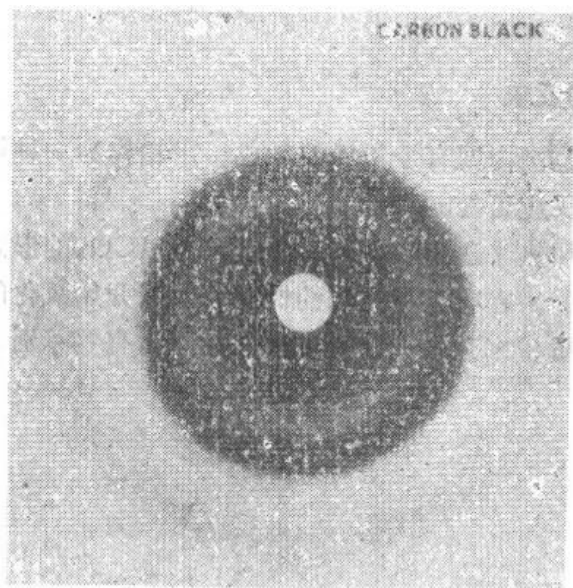


图12 炭黑衍射花样中弥散的衍射环，表示它比石墨的结晶程度低得多。显然炭黑也具有某些石墨结构的特征，但不能认为它和石墨是相同的物质

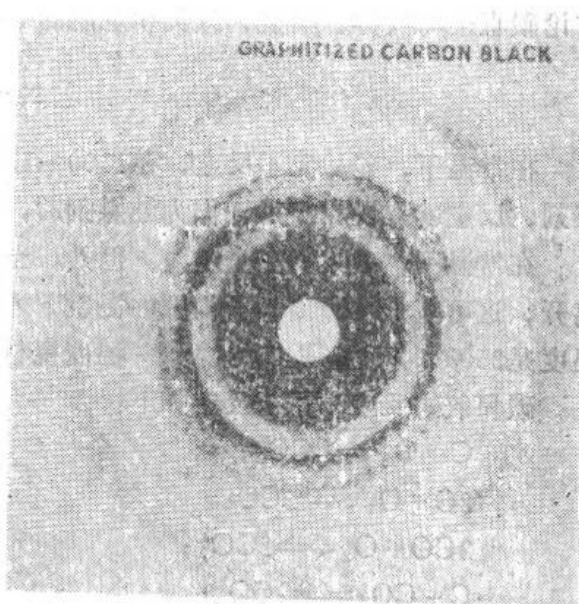


图13 将炭黑置于高温则其衍射图谱显示出具有新的高度发达的石墨结构的衍射环。同时，炭黑的物理性质则减少。

图14表示火焰高温生成的炭黑、(或者部分石墨化炭黑)和石墨的衍射图谱的对比。可以看到，从炭黑到石墨衍射环明显度增加，而石墨化炭黑的图谱则处在炭黑与石墨二者之间。

沸点（可参阅熔点）一种单一的纯液体的沸点定义是在某一个温度下它的蒸汽压等于实际的大气压。如果大气压或液面上的压力降低，则沸点亦降低；如果液面上的压力允许增加，沸点也提高。标准的沸点是在1个大气压（760毫米汞柱或14.7磅每平方英寸绝对）时的沸点。下面是不同作者测得的炭的沸点：

3600℃	维勒测得
4000℃	柯罗克斯测得
3500℃	摩森测得
3700℃	摩特测得

升华温度（亮白温度），指一种固体的能量水平，在这个水平上，固体能在大气压下不经过液态而直接转为汽态。

碳弧焰口温度
（碳的升华温度）3800℃ 张烈测得

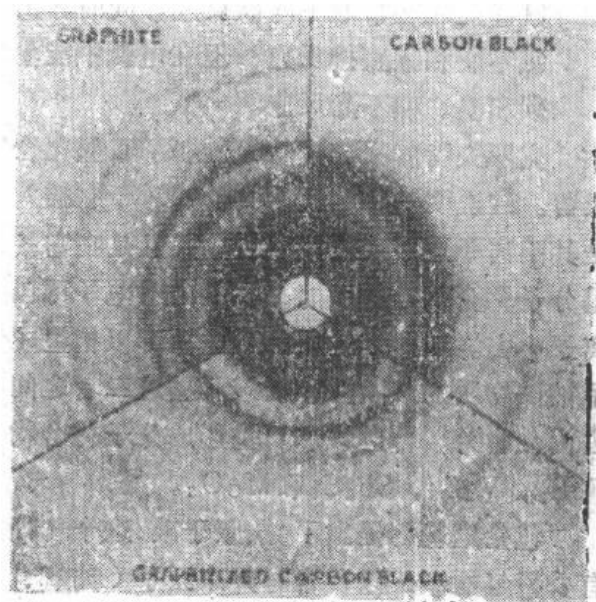


图14 三种物质的组合图谱，显示出结构上不同之处只是石墨化程度不同，在高温下，炭黑转化为石墨