

THE PERFORMANCE OF RUBBER
CONCRETE BRICK
AND ITS FILLER WALL FRAME SYSTEM

橡胶混凝土砖 及填充墙框架体系性能

王凤池 陈平 周静海 康天蓓◎著

中国建筑工业出版社

橡胶混凝土砖及填充墙框架体系性能

王凤池 陈 平 周静海 康天蓓 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

橡胶混凝土砖及填充墙框架体系性能/王凤池等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 9
ISBN 978-7-112-22542-2

I. ①橡… II. ①王… III. ①橡胶-混凝土-砖-研究②橡胶-混凝土-砖-填充墙-结构性能-研究 IV. ①TU522.1②TU227

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 180779 号

本书介绍了橡胶混凝土砖及填充墙框架体系的性能及应用情况, 主要内容共 8 章, 分别是: 绪论、橡胶混凝土砖的基本性能、橡胶混凝土砖的耐久性能、橡胶混凝土砖砌体的抗压性能、橡胶混凝土砖砌体抗剪试验、橡胶混凝土砖砌体有限元分析、橡胶混凝土砖填充墙框架结构动力时程分析、橡胶混凝土砖填充墙的滞回性能。

本书适用于建筑结构、建筑材料专业相关研究人员使用, 也可供大中专院校建筑结构和建筑材料相关专业师生参考使用。

责任编辑: 万 李

责任设计: 李志立

责任校对: 焦 乐

橡胶混凝土砖及填充墙框架体系性能

王凤池 陈 平 周静海 康天蓓 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 9¼ 字数: 225 千字

2018 年 9 月第一版 2018 年 9 月第一次印刷

定价: 45.00 元

ISBN 978-7-112-22542-2

(32598)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前言

钢筋混凝土填充墙框架结构的抗震设计研究一直是一个复杂的课题，在工程设计中往往将填充墙作为“非结构构件”考虑。但是大量试验和震害调查表明，填充墙框架之间存在着相互协同作用。目前的研究认为，纯框架结构应作为第二道抗震防线。合理设置填充墙、使用新型材料砌体改善填充墙的性能或者是采用增设消能减震装置等方法，可以显著提高框架结构的抗震承载力，将填充墙作为框架结构的第一道抗震防线，使框架结构形成具有二道抗震防线的抗震体系。

近年来，随着汽车工业的发展，越来越多的废旧轮胎形成的“黑色污染”正在威胁着人类的生存环境。废旧轮胎橡胶是一种弹性的固体的高分子聚合物，在自然条件下不溶于水，难溶于有机溶剂，而且不易腐烂，其数量在废旧高分子材料中居第二位，仅次于废旧塑料，废橡胶的合理处置关系到全球的生态环境及资源利用的可持续发展。国内外对废旧轮胎橡胶的处理方法，大致可分为热能利用、回收利用、原形及其改造利用和掩埋堆放等几种方式。简单的处理，如堆积或燃烧掉，可能产生二次污染。

废弃轮胎橡胶用于建筑材料是回收利用这种固体废弃物的有效方法之一。本书提出了一种将废旧轮胎橡胶粉按照一定比例取代混凝土中粗骨料和细骨料，制作而成的新型橡胶混凝土砖墙体，其具有免蒸压、经济、环保、利废、制作方便、良好的保温及隔热等性能。橡胶混凝土砖融合了混凝土和橡胶的双重性质。由于橡胶粉的掺入，在满足墙体使用性能的前提下，极大改善了混凝土砖抵抗变形性能，因此改变了以往填充墙承受外力作用时因变形能力差而过早产生裂缝的现象。

全书共分八章，第1章绪论，主要介绍橡胶混凝土砖的概念，框架填充墙受力状态及研究现状等；第2章为橡胶混凝土砖的基本性能，通过试验分析了抗折强度及抗压强度、体积密度、吸水率及饱和系数等；第3章为橡胶混凝土砖的抗冻融性和抗渗透性等耐久性性能的研究；第4章研究了橡胶混凝土砖砌体的抗压性能；第5章为橡胶混凝土砖砌体抗剪试验；第6章对橡胶混凝土砖砌体进行了有限元分析；第7章是橡胶混凝土砖填充墙框架结构动力时程分析；第8章研究了橡胶混凝土砖填充墙的滞回性能。

感谢聂晓梅、卢珊、李鹏飞、丁军胜、陈锋、刘柯依、陈凯荟、官爽、陈天泽、张雨石、孙畅等博士、硕士研究生对本书的贡献。同时，本书参考了许多学术论文、规范、教材和著作等，并尽量将其列入参考文献中，但也难免疏漏，在此向有关编著者表示衷心的感谢！本书可供从事砌体相关专业及领域的研究生参考，也可供相关学科的教学、科研及技术人员参考。本书的研究工作得到了辽宁省“百千万人才工程”资助项目（201557）等项目的资助，在此表示感谢。

由于作者学术水平有限，时间仓促，书中疏漏之处在所难免，恳请读者不吝赐教、指正。

王凤池

2018年于沈阳建筑大学

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 橡胶混凝土砖概念的提出	2
1.2.1 国内外废旧橡胶的现状	2
1.2.2 国内外对废旧橡胶的处理方法	3
1.2.3 国内外墙体材料的革新及发展现状	5
1.2.4 橡胶混凝土的研究现状	7
1.3 填充墙框架结构的受力分析	9
1.3.1 填充墙框架结构的破坏过程	9
1.3.2 填充墙框架结构的荷载传递路径	10
1.4 填充墙框架结构国内外研究现状	10
1.4.1 国外研究现状	10
1.4.2 国内研究现状	13
1.5 本书主要内容	14
2 橡胶混凝土砖的基本性能	16
2.1 橡胶混凝土砖试验材料及试样制备	16
2.1.1 橡胶粉	16
2.1.2 骨料	17
2.1.3 水泥	17
2.1.4 外加剂	17
2.2 橡胶混凝土砖的配合比设计	17
2.2.1 橡胶粉的取代方法	17
2.2.2 试验配合比设计	18
2.3 橡胶混凝土砖的制备与养护	19
2.4 橡胶混凝土砖的尺寸测量	20
2.4.1 试验方法	20
2.4.2 试验结果分析	21
2.5 橡胶混凝土砖的外观质量	22
2.5.1 缺棱掉角检查	22
2.5.2 裂纹检查	23
2.5.3 弯曲凸出检查	25

2.5.4	色差检查	25
2.6	橡胶混凝土砖的强度试验	25
2.6.1	抗折强度试验方法	26
2.6.2	抗压强度试验方法	27
2.6.3	强度试验数据与分析	28
2.7	橡胶混凝土砖的体积密度	29
2.7.1	试验方法	29
2.7.2	试验数据与分析	30
2.8	橡胶混凝土砖吸水率及饱和系数	31
2.8.1	试验方法	31
2.8.2	试验数据及分析	32
2.9	章节小结	34
3	橡胶混凝土砖的耐久性能	35
3.1	冻融循环试验	35
3.1.1	冻融循环	35
3.1.2	质量损失率	36
3.1.3	强度损失率	39
3.1.4	质量外观	42
3.1.5	冻融循环结论	43
3.2	毛细吸水试验	43
3.2.1	试验原理	43
3.2.2	试验	44
3.2.3	毛细吸水试验结果	46
3.2.4	毛细吸水试验结果分析	51
3.2.5	毛细吸水试验结论	55
3.3	本章小结	56
4	橡胶混凝土砖砌体的抗压性能	57
4.1	试验方案及试件制作	57
4.1.1	材料准备及试验方案	57
4.1.2	试件设计及制作	57
4.1.3	试验步骤	58
4.2	抗压强度试验结果与分析	60
4.2.1	试验现象	60
4.2.2	试验结果及与普通黏土砖试件的对比	63
4.2.3	影响抗压强度的因素分析	65
4.3	橡胶混凝土砖砌体本构关系	66
4.3.1	具有代表性的本构关系模型	67

4.3.2 橡胶混凝土砖砌体本构关系..... 67

4.4 橡胶混凝土砖砌体弹性模量..... 69

4.5 橡胶混凝土砖砌体泊松比..... 70

4.6 本章小结..... 71

5 橡胶混凝土砖砌体抗剪试验 72

5.1 试验方案及参数设置..... 72

5.1.1 试验目的..... 72

5.1.2 试件的设计及制作..... 72

5.1.3 试验步骤..... 73

5.2 试件破坏特征及影响因素..... 76

5.2.1 试验现象及破坏特征分析..... 76

5.2.2 抗剪强度的影响因素..... 78

5.3 试验结果分析..... 79

5.4 本章小结..... 82

6 橡胶混凝土砖砌体有限元分析 83

6.1 有限元模型..... 83

6.1.1 连续式模型..... 83

6.1.2 离散式模型..... 83

6.2 材料参数的定义..... 85

6.3 材料本构关系..... 85

6.4 橡胶混凝土砖砌体轴心受压和沿通缝抗剪有限元模型的建立..... 86

6.4.1 单元选取..... 86

6.4.2 网格划分、相互作用及加载方式..... 86

6.5 橡胶混凝土砖砌体轴心受压模拟计算结果与分析..... 87

6.5.1 橡胶混凝土砖砌体轴心受压极限承载力对比..... 87

6.5.2 橡胶混凝土砖砌体轴心受压应力-应变曲线 87

6.5.3 橡胶混凝土砖砌体轴心受压的应力分析..... 90

6.5.4 橡胶混凝土砖砌体轴心受压的塑性应变图..... 91

6.6 橡胶混凝土砖砌体沿通缝抗剪模拟计算结果与分析..... 92

6.6.1 橡胶混凝土砖砌体沿通缝抗剪极限承载力对比..... 92

6.6.2 受力状态下试件的应力分布状况..... 93

6.7 本章小结..... 94

7 橡胶混凝土砖填充墙框架结构动力时程分析..... 95

7.1 概述..... 95

7.2 填充墙—框架有限元分析模型..... 96

7.2.1 填充墙框架几何模型的确定..... 96

7.2.2	有限元单元类型	96
7.2.3	材料的本构关系	99
7.2.4	有限元模型的网格划分	101
7.2.5	材料的阻尼设定	101
7.3	地震时程反应分析	102
7.3.1	输入地震波的选取	103
7.3.2	地震波的调整	104
7.3.3	地震波输入	104
7.3.4	橡胶混凝土砖填充墙框架结构的地震时程分析	105
7.4	本章小结	123
8	橡胶混凝土砖填充墙的滞回性能	125
8.1	模型选取	125
8.2	加载制度	126
8.3	破坏准则	126
8.4	滞回曲线的耗能性能	127
8.5	结果分析	127
8.5.1	耗能能力	130
8.5.2	刚度退化	130
8.5.3	承载力退化	131
8.5.4	结构延性	131
8.5.5	开裂荷载、屈服荷载和极限荷载	132
8.6	本章小结	132
	参考文献	134

1 绪 论

1.1 引言

随着汽车工业的快速发展,如何处理与日俱增的废旧轮胎已经成为世界各个国家的难题,目前主要的处理方法是露天堆置。废旧橡胶轮胎不易分解且极易滋生蚊虫,造成了“黑色污染”,危害人类的生存环境。将废弃轮胎应用于土木工程是解决黑色污染的有效途径,橡胶混凝土砖(RCB)就是其中的方法之一。橡胶混凝土砖是一种利用废弃汽车轮胎加工得到的橡胶粉作为组成材料的一种新型砌块砖。由于具有其较高的阻尼特性、较低的密度和弹性模量,作为框架填充墙有利于减少框架结构震害的发生,具有良好的应用前景和推广价值。

在我国,钢筋混凝土框架填充墙结构是一种被广泛应用的结构形式。框架结构空间骨架由框架梁和框架柱构成,框架柱为主要的竖向承重构件,填充墙和隔墙起到分隔房间的作用。框架结构的优点是平面布置灵活、施工方便、房间的使用功能便于调整、工程造价经济。在地震作用下,如果能保证填充墙吸收能量破坏,较好地消耗地震能,就能够使框架结构成为一种非常好的结构抗震体系。

钢筋混凝土框架填充墙结构的抗震应以预防为主,根本是要搞好抗震设防,提高结构的抗震能力。完整的抗震设计方法包括结构抗震分析计算方法和抗震概念设计。现代结构的抗震设计理念由过去的弹性转变成非弹性。基于非线性理论,抗震概念由单纯地依靠结构承载力到利用屈服后的强度,使结构充分利用了非弹性变形,进而更有效地消耗地震能量,减少震害的发生。

近几十年,建筑结构在抗震设计方面有很大的发展,但钢筋混凝土填充墙结构在抗震设计上还不够完善。框架填充墙设计时采用纯框架计算,忽略了填充墙的贡献作用。事实上填充墙与框架存在着相互作用的工作关系,填充墙的存在使结构的刚度显著增加,特别是早期刚度增大较多。另外由于有填充墙的存在,在地震作用下时,在破坏形式上框架填充墙结构和纯框架结构就有许多的不同,如填充墙结构中的短柱破坏、短梁破坏等。在近些年的地震震后破坏中可以看到,由于填充墙破坏造成的损失大有超过结构损伤带来损失的趋势。即使建筑物保存下来,却因填充墙破坏丧失了结构的使用功能。在一些情况下,填充墙破坏带给人民生命财产安全的危害要大于结构损伤带来的,因此,研究和考虑填充墙对框架结构的影响是十分重要的。

钢筋混凝土框架填充墙的墙体大多采用中小型砌块。近些年,随着工业的发展,工业废弃物的增多,由轻骨料混凝土、加气混凝土以及工业废料等制成的再生砌块开始在填充墙中广泛应用。这类砌体具有节能环保、节省土地资源、改善和提高建筑物的抗震、隔声、隔热等一系列功能的特点。橡胶混凝土砖是一种绿色环保的砌块材料,对提高框架填

充墙结构的抗震性能具有更重要的理论和实际意义。

1.2 橡胶混凝土砖概念的提出

由于烧结黏土砖的生产毁掉了大量的农田，并且消耗过多的煤炭资源，因此城市建设中已经禁止使用烧结黏土砖。1992 年，国家建材局等有关部门颁布了《加快墙体材料革新和推广节能建筑意见的通知》。此通知的颁布，标志着我国开始正式对墙体材料进行改革，研发新型墙体材料是大势所趋。特别是近些年，各种墙体材料和墙体形式如雨后春笋，应运而生。橡胶混凝土砖是一种将废旧轮胎橡胶粉按照一定比例取代混凝土中粗骨料和细骨料，制作而成的新型墙体材料，其具有免蒸压、经济、环保、利废、制作方便、良好的保温、隔热等性能。

橡胶混凝土砖融合了混凝土和橡胶的双重性质。混凝土与普通填充墙材料均为脆性材料，由于橡胶粉的掺入，在满足墙体使用性能的前提下，极大改善了混凝土砖抵抗变形性能，因此改变了以往填充墙承受外力作用时因变形能力差而过早产生裂缝的现象。可见，作为墙体材料，橡胶混凝土砖有利于变废弃橡胶为宝，充分利用其优越的性能，推进了墙体材料的改革。

1.2.1 国内外废旧橡胶的现状

废旧橡胶来源于废旧轮胎、废旧胶鞋、废旧胶管、废胶带等橡胶制品以及橡胶生产过程中产生的边角料及废品（图 1-1），但主要来源是废旧轮胎。全世界每年产生数百万吨废橡胶产品，如此数量巨大的橡胶废弃物，不但造成了环境的严重污染，也造成了资源的浪费。因此，如何对其进行有效处理已成为全社会普遍关注的问题。据统计，目前世界每年所产生的普通废旧轮胎就有 14 亿条之多。如果把特种产业汽车、机械等产生的废弃轮胎计算在内，粗略估算可达 17 亿条之多。



图 1-1 废旧橡胶制品

(a) 废旧轮胎；(b) 废旧橡胶制品及边角料

目前，世界上产生废旧轮胎数量最多的国家是美国。有资料显示，美国 1990 年废弃轮胎产生量为 2.50 亿条，1996 年产生量为 2.66 亿条，2000 年产生量为 2.76 亿条。到目前为止，其废旧轮胎产生量基本徘徊在 2.80 亿~2.90 亿条之间，而且呈逐年增长趋势。因此，美国于 20 世纪 90 年代制定了相应的法律，以此来促进废旧轮胎的回收与再利用。

1996 年美国回收 1.92 亿条废旧轮胎，回收率为 72%；2000 年回收量为 2.03 亿条，回收率为 73.6%；进入到 21 世纪，废旧轮胎的回收率逐年提高，2001 年为 77.6%、2003 年 80.4%、2005 年 86.5%、2007 年已经上升到 94.8%。

废弃轮胎产生量仅次于美国的是欧盟。目前，欧盟的 5 大废旧轮胎产生国分别为德国、英国、法国、意大利和西班牙，其废旧轮胎产生量依次为 58.5 万 t、47.5 万 t、39.8 万 t、38.0 万 t 和 30.5 万 t。后加入欧盟的波兰，其废旧轮胎发生量为 14.6 万 t，成为欧盟第 6 大废旧轮胎产生国。而葡萄牙、比利时/卢森堡、瑞典、瑞士、捷克和罗马尼亚等国也有 5 万~10 万 t 的废旧轮胎产生量。根据有关方面的统计，2006 年主要欧盟国家的汽车保有量、废旧轮胎发生量对比如表 1-1 所示。

欧洲主要国家汽车拥有量及废旧轮胎产生量 表 1-1

国家	汽车保有量(万辆)			废旧轮胎产生量(万条)
	商用车	乘用车	合计	
德国	320	4650	4970	5850
英国	420	3090	3510	4750
法国	620	3040	3660	3980
意大利	460	3520	3980	3800
西班牙	510	2090	2600	3050
波兰	230	1340	1570	1460

在我国，经济的快速发展，直接推动机动车保有量和高速公路里程的不断增长。因此，我国废旧轮胎产生量以 10%~30% 的速度迅速增长。有关资料显示，2001 年废旧轮胎产生量为 0.8 亿条，2008 年为 2.30 亿条，至 2010 年，年废旧轮胎产生量已增至 2.50 亿条，现已成为世界三大废旧轮胎发生国之一。

1.2.2 国内外对废旧橡胶的处理方法

近年来，世界各国都加强了对废旧橡胶轮胎的监控和管理，积极研究有效的利用途径。废旧橡胶的处理及利用方式从早期的掩埋、焚烧，发展到原型利用、材料再生和热能、裂解等多种用途。由简单的处理上升到环保、利废，变害为利，变废为宝，形成了可再生型的环保产业。

西方发达国家，如美国，在处理和利用废旧轮胎方面有着悠久的历史。早期处理废旧轮胎的方法为填埋法，但是此法不但占用大量的土地，而且对环境造成严重污染，因为废旧轮胎在土壤中百年不烂，逐渐释放出多环芳烃、苯及苯酚等有毒、有害物质，既污染了土壤也污染了地下水。20 世纪 40 年代，废旧轮胎的主要处置方式是翻新利用，如预硫化法翻胎。20 世纪 90 年代，虽然处置方法逐渐增多，但在发达国家处理废旧橡胶轮胎的方法主要依然只有两种，一种是翻新再利用，一种是用于热能发电。如美国的主要利用方式是作为热能、材料利用，也可将其磨成胶粉在橡胶工业、公路铺设、农业上利用等。欧盟将废旧轮胎按照其可利用价值实施了新的科学分类，视轮胎的使用程度，分成部分损坏与终止使用两部分，即旧胎和废胎。旧胎主要用于翻新、再利用和出口。英国的翻新轮胎的使用寿命已达到新胎的 80%，而且其价格及所消耗的材料却为同规格新胎的 15%~30%。

目前，废旧轮胎机械加工利用法是发达国家处理废旧轮胎的主要方法之一。此方法为



图 1-2 橡胶粉

利用机械方法将废旧轮胎切割成 300mm 的胶条，或将其破碎成尺寸小于 10mm 的橡胶粒，或用常温或冷冻法将其研磨成尺寸更小的橡胶粉（图 1-2）加以利用。橡胶粉不但可以用于制造再生胶，而且还可以用于土木工程中。

废旧轮胎可以直接利用。例如可用于码头，作为船舶停靠的减震垫；将废旧轮胎直接布置在高速公路两侧，在撞车等事故发生时可起到减震作用。

废旧轮胎综合利用途径如图 1-3 所示^[1]。

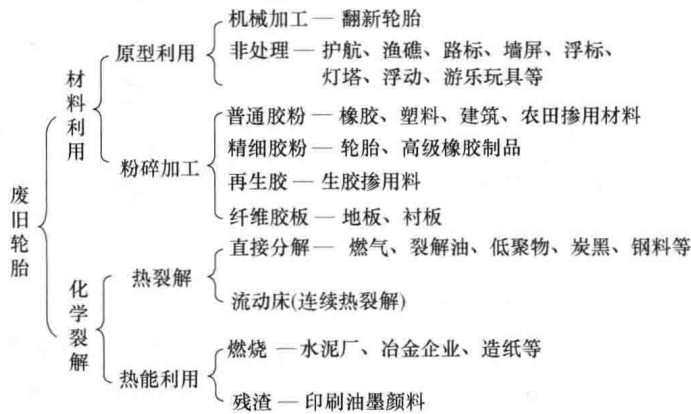


图 1-3 废旧轮胎综合利用途径

我国是橡胶消耗大国，根据国际橡胶研究会（IRSG）统计报道：中国橡胶消耗量 2001 年为 275 万 t，占世界橡胶消耗量的 15.6%，成为仅次于美国的橡胶制品消耗大国。

我国回收与利用废旧轮胎的方式与其他国家大致相同，主要有废旧轮胎原型直接利用、热分解、旧胎翻新、生产再生橡胶以及生产硫化橡胶粉等。其中硫化橡胶粉集环保与资源再生、利用为一体，是一种很有发展前途的回收利用废旧轮胎的方式。例如，胶粉改性沥青，是以废弃轮胎胶粉作为改性剂加入沥青中并辅以其他化学助剂，通过物理和化学反应对沥青进行改性，最终形成性能稳定的新型路面材料。胶粉改性沥青具有延长道路使用寿命、提高稳定性、降低噪声、有效缩短刹车距离、防水雾等优良性能；而且其生产成本低、环保节能，因此已占有市场绝对主导地位。在水泥混凝土中掺入适量的橡胶粉制成橡胶水泥混凝土，极大地改善了混凝土的韧性和抗冲击性能。

橡胶粉工业在我国才刚起步，还没有形成生产规模，但已经列入《中国 21 世纪议程》和我国再生资源回收利用、环保产业发展、能源节约和资源综合利用等规划中。目前我国已将废旧轮胎的研究与循环利用列为重点发展领域，并制定法律法规以及给予各种优惠政策鼓励和支持废旧轮胎的回收与再利用，例如出台了《废旧轮胎回收利用管理条例》等。

到 2009 年为止，我国国内胶粉生产厂家有 200 余家，主要分布在京津塘、长三角、珠三角以及河南、四川等地区。2001~2010 年胶粉和再生胶的需求量如表 1-2 所示^[1]。

我国 2001~2010 年胶粉和再生胶需求量 (万 t)

表 1-2

年度	胶粉			再生胶
	橡胶工业	建材工业	合计	
2001	4	3	7	37
2002	5	4	9	36
2003	6	5	11	35
2004	8	6	14	34
2005	10	8	18	33
2010	15	20	35	30

可以看出, 胶粉需求量逐年上升。生产胶粉成为处理和利用废旧橡胶最为科学、最为合理、应用最广的重要途径。

1.2.3 国内外墙体材料的革新及发展现状

我国开发与利用新型墙体材料起步较晚, 但发展却非常迅速。由于烧结黏土砖等传统砖存在一些不可改变的缺点, 因此在国家可持续发展方针的指导下, 墙体材料必须进行革新, 即用新型的墙体材料来代替落后的砖制品。这样做不但可以极大地保护耕地、节约能源, 而且利于环保, 符合国家的可持续发展战略。从技术角度来说, 新型墙体材料具有传统黏土砖所不具备的优点, 例如: 利用工业废渣、粉煤灰、煤矸石等制成的无熟料水泥煤渣混凝土砌块, 具有质量轻, 强度高的特点, 而且将工业废渣、粉煤灰、煤矸石等工业废料充分利用, 不但改进了砌体结构的施工工艺, 而且还充分利用了工业废料, 减少了环境污染。

原国家建筑材料工业局等有关部门于 1992 年颁布了《加快墙体材料革新和推广节能建筑意见的通知》, 是我国墙体材料的改革正式开始的标志。

20 世纪 60 年代以来, 我国多孔砖、空心砖等作为新型墙体材料, 其生产和应用都有较大的发展。例如: 在南京市建成了采用多孔砖墙承重的 6~8 层的旅馆, 其中 8 层旅馆的下部 4 层墙厚为 290mm, 上部 4 层墙厚为 190mm, 其经济效益非常明显。南京、西安等地研制和生产的拱壳砖, 构造巧妙, 结构合理, 每块空心砖上都带有可以相互搭接的槽和挂钩, 适宜于建造拱和薄壳结构的屋盖, 不需要支撑模板, 施工简便, 节省劳力且施工速度快^[2]。

我国新型墙体材料发展速度非常快。有数据显示, 1987 年, 新型墙体材料产量为 184.5 亿块标准砖, 1997 年为 1849.9 亿块, 产量是 1987 年的 10 倍之多。同时, 新型墙体材料在墙体材料总用量中的比例也由 4.6% 上升到 25.2%。经过多年的研究与努力, 我国新型墙体材料的发展开始走向多品种的道路, 基本形成了以砌块为主体, 板材为辅的新型墙材体系, 但品种种类较工业发达国家还有差距, 需进一步开发具有现代化水平的墙体材料。

早在 20 世纪五六十年代, 建筑砌块等新型墙体材料就在欧美等各国普遍使用, 基本实现了从烧结黏土砖向空心砖以及其他各种质轻、高强的新型墙体材料转变。20 世纪 70 年代, 开始发展复合轻质板, 其种类包括波兰纤维增强水泥板、石棉水泥板、硅钙板与各种保温材料复合而成的复合板, 金属面复合板、钢丝网架聚苯乙烯夹芯板等。日本在 20 世纪 90 年代, 建筑板材的使用就占到了墙体材料总量的 64%。轻质复合墙板是目前世界

各国大力发展的一种墙体形式，它集承重、防火、防潮、隔声、隔热、保温于一体，在世界其他国家很受欢迎。

混凝土砌块是主要的建筑砌块之一（图 1-4），由于其具有取材便利、制作工艺简单、生产效率高、价格低等特点，被世界各国广泛应用。例如：美国和日本是混凝土砌块的生产和使用大国，在美国混凝土砌块年使用量约为 5000 万 m³，约占美国墙体材料总量的 34%。日本的混凝土砌块的使用量与美国差不多，生产量约为本国墙体材料总量的 33%。其次是欧洲各国，混凝土砌块用量占墙体材料总量的 10%~30%。到目前为止，混凝土砌块的发展已经非常全面，其产品标准、规格、建筑法规及施工规范等都已完善。表 1-3 是世界新型墙体材料使用国墙体材料产品结构对比表。

世界新型墙体材料使用国墙体材料产品结构对比表 表 1-3

国别	年份	黏土空心砖(亿块)	灰砂砖(亿块)	混凝土砌块(亿块)	混凝土墙板(亿块)	各种轻型板材(亿块)	天然石材及其他(亿块)
德国	1983	22.3	25.6	39.8	—	12.3	—
日本	1982	3.0	—	33.0	—	64.0	—
美国	1978	15.0	—	34.0	—	41.9	9.1
苏联	1980	37.9	20.3	2.4	29.2	4.2	6.3
波兰	1978	13.3	13.3	26.5	29.4	17.5	—
中国	1990	4483		其他新型墙体材料占总量 5%			

灰砂砖也是主要的建筑砌块之一（图 1-5），其产品种类繁多，从小型到中型，规格多达数十种，被广泛应用于各种建筑中，而且正向空心化和大型化迅速发展。德国是最早应用灰砂砖的国家，目前其产量约 55 亿块，占墙体材料总量的 32%。目前，西方发达国家的新型墙体材料正朝着大型化、轻型化、节能、利废、环保化、复合化以及装饰化方向发展，产品形式及结构已趋于合理。



图 1-4 混凝土砌块



图 1-5 加气混凝土砌块

综合对比分析国内外回收及利用废旧轮胎的发展趋势，其作为一种可资源化的高分子材料，最好的利用方式就是生产各种不同粒径的橡胶粉。主要原因是生产橡胶粉的过程简单、设备少，生产过程中不会产生废水、废气，不会对环境造成二次污染^[1]。

传统的建筑砌块及砖砌体破坏属于脆性破坏，在地震作用时，其耗能相对较少。而橡胶砖砌体由于添加了橡胶粉末，改善了砖的性能，使得橡胶混凝土砖砌体填充墙具有较高的阻尼比，当混凝土框架橡胶混凝土砖填充墙受到冲击荷载作用时，橡胶混凝土砖填充墙能够起到缓冲的作用，消耗部分冲击功，达到耗能的目的。橡胶混凝土砖填充墙在地震中

充分利用了它的优势,抑制了它的缺点。因此,研究混凝土框架橡胶混凝土砖填充墙具有重要的科学和社会意义。

1.2.4 橡胶混凝土的研究现状

为了节约能源、保护耕地及实现生态环境的可持续发展,国内在建筑材料业中积极推广墙体材料改革政策。随着砖砌体改革政策的逐步落实和实施,新型砌体材料得到足够的重视,其在框架填充墙中的应用十分广泛,现阶段针对新型砌体材料的研究主要集中在砌体的抗压、抗渗、吸耗能、隔声和其他的物理力学性能,关于研究新型框架填充墙结构的抗震性能的成果相对很少,这方面少数的研究也主要是关于异型柱框架结构、钢框架结构方面。如黄雅捷^[3]由试验分析异形柱框架填充墙结构和异形柱纯框架结构,对比得出了两者抗震性能的差异性。李国强等^[4]根据加气混凝土砌块填充墙钢框架结构的试验结果分析,给出反应钢框架的填充墙结构抗震性能的弹性层间位移角的取值建议。戴绍斌^[5]通过有限元模拟了加气混凝土钢框架填充墙结构的性能,试验结果证明,新型砌体材料填充墙框架结构的变形能力比普通砖填充墙框架结构有一定提高。

现阶段在框架填充墙结构得到广泛应用的新型墙体材料,一般均具有轻质、保温隔热等特点,可以大大保护耕地、降低建筑保温隔热能耗,此外,轻型墙体材料还可以大大降低墙体对整体结构的重力荷载作用,进而降低整体结构造价。在墙改政策推动下,填充墙砌体材料由以前的实心黏土砖材料正逐步被新型砌体材料如混凝土空心砌块、加气混凝土砌块、蒸压粉煤灰砖等取代,新型砌体材料的优点是保温和轻质,但其力学性能和普通黏土砖还是有一定差异,比如在强度和刚度方面,加气混凝土砌块填充墙要比普通黏土砖填充墙低;在不同受力阶段时的内力分布及损坏过程和黏土砖砌体填充墙相比有较大的差异性。有研究表明,新型墙体材料填充墙结构的开裂位移角比黏土砖填充墙结构的大。现阶段缺少对新型墙体材料填充墙结构系统而全面的研究,目前的填充墙框架抗震设计以 20 世纪 80 年代黏土砖填充墙的研究成果为基础,因此有必要对新型砌体材料填充墙的抗震性能进行进一步研究,为修订规范提供技术资料,促进新型砌体材料在框架结构中的应用。

1995 年,美国北卡罗来纳州立大学土木工程学教授 Shuaib Ahmad 提出了橡胶混凝土概念(rubcrete),各国学者都加大力度研究橡胶集料混凝土。橡胶混凝土(rubber concrete)是将废旧轮胎处理后得到的橡胶微粒作为水泥混凝土的组成材料配制成的一种新型混凝土,而采用橡胶混凝土制成的砖为橡胶混凝土砖。橡胶混凝土砖有较低的弹性模量、良好的延性、较高的阻尼性能,对结构的整体抗震十分有利。橡胶混凝土砖是借鉴橡胶混凝土和粉煤灰砖提出的创新性的概念,目前尚无国内外学者涉及。

橡胶混凝土的研究改善了普通水泥混凝土的脆性问题,近年来受到国内外学者广泛关注。由于橡胶混凝土具有抗裂性能好、韧性高、吸能耗能大及变形能力好,其性能介于沥青混凝土和普通水泥混凝土之间,可应用于桥梁道路路面和飞机跑道等工程中。F. Hernandez—Olivares 曾报道,在西班牙 Salamanca 的居民区用小掺量橡胶混凝土建成的混凝土路面,经过 3 年重载交通的路面仍能保持良好的性能^[6]。在美国建造了橡胶混凝土试验路段,包括停车泊位、网球场、公路路面等。

橡胶混凝土力学性能方面的研究,H. A. toutanji^[7]等分别用橡胶粉部分或全部代替

混凝土中的骨料,研究表明,骨料全部被粒径相当的橡胶粉替代的混凝土的抗压强度减少 76.5%,抗折强度减少 36.9%,采用细橡胶粉替代的比粗骨料替代的混凝土强度降幅小。熊杰^[8]用不同粒径的橡胶粉取代部分粗骨料配制混凝土,发现橡胶粉粒径对混凝土的抗压强度影响很大,但并不是粒径越大强度降低越多。宋少明^[9]等研究发现,当橡胶粉掺量小于水泥质量的 7%时,添加橡胶粉对混凝土的抗压和抗折强度影响不大。

Paine^[10]等研究发现,将橡胶粉加入到混凝土中,能大大提高混凝土耐冻融性能,和加入引气剂的混凝土材料的冻融效果等同。Savas^[11]将 2~6mm 橡胶粉分别替代水泥质量的 10%、15%、20%、30%加到混凝土中,按照 ASTM C666(混凝土抗快速冻融性试验方法)研究其快速冻融性能,结果含橡胶粉 10%、15%的橡胶混凝土有较好的耐冻融性能。研究表明,在混凝土里掺入橡胶粉可改善混凝土的抗冻性能,掺橡胶粉比掺橡胶颗粒对改善混凝土抗冻性能效果更好。其原因是混凝土中的孔隙是影响混凝土抗冻性的根本因素,掺入适量粒径橡胶粉可减少孔隙数量,进而改善混凝土的抗冻性能。

橡胶粉添加到混凝土中,能增大混凝土内部骨料间的摩擦,进而加大能耗,提高橡胶混凝土砖的阻尼比。20 世纪 80 年代,天津大学的朱涵教授对橡胶混凝土进行了原创性的研发,采用 1~2mm 橡胶粒替代粗骨料质量的 12%的混凝土,试验结果显示橡胶混凝土试件的阻尼比比普通混凝土有显著提高。橡胶粉的填充和自身具有弹性,可改善混凝土内部的孔隙结构,有效吸收因振动产生的能量,从而使橡胶混凝土砖具有明显的吸能耗能的作用,阻尼比也有很大的提高,从而达到降噪减振的效果。

由于橡胶粉属憎水性材料,水泥属亲水性材料,两者混合时橡胶粉与水泥浆截面黏结不好,因此对橡胶粉进行改性预处理来改善橡胶粉与水泥浆的界面黏结性能,从而提高橡胶混凝土砖的强度。国内外在橡胶粉改性方面做了大量的研究,Eldin^[12]用水浸泡橡胶粉以去除表面污垢,使橡胶混凝土的强度较不处理前提高了 16%;Rostami^[13]等采用四氯化碳水溶液处理橡胶粉的表面,处理后的橡胶混凝土强度提高了 57%,但此种方法处理要求的条件比较复杂,不适合大范围生产橡胶混凝土。N. Sergre 和 I. loekes^[14]等采用 NaOH 溶液处理橡胶粉的表面,试验结果显示,橡胶混凝土的断裂能和弯曲强度都有提高,抗压强度提高了 33%。国内黄少文^[15]用表面活性剂、树脂对橡胶粉进行处理,活性剂可增强橡胶粉和水泥浆的界面连接,明显降低因掺加橡胶粉而引起的强度降低。于利刚和余其俊^[16]等利用氢氧化钠饱和溶液、聚乙烯醇(PVC)、偶联剂 KH570 和 KH560 等多种改良方法改良橡胶界面,结果表明,使用偶联剂处理能较有效地提高橡胶集料水泥构件的强度,其中当 KH560 添加量为橡胶粉的 0.5%时,具有最佳抗压强度。王亚明和刘岚^[17]等研究了橡胶粉改性前后对砂浆内部结构的影响,改性前后其内部孔隙大小明显不同,主要原因是橡胶粉与水泥浆结合不好,导致内部松散。

橡胶的导热系数约为 $0.1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,普通混凝土的导热系数为 $2.1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,由此可见掺入橡胶粉可降低混凝土砖的导热系数。Paine. K. A^[18]以粒径为 0.5~20mm 的橡胶颗粒代替 5%~100%的粗骨料时,橡胶混凝土导热系数比普通混凝土低,和传统的绝热材料相类似,当替代 100%粗骨料时,橡胶混凝土导热系数低于 $0.3\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,而且其 28d 抗压强度大于 5MPa。由此可见,高掺量橡胶混凝土砖具有较好的隔热保温性能,现行规范对填充墙砌块的强度要求为 5MPa。因而,在冬暖夏热地区的框架结构中,橡胶混凝土砖是作为填充墙砌体的最佳选择,可作为一种新型绿色节能墙体材料。

高强混凝土因其抗压强度高，节约混凝土而被广泛应用，但在温度超过 250℃时，由于混凝土内部水分蒸发形成水蒸气容易发生爆裂，使保护层发生爆裂破坏。在混凝土中掺入橡胶粉后弹性模量和强度虽有所下降，但混凝土的爆裂破坏程度也有所下降。混凝土中掺入了多孔结构的橡胶粉后，橡胶粉可吸附无法外泄的水蒸气，大大减小混凝土受高温时的爆裂破坏。当温度达到一定程度后，橡胶粉受热熔化形成孔道，易于水蒸气的外排，橡胶混凝土可降低混凝土高温爆裂破坏的可能性。橡胶混凝土砖填充墙一般用于民用住宅和学校等，这些房屋一旦发生火灾损失惨重，橡胶混凝土砖有较好的耐火性能，因此采用其砌筑填充墙能降低火灾危害。

1.3 填充墙框架结构的受力分析

填充墙框架结构与框架结构的区别在于前者是墙和框架共同工作，后者则是单独工作。在地震作用时，填充墙提供水平抵抗力，分担部分地震作用，通过在结构薄弱部位布置填充墙消耗地震能，从而提高框架结构整体的抗震能力。研究人员通过试验分析表明，由于框架和填充墙通过接触相互约束、相互作用，无论墙体开洞与否，填充墙框架结构共同承担的水平方向承载力均大于试验时纯框架和纯墙体的水平方向承载力总和，且其初始刚度较纯框架有明显提高。填充墙采用弹性较好的橡胶混凝土砖砌筑填充墙，能大大提高填充墙体吸能耗能的能力。

1.3.1 填充墙框架结构的破坏过程

由大量震后破坏情况和模拟试验研究可知，填充墙与框架受力过程分为四个阶段：①弹性阶段，填充墙与框架均处于弹性工作范围并整体工作，在填充墙和框架接触周边区域形成初始裂缝，如图 1-6 (a) 所示。②框架填充墙结构处于弹性工作阶段时，墙体周边裂缝随着水平力增加而不断加大，填充墙体与框架的两斜对角接触区域碎裂现象开始出现，填充墙体出现了未贯通的斜裂缝，但框架填充墙结构仍处于弹性工作阶段，填充墙起到了抗侧力的作用，墙体为抗侧力构件，由于填充墙和框架接触部分有缝隙存在，所以不能按照墙与框架整体粘结在一起考虑，见图 1-6 (b)。③弹塑性工作阶段，随着水平荷载继续增加，墙面陆续开始出现微裂缝并扩展成贯通的斜裂缝，框架柱出现裂缝并发展，达到了框架填充墙结构的最大承载力工作阶段。此时，框架是主要的承担侧向荷载构件，整个框架填充墙结构处于弹塑性工作阶段。④塑流阶段，结构总承载力达到极限，由大量震后分析和试验

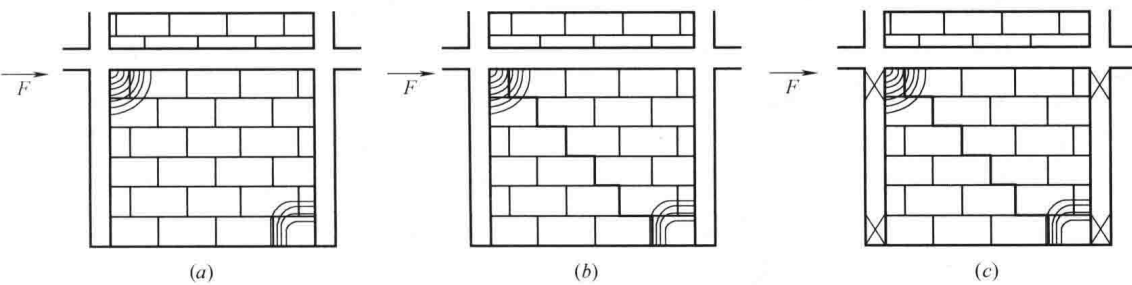


图 1-6 填充墙和框架的协同工作作用

(a) 弹性工作阶段；(b) 弹塑性工作阶段；(c) 塑流工作阶段