

短纤维增强塑料手册

[美] Roger F. Jones 主编

短纤维

增强

塑料

手册

27-62
13



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

短纤维增强塑料手册

[美] Roger F Jones 主编

Mitchell R Jones, Donald V Rosato 合编

詹茂盛 徐一琨 张继华 译

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

短纤维增强塑料手册 / (美) 琼斯 (Roger F. Jones) 主编; 詹茂盛等译. —北京: 化学工业出版社, 2002.8
ISBN 7-5025-3975-1

I. 短… II. ①约… ②詹… III. 短纤维-增强塑料-手册 IV. TQ327.9-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 053154 号

Guide to Short Fiber Reinforced Plastics/by Roger F. Jones

ISBN 1-56990-244-5

ISBN 3-446-18479-1

Copyright © Carl Hanser Verlag, Munich 1998. All rights reserved.

本书中文简体翻译版由 Carl Hanser Verlag 授权由化学工业出版社独家出版发行。

未经出版者许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2001-5264

短纤维增强塑料手册

[美] Roger F. Jones 主编

Mitchell R. Jones, Donald V. Rosato 合编

詹茂盛 徐一琨 张继华 译

责任编辑: 龚浏澄 邢 涛

责任校对: 李 丽 崔世芳

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(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 5 字数 129 千字

2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3975-1/TQ·1570

定 价: 18.00 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

译者序

本专著是 Roger F. Jones 先生主编的一本关于短纤维增强塑料材料的选材、使用以及自动化生产的基本知识的著作，作者从实践角度对短纤维增强塑料的实验数据进行了整理分析，可供纤维增强塑料领域的工程师和专业人员参考。

短纤维增强塑料材料的发展为批量生产精密部件提供了一条更为经济的途径，目前已达到令人瞩目的商业化水平，新产品层出不穷。本书主编 Jones 先生在塑料，尤其是短纤维增强热塑性复合材料方面，是公认的权威；其他编者在塑料及复合材料方面也有着极为丰富的实践经验。本书系统性强，涉及内容广泛而全面，从实践角度出发对短纤维增强塑料所使用的原材料及其选择、设计要点、快速模型、典型的成型工艺等分别进行了详细的介绍，是产品设计工程师的得力助手。

国内关于短纤维增强塑料的研究及资料、书籍不多，并缺乏系统性，因此我们翻译了这本书，希望能把国外的先进技术介绍给国内同行，并推动我国短纤维增强塑料技术的发展。

本书共分 8 章，张继华译第 1、2、3、4 章，张继华、徐一琨译第 5 章，徐一琨译第 6、7、8 章、序言及部分整理工作，詹茂盛主持翻译、校阅、技术审查和统编，肖威协助校阅了部分内容。

由于该专著涉及树脂、纤维、复合材料、成型加工、成本控制、机械设备等新技术，内容广泛，对译者的综合水平要求相当高，限于译者水平，对译文中的不妥之处，敬请读者批评指正。

最后，感谢化学工业出版社能及时出版这本译著。

詹茂盛

2002 年 4 月于北京

序

塑料工程学会 (SPE) 很高兴为 Roger F. Jones 编著的“短纤维增强塑料手册”一书提供赞助与支持。本书的结构安排相当合理。作者写作风格通俗易懂, 给纤维增强塑料领域的工程师和专业人员提供了一本很好的参考书。

SPE 技术书籍委员会长期负责出版塑料方面的书籍, 包括相关书目的鉴定、招募作者、进行新书的同行审议以及批准等等。

不仅是书籍的出版, 也包括其他活动, 如主办技术会议和教育课程, SPE 都有一定的技术实力; 同时, 学会还出版期刊, 如“塑料工程”、“聚合物工程与科学”、“注塑成型技术”、“乙烯基树脂及添加剂技术”及“聚合物基复合材料”等, 还有会议论文集及其他出版物。所有这些都要经过严格的技术评审程序。

大约 36 000 位工作在生产第一线的工程师、科学家以及技术人员使 SPE 成为本行业在世界范围内的佼佼者。欲知详情请与本学会联系, 地址在美国康涅狄格州费尔菲尔德地区, 布鲁克菲尔德大道 14 号, 邮编为 06804 (14 Fairfield Drive, Brookfield, Connecticut 06804, USA)。

Michael R. Cappelletti

执行董事

塑料工程学会

技术书籍委员会

Robert C. Portnoy, 主席

Exxon 化学公司

Hoa Pham, 评论家

B. F. Goodrich 公司

前 言

本书以简明的语言介绍了短纤维增强塑料的选材、用途以及自动化生产等基本知识,可供产品设计工程师参考。短纤维增强塑料是材料领域中越来越重要的一个分支,关于它的理论著作已有很多,但是从实践角度进行讨论的专著并不多见。笔者试图提供一些短纤维增强塑料方面的主要特性实验数据,以便设计工程师能够更好地了解它们在实际使用中的优势与不足,因此本书不是一本关于如何配制或制备这些复合材料的专题论文。本书虽然没有包揽所有塑料,但是热塑性树脂基体的塑料和热固性树脂基体的塑料,即商业通用塑料都涉及了。自始至终,笔者都尽量使所讨论的问题更接近于实际。

一般的设计工程师对塑料的了解可能只限于一些基本常识,而缺乏系统资料。当然这并非意味本书内容有多么高深或者说完美无缺。读者如果对理论或者更详细的内容感兴趣,请参考本书中参考文献。

在此,我要感谢帮助本书出版的各位人士。Ted Pilat、Mitch Jones、Nick Rosato 以及 Don Rosato 为本书撰稿,Ashak Rawji 提出最初的设想,Ed Immergut 和 Wolfgang Glenz 对本书的完成提供了支持和动力,Michael Sepe、Robert Gallucci 和 Seymour Newman 对本书进行了评述,Gabriele Eckler、Andrea Stoye、Elizabeth Hewitt、Elizabeth Gauger、Diana Actman 和 Sonia Kennedy 帮助进行文字处理和校对,BASF、拜尔、杜邦、Fiberite、通用电气、RTP、Instron、LNP 工程塑料协会、PPG、Vishay 测试集团以及其他公司的工作人员提供了数据和图表。还有许多朋友和同仁给予了极大的鼓励,恕不能在此一一列出。最后,在为本书调研资料的过程中,长时间不能陪伴我的妻子与家人,感谢他们对我的宽容。

Roger F. Jones

内 容 提 要

本专著是〔美〕Roger F. Jones 先生主编的一本短纤维增强塑料材料的选材、使用以及自动化生产的基本知识的著作。本书系统性强，涉及内容广泛而全面，从实践角度出发对短纤维增强塑料所使用的原材料及其选择、设计要点、快速模型、典型的成型工艺等分别进行了详细的介绍，是产品工程师的得力助手。

作者从实践角度对短纤维增强塑料的实验数据进行了整理分析，可供纤维增强塑料领域的工程师和专业人员参考。

目 录

1 引言	1
2 原材料	4
2.1 增强成分	4
2.1.1 玻璃纤维	4
2.1.2 碳纤维	6
2.1.3 有机聚合物纤维	7
2.1.4 无机纤维	7
2.1.5 天然纤维	8
2.1.6 金属纤维	8
2.1.7 陶瓷纤维	8
2.1.8 非纤维填料和添加剂	9
2.1.8.1 玻璃微珠	9
2.1.8.2 矿物质	10
2.1.8.3 弹性体	10
2.1.8.4 阻燃剂	10
2.1.8.5 润滑剂	11
2.1.8.6 偶联剂	11
2.1.8.7 发泡剂	12
2.2 塑料基体	12
2.2.1 热塑性树脂	12
2.2.1.1 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯	17
2.2.1.2 缩醛树脂	17
2.2.1.3 氟聚合物	17
2.2.1.4 液晶聚合物	18
2.2.1.5 尼龙	19
2.2.1.6 聚碳酸酯	19
2.2.1.7 聚醚酮类	20

2.2.1.8	聚乙烯	20
2.2.1.9	热塑性聚酰亚胺	20
2.2.1.10	聚苯醚	20
2.2.1.11	聚苯硫醚	21
2.2.1.12	聚丙烯	21
2.2.1.13	聚苯乙烯	21
2.2.1.14	聚砜和聚醚砜	21
2.2.1.15	聚氯乙烯	21
2.2.1.16	苯乙烯-丙烯腈	22
2.2.1.17	苯乙烯马来酸酐	22
2.2.1.18	热塑性聚酯	22
2.2.1.19	热塑性聚氨酯	22
2.2.2	热固性树脂	23
2.2.2.1	氨基树脂	24
2.2.2.2	醇酸树脂和聚酯	24
2.2.2.3	烯丙基树脂	24
2.2.2.4	环氧树脂	25
2.2.2.5	酚醛树脂	25
2.2.2.6	聚酰亚胺	25
2.2.2.7	硅树脂	25
	参考文献	25
3	原材料的选择	27
3.1	热塑性树脂	27
3.2	热固性树脂	32
3.3	计算机辅助选材	35
4	设计方案	37
4.1	基本思想	37
4.2	计算机辅助设计	39
4.3	尺寸稳定性	40
4.4	应力、应变和时间	42
4.5	温度	46
4.6	韧性	49
4.7	环境	51

4.7.1	化学腐蚀性	51
4.7.2	介电性和易燃性	52
4.7.3	磨损性	55
4.7.4	耐辐射性	57
4.8	加工制造	58
4.9	经济问题	59
4.10	生态问题	60
	参考文献	62
5	模型化与测试 (Mitchell R. Jones 编写)	64
5.1	模型化的必要性	64
5.2	模型技术	65
5.3	模型测试及评估	66
5.3.1	无损检测 (NDE)	68
5.3.2	显微照相	69
5.3.3	实验应力分析	70
5.4	应用实例	75
5.4.1	手电钻外壳	75
5.4.2	电子仪器外壳	76
6	技术规范及测试 (Mitchell R. Jones 编写)	78
6.1	技术规范的制定	78
6.2	全面质量管理 (TQM)	82
6.2.1	文化	83
6.2.2	统计控制	83
6.2.3	减小差异	85
	主要参考文献	86
7	注塑 (Donald V. Rosato 编写)	89
7.1	引言	89
7.2	基本工艺描述	89
7.3	机械操作	92
7.4	模具类型	98
7.5	螺杆注塑系统	100
7.6	机械加工控制	104
7.7	加工变量与模型制品性能	107

7.8 制品中的取向结构	108
7.9 制品熔接痕	108
7.10 影响制品的其他因素	109
7.11 制品公差	109
7.12 塑料材料的干燥	110
7.13 完整的注塑操作	115
参考文献	117
8 其他加工工艺	119
8.1 压缩和传递模塑	119
8.2 反应注射模塑 (RIM)	121
8.3 聚四氟乙烯的成型工艺	123
8.4 挤出成型和吹塑成型	124
8.5 二次成型	126
参考文献	128
附录 A: 参考书目	129
附录 B: 短纤维增强塑料的供应商	134
附录 C: 短纤维增强塑料的应用	141

1 引 言

随着短纤维增强复合材料的发展,提高了用塑料材料进行精密工程部件批量生产的可能性。虽然这种材料不是新品种,早在20世纪30年代就出现了以热固性塑料为基体的短纤维增强材料(在此之前的20多年里已经有了长纤维增强热固性塑料),短纤维增强热塑性复合材料最早出现于1951年,但是直到20世纪60年代中期螺杆注塑机被广泛使用后,短纤维复合材料才得以批量生产。从那以后,短纤维增强塑料的用量增长迅速,现在已经达到了令人瞩目的商业化水平。在美国,1997年预计产量超过530 000t,其价值超过15亿美元。工业研究表明,在今后的10多年中,这些产品将会以平均每年5%~7%的增长率递增;在此期间,热塑性塑料基体材料的增长速度将是热固性塑料基体材料的3倍。

尽管这些材料完全实用化还需要一段时间,但是新产品仍然不断在市场上出现。因此,短纤维增强塑料依然处于新材料技术的前沿。

然而,究竟什么是短纤维增强塑料呢?在本书的定义中,这种材料首先是指在热固性或热塑性基体中均匀分散着长度不超过10~15mm或0.5in^①纤维的复合材料,也包括与短纤维复合添加的粒状填料如矿物质、玻璃微珠等。之所以选择10~15mm作为分界点以区别短纤维和长纤维增强成分,是因为成型复合材料时通常以此分界点来决定是通过自动化批量生产如注塑或挤出成型进行加工,还是通过非自动化或半自动化工艺如手糊、喷射、转动模塑、压缩模塑和转移模塑等进行加工。短纤维增强材料是具有重要商业

① 1英寸(in)=25.4mm。

价值的材料，也是极具开发意义的品种。因此，基于这一观点，本书对该种材料的另一个定义是：可以通过自动化设备制造加工的材料。

虽然有些供应商提供了所谓“长纤维”或“长玻璃纤维”增强热塑性塑料，但是由于这些产品仍没有超出以上定义的范围，所以可以把它们看作特殊的短纤维增强塑料。正如长纤维增强复合材料供应商定义的那样，长纤维增强材料用的纤维平均长度为10~15mm，而“短纤维”增强材料所用纤维平均尺寸较小，大约为7mm。纤维的初始长度固然很重要，成型制品中的纤维长度同样至关重要。因为如果增强纤维的长度小于临界尺寸，基体树脂的性能只能得到较小的提高。因此，成型时认真操作、避免纤维长度的过度磨损是很关键的。不过无论如何，只要适当加工，长纤维增强材料的性能比短纤维增强材料提高的更显著，尤其是抗裂纹扩展和抗长期蠕变性能。

使用增强塑料的目的是为了提高尺寸稳定性、强度、韧性、耐热性和耐环境性能、回收利用性能以及这些性能的可预测性。由于增强塑料提高了性能，所以可将这些增强塑料归类为“工程塑料”。在很多应用中，成本较高的增强塑料由于以上特点以及高比强度、易加工及可进行一体化制品设计等优点，在使用中比成本较低的传统材料如金属、木材或玻璃显得更经济合算。对所有塑料而言，性能的提高，尤其是耐久性的提高，是明显优于传统材料的重要特点。

1997年，产量较大的复合材料主要应用市场情况（略大于总产量的70%）如表1-1和图1-1所示^①。在过去的20年中，酚醛树脂和一些增强热固性模塑料的市场已经增长了约25%，而尼龙等一些增强型热塑性塑料的市场占有量增长了300%之多。目前，增强热塑性塑料的使用量大约已经是增强热固性塑料的两倍了。短纤维增强复合材料大都应用于电器/电子设备和汽车工业中。

① 原文中的图1-1标题是1995年——译者注。

表 1-1 1997 年用于制备短纤维增强塑料

所需的主要基体聚合物市场情况

单位: 10^6kg

分 类	尼 龙	PBT/ PET ^①	酚醛树脂	尿素和 环氧树脂	总 计	所占比例 /%
交通运输	93	37	7	2	139	34
电器/电子设备	15	36	39	20	110	27
工业用途	25	21	5	5	56	14
消耗装置	28	6	15	3	52	13
仪表器械	10	6	12	3	31	7
其他	12	4	4	3	23	5
总计	183	110	82	36	411	100

① 热塑性聚酯: PBT = 聚对苯二甲酸丁二醇酯, PET = 聚对苯二甲酸乙二醇酯。

(富兰克林聚合物股份有限公司友情提供)

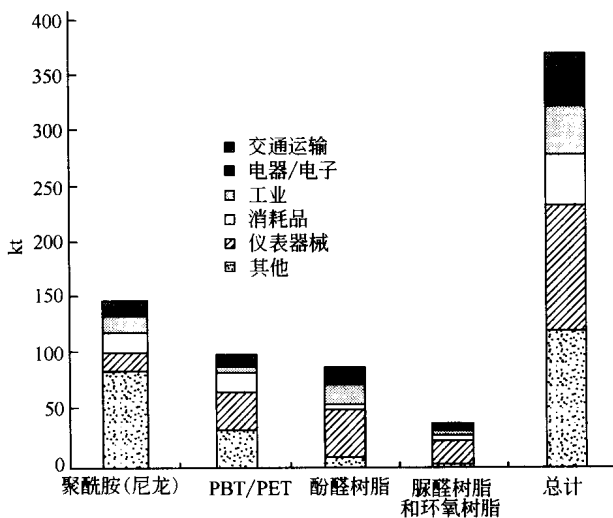


图 1-1 1995 年主要聚合物的市场使用情况

2 原 材 料

如第1章所述，短纤维增强塑料是在塑料基体内添加了增强纤维的一类复合材料。本章将介绍主要原料的特点，以便使读者更好地理解每种原料与复合材料制品性能间的关系。

首先介绍主要增强成分和添加剂的类型，然后再介绍热塑性和热固性树脂基体材料。

2.1 增强成分

增强成分主要用来提高复合材料的强度和硬度。用作增强目的的纤维主要是玻璃纤维和碳（石墨）纤维，聚合物纤维和金属纤维是用于特定目的的场合。虽然无机纤维过去也曾大量进行过商业化使用，但因其影响健康，而且性能低劣，所以现在已经很少使用这类纤维了。已经证明天然纤维的性能能满足不苛刻要求时的任何场合。本章还将介绍与纤维协同提高复合材料性能的某些填料。

2.1.1 玻璃纤维

玻璃纤维是塑料中使用最广泛的增强成分。玻璃纤维之所以优于其他增强成分，主要是因为其具有较高的性能价格比，包括尺寸稳定性、耐腐蚀性、耐热性和易加工等。

从含有熔融玻璃的熔炉中抽出玻璃细丝，制成束状，再进行表面处理，最后剪切成一定长度，便制得玻璃纤维增强成分。表面处理包括添加润滑剂、上浆剂和偶联剂，它对减少加工中玻璃纤维的断裂是很必要的，同时还可以提高玻璃纤维对不同树脂体系的相容性。

大多数短玻璃纤维增强成分是由E-玻璃制成的。E-玻璃最初是从电气应用中发展来的，通常由钙-铝-氟化硅盐配制而成；良好的性能和低廉的成本使其广泛应用于各个领域。E-玻璃除了具有优良的介电性能和力学性能外，还有良好的耐热性、防水性及较好的

抗碱性，但抗酸性较弱。在配方中稍加改性便可制得具有良好抗酸、抗碱和防水性能的 E-CR 玻璃，其主要性能如表 2-1 所示。S-玻璃和 R-玻璃是高强度增强成分（比 E-玻璃高 30%），通常呈长纤维形式存在，不需要短切，也不需要使用很宽范围的热塑性偶联剂。S-玻璃和 R-玻璃明显比 E-玻璃贵得多，在价格上相差约 7 倍。其他可使用玻璃的主要类型是 A-玻璃，这是一种苏打-石灰-硅的混合物，通常用来制造窗玻璃和玻璃瓶。

尽管短切纤维的尺寸在 3.2mm 到 25mm 之间，但在一些应用中仍需要使用更短的研磨纤维。研磨纤维，顾名思义，是研磨过的短切纤维，只不过它的长度比通常的短切纤维更短一些而已，其长度通常在 0.8~1.6mm 之间。研磨纤维用于对硬度、尺寸稳定性、成型时的高流动性，以及对各方向具有相同收缩率的要求比对拉伸强度或韧性的要求更重要的场合。

尽管玻璃纤维能被制成各种直径，但用在短纤维增强塑料中的玻璃纤维的直径通常为 $13\mu\text{m}$ ，以字母 K 标记。

从理论上讲，增强纤维的最小临界长度大约是直径的 50~100 倍。然而，一些研究已经表明，当纤维长径比 (L/D) 为 10:1 时，复合材料中的纤维强度保有率为 95%^[1~3]。对 E-玻璃而言，玻璃纤维长度只需要 $130\mu\text{m}$ 就可以达到这个水平。但是，如果我们想获得 E-玻璃纤维强度保有率为 99.5% 而不仅仅是 95%，那么纤维的长径比则必须为 100，即该纤维长度为 $1300\mu\text{m}$ 。在通常的成型制品中，纤维长度为 1.5~2.5mm。很明显，如果在工具设计和成型过程中，尽量避免纤维的超常磨损，那么制品的性能应与标准试样实验数据相一致。当然，这就要求回收料的含量达到最小（尽可能低于 25%）。将所用材料的试样实验数据与一些供应商提出的数据进行比较也是很有必要的，因为这样可以确保初始材料的合成是否适当，从而获得足够的增强效果。

E-玻璃纤维的典型物理性能列于表 2-1 中。其中，纤维的成本是以玻璃纤维的价格为 1.0 时计算出的相对价格，在本书写作期间，玻璃纤维的实际价格大约是 \$1.87/kg。

表 2-1 典型纤维增强成分的主要物理性能

性 能	E-玻 璃纤维	碳纤维 (PAN)	芳纶 纤维	PET	硅酸镁 石棉 纤维	剑麻 纤维	不锈钢 纤维	陶瓷 纤维
纤维直径/mm	0.0102	0.0076	0.0127	0.0229	0.0051	0.2540	0.0076	0.0051
相对密度	2.54	1.84	1.45	1.38	2.50	1.50	7.77	2.7
弹性模量/MPa	72.4	359	131	10.0	159	16.5	193	103
拉伸强度/GPa	3.45	3.79	2.76	1.03	2.07	0.52	0.59	1.72
伸长率/%	4.8	1.1	2.4	22	NA	2~3	2.3	NA
热导率/[W/(m·K)]	1.01	8.65	0.50	0.25	NA	NA	1.12	2.88
线膨胀系数 $C/10^4$	0.08	0.06	NA	NA	NA	NA	0.04	NA
近似相对成本 (质量)	1	15	4	2	1	0.7	18	3

2.1.2 碳纤维

碳纤维是真正“太空时代”的发展产物。碳纤维增强材料主要用在航天方面，航天方面对性能的要求比成本更重要。虽然在复合材料中可使用的碳纤维类型很多，如各种石墨化程度不同和直径不同的碳纤维，但是能用于短纤维增强塑料的碳纤维却是很有限制的。短切碳纤维和经过表面处理的碳纤维主要有聚丙烯腈（PAN）基碳纤维和沥青基碳纤维两种。由这两种纤维增强的复合材料在力学性能上的差异如表 2-5 所示。由此可知，PAN 型碳纤维明显优于沥青型碳纤维。PAN 基碳纤维为增强成分的典型力学性能如表 2-1 所示。沥青基碳纤维比 PAN 基碳纤维成本低，可以在一些要求导电而不要求极限力学性能的情况下使用。

碳（石墨）纤维通过热解作用而制得，即聚合物前驱体在高温下还原为连续的碳原子主链。与玻璃纤维相比，碳纤维具有更高的强度和模量、更低的密度、优异的导热和导电性，但成本也很高。此外，它们还有良好的耐化学腐蚀性和自润滑性。在制备具有特殊性能的复合材料时，碳纤维的低密度和高力学性能体现了很大的灵活性，包括使用玻璃纤维和碳纤维的混合物（为了降低单独使用碳纤维时的成本）。由于碳纤维具有高导电性，所以碳纤维特别适用于电磁屏蔽设备部件的制造。如表 2-1 中所示，碳纤维极好的导热性有助于提高复合材料部件耐内部热积累疲劳的能力。