

T

UGONGHECHENGCAILIAO
YINGYONGJISHUZHISHI

土工合成材料 应用技术知识

王正宏 包承纲 崔亦昊 窦宝松 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

TUGONGHECHENG CAILIAO
YINGYONG JISHU ZHISHI

土工合成材料 应用技术知识

王正宏 包承纲 崔亦昊 窦宝松 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要是为配合《水利水电工程土工合成材料应用技术规范》而编写。基本上按原规范的编排顺序,回答或解释各章中读者可能存在的问题。鉴于这些问题在水利水电以外其他行业的相应规范中也同样存在,故本书内容同样可作阅读其他规范的参考。为了扩大视野和了解土工合成材料应用新进展,增补了第8章、第9章和各章中所编入的新内容。

本书为一本通俗读物,看重实际的工程应用,故适用于水利工程的设计和施工人员,也可供高校土建专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

土工合成材料应用技术知识/王正宏等编著. —北京:
中国水利水电出版社, 2008
ISBN 978-7-5084-5777-2

I. 土… II. 王… III. 土木工程—合成材料—应用
IV. TU53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 111092 号

书 名	土工合成材料应用技术知识
作 者	王正宏 包承纲 崔亦昊 窦宝松 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 14 印张 332 千字
版 次	2008 年 9 月第 1 版 2008 年 9 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	45.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

目 录

1 概述	1
1.1 编写说明	1
1.2 土工合成材料发展简史	2
1.3 中国土工合成材料 20 年	4
1.4 展望	11
参考文献	12
2 名词、术语及土工合成材料	13
2.1 名词、术语	13
2.2 土工合成材料	13
2.3 土工合成材料产品	17
3 材料及其性能测试	30
3.1 材料的老化与防老化	30
3.2 材料性能测试	31
3.3 土工膜的渗透试验——WVT 法	37
3.4 材料的允许抗拉强度	39
3.5 蠕变极限强度 T_{CR}	41
3.6 土工合成材料膨润土垫 GCL	42
3.7 材料的基本功能和工程应用	45
参考文献	49
4 反滤和排水	50
4.1 有关反滤准则的补充说明	50
4.2 影响织物滤层设计的因素	53
4.3 织物反滤与粒料反滤的区别	55
4.4 土工织物淤堵及防淤堵措施	57
4.5 混合(复合)反滤层的设置	59
4.6 土工织物排水	59
4.7 土工织物排水设计实例	62
4.8 地下埋管排水和地面侵蚀控制	65
4.9 控制无纺土工织物渗滤性因素的新概念——“缩颈数”	68

4.10 小结	70
参考文献	72
5 防渗	73
5.1 土工膜防渗设计和施工中的关键问题	73
5.2 土工膜防渗层结构型式	75
5.3 土工膜防渗层的渗漏	77
5.4 土工膜的厚度	80
5.5 土工膜的施工要点	81
5.6 土工膜的耐久性	84
5.7 土工合成材料膨润土垫 GCL 在防渗中的应用	87
5.8 土工膜在防渗工程中的新应用	89
参考文献	91
6 防护	92
6.1 土工合成材料用于防护结构的特点	92
6.2 软体排	93
6.3 铰接联锁块软体沉排	98
6.4 土工箱笼	99
6.5 土工模袋	102
6.6 土工包容(包裹)系统	104
6.7 土工网垫和土工格室	111
6.8 长江中、下游的护岸工程	112
6.9 利用土工合成材料防治道路反射裂缝	117
参考文献	118
7 加筋与加固	119
7.1 加筋机理浅论	119
7.2 柔性筋材与刚性筋材加筋土挡墙	121
7.3 墙顶超荷载引起的土压力和水平推力	121
7.4 偏心荷载时地基承载力验算	123
7.5 对软土地基加筋计算的讨论	124
7.6 低透水性土填料的加筋土挡墙	124
7.7 模块式加筋土挡墙设计	129
7.8 加筋土坡设计	138
7.9 加筋土挡墙设计的 DIBt 法	144
7.10 土工格室及其加筋应用	149
7.11 纤维土	158
参考文献	162

8 土工包容系统	164
8.1 概述	164
8.2 土工袋	164
8.3 土工管袋	169
8.4 土工包	177
8.5 土工箱笼	185
参考文献	187
9 土工合成材料在废料填埋场中的应用	188
9.1 废料及其处理	188
9.2 填埋场的排液排气问题	188
9.3 填埋场系统的结构	188
9.4 用于填埋场的土工合成材料	193
9.5 城市垃圾的主要成分和性质	194
9.6 填埋场设计	194
参考文献	196
附录 土力学有关基础知识	197



1.1 编写说明

本书是为了配合《水利水电工程土工合成材料技术规范》(SL/T225—98)(以下简称《规范》)和行将问世的该规范修订稿而编写,是一本导读性的读本。

《规范》于1998年年底经批准颁布,系当年长江、嫩江和松花江特大洪水过后,修复水毁工程急需应用土工合成材料而编制的。此前我国各系统土建单位虽已在工程中不同程度地应用了土工合成材料和技术,但全国还没有一本系统成文的设计和施工准则可供参考和指导。由于规范是在时间十分紧迫的条件下匆忙编制,加之可供参考的技术文献较少和经验欠缺,故成稿条文简要,编制说明亦欠周详,特别是关于施工质量检测和验收标准,无法给出定量规定。《规范》颁布后,为了普及推广,曾在全国范围内组织过数十次的宣贯活动。此后,有关土工合成材料及技术的国家标准和铁道、公路和水运等专业的相应标准陆续问世。此后,中央还组织了10项国家级示范工程,水利部完成了50项部级示范工程。10年来示范工程和各行业结合,土工合成材料的众多工程实践,让相应规范的规定经受到实际考验,积累了丰富的经验,同时也揭示了存在的问题。

如果说,从《规范》发布到现在是一个学习规范、试用规范到检验规范的阶段,现在却应该进入深入评议的时期,弄清楚规范条文的适用范围、相应准则、理论依据、参数确定、施工要求和发现规定中的这样或那样的问题。在许多学术会议和读者的来函来电中,都提出了这类要求;另外,也为了弥补编制时的过分简易和疏漏,编写本书,希望能达到上述的目的。另外,本规范虽然冠有“水利水电工程”的字样,实际上,所有岩土工程包括水利水电工程在内,无非涉及土体的稳定、变形和防排水三个方面的问题,而土工合成材料的应用也正是满足了它们的需要。为此,水利水电工程中应用土工合成材料的原理和方法,对其他行业必然也有效,只是一些构造和细节需要符合各行业的特点,故在本书中为了拓宽眼界,也介绍了部分非水利水电行业的相应内容,如土工合成材料在防止道路反射裂缝和建造固体废料填埋场方面的应用,以及对一些材料新品种的应用介绍,如GCL(土工合成材料膨润土垫)的应用等。此外,还介绍了一些新概念,如控制土工程物渗透性的——“缩颈数”概念,该概念的提出,导致了双层土工织物的生产。

关于本书的编写方式,现作说明如下:

(1) 全书共分9章。前7章的章名和次序与规范的编排完全一致。内容是针对各章中读者对设计和施工各条文可能存在的问题一一加以说明和解释。并且将条文中内容的相应进展给予补充。

(2) 因为本书是《规范》条文的导读, 具有“问”有“答”性质, 故各章的每节都围绕问题单独成文, 一题一论, 不像专著那样系统、连续。

(3) 各节的内容篇幅长短不一, 以说清问题为度。

(4) 全书符号并不统一, 因为是一事一论, 故无碍阅读。

(5) 本书是较通俗读物, 着重实用, 不涉及深入的研究成果。

1.2 土工合成材料发展简史

土工合成材料相对于传统的木材、钢筋和水泥, 是一种新型品种, 有人称之为第四种建筑材料。它是以人工合成的聚合物, 如塑料、合成纤维、合成橡胶等为原材料, 制成的各种类型的用于岩土工程的产品。将它们按设计要求布放在土体内部、土层之间或表面, 可以发挥过滤、排水、隔离、加筋、防护、防渗或包容等功能, 从而解决岩土工程中涉及稳定、变形和防排水等方面的系列问题。为此, 土工合成材料创始人之一的著名专家 J. P. 基劳德 (Giroud) 博士曾赞誉其“可能是岩土工程历史上的一次最重要的革命”。

土工合成材料是随着聚合物的发明和发展以及工程应用需要逐步发展起来的。最早的产品由基劳德和 J. 勃弗梯 (Perfetti) 于 1977 年在巴黎召开的、后来被追认为第一届国际土工合成材料学术讨论会上命名, 他们把透水的这类材料称为土工织物 (geotextile), 不透水的称土工膜 (geomembrane), 所以早期的这类材料统称为土工织物、土工膜和相关产品 (related products)。其后随着新产品的不断增多, 上述统称显然难以确切反映众多产品的内涵, 故于 1994 年在新加坡举行的第五届国际学术讨论会上正式将它们统一命名为土工合成材料 (geosynthetics)。

土工合成材料一词既为产品名称, 也指工程应用技术。就原材料而言, 其中几种的工业化年份如表 1.1 所示。而产品的问世, 最早可能是用于防渗的土工膜; 其后为织造型 (有纺) 土工织物, 它们被用于过滤和加筋, 防止水流对土体的冲蚀; 而现今应用最广的非织造型 (无纺) 土工织物却迟至 20 世纪的 60 年代后期才在欧洲问世。由于无纺土工织物的纤维随机分布, 克服了材料明显的各向异性, 既可起过滤作用, 又具有导水能力, 他们的市场化, 给土工织物的应用带来新的生命, 使其应用领域迅速扩大。继后由二种或更多种单一产品组合成的土工复合材料 (如土工织物和土工膜合成的复合土工膜等) 和为专门用途开发的土工特种材料 (如用于加筋的土工格栅、用于护坡的土工模袋等) 陆续研发, 构成了现今市场相当广阔的土工合成材料大家族。

表 1.1 几种聚合物原材料的工业化年份

材 料 名 称	工 业 化 年 份	生 产 厂 家
聚氯乙烯 (PVC)	1931	BASF (德国)
聚苯乙烯 (PS)	1935	Dow Chemical (美国)
低密度聚乙烯 (LDPE)	1939	ICI (英国)
尼龙 66 (PA-66)	1939	Dupont (美国)
尼龙 6 (PA-6)	1943	BASF

续表

材 料 名 称	工 业 化 年 份	生 产 厂 家
聚酯 (PET)	1949	ICI
高密度聚乙烯 (HDPE)	1956	Hoechst (德国)
聚丙烯 (PP)	1957	Montecatini (意大利)

土工合成材料开始应用于岩土工程的确切年代已难以考证。下面仅列举些早期有里程碑意义的工程项目，供读者大致了解其发展进程和预见其开拓前景。

大致在 20 世纪 30 年代末，聚氯乙烯土工膜首先被用于游泳池防渗，大量的防渗薄膜得到应用。美国垦务局 1953 年在渠道上用聚乙烯膜防渗；1957 年开始用 PVC 膜；前苏联也较早地用低密度聚乙烯膜做渠道防渗；1992 年意大利 174m 高（1964 年建成）的 Alpe Gera 混凝土坝在修理时甚至用厚 2.2mm 的 PVC 土工膜固定于坝的上游面作为防渗层。

1958 年 R. J. 巴雷特 (Barrett) 将聚乙烯织物铺放在美国佛罗里达州的海岸块石护坡下作保护垫层，被公认为是应用土工织物的开端。1952~1953 年的巨大风暴使荷兰蒙受灾难性的生命、财产损失，牺牲生命 1800 余人。灾后为了修复莱茵河、迈斯河和谢尔德沿海岸海堤，开始了著名的三角洲工程。一反以往采用编扎柳排的办法，大量使用了以宽尼龙袋、手工编织的初期土工织物。据估计，该项目共采用了约 1000 万 m^2 的土工织物，大大促进了该种材料的应用。1968 年荷兰人获得专利，研制成以双层土工织物，在一定距离处加以缝合，可在现场作为模板，往其中充灌混凝土的产品，即现今所称的土工模袋。1968 年美国首先将其应用于高 17m 的 Allegheny 水库上作护坡。

1968 年美国联邦公路局 (FHWA) 将土工织物铺于沥青路面上，用于防止反射裂缝。同年英国 Netlon 公司推出聚乙烯土工网，用于减轻围堤受动荷载与暴雨的破坏，是将短土工网水平向置于边坡的近坡面处，以便于坡面上的有效压密，和防止软土发生底面滑移。

1968 年法国 Rhone-Poulenc 公司首创无纺土工织物，它大大拓展了土工织物的应用范围。国际有名厂家生产了 Bidim 无纺土工织物系列。1970 年法国 Vacros 坝即采用了质量为 $300g/m^2$ 的无纺土工织物作为土坝下游的排水反滤层，用厚一些织物铺在上游乱石护面下作保护层。同一时期英国 ICI 公司生产的另一种以热粘法制造的薄层 Terram 无纺织物系列，初次用于道路工程中粗粒料与地基土之间作为隔离层。

至 1973 年，人们已经认识到土工织物的三种基本功能：隔离、过滤和加筋。不久后，又确认了它们的排水功能。

随着土工合成材料应用领域的不断扩大，产品制造技术也迅速提高，除土工膜与土工织物外，不同类型的产品相继进入市场。例如研制成了多种新产品：20 世纪 80 年代初英国 F. B. 穆塞 (Mercer) 研制成由 Netlon 公司生产的 Tensar 土工格栅系列，至今仍是土加筋应用的主要材料；70 年代末生产出的塑料排水带是根据 1937 年克界曼 (Kjellman) 提出的排水纸板概念改进而成的可加速软土排水固结的材料，现已广泛替代传统砂井或袋装砂井用于软土地基处理。三维土工网垫是以热塑性树脂为原料，并挤出成网、拉伸、复

合成型的三维结构，铺于坡面，保护草籽不受风吹雨冲，助草生长的产品，已广泛用于护坡和美化景观。土工管袋内充泥沙用于岸滩防护，围垦筑堤，兴建人工岛等，为土工合成材料增添了包容功能。膨润土垫（GCL）是后期研制成的另一种防渗材料，在垃圾填埋场建设中得到了广泛应用。以上仅是少量属于复合土工合成材料和特种土工合成材料的举例。复合土工合成材料是当前发展的主流。

土工合成材料及其技术的快速发展有赖于理论研究、生产技术提升和广泛的国际交流。对此，国际组织和学术活动起到了重要促进作用。虽然早在 1977 年在巴黎和 1982 年在美国 Las Vegas 已召开过第一届和第二届国际土工合成材料学术讨论会，但国际土工合成材料学会（IGS）却于 1983 年 11 月方告成立。此后基本上每隔 4 年举行一次国际学术讨论会，先后有维也纳（1986 年）、海牙（1990 年）、新加坡（1994 年）、亚特兰大（1998 年）、里斯（法国，2002 年）和东京 2006 年，每届会议都出版了正式的会议论文集。此外，IGS 下还有地区性学会，如亚洲、欧洲、北美洲、南美洲等学会。亚洲学会曾在班加洛（印度，1995 年）、科伦坡（2000 年）和首尔（2004 年）分别举办过第一至第三届亚洲学术讨论会，已决定在 2008 年在我国上海召开第四届亚洲学术讨论会。至 2002 年，参加 IGS 的国家会员已有 21 个，我国的中国委员会（CCIGS）即是其中之一。

1.3 中国土工合成材料 20 年^[1]

20 世纪 70 年代末，中共十一届三中全会确定了划时代的“改革开放”政策，使我国长期与外界隔绝的局面开始改变，为对外科技交流开辟了畅通道路。在国际土工合成材料蓬勃发展的潮流影响下，我国全国性、跨行业的“土工织物科技情报协作网”于 1984 年底在天津成立，它有效地推动了该材料与技术在我国的应用与发展，20 年历程，它们已从襁褓时期逐步进入“而立”之年。回顾分析，成长岁月约可划分为四个时期。

1.3.1 自发应用时期

我国有数千年悠久历史，将植物纤维和草秸等掺入粘土，经立模夯实垒墙修屋的土建技术早为先民们所掌握。史书记载的工程实例屡见不鲜。例如早在 2000 年前，用草木材料于灌溉工程和拦河堵口的技术，至今仍被广泛采用。甘肃省玉门一带仍可见到以砂砾料和柳柴等压叠而成的古长城遗址。而近代以聚合物人工材料取代天然植物的工程在我国则开始于 20 世纪 60 年代。

最初用得较多的是塑料薄膜作渠道防渗。如山东打渔张灌区、河南人民胜利渠、陕西人民引渭工程等。膜材多为聚氯乙烯。以后推广至蓄水池、水库和水闸等。例如 1965 年辽宁省桓仁水电站用沥青聚氯乙烯热压膜，防止了混凝土支墩坝上游面的裂缝漏水。还有河北省子牙新河献县枢纽用粘土塑料薄膜作为进洪闸上游护坦的防渗措施。当时所用薄膜的厚度都较小，膜的接缝大多用胶结。另外，在 20 世纪 70 年代，土工织物已被用于防冲与防护。1976 年在江苏省长江沿岸的嘶马，以聚丙烯扁丝土工织物，结合聚氯乙烯绳网和压重混凝土块，构成软体沉排，成功地保护江岸免受冲塌。70 年代末江都长江芒稻河东岸西闸也用类似的软体排解决了其上、下游地面防冲问题。有意义的是，经过 7 年，从

原位采样检测,土工织物的拉伸强度比初始的只下降了 0.5%~1%。

早期自发应用的特点是无定型规格材料,无材料测试标准可循,设计与施工基本上按既往岩土工程经验,仅个别单位自发应用。这种新材料和技术一时还未被工程界认识,更谈不上被普遍接受。

1.3.2 技术引进时期

十一届三中全会以后,倡导科技在全国兴起。从 20 世纪 80 年代初,科技事业沐浴着改革开放的春风,呈现出蓬勃发展的崭新局面。改革开放方针指引我国在自力更生基础上,加强国际合作与交流,吸引借鉴人类的一切优秀科技成果,博采各国之长。

从 20 世纪 80 年代初,铁道科学研究院首先接受了美国杜邦公司赠送的 2 万 m^2 的纺粘土工织物,这是我国采用正规土工合成材料的开端。我国铁路长期以来存在基床翻浆冒泥病害,严重地影响列车安全和运输能力的提高。从 1981 年起,铁道部选择了几十处路面,以土工织物作为道渣与地基土的反滤隔离层,研究其治理病害的效果,共铺设 26 个工点,历时四五年,防治上述病害的成功率达 90% 以上。在进口产品启发下,由我国纺织院校倡导,开始了迄今用途最广的针刺无纺土工织物的试制与生产。当时国外有些厂商,除杜邦外,还有奥地利林茨、法国罗纳普朗克等公司瞄准市场前景,先后进驻我国。但因进口需以外汇结算,支付困难,故时隔不久他们就不得不知难而退,但我国的非织造织物却由此起步,迅速发展。

利用砂井加速地基排水固结处理软土地基的方法,在我国从 20 世纪 50 年代初即开始应用。但用砂量多,施工复杂。1981~1983 年我国从日本引进了塑料排水带技术。排水带是由塑料芯板,外包薄型无纺布滤膜形成的复合土工合成材料。将连续的排水带用插带机埋入地基内,可代替传统砂井,快速排出软土中的多余水量,提高土强度。第一航务工程局科研所、华东水利学院(现河海大学)和天津港务局合作,采用了国产化的排水带,首先在天津新港进行现场试验。与此同时,也研究开发了插带机,由轨道式的改进为履带式的。当时,国内正在采用砂井经改进后的袋装砂井,即用有织物缝制成的 $\phi 70\text{mm}$ 的细长管袋,灌满砂料代替较粗砂井(一般为 $\phi 200\sim 400\text{mm}$),可节约大量砂料。与其相比,排水带是工厂制造,根本无需砂料,优点十分明显。排水带技术首先在天津新港东突堤建设中获得大规模应用,该处地层为深厚超软泥,当时用此法处理的地基有 48 万 m^2 。另外还有 2.6 万 m^2 的地基,在利用排水带同时,结合真空抽气法施加预压荷载,即以塑料薄膜封闭处理区,抽去膜下地基内空气,利用膜上下气压差作为荷载,可利用压差达到了 80kPa,这样可更多地消除地基后期沉降。据报道,至 1987 年用此法加固的地基已达 150 万 m^2 ,1988 年排水带用量超过 1000 万 m 。

土工模袋是用双层高强度尼龙材料编织物缝制成的连续袋状产品,用高压泵将混凝土或水泥砂浆充入袋内,固化后形成连续坚硬板块,主要用于保护土坡。为使板块达到要求厚度,在两层织物之间,每隔一定间距,系以要求长度的高强尼龙绳。因织物代替了混凝土模板,产品因而得名。

土工模袋于 1983 年从日本引进我国。随即在江苏省泰州船闸引航道、通沙汽渡停泊区和南官沙航道上获得应用。江苏省无锡毛纺织染厂最早仿制日本旭化工业株式会社产品

进行试制，力学性能达到或超过了日本产品。至 20 世纪 80 年代末，我国即有七八个省的十几项护岸护底工程成功地应用了国产土工模袋。特别值得一提的是 1988 年在浙江省海宁的钱塘江口的强涌潮区海塘护岸工程中得到成功应用。施工期间，测得最大流速曾达 8.3m/s，相应的水流压力为 34.4kPa。在该工程中，为了防止模袋下可能因淘刷而架空，导致刚性板块断裂，将整体模袋分隔成许多长方形小块体，并将它们用高强锦纶绳相互连接，混凝土浇注后形成铰链式混凝土块排。

为了节省投资，简化施工，吉林省水利科学研究所参照模袋技术要求的基础上，用 14×14PP 编织型土工织物自制了简易土工模袋，在嫩江堤防上，一次就采用了土工模袋近 20 万 m² 作护坡工程。之后又用简易模袋在夹津沟上建起了三座丁坝。

土工格栅是一种良好的加筋材料。是在挤压成型的聚合物板上冲孔，再在拉伸机上单向或双向拉伸，促使分子定向，而形成的带长孔或方孔的平面板栅，分别称单向格栅及双向格栅。格栅具有拉伸强度高、伸长率低的特点。该产品由英国 Netlon 公司于 1982 年首创，以 Tensar 品牌闻名于世，我国于 1983 年引进该产品，首先在阳安、京秦和大秦等铁路线上用于加筋陡坡路堤。而后，我国一些制造厂和地方曾考虑购进 Tensar 制造设备，终因英方索价太昂，未能成交。直至 20 世纪 90 年代中期，我国方自制成功生产设备，才大量有产品问世。不过 Netlon 公司的土工网制造机械较为廉价，当时先后引进生产线数条，用于应力水平较低的加筋工程和边坡护面。虽然一时应用土工格栅的工程较少，但加筋技术却开始兴起。例如 1998 年北京亚运村主要交通的安慧立交桥的 16 座桥台，是用编织型土工织物建成。重庆长江滨江路的岸壁加筋采用的是加筋带，高度达 12~22m。

虽然防渗材料的土工膜和土工织物涂塑薄膜早在 20 世纪 60 年代已开始应用，但属于排水输水的管材于 80 年代初才从国外引进。这种低压输水管铺设时可少占耕地，短途输水方便，受到井窖地区农民的欢迎。管材为 PVC 或 PE，分地面软管和埋地式硬管，后者外护夯实土、土和水泥土等。由于低压管的投资小，在我国北方水源紧缺地区得到迅速推广，逐渐向南方扩展。

在土工合成材料技术逐渐被人们认识和开始进入土建工程的这一时刻，经我国老一辈岩土专家和时任河北省政协副主席、省水利厅副厅长的刘宗跃先生等共同倡导和岩土力学泰斗黄文熙、卢肇钧院士的鼎力支持，于 1984 年成立了全国性的“土工织物技术情报网”，至 20 世纪 80 年代后期，已拥有 300 多个会员单位。协作网团结了全国有识之士广泛交流信息，沟通技术，普及科技，组织学术活动，着力普及推广。很快于 1986 年和 1989 年分别在天津和沈阳组织召开了全国第一届和第二届土工合成材料学术会议，参会人数空前众多，达到四五百人。两届会议都出版了会议论文集。第一届会议还有法国、英国、奥地利和日本专家参加，发表的论文，不仅检阅了国内科技成果，也有助于开阔视野，洞察世界。我国还于 1986 年和 1990 年派员参加了在维也纳和海牙召开的第三、四届由国际土工合成材料学会（IGS）主持的国际学术会议，开始与国际学会接触。协作网组织了这些会议论文的选译。在国内又先后在水利学会（1987）与水力发电学会（1988）下成立学术团体。

在这一时期内，由于从业人员的不断实践和受国外新技术引进的启发，土工合成材料

无论在应用、科研或产品制造等方面都取得可喜进展。现简要举例如下：

(1) 在产品制造方面：除少数特殊用途的材料外，一般材料已能满足国内工程需要，甚至供过于求。并已研究了针刺无纺布物的梳理、成网、针刺的加工条件和原料规格的优选；研制机织扁丝土工织物和防老化、防静电和防滑移土工织物的试制；防老化 PP 土工织物的研制和应用；试制成强度好的土工织物拼接用粘合剂，它们也可用于与混凝土或木材等粘接；制造复合土工膜等。

(2) 在测试技术方面：自制了各种材料性能指标和功能指标的测试设备和方法，但未有统一标准。研究了织物等效孔径测试方法的标准化、界面摩擦试验设备、方法和影响因素、条带拉伸试验的尺寸效应、不同撕裂试验方法的成果对比以及对纤维土的试验研究等。

(3) 在设计方法和机理探讨方面：提出了按织物孔径、结构、透水性和水力梯度等的无粘性土的反滤准则；讨论了梯度比防堵准则的合理性；分析了地基土翻浆冒泥机理和对策；研究了织物切断土中毛细作用的原理；探讨了道路加筋和防止路面反射裂缝的机理和方法；研究了以土工膜整治膨胀土；用有限元法作加筋设计以及在离心模型机上研究加筋作用等。

(4) 在技术教育方面：多所较著名的工科院校如清华大学、天津大学、浙江大学、武汉大学、河海大学等都开设了土工合成材料的选修课，并有西南交大、北方交大、长沙交通学院、长沙铁道学院、中国纺织大学、天津工业大学和华北水电学院北京研究生部等许多院校培养出了一批工程硕士、博士生。协作网还为积极推广土工合成材料技术的应用编辑出版了专著《土工合成材料工程应用百例》。作为协作网联系全国信息的纽带，从 1984 年 12 月起，开始出版不定期的内部刊物《土工合成材料科技通讯》，至今已经发行了 169 期，对及时交流本专业的动态发挥了重要作用。

1.3.3 与国际接轨和正式建立组织时期

我国在土工合成材料的应用和研究方面，在广度与深度上均以前所未有速度继续前进，取得显著成绩。从发展历史看，成立正式组织，更有标志性意义。

从 1986 年我国首次派代表参加在维也纳举行的国际第三届学术讨论会（IGS 组织）以来，即开始与国际土工合成材料学会（IGS）建立联系，至 1990 年已有国际学会会员 28 人。到 2002 年底 IGS 下属国家会员共有 21 个。我国于 1990 年 5 月经国际学会批准成立了国际学会中国委员会（CCIGS），按时间先后，我国是第 6 个国际会员。经过三四年的申请，原先的“土工织物技术情报网”和水利学会与水力发电工程学会下属的两个学术团体于 1994 年 7 月经水利部批准，一并改为“中国土工合成材料工程协会”，并于 1995 年通过民政部批准，正式成立现今的协会，属水利部领导。这一时期继续开展的重要技术活动举例如下。

土工管袋（geotube）技术于 20 世纪 80 年代首先在荷兰应用。管袋技术是以高强度土工织物缝制成长的管袋，内充疏浚泥沙，待其排水固结后，形成固体状物，用于筑堤，用作围垦造地，形成人工岛，或围成堆放淤泥的场地以及岸边防护等。管直径可达三五米，长度达数十米至百米。多数情况下充灌透水性大的泥沙，脱水快，如天津港、上海金

山湾化工园地、上海船坞、上海陈行水库等新建管袋场都是成功工程，并有创新。充灌细粒淤泥的相对较少，因其脱水时间较长。但我国曾在云南滇池进行过充填淤泥的土工管的试验，形成围埝作为蓄纳疏浚污染淤泥的大面积堆放场，直径 3m、每根长度数十米，也取得较好成果，发现管袋尚有良好的净化水质，防止二次污染的功能。目前滇池疏浚处置污染，还正在以土工管袋建更多围场，解决污泥的堆放问题。它避免挖土和筑堤，保护环境与生态。

草袋填土是传统的防护措施之一。1992 年苏皖一带发生局部洪水，两省群众自发和经推广，使用大量编织型土工织物袋取代草袋，但直至 1996 年才基本上不用草袋，改变了传统的抢险办法。海河水利委员会利用土工织物研制了一整套抗洪方案，至 1998 年发生历史性大洪水时，编织袋才在全国得到推广。编织袋不仅强度高，容土量多，可机械化装土，而且是人工材料，材源广阔。

利用土工膜建垂直防渗墙是我国群众性创新。国外采用的皆是硬质板状的土工锁板 (geolock)。我国山东省、福建省和辽宁省等省创建的垂直铺塑方法，是以自制的开槽机在地基内（按土质条件等选用不同机型）开槽，一般宽 20cm，槽内以泥浆护壁，避免塌壁，再将厚约 0.3mm 的塑料膜卷材垂直向置于槽内，随进程逐渐展开，及时向槽内填土，下部填土最好是透水性低的粘土，填至地表。填土要压实。目前最大铺塑深度可达 15m 上下。防渗效果一般均较好。它在中小型工程中可代替传统混凝土防渗墙，施工简易，费用低廉。

群众性的另一种创新是桩膜围埝。它是施工时的临时挡水坝，在中小型工程中施工应用十分简便。其结构是：先拦河设排桩或钢制桁架。在迎水侧将土工膜或有涂料的有纺织物紧固其上，膜下端有足够长度，向上游伸展，紧贴河床，压以土袋等重物，形成水平防渗铺盖。这种结构施工简便，费用低廉，材料还可回收重复利用。

此外，关于防护用软体排、防止道路反射裂缝、利用土工格室在沙漠地区稳固沙基，利用软式排水管排水以及以土工植被网改善环境与生态的应用都有显著发展。

在此期间，中国土工合成材料工程协会（以下简称协会）于 1992 年在江苏省仪征和 1996 年在上海市分别主持召开了全国第三届和第四届学术讨论会。第三届会议荣幸地邀请到当时的 IGS 主席 R. K. Rowe 教授参加。1994 年协会组织代表参加在新加坡召开的国际第五届学术会议。1995 年底协会成员还应邀出席了在台北举行的第八届道路铺面技术讨论会，会上介绍了祖国大陆土工合成材料在铁路、水利领域的发展动态。

协会组织编写了《土工合成材料工程应用手册》、《土工合成材料测试手册》、《土工合成材料设计指南》和《塑料排水带地基设计规程》(CTAG02—97)等。协会为会员散发了大量的国内外技术资料，无偿地为全国所有有需要的单位提供技术咨询；还经常帮助或参与产品鉴定会、科技成果审查会、论证会、现场会、咨询会、研究生答辩会等。

协会坚持国家政策和利益的原则，帮助企业走上兴业道路，劝阻盲目上新项目；根据国内外的动态和工程需要，指明产品的前进方向；鼓励有序竞争，提倡以质量与技术服务来促销与开拓；积极架设产研桥梁，加强研发力量；努力介绍国外新技术，鼓励产品国产化。协会在会员中享有较高声誉，土工合成材料事业也同时稳健发展。协会密切配合国家建设需要，力尽所能，虽是一个纯民间组织，却受到了政府重视。

为便于社会各方面需求,提供更广泛咨询,1999年在铁道科学研究院建立了信息网站,后迁移至清华大学。由于经费等原因所限,业务未能阔步开展,但毕竟工作已启动。

1.3.4 步入标准化时期

1998年是一个不平凡的年代。当年发生了历史上的特大洪水,我国广大军民同心协力,投身于抗洪抢险的伟大壮举永载史册。就是这一重大事件给土工合成材料的发展带来了历史性机遇:该技术步入了规范化进程。

当时在与洪水搏斗的过程中,土工合成材料发挥了它应有的显著功效。随后国务院领导同志高屋建瓴,数次书面指示要求在汛后水毁堤坝修复中,尽力推广采用土工合成材料,并提高材料质量,降低成本。旋即在国家经济贸易委员会和有关部委领导下,组织力量,着手编制相应的标准与规范,研究新材料,开发新产品。

水利部率先制定了《水利水电工程土工合成材料应用技术规范》(SL/T225—98)。紧接着建设部与国家技术监督局联合组织,以我国协会成员为主的编委会编制和发布了国家标准《土工合成材料应用技术规范》(GB50290—98)。随后又颁布了土工合成材料产品的国家标准《土工合成材料》(GB/T17630~17642—98)。继而适用于有关行业的铁路、公路和水运的技术标准相继问世。此外,水利部和交通部还完成了相应的材料测试标准。还有归口于全国塑料制品标准化技术委员会的约十项产品标准,包括土工膜、土工格栅、土工网、土工格室和土工植被网等标准也先后发布。至此,在1999年的上半年,涉及土工合成材料的产品、设计、施工和测试的系列标准就此初步建立。

其后,为贯彻实施各项标准,开展了一系列的活动。例如在全国各省市举办了数十期的标准宣贯研讨会,讲解标准内容,进行科普宣传,组织示范工程等。水利部开展了50项示范工程,包括堤防、水利枢纽、水闸、病险水库除险加固等,采用的土工合成材料品种多,数量大,如土工织物用量有257万 m^2 、复合土工膜273万 m^2 、土工模袋13万 m^2 和土工格栅、三维植被网等其它材料。铁道、交通和建筑等行业也都完成了一些示范工程项目。这些工程也都检验了各项标准和规范,取得了经验和教训。

此外,为进一步促进土工合成材料的推广应用,还编写了一些科普读物和参考书,例如《堤防工程土工合成材料应用技术》、水利部50项示范工程总结的《水利工程土工合成材料技术和应用》,协会组织编写的《土工合成材料工程应用手册》的修订再版(第二版),和赴全国各地拍摄该材料在各种应用中的现场施工录像。

防洪抢险中虽然已经陆续应用了一些土工合成材料,但总体上几乎仍未脱离“人海战术”,施工方法和工艺均较落后,缺少现代化的机械和设备,效率很低,工程质量检测 and 评定不够规范。根据这种情况,水利部提出了进一步加强土工合成材料在水利工程中的应用研究、开发和推广应用。这个项目于1999年通过了在国家经济贸易委员会的立项,最终确定了21个研究子项目,并陆续完成任务。其中有一些新成果。现简述如下:

(1) 低价高摩擦土工织物防汛袋的研制。

(2) 抢护堤防管涌破坏的应用技术:开发了具有保砂、透水和消杀水势功能的滤垫和以PVC材料制成的装配式围井。

(3) 砂土充填土工织物长管袋筑坝。

(4) 新型土工模袋的应用：特点是灌浆口不固定，可按需要开孔；混凝土从上而下充满。

(5) 软体排抢护（防治）堤身渗漏险情的应用研究；研制成类似于小型机器人的铺排机械，重量轻，机动性好，能水下行走，自动铺排到指定位置，代替人力，减小水下施工风险。

(6) 土工织物新井管及反滤器研制：开发了多种可更换式的过滤器，解决了井管的机械淤堵和化学淤堵问题。

(7) 土工合成材料堤坝设计 CAD。

(8) 土工合成材料检测仪器设备的标准化、系列化：调研总结了国内外测试技术的异同，对国内测试方法的评价，提出系列化、标准化途径，为今后修订测试标准提供科学依据。

(9) 国外土工合成材料应用调研：成果编写成专著和正式出版《国外土工合成材料的应用研究》。

以上成果在拓展土工合成材料应用领域，了解国际动态，促进施工专业化以及加速设计进程诸方面显然起到了积极推动作用。

这一时期我国土工合成材料工程应用相当活跃，涉及各类材料和不同工程类型。从 2000 年底在湖北省宜昌市召开的全国第五届学术会议，发表的论文有 180 篇之多。从论文来看其中占多数的是加筋与加固内容 54 篇，防护与环保的有 24 篇，这个数字反映了当前应用的热点所在，值得专门一提。前已介绍，我国国产化格栅的问世较晚。1998 年第一条国产塑料格栅生产线首先在山东泰安投产，但时隔不久，即发展到 20 多家生产企业。而且在品种上趋于多样化。除了塑料格栅（单向的和双向的），还有经编（warp knitted）格栅和由加筋带（包括钢塑复合带）交叉焊接成的筋带组合格栅。经编格栅由高强度纤维或玻璃纤维编织，再浸以改性沥青而成，它的强度高，模量大，更具有柔性。几种格栅各有其最佳适用范围。例如塑料格栅多用于建造加筋土挡墙和陡坡，它是平板结构，施工便于操作和连接方便。可喜的是，这类格栅的制造在我国已逐步重视原料的合理配方，注意不同原料优选组合成性能最佳的共聚物，重视防老化掺和料碳黑的掺量和粒状，尤其是关于产品的蠕变性能愈来愈受到关注。有的生产厂花巨资建立了设备良好的蠕变试验室，能够根据试验提出量化的蠕变极限强度，因而产品的某些性能指标甚至超过国际名牌，产品已走向国际市场。在当今市场竞争十分激烈，营销不规范的局面下，注意研发力量，以质取胜的经营理念非常值得提倡。经编格栅柔性好，适应地形变化，而且模量高，在道路防治反射裂缝用途中显示其优越性，已获得广泛应用。在此领域，还创新地研制成控制钉和自粘形格栅，更利于施工和保证工程质量。筋带状组合格栅制造工艺简化，并为传统的加筋带开辟了新应用领域，这种材料在房屋地基的加固中已经得到应用，尚待进一步开拓。说到环保与防护，这是个全球瞩目的大课题。我国许多大城市已启动兴建卫生型的现代化垃圾场。故而防渗、防护土工合成材料提上了议事日程。首先是防渗材料的土工膜和土工合成材料膨润土垫（GCL）。GCL 是由土工织物与土工织物或与土工膜间包有膨润土或其它低透水性材料，经针刺、缝接或化学剂粘结而成的一种防水材料。铺放在土工膜之下，作为补充防渗层以阻止垃圾淋滤液外渗的垫层。亦可用作其它工程的阻水层。我国曾从国外

进口,但价格昂贵。我国有丰富的优质钠基膨润土料源,GCL近年来生产发展很快,已有多家生产厂投产,质量满足基本要求。尚要不断提高质量,丰富系列,特别要进一步研究施工工艺。与之配合,国内已能生产宽幅土工膜,宽度达5m以上;垃圾场需要厚度大的土工织物,有的要求达到 $1200\text{g}/\text{m}^2$,正在向该方向努力。近几年土工格室、软式排水管以及排水用土工网也都有数量较大的生产和应用。

学术活动也不断举行。如2000年在著名的三峡工程现场召开了全国第五届学术讨论会,发表论文180篇。有幸邀请到土工合成材料创始人之一的基劳德(Giroud)教授,作了《从有关土工合成材料失败应用中得出的教训》等精辟报告。2001年和2002年又分别在上海、武汉和杭州举行了大型的“全国土工合成材料测试技术研讨会”、“土工合成材料防渗、排水和反滤学术讨论会”和“第一届全国环境岩土工程与土工合成材料技术研讨会”等,以上会议都出版了会议论文集。这些年会之间还多次举行了专题学术讨论会。在国际学术活动方面,1998年和2002年协会分别组团前往美国亚特兰大和法国尼斯参加了IGS主办的国际第六届和第七届学术讨论会。在尼斯会议上,我国发表论文35篇,数量紧次于美国,得到国际好评,这届大会还给我三位会员颁发了2002年奖和1位学生优秀奖,还增补了中国为IGS理事会理事。在此期间又派员分别参加了在吉隆坡(2000)和汉城(2004)召开的亚洲地区第二届和第三届学术讨论会。

发展至今,我国土工合成材料事业总的情况可概述如下:在组织上有中国土工合成材料工程协会(CTAG)和国际土工合成材料学会中国委员会(CCIGS),成员互兼,基本上分管国内和国际技术活动。前者现有集体会员约660个,后者国际学会会员70人和集体会员2家。在协会下分设了防渗透与排水、加筋和测试技术等研究组。有约8省(直辖市)分别成立了省(直辖市)土工合成材料工程协会。为了开展学术活动灵活机动,上海市、浙江省、四川省、西北地区、东北地区各成立了分会。全国生产土工合成材料的专业和兼营厂不少于200家,其中绝大多数是协会会员单位。据不完全统计,全国业已完建的土工合成材料工程项目已在2万项以上。

1.4 展望

土工合成材料的应用范围很广,遍及水利、公路、铁路、港口、机场、环保和城建等领域,可以说,凡是有岩土工程基本建设的场所,都有它用武之地。我国政策是通过抓基础设施建设带动整个国民经济建设。当前难得的机遇,是国家提出了和正在实施的西部大开发战略,贯彻“十五”计划(2001~2005年),着手南水北调工程、太湖流域整治、黄淮工程和港口、交通等建设。如西部开发的西气东输工程2003年下半年启动,投资约1000亿元;中国第二大水力发电站(龙滩)总装机容量540万kW,投资为243亿元;西部铁路建设总投资1270亿元,其中青藏铁路总长1142km,工程总投资262亿元,耗时将6年(目前该工程已大量应用土工格栅加筋土坡和建挡墙)。南水北调东、中、西三线总投资5000亿元,其中东线将有26亿元,建135座污水处理池。在水运方面,“十五”计划新增海港20处、内河码头23处。2005年前航空港要由129个增至150个。此外未来10年,长江上游水土保持和长江三峡周围环保与景观改造工程预计投资200亿元等。如此宏伟蓝