

焦楚杰 孙 伟 高培正 蒋国平 孙 蓓 著

钢纤维混凝土动力特性

非外借



科学出版社

钢纤维混凝土动力特性

焦楚杰 孙 伟 高培正 蒋国平 孙 蓓 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以试验研究和理论分析为主,辅以数值仿真,介绍钢纤维混凝土(SFRC)的静态、准静态、动态力学性能研究成果。主要包括以下内容:第1章介绍研究背景、国内外研究历史与现状;第2章论述 SFRC 的制备技术与主要静态力学性能;第3章论述 SFRC 在准静态条件下的单轴受压特性,测试其轴心抗压强度、压缩韧度、弹性模量与泊松比,研究钢纤维体积率(V_f)对上述性能的影响,建立其准静态单轴压缩本构方程;第4章论述 SFRC 在中应变率条件下的冲击压缩特性,测试材料在中应变率下的强度、应变、应力-应变曲线,研究 V_f 和应变率对材料动态抗压强度、韧度的影响,建立其准一维动态本构方程;第5章论述 SFRC 抗冲击拉伸特性;第6章论述 SFRC 在一级轻气炮高速冲击、高应变率条件下的性能,并建立了高压状态方程;第7章对 SFRC 动态力学性能进行数值仿真。

本书可作为土木工程、材料科学与工程、力学等相关专业高年级本科生和研究生的学习用书,也可作为相关领域科技人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

钢纤维混凝土动力特性/焦楚杰等著. —北京:科学出版社,2019.6

ISBN 978-7-03-060167-4

I. ①钢… II. ①焦… III. ①金属纤维-纤维增强混凝土-动力特性
IV. ①TU528.572

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 291140 号

责任编辑:周 炜 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年6月第一版 开本:720×1000 B5

2019年6月第一次印刷 印张:12 1/4

字数:247 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

武器与防护是一对原始意义上的“矛”和“盾”，人类战争史是攻防手段相互促进的历史。高新技术武器大量涌入战场，对防护工程造成越来越严峻的威胁，如何防御以“快、准、狠”著称的现代常规武器，使其进不来、打不中、钻不深、穿不透，是防护工程体系刻不容缓的高难度课题。其中，先进的防护工程材料研发及其动态力学性能研究，则是该课题的核心内容之一。

作者有幸得到孙伟院士和高培正研究员的联合培养，步入高性能混凝土材料及其抗冲击与爆炸研究领域。10多年来，主持和参加国家、国防、省部级科研项目13项，基于科研项目成果，撰写成本书。

钢纤维混凝土是个大家族，组分不同则性能不同，从现代战争特点和战争需求出发，研究开发适用于不同战场条件、应用于不同防护对象、具有不同性能特点的钢纤维混凝土，对提高防护工程综合防护能力非常重要。本书选择基体强度为C40、C100、RPC200，钢纤维体积率为1%~5%的钢纤维混凝土进行研究，包括制备技术和动力特性两个方面，其中后者是本书研究重点。

本书以试验研究与理论分析相结合，辅以数值仿真方法，对钢纤维混凝土的准静态、中应变率和高应变率力学性能进行深入研究。研究的材料涉及普通混凝土、高强混凝土、活性粉末混凝土、钢纤维混凝土、聚丙烯纤维混凝土、聚丙烯纤维-钢纤维混凝土等；相应的材料性能包括准静态力学性能、SHPB(分离式Hopkinson压杆)冲击压缩性能、冲击劈裂拉伸性能、层裂性能、轻气炮高速冲击性能；主要成果包括钢纤维混凝土准静态本构方程、动态本构方程、高压状态方程，以及相关参数。上述内容对军事和民用防护工程的设计、计算与数值仿真具有参考价值。

本书由焦楚杰制订大纲，并撰写第1~5章，孙伟院士和高培正研究员对第1~5章进行了指导与校核；蒋国平负责第6章的试验工作与第7章的仿真，高乐参加了第6章的试验工作，孙蓓撰写第6章和第7章并校核。全书由焦楚杰统稿。

本书相关的研究得到了国家自然科学基金项目“生态活性粉末混凝土冲击本构关系和高压状态方程”(50708022)、“混杂纤维高强混凝土的抗冲击性能”(51278135)和“钢纤维轻骨料混凝土抗冲击试验与抗爆炸仿真”(51478128)支持，在此表示衷心的感谢。

本书的研究属于混凝土材料和防护工程的前沿科学,研究难度较大,其中许多问题仍处于探索阶段,加之作者水平有限,书中难免存在疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 钢纤维混凝土适用于防护工程的特性	2
1.2.1 强度和韧性	2
1.2.2 疲劳性能	3
1.2.3 物理耐久性	3
1.2.4 化学耐久性	3
1.2.5 电磁波吸收性能	4
1.2.6 综合经济效益	4
1.3 国内外混凝土动力特性研究概况	5
1.3.1 混凝土的冲击压缩性能概况	6
1.3.2 混凝土的冲击拉伸性能概况	13
1.3.3 混凝土的高压状态方程概况	16
1.4 本书的研究内容	18
第 2 章 钢纤维混凝土制备技术和主要静态力学性能	19
2.1 钢纤维混凝土制备技术	19
2.1.1 原材料的选择	19
2.1.2 施工工艺	21
2.1.3 影响纤维在拌合料中分散均匀性的主要因素	23
2.2 钢纤维混凝土主要静态力学性能	24
2.2.1 测试与计算方法	24
2.2.2 测试结果	25
2.2.3 钢纤维混凝土静态力学性能的影响因素分析	31
2.3 小结	35
第 3 章 钢纤维混凝土准静态单轴受压特性	38
3.1 概述	38
3.2 单轴受压试验设备、测试与计算方法	43
3.2.1 试验设备	43
3.2.2 测试与计算方法	45

3.3	钢纤维混凝土单轴受压试验结果	46
3.3.1	测试与计算结果	46
3.3.2	破坏形态	51
3.4	钢纤维混凝土单轴受压试验结果分析	53
3.4.1	破坏过程与形态	53
3.4.2	轴心抗压强度和韧度的影响因素分析	54
3.4.3	弹性模量与泊松比的影响因素分析	57
3.4.4	聚丙烯纤维-钢纤维复合增强和增韧效果	58
3.5	钢纤维混凝土单轴受压应力-应变曲线方程	58
3.5.1	应力-应变曲线的特点分析	58
3.5.2	曲线方程的数学推导	59
3.5.3	曲线方程参数的确定	62
3.6	小结	63
第4章	钢纤维混凝土抗冲击压缩特性	65
4.1	概述	65
4.1.1	钢纤维混凝土动态本构关系的重要性	65
4.1.2	应力波在不同介质界面上的反射和透射	66
4.1.3	SHPB装置及其在混凝土材料中的应用现状	68
4.2	冲击压缩试验设备、测试与计算方法	69
4.2.1	SHPB装置及试验原理简介	69
4.2.2	应变测试技术	71
4.2.3	SHPB计算方法	72
4.3	SHPB误差分析与试块尺寸的确定	74
4.3.1	弥散效应与应力不均匀性	74
4.3.2	界面摩擦效应	75
4.3.3	接触面平整性的影响	76
4.3.4	惯性效应	76
4.3.5	二维效应	77
4.3.6	试块尺寸与表面加工	77
4.4	试验结果	78
4.5	试验结果分析	85
4.5.1	波形分析	85
4.5.2	动态力学性能分析	86
4.5.3	破坏形态分析	88
4.6	钢纤维混凝土动态本构方程	89

4.6.1	本构方程概述	89
4.6.2	已有应变率相关性动态本构方程简介	90
4.6.3	钢纤维混凝土动态本构方程	91
4.7	小结	96
第5章	钢纤维混凝土抗冲击拉伸特性	98
5.1	试验设备与原理	98
5.1.1	冲击劈裂拉伸	98
5.1.2	层裂	100
5.2	钢纤维混凝土抗冲击拉伸试验结果	103
5.3	试验结果分析	108
5.3.1	冲击劈裂抗拉强度与层裂强度的区别	109
5.3.2	冲击劈裂抗拉强度与静态劈裂抗拉强度的区别	109
5.3.3	钢纤维对冲击拉伸性能的影响	109
5.3.4	钢纤维对冲击拉伸破坏形态的影响	110
5.4	小结	111
第6章	活性粉末混凝土高压状态方程	112
6.1	概述	112
6.2	试验设备及测试原理	113
6.2.1	一级轻气炮的组成	113
6.2.2	飞片速度测量	115
6.2.3	冲击波压力测量	116
6.3	试验设计	118
6.3.1	飞片、靶片尺寸设计	118
6.3.2	弹靶安装设计	119
6.4	试验过程与结果	120
6.4.1	试验过程	120
6.4.2	试验结果	120
6.5	试验结果分析	127
6.5.1	波形分析	127
6.5.2	拉格朗日分析	128
6.5.3	活性粉末混凝土的压力时程曲线与应力-应变关系分析	129
6.5.4	试块破坏形态分析	131
6.6	活性粉末混凝土的高压状态方程	131
6.6.1	试验数据处理	131
6.6.2	冲击绝热曲线的建立	132

6.7 分析与讨论	138
6.8 小结	138
第7章 钢纤维混凝土抗冲击仿真	139
7.1 数值仿真方法	139
7.1.1 LS-DYNA 简介	139
7.1.2 程序的算法	139
7.1.3 混凝土的本构模型及参数	141
7.2 钢纤维混凝土 SHPB 冲击仿真与分析	144
7.2.1 单元的划分	144
7.2.2 应力波传播情况及波形图	144
7.2.3 混凝土应力-应变曲线结果与分析	146
7.2.4 混凝土破坏过程结果及分析	149
7.3 活性粉末混凝土一级轻气炮冲击仿真与分析	157
7.3.1 模型的建立及仿真结果分析	157
7.3.2 活性粉末混凝土 $D-u$ Hugoniot 曲线的建立	159
7.3.3 活性粉末混凝土高压状态方程仿真和分析	167
7.4 小结	169
参考文献	171

第1章 绪 论

1.1 研究背景

根据《2002年中国的国防》白皮书^[1],中国国防的目标和任务之一是巩固国防、防备和抵御侵略。在新时期国土防卫作战中,防护工程具有举足轻重的地位。

武器与防护是“矛”与“盾”的关系,欲坚己之盾,须知敌之矛。国外常规高技术武器的主要特点可概括为五个方面^[2]。

(1) 提高隐身突防能力。利用隐身技术,不易被发现,突破对方防御体系,实施打击。

(2) 提高精确制导能力。直接命中概率大于50%的制导武器称为精确制导武器,这种武器在战争中使用量越来越大^[3]。

(3) 提高远距离攻击能力。包括强化导弹推进系统,利用空中加油使飞机增强长途奔袭能力,大口径远程火炮等,从而形成远程攻击为主的作战方式。

(4) 提高打击毁伤能力。关键是提高命中精度,提高战斗部(弹头)威力,从而增强对目标,特别是对硬目标的打击毁伤能力。例如,联合制导攻击武器(joint direct attack munition, JDAM),命中精度在4m以内,钻混凝土深度1.8~2.4m^[4],1999年5月7日,它曾用于攻击中国驻南联盟大使馆,5枚JDAM全部命中目标,并钻至使馆地下室爆炸。此外,还有用于攻击阿富汗和伊拉克的GBU-28导弹,命中精度为1~2m,可钻透混凝土6m^[5,6]。

(5) 提高防御对抗能力。抗精确制导武器,摧毁来袭导弹(反导);击毁对方发射和运载工具;破坏对方信息指挥和管理系统。

如何防御上述高技术武器以及未来更加先进的武器,使其进不来、打不中、钻不深、穿不透,是防护工程体系刻不容缓的高难度课题。

以防护目标为中心,对敌来袭武器实施高效的防空火力打击,构成远近结合、高低衔接的立体环形火网,层层拦截,同时采取电磁干扰,这是积极的防御方式。但是,对于具有低空突防、抗干扰制导方式、机动性、隐身设计以及超高速等优点的导弹与炸弹,在防空武器难以施展威力和发挥作用的情况下,还必须靠防护工程本身的结构予以抗击。

就防护工程本身结构来说,通过几十年的努力,我军已形成一定数量且能抵御多种武器打击的防护工程。但早期建造的部分防护工程,受当时经济和建设技术

条件限制,不一定还能满足防御新世纪高技术武器的要求。我国防护工程的加固与新建是当务之急。

防护工程的加固与新建,必然涉及工程材料的选择。防护工程的使用寿命(即服役年限)较长,工程材料的选择如果只反映建设时期武器装备的发展水平,那么在防护工程的使用期间,许多陆续研制成功的高技术武器,将给防护工程带来很大的威胁。这就需要加固与新建防护工程时,在材料选择上考虑武器的发展,适当开展超前预先研究,以满足攻防技术发展的需要。

1.2 钢纤维混凝土适用于防护工程的特性

钢纤维混凝土(steel fiber reinforced concrete, SFRC)是在脆性易裂的混凝土基体中掺入乱向分布的短钢纤维所形成的一种多相、多组分水泥基复合材料,因其具有优异的物理、力学性能,应用前景十分广阔。尤其在防护工程领域,更突出地显示其六个方面的优越性。

1.2.1 强度和韧性

材料的增强、增韧和阻裂能力是混凝土结构改革与创新的关键,尤其是影响防护工程抗爆与抗冲击性能的主要因素。

钢纤维的掺入,对混凝土基体产生了增强、增韧和阻裂效应^[7,8],从而显著地提高了混凝土的抗拉强度^[9]和主要由主拉应力控制的弯曲强度^[10]、剪切强度^[11]、抗扭强度^[12],当纤维体积率(V_f)为1%~2%时,与基体混凝土相比,抗拉强度提高40%~80%,弯曲强度提高60%~120%,抗剪强度提高50%~100%^[13]。

韧性是衡量塑性变形性能的重要指标,当 $V_f=1\% \sim 2\%$ 时,压缩韧性可提高2~7倍^[14],弯曲韧性可提高几倍至几十倍^[15],弯曲冲击韧性可提高2~4倍^[16],板式试块落球(锤)法击碎试验所测得的冲击韧性可提高几倍至几十倍^[17,18]。

更为重要的是,钢纤维在混凝土中趋近三维乱向分布,使构件在各个方向抗拉与吸收动能的能力比较接近,可以有效地克服防护工程中普通钢筋混凝土的如下困难:

(1) 集中荷载(炮弹、导弹的攻击)作用的部位一般不容易预料,因此在设计时也难以很理想地把钢筋布置在构件的受拉区。

(2) 强动荷载作用时,材料的变形往来不及传递,而普通混凝土吸收动能的能力较低,故强动荷载很可能造成防护工程结构局部严重破坏。

(3) 强动荷载作用时,材料内部的应力分布很复杂,应力是以应力波的方式传播的,在混凝土内部及混凝土与钢筋界面上会发生反射,由压缩波变为拉伸波或由

拉伸波变为压缩波,因此很难清楚钢筋混凝土构件内的应力分布,这就造成设计时配筋困难,若按传统的方法在混凝土各个部位都密布钢筋,则成本大幅增加,混凝土浇筑极其困难。

综上所述,在强度和韧性方面,SFRC比普通混凝土具有更强的抗爆与抗冲击能力。

1.2.2 疲劳性能

SFRC的弯曲疲劳和抗压疲劳性能较普通混凝土都有很大的改善。例如,当弯曲疲劳寿命为 10^6 次时, $V_f=1.5\%$ ($l_f/d_f=58$)的SFRC的应力比为0.68,而普通混凝土仅达0.51;当应力比为0.7时,SFRC弯曲疲劳寿命超过 10^5 次,而普通混凝土仅为850次; $V_f=2\%$ 的SFRC抗压疲劳寿命达 2×10^6 次时,应力比可达0.92,而普通混凝土的应力比仅为0.56^[14]。

由此可见,对于承受疲劳荷载的道路、桥梁以及沿江、沿海等设施,采用SFRC建造,会显著提高其抗疲劳寿命。

1.2.3 物理耐久性

一般说来,SFRC在各种物理因素下的耐久性都有不同程度的提高,其中耐冻融性、耐高温性有显著提高。

我国东北、华北、西北与西藏地区,冬季时间长,昼夜温差大,最低气温低,在这些地区,普通混凝土野战工事耐久性欠佳^[19]。SFRC具有很好的耐冻融性能,试验表明^[20],普通混凝土试块经过不到800次冻融循环就破坏,而 $V_f=2\%$ 的SFRC试块破坏时,冻融循环达到1050次。由此可见,SFRC能够满足寒冷地区防护工程所必备的良好抗冻融性能。

SFRC耐高温性能良好,据报道^[21],不锈钢纤维增强混凝土用于温度达 1000°C 以上水泥窑衬、玻璃窑衬与钢水罐内衬,使这些构件的寿命都比普通混凝土或耐火砖构件的寿命延长2~4倍。研究人员对 $V_f=1.5\%\sim 3\%$ 不锈钢SFRC与普通混凝土耐火构件在 1200°C 下的性能进行了测定,发现SFRC的弯曲强度及冲击韧性较普通混凝土均有所提高,抗压强度不受影响^[22]。SFRC这种优异的耐高温性能也是防护工程所需要的。

1.2.4 化学耐久性

SFRC在空气、污水和海水中都呈现良好的耐腐蚀性。SFRC的碳化速度很慢,腐蚀介质很难侵入混凝土内部,钢纤维在混凝土中不连续乱向分布,很难形成高能量的局部电池效应,在有钢筋和裂缝存在时,钢纤维尚可使钢筋腐蚀的效应降低^[23]。

美国、英国、澳大利亚等国研究人员对 SFRC 在海滨潮汐循环作用下的耐腐蚀性问题做了许多研究^[24~27],得出结论为:暴露在污水和海水中 10 年后的试块碳化深度小于 5mm,只有表层的钢纤维产生锈斑,内部钢纤维未锈蚀,不会像普通钢筋混凝土钢筋锈蚀后,锈蚀层体积膨胀而将混凝土胀裂。

日本学者将 SFRC 浇筑包裹在钢管桩的外围,作为钢管桩的保护层,SFRC 厚分别为 50mm 和 100mm 两种,将其放入海水中进行防锈试验,4 年 5 个月后,距外表面深 5mm 以上的钢纤维无任何锈蚀,10 年后敲开保护层,钢管桩仍青亮无锈,而相同条件下,用普通混凝土作为保护层的钢管桩早已严重腐蚀^[23]。

SFRC 这种化学耐久性的优点非常适合我国西北盐湖地区以及沿海的防护工程。

1.2.5 电磁波吸收性能

电磁波的防护技术是防护工程的一个新课题,主要在于三方面:

(1) 电磁脉冲波是一种新概念武器,其破坏作用包括电效应(破坏和烧毁电子元件,破坏 C⁴I 系统)、热效应(灼伤人体、物体)和生物效应(通过与人体组织器官发生生物共振而引起伤害)。

(2) 防护工程掩体内,空间狭窄,计算机网络、信息处理设备、电子通信设备及各种电器设备等,这些设备都发出电磁波,长期受电磁波密集辐射,会诱发人体多种疾病。

(3) 军事机密通过电磁波泄露,会给国家的安全造成极大的损失。

杨海燕等研究了 SFRC 对军用频率范围电磁波的吸收衰减特性。研究表明,SFRC 在 2~18GHz 频率范围内有一定的吸波效果,4dB 带宽最高可达 15.28GHz,最大吸收率 9.8dB,而且在 x 频段其吸波性能比较稳定^[28]。

李旭等研究了 V_f 为 1.22%~5.26% 的 SFRC 对微波的屏蔽和吸收性能的影响,发现当 V_f 增大时,吸波效果加强,在 3mm 波段范围内有较好的吸收效果,最大吸收率 10.8dB^[29]。

研究表明,SFRC 对减弱电磁脉冲的穿透强度、减少电磁波对人体的辐射危害、防止电磁信号泄露和被侦测有一定的作用。

1.2.6 综合经济效益

考虑包括上述五个特性等多方面因素之后,SFRC 的性价比应该显著高于普通混凝土。中国人民解放军空军工程设计研究局对采用 C80SFRC 与 C30 普通混凝土的防护门进行了比较^[14]。在防护门重量相同的情况下,前者抗力为后者的 2.4 倍,在通过炮弹、导弹对该试验的 SFRC 防护门实施攻击的防护效果试验中,与一般钢筋混凝土防护门相比,该防护门不但有良好的抗爆裂、抗破碎、抗震塌及

抗冲击性能,有效地保护了库内装备的安全,而且门扇损伤范围小,容易修复。Hannant 研究表明^[30], $V_f=1.25\%$ 的 SFRC 板在爆炸作用下,最大碎片速度降低 18%,可以减弱爆炸碎片对人员的杀伤力与对设备的破坏力。因此,军事和民用防护部门在选择防护工程材料时,不应只计一次性投资,而应考虑 SFRC 的优良使用性能、较低的维修费用和使用寿命延长所取得的综合经济效益。

1.3 国内外混凝土动力特性研究概况

混凝土是应用广泛的防护工程结构材料,混凝土科学的迅猛发展,通过优化材料组成结构和纤维增强技术,使其具有更强的抗冲击、抗爆炸能力成为可能。世界上大多数国家非常重视这种高性能混凝土的研究与应用,以抵抗现代高新技术武器的打击。抗冲击与抗爆炸的高性能混凝土的研制,必然涉及在冲击与爆炸的条件下,混凝土的动态响应特征与材料各参数之间的关系。这是防护工程界科研与技术工作者一直在努力探索以求解决或完善的问题。

在冲击与爆炸作用下,材料的变形和破坏规律与静态条件下的规律有很大的差异。材料的力学行为按其在荷载作用下的应变率可以进行如下划分^[31]:

- (1) 当 $10^{-6} \text{ s}^{-1} < d\epsilon/dt < 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 时,材料产生蠕变变形。
- (2) 当 $10^{-4} \text{ s}^{-1} < d\epsilon/dt < 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 时,材料产生准静态变形。
- (3) 当 $10^{-1} \text{ s}^{-1} < d\epsilon/dt < 10^2 \text{ s}^{-1}$ 时,应变率对材料应力-应变关系产生影响。
- (4) 当 $10^2 \text{ s}^{-1} < d\epsilon/dt < 10^4 \text{ s}^{-1}$ 时,材料受到冲击,惯性力成为重要因素。
- (5) 当 $10^4 \text{ s}^{-1} < d\epsilon/dt < 10^6 \text{ s}^{-1}$ 时,材料进入流体力学状态。

混凝土材料静态性能试验的应变率一般为 $1 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,飞机撞击的应变率为 $5 \times 10^{-2} \sim 200 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[32],化学爆炸应变率约为 30 s^{-1} ^[33]。冲击与爆炸给材料造成的影响通常都是(3)~(5)三种情况,此时,动荷载的特征时间远小于结构的响应时间,而且荷载强度很高,结构的整体响应与局部变形相比处于次要地位。研究人员更关心的是冲击影响区域的局部性动态响应,即材料承受冲击与爆破过程中弹塑性波的传播问题。材料在这种短历时、高脉冲的荷载作用下,产生比常规试验高几个数量级的高应变率变形,这时,静态、准静态试验提供的力学参数将不再适用,必须考虑在变形过程中的波传播效应和应变率相关性的影响。

研究材料动态力学性能的系列试验按应变率大小排列有^[34]:

- (1) 中应变率, $d\epsilon/dt = 10^0 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 。
- (2) 高应变率, $d\epsilon/dt = 10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 。
- (3) 超高应变率, $d\epsilon/dt = 10^4 \sim 10^6 \text{ s}^{-1}$ 。

从试验方法区分,落锤冲击方法适用于中应变率范围;分离式 Hopkinson 压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)试验装置适用于中、高应变率范围;而材

料的超高应变率测试则要采用现场爆炸试验、平板撞击试验(一维应变试验)或斜撞击试验(压-剪试验)。

以下内容针对应变率对混凝土动态性能产生影响的冲击压缩、冲击拉伸与高压状态方程科研领域,介绍国内外相关主要研究的历史和现状。

1.3.1 混凝土的冲击压缩性能概况

1. 混凝土的冲击压缩性能国外研究概况

Suaris 和 Shah 采用 MTS 液压伺服试验机对混凝土进行快速加载试验研究发现,随着应变率的提高,混凝土的抗压强度增加,但弹性模量基本保持不变^[35]。

Tang 等报道了对混凝土冲击试验的结果,提出混凝土动态抗压强度与应变率的对数存在线性关系^[36]。

Ross 等采用杆直径为 51mm 的 SHPB 试验装置对 C40 系列混凝土进行试验,得出混凝土动态抗压强度敏感性有一个临界值,超过该值材料对应变率非常敏感,动态抗压强度随应变率的对数呈线性增长,Ross 等通过反复测试,得出应变率敏感临界值为 60s^{-1} ^[37]。

Zhao 采用杆直径为 40mm 的 SHPB 试验装置和直接撞击式 Hopkinson 压杆(direct impact Hopkinson bar, DIHB, 与 SHPB 有点类似,但无输入杆,子弹直接冲击试块)装置对细粒混凝土进行了冲击压缩试验,其主要目的在于测试强度误差分析,认为根据一维应力波理论假定而得出的入射波、反射波与透射波公式适合于 SHPB,若用于 DIHB 则不够准确^[38,39]。

Gary 和 Bailly 采用 $\phi 40\text{mm}$ 的 SHPB 试验装置对 $\phi 40\text{mm} \times 40\text{mm}$ 的 C60 系列混凝土试块进行了带围压的动态压缩试验,测出其最大强度为 130MPa ^[40]。

Thabet 和 Haldane 采用已有的模型对前人文献的试验数据进行模拟验证。结果表明,混凝土在冲击压缩荷载下的力学行为可采用三轴失效准则和塑性理论较精确的模拟,在压应力下的力学性能可采用弹塑性断裂模型模拟,在拉应力下的弹性应力-应变关系可结合弥散裂缝模型、拉力软化和剪力保持模型来模拟^[41]。

Marar 等采用落锤冲击试验机对纤维增强混凝土进行冲击试验,指出掺加钢纤维利于提高混凝土抗冲击性能和冲击韧性,且由应力-应变曲线得到的压缩韧性耗能与由冲击试验得到的冲击耗能呈对数关系^[42]。

Lok 等用杆直径为 75mm 的短杆 SHPB 试验装置对尺寸为 $\phi 70\text{mm} \times 40\text{mm}$ 的混凝土试块进行了动态压缩试验,得到了很好的应力-应变曲线^[43]。

Li 和 Meng 采用试验和数值模拟对比验证的方法研究混凝土的动态效应,认为混凝土强度在应变率超过 100s^{-1} 后剧增的原因主要在于侧向约束惯性,而非应变率效应,因此 Drucker-Prager 本构模型更适于混凝土的冲击动态数值模拟^[44]。

Georgin 和 Reynouard 采用有限元方法对混凝土的 SHPB 冲击压缩试验进行了数值模拟,发现黏塑性本构模型能够真实地模拟出混凝土在冲击荷载作用下的动态性能,如惯性力、内约束、结构响应与应变率效应^[45]。

Krauthammer 等对尺寸为 $\phi 75\text{mm} \times 150\text{mm}$ 、 $\phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 、 $\phi 300\text{mm} \times 600\text{mm}$ 、 $\phi 600\text{mm} \times 1200\text{mm}$ 的高强混凝土圆柱体试块进行了不同加载速度的轴向冲击压缩试验,发现动态加载的尺寸效应比静态加载的尺寸效应更为明显,采用有限元软件 ABAQUS 对冲击试验进行了数值模拟,模拟结果与试验结论基本相近^[46]。

Sukontasukkul 等测试了 C40 级混凝土在受到侧向约束条件下的冲击压缩性能和应力-应变曲线,发现在约束条件下,材料的应变率敏感性更明显,强度和韧性增大,但弹性模量与无约束状态相差不大,甚至有所减小^[47]。

Unosson 和 Nilsson 对钢弹侵彻和贯穿高性能混凝土板进行试验,并采用连续介质力学和有限元方法进行仿真。研究表明,贯穿的计算结果与试验结果接近,但侵彻不一致,作者还提出了在侵蚀准则、收敛、接触、沙漏等方面改善混凝土材料抗侵彻数值仿真的建议^[48]。

Vossoughi 等分别用聚丙烯织物和超强 Zylon 纤维织物包裹不同厚度的混凝土板,对其进行钢弹冲击试验,发现混凝土板厚度对抗侵彻能力影响显著,织物能够减小板背面的震塌坑并包裹住碎块,Zylon 纤维织物的吸收冲击能力比聚丙烯纤维(polypropylene fiber, PPF)织物更高,实测数据还表明,美国国防研究委员会(National Defense Research Council, NDRC)推荐的侵彻公式适合于未被包裹的混凝土板,而不适合织物包裹的混凝土板^[49]。

Dancygier 等采用非变形弹体对高性能混凝土板进行了冲击试验,研究了弹体速度、混凝土强度等因素对混凝土板动态响应的影响^[50]。

Cotsovos 和 Pavlović 对高应变率下混凝土的压缩性能进行了研究,采用简化的混凝土材料模型(完全脆性、无应变软化阶段、不受加载路径影响)对混凝土试块和构件的受冲击压缩过程进行了数值仿真,分析了材料响应与结构响应的异同^[51]。另外,Cotsovos 和 Pavlović 改进了文献[51]中的有限元程序,使其能综合考虑混凝土静态单轴抗压强度、试块形状和尺寸大小、密度、试块潮湿等因素,通过数值仿真,区分出各因素对混凝土动态压缩性能影响的权重^[52]。

Forquin 等研发了一种针对于围压混凝土试块的高应变率冲击压缩试验技术。金属环箍住混凝土试块置于直径为 80mm 的 SHPB 设施中,金属环的本构关系是已知的,通过环侧表面的应变片测试出围压力,从而可算出试块的静水压力。Forquin 通过数值模拟和试验验证了该方法的有效性^[53]。

Habel 和 Gauvreau 对超高性能混凝土进行了落锤冲击压缩试验和四点弯曲试验,根据试验结果建立了该种混凝土的单质点弹簧模型和弯曲模型^[54]。

Hao 等对混凝土的 SHPB 试验进行了数值仿真,研究了不同应变率下的混凝土抗压强度,仿真结果表明,混凝土抗压强度随应变率增加而提高,是由混凝土试块的横向惯性约束效应和尺寸效应引起的^[55]。另外,Zhou 和 Hao 采用 SHPB 试验装置对混凝土材料进行了冲击压缩试验,讨论了动态强度提高因子的影响要素,并依据各向同性和各向异性模型分别对混凝土动态性能进行分析^[56]。

Forquin 等采用液压试验机和 SHPB 试验装置对钢环箍住的混凝土试块进行应变率为 $10^{-6} \sim 200\text{s}^{-1}$ 的压缩试验,发现在中高应变率时,围压下的饱水试块和干试块的压缩性能差别很大:干试块测出的强度持续增长,而饱水试块测出的强度增长几乎为 0,而准静态时,两种试块强度增长幅度无区别。Forquin 等从多孔介质力学的角度分析了这种差异形成的原因^[57]。

2. 混凝土的冲击压缩性能国内研究概况

近十多年来,国内也有较多学者从事混凝土抗冲击压缩性能研究。

王祥林等采用 $\phi 30\text{mm}$ 的 SHPB 试验装置对石棉纤维增强水泥石进行了冲击压缩试验,发现加入石棉纤维能显著改善水泥石的弹性与变形能力^[58]。

姜锡权采用 $\phi 37\text{mm}$ 的 SHPB 试验装置对钢纤维与尼龙纤维增强细粒混凝土进行了冲击压缩试验,发现在应变率为 $6 \sim 76\text{s}^{-1}$ 时,同应变率时,钢纤维、尼龙纤维增强混凝土的强度与普通混凝土的强度相差无几^[59]。

胡时胜等利用直锥变截面式 SHPB 试验装置,结合预留间隙法,并在试块与杆件之间加设万向头,对混凝土进行冲击压缩试验,发现混凝土材料的应变效应比一般金属材料敏感得多,应变率有很小的变化时就可导致流动应力的明显变化^[60,61];用应变计直接测量应变法适用于冲击过程损伤演化较小的初始阶段,但随着损伤的加剧,产生较大的随机应变,导致该方法失效,建议将试块直接贴应变计法、传统 SHPB 间接法以及试块应力直接测量法进行有机结合,以便得到更可靠的结果^[62,63];采用损伤冻结法对混凝土材料在冲击荷载下的损伤软化效应进行试验研究,结合黏弹性本构理论,得到混凝土材料的损伤型线性黏弹性本构方程^[64~67]。

严少华等利用 MTS 液压伺服试验机和 SHPB 试验装置对 C30~C120 系列混凝土、SFRC、聚丙烯纤维增强轻骨料混凝土进行了准静态单轴压缩和冲击压缩试验,得到了混凝土的准静态和动态应力-应变曲线,分析了材料力学性能指标与应变率的关系,并建立了相应的曲线方程^[68~72]。

焦楚杰等自 2001 年以来对普通混凝土、高强混凝土、SFRC、混杂纤维混凝土、超高强 SFRC 进行了准静态、冲击和爆炸试验与相关理论研究,建立了混凝土准静态本构方程、应变率相关性本构方程,得出了混凝土震塌系数,并建立了混凝土震塌模型^[73~82]。