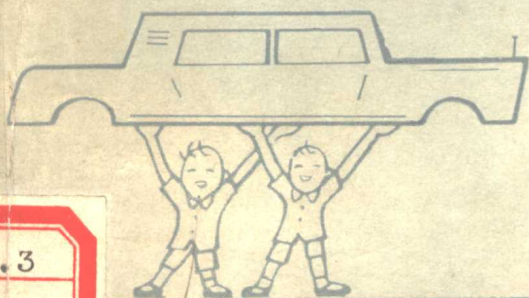
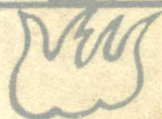




# 碳纤维



许鹤鸣 编著



327.3



科学出版社

# 碳纤维

许鹤鸣 编著

## 内 容 简 介

本书简明而又较为系统地介绍了一种强度比钢大、比重比铝还轻的新型工程材料——碳纤维。本书首先阐述了这门学科的发展过程和发展方向,然后从断裂力学的观点出发,对纤维及其复合材料的强度进行了分析,并指出了提高强度的途径。关于碳纤维的广泛应用,本书也做了一些介绍。

本书深入浅出、通俗易懂,可供广大具有中等文化水平的科技爱好者阅读,也可供从事有关材料研制、工程结构设计的科技人员和大专院校师生参考。

## 碳 纤 维

许鹤鸣 编 著

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

1979年1月第一版 开本:787×1092 1/32

1979年1月第一次印刷 印张:3 7/8

印数:0001—14,900 字数:86,000

统一书号:15031·206

本社书号:1276·15-2

定价: 0.33 元

# 目 录

一、古材新用 .....	1
二、碳纤维的种类 .....	6
三、碳纤维的特性 .....	9
四、碳纤维的结构 .....	26
(一) 碳和碳纤维 .....	26
(二) 弹性模量、强度和纤维结构 .....	32
(三) 强度和结构缺损 .....	33
五、碳纤维的历史 .....	39
六、碳纤维的制造——从有机纤维到碳纤维 .....	42
(一) 从腈纶纤维到碳纤维 .....	45
(二) 从石油沥青纤维到碳纤维 .....	55
(三) 从人造丝到碳纤维 .....	58
七、碳纤维的用途 .....	60
(一) 复合材料 .....	60
(二) 碳纤维和人造卫星、火箭导弹 .....	79
(三) 碳纤维和飞机 .....	86
(四) 碳纤维和原子能工程 .....	96
(五) 碳纤维和化学工业 .....	98
(六) 碳纤维和机械工业 .....	102
(七) 碳纤维和电机工程 .....	106
(八) 碳纤维和电业工程 .....	108
(九) 碳纤维和造船工业 .....	113
(十) 碳纤维和医疗事业 .....	115
八、碳纤维发展前景 .....	117

## 一、古 材 新 用

恩格斯说：“就世界性的解放作用而言，摩擦生火还是超过了蒸汽机，因为摩擦生火第一次使人支配了一种自然力，从而最终把人同动物界分开。”人类使用了火，是人类从自然环境的束缚中解放出来的一个动力。大约四、五十万年以前我国的北京直立人，是世界公认最早用火的祖先，在它们用火的遗迹里经常可以找到一些炭块。例如，在北京西南郊周口店北京直立人居住过的山洞里，曾发现过好几层灰烬，从灰烬中发现许多被火烧过的石头和骨头，此外，还发现了一块紫荆树的木炭。我们说，炭是人类第一次支配自然力制造出来的一种材料。

考古学家从史前的遗址和墓中，发掘出了各种土器、石器和炭的碎片，说明炭一直在无声无息地为人类服务。远在上古时代，人类就知道利用炭来取暖。从出土的古代陶器证明，早在原始公社时期我们的祖先就已用炭黑作为彩陶的黑色颜料和精美黑陶的配料了，如在甘肃临夏三坪出土的仰韶文化彩陶罐和浙江良渚出土的龙山文化时期的黑陶等。在出土的甲骨文中，有些是先用墨写再用刀刻的，墨就是用炭来做的。

此外，大家都知道，我国的文物考古工作者，一九七二年在湖南长沙市郊的马王堆，发掘出一座距今两千一百多年的西汉古墓，其中棺槨、尸体和大批随葬器物保存得相当完整，其原因之一就是在外槨四周及上部均填塞了厚约三十到四十厘米的木炭密封吸潮层。

人类在同自然界的斗争中，重要的是不断地改进自己的

劳动工具。制造工具就需要各种材料，最早人们只会用天然的石头制作工具，随着历史的发展，在长期的劳动实践中，才逐渐发现和使用金属。起先是铜器，然后是铁器，它们都比石器进了一大步。尤其是铁器的使用，大大促进了当时生产力的发展。恩格斯在《家庭、私有制和国家的起源》里说过：“铁使更大面积的农田耕作，开垦广阔的森林地区，成为可能；它给手工业工人提供了一种其坚固和锐利非石头或当时所知道的其他金属所能抵挡的工具。”古代，铜和铁的冶炼以及铜器和铁器的制造都离不开炭。我们的祖先早在商朝（公元前十六世纪）以前就已经学会了用炭来炼铜。《吴越春秋》里面有吴王阖闾为了造得“干将”和“莫邪”两把宝剑，“使童男童女三百人鼓囊装炭，金铁乃濡……”等记载。它说明公元前五百多年的春秋战国时代我国就有了规模不小的炼铁作坊，使铁器得到了普遍应用。随着铜器和铁器的大量使用，炭的应用范围也进一步扩大了。

再拿炼钢来说，春秋战国时期，吴越等地就发明了低温炼钢技术。低温冶炼，也就是将铁块反复锻打而成钢，我们平时常说的“百炼成钢”就形象地说明了我国早期的炼钢方法。这种炼钢方法还和木炭有着极为密切的关系哩！

那时，用铁来炼钢也都是采用木炭作燃料，而且木炭中的碳还是钢的一种不可缺少的成分，同时含碳量的高低是区别钢还是铁的一个重要指标。当铁在炭火中加热的时候，木炭中的碳就会从铁的表面渗进去，虽然不会渗入很深，但经过多次加热、锻打，甚至将伸展了的铁片折叠后继续锻打，铁中的含碳量就会逐渐增高，并向各处分布开去。很明显，铁的反复加热、锻打的次数愈多，含碳量就愈高，分布也愈均匀。河北省易县出土的一把战国铁剑就是用这种方法制成的。经化验发现，它比一般铁的含碳量高，但由于锻打的次数还不多，因此

在显微镜下就可以明显地看到含碳量象夹心饼那样很不均匀，只是在某些部分出现了钢的组织。人们为了提高这种钢的质量，就开始增加加热和锻打的次数，从十次、二十次，直到近百次。这种千锤百炼的过程不仅使钢的组织均匀，而且还可以去掉杂质，使钢的组织更致密。所以，这种锻打过的钢就称为“百炼钢”，这也就是我们平常所说的“百炼成钢”的起源。

火药是我国的四大发明之一。它是唐朝初年（公元七世纪）炼丹家孙思邈首先发明的。木炭是火药的一个重要组成部分，它与硫磺、硝石（硝酸钾）的混合物就是黑火药，有强烈的燃烧性和爆炸性。

此外，炭还是一种药物，很早就被用于治病。动物的遗骸、骨头、血等等在隔绝空气或空气不足的条件下加热而制得的炭，就叫做兽炭。由于它们多孔，因此具有很高的吸附性能。我国古代医学中曾把它用在药剂中，作为某些中毒症的内服剂，它能吸附肠内的化学物质及毒物，减少对肠粘膜的刺激。另外，它还有一定的止泻作用。

在对炭的长期使用过程中，人们的认识也在逐渐深化，发现了炭主要是由碳元素组成。在目前已经知道的 106 种化学元素中，我们可以看到，除碳以外的 105 种元素，它们之间所形成的化合物只有五万多种，然而碳的化合物却有三百多万种，几乎比 105 种元素所形成的化合物总数还多六十倍！

地底下蕴藏的石油和煤几乎都是由碳和碳的化合物所组成。地面上的植物、动物、包括人体在内的生命组织中的物质，除水分以外，差不多也都是由碳的化合物组成。因此，人们在大约一百五十年前就开始把所有的化学物质分为两大类：有机化合物和无机化合物。含碳的化合物就叫做有机化合物。

含碳的化合物种类虽多，但纯净碳的种类却并不多。炭是一种比较纯的碳，它是碳材料这个大家族中一个最古老的

成员。

到目前为止，碳材料可以分为四种类型。一种是炭，它是无定形的碳，如木炭、焦炭、炭黑等都属于这一类；另一种是石墨，如铅笔芯就是用石墨做的；第三种是金钢石，切割玻璃的刀刃大都是用金钢石制造的；第四种是白碳，这是一种白色的碳，迄今只能制造出很少的一点，对于它，目前人们知道的还不多。这四样东西虽然看上去形态各异，但是它们的化学成分却是一样的：都是由碳元素组成的。因此就把它们都叫做碳材料。天然出产的碳有石墨、金钢石和白碳。其中石墨矿发现最早，我国劳动人民在上古时代就用石墨来制墨。而天然白碳的发现却还是最近的事，目前只在巴伐利亚的雷斯火山口的矿物中，发现过天然的白碳。

由于炭、石墨、金刚石和白碳都是由碳元素组成，所以，在一定的条件下，它们之间可以互相转化。炭在隔绝氧气的条件下，加热到 $2000^{\circ}\text{C}$ 以上，可以转变为石墨。石墨在隔绝氧气的条件下，在约五万个大气压中加热到 $1400^{\circ}\text{C}$ ，可以转变为金刚石。金刚石是一种非常纯净的碳，在纯净的氧气中，它也会象木炭一样燃烧，当隔绝氧气加热到 $2000-3000^{\circ}\text{C}$ 时，金刚石还会转化为石墨。在 $10^{-4}$ 托的真空或正常压力下，用通电、激光或电子轰击的方法将石墨加热到摄氏 $3300^{\circ}$ ，石墨的表面层就会转变并生成直径为千分之几厘米的无色透明的白碳小晶体。但是，关于白碳向其它形式的碳，如石墨和金刚石转变的条件，目前还尚未得到。即使在石墨于30分钟转变成金钢石的高温高压条件下，过了十五小时，白碳也没有丝毫转变的迹象。这个实验证明：白碳是目前所知道的抗热力学性能最强的元素碳。

如今，碳已经成为一种不可缺少的工业材料。如铝的生产过程中需要的石墨电极；电机使用的炭电刷；开采石油钻井

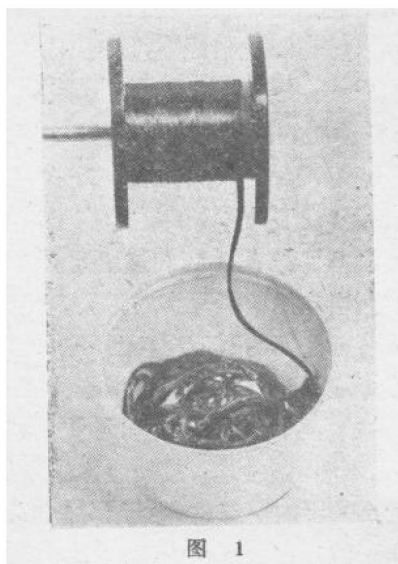


的岩心钻头所用的金钢石；原子能工业所用的石墨；还有飞机、汽车的轮胎、人们穿的胶鞋等等，都要用到炭（橡胶中加入炭黑后，强度可以一下提高十倍）。此外，炭还应用于铜的精炼、各种含有杂质物质的提纯，就连我们平时吃的糖，也是用炭来净化的。

在科学技术高度发展的今天，这个在史前就为人类服务的古老材料更加焕发了青春。我们这里要说的碳纤维，就是碳的一种新形态。当你用铅笔写字的时候，一定想不到，它竟与现代的碳纤维有着密切的联系呢！碳纤维是一种象人造丝、合成纤维一样的纤维状碳材料。通常说的碳纤维指的是炭的纤维和石墨的纤维。至于金钢石纤维，目前只有短纤维（最长者只有几毫米，因为形状象胡须，故一般称作晶须），连续的长纤维还尚未问世。关于白碳纤维，由于其抗热力学性能较好，具有与金钢石几乎相同的硬度和密度，而且可以被压成块状或融合成种种形状（天然金钢石是不可能的），因此，白碳纤维的研究将愈来愈被人们所重视。

碳纤维是一种强度比钢大、比重比铝还轻的新颖材料，并且它还有许多宝贵的电学、热学和力学性能。在现代科学技术、现代工业和现代国防的发展中，碳纤维起着重要作用。例如，用碳纤维或碳纤维增强的塑料、玻璃、陶瓷和金属等来代替钢材和合金等金属材料，已在化工、机电、造船、特别是飞机制造等工业部门中广泛使用。这不仅提高了产品的性能，降低了产品的成本，而且还使产品变得既轻巧又耐用。碳纤维还为宇宙空间、人造卫星、火箭导弹和原子能等工业的进一步发展，提供了一种性能优异的新型材料。这种材料的使用，甚至可以解决许多宇航工程中的关键问题。同时，上述这些工业的发展，也为碳纤维开辟了广阔的应用前景。

现在，人们还不能直接从炭和石墨中抽出丝来。因此，碳



纤维只能采用一些含碳的有机纤维做原料。在我们周围，含碳的有机纤维很多，如尼龙丝、腈纶丝、人造丝以至人的头发丝都是含碳的有机纤维，它们都可以用来作为制造碳纤维的原料。碳纤维就是将有机纤维放在惰性气体中，在保持原纤维形状的情况下烧制而成的。

## 二、碳纤维的种类

碳纤维的种类很多，由于采用的原料和制造工艺的不同，制造出的碳纤维的质地和性能也不同。碳纤维可以分为炭纤维和石墨纤维两种。

炭纤维通常是指有机纤维在  $2000^{\circ}\text{C}$  以下碳化而制得的纤维。从结构上看，它还没有变成石墨，一般炭纤维含有75—95%的碳。这类纤维由于处理温度较低，因此成本也较低。有

些有机纤维如腈纶丝,在空气中经过 200—300℃ 的温度处理后,得到的纤维称为黑化纤维。因为它在火焰中不会燃烧,所以又称为耐焰纤维,有人把这种纤维也归入碳纤维一类。实际从质地上来讲,它不是炭的纤维,而是一种耐热的有机化合物的纤维。

石墨纤维是指有机纤维在 2000℃ 以上的高温下碳化而制得的纤维。这类纤维的结构与石墨相似,但石墨的导电性能却比炭好。因此,石墨纤维的导电性能也比碳纤维好,并且表面上还有金属光泽。由于石墨的处理温度比碳纤维高,因此含碳量也很高,约98—99%以上,杂质极少。

此外,碳纤维按其性能的不同,还可以分为普通碳纤维和高弹性模量、高强度碳纤维。

普通碳纤维是由有机纤维在不加张力的情况下,在惰性气体或真空中经高温处理而制成的。这类纤维的制造费用是所有碳纤维中最低的,并且它的强度、弹性模量也不高,因此,它主要用做高温电炉的保温材料及一般的防腐蚀材料。如果用多孔的有机纤维作原料,那么碳化后得到的则是多孔的碳纤维。这种碳纤维虽然强度不太高,但它的比表面积(单位重量物质所具有的表面积)特别大,是一种非常好的吸附材料。

我们知道:一般有机纤维在受热过程中和受热后都要产生收缩,扰乱和破坏了纤维内部分子整齐而有序的排列。在碳纤维的制造过程中,作为原料的有机纤维在受热后,也要产生收缩,这就影响了它的弹性模量和强度。因此,为了制得高弹性模量、高强度的碳纤维,在制造过程中,就要一面加热、一面施加张力,使得纤维不产生收缩,从而保证纤维内部分子趋向于更加整齐而有序的排列。这样制得的碳纤维就比上述不加张力所制造的碳纤维,在弹性模量和强度方面要高得多,所以就把它叫作高弹性模量、高强度的碳纤维。随着碳化温

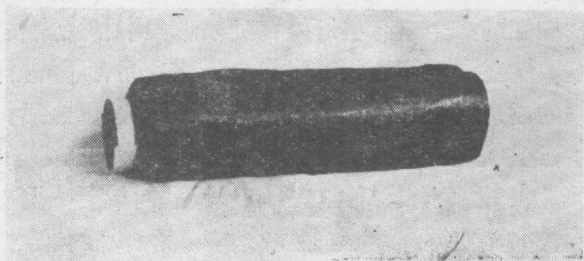
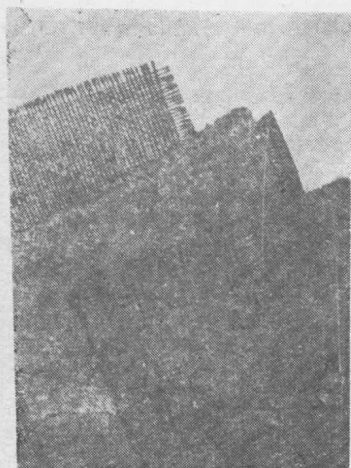


图 2

度的升高,碳纤维的弹性模量也愈高。尤其是在 2000°C 以上的温度下制得的碳纤维,其弹性模量更高,因此,这样的纤维又叫做高模量纤维。

碳纤维纤细而柔软,可以进行纺织加工。制品有线、绳、带、布和毡等等。碳纤维也可以和玻璃纤维、尼龙纤维等混合编织成各种制品。

### 三、碳纤维的特性

我们要利用碳纤维,就要先懂得碳纤维的特性,以便在实际中更好地应用这种新材料。

任何物体在使用过程中,都要受到不同形式外力的作用。如起重机上的钢索受到悬吊物的拉力;钢轨受到火车的压力;轴类零件受到的拉、压力等等。材料在外力的作用下都要变形,而且随着外力的增大,变形也相应增大。当外力达到一定限度时,材料就破坏了。对材料抵抗外力而不产生超过允许的变形和破坏的能力,人们用弹性模量和强度来表示。

弹性模量是表示材料受力后产生变形大小的一个力学性能指标。材料受外力后产生的变形愈大,说明它抵抗变形的能力愈差,弹性模量就愈低。如橡皮就是典型的低弹性模量材料,一块薄橡皮,用手不费劲就能把它拉长,使它变形。而同样大小的一块铁,用手就不能使它产生明显的伸长变形,这是因为铁的弹性模量比橡皮大得多的缘故。由此可见,在保证材料不产生超过允许的变形的前提下,弹性模量愈高的材料就愈能承担起大的外力。强度是表示在外力作用下,材料抵抗断裂破坏能力大小的一个力学性能指标。使它断裂破坏时需要的力愈大,强度就愈高。如钢铁的强度就明显地比木材、玻璃高。

在现代工业技术应用中往往要求材料结构坚固而又轻巧，这就必须经常考虑单位重量的弹性模量和单位重量的强度。为了能综合地反映它们，就把抗拉强度和弹性模量分别除以比重所得的值叫做比强度和比弹性模量。钢铁的弹性模量和强度虽然都比铝合金高，但它的比重却比铝合金大得多。因为钢铁的比弹性模量和比强度都不如铝合金高，所以在一些要求全面减轻自重的物体(如飞机)上，就大量应用铝合金，而很少用到钢铁材料。

强度和弹性模量是衡量材料坚固程度的两个最重要的力学性能指标。

如果提起骨架，大家一定会马上联想到人体的骨架，骨架对人体起到构架和支撑的作用。其实，许多物体的结构都有类似骨架的作用。如建造房屋要有梁、柱或构架；制造机器要有构架和壳体；制造飞机要有机翼大梁、机身隔框、发动机轴、机匣等等。制造这些在结构中起骨架作用部件的材料叫做结构材料，它的强度和弹性模量又是衡量结构坚固性的重要指标。

一般工程上所用的结构材料，不仅强度要大，而且材料的弹性模量也要大。象在水深流急的河面上架桥，为了减少施工时间和节约造价，就要求建在水中支持桥梁的桥墩数目愈少愈好，为此就必须要加大桥墩间的距离。在工程上两个相邻桥墩之间的距离叫作桥梁的跨度。建筑大跨度的桥梁，一般钢材的弹性模量就不能满足需要，而要求采用弹性模量和强度较高的合金钢来制造，这样才能保证在修建中桥梁伸臂拼接、装配时不会因弯曲太大而影响安装的准确性，并可以减少桥面上火车、汽车运行时造成的钢梁向下弯曲程度和桥梁的振动。例如举世闻名的南京长江大桥就是用特种合金钢建造的一座大跨度(约 160 米)桥梁。此外，大型厂房也要求用弹性模量高的材料来做梁；精密量具和机械零件也要求用变形

小,弹性模量高的材料来制造,如用来制造大型机床主轴的材料,如果弹性模量不高就会造成主轴的挠度(弯曲变形)过大,使加工出来的零件不能达到规定的精度而变成废品。

为什么一般金属材料,特别是钢铁在国民经济中受到那末大的重视呢?主要原因在于它们(尤其是钢铁)的强度和弹性模量都比较大。因此,无论是天上飞的飞机、火箭、人造卫星,还是担任陆地水面交通的轮船、汽车、火车;也无论是大的建筑,还是工厂的机器、各种战斗武器,都要用到它。尼龙和玻璃纤维刚问世时,曾经有人称它们是一种“细如蛛丝、强赛钢铁”的新型材料。其实,它们的强度虽然比钢材高一些,但是弹性模量却比钢材小多了(还不到钢材的一半),因此它们在使用中就容易变形,在工程中就不能用它们代替钢材来制造一些受力较大的梁柱和壳体等构件。此外,尼龙和玻璃纤维还有随着温度升高,强度陡然下降的缺点,尼龙到 $200^{\circ}\text{C}$ 、一般玻璃到 $400^{\circ}\text{C}$ 的温度时就不能保持其强度了。所以,它们还不能真正代替金属材料,来满足提高性能、减轻重量、降低成本等要求。

碳纤维是一种名符其实的“细如蛛丝、强赛钢铁”的新型工程材料。碳纤维不仅强度大、重量轻(只比一般塑料重一点),而且弹性模量也很高。此外,它还有耐高温、耐化学腐蚀、耐辐射、能导电、高温热绝缘性能好、反射中子射线能力强等优点。

钢铁在金属中算是坚固的了,但是碳纤维比钢铁还坚固好几倍。碳纤维的最大特点就在于它的弹性模量高,高弹性模量碳纤维的抗变形能力要比钢大两倍多。如图3所示,同样粗细的两根绳子,挂上同一重物后,用碳纤维做的那根绳子就要比钢丝做的绳子产生的变形小得多。

碳纤维除了弹性模量比钢高外,强度也比钢铁大,高强度碳纤维的抗拉强度可以达到 $30\text{—}40$ 吨/平方厘米,要比钢铁

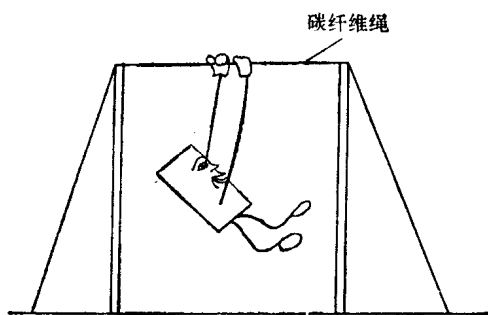
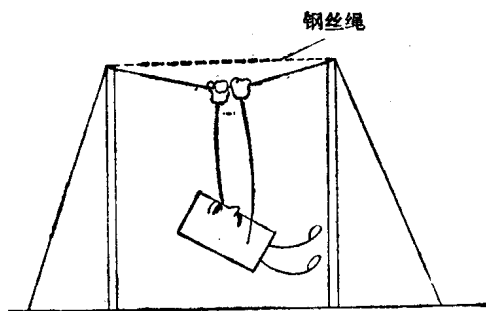


图 3



大四倍多。按它的强度计算，每平方厘米的截面积上可以承受三、四十吨拉力。一根用碳纤维编的手指一样粗的绳子，可以吊起一个几十吨重的火车头，而同样粗细的钢丝绳却只能吊起十几吨重的东西。如果用塑料的原料——树脂，把碳纤维粘结在一起，再经过一定的工艺使其固化后制成坚硬的碳纤维和塑料的复合材料，将它代替钢材做大桥的构件就能够制造出跨度更大、承载能力更高的桥梁。这样就可以使现代的大桥建筑水平发生根本的变化。

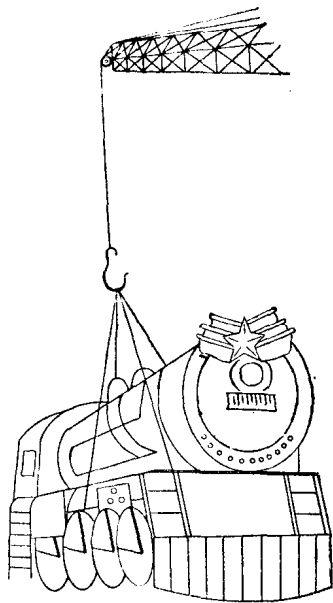


图 4

我们再把碳纤维和金属中享有又轻又坚固声誉的高强度铝合金比较一下。碳纤维比铝合金也要坚固好几倍，碳纤维的弹性模量比铝合金要高五、六倍。一条铝合金片，用手一折就弯了，但如果在这铝合金片上粘贴一层四分之一毫米厚的碳纤维和塑料的复合材料，就很难折弯它了。碳纤维的强度比铝合金要高六、七倍，而重量却只有铝合金的一半，加上塑料比碳纤维还要轻，因此，用碳纤维和塑料复合材料做的制品，比用铝合金做的重量轻将近一半，而弹性模量却要大二、三倍，强度也比铝合金高。用这样的材料代替铝合金，就可以制造出性能更好的飞机。如果把这种材料用在电子计算机中，由于它的比弹性模量和比强度高，就可以用它制