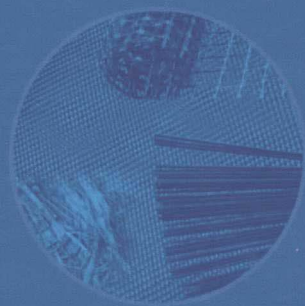
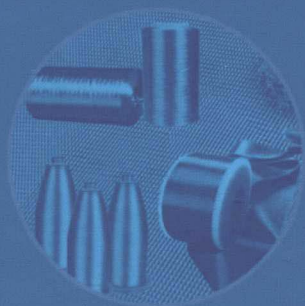


玄武岩纤维增强混凝土力学特性及其工程应用研究

○ 金生吉 孙一民 于贺 侯东序 著



清华大学出版社

玄武岩纤维增强混凝土力学 特性及其工程应用研究

金生吉 孙一民 于贺 侯东序 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书为关于新型复合建筑材料——玄武岩纤维增强混凝土(BFRC)力学性能及工程应用的研究成果,书中详细介绍了如何通过理论分析、开展试验和数值模拟的方法对 BFRC 的抗压、抗劈裂、抗拉伸、抗剪、抗弯等力学性能以及不同环境下 BFRC 抗渗、抗冻融等问题进行研究。同时,还介绍了如何开展玄武岩纤维布(BFC)加固钢筋混凝土梁受力性能研究,并对 BFRC 增强机理及制备工艺进行分析和总结。

本书是国家自然科学基金、辽宁省自然科学基金和人才基金等科研项目研究成果,书中运用了理论研究、试验测试和数值模拟分析相结合的科学研究方法,可为开展相关研究提供参考和借鉴。本书可作为土木工程领域科研人员及高等院校研究生用书,也可供从事相关研究和工程技术的人员参考。

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

玄武岩纤维增强混凝土力学特性及其工程应用研究/金生吉等著. —北京:清华大学出版社,2018
ISBN 978-7-302-51453-4

I. ①玄… II. ①金… III. ①玄武岩—纤维增强混凝土—力学性能—研究 IV. ①TU528.572

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 243494 号

责任编辑:赵益鹏

封面设计:陈国熙

责任校对:赵丽敏

责任印制:沈 露

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:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:11.25

字 数:271 千字

版 次:2018 年 11 月第 1 版

印 次:2018 年 11 月第 1 次印刷

定 价:68.00 元

产品编号:079090-01

党的“十九大”报告中明确提出,推动资源节约是中国绿色发展的重点工作。建设美丽中国,实现中华民族持续发展,加快新材料的革命,才能更好地适应我国土木、交通等领域的快速发展与大规模建设。2017年7月交通运输部公布的数据显示,我国高速公路已覆盖约98%的城镇人口20万以上的城市,通车里程达到13.1万km,位居世界第一,近40%的货物通过高速公路实现流转。在投入运营的道路中,很多公路路面未达到使用年限,甚至投入运营不久,即出现了严重的破裂和使用功能衰退,造成了严重的交通不便和巨大的经济损失。目前我国高速公路和高等级公路路面结构普遍采用水泥混凝土路面或沥青混凝土面层结构,因而路面结构用的混凝土材料的力学性能优劣至关重要。

混凝土是一种无机非金属材料,由于自身原材料来源广泛,综合耗能不高,有很高的抗压强度,且强度等级范围宽,有较好的耐久性、价格低廉等优点,因此在土木工程中的使用范围十分广泛,对土木工程的建设起到至关重要的作用。但混凝土自身仍然存在一些严重的性能缺陷,如抗折、抗拉强度低,韧性差,脆性大,抗冲击性能低等。裂缝是混凝土路面的主要病害,目前路面裂缝问题没有得到根本解决,在道路投入使用后容易受各种车载作用、温度变化以及地基沉降等各种因素的影响,路面会产生裂缝、坑槽、车辙、松散、沉陷、表面破损等病害。

纤维混凝土是以混凝土或水泥浆、砂浆为基础材料,以无机纤维、有机纤维或金属纤维材料为增强材料组合而成的一种复合材料。将弹性模量高、抗拉强度大、耐久性好的纤维均匀分布在混凝土中,可以弥补混凝土多种力学性能的不足。如今,用于改善混凝土性能的纤维不胜枚举。其中,应用较多的是钢纤维、碳纤维、聚丙烯纤维、玻璃纤维。连续玄武岩纤维(continuous basalt fiber, CBF 或 BF)就是典型的天然纤维,与其他纤维相比,拥有不可比拟的优越环保性能,并以其优异的力学性能在土木建筑和交通领域拥有广泛的应用前景,是新型纤维中的典型代表。玄武岩纤维是目前较为理想的增强增韧纤维材料,其潜在性能已经受到工程界人士的关注。玄武岩纤维是一种新型环保的无机纤维材料,是由天然玄武岩矿石为原料,经过1450~1500℃熔融后,通过铂铑合金拉丝漏板制作而成,具有优良的相容性和力学性能,属于纯天然的无机非金属材料,被称为21世纪的“万能”纤维。其优良的抗拉和抗弯性能、阻裂性能、耐冲击、抗渗、抗冻性成功地应用于军事、水利、建筑、机场、公路等领域。

玄武岩纤维的高性能在抑制混凝土初期收缩裂纹和优化混凝土耐久特性方面发挥的效用非常显著,而且其材料来源和生产过程完全是天然的,对人类健康和生态环境无害。由此

可将玄武岩纤维及其复合材料应用于国防建设、交通运输、建筑、环保、电子、航空、航天等领域,是 21 世纪符合生态环境要求的新兴绿色材料。玄武岩纤维产品是典型的硅酸盐纤维,具有玻璃纤维、芳纶纤维和碳纤维所不具备的很多特性,且有和水泥混凝土及砂浆相近的密度($2.63\sim 2.80\text{g}/\text{cm}^3$),所以在均匀分布方面具有独特优势,是一种很有发展前景的新型增强增韧材料,由此决定了它在特殊行业、领域有不可替代的市场需求。近年来,对玄武岩纤维混凝土的力学性能和工程应用的研究已经成为相关领域的研究热点,国内外不少学者对其性能展开了深入研究。

作为一种新型建筑复合材料,玄武岩纤维混凝土具有良好的力学性能和广泛的工程应用前景。本书利用理论分析、室内试验、数值模拟和现场跟踪测试的手段,探究这种新型材料的抗压强度、抗折强度、劈裂抗拉强度、抗弯拉强度力学性能以及各种环境下的耐久性等特性,以便能够充分发挥该材料在建筑工程和道路工程应用中的良好作用。同时,应用有限元软件对玄武岩纤维混凝土在各种荷载作用下进行应力及位移分析,确保这种新型复合建筑材料各方面的性能满足实际工程需要,该研究成果对相关领域具有积极的借鉴意义。通过新材料的研究及工程推广应用,能够创造良好的经济效益和社会效益。

本书是多年来多个课题的研究成果,应归功于课题研究团队共同努力。同时,在编写过程中,借鉴了一些相关的 ANSYS、MIDAS 参考书以及 ANSYS、MIDAS 软件官方网站,受益匪浅,在此深表感谢!

金生吉(沈阳工业大学)负责本书第 8、9 章的撰写并统稿;孙一民(沈阳工程学院)负责撰写本书第 1~4 章;于贺(沈阳工业大学)负责撰写本书第 5、6 章;侯东序(沈阳市建设工程质量检测中心有限公司)负责撰写本书第 7 章。在此,对沈阳工业大学刘子心、李忠良、张健、王艳苓、张鑫,以及沈阳工程学院、沈阳市建设工程质量检测中心有限公司的各位学者在本书撰写过程中所给予的指导和帮助,一并表示感谢!

本书资助项目包括国家自然科学基金项目“非常规天然气开采中关键力学问题理论与试验研究”(No. 11272216);辽宁省自然科学基金项目“玄武岩纤维增强混凝土路用性能及其工程应用研究”(No. 2015020583);辽宁省高等学校杰出青年学者成长计划项目“核电站取水 CA-CB-PX 结构流固耦合作用及抗震力学特性研究”(No. LJQ2013016);辽宁省教育厅基金项目“渗流-应力-温度耦合作用下混凝土大坝的破坏机理研究”(No. 201564068);辽宁省博士科研启动基金“高等级公路高填方路基不均匀沉降规律及稳定研究”(No. 20101076);沈阳市建委资金资助项目“BFRP 布加固损伤混凝土梁试验和工程应用指南”等。

最后,希望本书能在实际工程中的设计、分析、仿真和施工等方面给予广大读者启迪和帮助。

由于著者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在疏漏和错误之处,恳请读者不吝赐教。

作 者

2018 年 5 月

目
录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 玄武岩纤维增强混凝土研究现状	2
1.3 混凝土抗冻融破坏研究现状	4
1.3.1 混凝土冻融破坏机理与抗冻规律	4
1.3.2 混凝土内部结构影响冻融破坏的因素	5
1.3.3 纤维对混凝土抗冻性能的影响	5
1.3.4 混凝土冻融试验研究方法	6
1.4 纤维布加固国内外研究现状	7
1.4.1 常用纤维布	7
1.4.2 玄武岩纤维布	7
1.4.3 国内外研究现状	8
第 2 章 BFRC 力学性能试验设计与准备	10
2.1 试验材料	10
2.2 试验配合比设计	11
2.3 试件设计	11
2.3.1 抗压强度	11
2.3.2 抗折强度	12
2.3.3 劈裂抗拉强度	14
2.3.4 轴心抗拉强度	14
2.4 试件制备及养护	16
第 3 章 BFRC 力学性能试验研究	19
3.1 抗压强度试验	19
3.1.1 试验方法	19
3.1.2 试验结果与分析	20
3.2 抗折强度试验	23

3.2.1	试验方法	23
3.2.2	试验结果与分析	24
3.2.3	BFRC 韧性分析	26
3.3	劈裂抗拉强度试验	29
3.3.1	试验方法	30
3.3.2	试验结果与分析	31
3.4	轴心抗拉强度试验	34
3.4.1	试验方法	34
3.4.2	试验结果与分析	34
3.4.3	轴心抗拉强度与劈裂抗拉强度关系	37
3.5	本章小结	38

第 4 章 不同环境下 BFRC 抗冻融性能试验研究 40

4.1	常规环境下 BFRC 抗冻融性能试验	40
4.1.1	试验设备及试验方法	40
4.1.2	试验结果与分析	43
4.2	BFRC 在 NaCl 溶液中的抗冻融试验	46
4.2.1	BFRC 冻融破坏失效规律	46
4.2.2	BFRC 冻融损伤抑制作用	48
4.3	BFRC 在 MgSO ₄ 溶液中抗冻融试验	48
4.3.1	BFRC 冻融破坏失效规律	48
4.3.2	BFRC 冻融损伤抑制作用	49
4.4	BFRC 在复合溶液中抗冻融试验	50
4.4.1	BFRC 冻融破坏失效规律	50
4.4.2	BFRC 冻融损伤抑制作用	51
4.5	腐蚀条件冻融循环与单纯冻融循环作用比较	51
4.5.1	相对动弹性模量和冻融循环寿命	52
4.5.2	质量损失	53
4.6	本章小结	54

第 5 章 浸胶 BFRC 基本力学性能及其耐久性试验研究 55

5.1	浸胶 BFRC 基本力学性能试验研究	55
5.1.1	浸胶 BFRC 原材料的组成	56
5.1.2	浸胶 BFRC 配合比的设计	56
5.1.3	浸胶 BFRC 抗压强度试验研究	57
5.1.4	浸胶 BFRC 劈拉强度试验	59
5.1.5	浸胶 BFRC 弯拉强度试验	62
5.1.6	浸胶 BFRC 的落锤冲击试验	65
5.2	浸胶 BFRC 的抗渗性试验	67

5.2.1	混凝土抗渗性影响因素	67
5.2.2	混凝土抗渗性试验方法	68
5.2.3	渗透试验	68
5.2.4	渗透试验结果与分析	70
5.3	浸胶 BFRC 的耐腐蚀性试验	70
5.3.1	混凝土硫酸盐腐蚀影响因素	70
5.3.2	混凝土硫酸盐腐蚀试验方法	71
5.3.3	腐蚀试验	71
5.3.4	硫酸盐腐蚀试验结果与分析	71
5.4	浸胶 BFRC 的抗冻性试验	72
5.4.1	混凝土抗冻性影响因素	72
5.4.2	抗冻融性能试验	73
5.4.3	抗冻融试验结果与分析	74
5.4.4	结果分析	75
5.5	本章小结	75
第 6 章	BFRC 有限元数值模拟分析	77
6.1	BFRC 温度应力场有限元数值模拟	77
6.1.1	引言	77
6.1.2	耦合场数值模拟	77
6.1.3	BFRC 有限元数值模拟	78
6.2	BFRC 路面数值模拟	84
6.2.1	力学模型	84
6.2.2	计算参数	86
6.2.3	路面加载情况	87
6.2.4	模型建立	89
6.2.5	数值模拟结果分析	89
6.2.6	影响参数分析	93
6.3	BFRC 机场跑道有限元分析	101
6.3.1	引言	101
6.3.2	BFRC 机场跑道结构及参数	101
6.3.3	机轮荷载情况	102
6.3.4	BFRC 机场跑道模型建立	104
6.3.5	有限元结果分析	104
6.4	本章小结	111
第 7 章	玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁受力性能试验	112
7.1	试验方案设计	112
7.1.1	试验材料	112

7.1.2	试验配合比设计	113
7.1.3	玄武岩纤维布的粘贴工艺	113
7.1.4	应变片的粘贴技术	115
7.1.5	试件设计	116
7.1.6	试件制备及养护	118
7.2	玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁受弯试验	118
7.2.1	试验方法	118
7.2.2	试验结果与分析	122
7.3	玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁受剪试验	134
7.3.1	试验方法	134
7.3.2	试验结果与分析	135
7.4	玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁的理论分析	139
7.4.1	抗弯强度的计算	139
7.4.2	裂缝宽度的验算	144
7.4.3	抗剪强度基本公式	145
7.5	本章小结	147
第 8 章	玄武岩纤维对基体增强增韧理论分析	148
8.1	纤维混凝土增强机理分析	148
8.1.1	复合材料理论	148
8.1.2	纤维间距理论	151
8.1.3	增强机理分析	153
8.1.4	增韧机理分析	155
8.2	制备工艺对 BFRC 性能影响分析	156
8.2.1	试验主要设备	156
8.2.2	试验步骤	157
8.2.3	试验结果与分析	157
8.3	浸胶 BFRC 冲击试验电镜分析	158
8.4	本章小结	162
第 9 章	结论	163
参考文献		167

绪论

1.1 引言

普通水泥混凝土的优点主要包括抗压强度高、成本低、原材料来源丰富等,因此目前被广泛应用于工程建筑和道路桥梁等多数土木工程领域。但是其本身也存在一些缺点,例如脆性大、抗拉和抗折强度低、韧性低、抗冲击性能差、收缩开裂、自重大等,使其在工程中的应用范围受到一定限制^[1]。

如何改善普通水泥混凝土的性能,并扩大其应用范围,长期以来一直是研究人员不断探索追寻的问题。目前,通过将各种纤维加到混凝土中,以改良混凝土的各种性能的探究,已经成为混凝土增强增韧试验和理论研究的热点。由于掺入具有增强增韧的纤维,混凝土相较之前韧性、抗冲击性、耐久性能有明显提高,砂浆塑性开裂性能也得到明显抑制^[2]。

掺入纤维后,纤维增强增韧混凝土的强度韧性和抑制裂缝开展的能力主要受到纤维本身的力学性能、纤维与基体的黏结性能、纤维的数量及其在基体中分布情况的影响^[3]。根据弹性模量的大小,纤维主要有两大类:纤维素纤维、聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维等属于纤维自身弹性模量比基体弹性模量低的类别;石棉纤维、玻璃纤维、钢纤维、碳纤维和芳纶纤维等属于纤维弹性模量比基体弹性模量高的类别^[4-5]。作为近年来新兴的环保型材料,玄武岩纤维由于其优越的力学性能而备受关注。

连续玄武岩纤维(continuous basalt fiber, CBF)是一种外观呈金褐色的无机纤维材料,其原材料是纯天然火山喷出的玄武岩,利用铂铑合金拔丝漏板将原材料在 1 450~1 500℃ 高温下熔融后快速拉拔而成^[6]。CBF 与其他纤维相比具有一系列优越性能和显著特征^[1,6-9]。

(1) 原材料天然特性优异。CBF 是由天然火山喷出岩为原材料制作而成,具有极强的耐化学腐蚀性能和耐热性能,而且不含任何对人体造成伤害的物质成分。该纤维在生产过

程中不产生任何有害气体和废渣,原料与成品的投入和输出比可达 1.05,因此该纤维是纯绿色环保型材料。

(2) 良好的综合性能。CBF 有优越的综合性能,用于增强增韧材料可达到非常理想的效果。因其抗拉强度极高,可达 $4\,150\sim 4\,800\text{MPa}$,超过大丝束碳纤维等其他合成或天然纤维。其断裂延伸率比小丝束的碳纤维高。试验表明,玄武岩纤维的应力-应变曲线表现出完全弹性关系;不受酸、碱腐蚀,耐化学腐蚀性能极其优越;耐温度性能良好,在正常环境温度变化下,其性能不受影响;绝热、绝电、隔声效果良好。另外,CBF 的分子结构与其他纤维不同,其分子维数不是一维线性,而是三维立体式的,因此抵抗压缩变形的能力和抵抗剪切破坏的能力均很强,而且在不同温度环境中性能稳定。CBF 的外表面浸润性超强,当其与树脂等材料结合时能够互相渗透,表面极性良好。

(3) 相容性良好。玄武岩矿石主要是由 SiO_2 和 Al_2O_3 组成,CBF 的纤维是典型的硅酸盐纤维,因此其在拌合时很容易分布散开在水泥混凝土和砂浆中,掺入 CBF 后,混凝土体积不会发生变化,拌合流动和保水性好,有抗渗防冻等良好的耐久性,混凝土的耐温性能、抑制裂缝开展性能、抗冲击性能等得到大幅改善。

(4) 生产成本低廉。普通硅酸盐水泥用的 CBF,与聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维、玻璃纤维等纤维相比生产成本低,因此 CBF 和其他纤维相比,具有强大的竞争优势。

(5) 生产工艺简洁。CBF 生产工艺是将玄武岩矿石投入熔炉中,待高温熔融后经铂铑合金漏板拉拔即可制成纤维,在制作过程中不需要添加任何其他配料,因此生产工艺十分简洁。

(6) 应用领域宽。CBF 及其制品可应用于基础机械装备制造业、航空、船舶、汽车等交通工具制造业,做成保温、隔热、吸声和不可燃复合材料;CBF 增强混凝土还可以广泛应用于建筑、道路、桥梁、港口、航道、飞机场等各种大型运输结构枢纽以及地下结构工程、水利工程乃至核电发电设施、军事领域等。作为增强复合材料、结构板材和饰面材料很好地起到加固补强、防渗抗裂、延长建筑使用寿命等作用。

鉴于 CBF 的上述性能和优点,近年来在混凝土中掺加短切乱向 CBF 制成的玄武岩纤维增强混凝土(basalt fiber reinforced concrete,BFRC)成为工程领域的研究热点。但是目前我国对于 BFRC 的研究尚处于起步阶段,工程应用实例较少,多为试验室探索挖掘性研究。本书通过试验、理论分析和数值模拟相结合的研究方法进一步开展 BFRC 的基本力学性能、耐腐蚀性、耐久性以及在工程中的应用研究。

1.2 玄武岩纤维增强混凝土研究现状

玄武岩纤维(CBF)是苏联于 20 世纪 50 年代开发出来的。1960—1970 年,CBF 研制及其制备生产工艺作为国家重点任务得以迅速开展。1972 年,苏联的科研试验室已研制出 20 多种 CBF 制备生产工艺。1985 年,CBF 开发成功并实现了工业化生产,随后,苏联、美国等国家陆续建起 CBF 制备工厂,CBF 工业化生产不断扩大。

20 世纪 80 年代,我国引入纤维混凝土,并不断进行推广和应用。其中,玄武岩纤维是我国鼓励发展的四大高科技纤维之一,并于 2002 年 8 月将“玄武岩纤维及其复合材料”项目

列入国家“863”计划和国家级火炬计划、国家科技型中小企业创业基金^[6]。玄武岩纤维在我国不断得到更大的重视,对其的研究也不断地深入。

近年来,国内外各界人士对玄武岩纤维混凝土的性能进行了相应的研究,取得了一些成果。V. RAMAKRISHNAN 等人对新拌硬化后的玄武岩纤维混凝土进行了试验研究,结果表明,玄武岩纤维可以很好地分布在混凝土中,无成球或结团现象。纤维的掺入,提高了混凝土裂缝能量吸收能力和延展性。2005年,Dias、Thaumaturgo 等人^[10]对掺入玄武岩纤维的增强聚合物混凝土进行了断裂韧度的分析,研究表明,通过对断裂韧性值、临界应力强度因子值和临界裂缝张开位移值的测定和计算,发现掺入 CBF 的聚合物混凝土具有更好的抗断裂性能。Zielinski 和 Krzysztof 等人^[11]对 CBF 加固混凝土梁构件的适用性进行了研究,结果表明,相比玻璃纤维和碳纤维,CBF 具有更好的耐高温性能,改善了梁的屈服和极限强度。玄武岩纤维片施加数目为两层时是最好的加固方案,并且加强时不需要延伸到弯曲构件的整个长度。廉杰等人^[12]对不同纤维掺量的 BFRC 力学性能进行了试验研究,结果表明,掺入混凝土中的 CBF 在骨料结合界面具有良好的联结性能,提高了混凝土内部结构的密实度,降低了孔隙率,从而提高了混凝土的各项力学性能,特别在抗压强度的早期增强效果尤为显著。CBF 的体积掺量和长径比对混凝土的强度也有一定影响。因此,可以通过最优的体积掺量和长径比的确定来提高混凝土性能。

李为民等^[13]对 BFRC 的冲击压缩性能试验进行了研究,结果表明,在不同的 CBF 体积掺量情况下,BFRC 的动态强度增长因子与平均应变率的对数呈现线性关系,且强度和变形随应变率变化呈现显著的线性增加,体现了良好的相关性能。当 CBF 掺量为 0.1% 时,BFRC 动态的抗压强度最高提高了 26%,变形能力最高提高了 14%;当 CBF 掺量为 0.2% 左右时,BFRC 动态的抗压强度有所提高,但变形能力变化不太明显。在 BFRC 工作性能方面,通过对新拌 BFRC 性能研究,结果表明,CBF 的加入降低了混凝土的流动性,增加了含气量,相比聚丙烯纤维,CBF 提高了混凝土强度,也显著提高了其弹性模量。2012 年,有学者对 BFRC 的力学性能在机场路面上的应用进行了研究,结果表明,BFRC 改善和提高了原有机场混凝土道面的强度和耐久性,且长度为 40mm、直径为 40 μ m 的 CBF 增强效果更显著,最佳的体积掺量为 0.1%。韩嵘等^[14]通过混凝土中加入钢纤维对抗拉性能试验的研究,结果表明,钢纤维的体积掺量和长径比对混凝土拉伸强度具有提高作用,且体积掺量增加、长径比增大,其增强效果愈加显著。通过辅助刚架的设计,对受拉的应力-应变关系进行了测试,并提出了相应的解析表达式,对直接测试的拉伸强度和劈裂试验间接测试的拉伸强度关系进行了分析。赵茜^[15]对混凝土直接拉伸的测试技术和误差进行了相应的分析,提出混凝土轴心拉伸试验时的关键问题:试件几何对中时,要保证偏心率小于 15%。同时,要考虑试件的应力集中问题,保证试件在标距尺寸内的断裂率大于 75%。此外,黄承逵等^[16]应用能量原理对混凝土轴拉试件的稳定开裂条件进行了讨论,对混凝土的动态拉伸试验适用性进行了分析并提出了相应的试验方法。结果表明,试验机的系统刚度对试验有一定影响,当刚度不足时可以增加辅助的刚性杆,试验时采用位移控制加载速度。对动态拉伸强度和变形进行测试时,优先采用轴接试验方法。可采用抗折试验方法研究加载速率对试验结果的影响,但劈裂试验方法不适于动态拉伸试验。谢狄敏等^[17]对混凝土试件在高温作用下的抗拉强度与黏结强度进行了相应的试验研究和理论分析,并建立了高温条件下两个强度的推算公式。尹健等^[18]对高强混凝土的拉伸强度进行了试验研究,结果表明,高强性能的混凝土

土抗拉强度得到明显提高,有效降低了混凝土的脆性。同时,混凝土的轴心抗拉强度和抗压强度与劈裂强度均具有很好的相关性。

吴文伟^[19]对低温下不同纤维混凝土力学性能进行相应的研究,并对体积掺量为 1.5% 的混合纤维混凝土进行道路的数值模拟。结果表明,纤维的掺入对混凝土的抗压强度和抗压弹性模量影响不大,对弯拉强度和延性具有明显的提高,且体积掺量为 1.5% 的混合纤维对混凝土增强效果最好。通过静载作用下混合纤维混凝土路面的有限元分析,对比素混凝土路面,发现全掺式路面性能提高效果最好,为实际的工程应用提供了一定的参考。此外,Al-Khateeb G G 等^[20]对玄武岩纤维混凝土路面进行了动态蠕变车辙试验,取得较好的结果。Jamshidi M 等^[21]对纤维混凝土板进行了耐久性试验,结果表明,纤维的加入改善了水泥混凝土的延展性和韧性,提高了其耐久性性能。此外,Shi J、Chen Z、Shao S 等^[22]对玄武岩纤维混凝土的有效导热系数、CBF 增强聚合物复合梁的抗弯性能和 BFRC 高温下冲击变形特性也进行了相应的研究,表明 CBF 的加入提高了弹性模量和强度,且分散的相变材料与集体之间有限的接触热阻影响复合材料的有效导热系数;CBF 增强聚合物复合梁表现出良好的弯曲性能和承载能力、抗剪切性能和延展性能;BFRC 在不同温度和冲击荷载作用下具有较高的抵抗变形能力,且应力-应变曲线显示出塑性特征。

1.3 混凝土抗冻融破坏研究现状

1.3.1 混凝土冻融破坏机理与抗冻规律

混凝土结构冻融损伤过程极其复杂,因此到目前为止学术领域就混凝土的冻害性机理还没有真正权威的、达成共识的、能够充分并深入反映混凝土冻融破坏规律的理论分析。但自从 20 世纪 30 年代起,学者们开始探究混凝土受冻融破坏的机能和原理,并提出了基础的静水压假说和渗透压假说,美国学者 T. C. Powerse 得出的膨胀压与渗透压理论无疑是目前公认程度较高、最具有参考价值的理论^[8]。

膨胀压与渗透压理论认为含水量达到 91.7% 极限值(吸水饱和)的混凝土在其冻融过程中承受的破坏应力主要来自两部分。一部分是毛细孔的孔壁受到挤压产生压力,因为孔中的水在低于 0℃ 的情况下会结冰,水由液态变成固态时密度减小而体积膨胀,因此孔壁受压迫,自身的内部微观结构会形成拉应力;另一部分是渗管压,水发生形态变化时,胶凝材料孔隙中温度过低的水会在细小孔洞和裂纹中渗透移动。混凝土内部微观结构越细小,其中水分的冰点就越低,这是因为受到表面张力的影响。胶凝材料孔隙中的水冰点非常低,通常低于 -78℃,因此,由于冰与过冷水的饱和蒸汽压的差以及过冷水之间的盐分浓度差,使得水分发生搬迁移动产生渗透压。然而水分迁移形成的渗透压和膨胀压力互相影响,渗透压导致混凝土微观结构中冰体积加大,因此膨胀压力变大。当混凝土受冻时,以上两种压力的共同作用会对混凝土内部的微观结构造成损伤。然而单次冻融作用对混凝土造成的损伤不能够使其发生明显的宏观力学性能的改变,只有混凝土承受反复冻融循环作用后,材料内部累积加深了损坏,致使混凝土内部裂纹逐渐开展联系最终形成通缝,对混凝土的性能产生了不可逆破坏,导致混凝土失去了应有的强度,混凝土的损伤破坏顺序是由内到外。

混凝土发生冻融破坏,必须有两个条件同时存在:一是混凝土必须吸水饱和,不考虑干

燥的混凝土；二是外界气温高低变化交替，混凝土内部结构中的水经多次冻结融化反复作用。混凝土发生冻融破坏的宏观表现是外部逐渐剥落损坏。发生冻融循环的环境越差，即低温越低，冻层越厚，混凝土损坏越严重。如果温度降低的速度越快，反复冻融次数越多，混凝土的外层剥落越多，破坏越严重。混凝土抵抗冻融作用的能力主要受到自身抗冻能力、吸水饱和程度、所处环境温度、冻融速率、土壤最大冻深和年冻融循环次数等条件的影响^[23]。

1.3.2 混凝土内部结构影响冻融破坏的因素

混凝土的冻融破坏主要受到以下三个因素的影响。

1. 饱水度对混凝土冻融破坏的影响

混凝土中水的存在是混凝土产生冻融破坏的最重要原因，混凝土中的水主要有化学结合水、物理吸附水和自由水三种形态，可以在混凝土中自由迁移和渗透的自由水是影响混凝土冻融破坏的首要因素。自由水的迁移不受约束，大、小孔隙中的自由水都可以自由迁移渗透，毛细孔直径越大存水量越多，因此通常用孔隙中的饱水程度衡量混凝土遭受冻融作用的损坏程度。孔隙中水分越饱和，混凝土可冻水越多，体积膨胀越大，产生压力越大。当混凝土内部孔隙完全吸水饱和时可以产生最大的膨胀压力。瑞士学者 Fagerland 曾提出“冻融临界饱水值法”，指的是含水量达到孔隙总体积的 91.7%，若混凝土孔隙含水量低于该值，则混凝土不发生冻胀破坏，水分因为没有足够的压力而不发生迁移渗透。但大多数处于潮湿环境中的混凝土的含水量远远大于普通条件下的混凝土含水量，且远超临界值，当混凝土构件位于水位变化处，因为受到环境干湿交替影响，混凝土构件更容易发生冻融破坏。

2. 孔结构对混凝土冻融破坏的影响

混凝土内部充斥着孔洞，通常将孔结构分为三大类，即水泥石中的凝胶孔、毛细孔和大气孔，而对混凝土受冻破坏影响最大的是大气孔，其中的水最容易在低温下凝结成冰。混凝土冻害和其内部微观孔结构有着密不可分的关系，吴中伟教授通过大量试验后提出了孔结构理论。按照孔径大小将孔隙分为四类：直径 $r < 20\text{mm}$ 的为无害孔，直径 r 为 $20 \sim 50\text{mm}$ 的为少害孔，直径 r 为 $50 \sim 200\text{mm}$ 的是有害孔，当直径 $r > 200\text{mm}$ 时为多害孔，对混凝土冻融破坏起到主要因素的孔的直径为 $r > 100\text{mm}$ 的孔。可以通过改变水灰比来改变混凝土的孔隙率和孔结构，可以降低水灰比以减少混凝土的开孔体积，进而减少可冻水量以提高混凝土抗冻融性能。所以，在工程实践中，可采用控制水灰比以及加入引气剂的方法改善混凝土抵抗冻融循环破坏的能力。

3. 含气量对混凝土冻融破坏的影响

在混凝土受冻融影响的初始阶段，其内部相互分隔的微小气孔能够抵消一部分毛细孔中的静水压力，减少了膨胀压力，含气量对混凝土抗冻性能有不可忽视的影响。而内部气孔可通过在混凝土中掺入引气剂以增多数量，气孔可以很大程度上抑制甚至破坏水泥浆中产生细小冰晶体，提高混凝土的抗冻性能。

1.3.3 纤维对混凝土抗冻性能的影响

混凝土的冻融破坏应从微观机理出发，建立混凝土抗冻性的定量预测及冻融损伤模型来对其破坏程度进行评估。混凝土的抗冻融能力属于耐久性范畴，而耐久性涉及材料与结

构两方面的问题,因此应对耐久性进行全方位综合性的分析,并侧重研究材料性能的退化对结构构件承载力、刚度和延性的影响^[24]。

纤维对混凝土耐久性能提高的显著作用已经得到实践证明^[25-27]。普通混凝土加入纤维后可以与混凝土很好地形成优势互补,因为纤维可以对新拌混凝土的流动性、黏聚性和保水性等有所改善,控制凝结时间,调节可泵性,影响混凝土强度产生、发展的速率,改善混凝土的耐久性,加强混凝土抵抗裂缝开展的能力。纤维是混凝土中的限制成分,掺入纤维的混凝土的强度提高,干缩硬化变小,裂缝开展受限,并具有良好的三维特性,这样就可以更大幅度地提高混凝土的抗裂和抗渗性能。

1.3.4 混凝土冻融试验研究方法

混凝土抗冻融试验有很多种方法,由于室外环境复杂,不易控制,一般采用室内试验研究。目前世界上应用最广泛的试验包括两种,且都满足混凝土耐久性规范,一类为快冻法,这是美国、日本、加拿大等国采用的方法,以《混凝土抗急速冻结和解冻的标准试验方法标准》(ASTM C 666/C 666M—2015)为代表;另一类为慢冻法,以苏联 ГООТ1006 为代表。国内混凝土抗冻试验方法也主要是这两类。慢冻法在长期实践中暴露出了诸多缺点,例如试验周期较长,试验结果偏差较大,同时试验消耗大量人力物力,试验结果也与混凝土耐久性能要求相距甚远,因此慢冻法逐渐被淘汰,目前快冻法是主要的混凝土抗冻融性能试验标准方法。^[28-30]

《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)规定了快冻法的试验标准,要求试验用混凝土快冻法试件尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ 的棱柱体,养护天数为 28d,将成型的试件拆模后放在养护室养护直到试验龄期的第 4d,把试件从现养护条件下拿出,立即放入 $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 的水中继续浸泡 4d。进行试验时,首先擦干试件表面水分,称量试件最初质量,并测试试件最初的横向基频。每 25 个冻融周期将试件拿出,称量试件质量,并测试试件横向基频。测量时,将试件从盒中精心取出,冲洗干净,擦掉表面水分,称质量和测定横向基频,并进行必要的外观描述或照相。一个冻融循环经历 $2.5 \sim 4.0\text{h}$,在加热和冷却时,试样核心温度应分别调控在 $-17^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 和 $8^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。试件中心和表面的温差小于 28°C 。必须明确混凝土受冻融破坏的标准,这样才能对混凝土耐久性能进行定量分析和设计,确定混凝土已完全达到受冻破坏而没有研究的价值。规范规定了三种情况来判断混凝土是否达到冻融破坏的标准:(1)已经受 300 次冻融循环;(2)相对动弹性模量下降到 60% 以下;(3)质量损失率达 5%。符合其中一种就可认定试件坏损,终止试验。

自 20 世纪 80 年代以来,国内外的研究人员对混凝土的耐久性进行了大量的研究工作,并取得了很大进展,但是研究成果主要是对于碳化、氯盐侵蚀、应力、硫酸盐的侵蚀、冻融等单一因素作用下开展的试验研究^[31-37]。研究损伤的复合效应和两种损伤因素之间的相互影响规律是研究更加复杂的损伤复合效应的基础,这里也不排除多个因素之间有进一步耦合的可能。对于混凝土在多重破坏因素作用下的损伤复合效应的研究,应该从较为简单的两种因素作用研究开始,逐渐开展多种因素损伤复合效应的研究。鉴于此,本章以此为研究和解决上述问题的技术路线。

1.4 纤维布加固国内外研究现状

随着我国科学技术的不断快速发展,对建筑物结构强度的要求日渐增加,老式建筑物的功能满足不了当今社会的需求和标准化的工程质量要求。例如很多房屋建筑、桥梁等建筑物,混凝土材料老化风蚀、承受荷载增加,结构强度不足、用途的变化、设计考虑不周、施工不规范等因素,都能使一些建筑物的结构强度遭到破坏。因此需要进一步的结构加固,由于梁在建筑物中的抗裂、抗震、稳定的构造性作用,研究梁的加固在建筑工程中尤其重要。

由于玄武岩纤维布在我国起步较晚,国内关于此纤维布的研究较少,目前,主要的研究热点集中在力学性能的试验和理论研究^[39-42];对于抗疲劳强度的研究不够深入,并且国内外学者主要是对碳纤维布进行试验研究,对玄武岩纤维布研究较少。玄武岩纤维布具有良好的抗疲劳性能、力学性能、化学性能,但在实际工程中应用较少,本试验研究玄武岩纤维布的力学性能,来验证玄武岩纤维布能否在工程中大规模应用。

纤维布加固法能有效地增加结构强度和简化施工流程,主要体现在自身具有较好的力学性能、良好的化学性能、优异的抗疲劳性能、延展性较好、自重较轻、使用范围较广、施工流程简单、环保无污染等优点^[42-43]。Meier等^[44]通过CBF增强聚合物对框架结构和弱梁柱节点结构加固进行了研究,试验表明,CBF的加入使结构提高了抗剪能力和延展性,滞回耗能能力的显著提高阻止了梁柱节点失效模式,提高了结构抗震性能。

玄武岩纤维布加固钢筋混凝土结构的方法主要有U形全包法、U形套箍锚固基底纤维布法。综合国内外研究,U形套箍锚固基底纤维布法也能有效地实现U形全包法所能达到的力学效果,并且能有效地减少玄武岩纤维布使用量,避免资源的浪费,节约成本。

1.4.1 常用纤维布

纤维布加固是以混凝土试件作为基础材料,以环氧树脂胶作为粘贴剂,玄武岩纤维布作为粘贴材料,将弹性模量大、抗拉强度大、良好延展性的纤维布均匀平整地粘贴在混凝土试件的基底,这样可以弥补混凝土试件在力学性能和疲劳性能中的多种不足^[8],如抗弯、抗剪、抗腐蚀等。早期人们用棉布、帆布或者麻袋粘贴在要加固试件的表面来提高混凝土试件梁的力学性能。如今用于改善混凝土试件梁结构性能的纤维布种类越来越多。碳纤维布具有强度高、密度小、厚度薄,具有良好的抗拉性能及延展性,但是高昂的价格及耐酸碱性能较弱,工程中大规模应用会提高工程的预算成本^[45-47]。玻璃纤维布具有良好的耐酸耐碱性,但是抗拉强度、抗弯强度、延展性都较弱,不适用于工程中大规模使用^[48]。芳纶纤维布具有良好的耐酸耐碱性及抗弯强度,但是由于其不具有良好的延展性及抗压性能,在工程中的应用也比较少^[49]。

1.4.2 玄武岩纤维布

玄武岩纤维布是以玄武岩为原料制成的无机可降解纤维布,具有和硅酸盐水泥相同的亲水性,是一种具有很好发展前景的复合新型材料,具有良好的抗疲劳性能和力学性能,属于纯天然的无机非金属复合材料,在很多领域都有广泛的应用。在土木工程领域,玄武岩纤

维布在增强混凝土和沥青路面中得到广泛的应用。在建筑领域,对于建筑物梁、柱的加固也有一定的尝试,加固后玄武岩纤维布起到二次加筋的作用,增强了房屋、桥梁、跑道、临边防护等建筑工程的结构强度、防震防裂、耐化学腐蚀的作用^[50-51]。

玄武岩纤维布用环氧树脂粘贴在混凝土表面,可以代替一定程度上的钢筋,起到二次微加筋的作用。通过环氧树脂胶的粘贴,玄武岩纤维布和混凝土之间形成了耦合作用,能提高加固构件的力学性能和抗疲劳性能,弥补了混凝土构件原有的脆性缺陷。

在试件抗弯、抗剪试验中,玄武岩纤维布对混凝土试件初期收缩裂纹起到抑制效果,优化了混凝土构件的耐久性和抗化学腐蚀性能的效果。玄武岩纤维布在制作生产过程中不会产生对人体和环境有害的气体,属于绿色环保新型复合材料;玄武岩纤维布不仅环保,还具有其他纤维布不具备的优异力学性能和化学性能。

1.4.3 国内外研究现状

1984年,瑞士科学家 Meier 开创了纤维布增强混凝土结构强度的试验研究方法^[2],并成功应用于加固多跨连续箱形梁桥的实际工程当中。至此纤维布加固法的优点相继被发现,此后学者们陆续对此方法做出了深入的试验研究,并把试验结果成功地运用于结构加固工程中。

熊光晶、马晓升等^[52]提出了利用多种纤维布进行混合加固的试验方案,并与碳纤维布加固先进性对比,得出混合加固法对于试件的延展性有明显的提高;曾洪超等^[53]通过纤维布层数和适筋、少筋的改变,得出碳纤维布能够提高试件的抗弯性能,增加试件的刚度,并经过理论推导得到碳纤维布加固的构件抗弯承载力的计算公式;李志强等^[54]进行了碳纤维布加固和玄武岩纤维布加固的模拟分析,得出玄武岩纤维布不仅具有良好的力学性能,并且施工技术较低,比碳纤维布更具有应用前景。张学辉^[55]等通过粘贴不同种类纤维布的试件,并与素混凝土梁进行对比,得出抗弯和抗剪的试验中,经过粘贴多种纤维布后,能有效增加构件的开裂和破坏荷载;粘贴碳纤维布相对于粘贴玄武岩纤维布的试件承载力提高较大,综合来看碳纤维布加固试件的效果比粘贴玄武岩纤维布的效果更好,但是两者在承载力的提高差距并不大,从经济和技术改进方面玄武岩纤维布比碳纤维布的加固效果较好。

郭旗^[56]对 BFPR 纤维布约束素混凝土圆柱做了耐久性试验,试验结果表明,在不同的两种约束(全裹和条带)情况下,随着外荷载作用时间的增加,全裹和条带的两种锚固形式的轴向应变都有一定程度的降低,不同的承载历程对试件的纵向应变有较大的劣化作用。对比试验结果,条带和全裹约束相比无约束纵向变形能力有较大提高。欧阳煜等^[57]通过对玄武岩纤维布的试验研究,得出玄武岩纤维布能有效地提高混凝土的受剪承载力,对试件的结构强度有较好的加固作用,提高了试件的刚性,并根据理论分析推导出适合工程应用的承载力计算设计公式。陈绪军等^[58]对玄武岩纤维布加固梁进行抗弯试验,得出试件的力学性能和抗疲劳性能不随纤维布层数的增加而呈线性增加,并推导出试件的受弯荷载的公式,基本符合试验结果。

蒯建廷^[59]提出粘贴玄武岩纤维布加固后,对于试件梁的极限承载力和开裂荷载都有一定程度的提高,但这种增加和纤维布层数不呈线性增加;经过玄武岩纤维布加固试件的最大裂纹和裂缝间距都有所减小。随着纤维布层数的增加,加固梁的极限承载力逐渐增加,当