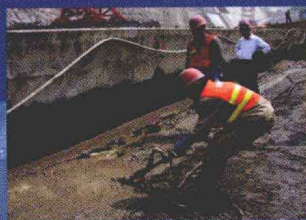


*Basic Application of
Ultra High Toughness Cementitious Composites
in Advanced Engineering Structures*

超高韧性水泥基复合材料 在高性能建筑结构中的 基本应用

徐世焯 李庆华 著



科学出版社
www.sciencep.com

超高韧性水泥基复合材料 在高性能建筑结构中的基本应用

Basic Application of Ultra High Toughness Cementitious
Composites in Advanced Engineering Structures

徐世烺 李庆华 著

科学出版社

北京

前 言

自 19 世纪 20 年代波特兰水泥问世以来,混凝土材料以其卓越的建筑性能成为目前应用最广、使用最成功的结构工程材料之一。近年来,我国建筑水泥用量已达到世界水泥使用总量的 70%,每年有近 20 亿 m^3 的混凝土用于工程,成为我国大型工程建设应用最广泛的基本工程材料。从大型水利水电工程、港口工程、海洋工程、桥梁工程、地下工程、城市建筑工程到核电站工程乃至机械制造业的基础工程,混凝土与钢筋混凝土结构都是最主要的结构形式。

一直以来,混凝土自身材料性能方面存在着诸多的缺陷,如凝结与硬化过程中收缩变形大、抗拉强度低、抗裂能力差、脆性大、极限延伸率小以及抗冲击性差等,给混凝土结构的实际应用带来了许多质量问题。首先,混凝土结构在极端荷载的作用下,如强烈地震、冲击或爆炸荷载,易发生破碎破坏。混凝土结构的这一特性对于大型水库大坝、大型桥梁、核电设施等重要结构的安全性能极为不利。同时,在正常工作荷载下,钢筋混凝土结构易由于混凝土的开裂、剥落而引发钢筋锈蚀及其他相关问题,而导致建筑物服役寿命缩短。这一问题对于大坝泄洪建筑物、跨江海大型桥梁、港口码头、海洋工程设施等恶劣工作环境下的钢筋混凝土结构尤为突出。很多学者认为,混凝土结构裂缝问题是一直未能很好解决的顽症,是影响许多重大工程结构耐久性降低和达不到设计使用寿命的一个突出问题。

材料的创新是土木工程结构领域最带有革命性的根本创新,是学科发展的制高点。高性能混凝土材料是当前国际上的研究热点,已连续召开了 5 届国际学术会议。目前研究趋势已经从传统的被动地研究材料和结构的性能,如断裂性能、抗震性能、可靠性、耐久性,过渡到主动地根据工程需求研究出集多种高性能性质于一身的高性能建筑结构。因此,由包括高性能混凝土在内的高性能结构材料所建造的高性能建筑结构是 21 世纪结构工程学科发展的新方向,对于有效提高钢筋混凝土结构的耐久性和服役寿命具有重要的学术意义和工程应用价值。根据国家对于防灾减灾、节能、环境保护和可持续发展的迫切需求,需要从高性能材料和高性能结构取得新的突破。国家自然科学基金委结构工程学科十二五发展规划中也将高性能结构列为结构工程学科重大项目研究方向。

基础理论的进步导致 20 世纪 90 年代初新水泥基复合材料的重大突破。美国密西根大学 Victor Li 和麻省理工学院的 Christopher K Y Leung 以断裂力学和微观力学原理对材料微观结构进行有意识的设计调整而率先研制了经过设计的水泥

基复合材料 (ECC), 在我国已被正式称为超高韧性水泥基复合材料 (UHTCC)。该材料宏观抗拉极限应变可达到 2%~3%。其抗拉应力应变关系呈现出随应变的增大应力不降低, 即通常讲的应变硬化现象。拉伸过程中多条微细裂纹的形成使材料的宏观拉应变增大 100~300 倍, 断裂能提高近千倍, 使水泥基材料由传统的脆性材料转变为类似金属的韧性材料。由于其优良的应力-应变性能, 该材料在未来土木工程中的应用已引起国内外学者的广泛关注, 并被认为是水泥基结构材料高韧性化的主要途径之一。日本应用该材料对广岛三鹰大坝大面积老化和开裂进行了成功修复。同时日本、美国、欧洲、韩国在许多实际工程包括隧道、铁道、桥梁、高层建筑、车站的新建与修复加固中进行了广泛应用。

有趣的是, 国际上许多研究高性能材料和高性能结构的学者大多同时从事混凝土断裂力学的研究。如国际混凝土与混凝土结构断裂力学协会前主席 Victor Li 教授在美国麻省理工学院任教授的时候就提出了高性能材料 ECC 的设计理念, 后转任密西根大学教授进一步发展了该材料。国际混凝土与混凝土结构断裂力学协会国际科学委员会委员、美国工程院院士、西北大学 Surendra P Shah 教授长期研究纤维混凝土, 最近开始了碳纳米增强水泥基复合材料研究。国际混凝土与混凝土结构断裂力学协会国际科学委员会委员、英国 Cardiff 大学的 Karihaloo 教授最近研究开发了一种抗拉强度为 10~15 MPa、抗压强度为 207 MPa、命名并注册为“Cardifrc”的高性能混凝土。俄罗斯科学院院士、原瑞士洛桑联邦工学院 Wittmann F H 教授也曾担任过国际混凝土断裂力学大会主席, 近年主要研究 SHCC 高性能材料。国际混凝土与混凝土结构断裂力学协会顾问委员会委员、日本岐阜大学 Rokugo 教授在从事混凝土断裂力学研究的同时, 也主要从事超高性能纤维增强水泥基复合材料 (UHPFRCC) 研究。

从 2000 年开始, 笔者的课题组开始了采用国产胶凝材料研制高韧性水泥基复合材料的工作, 并于 2003 年和 2006 年先后获得了国家自然科学基金重点项目和南水北调工程建设重大关键技术研究及应用项目的支持, 目前已成功研制出极限拉应变稳定达到 3%~6%、具有多重微细裂缝和显著应变硬化特性的超高韧性水泥基复合材料 (UHTCC), 同时对该材料的拉伸、压缩、弯曲、抗冻性能、抗渗性能、干缩性能、传热性能、热膨胀性能、与普通混凝土粘结性能、和普通混凝土和钢筋混凝土结构构件共同作用的力学性能及对裂缝抑制从而带来的耐久性提高开展了较为广泛的研究, 同时在我国一座在建的高碾压混凝土坝围堰的迎水面进行了现场工程施工和应用示范性研究。此外, 笔者课题组从 2004 年开始研究碳纳米管增强水泥基复合材料, 目前其抗压强度可达 170MPa。简言之, 围绕超高性能土木工程材料和高性能结构研究领域, 笔者课题组从超高韧性水泥基复合材料、纤维编织网增强混凝土、碳纳米管增强超高强砂浆的研制、材料基本力学性能、耐久性能以及高性能结构弯曲梁构件的基本计算理论等方面进行了较

为系统和深入的研究工作取得了较为丰富的研究成果。

高性能结构是一个非常大的研究课题，有着广泛的研究内容。笔者课题组目前主要根据自己研制的超高韧性水泥基复合材料为基础，制备出具有优良耐久性和抗震防裂能力的高性能复合梁弯曲构件，进行了初步性探索研究。

本书以超高韧性水泥基复合材料（UHTCC）这一新型土木工程材料为出发点，首先回顾总结了自提出该材料的微观设计原理以来，国内外研究人员在其基本力学性能、耐久性、结构应用等方面的研究成果。接下来着重介绍了本书作者以南水北调工程重大关键技术研究及应用项目为背景的部分研究成果——使用我国国产胶凝材料成功配制出的超高韧性水泥基复合材料在高性能结构中的基本应用（以弯曲构件为例），主要包括三部分内容：其一，针对水工混凝土大跨薄壳结构的开裂问题、腐蚀环境下的钢筋混凝土结构维修和加固问题，结合纤维编织网与 UHTCC 二者的优势，开展了非金属筋（碳纤维编织网）增强超高韧性水泥基复合材料的力学性能研究，提出了改善碳纤维编织网与 UHTCC 之间粘结性能的实用方法；其二，针对 UHTCC 在抗震限裂要求严格的大跨度结构或结构变形关键部位使用时遇到的构件设计问题，开展了钢筋增强超高韧性水泥基复合材料受弯构件（即 RUHTCC 长梁）的弯曲性能研究，论述了其基本力学性能及影响因素分析，对实验成果进行了较为详细的解释与分析，阐述了相应的计算理论、设计方法以及实验研究方法，提出了相关配筋计算公式以供工程使用参考；其三，根据功能梯度的概念对钢筋混凝土结构进行功能梯度优化设计，利用 UHTCC 优异的非线性变形能力和裂缝控制能力，制备了控裂功能梯度复合梁（UHTCC-FGC）以提高钢筋混凝土结构的耐久性，论述了其基本力学性能和计算理论，并提出了 UHTCC 控裂功能层厚度的确定方法。最后阐述了 UHTCC 材料在高性能建筑结构中的发展前景。

本书研究成果是在国家自然科学基金重点项目（50438010）“混凝土结构裂缝形成与发展机理及控制技术”和南水北调工程重大关键技术研究及应用项目（JGZXJJ2006-13）“超高韧性绿色 ECC 新型材料研究及应用”的资助下取得的，特此致谢。

徐世焱

2010年5月8日于杭州

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 超高韧性水泥基复合材料基本性能	3
1.2.1 超高韧性水泥基复合材料基本力学性能和材料特性	5
1.2.2 超高韧性水泥基复合材料的耐久性	17
1.2.3 具有特殊制备工艺和特殊性能的超高韧性水泥基复合材料	32
1.3 超高韧性水泥基复合材料在高性能建筑结构中的应用研究简介	41
1.3.1 作为混凝土保护层提高耐久性	41
1.3.2 用于无伸缩缝桥面板的连接板等承受大变形构件	42
1.3.3 作为耗能材料提高结构抗震性	44
1.3.4 新型结构形式	54
1.3.5 结构物的修复	55
1.4 本书主要内容和目的	60
第 2 章 纤维编织网增强超高韧性水泥基复合材料试验研究	63
2.1 引言	63
2.2 试验过程	64
2.2.1 试验材料	64
2.2.2 试验方案	65
2.2.3 试件制作和试验方法	65
2.3 等效弯曲应力-跨中挠度曲线	70
2.4 开裂形态分析	76
2.5 拔出试验分析	81
第 3 章 钢筋增强超高韧性水泥基复合材料 (RUHTCC) 受弯构件理论计算模型	86
3.1 引言	86
3.2 材料力学模型与基本假定	87
3.2.1 材料力学模型	87
3.2.2 基本假定	89
3.3 RUHTCC 构件正截面受弯承载力计算模型	89
3.3.1 RUHTCC 构件正截面受弯过程分析	89

3.3.2	RUHTCC 适筋构件正截面受弯弯矩-曲率关系	94
3.3.3	RUHTCC 受弯构件挠度验算	97
3.3.4	RUHTCC 受弯构件延性指标	97
第 4 章	钢筋增强超高韧性水泥基复合材料 (RUHTCC) 长梁试验研究及结果分析	99
4.1	引言	99
4.2	试件制备	99
4.2.1	试验材料	99
4.2.2	试件形式	100
4.2.3	试件浇筑	101
4.3	试验过程	101
4.4	理论计算模型的试验验证及讨论	102
4.4.1	平截面假定应用于 RUHTCC 梁计算分析的试验验证	102
4.4.2	钢筋与 UHTCC 变形协调的验证	104
4.4.3	起裂荷载的确定	106
4.4.4	理论计算模型的验证	107
4.5	纵筋配筋率对长梁弯曲性能的影响	116
4.6	RUHTCC 梁与钢筋混凝土梁的比较	117
4.7	裂缝控制	118
第 5 章	钢筋增强超高韧性水泥基复合材料 (RUHTCC) 受弯构件简化计算及影响因素分析	125
5.1	引言	125
5.2	简化计算方法	125
5.2.1	弯矩	125
5.2.2	曲率延性系数	128
5.2.3	变形	130
5.2.4	界限配筋率	132
5.2.5	最小配筋率	133
5.3	RUHTCC 适筋梁影响因素分析	134
5.3.1	几何尺寸	134
5.3.2	材料参数	141
5.3.3	纵筋配筋率	144
5.4	RUHTCC 受弯构件设计建议	146
第 6 章	超高韧性复合材料控裂功能梯度复合梁 (UHTCC-FGC) 弯曲性能理论分析	147
6.1	引言	147
6.2	基本假定	148

6.3	UHTCC-FGC 梁正截面受弯阶段分析	150
6.3.1	第一阶段：弹性阶段	150
6.3.2	第二阶段：起裂后至钢筋屈服的带裂缝工作阶段	152
6.3.3	第三阶段：钢筋开始屈服至截面破坏阶段	157
6.4	起裂、屈服及极限状态承载力计算	158
6.4.1	起裂时承载力计算	158
6.4.2	钢筋屈服时承载力计算	159
6.4.3	极限承载力计算	159
6.5	UHTCC-FGC 梁正截面受弯弯矩-曲率关系的确定	160
6.6	截面延性指标	161
6.7	UHTCC-FGC 梁挠度验算	161
第 7 章	超高韧性复合材料控裂功能梯度复合梁 (UHTCC-FGC) 四点弯曲试验研究	162
7.1	引言	162
7.2	试验过程	162
7.2.1	试验材料	162
7.2.2	试件设计	163
7.2.3	试件制备	164
7.2.4	加载方案	164
7.3	钢筋与 UHTCC (或混凝土) 的变形协调性	165
7.4	弯矩-曲率与荷载-跨中挠度关系试验曲线	166
7.5	UHTCC 控裂功能梯度复合梁与普通钢筋混凝土梁的对比	173
7.6	裂缝发展与裂缝宽度控制	174
7.6.1	起裂荷载的确定	174
7.6.2	裂缝宽度发展与开裂形态	176
7.7	控裂功能梯度复合梁中 UHTCC 最佳厚度分析	186
第 8 章	超高韧性水泥基复合材料在高性能建筑结构中的发展前景	189
参考文献		191
附录	主要符号含义	205

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景与意义

南水北调工程是我国在建的大规模跨流域调水工程，涉及领域广，工程技术难题极具挑战性，对社会和国民经济具有重大的影响。仅以中线工程为例，全长 1267km，跨越大小河流 160 余条，需新建各类交叉建筑物如长距离输水隧洞、大型输水渡槽、涵洞、倒虹吸、桥梁等 1800 多座（陈厚群，2003）。任一重要环节的安全性对整个输水工程的安全运行都至关重要。

混凝土材料是目前应用最广泛的结构工程材料之一，直接影响着工程安全、经济和耐久性能。混凝土使用的水泥、沙、石等基本原料是不可再生自然资源，超量使用会严重污染环境，破坏国土资源及植被，对环境和生态有着深远的影响。根据以往工程实例，混凝土开裂现象比较普遍，由于其自身缺乏高延性导致极端荷载下的脆性破坏、因耐久性不足引起的正常荷载下破坏以及缺乏可持续性等方面的不足限制了该材料的应用（Li，2007）。而工程结构性能随时间退化及其对使用寿命的影响这一重要问题也引起了国内外工程界的广泛关注（陈肇元等，2002）。特别是我国大量使用的低质量混凝土材料所导致的结构普遍开裂、进而钢筋锈蚀的现象，使得结构的耐久性进一步严重降低，由于远远达不到其设计寿命要求，这些结构的重建又会造成新一轮资源耗费。

南水北调是超长距离输水工程，关键交叉建筑物如输水渡槽长度可达几公里，结构形式复杂，采用壳槽、薄壁结构日益增多，失效后的修复代价高。以抗裂作为控制条件进行设计是水工建筑物特别是渡槽建筑物有别其他类型建筑的重要特征（唐纯喜，2007）。因为裂缝问题不仅会影响输水工程各类建筑物的输水效率和结构的使用寿命，而且会造成输水损失，还有可能引起水体交叉污染，对输水安全产生不利影响，严重的甚至会影响到结构的安全运行。但以目前建筑材料性能、施工技术水平和经济水平，要保证混凝土结构不开裂几乎是不可能的。因此，对于裂缝问题最有效的解决办法就是把材料的抗裂性能和延性作为结构设计选材的重点，将裂缝宽度和形式控制在无害或可以接受的范围内。20 世纪 60 年代纤维混凝土问世以来，通过加入钢纤维、聚丙烯纤维、聚合物等提高了水泥基复合材料延性，其抗裂性能和断裂韧性指标与普通混凝土相比得到了较大改善，但由于这些纤维本身的延性不高，其极限拉伸应变只能达到 0.02%~0.03%，对水泥基复合材料延性的提高有限，同时其直接拉伸强度提高幅度也不

是很大。产生单一裂纹的宏观开裂模式仍然是结构破坏的主要形式，裂缝的宽度并没有从本质上得到有效控制。同时，由于实际工程施工条件多样性和复杂性，以现有的混凝土、纤维混凝土材料的基本性能及其相应的施工技术，进行裂缝控制是很难达到预期目的的。与其他结构工程类似，抗震安全也是输水工程关键交叉建筑物设计时需要重点考虑的。南水北调工程 3 条线路大部分都穿过地震区，不少大型渡槽结构的抗震问题十分突出。陈厚群（2003）指出，中线工程沿线缺乏调蓄工程，所经地区是我国人口稠密、经济较发达地区，邻近京九、京广铁路干线，可能导致严重的地震次生灾害，因此，确保南水北调工程的抗震安全性意义十分重大。但普通钢筋混凝土结构由于延性、损伤容限和能量吸收能力较低，在地震荷载引发的大变形作用下，即使在变形关键部位设置较密箍筋，也未能改变混凝土自身的脆性以及钢筋/混凝土之间的变形不协调性，界面的劈拉破坏、混凝土保护层剥落现象时常发生，从而破坏了结构的整体性，还导致了钢筋用量的增加从而给混凝土施工带来很多不便。在与水、土壤直接接触的暴露环境下钢筋加速锈蚀或者混凝土剥落导致的结构抗震性能降低都可能会引发结构性破坏。

由此可知，为了保证像南水北调工程这样的超大型国家重大基础设施的安全运行，需要从材料选择到结构设计两个方面确保既能满足重大工程结构本身的抗裂防震要求，又能最大限度降低甚至免去长期运行和服役过程中的维护和加固费用。超高韧性水泥基复合材料（UHTCC）在性能上比普通高性能混凝土有本质意义上的重大突破。更值得一提的是，使用国产胶凝材料研制出的 UHTCC 使用了大量的工业废弃物，在节约资源、节约能源、保护环境等方面有着重要意义，是一种可持续发展的高效防裂绿色结构材料。它具有超高的拉伸韧性和优异的裂缝控制能力、损伤容限高、能量吸收能力强、与钢筋变形协调性好等突出优点。基于 UHTCC 自身出色的性能，预测将 UHTCC 材料应用于南水北调长大渡槽和长大渠道等关键交叉建筑物中，将会提高建筑物的防裂防渗性，改善结构的耐久性和抗震性，确保工程质量；使大型基础设施钢筋混凝土结构使用寿命在原设计能力基础上显著提高，产生可观的长期经济价值；利用其优良的环保作用，以保证广大居民用水安全。在国家自然科学基金重点项目（50438010）“混凝土结构裂缝形成与发展机理及控制技术”和南水北调工程重大关键技术研究及应用项目（JGZXJJ2006-13）“超高韧性绿色 ECC 新型材料研究及应用”的资助下，本书以超高韧性水泥基复合材料（UHTCC）这一新型绿色结构材料为基础，开展了向新材料结构方向迈进的探索性工作，旨在建立配筋超高韧性水泥基复合材料受弯构件计算新理论，提出一种具有防裂抗震和优异耐久性能的高性能复合结构。

1.2 超高韧性水泥基复合材料基本性能

为改善混凝土的脆性缺陷,自20世纪60年代以来,研究人员(Romualdi et al., 1964; Majumdar et al., 1968; Romualdi, 1969)开始采用向混凝土中添加纤维的方式来提高混凝土的韧性。Naaman (Naaman, 1972; Naaman et al., 1973; Naaman et al., 1974)首次对纤维增强混凝土的拉伸应力-应变曲线进行了较为深入的分析,虽然当时他使用了1.5%~3%体积掺量的钢纤维,但没有多缝开裂的现象发生。在20世纪70年代,已有学者开始进行纤维增强水泥和纤维增强混凝土复合材料的研究工作(Shah et al., 1971; Kelly, 1972; Neville, 1975; Hannant, 1978; Swamy, 1978), Kasperkiewickz观测到了钢纤维混凝土的多缝开裂和应变硬化现象,并首次明确提出了“应变硬化”这一术语(Naaman, 2007)。20世纪80年代早期, Lankard等首次提出了砂浆渗浇钢纤维混凝土 SIFCON (Lankard et al., 1984; Lankard, 1985),而后 Naaman与其合作者对 SIFCON 的拉伸、压缩性能进行了大量的研究工作(Homrich et al., 1987; Naaman, 1987a、b; Naaman et al., 1989)。由于 SIFCON 与其他纤维混凝土相比拉伸强度和延性都有十分明显的提高,属于应变硬化材料,为与其他纤维混凝土有所区分, Naaman 建议使用 HPFRCC 描述这种同时具有高强度和延性的水泥基复合材料。虽然 SIFCON 在纤维高掺量下具备了应变硬化特征,但同时也存在不易搅拌的困难。在20世纪90年代, ECCs、Ductal (Chanvillard et al., 2003)、UHPFRC (Rossi et al., 2000)等材料又相继出现;至1995~1996年,“假应变硬化”、“准应变硬化”、“应变硬化”等词汇被大量使用着;在1999年、2003年、2005年、2007年的四次 HPFRCCs 国际研讨会上,“应变硬化”一词已被普遍接受使用(Naaman, 2007)。其中在2003年的研讨会后, Naaman 和 Reinhardt 建议将纤维混凝土材料重新进行划分, HPFRCC 专指拉伸应变硬化材料,而超高韧性水泥基复合材料就是 HPFRCC 的典型实例。

超高韧性水泥基复合材料最早由美国密歇根大学 Li V C 教授率领密歇根大学先进土木工程材料研究实验室(advanced civil engineering materials research laboratory, 简称 ACE-MRL)进行研制开发。针对实际结构性能对所需材料特性的要求,采用基于微观力学的性能驱动设计方法(performance driven design approach, 简称 PDDA) (Li, 1992a)对材料微观结构进行调整。以乱向短纤维增强水泥基复合材料(random short fiber reinforced cementitious composite, 简称 RSFRCC)的纤维桥联法(Li et al., 1992)作为研究的理论基础,考虑了纤维特性、基体特性和纤维/基体的界面特性及其之间的相互影响,在获得材料应

变-硬化特性的两个设计准则即第一起裂应力准则和裂缝稳态扩展准则 (Marshall et al., 1988; Li, 1993) 的基础上, 提出了通过改进纤维理论体积掺量条件从而能够以最小的纤维含量实现复合材料的应变硬化效应。这样通过利用对材料体系进行系统设计、调整和优化 (Li, 1998), 最终在实验室得到了具有拉应变硬化特征和高韧性的 ECCs (engineered cementitious composites) 材料。名称中的“engineered”则用以表明其在材料设计方面的特别之处。Li 等在文献中给出了“engineered cementitious composites”这一名称的定义 (Li et al., 1994), 认为利用断裂力学和微观力学相关原理对微观结构进行有意识设计调整的短纤维乱向增强水泥基材料, 若其硬化后具有准应变硬化特征便可称之为 ECCs, 由极限拉应变和断裂能两个参数来表征。随后该材料的研究在日本、欧洲获得了飞速的发展, 依据 ECCs 在拉伸荷载作用下的优异性能, 日本将其称为 UHPFRCC (ultra high performance fiber reinforced cementitious composites); 欧洲则根据该材料应变硬化这一典型特征而将其命名为 SHCC (strain hardening cement-based composites)。然而, 随着这一材料的理论研究、实验研究及工程应用实践的发展, 发现 ECCs 材料的性能只有当其拉应变能力稳定地达到 3% 以上时其应变硬化性能才具有材料性能的稳定性 (徐世焯等, 2008)。因此, 徐世焯 (2007) 对这一材料定义了新的标准, 即, 使用短纤维增强, 且纤维掺量不超过复合材料总体积的 2.5%, 硬化后的复合材料应具有显著的应变硬化特征, 在拉伸荷载作用下可产生多条细密裂缝, 极限拉应变可稳定地达到 3% 以上。考虑到这种材料优异的韧性, 同时也为了便于工程应用和结构设计人员对此材料的理解 and 应用, 将符合这一标准的材料称为“超高韧性水泥基复合材料” (ultra high toughness cementitious composite, 缩写为 UHTCC)。鉴于该材料名称的多样性, 本书在介绍其研究进展时将统一称之为 UHTCC。就目前研究现状来看, 一般使用 PE 纤维和 PVA 纤维的 UHTCC 研制技术相对成熟, 极限拉应变能力可以稳定地达到 3% 以上; 最近, Ahmed 和 Maalej 使用混杂纤维也研制出了拉应变能力可达 3.5% 的超高韧性材料 (Ahmed et al., 2009)。

自 1992 年 Li 和 Leung 提出超高韧性水泥基复合材料的设计理论基础后, 研究人员对该材料基本力学性能和耐久性开展了大量的研究工作, 如直接拉伸性能 (Li et al., 2001; Li et al., 1992; 高淑玲, 2006; Kunieda et al., 2007; 李贺东, 2008; Kamal et al., 2008; 徐世焯等, 2009)、压缩性能 (Li, 1992b; Fisher et al., 2002a; Fischer, 2002; 徐世焯等, 2009)、弯曲性能 (Maalej et al., 1994; Naaman et al., 1996; Lepech et al., 2003; 李贺东等, 2010)、抗剪性能 (Kanda et al., Li 1998; Vasillaq, 2003)、抗冲击性能 (徐世焯, 2007; Zhang et al., 2007)、断裂特性 (Kabele et al., 1998; Wang et al., 2006; 高淑玲等, 2007; 徐世焯等, 2009; Spagnoli, 2009)、导热性 (王巍, 2009)、收

缩 (Lim et al., Li 1999; Weimann et al., 2003a、b; Li, 2004; Li et al., 2006; 刘志凤, 2009) 与徐变 (Billington et al., 2003; Boshoff et al., 2004; Boshoff et al., 2007) 性能、长期应变能力 (Li et al., 2004)、抗剥落性 (Kanda et al., 2003; Li et al., 2004)、抗疲劳性能 (Suthiwarapirak et al., 2002)、耐磨性 (Li et al., 2004)、自愈合能力 (Yang, 2008; Yang et al., 2009)、抗渗透性能 (Wang et al., 1997; Maalej et al., 2002; Lepech et al., 2005a; Miyazato et al., 2005; 徐世焯, 2007)、抗冻融循环能力 (Li et al., 2004; Ahmed et al., 2007; Sahmaran et al., 2007; 徐世焯等, 2009)、耐腐蚀能力 (徐世焯, 2007; Şahmaran et al., 2008a、b)、耐湿热老化性能 (Li et al., 2004; Horikoshi et al., 2005) 等方面。为满足不同工程需要, 还开发了具有特殊性能和制备工艺的超高韧性水泥基复合材料, 如喷射 UHTCC (Kanda et al., 2002; Kim et al., 2003a、b; Kim et al., 2004)、自密实 UHTCC (Li et al., 1998; Kong et al., 2003a、b; Kong et al., Li 2006a、b; 田艳华, 2008)、挤压成型 UHTCC (Stang et al., 1999; Takashima et al., 2002; Takashima et al., 2003; De Koker et al., 2004a、b; Li, 2002)、轻质 UHTCC (Wang et al., 2003)、绿色 UHTCC (Li et al., 2004; Wang et al., 2007; Yang et al., 2007; Lepech et al., 2008)、防水 UHTCC (Martinola et al., 2004; Şahmaran et al., 2009)、早高强 UHTCC (Wang et al., 2006)、被动智能自愈合 UHTCC (Li et al., 1998) 等。具有各种不同功能特点的超高韧性水泥基复合材料更易满足不同工程的需要, 硬化状态下的高延性、施工的方便灵活性使其具有广泛的应用前景。近几年, 研究人员已针对 UHTCC 在结构中的应用开展了一系列研究工作, 包括新型结构形式、建筑物的耐久性修复、提高结构的抗震性能等。与此同时, 建立了该材料的本构关系模型来实现结构性能的有限元数值模拟 (Kabele et al., 1996; Kanda et al., 2000; Kabele, 2003; Boshoff et al., 2004; Suwada et al., 2006; Yang et al., 2007; Kabele, 2007; Yang et al., 2008), 便于在结构中的关键部位有选择性的使用, 省去了大量不必要的实验研究。鉴于 UHTCC 优越的性能, 该材料在美国、欧洲和日本的工程应用方面进展很快, 先后成功应用到了许多实际工程。近几年, 国内许多学者如徐世焯、张君、梁坚凝、孙伟、赵铁军等、陈婷、詹炳根, 杨英姿等也相继开展了 UHTCC 的相关研究工作。

1.2.1 超高韧性水泥基复合材料基本力学性能和材料特性

1. 直接拉伸基本特性

直接拉伸试验是验证水泥基材料是否具有应变硬化特征的有效方法。国内徐

世焯科研团队（徐世焯，2007）采用国产胶凝材料和日本产 PVA 纤维成功配制出具有拉伸应变硬化特征的 UHTCC。李贺东（2008）使用改进的直接拉伸试验装置（见图 1.1）对 $350\text{mm} \times 50\text{mm} \times 15\text{mm}$ 的矩形平板式试件进行测试，在试件端部外贴纤维布增强并粘贴铝板，以避免夹具所造成的应力集中而导致试件端部过早破坏。试验结果显示多组 UHTCC 试件极限拉应变稳定达到 $3.6\% \sim 4.5\%$ （大约是混凝土的 $230 \sim 450$ 倍，是钢筋屈服应变的 $17 \sim 22$ 倍），极限抗拉强度 $4.5 \sim 6.0\text{MPa}$ ，拉伸弹性模量约为 18MPa ，极限破坏时裂缝平均间距在 $0.8 \sim 2.5\text{mm}$ 之间，对应裂缝宽度可以控制在 $100\mu\text{m}$ 以内甚至可以控制在 $40\mu\text{m}$ 以下（见图 1.2）。

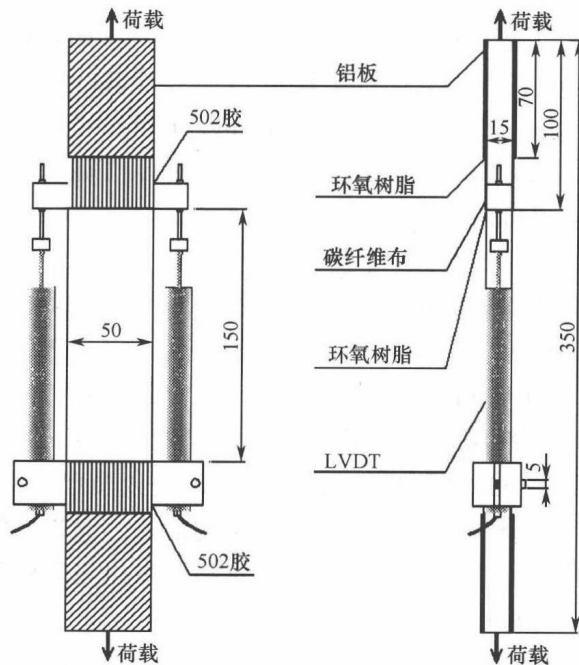


图 1.1 改进的直接拉伸试验装置示意图（单位：mm）（李贺东，2008）

UHTCC 直接拉伸荷载作用下的裂缝开展过程可以划分为五个阶段 [见图 1.2 (a)]：第 I 阶段（OA 段）为线弹性阶段，从加载直至第一条裂缝出现；第 II 阶段（AB 段）和第 III 阶段（BC 段）为裂缝的开展阶段，其中 AB 段抖动明显且成非线性关系，BC 段呈现近似线性硬化关系，也将此段称为稳态开裂阶段；第 IV 阶段（CD 段）为裂缝扩展阶段，再一次出现了应变硬化且直线近似光滑，但在此阶段没有新的裂缝产生，只是原有裂缝的扩展；至某条裂缝开始局部化扩展时，就进入了第 V 阶段，即裂缝局部化扩展阶段，呈现应变软化关系，直至试件最终断裂。

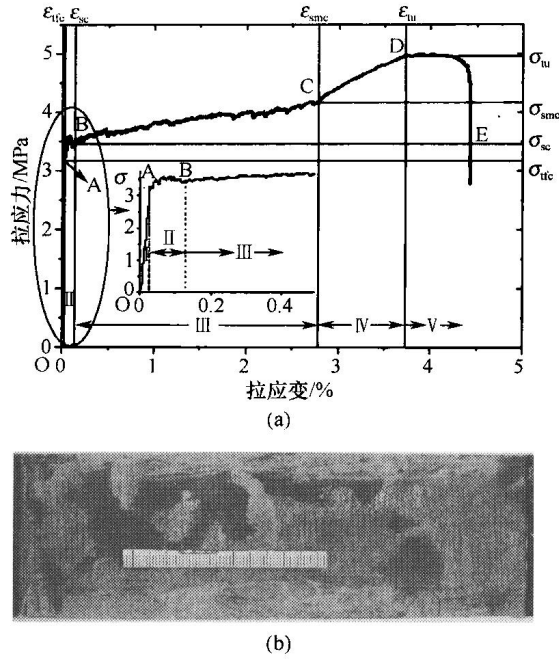


图 1.2 UHTCC 拉伸应力应变曲线和开裂模式 (李贺东, 2008)

通过对 28d 龄期的拉伸试件进行扫描电镜 (SEM) 观测发现 (李贺东, 2008), 直接拉伸荷载作用下 PVA 纤维破坏模式分为四种 (见图 1.3): 纤维从

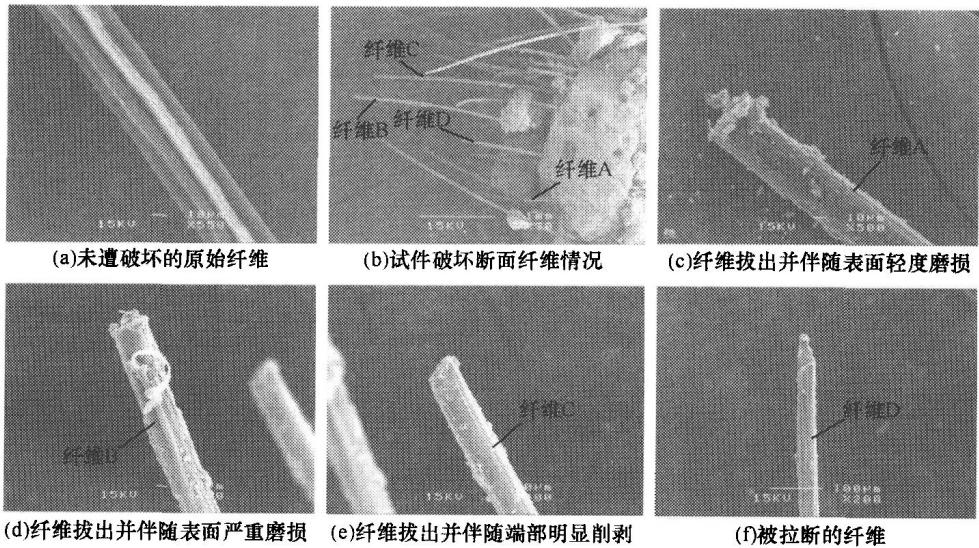


图 1.3 直接拉伸前后 PVA 纤维扫描电镜照片 (李贺东, 2008)

基体中拔出，表面轻度磨损端部完好；纤维拔出破坏，表面严重磨损端部基本完好；纤维拔出但端部严重受损；纤维拉断。扫描电镜观察到试件破坏断面同时存在纤维拔出和纤维拉断两种模式，这一现象即为 UHTCC 可同时获得适当的抗拉强度和较高应变能力的根本原因。

国内清华大学张君科研团队 (Zhang et al., 2008; 公成旭, 2008; Zhang et al., 2009) 所研制的 PVA-UHTCC 极限拉应变也达到了 1.5%~2.6% 之间，抗拉强度在 4.3~6.7MPa 之间。目前国际上所研究的 UHTCC 材料极限抗拉强度普遍较低，最近日本名古屋大学采用高强 PE 纤维并添加减气剂的方法，研制出 14 天极限拉伸强度可达 10MPa 以上的 UHTCC 材料 (Kunieda et al., 2007; Kamal et al., 2008)。

2. 单轴压缩特性

Fischer (1994) 对 PVA-UHTCC、PE-UHTCC 和混凝土的抗压性能进行了比较。发现由于缺少粗骨料，UHTCC 的弹性模量明显低于混凝土，而其峰值压应变能力较高，约为 0.5% (见图 1.4)。PVA-UHTCC 在达到其峰值抗压强度后，压应力缓慢持续下降，抗压破坏模式更具有韧性特征；而 PE-UHTCC 在达到其峰值抗压强度后，压应力先以较快的速率下降至峰值应力的 50% 左右，而后缓慢降低。

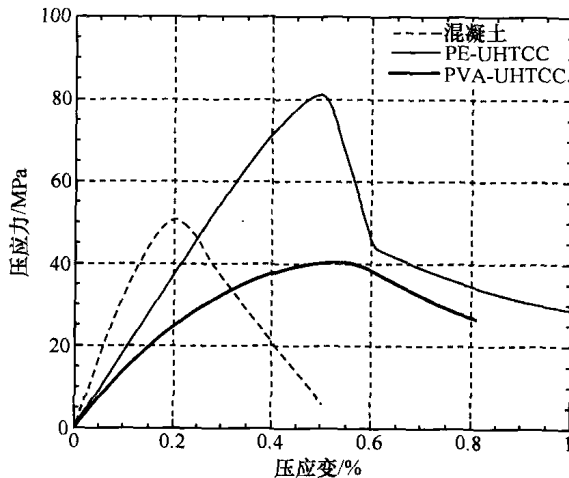


图 1.4 UHTCC 与混凝土压应力-应变比较 (Fischer, 1994)

徐世焯等 (2009) 采用棱柱体试件 (40mm×40mm×160mm) 和立方体试件 (70.7mm×70.7mm×70.7mm) 测定了不同强度等级的 UHTCC 龄期 90d 时的抗压性能，并对抗压力学模型进行了分析 (Xu et al., 2010)。将 2 个 LVDT 固定在试件两侧对称位置测量压缩变形；在棱柱体试件的两个对应侧面

分别粘贴相互垂直的电阻应变片，用以测量试件压缩应变和横向应变，最终得到泊松比。

试验得到抗压全曲线如图 1.5 和图 1.6 所示，UHTCC 应力达到峰值时对应的极限压应变约为 0.005，峰值点以后的下降段与普通混凝土明显不同，没有出现荷载的陡然降低，而是表现出了较为缓慢的下降过程。测得棱柱体试件的抗压强度为 42.0MPa，立方体试件的抗压强度为 50.0MPa，UHTCC 材料的泊松比是 0.23，弹性模量是 19.3GPa。与普通混凝土相比，UHTCC 的弹性模量偏低，但受压变形能力比普通混凝土大很多。这主要是由于纤维的增韧作用和 UHTCC 材料内部不含粗骨料而导致。观察试件的破坏形态发现，棱柱体试件产生类似于混凝土和钢纤维混凝土的斜向剪切破坏；而立方体试件并没有出现明显的棱锥体破坏，仅在试件表面能观测到一些破坏裂缝。所有试件在峰值荷载时均能保持良好的整体完整性，不会出现类似混凝土的坍塌破碎。UHTCC 与混凝土抗压性能之间的区别将对配筋构件的弯曲性能有着重要的影响。

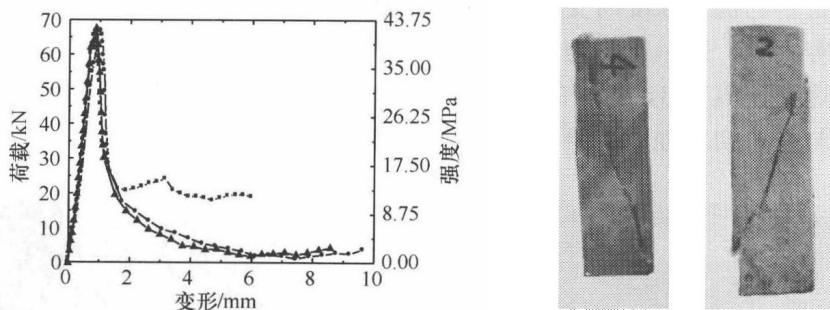


图 1.5 棱柱体试件荷载-变形曲线及破坏形态 (徐世焯等, 2009)

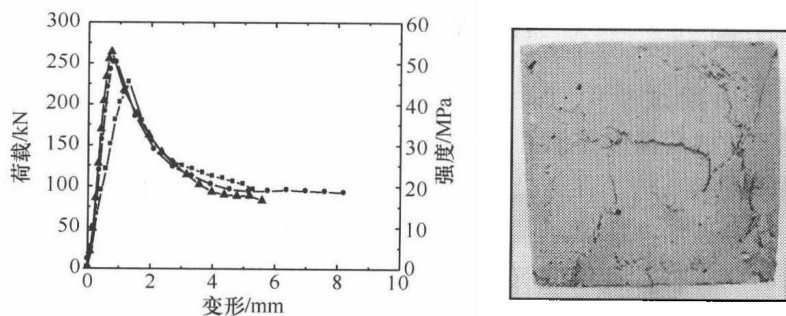


图 1.6 立方体试件荷载-变形曲线及破坏形态 (徐世焯等, 2009)

参照钢纤维混凝土弯曲韧性的测定与评价标准，分别计算棱柱体抗压强度在 33~52MPa 之间的 6 组 UHTCC 的等效抗压强度和变形能、韧性等级和相对韧性指标。随着棱柱体抗压强度的提高，UHTCC 开裂后所吸收的变形能和等效抗