

DIANZI FENGZHUANG YONG XINXING SHIMO XIANWEI
ZENGQIANG JINSHUJIFUHECAILIAO DE YANJIU

电子封装

用新型石墨纤维增强金属基 复合材料的研究



张昊明◎著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

本书受国家自然科学基金 (U1304512), 河南省科技发展计划项目 (172102210208), 郑州市科技攻关计划项目 (153PKJGG135) 和河南工程学院博士基金 (D2014015) 资助。

电子封装用新型石墨纤维 增强金属基复合材料的研究

张昊明 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

图书在版编目 (CIP) 数据

电子封装用新型石墨纤维增强金属基复合材料的研究/张昊明著. —北京: 知识产权出版社, 2017. 8

ISBN 978-7-5130-5047-0

I. ①电… II. ①张… III. ①金属基复合材料 IV. ①TB333.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 182060 号

内容提要

微电子及半导体器件对电子封装材料要求的不断提升推动着高热导率、可调热膨胀系数金属基复合材料的开发, 以有效地驱散热量和减小热应力, 提高电子设备的性能、寿命和可靠性。而具有高导热、低热膨胀系数且加工性良好的新型石墨系材料已开始被尝试用于和金属 Cu、Al 的复合, 成为电子封装用金属基复合材料研发的新动向。

本书简要介绍了电子封装材料的相关知识, 初步研究了高性能石墨纤维增强 Cu、Al 基复合材料的制备工艺, 显微结构及热物理性能。从增强体表面金属化改性的角度出发, 详细描述了石墨纤维表面金属化过程; 在优化复合材料的相关制备工艺的同时, 较系统地论述了石墨纤维与 Cu、Al 复合时的界面特性; 较全面地表征了所制备复合材料的热物理性能, 并对其导热机理进行了初步探讨。

责任编辑: 贺小霞 栾晓航

责任校对: 谷 洋

封面设计: 刘 伟

责任出版: 孙婷婷

电子封装用新型石墨纤维增强金属基复合材料的研究

张昊明 著

出版发行: 知识产权出版社有限责任公司

网 址: <http://www.ipph.cn>

社 址: 北京市海淀区气象路 50 号院

邮 编: 100081

责编电话: 010-82000860 转 8382

责编邮箱: luanxiaohang@cnipr.com

发行电话: 010-82000860 转 8101/8102

发行传真: 010-82000893/82005070/82000270

印 刷: 北京中献拓方科技发展有限公司

经 销: 各大网上书店、新华书店及相关专业书店

开 本: 720mm×1000mm 1/16

印 张: 8.5

版 次: 2017 年 8 月第 1 版

印 次: 2017 年 8 月第 1 次印刷

字 数: 135 千字

定 价: 42.00 元

ISBN 978-7-5130-5047-0

出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题, 本社负责调换。



前 言

在微电子技术高速发展的今天，芯片运算速度越来越高，集成电路的封装密度也越来越大。电子元件在高频工作下产生的极大热量，可导致器件及电路板工作温度升高，而过高的温度会影响器件的稳定性及寿命。半导体器件，尤其是高功率密度器件的散热问题已成为电子信息产业面临的技术瓶颈之一。另一方面，在微电子集成电路以及大功率整流器件中，因材料之间热膨胀系数的不匹配而引起的热应力与热疲劳也会引起微电子电路和器件的失效。解决上述问题的重要手段之一是选择合理的封装材料，此时要求封装材料具有高的热导率和可调的热膨胀系数以有效地驱散热量和减小热应力。

传统的低膨胀材料如 Invar, Kovar, W (Mo) /Cu 等已不能满足现代热管理对材料的散热性要求。自 20 世纪 90 年代以来，以 SiC/Al 材料为典型代表，将高导、低膨胀材料与高导金属材料进行复合以获得导热性良好、线膨胀系数可调的金属基封装材料，已成为设计和研制电子器件用封装材料的重要理念和发展方向。当前 SiC/Al 材料的各项性能，尤其是导热性能 [$<250 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$] 表现已难以取得突破，随着现代热管理对封装材料导热性要求的进一步提高，无疑以更高热导率金刚石为增强体的复合材料体系成了关注和研发的焦点。然而，在

高导金刚石/金属材料取得长足发展的同时,其可加工性能差的问题仍未得到很好解决,限制了其实际应用。近期,具有高导热、低热膨胀系数且加工性良好的新型石墨系材料,如石墨泡沫(graphite foam)、天然石墨鳞片(graphite flake)、高导石墨纤维(graphite fiber)等,已开始被尝试用于和金属如Cu、Al的复合,成为电子封装用金属基复合材料研发的新动向。

以中间相沥青为先驱体制备的高性能碳纤维,通常被称为中间相沥青基石墨纤维,其轴向热导率接近 $1100\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,热膨系数可达 $-1.5\times 10^{-6}/\text{K}$ 。随着石墨纤维技术的不断进步,该种石墨纤维的非连续形式(磨碎或短切形式)具备了超过 $900\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的热导率和较低的价格/成本(为连续长纤维的 $1/10$),因此,非常适合作为电子封装用金属基复合的增强相材料。基于此,本书以磨碎形式的该种石墨纤维为原料,分别采用放电等离子烧结和真空压力熔渗技术制备了石墨纤维/铜和石墨纤维/铝复合材料。并从增强体表面金属化改性的角度出发,对石墨纤维进行金属化处理,以改善体系的润湿和结合状况。对成形复合的工艺参数进行了优化,对复合材料的显微组织及热性能进行了检测和分析。以期为该体系复合材料的进一步研发提供理论与实践依据。

由于作者才疏学浅,水平有限,书中难免有很多不足之处,敬请读者不吝赐教。谢谢!

张昊明

河南工程学院机械工程学院



目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 电子封装材料概述 / 1	
1.1.1 电子封装材料的定义及要求 / 1	
1.1.2 常用电子封装材料 / 2	
1.1.3 先进金属基电子封装材料 / 4	
1.2 碳纤维及其与金属的复合技术 / 5	
1.2.1 导热型沥青基碳纤维简介 / 5	
1.2.2 碳纤维材料的导热理论 / 6	
1.2.3 碳纤维与金属基体润湿性的改善 / 9	
1.2.4 碳纤维/金属复合材料的制备工艺 / 12	
1.3 电子封装用碳纤维/金属复合材料的研究现状 / 13	
1.4 研究背景和意义 / 15	
第 2 章 实验部分	16
2.1 技术路线 / 16	
2.2 实验及研究内容 / 17	
2.3 主要原料 / 18	
2.4 分析及测试方法 / 19	
2.4.1 密度及相对密度测量 / 19	

- 2.4.2 显微组织与物相分析 / 20
- 2.4.3 热导率测试 / 20
- 2.4.4 热膨胀系数测定 / 21

第3章 石墨纤维的表面金属化 22

- 3.1 化学镀铜 / 22
 - 3.1.1 石墨纤维表面预处理 / 23
 - 3.1.2 化学镀铜工艺参数的优化 / 26
- 3.2 真空微蒸发镀钛和铬 / 31
 - 3.2.1 镀覆原理、过程及基本工艺参数 / 32
 - 3.2.2 蒸镀温度与时间对镀层质量的影响 / 35
 - 3.2.3 镀层的形貌、成分与结构 / 39
- 3.3 粉末覆盖烧结镀钼 / 44
 - 3.3.1 镀覆原料及过程 / 45
 - 3.3.2 镀覆工艺参数的选择与控制 / 45
 - 3.3.3 镀层的检测分析 / 52
- 3.4 本章小结 / 54

第4章 石墨纤维/铜复合材料的制备 55

- 4.1 实验方案、条件及过程 / 55
- 4.2 制备工艺对复合材料致密化的影响 / 57
 - 4.2.1 烧结温度的影响 / 57
 - 4.2.2 加压方式及压力大小的影响 / 59
 - 4.2.3 金属铜粉粒度及搭配的影响 / 62
- 4.3 石墨纤维含量及表面镀层对复合材料致密化的影响 / 64
 - 4.3.1 石墨纤维含量的影响 / 64
 - 4.3.2 镀层的影响 / 66
- 4.4 石墨纤维/铜复合材料的形貌及纤维排布特点 / 68
- 4.5 本章小结 / 71

第 5 章 石墨纤维/铜复合材料的显微结构与热性能分析	72
5.1 石墨纤维/铜复合材料的界面特性 / 72	
5.1.1 无镀层石墨纤维/铜复合材料的界面 / 73	
5.1.2 镀铜石墨纤维/铜复合材料的界面 / 75	
5.1.3 镀覆碳化物形成元素石墨纤维/铜复合材料的界面 / 76	
5.2 石墨纤维/铜复合材料的断口形貌 / 82	
5.3 石墨纤维/铜复合材料的热性能分析 / 85	
5.3.1 复合材料的热导率 / 85	
5.3.2 复合材料的热膨胀系数 / 92	
5.4 本章小结 / 94	
第 6 章 石墨纤维/铝复合材料的制备及组织性能	95
6.1 实验原料、设备及过程 / 95	
6.1.1 石墨纤维预制体的设计与制备 / 95	
6.1.2 预制体的热脱脂 / 98	
6.1.3 预制体的压力熔渗 / 100	
6.2 熔渗工艺对石墨纤维/铝复合材料致密化的影响 / 102	
6.2.1 熔渗温度的影响 / 102	
6.2.2 熔渗压力的影响 / 104	
6.2.3 保温时间的影响 / 105	
6.3 石墨纤维/铝复合材料的组织及性能 / 106	
6.3.1 复合材料的显微组织与界面特性 / 106	
6.3.2 复合材料的热物理性能 / 111	
6.4 本章小结 / 113	
第 7 章 结 论	114
主要参考文献	117

第 1 章 绪 论

1.1 电子封装材料概述

1.1.1 电子封装材料的定义及要求

科技的发展使得电子设备、系统的更新换代日益加速。然而,任何电子器件及电路在工作中都不可避免地会产生大量的热,要提高整体电子产品的性能及可靠性,就必须使产生的热量降低至最小。运用热力学原理提高整个系统或装置的能量利用率、减少废热排散、提高系统的稳定性和可靠性的相关技术,通过分析和模拟来管理这些热量通常称为热管理。从热管理的角度,设计、调整成分增大系统热量输出的材料称为热管理材料,如电子封装材料、热沉材料、反应堆材料等。由于电子封装材料的开发与设计引导着热管理材料的发展,所以电子封装材料成为热管理材料的最主要的组成部分^[1-6]。

电子封装是连接半导体芯片和电子系统的一道桥梁,随着半导体产业的飞速发展及其向各行业的迅速渗透,电子封装已经逐步成为实现半导体芯片功能的一个瓶颈。通过封装不仅对芯片具有机械支撑和环境保护作用,使其避免大气中的水汽、杂质及各种化学气氛的污染和侵蚀,从而使集成电路芯片能稳定地发挥正常电气功能,而且封装对器件和电路的热性能乃至可靠性起着举足轻重的作用。例如,空中飞行器、无绳电话、笔记本电脑以及其他微型系统中,如果温度分布不均匀将会导致电子元器件的噪音大大增加;而

且系统对重量的限制也越来越严。还有在航空航天方面,飞机起飞、导弹发射等要求电子器件系列必须承受机械振动和激烈的温度变化。所以,一般电子封装对材料的要求有^[7-14]:

(1) 良好的散热性:电子元器件工作时,本身消耗电能,转化成热能,热量集聚,使得电子元器件温度升高,热量必须传输出去。这就要求封装能便于散失热量;热导率(TC)是衡量材料导热能力的物理量,材料的热导率越高,其导热性能越好。

(2) 匹配的热膨胀系数:当应用于电子封装领域时,热膨胀系数(CTE)最好和电子元器件材料或陶瓷绝缘基板材料保持一致,否则,随工作温度的升高,将不可避免地在相邻部件间及焊接点处产生热应力,结合处将发生蠕变、疲劳甚至断裂。

(3) 密封保护性好:电子元器件常工作在高温、高湿、腐蚀、污染、辐射、光及干扰的电信号环境下,密封保护可以抵御这些有害环境对电子元器件的影响,同时,还可以防止局部高电压,射频信号和发热而伤害附近的电子元器件。

(4) 有一定的机械支撑能力:电子元器件在组装、运输及使用过程中,经常受到一定的压力、振动、冲击、摩擦等。高导热材料用作封装外壳时,对内部的电子元器件有支撑作用,为克服各种外力损害提供了强有力的保证。

(5) 重量轻:在航空航天等对于重量有特殊要求的应用领域,要求此类材料的密度尽可能地降低,以减少其占用的重量份额。

(6) 良好的加工性或近净成形工艺:要具有良好的可加工性,便于后续加工成形处理;或能够采用近净成形制备工艺直接成形,以满足其在复杂环境中的使用要求。

1.1.2 常用电子封装材料

电子封装材料的种类很多,主要包括:陶瓷、金属、复合材料、玻璃基片及金刚石等,表1-1是常用电子封装材料的性能^[8-14]。

表 1-1 常用电子封装材料的性能指标^[8-14]

Materials	Density (g/cm^3)	CTE ($10^{-6}/\text{K}$)	Thermal conductivity [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
Al_2O_3	3.7	7.3	21
AlN	3.26	3.5	79~260
BeO	2.9	7.1	250
Al	8.9	23	230
Cu	2.7	17	400
Mo	10.2	5.0	140
W	19.3	4.5	174
Invar (Ni42Fe58)	8.1	1.9	13
Kovar (Ni28Co18Fe53)	8.3	5.9	16
Mo-Cu (Mo80Cu20)	11.5	7.0	170
W-Cu (W85Cu15)	17.0	6.5	210

Al_2O_3 陶瓷^[12]的热膨胀系数与 Si ($4.1 \times 10^{-6}/\text{K}$) 材料的相差不大, 价格低廉, 耐热冲击性、电绝缘性都比较好, 制作和加工技术成熟, 但是 Al_2O_3 陶瓷热导率只有 $20\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 左右, 限制了它在大功率集成电路中的应用。AlN 陶瓷^[12]具有优异的电性能和热性能, 是最有发展前途的高导热陶瓷基片, 但其制备工艺复杂, 成本高, 至今仍未能大规模地生产和应用。BeO 陶瓷^[12]具有较高的热导率, 但是其毒性和较高的生产成本限制了其在生产和应用中的推广。金属材料中, Cu 和 Al 的热导率较高, 但是其的热膨胀系数比衬底材料的高得多, 器件工作时的热循环常会产生较大的应力, 导致材料失效。Invar^[11] (镍铁合金) 和 Kovar^[11] (铁镍钴合金) 合金具有非常低的热膨胀系数和良好的焊接性, 但是电阻很大, 热导率很低, 只能作为小功率整流器的散热和连接材料。W/Cu、Mo/Cu 合金^[14]的导热性比 Kovar 合金高得多, 但焊接性差, 密度高, 其中钨铜合金的密度过高, 所以在要求轻量化的领域 (如航空航天) 的使用受到限制。由此看来, 单一的金属或陶瓷很难满足或兼顾高性能电子器件对封装材料的综合性能要求。

1.1.3 先进金属基电子封装材料

由于传统的电子封装材料及单一材料已不能满足日益发展的现代封装技术对材料的要求,材料的复合化已成为必然趋势^[15]。为了解决上述传统封装材料的种种缺点,20世纪90年代以来,研究人员把目光投向金属基复合材料,因为金属基复合材料有以下优点^[15,16]:

(1) 可以通过改变基体合金的成分、增强体种类、体积分数、排列方式,或者改变热处理工艺等方式来实现复合材料热物理性能设计。可以完全做到同芯片材料 CTE 相匹配,同时保持金属基体的高热导率。

(2) 原材料来源广泛,制备工艺较为简单,生产成本较低。

(3) 材料强度、弹性模量较高,具有较好的力学性能。

(4) 可以近终成形,避免后期加工,简化生产流程,进一步降低生产成本。

金属基复合材料比传统的封装材料具有明显的优势,如高的导热率(可达 Cu 热导率的 3 倍以上)、低的可调的热膨胀系数、重量减轻到原来的 5%、体积是原来的 65%、高的强度及硬度、稳定性提高并减少热应力、生产成本不断下降等^[17-36]。表 1-2 为电子封装用先进金属基复合材料的性能^[15,29-36]。

其中 SiC/Al 复合材料^[17-20]最大特点是具有一定的强度和刚度、低热膨胀和较高的热导率,在用于电子封装时,能够与芯片良好配合,受热不易产生热应力。20 世纪 90 年代初以来, SiC/Al 复合材料得到了迅速的发展。但是 SiC/Al 存在表面难于处理,焊接性能较差的问题。且其各项性能,尤其是导热性能 [$<250\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]表现已难以取得突破。随着现代热管理对封装材料导热性要求的进一步提高,以更高热导率金刚石^[21]为增强体的金属基复合材料体系成了关注和研发的焦点。近些年来在对其制备方法、性能、界面、导热理论的研究方面都取得了显著成果^[22-27]。然而,在高导金刚石/金属取得长足发展的同时,其可加工性能差的问题仍未得到很好解决,限制了其实际的应用^[28]。近期,具有高导热、低热膨胀系数且加工性良好的新型石墨系材料,如石墨泡沫(graphite foam)、天然鳞片石墨(graphite flake)、高导石墨纤维(graphite fiber)等,已开始被尝试用于和金属如 Cu、Al 的复合,成为电子封装用金属基复合材料研发的新动向^[29-36]。其中,非连续石墨/铝(铜)

复合材料依赖高热导率、低热膨胀系数、易加工、低成本的综合性能优势,预期在航空、航天、通信产品中以及无线通信系统、IGBT 底座(例如应用到混合动力车市场)等市场有广阔的应用前景^[30,34-36]。

表 1-2 先进金属基电子封装材料的性能^[15,29-36]

Reinforcements	Matrix	Density (g/cm ³)	CTE (10 ⁻⁶ /K)	Thermal conductivity [W/(m·K)]
SiC	Al	3.7	6.5~9.4	170~230
Diamond	Al	3.1	7.1~9.2	460~760
Diamond	Cu	5.6	4.3~7.2	400~900
Diamond	Ag	6.0	7.5~8.4	600~970
Gr Flake	Al	2.3~2.7	6~7	400~420
Gr Foam	Cu	5.7	7~8	~350
Cont. GrF	Al	2.3~2.6	3.2~11	200~300
Cont. GrF	Cu	4.2~6.8	0~11	330~500
Disc. GrF	Al	2.4~2.7	4~7	218~250
Disc. GrF	Cu	4.5~6.6	2~10	300~400

Gr Flake-石墨鳞片; Gr Foam-石墨泡沫; Cont. GrF-连续石墨纤维; Disc. GrF-非连续石墨纤维

1.2 碳纤维及其与金属的复合技术

1.2.1 导热型沥青基碳纤维简介

根据纤维的制造原料,碳纤维一般被分为三类^[37]:①聚丙烯腈(PAN)基碳纤维;②粘胶基碳纤维;③沥青基碳纤维。而通常称含碳量超过99%的碳纤维为石墨纤维^[37,38]。

1964年,日本群馬大学的大谷杉郎发明了用沥青制造碳纤维的技术路线。

1970年,日本吴羽化学工业公司开始批量(10t/min)生产通用级沥青基碳纤维;1975年,美国联合碳化物公司(UCC)公布了用中间相沥青制造高模量碳纤维“Thornel P”方法,并很快就投入商业生产。从此,沥青基碳纤维进入发展的快车道,成为继PAN基碳纤维之后的第二大原料路线生产碳纤维。目前,研究沥青基碳纤维的单位较多,但能批量生产高性能碳纤维的单位只有美国的B. P. Amoco公司和日本的三菱化学、日本的石墨纤维公司^[37-39]。

沥青基碳纤维发展动向之一是研制开发高导热性能的中间相沥青基碳纤维^[39,40]。经调制和精密过滤的煤或石油沥青,中间相质量分数90%~100%,软化点在345℃以上,熔融纺丝温度超过395℃,连续纺出沥青纤维;沥青纤维的不溶化处理是用质量分数25%硝酸水溶液和含水质量分数35g/L的炭黑混合液,再经碳化和石墨化处理,可以得到高密度、超高模量和超高热率的中间相沥青基碳纤维^[40]。

就热导率而言,PAN基碳纤维的热导率是无法与其争雄的。前者热导率一般在40W/(m·K)左右^[41],后者可高达1100W/(m·K)^[42,43],就热导率高的铜也无法与之比拟。中间相沥青基石墨纤维不仅热导率高,而且密度小、质量轻,是传热、散热的极好材料。

1.2.2 碳纤维材料的导热理论

当物体内部或相互接触物体之间存在温差时,热量就会由高温部向低温部传递。因此,两种不同温度的材料相互接触时,热量由高温物体向低温物体传递,直到两者温度一样为止。这种热量传递过程叫作热传导过程,或叫作传热过程^[44]。金属材料的热量传递要靠材料的晶格热振动波和自由电子流动,而自由电子的传热比晶格振动波大得多。所以,金属材料的传热主要靠自由电子。非金属材料的传热主要靠晶格振动的格波,因而它不遵循德曼-夫兰兹(Weideman-Franz)定律,碳纤维等碳材料就属于这一类型的非金属材料。图1-1是晶格热振动的示意图。

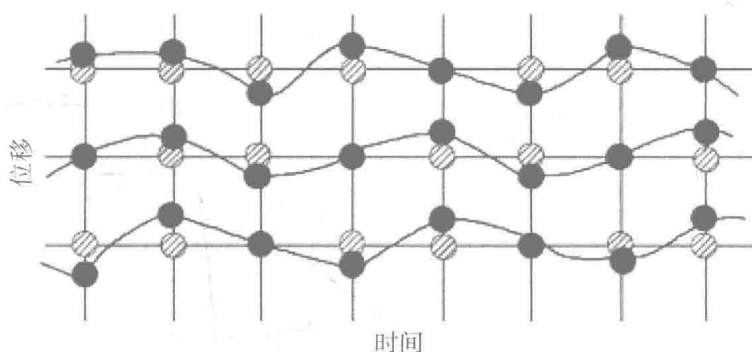


图 1-1 晶格的热振动

晶格中的原子在一定温度下的振动有一个相对应的振幅（位移），处于高温位置的原子振幅较大，处于温度低的原子振幅较小，由高到低地逐步传递热量，直到彼此温度达到平衡^[44]。

格波的能量是量子化的。格波量子叫作声子，热导率与声子的平均自由行程密切相关，可用 Debey 公式^[44]表示，即：

$$k = \frac{1}{3} C_v \lambda \bar{v} L \quad (1-1)$$

式中： λ —热导率；

C_v —单位体积的声子热容；

$\bar{v}$ —声子的平均速度；

L —声子的平均自由行程。

声子的平均自由行程 L 与石墨网平面大小 L_a 有关， L_a 愈大， L 也大，热导率 λ 也高。石墨层面发达的石墨纤维，杨氏模量高，热导率也高。图 1-2 是碳纤维的热导率 λ 与石墨微晶大小 L_a 的关系。显然，中间相沥青基碳纤维 P55（美国 B. P. Amoco）、E120 和 C700（美国 DU Pont）的 L_a 、 λ 要大于 PAN 基碳纤维 T300、T800 和 M40J。

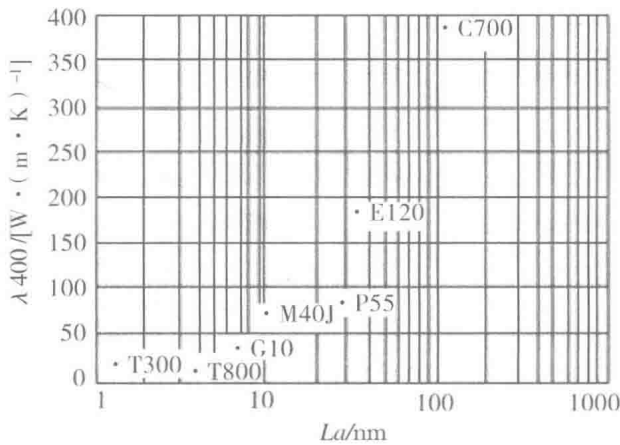


图 1-2 由 La 计算在 400K 时的 λ_{400}

碳纤维等碳材料的 λ 与其 ρ 密切相关, 可用公式表示:

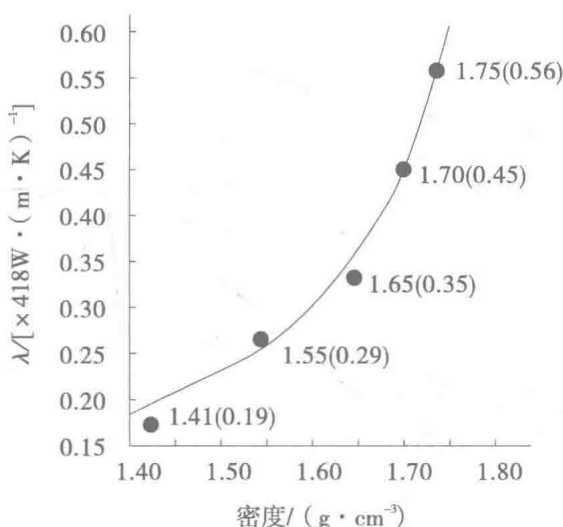
$$\lambda = (1272.4/\rho) - 49.4 [W/(m \cdot K)] \quad (1-2)$$

式中, ρ 为电阻率, 单位 $\mu\Omega \cdot m$ 。表 1-3 列出了 Thornel-P 型沥青基石墨纤维的 ρ 及用上述公式计算出的 λ 。由表 1-3 列出的数据可以看出随着 ρ 的降低, λ 在增加; λ 的计算值与实测值的规律基本一致, 具体数值相近, 说明用上述公式计算出的 λ 基本可信, 且测量 ρ 比测量 λ 要简单得多。

表 1-3 沥青基碳纤维的电阻率及其热导率

型号	电阻率 ($\mu\Omega \cdot m$)	热导率 [$W/(m \cdot K)$]		密度 (g/cm^3)
		计算值	实测值	
P55X	7.8	113.7	120	2.01
P75S	7.1	129.8	185	2.03
P100	2.4	480.8	520	2.13
P120	2.0	586.8	640	2.13

碳材料的 λ 与密度密切相关。密度愈高, λ 愈大, 如图 1-3 所示。由石墨的晶格参数计算出理论密度是 $2.266g/cm^3$, 实际碳材料的密度都低于此值, 说明存在孔隙、孔洞。密度愈低, 孔隙率愈高, 对声子的散射作用愈大, 即热阻愈大, 因而 λ 愈低。

图 1-3 石墨材料的密度与 λ 的关系

碳纤维热导率 λ 的测定可用激光快速法测定其单向复合材料 (CFRP) 的热性能, 并用公式 (1-3) 计算^[39]:

$$\lambda = C_p \times \alpha \times \rho / V_f \quad (1-3)$$

式中: λ —碳纤维的热导率;

α —碳纤维的热扩散率;

C_p —单向 CFRP 复合材料的比热容;

ρ —单向 CFRP 复合材料的密度;

V_f —单向 CFRP 中含纤维的体积分数。

此外, 也可采用 Halpin-Tsai 方程及其试验方法来计算或估算碳纤维的热导率^[39]。

1.2.3 碳纤维与金属基体润湿性的改善

碳材料与铜、铝之间的润湿性一般较差, 因此, 对材料复合过程润湿性的改善问题一直是本领域专家关注的焦点^[45,46]。对于碳纤维/铜复合材料, 即使在超过铜熔点的高温下, 碳纤维与铜既不润湿也不反应。这就使制备的碳纤维增强铜基复合材料的界面只能是机械互锁, 结合强度低。当承受载荷时, 往往造成碳纤维的拔出、剥离或脱落, 从而影响其综合性能的发挥^[45]; 而对