长材料与应用技术丛书

纳 米 碳 管

制备、结构、物性及应用

Carbon Nanotubes Synthesis, Microstructure, Properties and Applications

成会明 编著

By Hui-Ming Cheng

化 学 工 业 出 版 社

材 料 科 学 与 工 程 出 版 中 心

·北 京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

纳米碳管：制备、结构、物性及应用/成会明编著.
北京：化学工业出版社，2002.8
(纳米材料与应用技术丛书)
ISBN 7-5025-3957-3

Ⅰ. 纳… Ⅱ. 成… Ⅲ纳米材料-研究
Ⅳ. TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 050372 号

纳米材料与应用技术丛书
纳米碳管
制备、结构、物性及应用
Carbon Nanotubes
Synthesis, Microstructure,
Properties and Applications
成会明 编著
By Hui-Ming Cheng
责任编辑：王秀鸾 刘俊之
责任校对：陶燕华
封面设计：蒋艳君

*

化学工业出版社
材料科学与工程出版中心 出版发行
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
发行电话：(010) 64982530
http://www.cip.com.cn

*

新华书店北京发行所经销
北京市昌平振南印刷厂印刷
三河市宇新装订厂装订
开本 850×1168 毫米 1/32 印张 15½ 字数 412 千字
2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-3957-3/TQ·1558
定 价：34.00 元

版权所有 违者必究
该书如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责退换

出版者的话

纳米科技是20世纪80年代末、90年代初才逐步发展起来的新兴学科领域。它的迅猛发展将在21世纪促使几乎所有的工业领域产生一场革命性的变化。我国政府和广大科技工作者对于纳米科技的重要性已经有较高的认识，我国的纳米科技研究，特别是在纳米材料方面已经取得了重要进展，并引起了国际上的关注。

在国家政策向高新技术倾斜和提倡知识创新的大气候下，为满足广大读者对新知识、新技术的迫切需要，我社邀请国内有关专家编写了一套《纳米材料与应用技术丛书》，该丛书各分册如下：

纳米陶瓷
纳米纤维
纳米复合材料
纳米制备技术
聚合物-无机纳米复合材料
国外纳米材料技术进展与应用
纳米建材
纳米粉体合成技术与应用
纳米金属
纳米催化技术
纳米碳管
纳米材料化学

出版这套丛书的目的是为了有效地推动纳米材料和技术研究领域的发展步伐，从而促进我国经济发展。从前瞻性、战略性和基础性来考虑，目前应更加重视纳米材料应用技术与产业化前景的研究。因此，该丛书的特点是以技术性为主，兼具科普性和实用性，同时体现前瞻性。

相信本丛书的出版对于广大从事新材料开发和纳米材料研究的科技人员会有所帮助。

化学工业出版社

序

碳元素以单质或化合物广泛存在于茫茫苍穹的宇宙间和浩瀚无垠的地球上，碳是地球上一切生物有机体的骨架元素，可以说没有碳元素就没有生命。在人类文明发展史上，碳也留下了辉煌的篇章。人类直立行走后，首先学会的是用含碳的植物作燃料来取暖和烹、煮食物，利用烟炱作染料和书写的墨汁，随后学会了从煤炭取得能源，进而利用木炭和煤炭还原矿石以获取铜、铁等金属。从炼铁用的焦炭、电炉炼钢用的人造石墨电极、电机用的电刷、机械密封用的炭材料、化学工业用的碳电极、净化空气和治理废水等环境保护用的活性炭和活性碳纤维，到航空、航天、核能等高技术领域用的高密高纯高强石墨、碳纤维、热解石墨、玻璃炭、各向同性炭、金刚石及其薄膜等，这些碳质材料都为人类文明的进步做出了巨大贡献。

1985 年才发现的碳家族中的新成员——C_{60}等富勒烯以及 1991 年发现的纳米碳管具有优异的性能，其应用前景不可估量。纳米碳管有着独特的结构特征，故而表现出奇异的力学、电学和磁学等性质，可望在纳米电子器件、储能、场发射与平板显示、导电和电磁屏蔽、结构增强等众多领域获得广泛的应用。物理学家对不同结构纳米碳管的特殊电性质，化学家对纳米碳管的纳米尺度空间，材料科学家对其惊人的刚度、强度和弹力等，都极为关注，研究与开发工作甚为活跃，重大突破层出不穷，成为近年来凝聚态物理和材料科学领域十分重要的前沿方向。

随着人类对纳米科技将成为 21 世纪的主导技术的认识，人们越来越迫切需要了解和掌握纳米科学技术的基本知识和发展趋势，为我国在社会、经济、科学技术等全方位实现跨越式发展奠定坚实基础。纳米碳管的制备、性能和应用的探索是纳米科学技术的一个

重要方面，我国科学家在本研究领域也开展了比较深入、系统的研究，并取得了一系列突破性进展。在此基础上，全面分析已经取得的大量成果，正确把握纳米碳管研究未来的发展方向，促进和开拓纳米碳管独特性能的实际应用，出版一本全面论述纳米碳管的高质量专著很有必要，也非常及时。

青年学子成会明博士领导的中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家（联合）实验室先进炭材料研究部自 1997 年以来专心从事有关纳米碳管的研究工作，在纳米碳管的制备、性能和应用的探索等方面都取得了很有意义的成果，受到国内外同行的关注。他们在把握国内外纳米碳管研究进展的基础上，结合自身科研工作中取得的最新研究成果，经过认真分析、归纳、思考，最终写成《纳米碳管——制备、结构、物性及应用》一书。相信无论是从事纳米碳管研究与开发工作的科技工作者，还是对纳米碳管有兴趣的企业家、管理工作者、大学生和研究生等各类人士，通过阅读本书，都会对纳米碳管有一个比较深入的了解，从本书中获得有益的知识和启示，进而推动纳米碳管这一新材料的研究与应用，对我国国家知识创新和技术创新体系的建设和我国纳米科学技术的发展具有促进作用。

中国科学院院士、中国工程院院士　师昌绪

2002 年 5 月

前　　言

纳米碳管（Carbon nanotube）是1991年才被发现的一种新型碳结构，它是由碳原子形成的石墨烯片层卷成的无缝、中空的管体。一般可分为单壁纳米碳管（Single-walled carbon nanotube）和多壁纳米碳管（Multi-walled carbon nanotube）。由于纳米碳管的直径很小、长径比大，故可视为准一维纳米材料。理论预测和实验研究发现纳米碳管具有奇特的电学性能，并和其结构密切相关，可用于制作晶体管等纳米电子器件。纳米碳管的电子能带结构特殊，波矢被限定于轴向，量子效应明显，实验发现单壁纳米碳管是真正的量子导线。纳米碳管具有发射阈值低、发射电流密度大、稳定性高等优异的场发射性能，可用于制作高性能平板显示器。石墨烯平面中的碳碳键是自然界中已知的最强的化学键之一，纳米碳管的结构为完整的石墨烯网格，因此其理论强度接近于碳碳键的强度。理论预测其强度大约为钢的100倍，而密度只有钢的1/6，并具有很好的柔韧性。因此被称之为超级纤维，可用于高级复合材料的增强体，制成轻质、高强的太空缆绳，在航空、航天等高技术领域大显身手。此外，纳米碳管还具有很好的吸附特性，如高效储存氢气。这些特异性能预示着纳米碳管在众多领域具有广阔的应用前景。如全球最大的计算机制造商IBM公司近日宣布他们已用纳米碳管研制出一种性能优于目前最好的硅半导体芯片的晶体管，该晶体管是制造更小巧、速度更快的计算机的关键。

虽然纳米碳管才被发现10年，但国内外研究与开发异常活跃，从制备、结构到物性和应用的探索连连取得重大突破。美国、英国和日本等发达国家在该领域的研究处于领先地位，并先后出版了数种关于纳米碳管的专著。我国科学家在本领域也开展了比较系统的研究工作，特别是在纳米碳管的制备技术及物性研究等方面取得了

一些重大突破，在国际上有较大影响。但这些研究成果仅见诸于国内外的学术刊物和学术会议之中。如果能将国内外有关纳米碳管方面的研究成果融入一书，进行综合分析与论述，必将促进我国纳米碳管的研究与开发，促进纳米碳管在众多领域的实际应用。

编著者及其所在的中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家（联合）实验室先进炭材料研究部自 1997 年以来致力于纳米碳管的制备、结构、物性及应用等方面的研究与开发，在有机物催化热解法和氢电弧法制备单壁纳米碳管和单壁纳米碳管绳，纳米碳管的储氢特性、场发射特性、电化学特性、力学性能，以及纳米碳管的大量制备与应用等方面取得了有意义的结果，受到国内外同行的关注。在此基础上，编著者参阅有关纳米碳管的大量国内外科技文献与资料，总结国内外最新科研进展，充分融入编著者多年在科研工作中取得的成果和积累，探索性地编写了这本关于纳米碳管的专著。书中首先概述了碳和纳米碳管的基本特性，然后详细叙述了纳米碳管的制备方法、生长机理、微观结构、表面结构与孔结构、表征方法等内容，最后较为系统地阐述了纳米碳管的电学性质、力学性质、场发射特性、储氢特性、电化学特性及其可能的应用前景。

除编著者成会明外，中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家（联合）实验室先进炭材料研究部的大部分成员参与了编写工作，他们是：王茂章（第 1 章）；侯鹏翔、白朔（第 2 章）；李峰（第 3 章）；杨全红（第 4 章）；李峰、英哲（第 5 章）；李峰（第 6 章）；佟钰、刘畅（第 7 章）；刘畅、郑宏（第 8 章）；戴贵平、刘辰光、刘敏（第 9 章）；李莉香、杨全红（第 10 章）；杜金红、白朔（第 11 章）。王茂章、李峰在全书校对等方面做了许多工作。

本书相当一部分内容是编著者及其先进炭材料研究部几年来的研究成果，这些成果是多年来在国家自然科学基金委员会、科技部国家重点基础研究规划项目（973 计划）、科技部高技术研究发展计划项目（863 计划）和中国科学院知识创新工程重大项目和创新方向性项目的支持下取得的，在此表示感谢。本书的编写得到了中国科学院金属研究所的有关领导、同事及先进炭材料研究部所有成

员的大力支持，在此表示诚挚的谢意。

纳米碳管的研究发展十分迅速，新的成果不断涌现，文献资料浩瀚无边，由于编著者的水平有限，书中难免有疏漏与不妥甚至错误之处，恳请专家和读者批评指正！

成会明

2002 年 5 月于中国科学院金属研究所，沈阳

目　　录

第 1 章　碳及纳米碳管概述 …… 1
1.1　碳的广泛性、特殊性及多样性 …… 1
1.1.1　碳的广泛性 …… 1
1.1.2　碳的特殊性 …… 5
1.1.3　碳的同素异性体 …… 10
1.2　纳米碳管的发现 …… 16
1.2.1　纳米碳管的发现及合成 …… 16
1.2.2　石墨晶须、气相生长碳纤维、纳米碳纤维和纳米碳管的类同和区别 …… 20
1.2.3　纳米碳管的合成方法简介 …… 24
1.3　纳米碳管的特性、应用前景及发展方向 …… 27
1.3.1　纳米碳管的特性 …… 27
1.3.2　纳米碳管的应用前景 …… 32
1.3.3　纳米碳管的发展方向 …… 39
参考文献 …… 40
第 2 章　纳米碳管的制备及纯化方法 …… 48
2.1　多壁纳米碳管的制备 …… 48
2.1.1　电弧法 …… 48
2.1.2　催化热解法 …… 50
2.1.3　其他方法 …… 56
2.2　单壁纳米碳管的制备 …… 58
2.2.1　电弧法 …… 58
2.2.2　激光蒸发法 …… 62
2.2.3　催化热解法 …… 65
2.2.4　太阳能法 …… 72
2.2.5　直径最小的单壁纳米碳管 …… 73
2.3　双壁纳米碳管的制备 …… 74

2.3.1 富勒烯充填处理法 …… 74
2.3.2 电弧放电法 …… 75
2.3.3 流动催化法（浮游法） …… 76
2.4 纳米碳管阵列 …… 80
2.4.1 多壁纳米碳管阵列 …… 80
2.4.2 单壁纳米碳管绳 …… 85
2.5 纳米碳管的生长机理 …… 90
2.5.1 催化热解法 …… 91
2.5.2 电弧法和激光蒸发法 …… 93
2.5.3 单壁纳米碳管 …… 98
2.5.4 单壁纳米碳管束 …… 105
2.6 纳米碳管的提纯 …… 106
2.6.1 物理法纯化多壁纳米碳管 …… 106
2.6.2 化学法纯化多壁纳米碳管 …… 107
2.6.3 单壁纳米碳管的提纯 …… 109
参考文献 …… 114
第3章 纳米碳管的结构与拉曼光谱表征 …… 119
3.1 纳米碳管的基本结构 …… 120
3.1.1 单壁纳米碳管的结构特征 …… 120
3.1.2 单壁纳米碳管的晶格参数 …… 125
3.1.3 不规则纳米碳管的结构和欧拉定律 …… 127
3.1.4 纳米碳管的连接 …… 130
3.2 纳米碳管的基本结构 …… 132
3.2.1 多壁纳米碳管 …… 132
3.2.2 单壁纳米碳管的管束及管束环 …… 134
3.2.3 纳米碳管结构的稳定性 …… 136
3.3 纳米碳管结构的观察 …… 143
3.3.1 纳米碳管的实验观察分析 …… 143
3.3.2 纳米碳管各种结构的实验观察 …… 146
3.3.3 纳米碳管结构的控制 …… 149
3.4 纳米碳管的拉曼光谱表征 …… 152
3.4.1 拉曼（Raman）光谱简介 …… 152
3.4.2 纳米碳质材料的拉曼光谱研究 …… 152

3.4.3 纳米碳管的拉曼和红外活性振动模 …… 153
3.4.4 单壁纳米碳管的声子色散关系 …… 157
3.4.5 多壁纳米碳管拉曼光谱的实验研究 …… 160
3.4.6 单壁纳米碳管呼吸模和碳碳伸缩模的拉曼光谱 …… 161
3.4.7 单壁纳米碳管的共振拉曼光谱 …… 164
3.4.8 通过拉曼光谱判断单壁纳米碳管的导电性 …… 169
参考文献 …… 172
第4章 纳米碳管的表面特征与孔结构 …… 176
4.1 纳米碳管中的气体吸附 …… 177
4.2 纳米碳管的表面 …… 178
4.2.1 纳米碳管表面化学结构的不均匀性 …… 179
4.2.2 单壁纳米碳管的比表面积 …… 183
4.2.3 多壁纳米碳管的比表面积及其对碳管外径的依存性 …… 186
4.2.4 纳米碳管的成束状况 …… 188
4.2.5 大表面积纳米碳管的制备和孔径控制 …… 189
4.3 纳米碳管中的孔隙及其决定的吸附过程 …… 190
4.3.1 基本孔隙——纳米碳管的准一维纳米中空管 …… 192
4.3.2 单壁纳米碳管的氮吸附和多维孔径结构 …… 194
4.3.3 多壁纳米碳管的多维孔隙结构及其决定的多段吸附过程 … 195
4.3.4 纳米碳管多维孔隙结构模型 …… 198
参考文献 …… 200
第5章 纳米碳管的力学性能及其应用 …… 203
5.1 纳米碳管力学性能的理论研究 …… 204
5.1.1 纳米碳管的弹性模量 …… 205
5.1.2 纳米碳管的 Stone-Wales 形变 …… 207
5.1.3 纳米碳管断裂的理论分析 …… 209
5.2 纳米碳管力学性能的实验研究 …… 211
5.2.1 纳米碳管的轴向模量 …… 211
5.2.2 纳米碳管的径向模量 …… 218
5.2.3 纳米碳管的拉伸强度 …… 219
5.3 纳米碳管力学性能的应用 …… 227
5.3.1 扫描探针显微镜的探针 …… 227
5.3.2 纳米碳管在复合材料中的应用 …… 230

参考文献 …… 238
第 6 章　纳米碳管的电磁性能及其应用 …… 241
6.1　纳米碳管的电子能带结构 …… 242
6.1.1　二维石墨烯 …… 242
6.1.2　单壁纳米碳管 …… 243
6.1.3　管束和多壁纳米碳管 …… 249
6.1.4　纳米碳管结 …… 251
6.1.5　单壁纳米碳管电子态密度的实验测定 …… 256
6.1.6　纳米碳管的电子能量损失谱 …… 261
6.2　纳米碳管中的电子输运及磁学性质 …… 262
6.2.1　纳米碳管的电子输运特点 …… 262
6.2.2　多壁纳米碳管的电学特性 …… 264
6.2.3　单壁纳米碳管的电学特性 …… 268
6.2.4　掺杂纳米碳管的电学特性 …… 271
6.2.5　纳米碳管的磁学性质 …… 272
6.2.6　纳米碳管的 AB 效应 …… 274
6.3　纳米碳管电磁性能的应用 …… 276
6.3.1　纳米电子器件 …… 276
6.3.2　微型传感器 …… 280
6.3.3　纳米碳管电动机械装置 …… 281
参考文献 …… 283
第 7 章　纳米碳管的场致发射性能及其应用 …… 287
7.1　场致发射的基本原理 …… 287
7.1.1　固体内部电子状态与表面势垒 …… 287
7.1.2　电子逸出与逸出功 …… 289
7.1.3　福勒尔-诺德海姆模型 …… 290
7.2　常用的场致发射材料 …… 294
7.2.1　难熔金属及其化合物 …… 294
7.2.2　碳质材料 …… 296
7.2.3　氮化硼（BN）材料 …… 297
7.3　纳米碳管的场致发射性能 …… 298
7.3.1　纳米碳管场致发射性能的测试方法 …… 298
7.3.2　单壁纳米碳管的场致发射性能 …… 306

7.3.3 多壁纳米碳管的场致发射性能 …… 310
7.3.4 影响纳米碳管场致发射的主要因素 …… 321
7.4 纳米碳管场致发射性能的应用 …… 328
7.4.1 场致发射平板显示器 …… 328
7.4.2 冷发射阴极射线管 …… 329
7.4.3 其他可能的应用 …… 331
参考文献 …… 332
第8章 纳米碳管的储放氢特性 …… 335
8.1 传统储氢材料的发展及现状 …… 337
8.1.1 高压及液化储氢 …… 337
8.1.2 金属氢化物储氢 …… 338
8.1.3 多孔物质吸附储氢 …… 339
8.2 纳米碳管储氢特性的实验研究进展 …… 340
8.2.1 纳米碳管的储氢容量及其实验研究方法 …… 340
8.2.2 纳米碳管储氢的实验研究结果 …… 343
8.2.3 影响纳米碳管储氢性能的因素分析 …… 349
8.3 纳米碳管储氢的理论研究 …… 352
8.3.1 几何模型 …… 352
8.3.2 理论计算 …… 353
8.4 纳米碳管储氢中存在的问题和前景展望 …… 366
参考文献 …… 367
第9章 纳米碳管的电化学性能 …… 369
9.1 电化学储氢 …… 370
9.1.1 基本原理 …… 370
9.1.2 纳米碳管的理论储氢容量及可能机理 …… 370
9.1.3 纳米碳管储氢电极的制备及其电化学性能测试 …… 373
9.1.4 纳米碳管的电化学储氢特性 …… 373
9.1.5 电化学储氢的应用 …… 384
9.2 锂离子电池中纳米碳管负极材料 …… 384
9.2.1 锂离子电池概述 …… 384
9.2.2 锂离子电池中负极材料的种类 …… 386
9.2.3 纳米碳管负极材料的研究 …… 388
9.3 纳米碳管的电化学电容特性及应用 …… 390

9.3.1 电化学电容器原理及关键材料 …… 391
9.3.2 影响极化电极比电容的主要因素 …… 393
9.3.3 纳米碳管的电化学电容特性 …… 397
9.3.4 电化学电容器应用展望 …… 402
参考文献 …… 403
第 10 章 纳米碳管化学 …… 406
10.1 纳米碳管的结构和化学性质 …… 407
10.1.1 纳米碳管的价键结构及化学特性 …… 407
10.1.2 理想的一维纳米空间 …… 408
10.2 管中化学——纳米反应器中的物理化学 …… 410
10.2.1 纳米碳管开口中空管的吸附行为 …… 410
10.2.2 纳米碳管内的填充 …… 413
10.2.3 最小的反应器——纳米试管 …… 416
10.3 管外化学——纳米碳管的化学改性 …… 418
10.3.1 纳米碳管化学改性的机理 …… 419
10.3.2 纳米碳管的化学改性及其应用 …… 420
参考文献 …… 432
第 11 章 纳米碳纤维——介于纳米碳管和气相生长碳纤维的新材料 …… 436
11.1 纳米碳纤维的制备 …… 437
11.1.1 制备方法简介 …… 437
11.1.2 影响纳米碳纤维生长的主要因素 …… 440
11.2 纳米碳纤维的形貌及微观结构观察 …… 443
11.3 纳米碳纤维的生长机理 …… 451
11.4 纳米碳纤维的性能及应用前景 …… 456
11.4.1 纳米碳纤维的性能 …… 456
11.4.2 纳米碳纤维的应用前景 …… 461
参考文献 …… 466
中英文对照表 …… 469

第 1 章　碳及纳米碳管概述

碳元素广泛存在于茫茫苍穹的宇宙间和浩瀚无垠的地球上，其奇异独特的物性和多种多样的形态随人类文明的进步而逐渐被发现、认识和利用。20 世纪是人类科学技术发展最迅猛的 100 年，碳科学也不例外。尽管在 18 世纪，人们就已确定石墨和金刚石都是单质碳，然而直到 1924 年石墨的结构才被准确确定。但仅由单质碳构成的物质远不止这两种，1985 年在碳元素家族中发现了 C_{60} 等富勒烯族，1991 年又发现了纳米碳管。在人类发展史上，石墨电极的应用，碳纤维复合材料的开发以及金刚石薄膜的推广等都极大地推动了人类的进步。纳米碳管被发现后，理论推测和实验证明纳米碳管，特别是单壁纳米碳管具有特异的性能，其应用前景不可估量。物理学家对不同结构纳米碳管的特殊电性质，化学家对纳米碳管具有纳米尺度的空间，材料学家对其惊人的刚度、强度和弹力等都极为关注，使纳米碳管成为近十年来凝聚态物理和材料科学研究的一大热点。为了能对碳元素和纳米碳管有较全面的理解和认识，本章首先介绍碳元素的广泛性、特殊性及多样性，造就这些特殊性及多样性的原因以及纳米碳管在碳的同素异性体中所处的位置，然后叙述纳米碳管的发现和制备研究的概况，最后简要说明纳米碳管的特性、应用前景和可能发展的方向。

1.1　碳的广泛性、特殊性及多样性

1.1.1　碳的广泛性

按照“大爆炸（Big Bang）”理论，宇宙当初是一巨大的能量块。由于其密度无限大，体积又很小，故在 150 亿年前发生大爆炸后迅速膨胀。最初在宇宙空间充满了超高能量的光，随着膨胀的发生，其温度开始下降，光开始转化为物质。在温度达到 10^{14} K 时，

各种基本粒子开始形成，在进一步冷却时产生元素氢，由于万有引力作用，它们在各处凝集，因凝集热而使温度再次提高。当温度达到 5×10^6 K 时，重氢热核聚变成氦。当温度超过 10^8 K 时，氦燃烧完后，氦开始燃烧，3 个氦原子再次经热核聚变而成为容易形成固体的碳。碳和氦作用进而生成氧。当温度达 5×10^8 K 时，开始由碳燃烧生成氖、钠、镁。在 10^9 K 时，氧燃烧生成硫、磷、硅。在超过 2×10^9 K 时，硅燃烧逐次生成直至铁的各种重元素。在含碳以上更重成分星体的中心部，铁会捕获由氢经“质子-质子”或“碳、氮循环”反应后形成的中子，进而连锁地合成直至铋的各种更重的元素。在超新星爆发时，在这类星体周围更重的元素会迅速地捕捉快中子而形成超铀元素。合成的各种元素在冷却下来时会凝集成宇宙尘，在各处凝集后形成许多形态各异的天体，从而诞生了无数星球，形成众多的银河系[1]。

在太阳系的元素和同位素中，按原子比率的顺序列在前面的为：H≫He≫O≥C＞Ne≈N＞Mg≥Si≥Fe＞S＞Ar≥Al≥Ca。碳和氧差不多，列第 4 位，在易形成固体的元素中则最高[1]。也有文献报道，在整个宇宙的所有元素中，碳元素所占的比例为 0.3%[2]。宇宙中碳的丰度列第 6 位[3]。由于碳十分丰富，并能形成复杂的化合物，它在宇宙的进化中起着重要作用，是宇宙中前期生物分子进化的关键元素。目前已鉴定出的星际（IS：interstellar）及环绕星际（circumstellar）分子有 118 个，其中超过 75% 是含碳的分子。碳是扩散的星际云中自由电子的供给源，它在星际环境（ISM：interstellar medium）的物理进化中起重要作用。在宇宙中既发现有原子碳，也有分子碳和固态碳和碳化物。宇宙中各种已确定碳的形态有表 1.1 所示的一些类型[4]。通过宇宙中前期有机物质的外源传递（通过与彗星相遇以及与流星撞击），在地球早期生命的起源和进化中，碳产生深刻的影响。比太阳温度低的星球，其能量大部分由质子-质子的热核反应而来；而太阳以及比太阳温度更高的星球，其能量则主要来自“碳循环”反应。碳是太阳及某些星球在产生能量的“碳循环”热核反应中不可缺少的元素。“碳循环”也称“碳、