

[苏] B. B. 冈恰罗夫

辐照对核反应堆石墨的作用

原子能出版社

内 容 简 介

本书首次系统地给出了苏联碳素结构材料各种性能的有关资料。分析了决定石墨各种性能的工艺因素、总孔隙率和结晶程度以及石墨性能的辐照变化。特别注意了石墨的辐照尺寸稳定性和抗氧化能力。

在总结有关资料的基础上提出了碳素材料性能辐照变化的模型，并给出了计算这些变化的公式。描述了在反应堆上进行石墨研究所使用的试验设备，并分析了各种铀-石墨反应堆的砌体。

本书可供在原子能技术领域中工作的科学工作者、工程师和设计人员使用。

Владимир Владимирович Гончаров

Николай Степанович Бурдаков

Юрий Сергеевич Виргильев

Владимир Иванович Карпухин

Павел Александрович Платонов

Действие облучения на графит ядерных реакторов

Москва «Атомиздат», 1978

辐照对核反应堆石墨的作用

[苏] В. В. 冈恰罗夫等著

陈效军译 夏自芳校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京印刷一厂印刷

(北京市西便门)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/32 · 印张10 · 字数222千字

1981年12月第一版·1981年12月第一次印刷

印数001—1300 · 统一书号: 15175·331

定价: 1.25元

引 言

社会生产的发展直接引起对各种形式能量的需求的增长,而首先是电能需求的增长。电能需求量基本上依靠用有机燃料发电的电站来满足。然而电能需求增长的速度是很高的,以致在苏联个别经济区中,甚至于目前已出现尖锐的化石燃料的不足。譬如,预报指出,展望到1990年,即使考虑到把生产力大规模地迁移到苏联东部地区,电能的基本需求仍将集中在苏联的欧洲部份。而且只有在苏联欧洲部份的领土上广泛地建造核电站,才可保证能量的平衡^[2]。

利用原子能来满足冶金工业、化学工业和供暖所需的电能和热量,可以代替有机燃料和抵偿燃料平衡的任何不足。

1954年,世界上第一个原子能电站在苏联投入运行。第一原子能电站和以后建成的其它核电站的运行经验证明,它们在总的动力系统中能够可靠和稳定地工作。

在苏联建造的核电站的基本型式为:壳式水-水动力反应堆(БВΘР)核电站和管式铀-石墨大功率反应堆(РБМ-К)核电站。在苏联原子能动力发展计划中,管式铀-石墨反应堆核电站占有重要的地位。这是因为它们既有高度的工作可靠性,又有可能实现极大的单堆电功率(10^6 千瓦以上)。

铀-石墨大功率反应堆的基本部件之一是很多吨重的石墨砌体。它应当在核电站长达30年之久的整个运行期内可靠地工作。由此对作为结构材料的石墨提出了严格的要求。

反应堆石墨问题最初是在苏联卫国战争的年代里,在创建核反应堆的过程中向苏联物理学家们提出的。当时最重要

的问题是能不能得到必需数量的足够纯的石墨。对石墨的纯度提出了极为严格的要求。譬如，石墨中杂质硼的含量只允许为百万分之几。然而，使任务更为复杂化的是对石墨的需要量却要按几百吨来计。

由于И. В. 库尔恰托夫(Курчатов)所采取的强有力的措施，在比较短的时间里制定了获取高纯度石墨的方法和按必需的数量组织了工业生产。在И. В. 库尔恰托夫直接领导下，1946年12月25日在苏联成功地起动了欧亚大陆上的第一个用石墨作慢化剂的核反应堆。为了制造第一个苏联反应堆的砌体曾用了450吨石墨。

在战后最初的年代里，苏联已经取得了必要的经验来建造和掌握生产钚的反应堆，而且已经解决了很多复杂的技术问题。苏联学者在利用链式反应中已进入了下一阶段——在实际上解决原子能的动力利用问题^[133]。在第一个反应堆运行中得到的极有价值的经验和在它上面进行的研究工作使得人们能设计和建造其它反应堆。

在И. В. 库尔恰托夫的领导下，平行地进行了另外的研究工作。在这些研究过程中，发现了对了解反应堆工作和辐射对物质的作用来说极有兴趣并具有最重要意义的现象。当在强烈的中子辐照条件下研究石墨的物理特性时，发现它有显著的变化：热导率和电导率减小，体积和机械强度改变。以后又查明，当辐照后的石墨退火时会放出贮存在晶格中的潜能。这些研究工作搞清了石墨辐照破损的本质和解决了一系列在石墨慢化反应堆设计和运行中发生的实际问题。

在研究石墨性质中最有价值的结果是按照И. В. 库尔恰托夫的倡议，将功率为 5×10^4 千瓦的铀-石墨反应堆的砌体在运行了四年之后解体，进行了极为勇敢的试验以后得到

的。

现在,当石墨作为大型动力堆的活性区和反射层的结构材料在更高的参数下运行时,对它的性能提出了补充要求。后面这种情况要求进行专门的试验和理论研究,其目的是确定保证动力堆砌体长期工作能力的科学依据。

在最近的将来,由于打算在国民经济的各个领域中的应用的高温气冷堆的建造,石墨的需要量还将进一步扩大。

石墨那些独特的性能,如小的中子吸收截面、良好的慢化性能、较易获得化学纯的材料、特别好的热力学性能和足够的强度,使它在核技术中得到广泛应用。然而当在核反应堆内辐照时,由于快中子的作用使晶格结点上的碳原子产生位移和造成晶体结构的变化,石墨的性质有很大变化。

由于快中子场的不均一性和在单个石墨块(铀-石墨反应堆砌体的基本单元)内巨大的温度梯度使石墨性能的辐照变化进一步加深。上述经常起作用的因素使石墨沿着石墨块断面发生不同的尺寸变化并产生应力。这种应力可能成为运行过程中某些石墨块破坏的原因。

要预测石墨结构元件在现代核装置中的工作性能必须知道在广阔的温度范围内,在 10^{22} 中子/厘米²以上的快中子积分通量作用下,石墨性能因辐照而变化的规律性。属于这方面的基本性能有:线性尺寸的稳定性、强度、蠕变、弹性模量、热膨胀系数和热导率,以及石墨的抗氧化能力。

在最近三十年内,完成了数以千计的有关辐照对石墨作用的研究工作。尽管已经进行了大量的试验和理论研究工作,对石墨的兴趣并没有减少;不但如此,在最近几年内试验和理论工作的数目却大大地增加了。这是因为:由于力求增大单堆功率并从而提高核装置的运行参数,对石墨在辐照场内

的工作性能提出了新的技术要求。

全世界为制造优质的新牌号堆用石墨广泛地进行着研究工作。目前, 由于理论还只能近似地预言各种材料在辐照损伤时的性能变化, 因此研制新牌号的石墨, 不仅要对材料本身, 而且也要对其构件在能模拟该石墨构件工作情况的条件下, 进行辐照试验。在这些工作中, 研究铀-石墨反应堆砌块的工作性能占有重要的地位。

研究辐照对反应堆材料的物理-机械性能的影响, 推动了人们对辐照损伤的本质进行系统的研究。结果石墨竟成了在中子辐照作用下, 对其结构-物理性能的变化了解得最早的一种材料。研究石墨的辐照损伤, 大大地扩展了材料学和固体物理学课题的范围, 也扩大了在辐照过程中测定材料性能的各种试验方法的研究范围。

有大量的期刊和一些在国外出版的单行本专讲上面列举的问题。各种国际会议和讨论会对有关反应堆石墨辐照作用资料的综合工作起了很大的促进作用。然而已出版的成果是在研究国外牌号石墨时得到的。由于所用原料等的不同, 这些石墨牌号与苏联的牌号是有差别的。

总共只有几本俄文出版物是专讲这类问题的。奈廷格尔(Nightingale, 1962年)、西蒙斯(Simmons, 1965年)、雷诺(Reynolds, 1968年)、曼特尔(Mantel, 1968年)的专题论文没有译成俄文。

苏联最早的专讲核反应堆石墨问题和研究石墨辐照损伤本质的文章是按照И. В 库尔恰托夫的委托发表的(1955年苏联科学院和平利用原子能会议,《原子能》, 1957年, 卷3, 第11期)。

С. Е. 维亚特金(Вяткин)、А. А 杰夫(Деев)、В. Г. 纳

戈尔内伊(Нагорный)、В. С. 奥斯特洛夫斯基(Островский)、А. М 西加雷夫(Сигарев)和Г. А. 索克尔(Соккер)的《核石墨》一书(1967年)是第一本用俄文写的关于在原子能技术领域使用的结构石墨的专门著作。书中给出了石墨的生产方法,描述了晶体结构和孔隙结构,电子学性能,热力学性能和机械性能,以及石墨和某些元素和化合物的相互作用,阐明了各种国外牌号的反应堆石墨受较小剂量辐照后的行为。

在权威的苏联学者们所写的《原子能动力二十年》(1974年)一书中,给出有关苏联现有原子能电站的结构和运行经验的资料,大量地提供了作为国内外原子能动力事业学校的第一原子能电站的运行材料。

1975年出版的《碳基结构材料的性能手册》中,详细地叙述了苏联碳素材料的生产工艺及其性能。作为对基本性能的补充,还给出这些材料受中子辐照后的某些数据。

在С. Т. 康诺别叶夫斯基(Конобеевский)的专讲辐射材料学问题的著作《辐照对材料的作用》(1965年)一书中,分析了在各种类型的辐照作用下原子的碰撞,由此而发生的晶体结构的缺陷和它们与反应堆材料性能的关系。然而书中提到石墨的地方总共只有几页。稍晚用俄文出版的В. 凯利(Kelly)的《固体的辐照损伤》(1970年)一书详细地叙述了逐级位移理论,分析了辐照缺陷的直观结果。然而,牵涉到辐照对材料的影响问题时,只分析了辐照缺陷与这些材料各种性质变化的关系方面。

本书的目的是将辐照对石墨性能影响的研究成果系统化,描述苏联石墨结构材料制取过程中其性能的形成,以及这些性能与石墨在反应堆内辐照作用下行为的相互关系。为了显示这种或那种规律性,广泛的利用了样品材料。在制取这些

材料的过程中，使感兴趣的性能在其中发生有规律的变化。本书综合了已发表的关于石墨砌体的结构及其工作性能的资料。此外，还介绍了在苏联研究工作中采用的各种封装设备的结构和石墨的辐照方法。

在编写本书时，作者在总结了国内外关于石墨研究的成果以后，提出了通过计算途径来估计反应堆石墨某些性质辐照变化的方法。特别注意了石墨材料的(主要是苏联生产的)孔隙率和晶体结构的完整性对其初始的和辐照后的物理-机械性能的影响。

在写作中用到的文献没有全部列入清单。因为作者认为没有必要给出所有已发表的著作的一览表。

目 录

引言	iii
第一章 结构石墨及其性能	1
§ 1.1 制取工艺	3
§ 1.2 结构石墨的孔隙率	18
§ 1.3 碳素材料的晶体结构	23
§ 1.4 石墨的物理性能	31
§ 1.5 石墨的蠕变	63
§ 1.6 石墨性能的不均一性	36
第二章 石墨在核反应堆内的辐照技术	71
§ 2.1 堆内辐照装置	71
§ 2.2 辐照时影响材料性能的主要因素	85
§ 2.3 反应堆活性区内温度的测量	91
§ 2.4 中子辐照积分通量的确定	95
第三章 中子辐照下碳素材料的晶体结构和性能的变化	100
§ 3.1 晶体结构	100
§ 3.2 热导率	111
§ 3.3 比热	117
§ 3.4 潜能	118
§ 3.5 电气物理性能	123
§ 3.6 热膨胀系数	129
§ 3.7 强度和弹性	132
§ 3.8 辐照蠕变	155

第四章 石墨辐照时的尺寸变化	172
§ 4.1 尺寸因素	173
§ 4.2 原料	176
§ 4.3 热处理温度	180
§ 4.4 成形方法	184
§ 4.5 石墨的密实处理	189
§ 4.6 配料粒度	192
§ 4.7 辐照剂量和温度	193
§ 4.8 尺寸变化与积分通量和温度的关系	211
§ 4.9 几个理论问题	211
第五章 结构石墨的氧化	229
§ 5.1 反应堆技术中所用的气体	229
§ 5.2 石墨氧化的某些规律性	230
§ 5.3 石墨与辐照过的气体介质的相互作用	237
§ 5.4 石墨在反应堆内辐照时的氧化	240
§ 5.5 防止砌体在运行中氧化的几个问题	251
§ 5.6 核电站的气体回路	254
第六章 石墨砌体	256
§ 6.1 砌体的温度工况和中子分布	257
§ 6.2 砌体结构	260
§ 6.3 砌体的辐照变化	269
§ 6.4 石墨砌体的结构及其工况的改进	275
§ 6.5 石墨砌体工作性能的试验研究	287
文献目录	297

第一章 结构石墨及其性能

在门捷列夫周期表中碳属第Ⅳ族元素。碳的原子序号为6。它由两种稳定同位素所组成，质量数分别为12(98.892%)和13(1.108%)。天然碳的相对原子量为 12.01115 ± 0.00005 。

在自然界遇到的有结晶态的碳(金刚石和石墨)和无定形态的碳(煤、石油沥青等)。碳可以从一种形态转化成另一种形态。金刚石-石墨-液态碳体系的三相平衡点所对应的温度为4100 K，压力为 $(12.5-13) \times 10^4$ 公斤力/厘米²(测得不很精确)。在1公斤力/厘米²的压力下，石墨-蒸汽体系的平衡温度为 3640 ± 25 K。当压力增加到105公斤力/厘米²时，平衡温度上升到4000 K。石墨-液体-蒸汽三相点的压力为 125 ± 15 公斤力/厘米²，温度为 4020 ± 50 K^[128]。

石墨为六角形结构。碳原子位于紧密排列的正六角形的角顶，与苯环相似。这样的平面称为基面。在基面内每个原子和与其相距1.415埃的三个相邻的原子相连接。原子间的键能为170千卡/克原子。

石墨晶体中的基面互相平行地叠合，然而它们交替的次序可以不同，这就造成石墨有两种晶态——六角形的和斜方六面体的。前面一种的特点是各层相互之间有相对的偏移，而且每逢第三层就与第一层重复。相邻两层之间错开，使得每个六角形中心的上面和下面有毗邻层的碳原子。在斜方六面体结构中每逢第四层与第一层重复。斜方六面体结构常在天然石墨中遇到。在天然石墨中它的含量可达30%。在人造

石墨中实际上没有发现过。基面间的相互作用力很小，且具有范德瓦尔力的性质。垂直基面方向的键能为1—4.36千卡/克原子，而基面间的距离为3.3538埃。

所有各种人造石墨和天然石墨都具有各种稳定的结构缺陷。根据缺陷的规律性程度和特点，石墨材料的机械性能、热物理性质、半导体性质和其它实际上很重要的性能可以在很大范围内变化。作为石墨晶棱的功能团成份的，或者以化合物形式侵入晶面间空隙处的，或者作为机械杂质而进入碳素材料的异原子，造成石墨性能的进一步多样性。

工业上最广泛采用的人造碳素材料可分成下列各类^[6]：

1. 焦炭和煤。它们是固体和液态的有机物质热分解后的非挥发性残余物。根据原料的不同，称这些物质为煤焦、油焦或沥青焦等。

2. 碳素陶瓷物质。它们是用沥青粘结的焦炭和煤(基体)的组合物。沥青热处理(焙烧)后将基体固结。

3. 气成物——由于气体和蒸汽热分解的结果而形成的物质(碳黑、热解炭、热解石墨)。

4. 人造石墨——由原始材料及其组合物经高温热处理(石墨化)后制得的。

作为反应堆制造的结构材料主要采用人造石墨。它们是由含约75%多分散性的焦炭(填料)和25%煤沥青(粘结剂)的炉料(机械混合物)用电极法制成的。这时，原料的特性、制造工艺的特点等对人造石墨的性能，进而对其工作性能，有重大的影响。因此下面分析一下供反应堆技术用的结构石墨的制取工艺及其对材料运行性能的影响。

§ 1.1 制取工艺

上世纪的八十年代，在工业上已经找到制取碳素材料的基本工艺方法：将原料磨碎，与粘结剂混合，压制成形并在保护性介质(填充料)中焙烧制品。差不多在同时，曾第一次采用了煤焦油作为粘结剂。在十九世纪末发明了制取人造石墨的方法。

生产碳素材料的基本工艺步骤一直保持到现在。此外，在现代工业中还有大量成熟的和在生产中采用的辅助步骤。基本步骤对所有各类制品都是必要的，而辅助步骤可以只用于这种或那种制品。

鉴于每个工艺步骤对石墨材料性能的形成都有作用，下面介绍它们的简要特点。

原料 结构石墨的性质及其在运行中的行为在很大程度上取决于生产石墨时所用的原料的性质及对原料的初加工，尤其是焦化制度。因此我们分析一下在结构石墨生产中使用最广的焦炭的构造特性。焦炭是电极和电碳生产中，尤其是石墨制品生产中最重要原料之一。低灰份的焦炭价值最高，其灰份不超过1%。

石油残渣的沥青状物料在低温下碳化时形成焦炭的基本结构特性。对这些残渣加热出现球状的颗粒——与液态晶体相似的球状体或球粒。转变的起始温度与被碳化的物质品种有关，在400到520℃之间变化^[166]。随着温度的升高球粒长大，互相发生作用。由于聚结作用而形成“镶嵌物”。提高温度和延长保温时间，由于形成新的球粒和原有球粒的变大，使得被碳化的物料中的球粒份额增加。

根据文献[175]的资料,碳化时间不充分会使球粒汇合成类似纤维的长形“镶嵌物”,同时单球粒的各层不断地连接起来。原始碳素材料中的含氧量 $>7\%$ 促使获得各向同性的焦炭。当含氧量较小时($\leq 5-7\%$),则形成“镶嵌物”和各向异性的焦炭。

与球粒的生长和聚结同时发生的各种过程,决定着焦炭的结构[175]。球粒变大和它们结集的特点影响焦炭以后的织构。球粒的聚结和石油残渣中各向同性部份的消失,使球粒发生显著的变形。这些球粒就是半焦炭微观结构的基本单元。

当对半焦炭进行加热时,结构上的镶嵌性和它的分层性仍然保持,形成刚性的焦炭骨架,同时破坏了密实性而产生气孔。球粒越大,影响就越大。具有各向异性结构的焦炭能很好地进行石墨化。由含氧量 $>7\%$ 的原料所制得的各向同性的焦炭石墨化较差。

在苏联生产两类低灰份焦炭——石油焦和沥青焦。第一种由石油残渣焦化而得,第二种由煤沥青焦化而得。石油焦的性质主要取决于制造它们所用的石油残渣的品种。在较小的程度上还取决于焦化条件。因此石油焦分成两大类:裂化焦——用石油产品裂化加工的残渣制造;热解焦——用热解残渣制造。

裂化过程在温度 $<500^{\circ}\text{C}$ 下进行。在这个温度下不形成碳黑,而且裂化残渣的芳构化进展缓慢。热解过程则在大气压力下,温度为 $650-750^{\circ}\text{C}$ 的条件下进行。因此热解残渣总是显著地芳构化,含有大量碳黑,可以具有不同的组份和分子结构。因此,由这种原料制取的焦炭也将具有各种不同的性能。

焦炭颗粒是长形的(非等轴的)。这是因为在焦化过程中

芳香族化合物的分子倾向于沿着苯环的平面，平行于蜂窝状焦炭壁面取向。无烟煤晶粒的形状，由于它构造上分层的特点，也是非等轴的。这样的晶粒形状和性质极大地影响着制品成形后性能的各向异性程度。

国外工业上用的低灰分焦炭，来自褐煤半焦化时所得到的初级煤焦油。国外大部分牌号的石墨生产利用了各向异性的石油焦(表1.1)。将其煅烧后磨细就得到非等轴的有高度织构的颗粒。由于这种焦炭(“肯达尔”和“得克萨斯”型)显著的各向异性结构，即使相当大尺寸的颗粒(约1毫米)也还保持着非等轴性。以这种颗粒用挤压法经过压料机孔模使毛坯成形的过程，造成上述牌号的石墨具有高度的各向异性。用电子显微镜进行研究证明^[232]，以石油焦为基体的石墨的基本构造单元是外形光滑的片状颗粒，类似于天然石墨的颗粒。由于这个原因，石墨辐照时的尺寸变化是各向异性的。

近年来出现了研制各向同性材料的必要性。它们的基体是在结构上各向同性的硬沥青焦炭，它是由开采的石油沥青中取得的。在目前文献中还没有报道关于从硬沥青中制取焦炭的方法，也没有报道关于用它制造石墨的工艺。硬沥青焦炭结构的研究^[232]，证明了存在着大量直径10微米以下的各向同性的晶粒。在晶粒中碳素网格上“叠放”着中心明显无序的同心球。无序区的尺寸为6—8微米。在硬沥青焦炭中，除了各向同性的晶粒以外还含有约60%的转化成针状的小片，其直径为75埃，长约1微米。这些颗粒甚至在3000℃的温度下也很少石墨化。这就使以硬沥青为基体的材料的结构完整性不如由石油焦制成的石墨。应当指出，以硬沥青焦炭为基体的材料在其完整程度、宏观特性等性能上的差别很大。

由低温原料制得的苏联裂化焦是一种条状结构，具有长

表 1.1 经 1000—1300℃ 煅烧后, 在结构石墨生产中应用的焦炭的特性

焦炭牌号	焦炭类型	密度 ^① , 克/厘米 ³	灰分 ^① , %	含量, %				结 构 ^②	颗粒形状和粒度	文 献
				C	H	N	O			
P G A “肯达尔”	延迟焦化的 石油裂化焦	—	0.2	—	—	—	—	条 状	非等轴的, 0.01—1.00 毫米	[206]
	同 上	2.11	0.1	93	4.0	1.0	—	针状颗粒	非等轴的, 其中50% 为2—300微米, 其余 >300微米	[232]
“得克萨斯” “福尔特”	同 上	2.04	0.1	93	4.0	1.0	—	立方形颗粒	同 上	[206]
	沥青焦	—	—	93	4.1	1.1	0.5	点 状	等轴的,	[206]
—	硬沥青焦 ^③	—	1.1	83	10.5	2.4	2.1	直径12微米的椭圆 粒	0.01—1.0 毫米 各向同性	[211]
K H K ⊖	石油裂化焦	2.10	<0.6	—	3.4	—	—	条状, 部份结构单 元取一定位向	非等轴的	[57, 43 页; 61, 25 页]
	石油热解焦	2.04— 2.08	<0.3	—	2.7	—	—	球状, 颗粒均匀地 分布在稳定的条状 组份内	0.01—1.20 毫米	[57, 43 页; 61, 25 页]
K П ⊖	沥青焦	—	0.3— 0.5	97— 98	0.3— 0.5	1.0	2.0	短条状, 含有大量 碳黑结构的颗粒	—	[57, 43 页; 61, 25 页]

① 在1300℃下煅烧5小时后。

② 根据光学显微镜的资料。

③ 在未煅烧的状态下使用。

形的，强烈非等轴的结构单元。在煅烧时，结构内发生大量平行纤维方向的裂纹。由于这个原因，当将焦炭磨细时得到片状的颗粒。裂化焦有微孔，它使这种焦炭在显微切片下呈现网状结构。裂化焦中大量密闭的微孔造成压制的困难，在去掉负载后会使得制品内形成裂纹 [57, 43 页]。

在热解焦中气孔要大一些。焦炭颗粒具有密实的壁面，其上几乎没有微孔。这些结构上的区别一方面是由于在热解残渣中存在大量的碳化物，另一方面是由于在焦化时气体的释放程度不同 [61, 25 页]。

根据焦炭的微观结构(热解焦或裂化焦)，用这些焦炭生产制品的工艺条件有很大的变化。如果用颗粒的最大尺寸 b 和最小尺寸 c 的比值来表示非等轴性的程度，那末对牌号 KHPIC 的石油焦来说，颗粒的非等轴性不大。这也就造成了以它为基体的材料(如 Γ M3 石墨)的物理性能具有不大的各向异性。非等轴性程度越大，在压制时颗粒越易于采取一定的位向。有些文献的作者 [136, 31 页] 提出了颗粒的非等轴性与电阻的各向异性 (α) 之间的公式：

$$\alpha = \rho_{\parallel} / \rho_{\perp} = (b/c)^{7/4}$$

式中 $\rho_{\parallel}$ 和 $\rho_{\perp}$ ——平行和垂直挤压轴线测得的电阻。对 Γ M3 石墨来说 $\alpha \approx 1.4$ ，而非等轴系数 $b/c = 1.25$ 。

将 KHPIC 焦炭煅烧后磨碎，用 X 射线研究其颗粒的组织，也证实它们的组织性不高，甚至在 3000°C 下进行石墨化后，它实际上也没有什么变化。

焦炭在石墨化时的性状也各有不同。由裂化焦制得的石墨质软，有滑腻感，有高的电导率。用它做成的制品很容易进行机械加工和磨削。热解焦是两种不同结构的碳素物质的堆集物(球状的和条状的)。由它制得刚性的石墨，电导率较