

碳纤维和石墨纤维 复合材料技术

[美] J. 德尔蒙特 著

李仍元 过梅丽 吕锡慈 译

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书全面地阐述了高级复合材料的基本理论、性能和测试方法。本书共分十四章：第一、二、十四章论述了提高碳纤维和石墨纤维性能的技术关键；第三、四、五、十三章叙述了已经获得成功和正在发展中的各种耐高温树脂基体及其他基体；第六章介绍了改进基体和纤维间结合力的各种化学物理处理方法；第七至十二章分别阐明了新型复合材料的基本性能、测试方法及其应用。

本书可供从事材料科学研究的科技人员及高等院校有关专业师生参考。

J. Delmonte

TECHNOLOGY OF CARBON AND GRAPHITE FIBER COMPOSITES

Van Nostrand Reinhold Company 1981

碳纤维和石墨纤维复合材料技术

〔美〕J. 德尔蒙特 著

李仍元 过梅丽 吕锡慈 译

责任编辑 童安齐

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987年8月第一版 开本：787×1092 1/32

1987年8月第一次印刷 印张：16 5/8

印数：0001—2,000 字数：379,000

统一书号：15031·838

本社书号：4644·15—10

定价：3.90 元

目 录

第一章	碳纤维和石墨纤维的起源与发展	1
第二章	碳和石墨纤维的制造和性能	50
§ 2-1	整体石墨性质	51
§ 2-2	高强度晶须的性能	53
§ 2-3	碳/石墨晶体的特征	57
§ 2-4	碳/石墨纤维的有机纤维原丝	59
§ 2-5	聚丙烯腈纤维原丝	66
§ 2-6	碳/石墨纤维的沥青基	73
§ 2-7	大直径碳/石墨长丝	79
§ 2-8	混杂纤维	81
§ 2-9	耐氧化性	89
§ 2-10	碳/石墨纤维生产的工业活动评论	94
§ 2-11	碳纤维长丝的主要生产厂	95
§ 2-12	预浸料	98
第三章	使用温度达 200°C 的合成树脂基体	100
§ 3-1	环氧树脂体系	101
§ 3-2	耐热环氧树脂	103
§ 3-3	用于环氧树脂的固化剂	108
§ 3-4	热固性树脂体系的加工方法	112
§ 3-5	酚醛树脂	131
§ 3-6	聚酯树脂	132
§ 3-7	聚氨酯	134
§ 3-8	用于高级复合材料的其它热固性树脂	136
第四章	使用温度达 300°C 的合成树脂基体	140

§ 4-1	聚酰亚胺	141
§ 4-2	热塑性聚酰亚胺	162
§ 4-3	炔端基聚酰亚胺	168
§ 4-4	聚苯并咪唑(PBI)	171
§ 4-5	其它耐高温基体	171
第五章	热塑性基体	174
§ 5-1	纤维状填料和树脂的混合物	176
§ 5-2	热塑性塑料的特性	178
§ 5-3	热塑性工程塑料与碳/石墨纤维的复合	181
§ 5-4	热塑性工程塑料	187
§ 5-5	聚酯	191
§ 5-6	其它的热塑性基体	193
第六章	碳/石墨纤维的表面处理及其 对复合材料的影响	196
§ 6-1	化学偶联剂	205
§ 6-2	液态氧化剂	208
§ 6-3	气相氧化处理	210
§ 6-4	等离子气体技术	212
§ 6-5	化学溶液处理	213
§ 6-6	气相沉积处理	214
§ 6-7	在石墨纤维上进行电聚合	215
第七章	碳/石墨复合材料的力学性能和物理性能	218
§ 7-1	聚合物的断裂	219
§ 7-2	复合材料的断裂	222
§ 7-3	高级复合材料的韧性	244
§ 7-4	疲劳和蠕变现象	253
§ 7-5	其它环境因素	265
第八章	碳/石墨纤维的电性能及其应用	269
§ 8-1	应用	273
§ 8-2	碳纤维的处置	287
第九章	环境对碳/石墨纤维复合材料的影响	289

§ 9-1	热脉冲	302
§ 9-2	海上暴露	309
§ 9-3	热循环的影响	314
§ 9-4	环境对碳/石墨纤维复合材料疲劳性能的影响	316
第十章	高级复合材料的测试方法	321
§ 10-1	拉伸强度	322
§ 10-2	压缩强度	335
§ 10-3	剪切强度	337
§ 10-4	弯曲强度	342
§ 10-5	树脂含量和孔隙率	344
§ 10-6	冲击试验	346
§ 10-7	预浸料试验	349
§ 10-8	化学质量保证	352
§ 10-9	无损检验	354
第十一章	碳/石墨纤维复合材料在航空、航天和 汽车工业中的应用	360
§ 11-1	航空应用	364
§ 11-2	航天应用	375
§ 11-3	其它航空航天应用	381
§ 11-4	汽车工业中的应用	386
第十二章	在工业和商业中的应用	395
§ 12-1	体育运动和文娱活动方面的应用	395
§ 12-2	船舶工业的应用	398
§ 12-3	压力容器	400
§ 12-4	贮能设备	402
§ 12-5	低摩擦	406
§ 12-6	碳纤维增强的混凝土和陶瓷	409
§ 12-7	其它应用	411
第十三章	使用温度超过 300°C 的耐高温基体 (金属基和碳/碳复合材料)	414
§ 13-1	金属基体复合材料	414

§ 13-2	碳纤维/碳基体复合材料(碳/碳复合材料).....	424
§ 13-3	沥青基混合物.....	426
§ 13-4	碳/碳复合材料的树脂基体	432
§ 13-5	化学蒸气沉积(简称 CVD)	436
§ 13-6	玻璃基体.....	446
第十四章	碳/石墨纤维复合材料的制造和加工技术.....	449
§ 14-1	材料的选择.....	449
§ 14-2	材料的操作.....	453
§ 14-3	固化和后固化.....	458
§ 14-4	拉拔工艺.....	465
§ 14-5	纤维缠绕成型工艺.....	467
§ 14-6	胶接.....	469
§ 14-7	高级复合材料的修补.....	472
参考文献	474
汉英名词索引	503

第一章 碳纤维和石墨纤维的起源与发展

高强度碳纤维和石墨纤维复合材料的起源可追溯到本世纪六十年代。那时，形势日渐明朗：由于碳纤维和石墨纤维对提高结构件的强度和刚度能起很重要的作用，因此可能得到大力发展。

早在研制电灯的初期，爱迪生就首先用碳纤维制作了灯丝。不过，在随后的数年内，它又让位给效果更好并耐用的材料了。随着玻璃纤维在交通、建筑、船舶、电器绝缘、隔热和许多其它工业产品等各种各样的实际应用中发挥了突出的作用，纤维产品在航空航天和汽车工业部门的应用也逐渐变得与结构设计一样的重要了。航空航天工业部门对结构材料的迫切要求促进了优质高强度高模量纤维及其复合材料的出现。硼纤维和碳纤维的发展以及它们与新型高级粘结剂的复合形成了高级复合材料的基础。虽然纤维的产量还很有限，但它们毕竟满足了某些早期制件的物理性能要求。对此不断感兴趣的单位主要是美国空军、海军和航天部门，他们鼓励并资助进一步寻求其它材料的研制工作，从而令人十分可喜地出现了物理性能优良的碳/石墨纤维。虽然当时的玻璃纤维具有很高的拉伸强度，但是为了使它的刚性超过结构金属而进行的旨在提高模量的研究工作尚未获得成功。这个目标已经通过高级硼纤维和石墨纤维复合材料来实现了。图 1-1 综述了复合材料的优异特性，图中列举的几项内容有力地说明了为什么在结构件中要积极考虑采用复合材料，甚至用它们

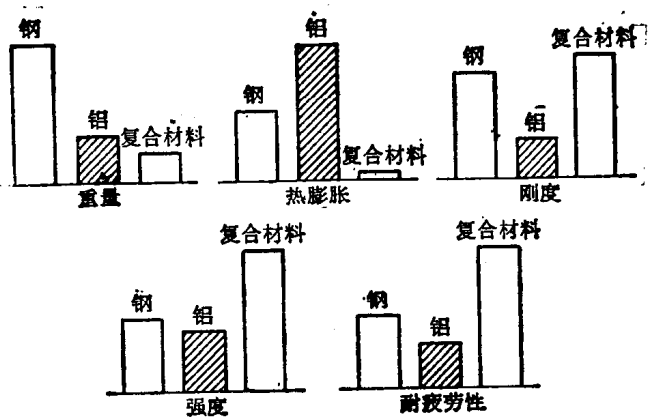


图 1-1 复合材料和金属材料的比较(Deutsch, G. S. 美国国家航空航天局, 航空航天材料与加工工程师学会第 2 届专题论文集, 1978 年 5 月)

来代替金属材料的理由。

在出版的技术性书刊中, 已充分地论证了玻璃纤维在复合材料技术中的作用。本书则主要强调碳和石墨纤维日益提高的地位, 并与其它几种具有竞争性的纤维作一些比较。由于混杂复合材料正在逐渐受到重视, 因而这样做是很重要的。由于制备具有优良性能的碳纤维需要复杂的技术, 因此在本书出版之时, 其价格相当昂贵。但毕竟碳是较丰富的元素, 因此估计在不远的将来, 碳纤维的价格会大大降低。甚至从七十年代初期到末期, 我们就看到, 碳纤维的价格已经从 100 美元/磅降低到了 20 美元/磅以下了。

回顾一下四十一五十年以前, 在飞机和汽车工业中就已经应用了许多早期的纤维增强塑料层压板。不过, 它们一般只作为次要结构产品(如外壳或盖板), 而很少作为承受应力的主要结构元件。在最早着眼于飞机用结构塑料的文件中, 有一篇是陆军航空队的 Johnson 撰写的。那时(1941 年), 对材

料在 $+165^{\circ}$ 、 75° 和 $-65^{\circ}\text{F}^{1)}$ 下要求的力学性能最低指标为:

比拉伸强度——22,000磅/英寸²²⁾

比弯曲强度——13,000磅/英寸²

比弹性模量—— 3.6×10^6 磅/英寸²

考虑到提出这些指标的时代背景,应该说这个目标是现实的。随着战争年代的到来,加上塑料工业的急剧发展,便提出了新的任务和目标。本书之所以引证早期的一些工作,是因为它们标志着军队在促进高级复合材料的发展中所起的作用。

几种半技术性的资料文件促使人们把注意力集中到日益显露头角的复合材料上,并向我们提出:优质复合材料除了在强度-重量比方面具有明显的优点之外,还要考虑其它一些因素,尤其应考虑高温下的耐热行为。例如,有些金属部件因为要氧化,从而限制了发动机的工作温度。而一些不易氧化的金属的高温强度又太低。业已发现,那些耐化学作用的金属如果用强而硬的碳/石墨纤维去增强,则它们的刚度和耐疲劳性能就会大幅度提高。本书有一章专门讨论以石墨纤维增强的金属基体。随着对宇宙飞船要求的提高——要求它能返回地面,人们对结构材料性能的要求就集中在高模量、高强度、耐高温和低密度等方面。有碳/石墨纤维增强剂和耐高温基体组成的高级复合材料,获得满足要求的材料已指日可待。

复合材料是把两种或多种材料适当地组合起来而形成的,通常希望复合材料的性能超过其中任何一种单一组分的性能。这样一个简单的概念函义很广,因为它打开了材料开发和应用的新途径。复合材料的设计是很复杂的,因为我们

1) $K=5/9(^{\circ}\text{F}+495.67)$ 。下同。——译者注

2) 1磅=0.453592千克,1英寸=0.0254米,1平方英寸= 6.451600×10^{-4} 米²。下同。——译者注

使用的已不再是均质材料,而是在物理性能、电性能和热性能等方面差别很大的几种材料的混合物。碳/石墨纤维复合材料的组分之一是有机粘结剂(或称基体),它与纤维结合成为一个实体。碳纤维所起的作用是使材料的刚度和强度提高、热膨胀系数降低、疲劳强度提高和电阻率减小。所谓碳/石墨纤维复合材料技术,是要研究用不同的树脂以及与其它纤维,特别是与玻璃纤维和芳香聚酰胺纤维混杂使用时,怎样把这些材料复合成为有用的工程产品。

当设计人员开始考虑——不一定从整块材料的角度,而是从材料的最佳性能来考虑时,他就能认识到材料工程的潜力,直升机的旋翼或飞机翼梁就是一个恰当的例子。在与机身或与旋翼叶毂相连的部位,达到最大应力。从减轻重量的角度来看,如果把较大的结构支承件从连接处一直扩展到应力最小的末端,那是不合算的。如果用复合材料,横截面可以减小,而且利用复合材料技术可有计划地把吸收应力的增强纤维铺在能充分发挥其作用的部位。还可以同时选用几种材料,以便使结构件所需的各种材料有效地分布。举个例子来说,在刚性较大的石墨纤维中混进比较柔软的纤维,就能提高材料的抗冲击性能,还能减轻复合材料中出现微裂纹的现象。

碳/石墨纤维增强复合材料的种类很多,如:

1. 碳/石墨短纤维无序地分布在树脂基体中,作为模塑混料。
2. 连续而平行排列的长纤维与树脂基体结合,制成单向带材。纤维方向可按工程设计要求铺排。
3. 各种结构的编织碳/石墨纤维与树脂粘结剂层合在一起。属于这一类的有为特殊需要所用的三维织物、毡制品和包装用的浸胶纱等。
4. 蜂窝结构。它在轻量级航空航天飞行器结构中十分

重要。制造蜂窝结构时,常用碳/石墨纤维面板。

5. 碳/石墨纤维与树脂和(或)金属复合的连续拉拔制品。

6. 碳/碳复合材料。这是用碳和石墨纤维来增强碳化树脂的一种复合材料,可在很高的温度下使用。

在讨论复合材料应用的章节中,将列举许多特例以供参考。推动人们应用碳/石墨纤维的理由很多,如优异的刚性、较好的疲劳强度、低收缩率和低膨胀系数、良好的耐热性和良好的耐化学性等。在复合纤维和树脂基体时,必须遵循特定的工艺过程才能获得优质的复合材料。

根据多年来处理和应用复合材料的实践经验,本书将把重点放在较有前途的材料和发展趋势上,而把某些产品暂时排除在外。例如,在热固性树脂方面,目前较感兴趣的是环氧树脂和聚酰亚胺树脂体系,因而它们是书中详细讨论的问题。同时,也将对其它可供选用的热固性塑料和热塑性塑料的长处加以说明和评论。

为了引导读者注意评论复合材料(包括碳/石墨)的早期文章,书中引证了对研制较新结构材料起到促进作用的某些刊物。

Hoffman^[2](Rand公司)通过他的研究工作写了一篇关于受拉结构元件中高强度纤维的评论文章。他得到的结论是:用纤维去改进现有的结构材料不会遇到大的障碍。

1965年^[3]发表过一篇关于陶瓷和石墨纤维的综述性论文。该文旨在编辑一部来源统一的有关晶须和纤维的权威性科技资料,论述它们在1200°F以上作为填料、柔性结构和绝缘材料使用,以及在复合材料中作增强剂使用的情况。文章对挑选出来可代表新纤维发展的上百篇文献专利进行了回顾。作者们认识到,当时该领域中的各方面要并驾齐驱地发

展是不可能的。但他们评论道：在能满足航空航天飞行器所需要的材料中，包括新的高强度玻璃、碳纤维、金属氧化物、碳化物和硼的多晶纤维与单晶晶须。综述中主要评论了八篇有关碳/石墨的专利。本书作者在本章末阐述并修正了该文的内容。

1963年，在一篇关于复合材料的文章中有如下一段文字：“……对明天要求的标准来说，今天的复合材料是无效的。不管理论上清楚与否，合理的设计技术的进展以及产生的实用数据必将赶上开发材料的步伐，而应用方面的要求将源源不断地出现。正是复合材料的多样性和复杂性……使之具有灿烂的发展前景”^[4]。

Alexander^[5]于1966年在一篇题为“幸运”(Fortune)的文章中写道：“如果一旦制造出这类由新纤维技术所预言的非常强的材料，那么，飞机会更轻，发动机的效率会更高。诚然，这是一个很大的‘如果’，但毕竟正在日益缩小”。那个时候，人们的注意力主要集中在硼纤维上。不过，正如 Peterson (Wright-Patterson 空军基地高级纤维复合材料部门的首脑)所说：“空军并不仅仅关注硼，而是正是探索任何有用的高强度高模量纤维”。

在题为“现代塑料”(Modern Plastics)的一篇文章中，Grimes^[6]把纤维状和丝状增强剂与金属和有机基体进行了比较。这篇报告发表时(1966年)石墨纤维的拉伸强度为 160×10^3 磅/英寸²，模量为 20×10^3 磅/英寸²。它们的比模量(=模量/密度)不如硼纤维和铍纤维。较近期的技术把石墨的强度和模量都大幅度地提高了，使它成为比强度和比模量最高的纤维。由于铍的比重为1.86，比较轻，因此人们总是考虑应用它。但是，一方面因为铍的材料来源不足，另一方面铍盐具有毒性，因此阻止人们在这个方向上再作主要的努力。

不久之后(1968年),碳和石墨纤维的物理性能便得到了提高。据 Simon 和 Prosen^[7]的报告,纤维的拉伸强度达 400,000 磅/英寸²,弹性模量达 50×10^6 磅/英寸²。他们调研了当时的十七种碳纤维,把它们和环氧树脂粘合成单向复合材料,然后测定复合材料的物理性能。从复合材料的模量和拉伸强度数据,表明纤维的性能已贡献给了复合材料。只有一点例外,即剪切强度较低。于是,设法通过在碳纤维表面生长碳化硅晶须来提高复合材料的剪切强度。这项研究强调了有必要作进一步的努力,以便通过适当的表面处理来提高基体树脂与碳纤维表面的粘结力。

Dwyer^[8]在 1970 年的一篇文章中评论道:“仅仅到最近几年内,复合材料的技术发展水平才达到了可能有效地应用新型金属和新型塑料的阶段——主要用于飞行器机体和发动机部件上——并且对该领域中占统治地位的钢、铝和钛等提出了严峻的挑战”。到那时为止,据报道,所生产的石墨纤维的弹性模量为 40×10^6 磅/英寸²。它以比模量最高的特点列于各种材料的首位。在这篇文章中,举了一个 Hercules 公司制造的 F-5 飞机上的翼尖作为例子。据报告,那是第一个石墨/环氧飞行器部件(与相应的铝制件相比,重量减轻 25%)。Kuebler 和 Jordan 于 1970 年在制造工程师协会会议上,阐明了高强度石墨纤维和硼纤维在比模量性能方面所占据的统治地位。注意下列事实是很有意义的:起初在钨芯上沉积硼,而这时,研究正朝着将硼沉积在石墨纤维上的方向发展。两者的强度相似,而后者的密度更低^[9]。

翌年(1971年),就硼纤维与石墨纤维的性能展开了更激烈的竞争。虽然石墨纤维的模量继续不断地提高,但这一优点却被它的拉伸和剪切性能的降低而抵消了。硼纤维的压缩性能较好,因为其直径较粗,大约有 100 微米(0.004 英寸),

而石墨纤维的直径只有 6.6 微米。另一方面，直径较小的石墨纤维有可能利用更普通的玻璃纤维技术。Powers^[10]对这两种纤维的复合材料的性能作了比较，结果如下表所示。这些实验结果是从单向纤维增强的环氧树脂层压材料中测得的，纤维的体积含量为 50%。

硼-环氧复合材料与石墨-环氧复合材料的性能比较(1971)

性能	硼纤维复合材料	石墨纤维复合材料
密度(克/毫升)	2.08	1.61
拉伸强度(磅/英寸 ²)	225,000	190,000
弹性模量(磅/英寸 ²)	32×10^6	27×10^6
梁的层间剪切强度(磅/英寸 ²)	17,000	3,000—10,000*

* 较高的数值是纤维经过特殊表面处理得到的。

因为石墨纤维的密度较低，强度-重量之比较高，而且有较好的工艺性能，所以石墨纤维仍占上风。

预计 1971 年碳和石墨纤维的几个主要生产厂的产量如下^[11]：

Hercules 公司	40,000 磅
Celanese 公司	20,000 磅
联合碳化物公司	10,000 磅
Great Lakes 碳公司	7,000 磅
Whittaker-Morgan 公司	4,600 磅
Hitco 公司	3,600 磅

现在，英国的 Courtaulds 公司、日本的吴羽公司、日本化学公司和东丽公司也供应碳和石墨纤维。在本书第二章之末，列出了 1980 年初碳和石墨纤维的生产情况。1980 年当年的产量将接近 3,000,000 磅。

1974 年，Lovell^[12]就高级复合材料作了一个颇有影响的评论。他指出，应该把今天人们称为现代复合材料的起源

归结到四十年代发展起来的玻璃纤维-聚酯复合材料。美国所进行的深入研究和研制计划，以及英国和日本作出的重要贡献，已使复合材料达到了当初预言的结构性能要求。就在碳纤维作为高级复合材料的高模量纤维而首先显露头角的同时，其它的纤维如石墨纤维(见前面)、氧化铍和碳化硼纤维也超过了最好的玻璃纤维(S玻璃的模量超过标准E玻璃的20%)。Lovelaoc着重指出了把实验室制备的晶须性能转移到高强度复合材料中去时会出现的问题。在批量生产中，晶须的取向、长径比的不均匀性以及质量控制等问题，都会导致生产出来的制品达不到预期的要求，所以把工作重点放在层压结构中的长纤维上。纤维缠绕设备和拉拔设备的发展可能充分发挥这些纤维的潜力，特别是高模量石墨纤维的潜力。

单层板的性能取决于纤维的取向。就单轴性能而言， 0° 取向方向上刚度和强度最高。取向角度愈大，刚度和强度愈低。事实上，垂直于纤维方向上的物理性能基本上接近于基体树脂的性能。石墨纤维增强复合材料的弹性模量很高，远远超过了玻璃纤维增强复合材料，这是高级复合材料的特性之一。另外，石墨纤维增强复合材料的热膨胀系数很低，而且可以控制，因此能用来制造稳定的空间天线和光学仪器支座等结构元件。有关这些具体的例子和碳/石墨纤维复合材料的作用将在以后碳纤维应用的章节中专门讨论。

为了证明复合材料在飞行中的价值，在高级复合材料的首批应用中就包括了Heroules公司制造的F-5飞机的翼尖。它比相应的铝合金部件轻25%。F-5翼尖的成功使用引起了其它方面的变革。在航空航天应用的一章中，列举了许多使用复合材料的军用飞机和民航飞机，这些飞机都圆满

地经历了许多飞行小时。在大多数例子中，重量的减轻是相当可观的。为了增强信心，也为了鉴定各种恶劣环境对材料的影响已经把大型运输机也包括在用碳/石墨复合材料代替金属部件的行列之中了。

当我们对复合材料领域内的发展趋向有了一个总的认识



图 1-2 爱迪生制造的第一台以碳纤维为灯丝的电灯(复制品, Pacific 煤气电力公司提供)

之后，就可以开始更加详尽地讨论碳和石墨纤维的研制以及实现工业生产所必须解决的技术问题了。为达到这个目的，也为了确切了解材料的优缺点，最好回顾一下该领域内一些很出色的美国专利。从提供资料和教学的角度来看，作这样的回顾也是很有收益的。可以证明，以下若干页所给出的材料是很有价值的参考资料和进一步研究的指南。如果读者需要更多的资料，可向美国

专利馆索取专利原文的详细说明。

爱迪生是第一个把碳化纤维素成功地用于白炽灯的科学家。他优先选用的灯泡中的灯丝是用下列工艺制备的：把洁净的棉花溶解在氯化锌溶液中，然后使之通过一个口模而喷到流体硬化剂中去；待纤维干燥之后，在与空气隔绝的条件下进行碳化。后来，随着制备工艺的进步，实践中是把纤维浸在烃类(如苯)中，通电加热使烃分解，于是在纤维上留下所生成的碳。这种灯丝基质材料是一种不太纯的、密实而坚硬的碳基料，外面包围着一层碳壳。

美国专利 223, 398——“电灯”

Edison, T. A.

入档日期: 1879年11月1日; 批准日期: 1880年1月27日

本发明是由一个卷曲碳丝或薄碳片制成的发光体组成, 碳丝或碳片在通电中起电阻作用。这个发光体被密封在真空度很高的玻璃容器中, 以免该导体在空气中受到氧化而损坏。电流是通过密封在玻璃中的铂丝输入真空灯泡的。棉线或植物纤维经碳化、卷曲, 然后夹持在金属输入线上。

美国专利 230, 309——“制备碳导体的工艺”

Maxim, H. S.

入档日期: 1880年3月22日; 批准日期: 1890年7月20日

该专利描述了一种制备碳灯丝的改进工艺: 把碳素物质暴露在烃类气氛(如煤气)中并在炉内加热。把硬纸板、纸、丝绸或棉花这类材料切割或弯曲成所需要的形状, 然后在蒸馏罐中一面通入烃类蒸气, 一面进行焦化。据专利描述, 用该法获得的碳导体比用其它工艺所得的碳导体更加密实和坚韧。

美国专利 2, 562, 764——“碳电极的制造”

Bailey, B., Great Lakes 碳公司

入档日期: 1948年5月28日; 批准日期: 1952年1月15日

本专利叙述了各种把碳加工成电极的方法。这些方法也是影响后续挤出工艺的措施。把从石油中分馏出来的重而可液化的烃进行焦化, 直至除水之外的挥发物含量为8—20%为止。把这种未焙烧的焦炭与10—20%的塑化剂(煤焦油衍生物、煤沥青、葱油)混合。在焙烧条件下, 塑化剂大多转化为