

玄武岩纤维水工混凝土 及BFRP加固

张俊芝 高延红 章晓桦 孙从炎 孙志恒 王建东 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

本书获浙江工业大学专著与研究生教材出版基金资助
(资助编号: 20160107)

玄武岩纤维水工混凝土 及 BFRP 加固

张俊芝 高延红 章晓桦 孙从炎 孙志恒 王建东 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书以水工混凝土结构所处的实际工作环境为背景,以试验研究和理论分析的方法,系统地研究玄武岩纤维水工混凝土及水泥砂浆的基本物理力学性能,玄武岩纤维水工混凝土的抗冲耐磨与抗渗性能和抗氯离子侵蚀增强性能等,形成了玄武岩纤维水工混凝土应用的基础理论与技术;以试验、理论分析和数值模拟方法研究考虑加载历程的玄武岩纤维复合材料(BFRP)加固钢筋混凝土简支梁、连续梁及方柱的受力过程、破坏形态、补强效果及承载力的计算模型等,分析计算模型的适用性与加固的经济性;进行了以玄武岩纤维聚合物水泥砂浆等对大型水库的溢流面、溢洪道底板脱空和溢洪道伸缩缝等缺陷修补的应用研究,并取得了预期的补强效果。全书共分9章,包括玄武岩纤维水工混凝土及水泥砂浆的增强性能、BFRP加固RC构件的性能及玄武岩纤维聚合物水泥砂浆的修补应用等三部分内容。

本书的研究内容,涵盖了玄武岩纤维混凝土(及砂浆)的基本性能和BFRP加固RC构件的计算方法等,积累了纤维水工混凝土的技术和经验。本书既有试验研究,也有理论分析与应用研究,可供进一步开发和应用玄武岩纤维,进行纤维混凝土及BFRP加固RC构件等研究的土木工程和水利工程等专业的工程技术人员、本科生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

玄武岩纤维水工混凝土及BFRP加固 / 张俊芝等著

— 北京:中国水利水电出版社,2017.2

ISBN 978-7-5170-5207-4

I. ①玄… II. ①张… III. ①玄武岩—纤维增强混凝土—应用—水工建筑物—加固—研究 IV. ①TV544

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第038101号

书 名	玄武岩纤维水工混凝土及 BFRP 加固 XUANWUYAN XIANWEI SHUIGONG HUNNINGTU JI BFRP JIAGU
作 者	张俊芝 高延红 章晓桦 孙从炎 孙志恒 王建东 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京九州迅驰传媒文化有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 20 印张 370 千字
版 次	2017 年 2 月第 1 版 2017 年 2 月第 1 次印刷
印 数	001—600 册
定 价	78.00 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

前言

海工与水工混凝土结构所处的使用环境恶劣,对混凝土的基本物理力学性能与抗冲耐磨等耐久性能的要求更高;而在混凝土中掺加不同种类的纤维(包括碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维或钢纤维等)都可以不同程度地提高混凝土的基本物理力学与工作性能。近年来,已开展了各种纤维及其增强复合材料在混凝土和结构构件加固中的工作性能、效果及经济性等研究,取得了相应的研究成果。

水泥基材料中使用的纤维种类较多,如果按材料性质可划分为金属纤维,如钢纤维等;无机纤维,如抗碱玻璃纤维、碳纤维和碳化硅纤维等人造矿物纤维;有机纤维,主要有聚丙烯纤维、尼龙纤维等合成纤维和天然植物纤维。与其他纤维相比,玄武岩纤维(Basalt Fiber, BF)有材料的环保性、较好的物理力学性能和较稳定的化学性能等特点。相对其他纤维材料而言,作为一种应用于工程中的时间不长、以玄武岩为主原料的绿色纤维材料,对玄武岩纤维混凝土及其增强复合材料(Basalt Fiber-Reinforced Polymer, BFRP)加固性能的系统性研究成果不多,尤其缺乏水工(海工)玄武岩纤维混凝土的工程应用性能和现场试验研究的成果,仍有不少基本的力学性能和应用技术及经济性等需要深入研究。本书以试验和理论分析及模拟计算的方法,对玄武岩纤维水工混凝土及增强复合材料加固进行了系统研究,涉及玄武岩纤维混凝土工程应用的主要性能及BFRP加固不同受力状态RC构件的性能,研究的内容拓展了纤维混凝土及纤维增强复合材料的研究范围。

本书首先介绍了玄武岩及其纤维材料的特征、玄武岩纤维材料及复合材料的应用。第2章研究了玄武岩纤维水工混凝土的基本物理力学性能,包括玄武岩纤维水工混凝土的抗压、劈裂抗拉、抗弯性能、弹性模量、抗剪性能、轴心抗拉强度、抗冻性能和抗碳化性能等。第3章研究了玄武岩纤维水工混凝土抗冲耐磨与抗渗性能,包括水工混凝土抗冲增强性能、抗磨增强性能、抗水流及现场抗冲刷性能、抗渗性能及表面修补性能等。第4章研究了玄武岩纤维水工砂浆的基本性能,包括玄武岩纤维水工砂浆的抗压性能、劈裂抗拉强度、黏结强度、抗渗性能、现场抗冲性能和抗氯离子侵蚀性能及抗冻性能等。第5章介绍了玄武岩纤维水工混凝土的抗氯离子侵蚀性能,包括玄武

岩纤维混凝土在改进的自然扩散法环境下的抗氯离子侵蚀性能、自然潮差环境下抗氯离子侵蚀性能、人工模拟潮差环境下抗氯离子侵蚀性能、强感潮环境下抗氯离子侵蚀性能、短切玄武岩纤维混凝土构件的抗氯离子腐蚀性能及其抗氯离子侵蚀的微观机理等。第6章研究了BFRP加固钢筋混凝土简支梁的抗弯性能,包括BFRP加固RC简支梁正截面承载力的计算、BFRP加固RC简支梁的试验及加固效果分析和计算模型的适用性等。第7章介绍了BFRP加固RC方柱的性能及数值分析,包括BFRP加固RC方柱的试验及力学性能、理论分析和数值分析。第8章为BFRP加固RC连续梁的性能及数值分析,介绍了BFRP加固RC连续梁的试验及理论分析、BFRP加固RC连续梁的数值计算及BFRP加固RC构件的经济性。第9章为玄武岩纤维混凝土及砂浆的应用研究,包括聚合物玄武岩纤维砂浆性能的试验研究成果、水电站溢流面表层玄武岩砂浆的抗冲磨防护应用、聚合物玄武岩纤维混凝土处理水电站溢洪道伸缩缝缺陷及处理水电站表孔溢洪道底板脱空等应用成果。本书中还列出了300多个参考文献,为进一步研究提供了必要的线索。

全书中的2.2、3.2、3.3、3.4、3.5、4.5、4.6和5.5节内容由高延红撰写;2.2.3、2.8、2.9、3.6.3、4.7和9.5节内容由章晓桦和孙从炎撰写;9.1、9.2、9.3和9.4节内容由孙志恒撰写;2.6和4.4节内容由王建东撰写;其他内容由张俊芝撰写。全书由张俊芝统稿,高延红完成全书内容校对、部分图表绘制和参考文献编排等。浙江工业大学研究生刘华挺、朱燕东、傅招旗、赵璟、吴灵杰、黄俊、许亮、庄华夏、石佳乐、胡明龙、陈伟、李登辉以及本科生张灵福和徐雪峰等,浙江省水利河口研究院的陈文亮和黄建超等,具体完成了书中相应内容的试验、理论分析及数值模拟计算等研究,他们的研究成果体现在参考文献和有关研究报告中,在此未对他们的工作一一列举;研究生周胜兵、王梁英、伍亚玲、金汉阳、刘如泰、周巧萍、孙玮琨、屠一军、张杉、江维、边帆、方赵峰和郭杰等参加了部分试验研究及编写资料的收集工作。

本书是作者多年来对玄武岩纤维混凝土及其增强复合材料加固性能的系统性研究成果的总结,旨在为纤维水工混凝土及其应用的深入研究提供一些基础资料,以推动玄武岩纤维及BFRP的应用。从2009年开始,受水利部公益性行业科研专项项目(200901065)、浙江省水利厅科技项目(RB1302)资助以来,作者及项目承担单位的有关研究人员,一直致力于玄武岩纤维水工混凝土基本物理力学性能及工程性能、玄武岩纤维增强材料加固性能和实际水利工程修补应用等研究;研究过程中,还获得国家自然科学基金(50879079和51279181)、浙江省自然科学基金(LY13E090008和LY17E090007)等项目资助。这些研究

项目，促进了作者对玄武岩纤维混凝土及其增强复合材料加固性能的深入研究，丰富了纤维混凝土研究领域的内容。

本书的出版得益于众多研究人员的关心和帮助，并得到了上述研究项目的资助。感谢浙江工业大学学术著作出版基金、浙江省重点学科（结构工程）和浙江工业大学重点学科（防灾减灾工程及防护工程）的资助；感谢同行学者和作者进行的有益探讨并提供了宝贵的资料。浙江工业大学杨俊杰教授、李通坤副教授、袁伟斌副教授、马成畅高级工程师、韦甦高级工程师等在项目研究过程中给予过重要的帮助。还要特别感谢浙江省钱塘江管理局黄海珍高级工程师、胡振华高级工程师和胡华强工程师，他们提供了现场试验研究的便利及宝贵的研究资料。在此一并向他们及有关协助单位表示谢意。

限于作者的水平，本书如果存在不妥、疏漏甚或错误之处，敬请读者不吝赐教。

作者

2016年10月于杭州

目录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 玄武岩及其纤维材料的特征	1
1.2 玄武岩纤维材料	3
1.2.1 玄武岩纤维主要技术指标	3
1.2.2 玄武岩纤维主要物理力学性能	5
1.3 玄武岩纤维复合材料	7
1.4 玄武岩纤维及 BFRP 应用	11
第 2 章 玄武岩纤维水工混凝土的基本物理力学性能	13
2.1 试验原材料与配合比	13
2.1.1 试验原材料	13
2.1.2 试验混凝土配合比	14
2.1.3 纤维混凝土的制备	15
2.2 玄武岩纤维水工混凝土的抗压性能	16
2.2.1 与掺加硅粉的混凝土抗压性能的比较	16
2.2.2 与掺加碳纤维的混凝土抗压性能的比较	19
2.2.3 粉煤灰短切玄武岩纤维混凝土的抗压强度	24
2.3 玄武岩纤维水工混凝土的劈裂抗拉性能	24
2.3.1 混凝土劈裂抗拉性能试验	24
2.3.2 玄武岩纤维混凝土劈裂抗拉强度增强效果	25
2.4 玄武岩纤维水工混凝土的抗弯性能	28
2.4.1 玄武岩纤维水工混凝土抗弯性能试验	28
2.4.2 玄武岩纤维水工混凝土抗弯性能分析	29
2.5 玄武岩纤维水工混凝土的弹性模量	32
2.5.1 玄武岩纤维水工混凝土的弯曲弹性模量	32
2.5.2 玄武岩纤维水工混凝土的静力抗压弹性模量	33
2.6 玄武岩纤维水工混凝土的抗剪性能	34
2.6.1 玄武岩纤维水工混凝土的抗剪性能试验	35

2.6.2	试验结果	36
2.6.3	玄武岩纤维水工混凝土抗剪强度的影响因素	38
2.6.4	抗剪强度与轴心抗压强度的关系	41
2.7	玄武岩纤维水工混凝土的轴心抗拉强度	42
2.7.1	混凝土轴心抗拉强度试验	42
2.7.2	混凝土轴心抗拉强度试验结果与分析	44
2.8	玄武岩纤维水工混凝土的抗冻性能	47
2.8.1	混凝土抗冻性能试验	47
2.8.2	玄武岩纤维水工混凝土的抗冻性能	49
2.9	玄武岩纤维水工混凝土的抗碳化性能	50
2.9.1	混凝土抗碳化性能试验	50
2.9.2	混凝土的抗碳化性能	50
第3章	玄武岩纤维水工混凝土抗冲耐磨与抗渗性能	52
3.1	水工混凝土抗冲耐磨与抗渗性能	52
3.1.1	水工混凝土的抗冲耐磨性能	52
3.1.2	水工混凝土的抗渗性能	53
3.2	玄武岩纤维水工混凝土的抗冲增强性能	55
3.2.1	抗冲试验原材料与试验方法	55
3.2.2	纤维混凝土抗冲试验结果	57
3.2.3	纤维混凝土抗冲增强性能分析	58
3.3	玄武岩纤维水工混凝土的抗磨增强性能	60
3.3.1	抗磨试验原材料与试验方法	61
3.3.2	纤维混凝土抗磨试验结果	62
3.3.3	混凝土抗磨增强性能分析	63
3.4	玄武岩纤维水工混凝土的抗水流冲刷性能	66
3.4.1	抗水流冲刷试验的原材料与试验方法	67
3.4.2	抗水流冲刷的试验结果	69
3.4.3	抗水流冲刷性能分析	69
3.5	强感潮环境下玄武岩纤维水工混凝土的抗冲性能	72
3.5.1	现场抗冲试验的原材料与试验方法	72
3.5.2	现场抗冲试验的结果	73
3.5.3	强感潮环境下现场抗冲性能分析	74
3.6	玄武岩纤维水工混凝土的抗渗性能	76
3.6.1	抗渗性试验的原材料与试验方法	76

3.6.2	玄武岩纤维与碳纤维混凝土的抗渗性	79
3.6.3	玄武岩纤维粉煤灰混凝土抗渗性能	83
3.7	玄武岩纤维水工混凝土面板的抗冲性能	84
3.7.1	水库工程及大坝混凝土面板与抗冲试验	84
3.7.2	混凝土面板抗冲性能	85
3.8	自然强潮环境下玄武岩纤维混凝土表面修补性能	86
3.8.1	表面修补的混凝土原材料及试验方法	86
3.8.2	玄武岩纤维混凝土表面修补的效果	88
3.8.3	与既有混凝土的黏结及长期抗冲磨性能	88
第4章	玄武岩纤维水工砂浆的基本性能	90
4.1	玄武岩纤维水工砂浆的抗压性能	90
4.1.1	试验原材料与试验方法	90
4.1.2	试验结果	91
4.1.3	试验砂浆抗压性能分析	94
4.2	玄武岩纤维水泥砂浆的劈裂抗拉强度	96
4.2.1	试验原材料与试验方法	96
4.2.2	试验结果	97
4.2.3	试验砂浆劈裂抗拉强度分析	97
4.3	玄武岩纤维水泥砂浆的黏结强度	98
4.3.1	试验原材料与配合比	98
4.3.2	试验方法与结果处理	99
4.3.3	试验结果	100
4.3.4	试验砂浆黏结强度分析	102
4.4	玄武岩纤维水泥砂浆的抗渗性能	104
4.4.1	试验原材料与试验方法	104
4.4.2	试验结果	106
4.4.3	试验砂浆抗渗性能分析	108
4.5	强感潮环境下玄武岩纤维水泥砂浆的抗冲性能	109
4.5.1	砂浆现场抗冲试验的原材料与试验方法	110
4.5.2	砂浆现场抗冲试验结果	110
4.5.3	砂浆现场抗冲试验结果分析	112
4.6	自然潮差环境下玄武岩纤维水泥砂浆抗氯离子侵蚀性能	113
4.6.1	试验原材料及配合比	114
4.6.2	试验方法	114

4.6.3	自然潮差环境下的试验结果及分析	118
4.7	玄武岩纤维水泥砂浆的抗冻性能	120
4.7.1	试验的原材料与试验方法	120
4.7.2	玄武岩纤维砂浆抗冻性能	121
第5章	玄武岩纤维水工混凝土的抗氯离子侵蚀性能	122
5.1	混凝土抗氯离子侵蚀的试验方法	122
5.2	改进的自然扩散法环境下混凝土抗氯离子侵蚀性能	124
5.2.1	试验原材料与配合比	124
5.2.2	改进的自然扩散法	125
5.2.3	试验结果与分析	127
5.3	自然潮差环境下玄武岩纤维混凝土抗氯离子侵蚀性能	130
5.3.1	试验原材料与试验方法	130
5.3.2	试验结果	131
5.3.3	自然潮差环境下试验结果分析	132
5.4	人工模拟潮差环境下玄武岩纤维混凝土抗氯离子侵蚀性能	136
5.4.1	试验原材料与试验方法	137
5.4.2	试验结果	138
5.4.3	人工模拟潮差环境下试验结果分析	140
5.5	强感潮环境下玄武岩纤维混凝土抗氯离子侵蚀性能	144
5.5.1	试验原材料与试验方法	145
5.5.2	试验结果	148
5.5.3	自然潮差环境下试验结果分析	152
5.6	短切玄武岩纤维混凝土构件的抗氯离子腐蚀性能	154
5.6.1	试验设备与氯离子腐蚀环境	155
5.6.2	试验方法	156
5.6.3	试验结果	158
5.6.4	试验结果分析	158
5.7	玄武岩纤维混凝土抗氯离子侵蚀的微观机理	161
5.7.1	试验混凝土与试验方法	161
5.7.2	试验结果	162
5.7.3	混凝土抗氯离子侵蚀的微观机理分析	163
第6章	BFRP 加固钢筋混凝土简支梁的抗弯性能	165
6.1	FRP 加固 RC 梁的理论计算与试验研究方法	165
6.1.1	FRP 加固 RC 梁正截面承载力计算与设计规范	165

6.1.2	FRP 加固 RC 梁正截面承载力的试验与数值分析	166
6.1.3	FRP 加固 RC 梁的过程与影响因素	168
6.2	BFRP 加固 RC 简支梁正截面承载力的计算	171
6.2.1	基本假定	171
6.2.2	正截面承载力的表达式	173
6.2.3	考虑 BFRP 滞后应变的 RC 梁承载力的算例	179
6.3	BFRP 加固 RC 简支梁的试验	181
6.3.1	BFRP 加固 RC 简支梁的试验方案	181
6.3.2	BFRP 加固 RC 简支梁的试验方法	183
6.3.3	BFRP 加固 RC 梁的试验结果	185
6.3.4	BFRP 加固 RC 简支梁的试验现象分析	187
6.4	BFRP 加固 RC 简支梁的效果分析	193
6.4.1	不同预加载程度时的加固结果比较	193
6.4.2	不同卸载程度的加固结果比较	195
6.4.3	加固试验时的不同损伤程度比较	197
6.4.4	不同 BFRP 层数的加固结果比较	198
6.5	BFRP 加固 RC 梁的计算模型及适用性	202
6.5.1	BFRP 加固 RC 梁承载力的计算	202
6.5.2	BFRP 加固 RC 简支梁试验的数据统计分析	203
6.5.3	BFRP 加固 RC 简支梁承载力计算模型的适用性	205
第 7 章	BFRP 加固 RC 方柱的性能及数值分析	207
7.1	FRP 加固 RC 柱的试验与理论研究	207
7.1.1	FRP 加固 RC 柱的试验研究	207
7.1.2	FRP 加固 RC 柱的理论研究	208
7.1.3	FRP 加固 RC 柱的数值分析	209
7.2	BFRP 加固 RC 方柱的试验研究	210
7.2.1	BFRP 加固 RC 方柱的试验设计及材料性能	211
7.2.2	BFRP 加固 RC 方柱性能的试验方法	212
7.2.3	BFRP 加固 RC 方柱的试验现象与破坏形态	215
7.3	BFRP 加固 RC 方柱的力学性能及分析	219
7.3.1	BFRP 加固 RC 方柱的承载力	219
7.3.2	BFRP 加固 RC 方柱的力学性能	221
7.4	BFRP 加固 RC 方柱性能的理论分析	228
7.4.1	FRP 加固 RC 方柱的相关参数	228

7.4.2	BFRP 加固 RC 方柱的计算模型	231
7.4.3	BFRP 加固 RC 方柱的计算	232
7.5	BFRP 加固 RC 方柱性能的数值分析	232
7.5.1	BFRP 加固 RC 方柱的数值计算模型	233
7.5.2	BFRP 加固 RC 方柱的数值计算结果	236
第 8 章	BFRP 加固 RC 连续梁的性能及数值分析	240
8.1	FRP 加固 RC 连续梁的试验与理论	240
8.1.1	FRP 加固 RC 连续梁的正截面承载力	240
8.1.2	FRP 加固混凝土梁的斜截面抗剪承载力及数值分析	241
8.2	BFRP 加固 RC 连续梁的试验研究	243
8.2.1	BFRP 加固 RC 连续梁的试验方案	243
8.2.2	BFRP 加固 RC 连续梁的试验结果	246
8.2.3	BFRP 加固 RC 连续梁的受力性能分析	250
8.2.4	BFRP 加固 RC 连续梁的影响因素分析	252
8.3	BFRP 加固 RC 连续梁的理论分析	258
8.3.1	BFRP 加固 RC 连续梁的受力过程分析	258
8.3.2	BFRP 加固 RC 连续梁的承载力计算	260
8.4	BFRP 加固 RC 连续梁的数值分析	261
8.4.1	BFRP 加固 RC 连续梁的有限元分析模型	261
8.4.2	BFRP 加固 RC 连续梁的模拟计算及分析	263
8.5	BFRP 加固 RC 构件的经济性分析	267
8.5.1	FRP 加固 RC 构件的价值分析方法	267
8.5.2	BFRP 加固 RC 构件性能的价值分析	268
第 9 章	玄武岩纤维混凝土及砂浆的应用研究	272
9.1	聚合物玄武岩纤维砂浆性能的试验研究	272
9.1.1	聚合物玄武岩纤维砂浆的原材料	273
9.1.2	试验砂浆配制与试件成型	273
9.1.3	试验结果及分析	274
9.2	水电站溢流面表层玄武岩纤维砂浆的抗冲磨防护应用	275
9.2.1	工程概况与防护现场施工	275
9.2.2	应用的试验结果	277
9.3	聚合物玄武岩纤维混凝土处理水电站溢洪道伸缩缝缺陷	277
9.3.1	工程概况	277
9.3.2	修复施工方法	278

9.3.3	修复的施工质量检测结果	280
9.4	聚合物玄武岩纤维混凝土处理水电站表孔溢洪道底板脱空	280
9.4.1	工程概况	280
9.4.2	混凝土底板脱空处理	281
9.4.3	聚合物纤维混凝土处理的质量检验	282
9.5	玄武岩纤维混凝土加固水工结构的应用	283
9.5.1	水库工程溢洪道纤维混凝土挡墙	283
9.5.2	河道与渠道工程的加固应用	284
参考文献		286

第1章 绪 论

现有的研究成果表明,在混凝土中加入纤维能有效抑制混凝土塑性收缩开裂,改善混凝土抗冲磨、抗冲击、抗冻和抗渗等性能。近年来,纤维增强混凝土在建筑、道路交通和隧道桥梁等基础设施建设领域已经得到广泛应用。通过在混凝土中掺加钢纤维、聚丙烯纤维、玻璃纤维及尼龙纤维等形成纤维混凝土,这些纤维可有效提高混凝土的强度及抗裂性能。20世纪80年代后期,纤维混凝土在我国逐渐得到推广。纤维均匀地掺入到混凝土中,相互搭接形成一个乱向支撑体系,阻碍了混凝土内部裂缝的扩展与连通贯穿,防止混凝土碎块从基体中剥落。

连续玄武岩纤维(Continue Basalt Fiber, CBF)是以天然玄武岩矿石为原料,将矿石破碎后加入熔窖中,在1450~1500℃熔融后,通过铂铑合金拉丝漏板制成的连续纤维。玄武岩纤维的结构及性能类似于玻璃纤维,但其在耐高温、耐水汽、耐腐蚀性和绝热隔音等性能方面都优于玻璃纤维,它在空气和水介质中不会释放有毒物质而且阻燃性好,还具有良好的力学性能,并且能在降解后即成为土壤的母质,对环境友好,是一种绿色材料^[1-3]。因为该纤维主要成分为火山岩浆岩的中性、碱性岩(SiO_2 为52%~65%),包含辉长岩和碱性玄武岩、闪长岩-安山岩类,因此也称之为“火成岩纤维”^[4-5]。但是原料以玄武岩为主,为与多数研究成果一致,因此本书仍称其为“玄武岩纤维”^[6-10]。

玄武岩纤维复合材料(BFRP)是一种新型无机纤维复合材料,在工程中应用的包括短切玄武岩纤维、玄武岩纤维片材、型材、板材、筋(棒)材和索材等。CBF作为一种新型的建筑材料,与碳纤维、玻璃纤维和芳纶纤维相比,具有较强的综合性能,而且具有较明显的价格优势。玄武岩纤维及其复合材料应用的主要领域包括在增强混凝土性能方面用作混凝土改性掺料,在建筑修复、加固和更新领域代替碳纤维新材料,补强梁、柱、板和墙等结构构件,尤其适合抗震加固,在道路施工领域用作土工格栅材料等^[11-15]。

1.1 玄武岩及其纤维材料的特征

砂浆和混凝土使用的纤维种类较多,按材料性质可以分为三类:①金属纤

维，如钢纤维等；②无机纤维，如抗碱玻璃纤维、碳纤维和碳化硅纤维等人造矿物纤维；③有机纤维，主要有聚丙烯纤维、尼龙纤维等合成纤维和天然植物纤维。

与其他纤维相比，玄武岩纤维具有一定的优势。但由于玄武岩纤维的产地不同，原材料本身成分的波动性大，化学成分较为复杂，其物理力学性能及耐化学介质等性能存在着一定的差异，影响了玄武岩纤维成型工艺的稳定性，使得玄武岩纤维在拉伸强度等方面的特性产生较大波动^[16-17]。

玄武岩为天然火山熔岩，经过高温喷发而成，其主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 等多种氧化物^[9,14,18-20]。由于玄武岩纤维原料的差异，连续玄武岩纤维的化学成分有所不同。

表 1.1 列出了一些连续玄武岩纤维不同的化学成分（质量比）。

连续玄武岩纤维的化学成分				%
化学成分	文献 [14]	文献 [18]	文献 [19]	文献 [20]
SiO_2	52~58	43.3~47.0	42.43~55.69	48~60
Al_2O_3	14~19	11~13	14.21~17.97	14~19
CaO	5~9	10~12	7.43~8.88	5~9
MgO	3~6	8~11	4.06~9.45	3~6
$\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$	3~6	$\text{Na}_2\text{O}<5$	Na_2O , 2.38~3.79	3~6
TiO_2	0.5~2.5	<5	1.10~2.55	0.5~2.5
$\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}$	9~14	$\text{Fe}_2\text{O}_3<5$	Fe_2O_3 , 10.80~11.68	9~14
其他	0.09~0.13	$\text{K}_2\text{O}<5$	K_2O , 1.06~2.33	0.09~0.13

与其他纤维相比，玄武岩纤维有以下特征^[1-3,11,13-14,16,21-29]：

(1) 材料的环保性。玄武岩纤维的原料取自于天然的火山岩（主要含玄武岩和安山岩），在一定程度上避免了传统材料在生产、使用和废弃过程中需要消耗大量的能源和资源，造成环境污染等缺点。

(2) 较好的物理力学性能。玄武岩纤维（无捻粗纱浸胶）的抗拉强度普遍能达到 2000MPa 以上，弹性模量也能达到 90GPa 左右。其具有三维的分子维数，与分子维数是一维的线性聚合物相比，CBF 具有较高的抗压强度、抗剪强度和在耐恶劣环境中使用的适应性及抗老化性等性能。玄武岩纤维在 400℃ 温度下工作时，其断裂强度能保持 85%；在 600℃ 下工作，其断裂强度仍能保持 80% 左右；玄武岩纤维软化点为 960℃，在高温下其强度可保持较长时间。

(3) 稳定的化学性能。玄武岩纤维具有较高的抗碱抗酸性能，且耐酸性和耐碱性均优于铝硼硅酸盐纤维。

(4) 工艺的简洁性。生产玄武岩纤维的基本工艺是：玄武岩矿石投入熔炉→融化→拉丝，工艺简洁。由于不需要人工配料，其生产工艺环节比一般的纤维工艺要简洁得多。

(5) 应用的广泛性。国内外将玄武岩纤维用于制备摩擦材料、造船材料、过滤材料、军工和航空航天材料以及水泥基复合材料等。在土木工程领域，短切玄武岩纤维可用于增强水泥混凝土和沥青混凝土，与树脂复合可以制成复合筋代替钢筋；在房屋、桥梁和高速公路等建筑领域可用于构件的加固补强。

1.2 玄武岩纤维材料

最早的玄武岩连续纤维的制造技术，出现在 1922 年的美国专利 (US1438428) 上，是由法国人 Paul 提出的，但后来并没有进行实质性的工业化生产^[3,17,30]。1953—1954 年苏联莫斯科玻璃和塑料研究院开发出成套的玄武岩纤维生产技术^[16]。1960—1970 年苏联玻璃钢与玻璃纤维科学研究院乌克兰分院根据苏联国防部的指令，着手具体研制连续玄武岩纤维。乌克兰建筑材料工业部设立了专门的绝热隔音材料科研生产联合体，主要任务是研制 CBF 及其制品设备工艺的生产线。联合体的科研实验室于 1972 年开始研制制备 CBF，曾经研制出 20 多种 CBF 制品的生产工艺；1985 年 CBF 研制成功并实现了工业化生产。由此可知，CBF 开发成功和投入生产的历史有 20 年左右。在这期间，苏联和美国等几个国家都陆续建立起了 CBF 制造工厂。在 2002 年以前，苏联地区每年大约有 500t 连续玄武岩纤维产品，其主要用于军工领域。由于产品产量少，价格居高不下，进一步限制了玄武岩纤维的发展市场以及使用范围和使用数量，其年总产量仍然在 3000t 以下^[22]。

玄武岩纤维及其制品本身的材料性能研究，已从其化学成分、生产工艺和材料改性等研究发展到玄武岩纤维材料及其制品的应用，如在机械制造业中的热处理设备的保湿、增强与阻燃部件等；工程结构的补强加固。而对玄武岩纤维混凝土，开始研究其基本物理力学性能及梁等玄武岩纤维混凝土构件的性能。另外，在应用领域方面也拓展到水利工程、船舶制造和路面土工格栅等^[24]。玄武岩纤维掺量对增强无机聚合物水泥混凝土断裂韧度及强度的影响研究发现，其具有更加优越的抗断裂性能^[25]。

1.2.1 玄武岩纤维主要技术指标

早期主要研究玄武岩纤维材料的基本物理力学性能^[16,18,31-32]，之后主要是

对比研究玄武岩纤维性能与其他纤维性能^[33-34]，同时开展了对玄武岩纤维制品（如连续玄武岩纤维层板、增强复合材料）的研究^[35-38]。玄武岩纤维的性能很大程度上取决于玄武岩矿石的性能和整个生产工艺，不同的成品之间存在较大的差异。因此，应用玄武岩纤维制品时，应研究使用的玄武岩纤维的材料性能。

表 1.2 和表 1.3 分别列出了某玄武岩纤维有限公司生产的玄武岩连续纤维与一些主要的纤维类型在物理、化学性能上的比较^[1,39]。

表 1.2 玄武岩纤维的主要技术指标^[1,39]

性 质 指 标		指标
热物理性能	使用温度 /℃	—260~700
	黏结温度 /℃	1050
	导热系数	0.030~0.038
物理性能	单丝直径 / μm	12~15
	密度 /(kg/m^3)	2800
	弹性模量 /(kg/mm^2)	10000~11000
	拉伸强度 /MPa	2800~3800
	热处理下拉伸强度 /%	
	20℃	100
	200℃	95
	400℃	82
化学稳定性 (在 3h 沸腾条件下失重, %)	2N HCl	2.2
	2N NaOH	2.75
	H ₂ O	0.2

表 1.3 玄武岩纤维与玻璃纤维、碳纤维及其他纤维的主要指标^[1,39]

纤维类型		纤维密度 /(g/cm^3)	力学强度 /MPa	弹性模量 /GPa	伸长率 /%
玻 璃 纤维 类	A 型玻纤	2.46	3310	69	4.80
	C 型玻纤	2.46	3310	69	4.80
	E 型玻纤	2.60	3450	76	4.76
	S-2 型玻纤	2.49	4830	97	5.15
	硅土纤维	2.16	206~412	—	—
	石英纤维	2.20	3438	—	—