

BFRP在砌体结构加固中的应用

王继兵著



郑州大学出版社



图书在版编目 (CIP) 数据

BFRP 在砌体结构加固中的应用/王继兵等著. —郑州:
郑州大学出版社, 2016. 4

ISBN 978-7-5645-2555-2

I. ①B… II. ①王… III. ①砌体结构-加固
IV. ①TU36

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 225794 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人: 张功员

全国新华书店经销

虎彩印艺股份有限公司印制

开本: 787 mm × 1 092 mm 1/16

印张: 7.75

字数: 241 千字

版次: 2016 年 4 月第 1 版

邮政编码: 450052

发行电话: 0371-66966070

印次: 2016 年 4 月第 1 次印刷

书号: ISBN 978-7-5645-2555-2

定价: 22.00 元

本书如有印装质量问题, 由本社负责调换



内 容 提 要

砌体结构在我国有着悠久的历史,特别是新中国成立以后砌体结构得到迅速发展。据统计,我国 1995 年以前的住宅建筑,95% 以上采用砌体结构建造。与混凝土结构及钢结构相比,砌体结构自重大、自振周期短、强度低、延性差,在地震荷载作用下的破坏程度往往是最严重的。近年来历次大地震中,如 2008 年汶川 8.0 级地震及 2010 年青海玉树 7.1 级地震,均显示我国大量在役砌体结构建筑不能满足抵抗强烈地震作用需求,大部分砌体结构房屋需要维修加固。我国现存大量砌体结构房屋大多在设计建造时都没有考虑抗震,有些建筑具有极高的文物、历史价值,由于各种因素影响,这些古老建筑很多已不能满足正常使用功能要求,对这些老旧建筑采取经济有效加固措施非常必要。同时,一些新建建筑还因地震、火灾、结构使用不当、人为破坏、勘察、设计、施工质量缺陷以及对原有结构进行改建、扩建、加层等因素,使原结构安全质量等存在一定隐患,需要对原结构进行加固修复。

碳纤维复合材料(CFRP)、玻璃纤维复合材料(GFRP)以及芳纶纤维复合材料(AFRP)在结构加固领域已经得到广泛应用而玄武岩纤维复合材料(BFRP)具有优异性价比、良好的延伸率、较好的强度以及耐腐蚀等突出优点,在结构加固工程中具有很高的推广应用价值。



前言

本书结合了我 国近几年砌体结构在历次地震中的破坏情况,阐述了玄武岩纤维在砌体结构加固中的研究成果,介绍了地震损伤后砌体砖墙的修复、BFRP 在砌体结构加固中的关键施工技术以及模拟水平地震加载的试验过程,并结合 BFRP 加固砌体砖墙的有限元数值模拟与试验结果进行了对比分析。与混凝土结构及钢结构相比,砌体结构自重 大、强度低、延性差,其在地震荷载作用下的破坏程度往往是最严重的。近年来历次大地震中,如 2008 年汶川 8.0 级地震及 2010 年青海玉树 7.1 级地震,均显示我国大量在役砌体结构建筑不能满足抵抗强烈地震作用需求,大部分砌体结构房屋需要维修加固。与 CFRP、GFRP 以及 AFRP 相比 BFRP 具有优异的性价比、良好的延伸率、较好的强度以及耐腐蚀等突出优点,在结构加固工程中具有很高的推广应用价值。

本书共分为 6 章。第 1 章为绪论;第 2 章 FRP 加固砌体结构国内外研究进展,主要介绍 FRP 在砌体结构加固中的发展及工程应用情况;第 3 章玄武岩纤维加固砌体抗震性能试验研究,主要介绍试件的设计制作、模拟水平地震加载的试验实施过程以及相应的试验成果;第 4 章玄武岩纤维加固砌体墙有限元建模与分析,主要介绍砌体及纤维材料在有限元软件中的实现过程,并结合试验成果展开了参数分析;第 5 章玄武岩纤维加固震损砌体墙承载力计算分析,主要介绍了加固后砌体墙的抗剪受力性能,提出了加固后砖墙的承载力计算方法,为工程设计提供参考;第 6 章结论与展望,主要介绍玄武岩纤维加固砌体结构的重要研究成果及 BFRP 在砌体结构加固领域的工程应用前景。

本书第 1 章、第 3 章及第 4 章由王继兵完成,约 17 万字;第 5 章由张大英完成,约 5 万字;第 2 章由王江华完成,约 1 万字;第 6 章及书中的插图由沈志完成,约 1 万字。

感谢郑州大学出版社的刘开编辑对本书顺利出版的支持与帮助,在写作过程中参考了很多文献资料,在此向有关作者表示感谢,同时本书在出版过程中得到一些项目资金支持,在此表示感谢。

本书在出版之前稿件已经多次修改,但由于作者水平有限及对一些规范学习理解不够,书中不可避免有错误之处,恳请读者批评指正。

王继兵
2015 年 10 月



目 录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 FRP 加固砌体结构国内外研究进展	3
2.1 引言	3
2.2 砌体结构概述	3
2.3 砌体结构传统加固方法	4
2.4 FRP 加固砌体结构研究进展	6
2.5 玄武岩纤维加固技术	6
2.6 小结	11
第 3 章 玄武岩纤维加固砌体抗震性能	
试验研究	13
3.1 引言	13
3.2 试验设计	13
3.3 材料性能	18
3.4 预损伤	20
3.5 裂缝修复及加固方案	22
3.6 主要试验结果	24
3.7 试验结果分析	49
3.8 墙体抗震性能分析	57
3.9 小结	69
第 4 章 玄武岩纤维加固砌体墙有限元	
建模与分析	71
4.1 引言	71
4.2 有限元模型的建立	71
4.3 试验验证	78
4.4 参数分析	83

4.5 小结 90

第 5 章 玄武岩纤维加固震损砌体墙承载力计算分析 92

5.1 引言 92

5.2 砌体剪力墙的破坏形态 92

5.3 影响砌体抗剪强度的因素 93

5.4 BFRP 加固砌体墙受剪承载力分析 97

5.5 小结 107

第 6 章 结论与展望 109

6.1 结论 109

6.2 展望 109

参考文献 111

第 1 章

绪论

砌体结构在我国有着悠久的历史,特别是新中国成立以后砌体结构更是得到迅速发展。据统计,我国 1995 年以前的住宅建筑,95% 以上采用砌体结构建造而成。我国现存的各种建(构)筑物的总面积已超过 100 亿 m^2 ,并且以每年 5 亿 m^2 的速度增长^[1],随着结构设计和抗震标准不断完善,人们对建筑物的安全性、实用性和耐久性要求不断提高,以及设计和施工产生的隐患,大部分砌体结构房屋需要维修加固^[2,3]。因此,对已建砖混房屋进行加固修复,已成为土木工程领域比较关注的问题。

与混凝土结构及钢结构相比,砌体结构自重大、自振周期短、强度低、延性差,其在地震荷载作用下的破坏程度往往是最严重的。1976 年 7 月 28 日的唐山大地震,几乎唐山市所有砌体结构房屋成为一片废墟,经济损失与人员伤亡惨重^[4]。近年来,极具破坏性的地震活动比较活跃,我国 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级大地震、2010 年 4 月 14 日玉树 7.1 级地震以及 2011 年 1 月 1 日云南盈江地震,都给灾区人民的生命财产带来了巨大损失。从现场房屋破坏及倒塌情况看,大多数房屋没有达到抗震设防要求,即使部分房屋没有倒塌,也受到了不同程度的损伤,因此急需对受损结构进行快速修复加固。

砌体结构加固主要包括两个方面:对已经受损结构加固,使其恢复甚至超过原有结构抗力;对完好结构加固使其提高结构抗力。砌体结构传统的加固方法主要有钢筋网砂浆面层、增加混凝土加板墙、外加圈梁、设置构造柱等。这些加固方法施工难度大、周期长、增加结构自重以及加固后影响结构外观。与传统加固方法相比,粘贴纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer/plastic,简称 FRP)作为一种新兴加固技术,具有不增加结构自重及体积、不改变截面形状、高强高效、施工便捷、耐腐蚀以及耐久性好、适用面广等优点。并且在不明显改变结构刚度的情况下,可显著提高砌体构件的抗弯、抗剪承载力,改善砌体结构的延性、抗震性能,是对砌体结构进行平面外抗弯加固、平面内抗剪加固以及整体抗震加固的理想方法^[5]。

FRP 加固砌体结构主要是利用树脂使纤维与砌体之间形成一种复合体的体外加固技术。由于复合材料中加强材料和基质能够有机组合,基质主要起传递剪力和包裹纤维作用,绝大部分应力由具有较高强度的纤维承担,因而使得纤维能较好地发挥高强度的特点^[6]。1984 年,瑞士联邦材料实验室进行了碳纤维板加固钢筋混凝土梁的试验研究^[7],这是最早有关 FRP 在结构加固中的研究报道。20 世纪 80 年代,美国、日本以及欧洲的一些国家相继开展了外贴 FRP 片材对已有结构进行补强和抗震加固的相关技术研



究。美国北岭地震(1994 年)和日本阪神大地震(1995 年)中,许多建筑物和桥梁发生了倒塌或遭到严重破坏,在震后的快速重建以及损坏建筑结构的加固修复中,FRP 加固技术的优越性得到很好验证,粘贴纤维复合材料加固技术在建筑工程中的应用得到广泛重视。

目前,国内外用于结构加固修复技术的纤维增强复合材料主要有碳纤维增强复合材料(CFRP)、玻璃纤维增强复合材料(GFRP)、芳纶纤维增强复合材料(AFRP)以及玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)。与普通钢材相比,FRP 材料密度为普通钢材的 $1/5 \sim 1/3$,而抗拉强度可达到普通钢材的 $8 \sim 10$ 倍^[8,9]。碳纤维增强复合材料(CFRP)由于具有高抗拉强度、高弹性模量在几种主要 FRP 材料中应用最为广泛,但 CFRP 依赖进口,价格贵且原材料受到国外市场波动影响较大。玻璃纤维增强复合材料(GFRP)和芳纶纤维增强复合材料(AFRP)价格相对便宜,但抗拉强度和弹性模量略低,而且耐久性不理想,在一定程度上制约了其广泛应用^[10]。

玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)是一种新型的高技术纤维,以纯天然玄武岩为原料,在 $1450 \sim 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 熔融后,通过铂铑合金拉丝漏板高速拉制而成。由于连续玄武岩纤维具有一系列优异的化学、物理力学性能,且原料取自于天然矿石,储量丰富,生产过程中无有害物质析出,不向大气排放有害气体,不污染环境,因而被誉为 21 世纪“石头变丝”的绿色环保新材料^[11]。目前,因国际市场上玻璃纤维、碳纤维等纤维增强复合材料的严重短缺,加之玄武岩纤维独特的物理、力学性能和低价位等优势,我国已将其列为今后中长期发展规划中鼓励发展的四大高科技纤维之一。2001 年 6 月将其列为中俄两国政府间科技合作项目,2002 年 5 月列入深圳市科技计划,2002 年 8 月列为国家 863 计划,2004 年 5 月列入国家级火炬计划,2004 年 11 月列入国家科技型中小企业创新基金。而且,先后颁布了 3 个国家技术标准:《水泥混凝土和砂浆用短切玄武岩纤维》(GB/T 23265—2009)、《玄武岩纤维无捻粗纱》(GB/T 25045—2010)以及《结构加固修复用玄武岩纤维复合材料》(GB/T 26745—2011)。

第2章

FRP 加固砌体结构国内外研究进展

2.1 引言

砌体结构在世界各地土木工程建设中广泛存在,特别是在我国住宅建筑中,砌体结构占据相当大比例。由于砌体材料强度低、结构自重大、抗震能力差,国内外历次震害表明砌体结构是地震破坏最严重的结构形式。我国是一个地震发生较频繁的国家,据统计20世纪全国共发生200多次6.0级以上破坏性地震^[12],特别是2008年5·12汶川大地震给人民的生命财产带来了巨大损失。我国现存大量老旧砌体结构建筑,由于建筑年代久远以及当时设计、施工水平限制等因素,需要重新对砌体结构进行检测评估和结构加固。

钢筋网砂浆面层、钢筋混凝土板墙以及内设构造柱和圈梁等传统加固方法,在我国砌体结构加固中得到推广应用,但这些加固方法具有施工周期长、结构自重增加较多以及加固后建筑使用空间减少等缺点。与传统加固方法相比,FRP加固技术具有高强高效、不增加结构自重及尺寸、施工便捷可操作性强以及适用性广等优点,近十几年来,得到国内外研究者广泛关注。

2.2 砌体结构概述

2.2.1 砌体结构发展

由胶结材料和块材(砖、砌块及石材)砌筑而成的结构,统称为砌体结构。砌体结构在我国有着几千年的缓慢发展史,但直到20世纪50年代才得到迅速发展。新中国成立后,由于历史和经济的原因,我国大部分住宅和民用建筑都是砌体结构建造而成的,甚至在一些中小型单层或多层工业厂房以及一些剧院、食堂、仓库、烟囱、小型水池、料仓、渡槽等的建造中,砌体结构也得到了广泛使用^[13~16]。

砌体结构的广泛使用,推动了砌体新材料、新技术以及新结构的研制。近几十年来,多孔砖、空心砖以及各种砌块,在我国砌体结构中得到了广泛使用,减少了生产传统黏土砖所需的土地资源 and 能量消耗。

BRP 在砌体结构加固中的应用

4

砌体结构的工程应用虽然有几千年历史,但砌体结构理论研究只有不到 100 年历史。20 世纪 50 年代以前,我国砌体结构建筑都是依据经验建造,新中国成立后引用苏联砖石结构设计规范作为砌体结构设计依据。直到 1973 年,我国才在一系列理论和试验研究的基础上,颁布了国家标准《砖石结构设计规范》(GBJ 3—1973)。随着研究工作的不断深入以及新材料、新理论不断发展,1988 年颁布了修订的《砌体结构设计规范》(GBJ 3—1988),2001 年又颁布了新的修订规范《砌体结构设计规范》(GBJ 3—2001)^[17]。

2.2.2 砌体结构特点

砌体结构长期被广泛使用,与其自身的优点是分不开的,主要包括以下几部分。

(1) 材料来源广泛,易于就地取材加工。黏土、石材、砂等原材料可就地取材加工,价格便宜,与混凝土和钢结构材料相比具有明显价格优势。而且,粉煤灰等工业废料可用来加工砌块,有利于降低造价和保护环境。

(2) 耐火和耐久性好。一般情况下,砌体结构可抵抗 400 ℃ 左右高温,同时组成砌体的原材料均为天然材料,所以砌体结构具有很好的耐久性和大气稳定性。

(3) 具有良好的保温、隔热以及隔音性能,尤其是空心砌块砌体结构其保温隔热效果更好,能够减少建筑能量损耗,特别适用于建造住宅及办公楼等民用建筑。

(4) 砌体结构施工设备简单,可连续作业。

(5) 节约水泥、钢材和木材,降低造价。

当然,相比砌体结构的优点来说,砌体结构也有其自身的缺点,综合起来主要有以下几点。

(1) 相比混凝土、钢材来说,砌体结构材料强度比较低,因此承重构件的截面尺寸比较大,材料用量多,结构自重较大。

(2) 砂浆和块体间黏结力较弱,致使砌体的抗拉、抗弯和抗剪强度较低,因此砌体结构抗震和抗裂性能较差,这也在一定程度上限制了砌体结构的应用。

(3) 砌体结构基本都是手工操作,劳动强度大,生产效率低。而且,生产黏土砖需要占用大片农田,黏土砖在烧制过程中又消耗大量能源,排放有害气体,污染环境。

2.3 砌体结构传统加固方法

抗震加固的目标是为了提高建筑结构的承载能力、变形能力以及整体抗震性能。砌体结构由于年久失修、设计或施工差错、自然灾害、建筑物进行改建和扩建等因素,产生开裂损坏,不满足抗震设防要求,均需对其进行加固修复。砌体结构常用的加固方法主要有如下几种^{[13,14][18~21]}。

(1) 压力灌浆补强加固。压力灌浆是借助压缩空气,将复合水泥浆液、砂浆或化学浆液,注入砌体裂缝、欠饱满灰缝、孔洞以及疏松部分,以达到恢复结构整体性,提高砌体结构强度和耐久性,改善结构防水抗渗性能。主要用于砌体裂缝的补强加固,加固后砌体

强度能达到或超过原结构强度。

(2) 砂浆面层加固。砂浆面层加固是用强度等级不小于 M10.0 的水泥砂浆、混合砂浆、纤维砂浆以及树脂砂浆等,在墙体表面喷抹厚度为 20 ~ 25 mm 面层,达到提高墙体承载力的一种加固方法。砂浆面层加固施工简便,适用于承载力相差不多的静力加固和抗震加固。

(3) 钢筋网砂浆面层加固。钢筋网砂浆面层加固是在面层砂浆中配置钢筋网、钢板网或焊接钢丝网,提高墙体承载力和变形性能的一种加固方法。该加固方法对墙体平面外抗弯强度、平面内抗剪强度、延性以及抗裂性能均有较大提高,适用于静力加固和中高烈度的抗震加固。

(4) 钢筋混凝土板墙加固。现浇钢筋混凝土板墙加固是在砌体墙两侧或一侧增设现浇混凝土组合层,从而达到大幅提高墙体承载能力和变形性能的一种加固方法。其优点是加固后墙体在平面外抗弯强度、平面内抗剪强度以及延性均得到较大提高,适用于增幅较大的静力加固和抗震加固。

(5) 内设构造柱和圈梁加固。该加固方法是在砌体墙体中增加抗震构造措施,利用构造柱和圈梁对墙体的约束作用,增加建筑物的整体性,从而提高建筑物的抗侧移能力,防止或延缓建筑物在地震作用下的突然倒塌或者减轻建筑物在地震荷载下的损害程度。此加固方法不能明显提高砌体的抗裂能力,且施工工艺较为复杂,施工周期相对较长,对结构现状和几何尺寸改动较大,一定程度上会导致结构使用功能发生变化。

(6) 增设扶壁柱加固。增设扶壁柱加固属于加大截面加固法的一种,根据所用材料可分为砖扶壁柱和混凝土扶壁柱。扶壁柱可以设置在窗间墙或者横墙的适当位置,其优点与钢筋混凝土外加层加固法相近,但承载力提高有限,主要用来提高砌体稳定性,一般仅在非地震区应用。

(7) 钢筋混凝土外加层加固。此种加固方法主要用于砖柱承载力不足时的加固,通过在原构件表面叠浇钢筋混凝土外加层,增大构件截面积,从而达到提高砌体构件承载力的目的。

(8) 外包钢加固。在砖柱四周外包型钢,型钢之间以缀板相连以形成受力的整体。该加固方法可用于增加砌体强度,修复中等或轻微破坏砌体,适用于被加固构件截面尺寸受到严格限制,而又需要大幅提高承载力的情况。

(9) 外部后张预应力加固。在砌体构件外部安装水平及竖向钢拉杆或型钢撑杆,以施加后张预拉应力对砌体构件进行加固。其优点是通过施加的预应力,可以改变原结构内力分布,消除加固部分的应力滞后,而使后加部分和原结构部分能够更好地协同工作,提高原构件的承载力,具有加固、卸荷以及改变原结构内力分布的作用。

以上为砌体结构传统加固方法,在实际工程中得到普遍应用,能够一定程度上满足结构承载力及抗震性能的加固要求,显示出了各自的优势,但也存在明显的缺点,如湿作业、工作量大、施工周期长、原有使用空间减小、结构自重增加较多、有时需要一些大型设备以及对原结构造成损伤等。

这些传统加固方法的缺点,一定程度上限制了它们的进一步应用,而粘贴纤维增强复合材料加固技术是近年发展起来的一种新型加固方法。纤维增强复合材料是一种轻

FRP 在砌体结构加固中的应用
.....
6

质高强、耐磨防腐、便于施工、附加体积小以及几乎不增加结构质量和不改变结构外观的高科技新型材料,尤其适合历史文化保护建筑的加固与修复。纤维增强复合材料加固技术已经在混凝土结构加固中得到广泛应用,近年来面对越来越多需要加固修复的砌体结构,许多学者做了这方面的研究工作。

2.4 FRP 加固砌体结构研究进展

纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer/plastic,简称 FRP)产生于 20 世纪 40 年代,是由连续纤维经过基底材料胶合后形成的复合材料。与传统加固材料相比,FRP 材料具有明显的优越性。

(1)抗拉强度很高,远远超过普通钢材,在结构加固修复中充分利用其高强度及高弹性模量特点,提高构件加固后的承载力及延性,改善结构受力性能,达到高效加固补强的目的。

(2)与普通钢材相比,具有很好的抗腐蚀和耐久性,可用于恶劣环境下结构的加固修复,提高结构使用寿命,降低后期维护费用。

(3)自重轻、施工便捷,FRP 材料密度只有普通钢材的 $1/5 \sim 1/3$,所以 FRP 加固对原有结构自重和构件尺寸基本没有影响,而且 FRP 材料容易现场切割加工,施工占用场地少,没有湿作业,施工周期短,施工质量容易保证,用于旧有结构以及场地狭小构件加固修复时优势更加明显。

(4)适用于各种结构类型和各种结构形状加固,且加固后不改变原结构外观,可广泛用于钢筋混凝土结构、砌体结构、木结构以及钢结构的加固修复。

与 FRP 加固混凝土结构相比,FRP 加固砌体结构相关技术的研究开展的较晚。自 20 世纪 80 年代至今,国外研究者开展了一系列 FRP 加固砌体结构的研究。从研究对象上来看,包括构件(墙、梁、柱、拱等)试验研究、整体模型试验研究以及实际工程应用研究,具体研究内容涉及平面内抗剪性能、平面外抗弯性能、抗震性能、设计计算理论以及数值分析模型等方面。

与国外相比,国内开展 FRP 用于土木工程结构补强加固研究较晚。1997 年,华南理工大学黄培彦教授在国家自然科学基金和广东省自然科学基金资助下,开展了纤维薄板与混凝土构件界面强度和剥离破坏机制等的研究。随后,多家科研院所、高等院校、从事加固工程的加固公司以及 FRP 原材料的生产厂家,开展了 FRP 在加固工程中的应用研究工作^[24,25]。

2.5 玄武岩纤维加固技术

2.5.1 玄武岩纤维复合材料

连续玄武岩纤维(continuous basalt fiber,简称 CBF)是一种无机纤维,以天然火山喷出岩作为原料,将其破碎后加入熔窑中,在 $1\,450 \sim 1\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 熔融后,通过铂铑合金拉丝漏

板制成的连续纤维。连续玄武岩纤维是一种新型的纤维增强材料,它具有良好的力学性能、较好的稳定性以及较低的价格,在结构加固领域应用前景广阔,已经得到国内外研究机构的广泛关注。

玄武岩纤维(BFRP)与碳纤维(CFRP)、芳纶纤维(AFRP)以及玻璃纤维(GFRP)相比,具有很多独特的优点:与AFRP、GFRP相比,有更好的热稳定性、耐高温以及抗碱性能;物理、力学性能较CFRP差,但价格比较便宜,仅相当CFRP加固价格的1/4左右。玄武岩纤维与其他纤维的物理性能比较如表2.1所示,主要力学性能比较如表2.2所示^{[1][11][28~30]}。

表 2.1 玄武岩纤维与各种纤维材料的抗腐蚀性能对比

性能	玄武岩纤维	碳纤维	芳纶纤维	玻璃纤维
水中煮 3 h 质量损失率/%	0.4	—	—	0.7
2 mol/L NaOH 中煮 3 h 质量损失率/%	4.3	—	—	6
2 mol/L HCl 中煮 3 h 质量损失率/%	8.1	—	—	38.9
水中煮 3 h 强度保持率/%	99.8	—	—	2.49
0.5 mol/L NaOH 中煮 3 h 强度保持率/%	95.8	—	—	—
2 mol/L HCl 中煮 3 h 强度保持率/%	65.5	—	—	—
湿热老化时间 1 000 h 强度损失率/%	8.6	0.9	21.9	26

表 2.2 玄武岩纤维与各种纤维材料的力学性能对比

性能	玄武岩纤维	碳纤维	芳纶纤维	E 玻璃纤维	S 玻璃纤维
拉伸强度/MPa	3 000 ~ 4 800	3 500 ~ 6 000	2 900 ~ 3 400	3 100 ~ 3 800	4 020 ~ 4 650
弹性模量/GPa	80 ~ 110	230 ~ 600	70 ~ 140	72.5 ~ 75.5	83 ~ 86
断裂伸长量/%	3.1	1.5 ~ 2.0	2.8 ~ 3.6	4.7	5.3
密度/(g · m ⁻³)	2.6 ~ 2.8	1.7 ~ 2.2	1.45	2.55 ~ 2.62	2.46 ~ 2.49
使用温度/℃	-260 ~ 880	最高 500	最高 250	-60 ~ 350	最高 300

由表 2.2 可知玄武岩纤维的抗拉强度为 3 000 ~ 4 800 MPa,为普通钢材的 10 ~ 15 倍,和玻璃纤维相当,略高于芳纶纤维,约是碳纤维的 2/3;玄武岩纤维的弹性模量为 80 ~ 110 GPa,约是碳纤维的 1/3,和玻璃纤维、芳纶纤维相当。

玄武岩纤维以同属硅酸盐的火山喷出岩为原料制成,因此其具有较强的耐酸碱性能。而且,玄武岩纤维的 K₂O、MgO 和 TiO₂ 等成分对提高纤维耐化学腐蚀及防水性能起到重要的作用。试验表明,玄武岩纤维在饱和 Ca(OH)₂ 溶液以及水泥等碱性介质中耐久性好,能保持较高的稳定性,同时玄武岩纤维具有天性的与水泥、混凝土亲和力,在建筑增强领域的应用已显示出它独特的优势和发展潜力。

2.5.2 玄武岩纤维国内外发展应用现状

玄武岩纤维由苏联玻璃和塑料研究院于 1953 ~ 1954 年开发,并于 1985 年实现工业化生产。目前,乌克兰、俄罗斯、奥地利、中国、日本、格鲁吉亚以及韩国等都有生产厂家^[31]。其中,乌克兰早在 1985 年就实现玄武岩纤维产业化,现有 4 家生产企业,俄罗斯的 Kamenny Vek 公司是其唯一生产玄武岩纤维企业,年产量在 1 000 t 左右。

我国虽然开展 CBF 研究较晚,但得到了国家的大力支持,部分技术已经达到国际领先水平。目前,国内至少有 6 家立项生产 CBF 的厂家,其中黑龙江省宁安镜泊湖 CBF 有限公司耐碱玄武岩纤维项目已经立项投产,每年产能 1 万 t,其产品主要为耐碱连续玄武岩纤维原丝、短切纤维薄毡、无捻粗纱网布以及玄武岩纤维筋等^[1]。按照国家发改委计划,我国到 2020 年要达到每年生产 3 万 t CBF 制品。

以玄武岩纤维为增强体可制成各种性能优异的复合材料,可广泛应用于航空航天、军工、车船、建筑等军工和民用领域^[11]。国产玄武岩纤维复合材料主要包括玄武岩纤维片材、型材、索材、板材、筋(棒)材等,各玄武岩纤维制品如图 2.1 ~ 图 2.4 所示。

2.5.2.1 玄武岩纤维纱

玄武岩纤维纱包括玄武岩纤维无捻粗纱、玄武岩纤维纺织纱、玄武岩纤维短切纱、玄武岩纤维膨体纱,如图 2.1 所示。



(a) 玄武岩纤维无捻粗纱



(b) 玄武岩纤维纺织纱



(c) 玄武岩纤维短切纱



(d) 玄武岩纤维膨体纱

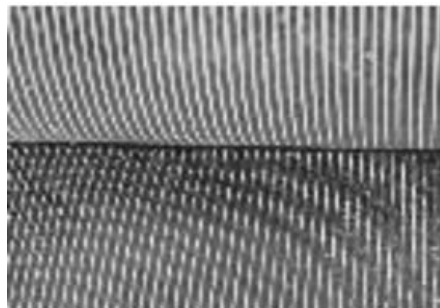
图 2.1 玄武岩纤维纱

2.5.2.2 玄武岩纤维布

玄武岩纤维布包括玄武岩纤维防火布、玄武岩纤维多轴向织物、玄武岩纤维单向布以及玄武岩纤维土工布,如图 2.2 所示。



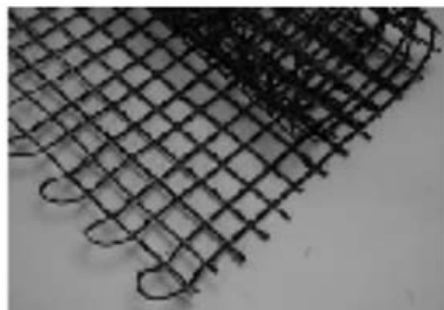
(a) 玄武岩纤维防火布



(b) 玄武岩纤维多轴向织物



(c) 玄武岩纤维单向布



(d) 玄武岩纤维土工布

图 2.2 玄武岩纤维布

2.5.2.3 玄武岩纤维复合材料

玄武岩纤维复合材料包括钢-连续纤维复合筋、CNG 气瓶、玄武岩纤维片材以及玄武岩纤维筋,如图 2.3 所示。



(a) 玄武岩纤维钢-连续纤维复合筋



(b) 玄武岩纤维 CNG 气瓶



(c) 玄武岩纤维片材

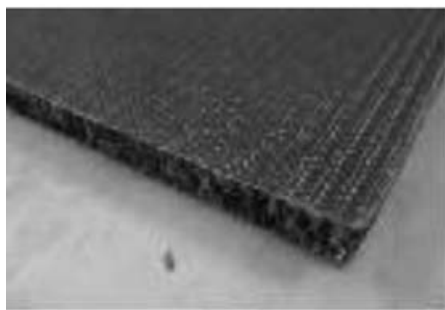


(d) 玄武岩纤维筋

图 2.3 玄武岩纤维复合材料

2.5.2.4 特殊功能玄武岩纤维制品

特殊功能玄武岩纤维制品包括玄武岩纤维织物、玄武岩纤维防火板、玄武岩纤维绳以及玄武岩纤维套管,如图 2.4 所示。



(a) 玄武岩纤维织物



(b) 玄武岩纤维防火板



(c) 玄武岩纤维绳



(d) 玄武岩纤维套管

图 2.4 特殊功能玄武岩纤维制品



2.5.3 玄武岩纤维在结构加固中的应用

纤维增强复合材料(FRP)在土木工程中的应用越来越广泛,目前工程中常用的是碳纤维(CFRP)、玻璃纤维(GFRP)和芳纶纤维(AFRP)。连续玄武岩纤维是用火山爆发形成的一种玻璃态玄武岩矿石经高温熔融后快速拉制而成的纤维,具有抗拉强度高、弹性模量大、耐高温、耐腐蚀、耐酸碱性能强、耐化学性能好和热稳定性优越等优点,特别是价格较低,其在土木工程加固等相关领域的应用前景非常广阔,引起国内外研究者广泛关注。

韩国的 Jongsung Sim 等^[32]进行了玄武岩纤维加固钢筋混凝土简支梁抗弯性能试验研究。结果表明,加固梁的承载力提高程度与纤维粘贴层数有关,粘贴1层梁屈服荷载提高了15%而极限荷载提高不明显,粘贴2层梁屈服荷载和极限荷载分别提高了26%和27%,粘贴3层梁屈服荷载和极限荷载分别提高了16%和29%,破坏模式为纤维剥离破坏。

国内对玄武岩纤维用于结构加固的研究刚刚起步,已有的研究主要是针对混凝土结构的加固修复。吴刚^[33~37]、龚斌文^[38]、麻建锁^[39]、李志强^[40,41]、欧阳煜^[42,43]、张克纯^[10]、孙衍英^[44]、童谷生^[45~49]、欧阳利君^[1]等,对玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁、双向板、短柱以及框架节点等的受力性能进行了试验研究。结果表明,玄武岩纤维加固,可有效提高构件承载能力和变形能力,在强度、施工以及加固方式等相同情况下,梁斜截面承载力相比,BFRP加固和CFRP加固两者相差不大,但玄武岩纤维加固具有更好的经济优势,施工相对也比较简单。

白润山、麻建锁等^[50~53]采用玄武岩纤维布加固非标准损伤钢梁和修复木结构建筑。结果表明,BFRP加固钢梁,承载力有一定提高,但构件屈服时,纤维布应力只有180~200 MPa,说明玄武岩纤维布的高强度优势未能充分发挥;BFRP加固修复木柱、木梁即可保持原有建筑特色与风貌,又能取得比较好的经济效益,同时可达到满意使用效果。

陈贡联^[54]对玄武岩纤维布加固多孔砖1:3缩尺模型抗震性能,进行了振动台试验研究,模型采用MU10混凝土多孔砖和M10专用砂浆砌筑,砌筑方式为一顺一丁,砖块尺寸为80 mm×37 mm×30 mm,墙厚为80 mm,加固方式为:一层构造柱和圈梁相应位置采用灌浆料包角并植筋加固,二层以上及各层门窗洞口处采用玄武岩纤维布加固。结果表明,玄武岩纤维布与砌体能够很好地协同变形,在砌体结构快速加固修复中可取得较好的效果。

综上所述,玄武岩纤维价格低廉,用玄武岩纤维加固结构或构件,造价仅相当于碳纤维加固的1/4左右,具有较好的社会效益和经济效益,而且玄武岩纤维自身优越的物理、力学性能,在土木工程结构加固中会有越来越广泛的应用,但是国内外目前对其在加固领域的应用研究还很少。

2.6 小结

综上所述,目前国内外众多学者对FRP加固砌体结构进行了大量的试验研究和理论