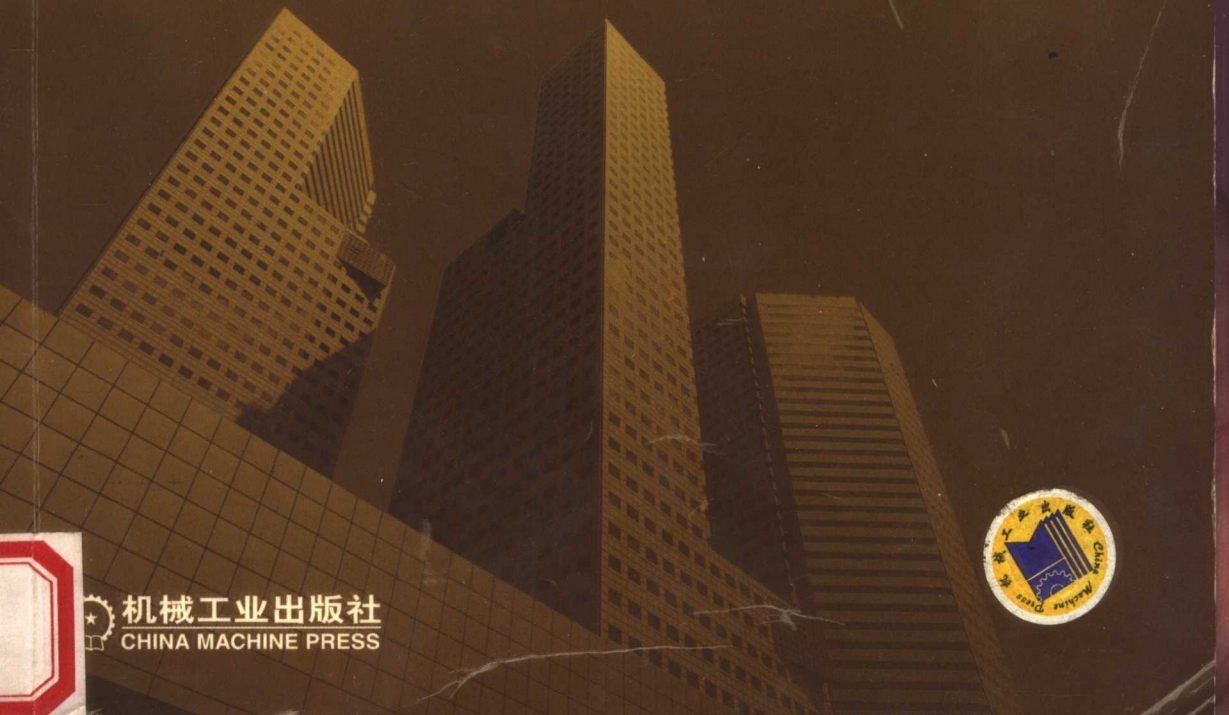


土木工程研究生系列教材

# 土工合成材料

王 钊 编 著  
王正宏 主 审



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



土木工程研究生系列教材

# 土工合成材料

王 钊 编 著  
王正宏 主 审



机械工业出版社

本书较全面地介绍了土工合成材料的应用原理和工程实践。主要内容包括：聚合物性质，土工合成材料产品、特性和试验方法，以及土工合成材料在排水和渗滤、防渗，加筋和加固，道路工程中的隔离、环保和防护、减载等领域的应用。在第十章还给出了目前的应用进展，例如，土工合成材料粘土垫、土工包容系统、废弃轮胎的应用、岩石边坡植生技术和电动土工合成材料等。通过大量例题和工程实例的分析，加深对汇编的设计公式、检测方法和施工措施的理解。

本书可供水利、道桥、矿山和工民建等土木工程专业的研究生及本科生、科研和工程技术人员使用，也可作为土工合成材料生产厂家的参考书。全书共十章，全部讲授需 54 学时。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

土工合成材料/王钊编著. —北京: 机械工业出版社, 2005.4

(土木工程研究生系列教材)

ISBN 7-111-16272-2

I. 土… II. 王… III. 土木工程-合成材料-研究生-教材

IV. TU5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 019751 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 季顺利 版式设计: 冉晓华 责任校对: 申春香

封面设计: 张 静 责任印制: 陶 湛

北京金明盛印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5·10 印张·2 插页·383 千字

定价: 27.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

# 土木工程研究生系列教材编审委员会

**顾问：**（以姓氏笔画为序）

刘宝琛	刘祖德	刘怀恒	王正宏	林 皋
任爱珠	朱博鸿	沈世钊	沈祖炎	欧进萍
陈英俊	周 氏	周锡元	钟善桐	赵国藩
殷宗泽	顾晓鲁	蔡美峰		

**主任委员：**江见鲸

**副主任委员：**（以姓氏笔画为序）

朱合华	李宏男	李 奇	李爱群	陈云敏
张永兴	杜修力	张素梅	尚守平	姜忻良
夏 禾	徐志胜	廖红建		

**委员：**（以姓氏笔画为序）

卫 军	王 钊	王清湘	卢廷浩	朱召泉
李正良	李英民	李洪泉	李鸿晶	刘晶波
吴知丰	陈国兴	杨果林	张家生	张毅刚
张耀春	郑 刚	易伟建	单 建	周朝阳
赵树德	徐礼华	袁迎曙	康清良	盛宏玉

**秘书长：**季顺利

# 土木工程研究生系列教材序

随着我国高等教育的发展,普通本科教育已由精英式教育发展成为大众式教育。我国科学技术的高速发展,对具有高级专业知识、高级专业技能的专门人才的需求,日益迫切,这为硕士研究生教育的发展提供了广阔空间。一些高等院校,硕士研究生的招生规模,近年来正以 15%~30% 的速度发展。对一些研究型重点高校,在“十五”期间,本科生与研究生的招生比例要大致相当。许多高校已获得工程硕士的培养授权,这为研究生培养又开辟了新途径。

硕士研究生招生规模的扩大,对传统的研究生教育模式提出了挑战。过去硕士生的培养基本套用博士生的培养模式,主要靠传帮带式的教育模式,而对数量增大的研究生教育,必须建立整建制的培养模式,即要求硕士研究生的教育培养模式向公共化、规范化方向发展。对此,硕士研究生的教材,特别是研究生教育的平台课、学位课的教材建设就显得特别重要了。

机械工业出版社根据当前土木工程研究生教育发展现状,本着“大土木工程”的教育思想,组织国内部分高校土木工程专业的教授,对土木工程研究生用教材建设进行了研讨,并组织编写了土木工程研究生系列教材。为保证教材的编写质量,组织成立了教材编审委员会,聘请了一批学术造诣深、德高望重的专家作顾问和教材主审。本套系列教材编写、出版的思路是:先基础课、平台课教材,后专业课教材。教材由长期给研究生授课的教师合作编写,达到“学校优势互补,质量上乘”的目标。教材体系设计,本着“重基本理论、重学科发展,结合学生现状和人才培养要求”的原则。教材编写质量,本着“出精品、主编负责、主审把关”的原则,符合国务院学位委员会设定的专业要求。

本套系列教材将于 2005 年陆续出版。我们相信,本套系列教材的出版将对我国土木工程研究生教育的发展和教学质量的提高及人才培养,产生积极作用,为我国经济建设和社会发展作出贡献。

江见鲸

# 前 言

经过多年对土工合成材料的研究和实践,其应用技术已日渐成熟,其作用机理的研究也基本能解释试验规律和实际工程的性状。从基本上讲,作为散粒体的土需要一种连续介质来改善其工程特性,而土工合成材料耐腐蚀、高强度、质轻和价廉,最好地满足了这一要求。随着工程实例的增多,出现了大量的论文和专著,各个国家的相关部门颁布了土工合成材料的测试和应用规范,这进一步促进了土工合成材料在水利、土建、交通、铁道、冶金、农业和环保等各个领域的应用,并带动了化工和纺织工业的发展。

为了适应以上形势,国内外一些高等学校已开始讲授土工合成材料的应用知识,因此有必要编写一本教材,系统地介绍土工合成材料产品的特性和原材料的性质,以及试验方法,介绍土工合成材料的应用设计和施工方法。本书的编写仍然将重点放在应用原理上,力求将道理说清楚。

本书内容是在《土工合成材料应用原理》(水利电力出版社1994年6月)和《国外土工合成材料的应用研究》(现代知识出版社2002年5月)的基础上编写的,前者从1993年起每年用于研究生教学,在原有内容的基础上,现增加了土工合成材料在路面结构、边坡绿化防护和垃圾填埋场等领域的应用,以及一些应用进展。书中的符号和公式力求和新发表的规范相同,同时为了增强同学的工程意识和对实践的指导作用,也汇编了国内外一些指南和手册中的设计公式、检测方法和施工措施,并增加了一些工程实例的分析和例题及习题。

王正宏教授主审本书并提出了很多宝贵建议,在此谨表达深切谢意。

编者的许多研究生参加了做题、校稿、整理和打印等工作,他们是:王俊奇、王陶、邹维列、庄艳峰、苏金强、周正兵、肖衡林、张训祥、胡海英、李丽华、王金忠等。在此,谨对他们深表谢意。

编者还要向引用文献的作者表示衷心感谢。

由于编者的水平所限,书中的错误与疏漏之处在所难免,敬请读者多加指正。

王 钊

# 目 录

## 土木工程研究生系列教材序

### 前言

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 概述.....	1
第二节 聚合物简介.....	4
第三节 土工合成材料的类型和应用.....	8
<b>参考文献</b> .....	14
<b>第二章 土工合成材料的制造</b> .....	16
第一节 概述 .....	16
第二节 合成纤维的特性和生产方法 .....	16
第三节 土工织物的生产过程和结构 .....	20
第四节 土工膜和复合土工膜 .....	25
第五节 土工网和土工复合排水网 .....	27
第六节 土工格栅和土工网垫 .....	29
习题 .....	31
<b>参考文献</b> .....	31
<b>第三章 土工合成材料的特性和试验</b> .....	32
第一节 概述 .....	32
第二节 物理性质 .....	34
第三节 力学性质 .....	38
第四节 水力学性质 .....	51
第五节 土工合成材料与土的相互作用 .....	55
第六节 耐久性 .....	60
第七节 土工合成材料的允许抗拉强度 .....	63

第八节	试验成果的整理和比较 .....	65
习题	.....	69
参考文献	.....	71
<b>第四章</b>	<b>排水与反滤作用</b> .....	72
第一节	土工合成材料的排水特性 .....	72
第二节	软土地基的排水 .....	77
第三节	挡土墙和防渗心墙后的排水 .....	89
第四节	填埋场中的排水 .....	91
第五节	道路排水 .....	93
第六节	土工织物的反滤应用 .....	98
习题	.....	107
参考文献	.....	108
<b>第五章</b>	<b>土工膜的防渗作用</b> .....	109
第一节	概述 .....	109
第二节	土工膜的工程性质 .....	110
第三节	土工膜防渗应用和设计 .....	113
第四节	土工膜的铺设 .....	122
习题	.....	127
参考文献	.....	127
<b>第六章</b>	<b>加筋作用</b> .....	129
第一节	概述 .....	129
第二节	加筋土的试验和机理分析 .....	132
第三节	加筋土挡土墙和陡坡 .....	139
第四节	条形基础的加筋地基 .....	148
第五节	软土地基上的加筋堤 .....	156
第六节	土工合成材料用于桩基础 .....	161
第七节	加筋土结构的施工 .....	166
习题	.....	169
参考文献	.....	170
<b>第七章</b>	<b>道路工程中的隔离作用</b> .....	171
第一节	路基底部的隔离作用 .....	172



第二节	路面处的隔离作用·····	176
第三节	土工合成材料路面应用的现场试验·····	183
第四节	土工合成材料隔离层的施工·····	192
	习题·····	193
	<b>参考文献</b> ·····	193
<b>第八章</b>	<b>防护和环保</b> ·····	195
第一节	概述·····	195
第二节	防护结构的型式和应用·····	196
第三节	防护结构的设计·····	204
第四节	土工合成材料在防洪抢险中的应用·····	215
第五节	土工合成材料在垃圾填埋场中的应用·····	217
	习题·····	241
	<b>参考文献</b> ·····	242
<b>第九章</b>	<b>土工泡沫的减压作用</b> ·····	244
第一节	概述·····	244
第二节	泡沫塑料的基本性质·····	245
第三节	泡沫塑料在土工中的应用·····	248
	习题·····	259
	<b>参考文献</b> ·····	259
<b>第十章</b>	<b>其他应用</b> ·····	261
第一节	土工合成材料粘土垫·····	261
第二节	土工包容系统·····	273
第三节	废弃轮胎加筋土结构·····	283
第四节	岩石边坡生态防护方法简介·····	292
第五节	电动土工合成材料(EKG)的研制和应用·····	299
	习题·····	306
	<b>参考文献</b> ·····	306

# 第一章 绪 论

## 第一节 概 述

土工合成材料 (Geosynthetics) 泛指用于土木工程的合成材料产品。它的品种繁多, 可以由不同的聚合物原材料生产, 也可以按照使用目的制成各种各样结构形式。但粗略地按照目前的习惯可以分为四个大类。第一类是土工织物, 它是用合成纤维以纺织工业的生产方式制造成的产品, 因而是透水的; 第二类是土工膜, 它是用合成材料以塑料工业生产方式制成的柔性不透水的薄膜; 第三类是土工塑料, 它也是用合成材料以塑料工业生产方式制成的产物, 如土工格栅、土工网和泡沫塑料等; 第四类是土工复合材料, 根据应用要求将不同种类的土工合成材料或与其他材料复合在一起, 例如土工织物和土工膜、土工织物和土工网以及土工织物和粘土的复合等。

土工合成材料在土木、水利、交通、铁道和环境工程中得到广泛的应用, 起到排水反滤、防渗、加筋、隔离、防护和减载等作用。这些作用是以不同形式的产品来实现的, 例如, 土工织物用于滤层、隔离和防护; 土工网和三维植被网垫用于排水和坡面的稳定; 土工格栅、条带和有纺或编织土工织物用于加筋、土工膜用于防渗等。复合型土工合成材料则结合了各自的优点, 例如, 兼具过滤和排水性能的土工织物和土工网复合材料, 结合加筋和隔离功能的土工织物和土工格栅复合材料, 而土工织物和土工膜结合形成的复合土工膜则既能防渗又具有防刺破的作用, 同时具有与土较高的界面摩擦系数。本书的内容主要是按土工合成材料的作用而编写为相应的章节。

尽管有众多的产品和更多的潜在的应用形式, 对于具体的工程应判断土工合成材料的主要作用, 选择合理的设计公式, 确定要求达到的性能指标, 并寻求一个经济上合适的施工方法。目前证明较成功的应用有: 无纺土工织物代替粒状级配滤层应用于反滤排水工程中, 土工合成材料加筋挡土墙代替重力式挡土墙, 塑料排水带代替砂井, 土工膜用于防渗材料等。在应用的初期, 最担心的是耐久性, 忽视铺放的位置, 认为铺土工合成材料总比不铺好。而现在经验证明在土中耐久性是可以保证的, 相反, 土工合成材料铺放的位置不当或施工质量差, 会降低作用, 甚至适得其反。

关于土工合成材料的应用历史, 可以追溯到 20 世纪的 50 年代。现已考证, 土力学的奠基者太沙基 (K. Terzaghi) 当时用滤层布 (土工织物) 作为柔性结构

物结合水泥灌浆，封闭 Mission 坝岩石坝肩与钢板桩间隙。在同一工程，用池垫（土工膜）防止上游粘土铺盖脱水。Mission 坝位于加拿大，现已改称为太沙基坝。不同的资料显示，土工合成材料的应用历史可能更早，例如，在 20 世纪 30 年代美国已将塑料布用到游泳池的防漏措施之中。到 50 年代，美国、苏联、印度等国家开始在渠道表层采用土工膜的防渗措施。1963 年荷兰采用聚乙烯土工膜作为一个占地 50 公顷的小型水库的防渗措施。

第一次用织物加筋道路的尝试是由美国卡罗来纳（Carolina）高速公路部门在 1926 年完成的，具体做法是在基层布置了一层厚棉布，布上涂了热沥青，在沥青上铺了一层薄沙。1935 年该部门公布了八个试验段的结果：直到织物被破坏，路面情况仍保持良好。织物的应用使路面的裂纹减少并将出现问题的地方控制在局部。虽然用的不是聚合物材料，但应用原理沿用至今。

土工织物首先应用在荷兰的堵口工程。荷兰西南部的大风和海潮泛滥成灾，损失严重。在修复治理工作中，为了保护滩地不受水流冲刷的危害，在 1957 年首次采用人工编织的土工织物垫层，同时也采用尼龙袋充填砂土作为压重。1958 年美国在佛罗里达州大西洋海岸的护岸工程中，首先采用有纺织物代替传统的砂砾石滤层。1968 年法国首先生产无纺（非织造）土工织物，并在 1970 年首次用于法国的堤坝工程建设中，以无纺织物包裹坝下游的集水管中的粗粒材料，起到反滤作用。在 1971 年首次出现土工织物片状排水体，铺设在堤坝的底部起加筋作用和用土工织物作加筋挡墙的实例。1972 年在临时性道路建筑中首次采用土工织物隔离地基土与粗粒填料。

泡沫塑料在 20 世纪 60 年代就有在道路工程中作为隔热材料的应用实例。但直到 1972 年才首次用泡沫塑料的质轻特点在道路工程中起到减荷作用。

以上这些首创性的土工合成材料成功的应用，配合生产上的发展和技术上的改进，极大地推动了土工合成材料的全面日益扩大的应用。

随着土工织物和土工合成材料的应用发展，1977 年在巴黎召开了第一届国际会议，而 2002 年在法国尼斯（Nice）召开的国际土工合成材料会议已是第七届。1980 年美国 Koerner R. M. 关于土工合成材料的第一本专著问世，至 1998 年已是第 4 版。1983 年国际土工合成材料协会（International Geosynthetic Society，简称 IGS）成立。其后，出现了一些关于土工合成材料的期刊、杂志和时事通信，这些都标志着土工合成材料已作为一种新材料在岩土工程等领域确立了自己的地位。与此同时，各国制定和不断补充关于土工合成材料试验和应用的标准，例如国际标准化组织（ISO）、美国（ASTM）、英国（BSI）、法国（NF）、德国（DIN）、日本（JIS）和澳大利亚（AS）等。

土工合成材料在我国的应用也可以追溯到 20 世纪的 60 年代，例如，北京市东北旺农场南干渠使用聚氯乙稀土工膜防渗。有纺织物首次应用的成功实例，是

在 1974 年江苏省江都县嘶马长江的护岸工程。该工程采用聚丙烯编织布, 聚氯乙烯绳网和混凝土块组成整体沉排, 防止河床冲刷。无纺布作为隔离材料, 1981 年铁路部门首先应用于防治“翻浆冒泥”现象。无纺布作为反滤材料, 1984 年首次成功地应用于云南麦子河工程大坝上。1983 年铁路部门在广茂铁路路基中第一次采用了土工织物铺设在软土地基表面, 增加了路堤的稳定性。

1984 年我国成立了土工织物技术协作网, 不久有关产品测试和工程应用的手册相继问世。1986 年在天津召开了我国第一届土工织物学术交流会, 2004 年在西安召开了第六届全国土工合成材料学术会议。1994 年协作网正式改名为“中国土工合成材料工程协会”。在 1998 年我国的防洪抢险中土工合成材料发挥了很大的作用, 并得到政府的大力推广, 其后出现了不少“示范工程”、规范和专著, 对土工合成材料应用和研究促进很大, 有些被列入本书的参考文献中。

应特别指出的是, 不同产品的生产商(厂家)坚持不懈地努力拓宽了应用的范围, 他们的产品、设计和施工指南, 以及建立的网站, 对土工合成材料的推广应用功不可没。

实际上, 土工合成材料的应用和聚合物材料的研制息息相关, 也只有当某种聚合物材料商品化后, 才能真正用于工程实践。聚合物的种类繁多, 但用于制造土工合成材料产品的聚合物主要只有聚乙烯和聚丙烯等少数几种。各种聚合物的用量可大致根据它们的产量来推算, 例如, 美国塑料工业协会(SPI)统计的 1995 年美国各种塑料的产量, 其中产量最大的一些塑料依次排列于表 1-1。

表 1-1 美国 1995 年各种塑料的产量排序 (引自: Koerner, 1998)

排序	产品名称	英文名	代号	产量 (MN)
1	低密度聚乙烯	Low Density Polyethylene	LDPE	57342
2	聚氯乙烯	Polyvinylchloride	PVC	54712
3	高密度聚乙烯	High Density Polyethylene	HDPE	49889
4	聚丙烯	Polypropylene	PP	48460
5	聚苯乙烯	Polystyrene	PS	25169
6	聚酯	Polyester	PET	16843
7	聚酰胺(尼龙)	Polyamide	PA	4539

岩土工程的发展历来倚重于材料和设备的进步, 土作为散粒体客观地需要一种二维连续的材料改善它的工程特性, 于是土工合成材料应运而生。

目前, 土工合成材料的应用发展已具备很多有利的条件:

- 1) 应用和设计理论已相对成熟, 并建立了相应的测试、设计和施工规范。
- 2) 科技的进步已能生产符合各种工程要求的价格合适的专门产品。
- 3) 已有大量成功应用的实例, 并得到有组织的宣传推广。

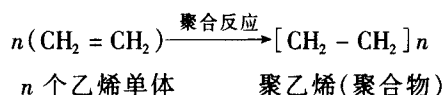
需要进一步努力的是，在有关的工程技术人员中普及土工合成材料的应用知识，变陌生为熟悉。其中很重要的一条是在高等学校中开设相应的课程。据估计，目前在科技进步的国家有 75% 的土木工程系毕业生具有初步的应用土工合成材料的知识，并开设土工合成材料的专门课程。我国的高等教育中也正在努力进行同样的普及教育工作。

## 第二节 聚合物简介

聚合物是土工合成材料的主要原料，下面将介绍聚合物的概念、种类及影响其性能的因素。

### 一、聚合物的基本概念及其命名

人工合成聚合物是由一种或几种低分子化合物通过化学聚合反应以共价键结合而形成的高分子化合物，其分子量一般高达数千到几万。煤、石油、天然气、石灰石以及一些有机物如棉籽壳、玉米芯等原始材料经过加工提炼得到乙烯、丙烯、苯等低分子化合物。聚合反应是大量小分子结合成链状或网状大分子的反应。通常将简单化合物称为单体，单体分子经聚合反应先变成高分子化合物的结构单元，然后形成聚合物。例如聚乙烯由乙烯单体聚合而成，其表达式为



$n$  为聚合物所含的重复单元的数目，因聚合物形成时每一分子的分子量不是固定的， $n$  只是一个统计上的平均值。聚合物是由不同分子量的分子组成的同系混合物，一般为无定形物，有晶体共存，但很少全部为晶体。

第一个出现的聚合物可能是酚醛树脂，它是美国 General Bakelite 公司于 1909 年通过化学反应合成的第一种塑料。到了 20 世纪 30 年代聚合物才开始发展，1939 年美国杜邦公司发现了尼龙并很快投入了工业化生产，出现了第一种大规模生产的合成纤维。同年英国 ICI 公司合成了低密度聚乙烯。其后，随着石油化学工业的发展，人工合成聚合物的品种和产量得到了蓬勃的发展，逐渐与金属和混凝土一起成为最重要的材料。

聚合物主要是根据其化学组成来命名，例如由一个单体聚合而得到的聚合物，其命名法是在单体名称前加一“聚”字，如聚乙烯，聚丙烯，聚氯乙烯，聚苯乙烯等。大多数烯类单体的聚合物均按此法命名。由两种或两种以上的单体经聚合反应得到的聚合物，例如丙烯腈-苯乙烯聚合物可称为腈苯共聚物。具体品种有其他的或商品上的名称。例如尼龙(商品名)为聚酰胺中的一大类。我国还习惯以“纶”字作为合成纤维商品的后缀字，如锦纶(尼龙-6)，腈纶(聚丙烯

腈), 氯纶 (聚氯乙烯), 丙纶 (聚丙烯), 涤纶 (聚对苯二甲酸乙二酯) 等等。

在实际应用时, 聚合物还采用代号 (英文缩写) 代表其名称, 参见表 1-1。在表 1-2 中再给出土工合成材料中其他常见的聚合物代号。

表 1-2 常见聚合物的代号

名 称	英文名称	代 号
氯化聚乙烯	Chlorinated polyethylene	CPE
氯磺化聚乙烯	Chlorinated Sulphured Polyethylene	CSPE
极低密度聚乙烯	Very Low Density Polyethylene	VLDPE
线性低密度聚乙烯	Linear Low Density Polyethylene	LLDPE
极软聚乙烯	Very Flexible Polyethylene	VFPE
线性中密度聚乙烯	Linear Medium Density Polyethylene	LMDPE
柔性聚丙烯	Flexible Polypropylene	FPP
聚烯烃	Polyolefin	PO
聚丙烯腈	Polyacrylonitrile	PAN
聚氨酯甲酸酯	Polyurethane	PUR
氯丁橡胶	Chloroplene Rubber	CR
顺丁橡胶	Butyl Rubber	BR
异丁橡胶	Isobutylene Rubber	IR

## 二、聚合物的分类

### 1. 按其性能分类

聚合物按性能分为塑料、纤维和橡胶三大类, 此外还有涂料、胶粘剂和合成树脂等。

(1) 塑料 在一定条件下具有流动性, 可塑性, 并能加工成形, 当恢复平常条件 (如除去压力和降温), 则仍保持加工时形状的聚合物称为塑料。其中又分为热塑性塑料和热固性塑料两类。热塑性塑料是指在温度升高后能够软化并能流动, 当冷却时即变硬并保持高温时形状的塑料, 而且在一定条件下可以反复加工定形, 例如聚乙烯、聚丙烯和聚氯乙烯等; 热固性塑料是指加工成形后的塑料在温度升高时不能软化、其形状不变的塑料, 例如酚醛树脂, 脲醛树脂等。

(2) 纤维 长度大于直径 1000 倍以上而又具有一定强度的线形或丝状且直径很小的聚合物称为纤维。重要的合成纤维品种有: 聚酯纤维, 如涤纶; 聚酰胺纤维, 如尼龙 66; 烯类纤维, 如腈纶, 维尼纶等。

(3) 橡胶 在室温下具有高弹性的聚合物材料称为橡胶 (又称为弹性体)。在外力作用下, 橡胶能产生很大的应变 (可以达到 1000%), 外力除去后又能迅

速恢复原状。重要的合成橡胶品种有顺丁橡胶、氯丁橡胶、硅橡胶等。

以上是从性能上的分类。就其原材料来说可以是相同的，例如聚氯乙烯可以制成为塑料产品、纤维和类似于橡胶的制品。

产生以上性能差别的原因是这些聚合物的分子间的作用力不同，其中以橡胶的分子间吸引力为最弱，纤维的分子间吸引力最强，而塑料则介于两者之间。

## 2. 按其键结构分类

键结构是指高分子本身的结构，即原子在分子中的排列运动情况。聚合物根据其主键的几何形状一般分为：

(1) 线形聚合物 它是指每个重复单元仅仅和另外两个单元相连接的聚合物。每一个分子链为一独立的单位，尽管有时也有短的分枝，但分子链之间没有任何化学键连结。因此它们柔软有弹性，分子键之间易于产生相互位移，可以热塑成各种形状的产品，为热塑性聚合物。这一类聚合物很多，如无支化的聚乙烯、定向聚丙烯、聚酯和尼龙等。

(2) 支化聚合物 它是指在主链上带有侧链的聚合物。它可以形成一些较长的支链，如在高温高压下形成的低密度聚乙烯（由于支链的存在降低其密度）在100个碳原子上含有大约20~30个支链，其中包含少量较长的支链。这时它的性能明显地不同于高密度线形聚乙烯。短支链使得聚合物主链之间距离增大，流动性较好，而支链过长则反而阻碍聚合物的流动，影响结晶，降低弹性。总的说来，支化聚合物密度较低，但穿透性能有所增加。

(3) 网状聚合物 它是指一种相互连接起来（又称交联）的支化聚合物。由于分子链通过支链以化学键与其他分子链相连接，其形状不易改变。因而网状聚合物为热固性聚合物，如环氧树脂，酚醛树脂等等。这类聚合物的耐热性好，强度高，形态稳定。

聚合物的结构除了分子链结构外，还包括有聚集态结构。它是指聚合物内高分子与高分子之间的几何排列。主要是指非晶态结构、晶态结构和定向结构，它们是影响聚合物性能的直接因素，将在下文中简介。

## 三、影响聚合物力学性能的因素

聚合物的力学性能不仅和其化学成分有着密切关系，也受其分子量、支化、交联、结晶、取向、添加剂及其加工工艺程序等的极大的影响。相同材料的力学性能又和其试验时的条件，如温度、湿度、加荷条件、加荷速度等有关。

聚合物的力学性能和聚合物的分子链的主价键（共价键），分子间的作用力（范德华力）有着密切关系。有些材料取决于主价力（如高分子链的断裂），有些材料取决于次价力（如高分子间的相对滑动），视哪一方面是薄弱环节而定。所以增加聚合物的极性或产生氢键可以使强度增高，例如，高密度聚乙烯的抗拉强

度为 12~45MPa；而聚氯乙烯因有极性集团，抗拉强度可达 35~56MPa。同一品种的聚合物，影响其力学性能的因素有：

### 1. 分子量

聚合物的分子量对其力学性能起着决定性的作用。当分子量小时，分子数增加，分子端点的薄弱环节增加，分子间相互作用的次价键就少，因而分子间相互作用力就较小。例如超高分子量（200~300 万）的聚乙烯的冲击强度比普通的低压聚乙烯（分子量 10 万）的冲击韧度增加一倍以上。

### 2. 结晶

高聚物的许多力学性能明显受结晶度的影响，如屈服点、强度、模量、硬度等都随结晶度增加而提高；断裂伸长率、抗冲击性能则下降。聚丙烯的非晶态结构含量（体积分数）从 2% 提高到 6.4%，其抗拉强度从 34.5MPa 下降到 29MPa。结晶度增加使聚合物变硬变脆是由于晶体中分子链排列紧密有序（即结晶化）程度提高，空隙小，分子间作用力增强，链段运动困难造成的。又如结晶度高的高密度（因排列较整齐）的聚乙烯的强度大于结晶度低的低密度聚乙烯，且弹性模量显著增大。除了结晶度外，球晶的大小对聚合物性能影响也很大，超过了结晶度的影响，大的球晶一般使伸长率和韧性降低。

### 3. 取向

聚合物的取向可分为分子取向和晶粒取向两大类。分子取向是指高分子链或链段朝着一定方向占优势排列的现象。远程无序的无定形聚合物的取向即属分子取向。晶粒取向是指晶粒或某晶面朝着某个特定方向占优势排列的现象。聚合物的取向是在拉伸过程中（如在纤维和格栅生产中采用的）或在流动过程中（如注塑成形）形成的。取向对聚合物力学性能的最为突出的影响是使材料在取向方向的强度大为增加，但同时伸长率却降低很多，而且在垂直方向的强度会有所降低，形成强烈的各向异性特性。所以对合成纤维和格栅可以采用单轴取向，只提高拉伸方向的强度；对薄膜则需要双轴拉伸，减少各向异性的程度。取向是一个分子或晶粒趋向排列整齐的过程，而热运动则刚好相反是使排列无序，称为解取向。所以，在聚合物经过拉伸处理取得了高强度后再来一个热处理（又称热定型）工序，适当地解取向，达到既增加强度又增加弹性的目的。

### 4. 添加剂

在聚合物的生产和使用时常需在原材料中掺入一定数量的其他原料，称为添加剂（或助剂），以改变它们的加工或使用性能。例如添加增塑剂使流动性较差的聚氯乙烯易于加工。掺加增强剂（炭黑和纤维等），可以提高橡胶的强度。无定形硅橡胶在增强后，其强度可以增加 40 倍。热塑料可以采用合成纤维、玻璃纤维和碳纤维等作为增强剂形成比钢材强度还要高的纤维加筋塑料，例如玻璃钢。聚合物抗老化的性能较差，需添加稳定剂，例如在聚乙烯中添加 2%（质量



分数)的炭黑(早期常用的稳定剂),可以使抗老化能力提高30倍。

### 5. 加工方式

聚合物的性能不仅和其原材料的性能有关,同时也和生产过程及其工艺有着密切的关系。例如格栅是否在生产过程中经过拉伸定向,对它的抗拉强度影响极大。又如同样的原材料经过不同制造方式形成的有纺织物和无纺织物,两者的性能就有很大的差别。

聚合物材料本身具有粘弹性特点,在不变拉伸荷载的作用下,拉应变不是惟一的,随荷载的作用时间不断发展,即具有蠕变性。另有一个重要的指标,玻璃化温度( $t_g$ ),影响聚合物的蠕变特性, $t_g$ 是指非晶态聚合物从玻璃态向高弹态转变的临界温度,不同聚合物的 $t_g$ 是不同的。例如,PET的 $t_g$ 约75℃,PP的 $t_g$ 在-10~15℃,HDPE的 $t_g$ 约-80℃。当聚合物的环境温度低于其 $t_g$ 时,聚合物中的非结晶区的分子处于冻结状态,分子键不易移动,蠕变性低,故聚酯的蠕变性远低于聚丙烯和聚乙烯。

## 第三节 土工合成材料的类型和应用

### 一、土工合成材料的产品类型

土工合成材料的生产基本上来源于塑料工业,也就是说,采用的主要原料是聚合物,尽管有时也会用到玻璃纤维、橡胶和一些天然材料。其家族成员目前主要有土工织物(geotextiles)、土工膜(geomembranes)、土工格栅(geogrids)、土工网(geonets)、土工复合材料(geocomposites)及土工-其他材料(geo-others)。

#### 1. 土工织物

土工织物是采用编织技术生产的透水性土工合成材料,成布状,故俗称土工布。主要特点是重量轻、整体连续性好、施工简便、抗拉强度高、耐腐蚀。土工织物又分为有纺土工织物(woven geotextiles)和无纺土工织物(nonwoven geotextiles),前者由单丝或多股丝织成,或由薄膜切成的扁丝编织而成;后者由短纤维或喷丝长纤维随机铺成絮垫,再经机械缠合(针刺)或热粘,或化学粘合而成(参见文前彩图1和2)。

#### 2. 土工膜

土工膜是土工合成材料的主要产品之一(文前彩图3、4),具有极低渗透性的膜状材料,渗透系数为 $1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-13} \text{ cm/s}$ ,实际上几乎不透水,是理想的防渗材料。与传统的防水材料相比,土工膜具有渗透系数低、低温柔性好、形变适应性强、重量轻、强度高、整体连接性好、施工方便等优点。由于其透水性极低,其主要功能是防渗和隔离。土工膜主要应用于液体或垃圾填埋设施的覆盖层或衬垫,作为液体或气体的一种隔离屏障,在水利上主要用于水库和堤坝的防