



《新型炭材料》丛书

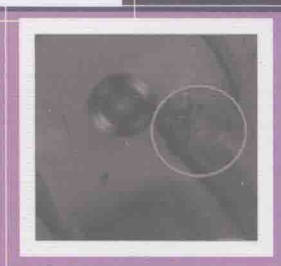
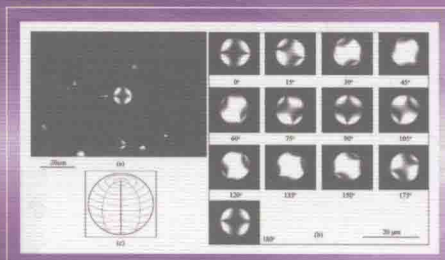
■ 宋怀河 总主编 ■

New Carbon Material Series

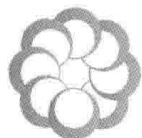
沥青基炭材料

Pitch-based Carbon Materials

王成扬 陈明鸣 李明伟 编著



化学工业出版社



《新型炭材料》丛书

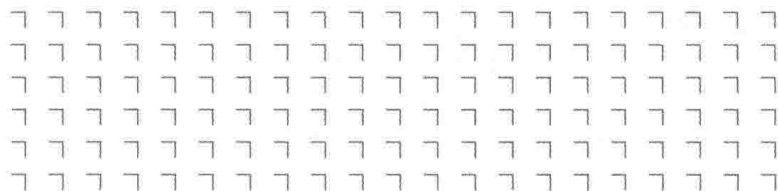
▪ 宋怀河 总主编 ▪

New Carbon Material Series

沥青基炭材料

Pitch-based Carbon Materials

王成扬 陈明鸣 李明伟



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是著者及其研究团队多年来在炭材料研究方面部分工作的总结。主要内容包括：沥青的来源及组成结构，中间相沥青的形成与转化，沥青基炭材料的可控制备和应用等。

书中从稠环芳烃液炭化的物理化学角度，依据中间相形成与发展的“颗粒基本单元构筑”理论和炭化过程理论，重点论述了中间相沥青的形成与形态转化，系统阐述了通过特定的炭材料成型（成纤、成球等）和热处理工艺（不熔化、炭化和石墨化）制备各种用途的沥青基炭材料，诸如沥青焦、针状焦、沥青基炭纤维、中间相沥青炭微球、沥青基炭纳米材料等的制备原理和技术。

本书可作为从事炭材料研究、制造与应用工作的科学技术人员的参考书，亦可作为相关专业本科生、研究生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

沥青基炭材料/王成扬, 陈明鸣, 李明伟编著. —北京:
化学工业出版社, 2018.7

(新型炭材料)

ISBN 978-7-122-32102-2

I. ①沥… II. ①王…②陈…③李… III. ①沥青-炭
素材料-研究 IV. ①TE626.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 092911 号

责任编辑: 夏叶清

文字编辑: 陈 雨

责任校对: 王 静

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 三河市航远印刷有限公司

装 订: 三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 23¼ 字数 454 千字 2018 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 128.00 元

版权所有 违者必究

前 言

碳元素是自然界存在的，与人类最密切相关的元素之一。碳元素具有多样的电子轨道特性（ sp 、 sp^2 、 sp^3 杂化），再加之 sp^2 的异向性导致的晶体各向异性和其排列的各向异性，使得以碳元素为主体元素构成的炭材料几乎包括了地球上所有物质所具有的性质，如：最硬-最软；绝缘体-半导体-良导体；绝热-良导热；全吸光-全透光等。随着科学技术的进步，人们发现碳似乎蕴藏着无限的开发可能性。

沥青基炭材料作为炭材料的典型代表，其优良的耐热性能、高热导率、良好的化学惰性、高电导率等优异的性能引起了炭材料领域科技工作者的高度重视，促进了沥青基炭材料的快速发展，在航空航天、能源、环保、医疗、电子、化工、机械、冶金等诸多领域越来越显现出广阔的应用前景。

中间相沥青是一类重要的炭材料前驱体，其结构和后处理条件决定了形成的中间相沥青炭材料的结构。而中间相沥青炭材料的结构与其具有的性质密切相关，是影响其具体性能和最终应用的关键因素之一。因此，控制中间相沥青的形成及其向炭材料转化过程中的结构发展对制备高性能的沥青基炭材料尤为重要。

基于著者及其研究团队从事沥青基炭材料科学研究三十多年来，在国家 863 计划项目、国家自然科学基金、天津市自然科学基金重点项目、天津市应用基础及前沿技术研究计划重点项目、天津市重点科技攻关项目、天津市科技支撑计划重点项目和中国产学研合作创新项目（中石化、中海油和中车新能源）等研究课题中取得的一系列科研成果，尤其是利用王成扬教授提出的碳质中间相形成和形态发展的“颗粒基本单元构筑”新理论，进行可控制备高质量和高性能的沥青基炭材料，诸如中间相沥青炭微球、中间相沥青炭纤维、针状焦等的研究与开发，为本书的撰写提供了诸多原创性素材。

本书从稠环芳烃液炭化的物理化学角度，依据中间相形成与发展的“颗粒基本单元构筑”理论和炭化学基础，重点论述了中间相沥青的形成与形态转化，系统阐述了通过特定的炭材料成型（成纤、成球等）和热处理工艺（不熔化、炭化和石墨化）制备各种用途的沥青基炭材料，诸如：沥青焦、针状焦、沥青基炭纤维、中间相沥青炭微球、沥青基炭纳米材料等的原理和技术。希望本书的出版能给我国炭材料科技工作者提供有益的研发参考资料，有利于促进我国沥青基炭材料的研发和工业化发展。

本书的主要内容包括沥青的来源及组成结构，中间相沥青的形成与转化，沥青基炭材料（沥青焦、针状焦、沥青基炭纤维、中间相沥青炭微球、沥青基炭纳米材料等）的可控制备和应用等。其中：第 1、3、5 章，王成扬执笔；第 2、4 章，李明伟执笔；第 6 章，陈明鸣执笔。

感谢天津大学化工学院及郭崇涛教授、郑嘉明副教授、李明高级工程师、李同起博士、刘秀军博士、李太平硕士、丁翰洋硕士、孙帅博士、卢秀荣硕士、贾荣利博士、王璿博士、王九洲博士、郭雪飞博士和著者研究团队的全体成员对书中研究工作所做的贡献和大力支持！

由于时间与水平有限，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请广大读者和同行专家批评指正。

编著者
2018 年 6 月

目 录

第 1 章	原料沥青的来源及组成结构	1
1.1	煤沥青	1
1.1.1	煤沥青的性质	1
1.1.2	煤沥青的组成结构	2
1.2	石油沥青	9
1.2.1	石油沥青的性质	9
1.2.2	石油沥青的组成与结构	12
1.3	萘沥青	21
1.3.1	萘的分子结构本性与热反应性能	22
1.3.2	萘沥青的制备方法	25
1.3.3	催化缩聚法制备萘沥青和中间相沥青	33
	参考文献	40
第 2 章	沥青焦和针状焦	43
2.1	沥青焦	45
2.1.1	生产原料	45
2.1.2	生产工艺	46
2.1.3	沥青焦的性能与应用	54
2.2	针状焦	58
2.2.1	针状焦简介	58
2.2.2	生产针状焦的理论基础	60
2.2.3	针状焦的生产工艺	61
2.2.4	针状焦的结构及其性能	72
2.2.5	针状焦的应用	79
	参考文献	84
第 3 章	中间相沥青的形成与转化	91

3.1	中间相沥青的概念	91
3.2	中间相沥青的制备与评价	92
3.2.1	原料	92
3.2.2	制备方法	102
3.2.3	质量评价	109
3.3	中间相沥青的形成过程	113
3.3.1	球形中间相	113
3.3.2	体形中间相	123
3.3.3	“颗粒基本单元构筑”理论	135
	参考文献	173

第4章 沥青基碳纤维

182

4.1	发展概况	183
4.2	生产工艺	185
4.2.1	原料沥青的选择和精制	185
4.2.2	纺丝沥青的调制	188
4.2.3	沥青纺丝	201
4.2.4	沥青纤维的不熔化	227
4.2.5	炭化	229
4.3	碳纤维的力学性能与微观结构	234
4.3.1	碳纤维的力学性能	234
4.3.2	碳纤维的微观结构	236
4.3.3	碳纤维中的石墨微晶结构	242
4.4	沥青基碳纤维的性能与应用领域	253
4.4.1	通用级沥青基碳纤维的性能	253
4.4.2	高性能沥青基碳纤维的性能	254
4.4.3	应用领域	257
	参考文献	263

第5章 中间相沥青炭微球

273

5.1	中间相沥青炭微球的制备	273
5.1.1	缩聚法	273
5.1.2	乳化法	275
5.1.3	悬浮法	281
5.2	中间相沥青炭微球的分离	285

5.2.1	溶剂分离法	285
5.2.2	离心分离法	287
5.2.3	热过滤分离法	288
5.3	中间相沥青微球的炭化石墨化	290
5.4	中间相沥青炭微球的结构与性能	292
5.4.1	中间相沥青炭微球的形态	292
5.4.2	中间相沥青炭微球的织构	293
5.4.3	中间相沥青炭微球的微结构	299
5.4.4	中间相沥青炭微球的结构与性能的关联	301
5.5	中间相沥青炭微球的应用	319
5.5.1	高密度高强度炭材料	319
5.5.2	高性能液相色谱柱填料	325
5.5.3	高比表面积活性炭	325
5.5.4	锂离子二次电池电极	330
5.5.5	催化剂载体	334
	参考文献	338

第6章 其他沥青基炭材料

343

6.1	沥青基球形活性炭	343
6.1.1	沥青基球形活性炭的制备方法	344
6.1.2	减黏剂结晶对球形活性炭初始孔道的影响	345
6.1.3	沥青基球形活性炭的孔道控制	345
6.1.4	球形活性炭的表面改性	346
6.1.5	不熔化处理的新方法	346
6.1.6	球形活性炭的应用	346
6.2	两亲性炭材料	347
6.2.1	水分散性	348
6.2.2	粒度分布	349
6.2.3	表面官能团	349
6.2.4	两亲性碳质前躯体构筑纳米球及其特点	350
6.2.5	两亲性碳质前躯体制备纳米多孔炭	352
6.2.6	包覆	355
	参考文献	360

第 1 章

原料沥青的来源及组成结构

炭材料是一种既古老又年轻、既普通又神奇的材料，沥青基炭材料作为其中的典型代表，以其优良的耐热性能、高热导率、良好的化学惰性、高电导率等优异的性能引起了炭材料领域科技工作者的高度重视，促进了沥青基炭材料的快速发展，在航空航天、能源、环保、医疗、电子、化工、机械、冶金等诸多领域越来越显现出广阔的应用前景。

制备沥青基炭材料的主要原料有煤沥青、石油沥青和萘沥青等^[1]。

1.1 煤沥青

煤沥青全称为煤焦油沥青，是煤焦油蒸馏提取轻油、酚油、萘油、洗油和蒽油等馏分后的残留物，其产率约占煤焦油的 50% ~ 60%^[2]，是煤焦油加工的主要产品之一。煤沥青的性质及组成与原料煤的性质、炼焦的工艺条件、焦油蒸馏条件及沥青的生产工艺等有关^[3,4]。

1.1.1 煤沥青的性质

煤沥青在室温下为黑色脆性块状物，无固定的熔点，只有从固态转化为过渡态的温度范围，通常用软化点表示。根据软化点（环球法）的高低，一般将煤沥青划分为：低温煤沥青（软沥青）、中温煤沥青（普通沥青）、高温煤沥青（硬沥青）。

表 1-1 是国标 GB/T 2290—2012 规定的煤沥青技术指标。

表 1-1 煤沥青的技术指标

指标名称	低温沥青		中温沥青		高温沥青	
	1号	2号	1号	2号	1号	2号
软化点 $t/^\circ\text{C}$	35~45	46~75	80~90	75~95	95~100	95~120
甲苯不溶物/%			15~25	≤25	≥24	<5.0

续表

指标名称	低温沥青		中温沥青		高温沥青	
	1号	2号	1号	2号	1号	2号
灰分/%			≤0.3	≤0.5	≤0.3	
水分/%			≤5.0	≤5.0	≤4.0	≤5.0
喹啉不溶物/%			≤10			
结焦值/%			≥45		≥52	

- 注：1. 软化点测定按 GB/T 2294—1997 规定进行，发生争议时按环球法规定进行仲裁。
 2. 甲苯不溶物含量测定按 GB/T 2292—1997 规定进行。
 3. 灰分测定按 GB/T 2295—2008 规定进行。
 4. 水分测定按 GB/T 2288 规定进行，只作生产操作中控制指标，不作质量考核依据。
 5. 喹啉不溶物含量测定按 GB/T 2293 规定进行，每月至少测一次。
 6. 结焦值测定按 GB/T 8727 规定进行。

低温煤沥青（俗称软沥青）主要用于建筑防水、电极炭素材料和炉衬黏结剂，也可用于制备炭黑和作为燃料，还是系列新型炭材料，诸如：针状焦、中间相沥青、中间相沥青基炭纤维、中间相沥青基泡沫炭等的优质原料^[1~3]。

中温煤沥青用于制备建筑物防水层、高级沥青漆、改质沥青和沥青焦；亦可作为炭材料生产用黏结剂和浸渍剂，如生产石墨电极、冶金炉用和铝电解槽用炭块、电解铝用预焙阳极和阳极糊以及冶炼铁合金、电石所需电极糊等，经过一定的预处理，还可以用于制取中间相炭微球、通用级沥青炭纤维等炭材料^[1~3,5~8]。

高温沥青及改质沥青可作为生产沥青焦或活性炭的原料，并用于制备各种高性能炭材料，诸如：高功率和超高功率石墨电极、优质预焙阳极和炭块、高密高强石墨、高温模压炭砖以及微孔炭砖等的黏结剂^[1~3,8]。

1.1.2 煤沥青的组成结构

组成煤沥青的主要化学元素是碳和氢，其中碳的质量分数大于 90%，氢的质量分数一般不超过 5%。煤沥青的组成极为复杂，分子量分布较宽，从数百到上千，平均分子量为 300~1000，是一种多组成的共熔混合物^[2]。

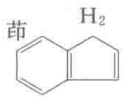
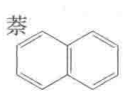
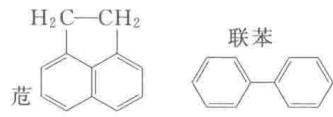

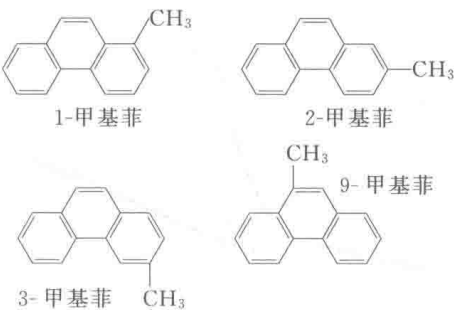
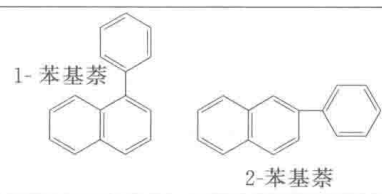
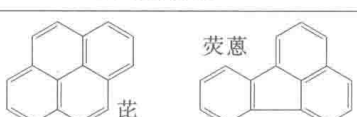
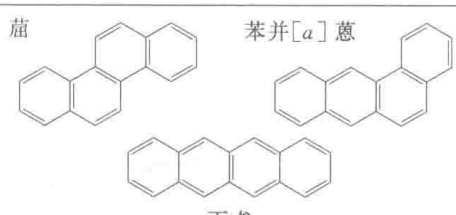
煤沥青以稠环芳烃为主，其中大多数为三环以上的多环芳烃，还含有 O、N、S 等元素的杂环化合物和少量高分子物质；煤沥青中的低分子物质具有结晶性，并可形成多种结构的共熔混合物^[2~3]。

(1) 中温煤沥青中的典型化合物

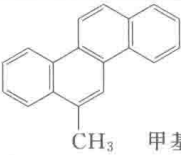
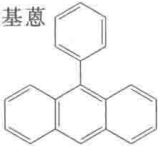
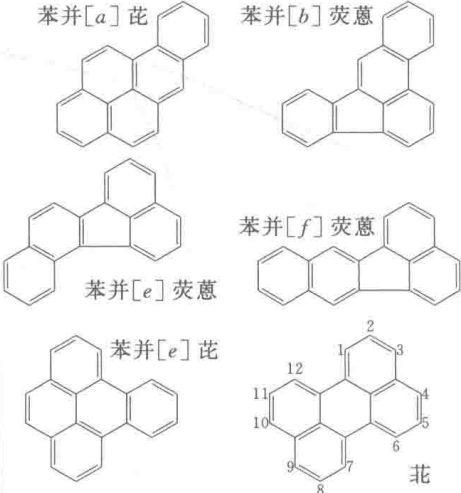
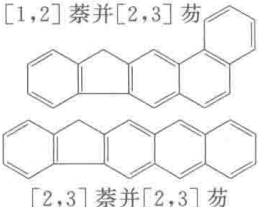

煤沥青中已查明的化合物有 70 余种，这些化合物中，大多带有基团，诸如：甲基、乙基、羰基、酚羟基、亚氨基和苯基等。

表 1-2 列出了中温煤沥青中部分典型化合物的组成与结构。

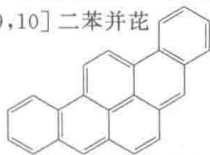
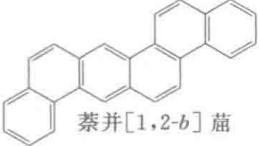
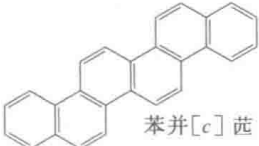
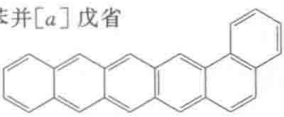

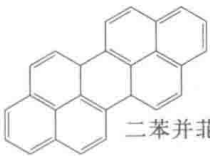

表 1-2 中温煤沥青中部分典型化合物的组成与结构^[3]

物质名称	分子式 (分子量)	结构式	C/H 原子比	质量分数 ^① /%	
				1	2
茚	C ₉ H ₈ (116)		1.125	0.1	0.1
萘	C ₁₀ H ₈ (128)		1.250	8.0	9.0
茈, 联苯	C ₁₂ H ₁₀ (154)		1.200	1.8	2.2
蒽, 菲	C ₁₄ H ₁₀ (178)		1.400	5.5	4.6
甲基菲	C ₁₅ H ₁₂ (192)		1.250	3.4	2.5
苯基萘	C ₁₆ H ₁₂ (204)		1.333		
四环芳香剂					
卟位聚合	C ₁₆ H ₁₀ (202)		1.600	9.6	8.4
蒾位聚合	C ₁₈ H ₁₂ (228)		1.500	6.9	5.0

续表

物质名称	分子式 (分子量)	结构式	C/H 原子比	质量分数 ^① /%	
				1	2
四环芳香剂					
甲基蒽	C ₁₉ H ₁₄ (242)	 CH ₃ 甲基蒽	1.360	2.1	1.3
苯基蒽	C ₂₀ H ₁₄ (254)	 苯基蒽	1.429		
五环芳香剂					
迫位聚合	C ₂₀ H ₁₂ (252)	 苯并[a]蒽 苯并[b]荧蒹 苯并[e]荧蒹 苯并[f]荧蒹 苯并[e]蒽 蒽	1.667	9.8	8.4
渺位聚合	C ₂₁ H ₁₄ (266)	 [1,2]萘并[2,3]芴 [2,3]萘并[2,3]芴	1.500	2.3	1.8
六环芳香剂					
苯并花	C ₂₂ H ₁₂ (276)	 苯并花	1.833	3.7	3.4

续表

物质名称	分子式 (分子量)	结构式	C/H 原子比	质量分数 ^① /%	
				1	2
六环芳香剂					
迫位聚合	C ₂₄ H ₁₄ (302)	[3,4,9,10]二苯并蒽 	1.714	1.4	1.0
渺位聚合	C ₂₆ H ₁₆ (328)	蒽并[1,2-b]蒽 	1.625	0.2	0.1
		苯并[c]蒽 			
		苯并[a]戊省 			
七环芳香剂					
晕苯	C ₂₄ H ₁₂ (300)	晕苯 	2.000	0.2	0.2
二苯并蒽 [3,4;9,10]	C ₂₆ H ₁₄ (326)	二苯并蒽 	1.857	0.2	0.2
二苯并蒽 [7,8;11,12]	C ₂₈ H ₁₆ (352)	二苯并蒽 	1.750	痕量	痕量
杂原子化合物					
含氮化合物				18.2	12.9
含硫化合物				2.1	1.5
含氧化合物				1.4	1.1
未蒸发的残渣				29.0	43.6

① 两个中温煤沥青试样的质谱测试数据。

(2) 煤沥青的族组成

鉴于煤沥青组分的复杂性，难以单独提取每一组物质，因此常用族组成分析法进行研究。

族组成分析法是一种在沥青的分子结构没有破坏的条件下，进行分子组分的分割的方法。煤沥青族组成的分割手段通常采用溶剂萃取，即利用相似相容原理，将煤沥青分离为若干具有相似化学、物理性能的芳香族化合物，由于各组分的芳构化程度、组成、性质、分子结构等都不尽相同，因而在不同溶剂中的溶解度也不同。尽管同一溶剂萃取得到的组分结构类似，但也不是纯净组分，仍然是异族的混合物。显然，沥青的族组成取决于溶剂的性质。

用于煤沥青族组成分析的溶剂有很多，诸如：喹啉、吡啶、甲苯、苯、四氢呋喃、石油醚、汽油、正己烷、正戊烷、正庚烷等。常用的有机溶剂为喹啉（或吡啶）、甲苯（或苯）和正己烷（或正戊烷，或正庚烷），分割后的族组成分别为：喹啉（或吡啶）不溶物、甲苯（或苯）不溶物-喹啉（或吡啶）可溶物、正己烷（或正戊烷，或正庚烷）不溶物-甲苯（或苯）可溶物和正己烷（或正戊烷，或正庚烷）可溶物。

天津大学著者研究团队在煤沥青族组成分割过程中采用的有机溶剂为正己烷、甲苯和喹啉，分割流程如图 1-1 所示。

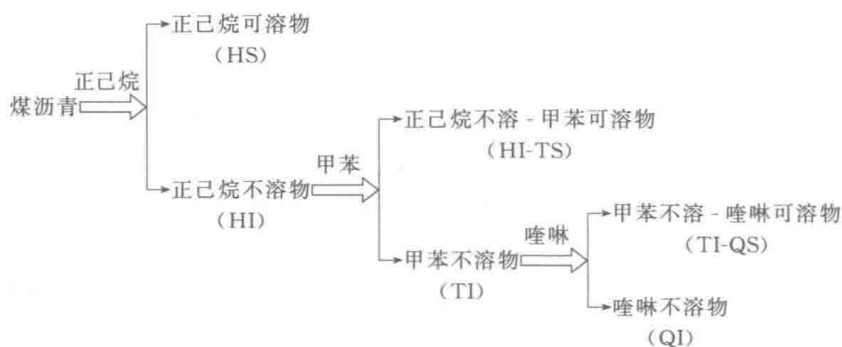


图 1-1 沥青族组成分割流程简图

分割条件为：正己烷不溶物（HI）——常温下搅拌，静置 30min 获得；甲苯不溶物（TI）—— $(60 \pm 5)^\circ\text{C}$ 下热溶 30min 获得；喹啉不溶物（QI）—— $(75 \pm 5)^\circ\text{C}$ 下热溶 30min 获得。

所有溶剂不溶物均用相应溶剂洗涤 4 次，然后用高速离心机去除上层液体。为了在干燥后不因溶剂的残存而使结果偏大，在每次干燥不溶物前，先把不溶物用丙酮冲洗一次，而后在 60°C 时干燥约 20h。

表 1-3 是著者研究团队在进行碳质中间相生成理论及其应用研究中所采用的原料中温煤沥青和低温煤沥青的族组成。

表 1-3 煤沥青的软化点和族组成^[8]

原料	软化点 $t/^\circ\text{C}$	HS/%	HI-TS/%	TI-QS/%	QI/%
低温煤沥青	27	20.6	67.0	12.1	0.30
中温煤沥青	78	19.6	58.8	16.9	4.70

注：中温煤沥青，天津煤化工工厂生产；低温煤沥青，山东济宁煤化工工厂生产；软化点的测试采用环球法。

HS，正己烷可溶物；HI-TS，正己烷不溶物-甲苯可溶物；TI-QS，甲苯不溶物-喹啉可溶物；QI，喹啉不溶物。

(3) LS 中温煤沥青的组成结构

中国科学院山西煤炭化学研究所钱树安采用有机溶剂正庚烷、苯和吡啶对我国典型石墨电极黏结剂 LS 中温煤沥青的族组成进行分割，并对各分割组分进行元素分析，VPO 分子量测定和相应的平均分子式计算，同时通过核磁共振氢谱和红外光谱联合解析所得的各组分的平均分子结构参数，进而得出各组分的平均分子结构模型。

表 1-4 列出了 LS 中温煤沥青的族组成，其中主要族组分的元素组成、分子量和平均分子式列入表 1-5，各组分的平均分子结构参数见表 1-6，依据表 1-6 数据得到 LS 中温煤沥青各族组分的平均分子结构模型如图 1-2 所示。

表 1-4 LS 中温煤沥青的族组成^[9]

族组成	HS	HI-BS	BI-PS	PI
质量分数/%	27.8	25.6	31.1	15.4

注：HS，正庚烷可溶物；HI-BS，正庚烷不溶-苯可溶物；BI-PS，苯不溶-吡啶可溶物；PI，吡啶不溶物。

表 1-5 LS 中温煤沥青主要族组分的元素组成与平均分子式^[9]

LS 中温煤沥青	元素组成/%					C/H 原子比	平均分子量	平均分子式
	C	H	N	O ^①	S			
HS	91.85	5.30	0.85	1.57	0.43	1.46	299.0	$\text{C}_{22.90}\text{H}_{15.70}\text{N}_{0.18}\text{S}_{0.04}\text{O}_{0.29}$
HI-BS	91.98	4.76	1.01	1.75	0.50	1.62	339.3	$\text{C}_{25.98}\text{H}_{18.02}\text{N}_{0.25}\text{S}_{0.05}\text{O}_{0.37}$
BI-PS	89.85	4.42	0.00	5.32	0.41	1.71	402.0	$\text{C}_{30.08}\text{H}_{17.63}\text{S}_{0.05}\text{O}_{1.34}$

① 差减法。

注：HS，正庚烷可溶物；HI-BS，正庚烷不溶-苯可溶物；BI-PS，苯不溶-吡啶可溶物。

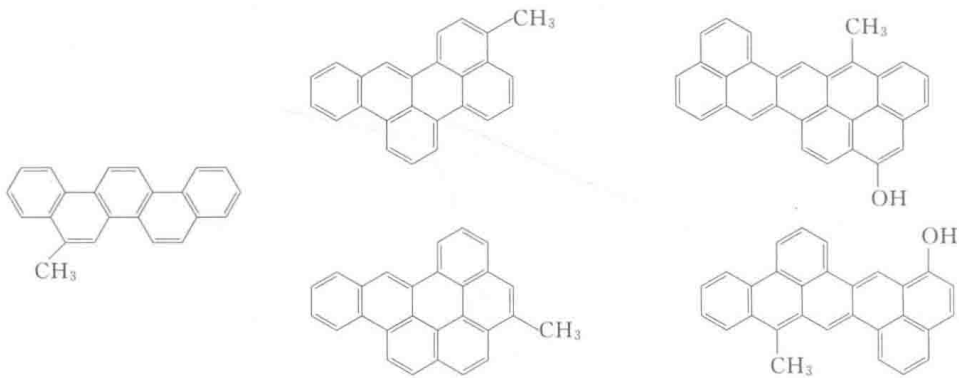
关联表 1-4 和表 1-5 可知，LS 中温煤沥青除含有正庚烷可溶物 (HS) 和正庚烷不溶-苯可溶物 (HI-BS) 组分外，还含有大量的苯不溶-吡啶可溶物 (BI-PS) 和 (吡啶不溶物) PI 组分。其中 BI-PS 组分中，氧原子的质量分数高达 5.32%，超过

每个平均分子 1 个氧原子 (1.34); 可以预料到 PI 组分中的杂原子含量将更高。

表 1-6 LS 中温煤沥青主要族组分的平均分子结构参数^[9]

LS 中温煤沥青	X	f_A	σ	C_P/C_A	C_A	C_P	R_A	R_N	n	L	C_{A1}	H_{A1}	M
HS	2.51	0.948	0.066	0.626	21.7	13.7	5.0	0.2	0.9	1.4	1.2	3.1	1
HI-BS	2.49	0.951	0.071	0.560	24.7	14.0	6.4	0.2	1.0	1.3	1.3	3.2	1
BI-PS	2.44	0.961	0.056	0.542	28.9	15.8	7.6	0.3	0.9	1.3	1.2	2.9	1

注: X, 芳核上烷基取代基的氢碳原子比; f_A , 芳香度, 平均分子中的芳碳数与总碳数的比; σ , 取代度, 平均分子芳核实际取代数与可能取代数的比; C_P/C_A , 缩合度, 平均分子芳核外周碳数与总芳碳数的比; C_A , 平均分子总芳碳数; C_P , 平均分子芳核外周碳总数; R_A , 平均分子芳环总数; R_N , 平均分子环烷环总数; n, 平均分子取代基总数; L, 取代基平均链长; C_{A1} , 平均分子脂碳总数; H_{A1} , 平均分子脂氢总数; M, 平均分子芳核数。



(a) 正庚烷可溶物 (HS) (b) 正庚烷不溶-苯可溶物 (HI-BS) (c) 苯不溶-吡啶可溶物 (BI-PS)

图 1-2 LS 中温煤沥青各族组分的平均分子模型^[9]

从图 1-2 可看出, LS 中温煤沥青 3 个被解析的组分中有 2 个平均分子芳核构型不规则, 亦即: 只有正庚烷可溶物为规则的芳环渺位构型, 而正庚烷不溶-苯可溶物和苯不溶-吡啶可溶物的芳环均接近于迫位构型。

(4) 煤沥青分子结构的特征

从表 1-3 和表 1-4 可以看出: 山东济宁低温煤沥青正己烷不溶-甲苯可溶物的质量分数为 58.8%, 甲苯不溶-喹啉可溶物的质量分数为 16.9%, 二者之和为 75.7%; 天津中温煤沥青的正己烷不溶-甲苯可溶物的质量分数为 67.0%, 甲苯不溶-喹啉可溶物的质量分数为 12.1%, 二者之和为 79.1%; LS 中温煤沥青的正庚烷不溶-苯可溶物的质量分数为 25.6%, 苯不溶-吡啶可溶物的质量分数为 31.1%, 二者之和为 56.7%。由此可以认为, 低温和中温煤沥青的主要族组成均为正庚烷 (或正己烷) 不溶-苯 (或甲苯) 可溶物和苯 (或甲苯) 不溶-吡啶 (或喹啉) 可溶物。

关联表 1-4、表 1-3 与图 1-2, 可以推测出传统煤沥青分子的结构特征为: 稠

环芳烃接近于迫位构型，脂肪族侧链较少且短。

1.2 石油沥青

石油沥青是原油加工的一种产品，主要由烃类及其衍生物组成。生产石油沥青的方法主要有蒸馏法、氧化法、溶剂法、调合法以及这4种工艺间的组合^[10,11]。石油沥青的产量约占原油加工量的2%~4%^[12]。

石油沥青的分类体系主要有以下几种。

- ① 根据生产工艺分类：直馏沥青、氧化沥青、溶剂脱油沥青、调和沥青等。
- ② 按照原油基属分类：石蜡基沥青、环烷基沥青、中间基沥青等。
- ③ 依据外观形态分类：固体沥青、液体沥青等。
- ④ 基于应用领域分类：道路沥青、建筑沥青、防水防潮沥青和以用途或功能命名的各种专用沥青。

另外，也常采用原油名、企业名等来称呼石油沥青。

1.2.1 石油沥青的性质

石油沥青在常温下为黑色或黑褐色的黏稠液体、半固体或固体，其性质与组成随原油来源和生产方法的不同而变化。

石油系沥青中稠环芳烃的芳香度比煤焦油沥青低，碳的质量分数只有83%~87%^[13]，脂肪族侧链较长且多。

石油沥青的使用性能与其化学组成密切相关，因此石油原油的化学组成是选择石油沥青生产原料的依据之一。

石油沥青分析评价的方法是采用石油化工行业标准 NB/SH/T 0509—2010《石油沥青四组分测定法》，将石油沥青分为饱和分(Sa)、芳香分(Ar)、胶质(Re)和沥青质(As)四种组分。

石油沥青四组分测定法(NB/SH/T 0509—2010)概要：将石油试样用正庚烷沉淀出沥青质，过滤后，用正庚烷回流除去沉淀中夹杂的可溶分，再用甲苯回流溶解沉淀，得到沥青质。再将脱沥青质部分吸附于氧化铝色谱柱上，依次用正庚烷或石油醚、甲苯、甲苯—乙醇展开洗出，对应得到饱和分、芳香分和胶质。

一般认为，饱和分的质量分数为8%~15%，芳香分的质量分数为30%~50%，胶质的质量分数为25%~45%。沥青质的质量分数为1%~10%的石油沥青各项性能指标发挥得比较好^[10]。

作为炭材料原料的石油沥青，通常以富含芳烃的减压渣油、催化裂化油浆和乙烯焦油等为原材料，采用热聚法获取^[14]。这种石油沥青中含有片状稠环分子结构的沥青烯炔，由于沥青烯炔的分子量、芳香度和热稳定性都比较高，是较好的制备碳质中间相的原料，亦是制备炭材料的适宜原料。