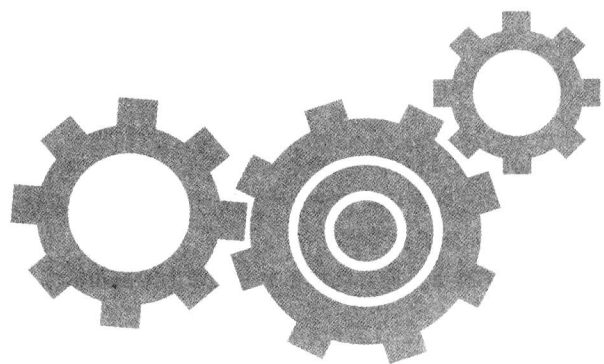


复合材料齿轮

张力 著

清华大学出版社



复合材料齿轮

张力 著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地阐述了对复合材料齿轮的研究。

全书共分 9 章,主要内容为复合材料齿轮概述、自修复复合材料齿轮、聚合物基复合材料的力学性能、复合材料设计和成形工艺、复合材料齿轮的模具设计和制造、复合材料齿轮的性能研究、复合材料齿轮的温度场分析、复合材料齿轮的应力分析、复合材料齿轮有限元分析和实验研究。

本书可供从事复合材料研究及齿轮设计、制造的科技工作者及高等院校相关专业师生阅读和参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

复合材料齿轮/张力著.--北京:清华大学出版社,2012.5

ISBN 978-7-302-28114-6

I. ①复… II. ①张… III. ①复合材料—齿轮—研究 IV. ①TH132.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 033315 号

责任编辑:庄红权

封面设计:常雪影

责任校对:王淑云

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:8.5 字 数:205 千字

版 次:2012 年 5 月第 1 版 印 次:2012 年 5 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:25.00 元

产品编号:038891-01

前 言

复合材料齿轮有质轻、减振、降噪、自润滑、耐腐蚀及耐磨损等优点。与金属齿轮相比,聚合物基复合材料齿轮工作时的主要失效形式是齿轮折断、磨损、点蚀和烧伤。在疲劳弯曲和接触应力的反复作用下,齿轮表面出现的疲劳裂纹和损伤对齿轮造成很大的破坏。

本书汇集了近年来作者的研究成果,并参考了很多资料,展示了复合材料齿轮未来发展的若干趋势及当前的研究进展,全面系统地论述了复合材料齿轮的设计、制造、性能测试及应用,讨论了微胶囊自修复技术在齿轮中的应用研究,提出了一种全新的修复聚合物基复合材料齿轮疲劳点蚀裂纹和烧伤的方法,有利于提高轮齿的断裂强度、耐热性能、耐磨性能和降低摩擦系数,延长齿轮寿命。

在本书的撰写过程中,得到了张恒、刘玉德、王辉、纪晓刚、卜晓媛、陈浩、田野、马艳苗的大力协助,孟春玲教授和董秀萍副教授认真、细致地审阅了书稿,在此向他们深表感谢。

本书获得“北京市属高等学校人才强教计划资助项目”资助(编号:PHR201107110)。

由于本书涉及面广,限于作者水平,书中难免有不当之处,恳请读者不吝赐教。

作 者
2012 年 2 月

目 录

第 1 章 复合材料齿轮概述	1
第 2 章 自修复复合材料齿轮	3
2.1 微胶囊自修复机理	4
2.2 断裂力学分析	6
2.3 自修复微胶囊在聚合物中的应用	8
第 3 章 聚合物基复合材料的力学性能	10
3.1 尼龙的力学模型分析	10
3.2 Maxwell 模型	10
3.3 Voigt 模型	13
3.4 三元素模型	15
第 4 章 复合材料设计和成形工艺	18
4.1 基体材料设计	18
4.2 增强材料设计	20
4.3 微胶囊自修复齿轮用复合材料制备	21
4.3.1 造粒	21
4.3.2 玻纤尼龙复合材料标准样块制备工艺	23
第 5 章 复合材料齿轮的模具设计和制造	24
5.1 模具设计	24
5.1.1 注射模具材料选择	24
5.1.2 浇注系统设计 ^[32]	25
5.1.3 脱模机构设计	25
5.1.4 注射参数校核	26
5.2 复合材料齿轮模塑制造	28
5.3 复合材料齿轮的切削加工	30
第 6 章 复合材料齿轮的性能研究	32
6.1 力学性能测试	33
6.1.1 拉伸性能测试	33
6.1.2 弯曲性能测试	34
6.1.3 洛氏硬度测试	34

6.1.4	冲击性能测试	35
6.1.5	结果对比	37
6.2	摩擦噪声试验	38
6.3	断裂韧性测试	41
6.3.1	断裂韧性测试原理	42
6.3.2	试验试样	42
6.3.3	裂纹判定	43
6.3.4	试验步骤	46
6.3.5	结果处理	46
6.4	扫描电镜分析	48
6.5	热性能测试	49
第 7 章	复合材料齿轮的温度场分析	51
7.1	引言	51
7.2	复合材料齿轮的瞬时温升计算	51
7.2.1	啮合点瞬时内耗温升	51
7.2.2	啮合点瞬时摩擦温升	53
7.2.3	复合材料齿轮的瞬时温升	54
7.2.4	有限单元法计算齿面摩擦热瞬时温度场	55
7.3	复合材料齿轮轮齿内温度场分析	57
7.3.1	齿轮温度测量	57
7.3.2	轮齿内的温度分布	60
第 8 章	复合材料齿轮的应力分析	62
8.1	引言	62
8.2	复合材料齿轮轮齿弯曲强度分析	62
8.2.1	计算模型	62
8.2.2	Laplace 变换(有限元复合法的基本公式)	64
8.3	计算机程序	68
8.3.1	程序流程图及计算框图	68
8.3.2	计算机程序	70
8.4	复合材料齿轮弯曲静强度分析	100
8.4.1	计算结果	100
8.4.2	轮齿弯曲静强度分析	100
8.5	复合材料齿轮接触应力分析	102
8.5.1	边界元法求解二维弹性接触问题的基本公式	103
8.5.2	求解条件	108
8.6	复合材料齿轮的热黏弹性应力分析	110
8.6.1	时间温度等效原理	110

8.6.2	计算模型.....	111
8.6.3	Laplace 变换(有限元复合法基本公式推导)	112
8.6.4	热黏弹性应力场求解过程.....	114
第 9 章	复合材料齿轮有限元分析和实验研究.....	115
9.1	齿轮模型建立	115
9.2	有限元分析	117
9.2.1	静力分析.....	118
9.2.2	模态分析.....	121
9.3	齿轮模态振动试验	122
9.4	实验数据处理及结论	124
参考文献		128

第 1 章 复合材料齿轮概述

中国齿轮工业在“十五”期间得到了快速发展:2005 年齿轮行业的年产值由 2000 年的 240 亿元增加到 683 亿元,年复合增长率为 23.27%,已成为中国机械基础件中规模最大的行业;就市场需求与生产规模而言,中国齿轮行业在全球排名已超过意大利,居世界第四位。“十一五”末期,中国齿轮制造业年销售额达到 1300 亿元,从业人员的人均销售额上升到 65 万元/年,在世界行业排名中达到世界第二。但是,中国齿轮制造业与发达国家相比还存在自主创新能力不足、新品技术开发慢等诸多问题。

齿轮系统是各种机器设备和机械装备中应用最广泛的动力传动形式之一。随着现代工业的发展,对大功率、高速、重载齿轮的需求日益增强,对齿轮性能的要求不断提高。因此,研究新工艺、新材料的应用,对提高齿轮的质量和性能,降低生产和使用成本,减少噪声,减少能源和资源消耗具有十分重要的意义,成为当前齿轮研究的重点之一。

随着国民经济的发展和科学技术的进步,各个产业所用材料正向超高强度、耐高温和超低温、抗腐蚀、轻量化方向发展,复合材料的应用比重逐渐加大。近年来,复合材料正在越来越多地应用于制造传递运动和动力的重要机械元件——齿轮。

复合材料(composite materials),是由两种或两种以上不同性质的材料,通过物理或化学的方法,在宏观上组成具有新性能的材料。各种材料在性能上互相取长补短,产生协同效应,使复合材料的综合性能优于原组成材料而满足各种不同的要求。复合材料按照基体材料的不同,可以分为金属基复合材料、陶瓷基复合材料和聚合物基复合材料。

目前,金属基复合材料和陶瓷基复合材料在齿轮上的研究应用仍然很少,而聚合物基复合材料由于其优越性能,在这方面的应用相对较多,所以,本书主要研究聚合物基复合材料齿轮。

复合材料齿轮与金属齿轮相比,有重量轻、成本低、工艺性好、传动平稳、噪声小、无须润滑、耐磨损等一系列优点,尤其在轻载和转速不高的使用条件下,具有较多优势。近 30 年来,复合材料齿轮及其材料得到了迅速的发展。复合材料成形设计的自由度保证了更高效的齿轮制造,可以用复合材料成形内齿轮、齿轮组、蜗轮等产品,若采用金属材料则会使得成本大幅增加。复合材料齿轮还比金属齿轮轻、惰性好,可用在易腐蚀、退化的环境中,例如水表和化学设备的控制。和金属齿轮相比,复合材料齿轮可以通过偏转变形来吸收冲击载荷,能较好地分散轴偏斜和错齿造成的局部负荷变化。许多复合材料固有的润滑特性使其成为打印机、玩具等低负荷运转机构齿轮的理想材料。复合材料齿轮不但可以在干燥的环境中运行,还可用油脂或油来润滑。随着材料技术的不断进步,复合材料齿轮的应用领域更加广泛,也正朝着承受更高负荷、传送更大动力的方向发展^[1]。

目前,工程实践中已经广泛应用的纤维增强聚合物齿轮、添加颗粒状改性填料的各种塑料齿轮以及采用各种合金元素粉末和石墨粉制成的粉末冶金齿轮都属于复合材料齿轮的范围。其中粉末冶金齿轮主要用于不能添加外润滑油或不希望添加外润滑油的场合,其设计和实验资料可在某些介绍金属齿轮的专著中找到;而陶瓷材料多用于强化齿轮表面。常用热塑性塑料制成齿轮的种类很多,如图 1.1(a)所示的尼龙齿轮为其中的一种。其中 MC 尼

龙(PA6)、尼龙 66 (PA66)、尼龙 6G (PA6G)制成的齿轮有耐冲击、耐疲劳、耐磨损和自润滑性能良好等优点,但其尺寸稳定性和力学性能易受到环境温度的影响。用尼龙 610 (PA610)、尼龙 612 (PA612)、尼龙 11(PA11)、尼龙 12(PA12)和尼龙 12G (PA12G)制成的齿轮湿热膨胀较小,尺寸稳定性好、强度也较高。尼龙塑料齿轮可以传递较大动力,例如土建工程机械中的单槽绞车中的电动机小齿轮和与之啮合的齿轮都采用 MC 尼龙和石墨填料制成的复合材料,使用效果很好。高密度聚乙烯(HD. PE)和超高密度聚乙烯(UHD. PE)齿轮已经用于纺织机械(如织机曲轴 36 牙齿轮),相对于原来的铸铁齿轮,可降低噪声 4 dB 左右。聚乙烯齿轮摩擦系数很低,湿度对其性能影响较小,但热稳定性较差。聚甲醛(POM)制成的齿轮滑动性能好、耐磨、受环境影响较小。聚碳酸酯(PC)也可用作齿轮材料,但其滑动性能不及尼龙。聚氨酯(PU)齿轮有优异的吸振降噪和耐腐蚀的功能,但热稳定性较差。

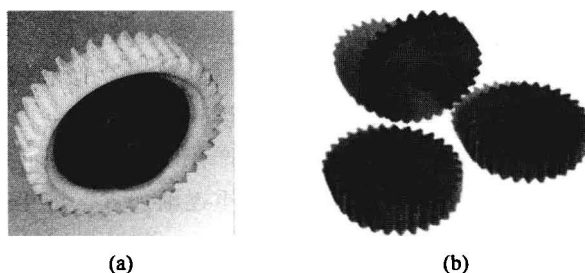


图 1.1 尼龙齿轮与胶木齿轮

(a) 尼龙齿轮; (b) 胶木齿轮

纤维增强塑料齿轮按聚合物基体性质又可分为两类:纤维增强热塑性聚合物齿轮和纤维增强热固性聚合物齿轮。纤维增强热塑性聚合物齿轮通常由短切玻璃纤维或碳纤维和各种热塑性塑料采用浇铸或注射方法制成,常用的有玻璃纤维增强尼龙(GF. PA6, GF. PA66, GF. PA11, GF. PA12)、玻璃纤维增强聚甲醛(GF. POM)和碳纤维增强尼龙(CF. PA66)等。碳纤维具有减小摩擦系数、降低磨损量和增强材料导热性能的功能。由于增强纤维的作用,齿轮的承载能力和尺寸稳定性都远远高于单一材料的塑料齿轮,耐热性能和耐疲劳性能也都有所提高。近年来在很多进口设备上常常可以看到碳纤维塑料齿轮的应用,例如由日本进口的箭杆织机用碳纤维塑料齿轮实现高速运动的箭带的导向和换向。由于国产碳纤维价格偏高,作为民用复合材料的原材料尚不具备市场竞争能力,玻璃纤维是国产复合材料的原材料。玻璃纤维和碳纤维混杂织物用作齿轮增强材料有较高的经济效益。纤维增强热固性聚合物齿轮常见于各种模压成形的玻璃纤维增强环氧树脂齿轮、玻璃纤维增强酚醛树脂齿轮和棉纤维增强酚醛树脂齿轮(俗称胶木齿轮),例如小型工具锯床电动机小齿轮、汽车发动机齿轮等都采用如图 1.1(b)所示胶木齿轮。此外,有研究报告表明,碳纤维增强环氧树脂及碳纤维增强酚醛树脂复合材料也用于制造齿轮,通过在齿圈和芯套均匀设置的孔来减少变形带来的尺寸变化,采用碳纤维增强复合材料整体注塑成形。

第2章 自修复复合材料齿轮

智能自修复复合材料的研究是一门新兴的综合科学技术。智能材料是指能模仿生命系统,同时具有感知和激励双重功能的材料,自诊断与自修复是智能材料的重要功能。自修复又称自愈合,是生物的重要特征之一,人们把产生缺陷时,在无外界作用的情况下,材料本身自我判断、控制和恢复的能力称为自修复。目前,具有自诊断、自修复功能的智能自修复复合材料已成为新材料领域的研究重点之一,自修复的核心是能量补给和物质补给,其过程由生长活性因子来完成。模仿生物体损伤愈合的原理,使得复合材料对内部或者外部损伤能够进行自修复、自愈合,从而消除隐患,增强材料的机械强度,延长使用寿命,在军工、航天、电子、仿生等领域显得尤为重要^[2]。

目前,用于自修复的复合材料主要有微胶囊型自修复复合材料、液芯纤维自修复复合材料及其他自修复复合材料^[3]。

1. 微胶囊型自修复复合材料

在聚合物基自修复复合材料领域,微胶囊是研究和应用相对较多的一种填充材料。用于复合材料自修复的微胶囊主要是聚脲甲醚包覆双环戊二烯微胶囊、聚脲甲醚包覆环氧树脂微胶囊等。其中报导较多的是用聚脲甲醚树脂包覆双环戊二烯(DCPD)微胶囊和Grubbs 催化剂组成的自修复体系制得的自修复材料。

2. 液芯纤维自修复复合材料

含有修复剂的液芯纤维在聚合物基复合材料中的应用也较多。Pang J. W. C. 等提出将填充有环氧树脂修复剂的空心纤维应用到聚合物基复合材料中,采用手工铺层的方式在 0° 方向上埋入直径为 $60\text{ }\mu\text{m}$ 的空心纤维,在 90° 方向的空心纤维内填充固化剂,产生的裂纹使空心玻璃纤维破裂释放修复剂和固化剂,研究表明材料强度可恢复97%。Williams G. J. 等利用填充有环氧树脂修复剂的空心玻璃纤维制成自修复环氧树脂复合材料,当纤维间距为 $70\text{ }\mu\text{m}$ 时,复合材料的挠曲强度明显恢复。

采用空心纤维内装修复剂修复树脂基复合材料技术,目前都还停留在实验室阶段,难以进入工业应用。因为该技术存在一些缺陷,同时也存在制造工艺上的技术难点。由于一般空心纤维直径都在毫米级,如果将其埋入复合材料中,本身将构成一种缺陷,只有直径 $5\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 的空心纤维能达到要求,但是这种空心纤维直径太小,很难将修复剂注入^[4]。当前科学技术可以批量生产空心纤维但不能方便地制造类似于动物血管系统的空心纤维网络。要制造一个空心纤维网络,在其内部充满修复剂并保持一定的内压以便破裂时能使修复剂流出,需要一个十分复杂的手工制备工艺和较复杂的压力维持系统^[2]。

3. 其他自修复复合材料

除了利用微胶囊及液芯纤维可实现材料的自修复功能外,最近研究发现,利用材料自身的热可逆反应可修复材料。这种材料是由两种单体通过热可逆共聚反应制得、由可逆交联共价键连接而成的大分子网络,其优点主要是只需简单加热,无须额外加入催化剂、单体分子或其他特殊处理就可对裂纹进行修复。Chen X. X. 等以咪喃多聚体和马来酰亚胺多聚

体进行热可逆共聚,形成的聚合物就可以实现这种自修复,其修复率可达 57%。Hayes S. A. 等提出在热固性环氧树脂基体中引入热塑性树脂,材料产生裂纹时将复合材料加热,热塑性树脂重新固化,从而黏结裂纹面。拉伸试验表明,在基体树脂中加入 20% 热塑性修复剂,裂纹愈合效率可达到 70%。在玻璃纤维增强环氧树脂复合材料中加入 10% 热塑性修复剂,材料修复后的裂纹区域明显减小。

利用材料自身热可逆反应的可修复材料,由于不需要埋入其他物质,所以对复合材料使用性能的影响较小。但由于对热固性树脂进行改性,或引入热塑性树脂于基体材料中,会使复合材料的加工制备技术等受到影响,因此该技术目前也只处于起步阶段,仍需较长时间的研究^[4]。

因此,上述三种自修复复合材料中,微胶囊型自修复复合材料是目前研究和应用最多的。本书正是借鉴了目前已广泛应用于医药、印刷、化妆品等行业的微胶囊新技术,采用作者所参加的国家自然科学基金项目的部分研究成果,在复合材料齿轮中构建一种新型自修复系统,其基本原理是:首先,采用微胶囊技术制备含液态修复剂的微型空心颗粒;其次,按照颗粒增强复合材料的制备工艺把含修复剂的空心颗粒均匀地分散于基体材料中并制备在齿轮中,当齿轮受外界作用(压力、温度、腐蚀等)表面出现磨损、点蚀、烧伤和裂纹时,由于裂纹穿过空心颗粒,微颗粒中的修复剂流出、固化,把各组分材料黏合在一起,防止点蚀和裂纹的进一步扩大,从而避免复合材料齿轮因出现疲劳点蚀裂纹和烧伤而失效。

由于目前各种传动系统广泛采用齿轮传动,因此提高齿轮的使用寿命将极大地降低传动系统的维修成本。本书的研究意义在于提出了提高聚合物基复合材料齿轮寿命的一种全新的方法,研究解决在齿轮表面出现的疲劳裂纹和损伤等失效问题,具有非常重要的社会效益、经济效益和良好的发展前景。

2.1 微胶囊自修复机理

自修复复合材料是依据仿生学的原理研制出来的。它模仿生物组织受伤后的再生、恢复机理,采用黏结材料和基体相复合的方法,对材料的损伤破坏进行自修复,恢复材料原有的性能。自修复复合材料的修复机理是:在复合材料中预埋入内含修复剂的微型结构,这种微型结构应该对材料的原有性能不产生影响。当复合材料内部产生微裂纹时,处于裂纹

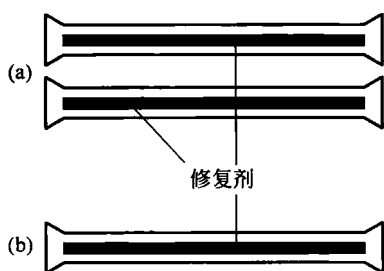


图 2.1 Dry 设计的含修复剂的空心玻璃纤维

- (a) 双组分交联剂(含有不同组分的
两根纤维平行置放);
(b) 单组分交联剂

扩展前沿的微型结构在裂纹扩展力的作用下破裂,释放出修复剂,把裂纹面黏结在一起,阻止裂纹的进一步扩展,从而实现材料的自修复功能。

最早的自修复系统是对动物血管网络的简单模拟。例如,1994 年,美国 Illinois 大学的 Carolyn Dry 将空心玻璃纤维埋入混凝土中,纤维内注入缩醛高分子溶液作为修复剂,如图 2.1 所示。在外力作用下基体开裂时,空心玻璃纤维断裂,修复剂流出并进入裂纹面,固化后把裂纹面黏结在一起,阻止了裂纹的继续扩展^[5]。根据已做的试验可知,空心玻璃纤维管中的内压力影响混凝土结构

裂缝自愈合的质量。当管内压力加大到 0.23 MPa 以上时,其中的修复剂才能迅速流到裂缝破损处,使 95% 以上的裂缝都能得到黏合。梁大开^[6]等在空心光纤智能复合材料结构的自修复网络中,采用了 E44 型双组分环氧树脂胶作为修补材料,分别将环氧树脂和固化剂装入不同的空心光纤,制成了液芯光纤。张妃二^[7]等在混凝土中分层布置注满缩醛高分子溶液的大直径空心光纤,实现了混凝土裂缝的自修复。在自修复网络系统中,控制空心纤维的内压力对于裂缝自修复的质量十分重要。由于空心纤维网络系统制造工艺上的技术难点,很难实现自动化制备,目前还难以进入工业应用。

受生物体损伤自动愈合的启发,White 等报导了一种具有自动修复裂纹能力的聚合物材料。这种材料嵌有内装修复剂的微胶囊,每个微胶囊约有头发丝宽,这些微胶囊遇到裂纹入侵时由于裂纹尖端的应力集中作用而破裂,并通过毛细作用释放修复剂到裂纹面,修复剂接触预先埋入环氧基体的催化剂而引发聚合,黏结裂纹面^[8]。这种损伤诱导的引发聚合使得裂纹修复实现了就地自动控制(self-specific autonomic control),如图 2.2 所示。冲击试验结果表明这种材料能恢复 75% 的韧性,而且该方法有望适用于其他脆性材料,如硅酸盐和玻璃。

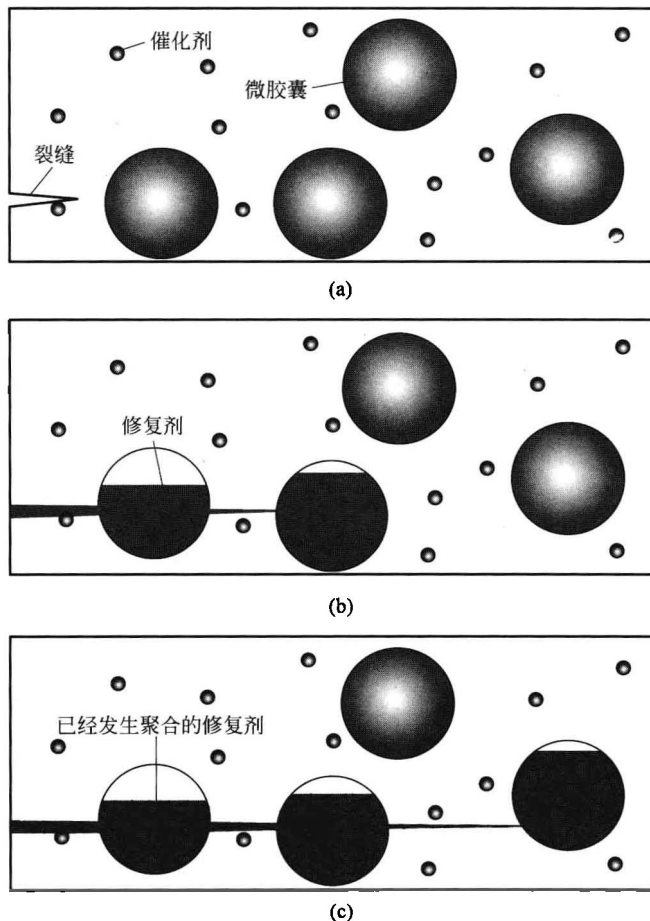


图 2.2 微胶囊自修复机理

(a) 母体损坏,出现裂缝;(b) 裂缝使微胶囊破裂,通过毛细作用将其中的修复剂释放到裂缝表面;

(c) 修复剂与母体中的催化剂接触,引发聚合反应,使断裂面黏结修复

同液芯纤维修复机制一样,用于微胶囊自愈合的单体必须具备低黏度、低挥发性和室温下快速反应的特点。另外,体系还要满足寿命长、在聚合过程中收缩率低等条件。White 等以金属钨配合物做催化剂在损伤区域引发双环戊二烯(DCPD)聚合形成高度交联的聚合物网络。该聚合反应室温下即能进行聚合。这种方法的巧妙之处在于反应机理属于活性开环聚合(ROMP),修复后的聚合物端基仍有活性,重新注入单体会继续聚合,因此只要适时添加单体即能对再产生的裂纹进行多次修复。微胶囊是采用标准的微胶化技术制得的,胶壳以脲醛树脂为材料,在复合材料的制备中起着分隔单体和引发剂的作用。微胶囊的性质和几何尺寸对力学破坏引发愈合过程有很大的影响,不合适的微胶囊大小将会削弱基体强度。另外,如果微胶囊的外壳太厚,遇到裂纹不容易破裂;相反如果胶壳过薄,在加工成形过程中就可能被破坏。其他相关的设计参数包括微胶囊的相对刚性、微胶囊和基体界面的强度,所有这些因素在研究中都需要加以综合考虑。

2.2 断裂力学分析

要实现复合材料的自修复功能,则当裂纹前沿遇到微胶囊时,微胶囊必须能够破裂使修复剂流出,与固化剂混合并发生化学反应,这就需要对材料进行断裂力学设计。断裂力学为微胶囊自修复复合材料受力破坏的研究提供了理论基础,明确自修复复合材料的断裂机理,将有利于研究含微胶囊自修复复合材料的性能。

1. 均质材料的断裂判据

应力强度因子 K 是描述裂纹尖端附近应力场强弱程度的参量。裂纹是否会发生失稳扩展取决于 K 值的大小,因此可用 K 因子建立断裂准则(也称 K 准则),即 $K = K_c$,其含义是:当含裂纹的弹性体在外载荷的作用下,裂纹尖端的 K 因子达到裂纹发生失稳扩展时材料的临界值 K_c 时,裂纹就发生失稳扩展,导致裂纹体的断裂。对于张开型裂纹,当表示裂纹尖端应力场强弱程度的参量 K_I 达到临界值,即

$K_I = K_c$ 时,此裂纹试件即处于临界状态,故脆性断裂的条件为

$$K_I \geq K_c$$

式中, K_c 称为断裂韧性,可由实验确定。其是与实验温度、板厚、变形速度等参量有关的数值,一旦这些外部因素固定时, K_c 即为表示材料性质的常数。所以,知道了材料的断裂韧性值,就可由公式得到脆断时工作应力与裂纹长度临界值(或裂纹长度与工作应力临界值)之间的关系。

理论分析和实验均证明:张开型裂纹最容易产生脆断;同时,在平面应变条件下,裂纹尖端 $\sigma_x = \sigma_y$, $\sigma_z = \mu(\sigma_x + \sigma_y)$, 裂纹容易产生扩展。所以,通常都用具有张开型的厚板进行实验,以确定平面应变状态下应力强度因子的临界值

K_{Ic} , 简称为“平面应变断裂韧性”,如图 2.3 所示。

于是,对于平面应变状态的张开型裂纹脆断条件为^[9]

$$K_I \geq K_{Ic}$$

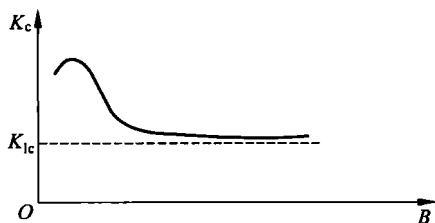


图 2.3 临界应力强度因子和厚度的关系

K_c 随厚度变化的曲线如图 2.3 所示, K_{Ic} 是厚度较大时的临界强度因子的稳定的低值。 K_I (应力

分路线无关。对于 I 型裂纹的 J 值,用 J_I 表示。平面应变条件下的临界值 J_{Ic} 已经测得,实验表明它是一个材料常数。大量的研究工作说明:

$$J_I \leq J_{Ic}$$

作为裂纹失稳扩展判据的可能性。

对于线弹性体,或在线弹性阶段,Rice 最先证明 I 型裂纹中, J 积分与 K_I 、 G_I 存在关系:

$$J_I = \frac{1-\nu}{E} K_I^2 = G_I \quad (\text{平面应变})$$

上式表明,在线弹性阶段, J 积分与应变能释放率 G_I 等价,利用 J_I 与 K_I 的对应关系,可以通过测定材料的 K_{Ic} 值间接求得 J_{Ic} 值。

断裂力学中用于表征裂纹尖端附近应力场强弱的参数是应力强度因子 K_I (张开型裂纹)。它是裂纹体对外加载荷的一种响应,裂纹体一定时,外载荷越大,应力强度因子就越大;外载荷越小,应力强度因子就越小。外力增大时,裂纹尖端的应力强度因子也增大,继续增大外力, K_I 也随着增大,当它随着外载荷的增加而增大到某一个临界值的时候,裂纹就扩展了。 K_I 的这个临界值用 K_{Ic} 表示。大量的实验表明,对于某种给定的复合材料来说,在给定的外部条件下,使裂纹突然扩展的这个临界值 K_{Ic} 是一个确定的值。从另外一个角度说,在给定的外部条件下,一种材料在裂纹尖端能够承受的奇异应力场的强度是有限度的,超过这个限度,裂纹就要扩展。这个限度越大,说明材料在裂纹尖端可以承受很强的应力场而不开裂,说明材料抵抗裂纹扩展的能力越强。这个限度 K_{Ic} 表征材料抵抗裂纹扩展的能力,称为临界应力强度因子。在平面应变条件下, K_{Ic} 有个稳定的值即 K_{Ic} ,材料给定的时候, K_{Ic} 值就定了,它是材料本身的特性之一。 K_{Ic} 表征的是这种材料在平面应变条件下抵抗裂纹扩展的能力,称为材料在平面应变条件下的断裂韧性。断裂韧性是材料的固有属性,与裂纹的长度、形状以及外载荷的大小无关。

断裂力学利用 K_{Ic} 建立了判定材料内部裂纹是否扩展的准则。针对一个具体的裂纹体,要判别裂纹是否扩展,就要知道应力强度因子和断裂韧性的大小。对于微胶囊自修复复合材料,微胶囊壳的破裂是材料自修复性能实现的保证。在什么条件下,裂纹可以穿过微胶囊的壳,让微胶囊破裂,修复剂流出;在什么情况下,裂纹会分叉绕过微胶囊,使材料无法实现自修复功能。基体材料和微胶囊壳材料的断裂韧性相互关系对上述问题有着重要的影响。

2.3 自修复微胶囊在聚合物中的应用

近几年来,伴随复合材料技术的发展,微胶囊技术在复合材料裂纹自修复方面的应用开始得到了重视,并逐渐成为新材料领域研究的一个热点。具有自修复功能复合材料的提出使得复合材料对内部以及外部损伤能够完成自我修复,可以阻止复合材料尤其是脆性材料的内部微裂纹进一步扩展,从而显著增加复合材料的强度,大大延长材料的使用寿命,特别是在城建、航空、航天、电子、仿生领域的应用显得尤为重要。

20 世纪中后期,塑料力学行为的研究手段已经发展得比较成熟,通过各种静、动态实验以及一些简单的数学模型,人们对塑料力学行为的了解越来越多,尤其是塑料的线性力学行为。由于具有大分子特殊的长链结构,聚合物具有其特定的力学状态——高弹性。高弹性是高聚合物特有的由熵变化引起的弹性,与由能量变化引起的普弹性有本质的区别。此外,

有别于金属和无机材料,高聚合物的力学性能与温度和作用时间关系极大,具有明显的黏弹性。聚合物的力学行为依赖于外力作用的时间,即它的分子对于外力的响应达不到平衡,是一个速率过程。再有,聚合物的力学行为有很大的温度依赖性。所以时间和温度是研究尼龙材料力学特性需要特别注意考虑的两个重要参数。同时尼龙材料应力-应变关系是非线性的,因而使得聚合物材料的力学性能比一般金属材料要复杂。与金属材料相比,聚合物基复合材料独特的力学性能主要表现在黏弹性。弹性是指在给定应力(应变)下,物体的应变(应力)能够实现瞬时响应;黏性是指物体的响应随输入的作用时间或速度变化而改变的特性。而黏弹性则介于两者之间,黏弹性体的变形不仅与作用的外力大小相关,还与温度的改变力的作用时间和加载顺序有关,蠕变和松弛是黏弹性体的两种特殊情况。蠕变是指在时间 $t=0$ 时施加到物体的常应力 σ_0 ,而应变 ϵ 随时间 t 的延长而逐渐增大,但是增大的速率在减小。松弛是指在时间 $t=0$ 时施加给物体以常应变 ϵ_0 ,随时间的延长,应力 σ 逐渐减小^[13]。

基于聚合物材料特殊的力学性能和微胶囊的特性,研究人员对自修复微胶囊在聚合物中进行了大量的研究。自修复 White S. R.^[14~17]的研究小组,作为首先将自修复微胶囊技术应用到了聚合物基中的研究团队,他们将环戊二烯聚体(DCPD)包裹在脲醛树脂中制备出的微胶囊,并将催化剂 Grubbs 一起分散在环氧基体中。当树脂材料产生裂纹时,自修复微胶囊破裂,DCPD 通过裂缝由于虹吸作用渗入银纹中,与催化剂 Grubbs 结合产生交联聚合反应完成修复功能,这种复合材料的修复率为 75%。Kessler^[18,19]等利用同样的方法制备微胶囊,首次应用于 E 玻纤增强的环氧树脂材料,研究了存在玻璃纤维的情况下基体的自修复能力,通过结果证明修复率可达 67%。Jung^[20]等通过在聚酯基复合材料中埋植由聚乙烯和聚苯乙烯组成修复剂的微胶囊,加入不同比例的微胶囊发现加入 10%时样品表现出最大的抗冲击韧性。

田薇^[21]等采用原位聚合法制备出聚脲甲醛包裹的 DCPD 自修复微胶囊,通过在环氧树脂基体中加入不同比例的微胶囊,研究总结出微胶囊浓度与自断裂韧性的关系。张恒^[22,23]等对聚合物基体和自修复微胶囊进行了断裂测试,分析了夹层模拟试样与含微胶囊试样的断裂特性,分析总结了胶囊壳体材料和基体材料断裂韧性的匹配关系。袁莉^[24]等采用原位聚合法制备以尿素、甲醛为壁材,以双酚 A 型环氧树脂(DGEBA)为芯材的自修复微胶囊,应用于氰酸酯树脂(CE)和双马来酞亚胺(BMD)这两种聚合物基体中,通过实验研究分析微胶囊对于两种材料的修复能力。

第 3 章 聚合物基复合材料的力学性能

3.1 尼龙的力学模型分析

尼龙作为高分子聚合物中的一种,其力学行为依赖于外力作用的时间,即它的分子对于外力的响应达不到平衡,是一个速率过程。再有,尼龙的力学行为有很大的温度依赖性。所以时间和温度是研究尼龙材料力学特性需要特别注意考虑的两个重要参数。同时尼龙材料应力-应变关系是非线性的,因而使得尼龙材料的力学性能比一般金属材料要复杂。

材料的力学性能通常可以借助一些简单模型来描述,而力学模型的最大特点是直观。例如,一根符合胡克定律的弹簧可以用来准确描述理想弹性体的力学行为。如图 3.1(a)所示,应变 ϵ 与应力 σ 成正比关系: $\sigma = E\epsilon$ 。由活塞和充满黏度为 η 组成的符合牛顿流动定律的液体黏壶,可以用来准确描述理想液体的力学行为。如图 3.1(b)所示,应变的一阶变化速率与应力成正比: $\sigma = \eta \frac{d\epsilon}{dt}$ 。聚合物的黏弹性现象都可以通过上述弹簧和黏壶模型的组合进行宏观定性描述。可以想象,高聚合物的黏弹性行为的力学模型应该可以用上述的弹簧和黏壶的各种组合进行模拟。由弹簧和黏壶组合而成的各种模型的高聚合物黏弹性微分表达式的一般形式为

$$a_0\sigma + a_1 \frac{d\sigma}{dt} + a_2 \frac{d^2\sigma}{dt^2} + \dots = b_0\epsilon + b_1 \frac{d\epsilon}{dt} + b_2 \frac{d^2\epsilon}{dt^2} + \dots \quad (3-1)$$

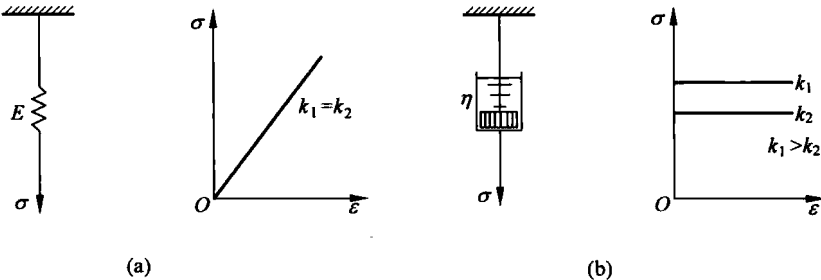


图 3.1 弹簧和黏壶以及它们的应力-应变曲线

(a) 弹簧及其应力-应变曲线; (b) 黏壶及其应力-应变曲线

3.2 Maxwell 模型

弹性模量为 E 的弹簧与黏度为 η 的黏壶串联的模型通常称为 Maxwell 模型,它可以用来说明聚合物的应力松弛、动态力学性能以及应力-应变曲线的一般特征。Maxwell 模型如